

Ökobilanz zur Gewinnung von hochwertigen Zementen aus Stahlwerksschlacken und Rückgewinnung von Sekundärmetallen

Darmstadt,
18.12.2024

Autorinnen und Autoren

Dr. Felix Mayer
Hannah Bachmann

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Eine Studie im Rahmen des Projektes „**SlagCEM – Hochwertige Zemente und Roheisen aus Stahlwerksschlacken**“

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Tabellenverzeichnis | 7 |
| 1. Einleitung | 9 |
| 2. Ziel und Untersuchungsrahmen | 10 |
| 2.1 Ziele und Anwendungen der Studie | 10 |
| 2.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens | 11 |
| 2.2.1 Zu untersuchendes System | 11 |
| 2.2.2 Funktion und funktionelle Einheit | 11 |
| 2.2.3 Festlegung der Systemgrenzen | 12 |
| 2.2.4 Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität | 13 |
| 2.2.5 Technologische Repräsentativität | 13 |
| 2.2.6 Geographische Repräsentativität | 13 |
| 2.2.7 Zeitrepräsentativität | 13 |
| 2.2.8 Umgang mit Allokationen und multifunktionellen Prozessen | 13 |
| 2.2.9 Softwareumgebung | 14 |
| 2.2.10 Wirkungskategorien | 14 |
| 2.2.11 Methoden der Auswertung | 17 |
| 2.2.12 Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen | 18 |
| 2.2.13 Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts | 18 |
| 2.2.14 Konformität und kritische Prüfung | 18 |
| 3. Sachbilanz | 19 |
| 3.1 Modellierung von übergeordneten Prozessen | 19 |
| 3.1.1 Datengrundlage für die Bereitstellung von Strom | 19 |
| 3.1.2 Datengrundlage für die Bereitstellung von Wärme | 20 |
| 3.2 Berechnungsgrundlagen zur Allokation bei Multi-Output Prozessen | 20 |
| 3.2.1 Allokation im System Stahl – Hochofenschlacke – LD-Schlacke | 21 |
| 3.2.2 Allokation im System SlagCEM-Material – Roheisen | 23 |
| 3.3 Modellierung der betrachteten Zementarten | 23 |
| 3.3.1 Referenzzusammensetzung der betrachteten Zementarten | 24 |
| 3.3.2 Prozesskette zur Bereitstellung von SlagCEM-Material | 25 |
| 3.3.3 Prozesskette zur Bereitstellung von Zementklinker | 27 |
| 3.3.4 Prozesskette zur Bereitstellung von weiteren Zementrohstoffen | 29 |
| 3.4 Darstellung der gesamten Prozesskette | 30 |
| 3.5 Einschätzung der Datenqualität | 30 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 4. | Ergebnisse der Wirkungsabschätzung | 32 |
| 4.1 | Ökologische Wirkungen ausgewählter Zementbestandteile | 32 |
| 4.1.1 | Klinkerproduktion | 32 |
| 4.1.2 | Hüttensand | 33 |
| 4.1.3 | SlagCEM-Material | 33 |
| 4.1.4 | Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Klinker, Hüttensand und SlagCEM-Material | 34 |
| 4.2 | Ökologische Wirkungen der betrachteten Zementarten | 35 |
| 4.2.1 | Erderwärmungspotenzial | 35 |
| 4.2.2 | Eutrophierungspotenzial | 37 |
| 4.2.3 | Versauerungspotenzial | 39 |
| 4.2.4 | Kumulierter Energieaufwand | 40 |
| 4.2.5 | Photochemisches Ozonbildungspotenzial | 41 |
| 4.2.6 | Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen | 42 |
| 5. | Auswertung der Ökobilanz | 44 |
| 5.1 | Identifizierung der signifikanten Parameter | 44 |
| 5.2 | Beurteilung | 44 |
| 5.2.1 | Vollständigkeitsprüfung | 45 |
| 5.2.2 | Konsistenzprüfung | 45 |
| 5.2.3 | Sensitivitätsprüfung | 45 |
| 5.3 | Schlussfolgerungen und Empfehlungen | 58 |
| 5.3.1 | Sensitivitätsanalysen | 58 |
| 5.3.2 | Einschränkungen | 59 |
| 5.3.3 | Fazit | 60 |
| 6. | Literaturverzeichnis | 63 |
| 7. | Anhang | I |
| A-1. | Pedigree-Matrix | I |
| A-2. | Sensitivitätsanalysen – weitere Wirkungskategorien | II |
| 8. | Externes kritisches Gutachten | XII |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------|---|----|
| Abbildung 2-1 | Schematische Darstellung der Systemgrenzen | 12 |
| Abbildung 3-1 | Massenbilanz im System Stahl, Hochofenschlacke und LD-Schlacke | 22 |
| Abbildung 3-2 | Prozesskette zur Bereitstellung von SlagCEM-Material | 26 |
| Abbildung 3-3 | Prozesskette zur Bereitstellung von Zementklinker | 27 |
| Abbildung 3-4 | Prozesskette zur Herstellung verschiedener Zementarten | 30 |
| Abbildung 4-1 | Umweltwirkungen der Klinkerproduktion | 32 |
| Abbildung 4-2 | Umweltwirkungen der Produktion von Hüttensand | 33 |
| Abbildung 4-3 | Umweltwirkungen der Produktion von SlagCEM-Material | 34 |
| Abbildung 4-4 | Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Klinker, Hüttensand und SlagCEM-Material | 35 |
| Abbildung 4-5 | Erderwärmungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 36 |
| Abbildung 4-6 | Erderwärmungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 37 |
| Abbildung 4-7 | Eutrophierungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 38 |
| Abbildung 4-8 | Eutrophierungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 38 |
| Abbildung 4-9 | Versauerungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 39 |
| Abbildung 4-10 | Versauerungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 40 |
| Abbildung 4-11 | Kumulierter Energieaufwand CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 40 |
| Abbildung 4-12 | Kumulierter Energieaufwand CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 41 |
| Abbildung 4-13 | Photochemisches Ozonbildungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 42 |
| Abbildung 4-14 | Photochemisches Ozonbildungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 42 |
| Abbildung 4-15 | Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 43 |
| Abbildung 4-16 | Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 43 |
| Abbildung 5-1 | Sensitivität 1: Reduktion ohne Kohlenstoff – Erderwärmungspotenzial. CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 47 |
| Abbildung 5-2 | Sensitivität 1: Reduktion ohne Kohlenstoff - Erderwärmungspotenzial. CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 47 |
| Abbildung 5-3 | Sensitivität 2 a: Physikalische statt ökonomische Allokation - Erderwärmungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 49 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 5-4 | Sensitivität 2 a: Physikalische statt ökonomische Allokation - Erderwärmungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 49 |
| Abbildung 5-5 | Schematische Darstellung der Berechnung des Systems bei einer Vermeidung von Allokationen durch Systemerweiterung (Substitutionsmethode). | 51 |
| Abbildung 5-6 | Sensitivität 2 b: Substitutionsmethode - Erderwärmungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 53 |
| Abbildung 5-7 | Sensitivität 2 b: Substitutionsmethode - Erderwärmungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 54 |
| Abbildung 5-8 | Sensitivität 3: Verringerung der Transportdistanz - Erderwärmungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand. | 56 |
| Abbildung 5-9 | Sensitivität 3: Verringerung der Transportdistanz - Erderwärmungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker. | 57 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 2-1 | Ausschlusskriterien für Wirkungskategorien, die nicht innerhalb dieser Studie berücksichtigt wurden | 17 |
| Tabelle 3-1 | Deutscher Strommix im Jahr 2023 | 19 |
| Tabelle 3-2 | Anteile der Energieträger am Wärmemix | 20 |
| Tabelle 3-3 | Wert der zum Absatz bestimmten Produktion von granulierter Schlacke und ähnlichen Abfällen der Stahlherstellung | 21 |
| Tabelle 3-4 | Wert der zum Absatz bestimmten Produktion von Stabstahl aus niedrig legiertem Stahl, warmgewalzt | 21 |
| Tabelle 3-5 | Angesetzte Substitutionsraten in den Szenarien Sz low und Sz high | 24 |
| Tabelle 3-6 | Zusammensetzung der betrachteten Zementarten | 25 |
| Tabelle 3-7 | Brennstoffmix der deutschen Zementwerke 2022 und deren Heizwert (vdz 2023; 2022b) und Kohlenstoffanteil | 28 |
| Tabelle 3-8 | Bewertung der Datenqualität anhand der Pedigree-Matrix | 31 |
| Tabelle 5-1 | Einsatzmenge der Reduktionsmittel bei der Reduktion von Konverterschlacke pro t aufbereiteter Schlacke | 46 |
| Tabelle 5-2 | Einfluss der Reduktionsmittel auf die verschiedenen Wirkungskategorien. | 48 |
| Tabelle 5-3 | Einfluss der Reduktionsmittel auf die verschiedenen Wirkungskategorien. | 50 |
| Tabelle 5-4 | Einfluss der Allokationsmethode auf die verschiedenen Wirkungskategorien. | 54 |
| Tabelle 5-5 | Einfluss der Transportdistanz auf die verschiedenen Wirkungskategorien. | 58 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------------|--|
| ADP | Verknappung abiotischer Ressourcen (engl. „abiotic depletion potential“) |
| AP | Versauerungspotenzial (engl. „acidification potential“) |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| CO₂-Eq | Kohlenstoffdioxid-Äquivalente |
| EP | Eutrophierungspotenzial (engl. „eutrophication potential“) |
| EPD | Umweltproduktdeklaration (engl. „Environmental Product Declaration“) |
| FE | Funktionelle Einheit |
| GHD | Gewerbe, Handel, Dienstleistung |
| GLO | global (verwendet innerhalb von ecoinvent-Datensätzen) |
| GWP | Erderwärmungspotenzial (engl. „global warming potential“) |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| KEA | Kumulierter Energieaufwand |
| LCA | Ökobilanz (engl. „Life Cycle Assessment“) |
| LD-Schlacke | Stahlwerkschlacke aus dem Konverter der Hochofenroute |
| m-% | Massenprozent |
| Mg | Megagramm (1.000 kg) |
| MVA | Müllverbrennungsanlage |
| NOx | Stickstoffoxide |
| POFP | Bildung von photochemischem Ozon (engl. „photochemical ozone formation potential“) |
| RER | Europäischer Raum (verwendet innerhalb von ecoinvent-Datensätzen) |
| RoW | Rest-of-the-World (Rest der Welt, verwendet innerhalb von ecoinvent-Datensätzen) |
| VOC | Flüchtige organische Verbindungen |

1. Einleitung

Zement setzt sich aus fein gemahlenem Portlandzementklinker und einem Sulfatträger als Erstarungsregler zusammen. Neben Zementklinker können weitere Hauptbestandteile, wie Hüttensand, Flugasche und Kalkstein enthalten sein, die den Anteil an Zementklinker verringern. Je nach Zusammensetzung der Hauptbestandteile wird der Zement in verschiedene Zementarten unterteilt.

Zement wird in der Bauindustrie zu etwa gleichen Teilen im Tief-, Wohnungs- und Nichtwohnbau benötigt. Die Produktionsleistung lag in Deutschland über die letzten Jahre konstant bei über 33 Mio. t (vdz 2023). Diese Produktionsmenge geht mit erheblichen Treibhausgasemissionen einher. Nach vdz (2020) kann der spezifische CO₂-Eq Ausstoß mit 600 kg pro t Zement angesetzt werden. Für die Gesamtmenge an Zement bedeutet das einen Ausstoß von 20 Mio. t CO₂-Eq pro Jahr oder „3 % der gesamten deutschen CO₂-Emissionen“ (vdz 2020). Ursächlich für den hohen CO₂-Eq Ausstoß ist vor allem die Klinkerproduktion. Durch das Brennen des Zementklinkers werden einerseits durch die Brennstoffemissionen und andererseits durch die geogenen CO₂-Emissionen erhebliche Mengen an Treibhausgasen freigesetzt.

Um die spezifischen Emissionen der Zementproduktion zu reduzieren, verfolgt die Zementindustrie als eine Strategie, den Klinkerfaktor¹ zu reduzieren. Dies gelingt u. a. mit sogenannten klinkereffizienten Zementarten, d. h. solchen, die anteilig weniger Zementklinker enthalten. Damit künftig - neben den bestehenden Stoffen zur Substitution von Klinker - genügend Material zur Verfügung steht, müssen neue Stoffe erprobt werden. Dies ist insbesondere vor einer drohenden Verknappungsproblematik hinsichtlich von Hüttensand zu forcieren. Hüttensand ist ein Nebenprodukt der Roheisenherstellung, das durch schnelles Abkühlen von Hochofenschlacke entsteht. Perspektivisch werden die Mengen durch die Umstellung auf wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren deutlich zurückgehen, die Eisen- und Stahlindustrie geht von einem Rückgang von jährlich 5 Mio. t im Jahr 2020 auf 4 Mio. t im Jahr 2030 und 2 Mio. t im Jahr 2050 aus (vdz 2022a).

Als ein Substitut für Klinker bzw. auch Hüttensand kommen Stahlwerksschlacken infrage. Eine dieser Schlacken entsteht bei der Umwandlung von Roheisen zu Rohstahl in einem LD-Konverter und wird daher auch LD-Schlacke² oder Konverterschlacke genannt. Im Rahmen des Projektes „ReMin – Verbundvorhaben: SlagCEM – Hochwertige Zemente und Roheisen aus Stahlwerksschlacken“ wird von den verschiedenen Partnern im Projekt³ erforscht, ob aufbereitete LD-Schlacken (sog. SlagCEM-Material) zur Substitution von Klinker und Hüttensand in verschiedenen Zementarten in der Hinsicht geeignet sind, dass die Materialeigenschaften nicht kompromittiert werden.

Im Rahmen dieser Ökobilanz sollen die Umweltwirkungen des Einsatzes von aufbereiteter LD-Schlacke in Zementen quantifiziert werden. Dafür werden im Rahmen einer vergleichenden Ökobilanz für fünf verschiedene Zementarten jeweils einem Basisszenario ohne Einsatz von aufbereiteter LD-Schlacke zwei Szenarien mit unterschiedlichen Anteilen an LD-Schlacke gegenübergestellt.

¹ Der Klinkerfaktor bezeichnet den Anteil von Zementklinker im fertigen Zement.

² Der Begriff LD-Schlacke leitet sich aus dem Linz-Donawitz-Verfahren ab. In Folge dieses Verfahrens wird sie bei der Rohstahlherstellung erzeugt.

³ i.e. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, ArcelorMittal Eisenhüttenstad GmbH, Technische Universität Berlin, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., FEhS Institut für Baustoff-Forschung e.V., thyssenkrupp Industrial Solutions, LTB Lasertechnik Berlin

2. Ziel und Untersuchungsrahmen

Die erste Phase einer Ökobilanz (LCA) gemäß ISO 14040 umfasst die Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens. In diesem Schritt erfolgt eine Skizzierung der Zielsetzung sowie der Zielgruppe der Ökobilanz. Des Weiteren ist es erforderlich, den Untersuchungsrahmen sowie die Systemgrenze der Studie festzulegen. Abschließend werden die methodischen Entscheidungen zur Durchführung der Ökobilanz dargelegt. Obgleich Ökobilanzen durch die ISO-Normen 14040 und 14044 formalisiert sind, sehen sich Bilanzierer*innen weiterhin mit einer Vielzahl von methodischen Entscheidungen konfrontiert. Diesbezüglich sind beispielsweise die Art der Modellierung, Allokationsfragen, die Modellierung der End-of-Life-Phase, die Festlegung der Systemgrenze sowie der funktionellen Einheit zu nennen. Im Folgenden werden die methodischen Entscheidungen konkretisiert.

2.1 Ziele und Anwendungen der Studie

Ziel der Studie ist es, die Umweltauswirkungen des Einsatzes von sogenanntem „SlagCEM-Material“⁴ in der Zementherstellung objektiv mithilfe der Methodik Ökobilanz zu quantifizieren. Für ausgewählte Zementarten wird untersucht, wie sich verschiedene Umweltauswirkungen entwickeln, wenn SlagCEM-Material in festgelegte Zementmischungen integriert und dabei entweder Zementklinker oder Hüttensand ersetzt wird.

Die Nutzung von SlagCEM-Material wurde bisher im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts SlagCEM nur im Labormaßstab getestet. Um dennoch den industriellen Maßstab abzubilden, wird die Bilanzierung mittels eines Ex-Ante-Ansatzes vorgenommen. Dabei wird ein Best-Case-Szenario berechnet, um zu ermitteln, ob folgende Zielpfade potenziell erreicht werden können:

- Im Falle der Substitution von Zementklinker durch SlagCEM-Material ergeben sich relevante Einsparpotenziale bei den Umweltauswirkungen.
- Im Falle der Substitution von Hüttensand bleiben die Ergebnisse konstant oder es tritt keine relevante Verschlechterung des Systems auf.

Um das methodische Vorgehen und die Zielpfade verständlicher zu machen, werden die Hintergründe kurz erläutert. Das methodische Vorgehen (Ex-Ante-Ansatz in Kombination mit Best-Case-Modellierung) resultiert daraus, dass bisherige Labortests gezeigt haben, dass die Integration von SlagCEM-Material in das Zementssystem zu erheblichen Einbußen in Bezug auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit führt. Bei den gewählten Zementarten sind diese Qualitätsverluste nicht akzeptabel, und eine vergleichende Bilanz ist aufgrund fehlender funktioneller Gleichwertigkeit nicht möglich. Daher wird ein Best-Case-Szenario berechnet, bei dem angenommen wird, dass die genannten Qualitätsverluste nicht auftreten. Sollte bereits in diesem Szenario die Zielpfade nicht erreicht werden, lässt sich aus ökologischer Sicht kaum rechtfertigen, warum SlagCEM-Material in der Zementherstellung eingesetzt werden sollte.

Bei den Zielpfaden wird nach Substitution von Zementklinker und Substitution von Hüttensand unterschieden. Bei der Substitution von Zementklinker soll ein Werkstoff ersetzt werden, der mit einer hohen Umweltast, insbesondere hinsichtlich des Erderwärmungspotenzials, einhergeht. Daher soll der Klinkeranteil im Zement (auch Klinkerfaktor genannt) kontinuierlich verringert werden. Das stellt u. a. auch ein erklärtes Ziel der Zementindustrie dar.

⁴ SlagCEM-Material ist aufbereitete Stahlwerkschlacke aus dem Konverter der Hochofenroute (auch als LD-Schlacke bekannt).

Bei der Substitution von Hüttensand wird eine andere Perspektive eingenommen. Hier liegt der Fokus auf der Ressourcenknappheit. Hüttensand, also aufbereitete Roheisenschlacke, wird bereits in einem solchen Ausmaß in der Zementindustrie verwendet, dass eine Verknappungsproblematik abzusehen ist. Da der Klinkerfaktor in Zukunft weiter reduziert werden soll, impliziert dies eine steigende Nachfrage nach Hüttensand. Kann aufbereitete Stahlwerksschlacke als adäquates Substitut für Hüttensand verwendet werden, lässt sich dadurch die Verknappungsproblematik entschärfen.

Die Nutzbarmachung von SlagCEM-Material stellt ein Querschnittsthema zwischen der Stahlindustrie und der Zementindustrie dar. Perspektivisch sind die Ergebnisse der Studie daher für Akteure beider Industriezweige relevant. Zunächst dienen die Ergebnisse dem Konsortialteam des Projekts SlagCEM als Indikator dafür, ob die bestehende Forschung fortgeführt werden soll.

2.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

Die vorliegende Ökobilanz kann als **Produktökobilanz** klassifiziert werden. Das Zielprodukt ist dabei immer Zement. Im Rahmen einer **komparativen Ökobilanz** werden Zemente mit und ohne SlagCEM-Material innerhalb einer Zementart gegenübergestellt. Die Bilanzierung wird als **attributive Bilanz** durchgeführt und konzentriert sich darauf die (direkten und indirekten) Umweltauswirkungen eines Systems zu erfassen. Im Gegensatz zu einem konsequenziellen Ansatz werden keine Kausalitäten und Marktdynamiken berücksichtigt.

2.2.1 Zu untersuchendes System

Insgesamt werden 15 verschiedene Produktsysteme untersucht, deren Produkt Zement ist. Innerhalb der Produktsysteme wird anteilig Hüttensand, bzw. Klinker durch SlagCEM-Material ersetzt.

Es werden drei Zementarten (CEM II/B-M SV, CEM III/A und CEM V) bilanziert, bei welchen der anteilige Ersatz von Hüttensand zu jeweils 30 % und 100 % betrachtet wird, ebenso wie die herkömmliche Herstellung.

Des Weiteren werden zwei Zementarten (CEM II/A-LL und CEM III/A) untersucht, bei welchen die herkömmliche Herstellung und der absolute Ersatz von Klinker zu jeweils 5 % und 15 % betrachtet wird.

Die Zusammensetzung der Zementarten wird in Tabelle 3-6 (Kapitel 3.3.1) dargestellt.

2.2.2 Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktion der Produktsysteme ist die Bereitstellung von Zement in verschiedenen Anwendungsgebieten, mit den jeweils für die Zementsorte definierten Eigenschaften. Die funktionelle Einheit (FE) ist die Produktion von 1 t Zement. In einem Ex-Ante Ansatz wird hierbei davon ausgegangen, dass innerhalb einer Zementsorte die gleichen Qualitätseigenschaften (insbesondere hinsichtlich mechanischer Eigenschaften Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit sowie Verarbeitbarkeit) erreicht werden, um in entsprechenden Anwendungen eingesetzt werden zu können. Der Referenzfluss ist demnach 1 t Zement mit den definierten Eigenschaften. Es wird angenommen, dass die Zementrezepturen abgesehen von der Substitution gleichbleiben. Der Substitutionsfaktor für den Ersatz von herkömmlich hergestellten Zementarten beträgt daher 1. Das umschließt auch die Annahme, dass sich nachgelagerte Betonrezepturen nicht verändern.

2.2.3 Festlegung der Systemgrenzen

Die Festlegung der Systemgrenzen orientiert sich am cut-off by classification Ansatz. Der Ansatz wurde einerseits gewählt, weil er einfach zu kommunizieren ist (z.B. im Gegensatz zum apos oder PEF-Ansatz⁵) und andererseits der Methodik der Umweltproduktdeklaration (EPD) sehr ähnlich ist⁶. Die Herstellung von Zement berücksichtigt alle Prozesse von der Bereitstellung der Ausgangsmaterialien über die Aufbereitung bis zur Herstellung des Zementes. Hierbei gilt:

- Bei **Primärmaterialien** (z.B. Gips, Kalksteinmehl, Quarz oder Kohle) wird die vollständige Rohstoffgewinnung und -aufbereitung berücksichtigt.
- Bei **Koppelprodukten** (Schlacken der Stahlerzeugung) erfolgt eine Allokation zwischen abgebendem und aufnehmendem System (im Detail in Kapitel 2.2.8 dargestellt).
- **Abfallströme** ohne bzw. mit vernachlässigbarem Marktwert gehen lastenfrei in das System ein. Das bedeutet das „Vorleben“ der Produkte, bevor sie zu Abfall wurden, wird von der Bilanz abgeschnitten (cut-off). Im betrachteten System trifft das ausschließlich auf Flugasche zu.
- Die **Entsorgung**⁷ von **Sekundärabfällen** bei der Produktion und Verarbeitung findet innerhalb des Bilanzraums statt. Nach dem gewählten Ansatz werden keine Gutschriften für Substitutionsprodukte bei der Entsorgung erteilt.

Die Systemgrenze endet mit der Bereitstellung von Zement. In Abbildung 2-1 ist die Bilanzgrenze schematisch dargestellt.

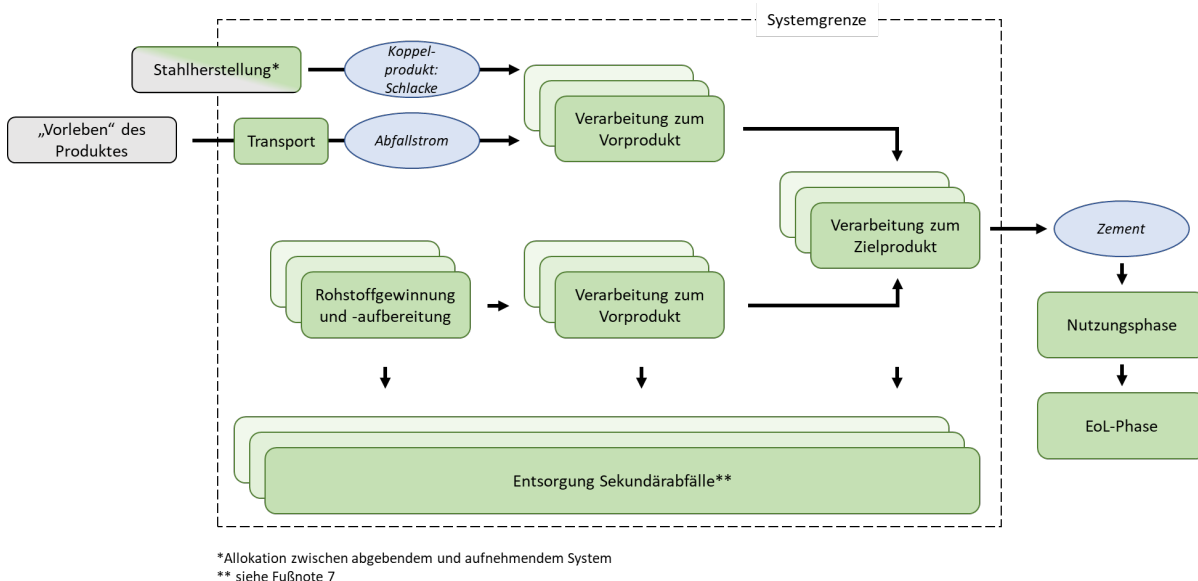


Abbildung 2-1 Schematische Darstellung der Systemgrenzen

⁵ Der apos (allocation at point of substitution) und PEF (product environmental footprint) Ansatz teilen die Lasten zwischen abgebenden und aufnehmendem System nach definierten Regeln, die insbesondere für Laien schwer nachzuvollziehen sind.

⁶ Beim cut-off by classification Ansatz tritt das EoL Material am Punkt der Sammlung und somit ggf. schon vor dem Ende der Abfalleigenschaft in das System ein. Bei einer Umweltproduktdeklaration nach DIN EN 15804 ist immer das Ende der Abfalleigenschaft ausschlaggebend für den cut-off Punkt.

⁷ Beinhaltet (energetische/stoffliche) Verwertung und Beseitigung. Nach dem cut-off by classification Ansatz werden für stofflich verwertete Abfälle nur die Lasten für den Transport zur Recyclinganlage im abgebenden System bilanziert. Bei energetisch verwerteten Abfällen werden die Lasten für die Verbrennung, jedoch keine Gutschriften für erzeugten Strom und Wärme vergeben (Ausnahme: energetisch verwertete Abfälle mit Marktwert, z.B. als Brennstoff im Zementwerk). Die Lasten der Beseitigung (z.B. Deponierung) werden vollständig dem abgebenden System angerechnet.

Die anschließende Nutzungs- und End-of-life-phase wird von der Betrachtung ausgeschlossen, da sie innerhalb einer Zementart als gleich oder sehr ähnlich angenommen wird. Der Festlegung der Systemgrenzen entsprechend, könnte die Bilanz annäherungsweise als „cradle to gate“ (Wiege zum Tor) Bilanz klassifiziert werden. In Anlehnung an eine EPD werden die Schritte A1-A3 abgedeckt.

Eine vermiedene Entsorgung oder alternative Nutzungen der eingesetzten Materialmengen (z. B. Nutzung der LD-Schlacke als Gesteinskörnung) wird nach der hier vorgesehenen Methodik nicht berücksichtigt. Dieser Ansatz fällt eher in eine konsequenzielle Modellierung.

2.2.4 Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

Die Datenerhebung zur Aufbereitung und zum Einsatz von SlagCEM-Material basiert möglichst auf Primärdaten. Das betrifft alle Stoffströme, Energieverbrauchsdaten und Emissionen. Für die Bereitstellung von anderen Zementbestandteilen, wie Klinker, Kalkstein oder Hüttensand wurde auf Datensätze der ecoinvent Datenbank zurückgegriffen. Diese wurden bei Bedarf mit Hinblick auf die geographische und zeitliche Repräsentativität (Kapitel 2.2.6 und 2.2.7) angepasst.

2.2.5 Technologische Repräsentativität

Die Zementherstellung entspricht dem Stand der Technik. Der Einsatz von SlagCEM-Material wird noch nicht im industriellen Maßstab durchgeführt, weshalb hier entsprechend des Ex-Ante Ansatzes abgeschätzt wurde, wie sich dessen Nutzbarmachung nach dem Stand der Technik gestaltet.

2.2.6 Geographische Repräsentativität

Die geographische Systemgrenze der Ökobilanz ist Deutschland, da dies dem Entscheidungskontext entspricht. Das Vordergrundsystem ist so weit wie möglich auf diesen Bezugsraum zugeschnitten. Die Vorketten können einen abweichenden Bezugsraum haben und werden in der Sachbilanz transparent dargestellt.

2.2.7 Zeitrepräsentativität

Die Bilanz ist möglichst nach aktuellem Stand erstellt. Da die Datenaufnahme zum größten Teil im Jahr 2023 erfolgte und auch Datensätze nur für abgeschlossene Jahre vorliegen (z.B. Strommix) wurde für die Bilanz das Referenzjahr 2023 festgelegt. Dabei ist die zuvor diskutierte Betrachtung entsprechend des Ex-Ante Ansatzes zu beachten. Das System wird aufgrund hoher Datenunsicherheiten nicht in die Zukunft projiziert.

2.2.8 Umgang mit Allokationen und multifunktionellen Prozessen

Bei der Aufbereitung von LD-Schlacke wird neben dem Zielprodukt SlagCEM-Material auch das Koppelprodukt Roheisen bereitgestellt⁸. Die Bereitstellung von zurückgewonnenem Roheisen aus der Behandlung von Konverterschlacke wird alloziert. Das heißt die Umweltlasten der Aufbereitung werden sowohl dem Zielprodukt (SlagCEM-Material) als auch dem Koppelprodukt (Roheisen) nach

⁸ Die Stahlwerksschlacke enthält einen gewissen Anteil an Roheisen. Dieses Roheisen wird ungewollt über die Schlacke ausgetragen. Bei der Aufbereitung von Stahlwerksschlacke zu SlagCEM-Material wird Roheisen durch die Kombination von Aufmahlen und Magnetabtrennung wieder aus der Schlacke abgetrennt. Das gewonnene Roheisen kann dem Stahlwerk wieder zugeführt werden und hat einen Marktwert.

definierten Regeln zugewiesen. Weiterhin sind sowohl Hochofenschlacke und LD-Schlacke als Koppelprodukte der Stahlherstellung zu werten. Das heißt die Lasten der Stahlherstellung sind auf die drei Produkte Stahl, Hochofenschlacke und LD-Schlacke zu allozieren.

Die Allokation geschieht im Basisfall nach dem Grundsatz der ökonomischen Allokation. Da Allokationen einerseits Unsicherheiten und andererseits subjektive Entscheidungen mit sich bringen, werden die Allokationen entsprechend ISO 14044 Abs. 4.3.4.2 Sensitivitäten unterzogen. In zwei Sensitivitäten soll (i) die physikalische Allokation, sowie (ii) die Vermeidung einer Allokation entsprechend der Substitutionsmethode untersucht werden. Die Hintergrunddatenbank (siehe 2.2.9) bleibt bei allen Allokationsmethoden gleich.

2.2.9 Softwareumgebung

Der Kern einer Ökobilanz ist die Betrachtung von Prozessen über ihren gesamten Lebensweg. Prozessketten werden entsprechend komplex und umfangreich, wenn alle Lebenszyklen der einzelnen Prozessschritte holistisch erfasst werden. Ökobilanzen werden daher heute in der Regel mithilfe von Ökobilanzierungssoftware in Verbindung mit integrierten Datenbanken berechnet.

Für die Berechnung der vorliegenden Studie wird die Softwarelösung openLCA v. 2.1.1 (GreenDelta 2024a) verwendet. Als Datenbank wird die ecoinvent, v. 3.10, Stand: 2024 nach Wernet et al. (2016) verwendet. Ecoinvent wird in der cut-off Ausführung verwendet, da das Vordergrundsystem, bzw. die Prozesskette auch nach dem cut-off Ansatz betrachtet wird (Kapitel 2.2.3) und es sich um eine attributive Bilanz handelt.

Eine Inkonsistenz ergibt sich bei der in Kapitel 2.2.8 beschriebenen Sensitivität innerhalb derer eine Allokation nach der Substitutionsmethode vermieden wird. Dabei wird aber trotzdem der Datenbanktyp cut-off beibehalten, obwohl die Substitutionsmethode und der cut-off Ansatz formal nicht vereinbar sind. Da es sich an der Stelle aber um eine richtungsweisende Sensitivität handelt, die nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand (Änderung der Hintergrunddatenbank) korrigiert werden kann, wird diese Inkonsistenz in Kauf genommen.

2.2.10 Wirkungskategorien

Emissionen und Ressourcenverbräuche, die über den Lebenszyklus eines Produkts oder einer Dienstleistung freigesetzt bzw. verbraucht werden, führen zu direkten oder indirekten Umweltauswirkungen. Diese werden in der Ökobilanzierung unter dem Begriff "Wirkungskategorien" geführt. Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden zahlreiche Wirkungskategorien entwickelt, um potenzielle Umweltwirkungen möglichst umfassend abzudecken. Beispielsweise enthält die Wirkungsabschätzung nach der ReCiPe-Methode 18 Wirkungskategorien⁹, die nach der Environmental Footprint Methode sogar 25 Kategorien¹⁰.

Die ISO 14044 gibt keine spezifische Empfehlungsliste für Wirkungskategorien vor, weshalb es dem/der Ökobilanzierer*in überlassen bleibt, eine Auswahl hinsichtlich der Wirkungsabschätzungsmethodik und der darin enthaltenen Wirkungskategorien zu treffen. Der Wirkungsabschätzung kann auf zwei Arten nähergetreten werden: Entweder werden innerhalb einer Wirkungsabschätzungsmethode alle Wirkungskategorien ausgewertet und diskutiert, oder es werden im Vorfeld bestimmte Wirkungskategorien begründet ausgeschlossen. Beide Herangehensweisen haben ihre Vor- und Nachteile.

⁹ ReCiPe Midpoint (H) – 2016 Methode

¹⁰ EF 3.1 - 2023

Die vollständige Darstellung aller Wirkungskategorien hat den Vorteil, dass alle bekannten Umweltauswirkungen abgedeckt sind, die die Ökobilanz quantifizieren kann. Wenn sich über alle Wirkungskategorien hinweg eine ähnliche Tendenz zeigt, kann aus ökobilanzieller Sicht eine Präferenz für ein System innerhalb einer vergleichenden Bilanz ausgesprochen werden. Die ökobilanzielle Sicht ist jedoch keineswegs mit der ökologischen Sicht gleichzusetzen, da die Ökobilanz nur einen Teil der ökologischen Aspekte abdecken kann.

Dies führt zu der Frage, warum ein vorheriger Ausschluss von Wirkungskategorien sinnvoll sein kann. Die Ökobilanz kann nur Emissionen und Ressourcenverbräuche in Umweltauswirkungen übersetzen. Dadurch bleiben viele Umweltauswirkungen unberücksichtigt. Zudem erfolgt die Übersetzung auf lineare Weise, was bedeutet, dass weder Schwellenwerte noch sich potenzierende Effekte berücksichtigt werden. In einigen Wirkungskategorien werden zudem statische Reichweiten (z. B. in der Kategorie "kumulierter Ressourcenaufwand") nicht berücksichtigt¹¹. Abschließend lassen Datensätze auch eine Datenasymmetrie erkennen. Datensätze decken Ressourcenverbräuche und Emissionen oft nur unvollständig ab, weil deren Erhebung/Inventarisierung (augenscheinlich) nicht prioritär ist. So werden zum Beispiel Emissionen, die Auswirkungen auf das Erderwärmungspotenzial haben vorrangig abgedeckt, während Emissionen, die beispielsweise ein Toxizitätspotenzial aufweisen, teilweise nicht gemessen oder auch nicht inventarisiert werden. Wegen genannter Gründe sind viele Wirkungskategorien nicht robust genug, um qualifizierte Aussagen zu den Umweltauswirkungen zu treffen. Durch die Auswertung weniger robuster Wirkungskategorien laufen Ökobilanzierer*innen und Leser*innen Gefahr, falsche Schlussfolgerungen zu ziehen.

Daher wird eine Auswahl von Wirkungskategorien getroffen, die verwendet werden sollen. Kriterien bei der Auswahl sind (erwartete) Relevanz mit Hinblick auf das betrachtete Produktsystem sowie Ziel und Fragestellung der Studie. Weiterhin fließt die Robustheit und Aussagekraft der Wirkungskategorien in das Auswahlverfahren hinein. Hinsichtlich der Robustheit orientieren wir uns an den Empfehlungen der Europäische Kommission (2021). Dort ist die Robustheit der Wirkungskategorien in I (sehr robust) – III (wenig robust) unterteilt.

Für diese Studie werden überwiegend Wirkungskategorien aus der CML baseline-IA Methodik (CML 2016) aus dem Methodenpack 2.1.1 in openLCA (GreenDelta 2024b) entnommen. Die CML-Methode ist eine weit verbreitete und anerkannte Methode zur Wirkungsabschätzung. Sie bietet eine standardisierte Vorgehensweise, die von vielen Industrie- und Forschungseinrichtungen akzeptiert wird. Die CML-Methode deckt eine breite Palette von Wirkungskategorien ab, unterteilt gewisse Wirkungskategorien (z. B. Eutrophierung) aber nicht weiter (z. B. terrestrische Eutrophierung, marine Eutrophierung etc.) und bleibt dadurch übersichtlich. Die Wirkungsabschätzung erfolgt auf der Midpoint-Ebene, d. h. in der Mitte der Wirkungskette. Gegenüber der endpoint-Ebene ergibt sich hier der Vorteil einer höheren Transparenz und Datensicherheit.

Folgende Midpoint-Kategorien werden für diese Studie ausgewählt:

Die Berechnung des **Erderwärmungspotenzials** (global warming potential - GWP) weist eine hohe Robustheit auf (Robustheit I) und wird allgemein anerkannt. Das GWP wird in Form von CO₂-Äquivalenten ausgewiesen. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht ein internationales Fachgremium, das die Methode und die entsprechenden Charakterisierungsfaktoren für klimawirksame Substanzen kontinuierlich weiterentwickelt. Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten muss die Verweilzeit der Gase in der Atmosphäre berücksichtigt werden. Gemäß ISO 14067

¹¹ Gewissermaßen sind auch Wirkungskategorien, die eine statische Reichweite aufweisen dahingehend limitiert, dass nur die bekannten Vorkommen berücksichtigt werden und darin auch die Recyclingfähigkeit, bzw. das tatsächlich betriebene Recycling nicht hinreichend abgedeckt wird.

wird der Bezugszeitraum auf 100 Jahre festgelegt. Diese Empfehlung wird auch in dieser Studie angewendet. Die Wirkungsabschätzung zum Erderwärmungspotenzial in der CML Methode ist veraltet, weshalb hier abweichend auf die IPCC 2021 Methode (IPCC 2023) zurückgegriffen wird.

Eine **Versauerung** wird durch saure oder säurebildende Emissionen hervorgerufen. Eine Versauerungswirkung kann bei terrestrischen und aquatischen Systemen auftreten. Die Berechnung des Versauerungspotenzials (acidification potential - AP) erfolgt in der CML-Methode in Form von SO_2 -Äquivalenten. Die Robustheit wird mit II angegeben.

Eutrophierung wird durch eine übermäßige Nährstoffzufuhr und -anreicherung (insbesondere von stickstoff- und phosphorhaltigen Substanzen) hervorgerufen. Eutrophierung kann in Gewässer und Böden unterschiedliche Umweltauswirkungen, wie einem Nährstoffungleichgewicht, einer Verschmutzung oder Verschlechterung der Wasserqualität, Totzonenbildung usw. führen. Das Eutrophierungspotenzial (Eutrophication potential - EP) wird in CML durch die Aggregation von Phosphat (PO_4^{3-})-Äquivalenten ermittelt. Die Robustheit wird mit II angegeben.

Die Kategorie **Bildung von photochemischem Ozon** (photochemical ozone formation potential - POFP) beschreibt einen Prozess, bei dem oberflächennahes Ozon in der Atmosphäre freigesetzt wird. Die Bildung von Ozon geschieht durch eine Kaskade chemischer Reaktionen, die durch Sonnenlicht angetrieben wird. Edukte der Reaktion sind insbesondere die Vorläufersubstanzen Stickstoffoxide (NO_x) und flüchtige organische Verbindungen (VOCs). Bodennahes Ozon ist vor allem vor dem Hintergrund der schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit relevant. Ebenso kann es aber auch das Pflanzenwachstum negativ beeinflussen. Bekannter Effekt der Bildung von oberflächennahem Ozon ist der sogenannte "Sommer-Smog", der vor allem in urbanen Gebieten auftreten kann. Das POF-Potenzial wird in der CML-Methode zu $\text{kg C}_2\text{H}_4$ -Äquivalenten aggregiert. Die Robustheit wird mit II angegeben.

Die **Verknappung abiotischer Ressourcen** (Abiotic depletion potential - ADP) bezieht sich auf die potenzielle Erschöpfung oder begrenzte Verfügbarkeit von Mineralien und Metallen. Die Verknappung der Rohstoffe stellt zunächst keine Umweltauswirkungen dar. Diese können jedoch durch deren Abbau, Verbrauch und Erschöpfung entstehen. Durch die Endlichkeit der Ressourcen jedoch, kann ihre Verknappung zu verstärktem Wettbewerb, höherem Energieverbrauch und damit zu einem erhöhten Risiko der Umweltzerstörung führen. Die Ressourcennutzung wird in der CML-Methode in $\text{kg Antimon-Äquivalenten (Sb-Eq)}$ gemessen. Die Verknappung abiotischer Ressourcen ist mit einer niedrigen Robustheit (Robustheit III) bewertet, erscheint aber im Zusammenhang mit der rohstoffintensiven Zementproduktion von hoher Relevanz für diese Bilanz.

Der **Verbrauch an energetischen Ressourcen** wird über den Kumulierten Energie-Aufwand (KEA) abgebildet. Der KEA aggregiert die Gesamtheit der Energieflüsse, die im Verlauf des gesamten Lebenszyklus eines Produkts, einer Dienstleistung oder eines Systems benötigt werden. Im KEA enthalten ist auch der Energiegehalt des Produktes selbst. Über den KEA können alle nicht erneuerbaren und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte ausgewiesen werden. Genau wie das ADP führt der KEA selbst zu keiner Umweltauswirkung. Jedoch korreliert die Bereitstellung von Energie immer mit einer Vielzahl von Umweltauswirkungen (z. B. Flächenverbrauch durch Energie aus Biomasse, Treibhausgasfreisetzung durch Kohleverbrennung, Ressourcenabbau durch Photovoltaik und Windenergie). Der KEA wird in MJ angegeben. Zur Berechnung wird der untere Heizwert der verschiedenen Energieträger angesetzt. Die Methodik zum KEA ist nicht in CML enthalten und stammt aus der Wirkungskategorie „Cumulative Energy Demand (LHV)“.

Weitere Wirkungskategorien werden entsprechend der Ausschlusskriterien in Tabelle 2-1 nicht betrachtet.

Tabelle 2-1 **Ausschlusskriterien für Wirkungskategorien, die nicht innerhalb dieser Studie berücksichtigt wurden**

| Wirkungskategorie | Ausschlusskriterium | Robustheit ^a |
|---|---|-------------------------|
| Verknappung von fossilen Ressourcen | Der Verbrauch und die Verknappung von fossilen Ressourcen ist eng mit dem GWP verknüpft und es wird erwartet, dass durch die Auswertung der Kategorie keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen werden. | III |
| KEA, fossil | | III |
| Öko- und Humantoxizität | Die Toxizität ist in der jetzigen Methodik eine wenig robuste Wirkungskategorie, da sie einerseits auf lineare Zusammenhänge zwischen Emissionen und Wirkungen setzt und andererseits die Inventarisierung relevanter Emissionen unvollständig ist (Datenasymmetrie). Die Ergebnisse sind nicht ausreichend belastbar und allenfalls indikativer Natur. Fundierte Aussagen auf Basis der schlechten Datenlage bzw. Methodik sind nicht möglich. | III |
| Abbau der stratosphärischen Ozonschicht | Trotz der hohen Robustheit ¹² wird die Kategorie nicht ausgewertet. Im Vordergrundsystem kann keine spezifische Prozesskomponente identifiziert werden, die zur Zersetzung von Ozon führt. Daher wird die entsprechende Wirkungskategorie für diese Studie als nicht relevant betrachtet. | I |
| Ionisierende Strahlung | Ionisierende Strahlung stammt im betrachteten System fast ausschließlich aus dem Bezug von Atomstrom. Die Auswertung dieser Kategorie wäre schlussendlich ein Indikator für den Einsatz von Atomstrom in den betrachteten Bilanzen und wird daher nicht in dieser Studie betrachtet. | II |

^{a)} nach Europäische Kommission (2021)

Eine Normierung mit globalen Jahresemissions- bzw. Verbrauchswerten als optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung wird in dieser Studie nicht durchgeführt. Ebenso werden keine Ordnungs- und Gewichtungsverfahren verwendet.

2.2.11 Methoden der Auswertung

Die Auswertung erfolgt gemäß den in ISO 14040 und ISO 14044 festgelegten Anforderungen. Diese umfassen:

- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungsphasen der Ökobilanz;

¹² Die Einschätzung der Robustheit ist fraglich vor dem Hintergrund, dass in der der EF 3.1 Methode (ebenso wie in der CML-IA baseline und EPD 2018 Methode) die Flüsse Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄) keine Berücksichtigung finden, obwohl sie erwiesenermaßen zum stratosphärischen Ozonabbau beitragen. Werden Lachgas und Methan in der Wirkungskategorie berücksichtigt (wie das z.B. in der ReCiPe Midpoint (H) Methode der Fall ist) sind deren Auswirkungen dominant.

- eine Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt;
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

2.2.12 Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen

Die Bilanz ist im Rahmen eines Forschungsprojektes entstanden und ist somit zunächst für die Forschungsgemeinschaft interessant, die sich mit der Erschließung bzw. Nutzbarmachung von (Sekundär-)Rohstoffen befasst. Thematisch ist die Bilanz im Querschnitt der Stahl- und Zementindustrie zu verorten. Die Bilanz hat Stand heute im engeren Sinn keine Praxisrelevanz, da die Verwendung von SlagCEM-Material in Zement zu erheblichen Qualitätseinbußen führt und eine Nutzbarmachung bisher nicht erfolgreich war. Der vorliegende Bericht kann nur als Voruntersuchung zur Verwendung von SlagCEM-Material in verschiedenen Zementarten dienen.

Die Bilanz ist als Annäherung daran zu sehen, wie sich die Verwendung von SlagCEM-Material ökobilanziell auswirken könnte. Es wird bewusst der Konjunktiv gewählt, da eine Anpassung des Aufbereitungs- bzw. Verarbeitungsprozesses von SlagCEM-Material unbedingt erforderlich ist und weitergehend nicht abgeschätzt werden kann, welche zusätzliche Belastung oder Entlastungen bei der Bereitstellung von SlagCEM-Material zu erwarten sind.

Abschließend soll noch ergänzt werden, dass für die Bau- und Zementindustrie eine Bewertung nach der Umwelt-Produktdeklaration nach EN 15804 maßgeblich ist. Hier wird aber bewusst nach der ISO 14040 bzw. 14044 gearbeitet, da diese Normen breiter gefasst sind und mehr Spielraum bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse zulassen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der Allokationsfragen multifunktionaler Prozesse wichtig.

2.2.13 Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts

Die Art und der Aufbau des Berichts orientieren sich an den vier Phasen einer Ökobilanz (Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Auswertung). Nach Abschluss des Projekts soll dieser Bericht als Ganzes publiziert werden.

2.2.14 Konformität und kritische Prüfung

Die vorliegende Ökobilanz wurde gemäß den Vorgaben der ISO 14040 und ISO 14044 durchgeführt. Da es sich um eine zur Veröffentlichung vorgesehene Ökobilanz handelt, wurde gemäß den Vorgaben der Normen eine kritische Prüfung durch ein Review-Panel durchgeführt. Benedikt Kauertz, Joachim Reinhardt und Christian Dierks verfügen über einschlägige und umfassende Kenntnisse und Erfahrungen zu den Systemen Stahl und Zement und hinsichtlich der methodischen Anforderungen an Ökobilanzen. Die Prüfung wurde gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 studienbegleitend durchgeführt. Das Gutachten mit der Prüfaussage ist dem Bericht als Anlage beigelegt.

3. Sachbilanz

Zunächst wird die Modellierung von übergeordneten Datensätzen beschrieben, die zunächst unspezifisch für das betrachtete System sind. Dazu gehört die Modellierung von Strom und Wärme. Nachfolgend werden die Grundlagen der ökonomischen Allokation im Vordergrundsystem dargestellt. Im Anschluss wird die Modellierung für die betrachteten Systeme dargestellt. Abschließend erfolgt eine Einschätzung der Datenqualität.

3.1 Modellierung von übergeordneten Prozessen

Die Bereitstellung von Energie spielt in Ökobilanzen eine zentrale Rolle, weshalb diese so spezifisch wie möglich modelliert wird. Nachstehend werden die Modellierungsgrundlagen dargestellt.

3.1.1 Datengrundlage für die Bereitstellung von Strom

Die rasche Veränderung des deutschen Strommix durch die Energiewende hat über die letzten Jahre dazu geführt, dass der in ecoinvent hinterlegte Strommix trotz regelmäßiger Updates nicht dem aktuellen Stand entspricht. Aus diesem Grund wird der Prozess des deutschen Strommix inklusive Umspannungsverlusten nachmodelliert. Die Zusammensetzung des modellierten Mix und die eingesetzten Anteile der jeweiligen Anlagentypen sind Tabelle 3-1 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Zusatzaufwände pro bereitgestellter kWh gerechnet werden. Dies gilt auch für die Umspannungsverluste.¹³ Aus diesem Grund wird der Umspannungsaufwand auf alle Stromerzeugungsanlagen mit Hoch- und Niederspannung angewandt.

Tabelle 3-1 **Deutscher Strommix im Jahr 2023 (Fraunhofer ISE 2024) und spezifische CO₂-Emissionen (eigene Berechnung)**

| Energieträger | Anteil am Strommix |
|---------------------------------|---|
| Abfall | 1,8 % |
| Biogas | 5,1 % |
| Biomasse | 2,6 % |
| Braunkohle | 14,6 % |
| Erdgas | 13,6 % |
| Kernenergie | 1,2 % |
| Öl | 1,0 % |
| PV | 10,8 % |
| Steinkohle | 6,6 % |
| Wasser | 3,5 % |
| Wind, offshore | 4,2 % |
| Wind, onshore | 21,0 % |
| Importe ^a | 13,9 % |
| Summe | 100,0 % |
| Spezifische CO ₂ -Eq | 418 g CO ₂ -Eq/kWh _{el} |

¹³ Da in ecoinvent kein Umwandlungsprozess von Nieder- auf Mittelspannung vorhanden ist, wurde für die Solarenergie der gleiche Umwandlungsverlust wie für Hoch- auf Mittelspannung angenommen.

a) In Deutschland belief sich die Stromerzeugung im Jahr 2023 auf 486,7 TWh, davon wurden 57,8 TWh exportiert und 69,1 TWh importiert. Der Stromverbrauch beläuft sich im Jahr 2022 damit auf 498,0 TWh. Die Importe beziehen sich auf den Stromverbrauch.

3.1.2 Datengrundlage für die Bereitstellung von Wärme

Wenn nicht anders angegeben wurden Wärmeverbräuche entsprechend des Wärmemix aus *Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden und Verarbeitendes Gewerbe* modelliert. Die jeweiligen Anteile am Wärmeenergieverbrauch können den AG Energiebilanzen (2023) entnommen werden. Bei der Modellierung wurde berücksichtigt, dass ein Teil der Wärme über Kraft-Wärme-Kopplung und ein Teil über Heizkessel bereitgestellt wurde¹⁴. Weiterhin wurde auch die Bereitstellung durch Fernwärme berücksichtigt. Die Zusammensetzung der Fernwärme wurde über Daten der AG Fernwärme (2023) modelliert. Tabelle 3-2 zeigt die Zusammensetzung des Wärmemix nach Energieträgern und die spezifischen CO₂-Eq Emission pro MJ thermische Energie.

Tabelle 3-2 **Anteile der Energieträger am Wärmemix (Endenergieverbrauch) nach Sektoren (ohne Strom) im Jahr 2022 in Deutschland nach AG Energiebilanzen (2023) und spezifische CO₂-Emissionen (eigene Berechnung)**

| Energieträger | Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden und verarbeitendes Gewerbe ^a |
|---------------------------|--|
| Abfall | 4,7% |
| Abwärme | 0,2% |
| Braunkohle | 5,0% |
| Steinkohle | 18,5% |
| Erdgas und andere Gase | 48,7% |
| Öl | 4,9% |
| Biomasse | 8,3% |
| Fernwärme | 9,6% |
| Summe | 100 % |
| Spez. CO ₂ -Eq | 82,6 g / MJ _{th} |

3.2 Berechnungsgrundlagen zur Allokation bei Multi-Output Prozessen

Als Vorgriff auf die Modellierung der betrachteten Systeme soll die Berechnungsgrundlage für die ökonomische Allokation in den Systemen dargelegt werden, in denen neben dem Zielprodukt ein oder mehrere Koppelprodukte erzeugt werden. Dabei handelt es sich im Vordergrundssystem um die Systeme:

- Stahl, Hochofenschlacke, LD-Schlacke und
- SlagCEM-Material und Roheisen.

¹⁴ Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung wird innerhalb der ecoinvent Datensätze exergetisch alloziert.

3.2.1 Allokation im System Stahl – Hochofenschlacke – LD-Schlacke

Die Stahlbereitstellung stellt einen Multi-Output Prozess dar. Neben dem Zielprodukt Stahl werden außerdem die Koppelprodukte Hochofenschlacke (Vorprodukt von Hüttensand) und LD-Schlacke (Vorprodukt von SlagCEM-Material) bereitgestellt. Hochofenschlacke stellt bereits heute ein Produkt mit nennenswertem Marktwert dar. Bei LD-Schlacke fällt der Marktwert Stand heute deutlich geringer aus. Allerdings wird entsprechend des Ziels und Untersuchungsrahmens ein Ex-Ante Szenario festgelegt. Demnach ist die LD-Schlacke ähnlich nutzbar der Hochofenschlacke und sollte somit einen vergleichbaren ökonomischen Gegenwert aufweisen.

Um eine ökonomische Allokation für Hochofenschlacke, LD-Schlacke und Stahl vorzunehmen, sind einerseits Marktwerte aus einer einheitlichen Datenbasis und andererseits die Massenströme der drei Produkte erforderlich. In Anlehnung an ArcelorMittal (2022) erfolgt die Allokation anhand des Produktes „warmgewalzter Stahl“.

Um die Marktwerte zu ermitteln, wird aus Destatis (2024) das fünfjährige Mittel für die Produktion von *granulierter Schlacke, Zunder u.a. Abfälle der Stahlherstellung* als Proxy für die Hochofenschlacke und LD-Schlacke genutzt. Ebenso wird aus Destatis (2024) das fünfjährige Mittel für niedrig legierten, warmgewalzten Stahl entnommen. Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 zeigen die angesetzten Marktwerte für Stahl und Schlacke.

Tabelle 3-3 Wert der zum Absatz bestimmten Produktion von granulierter Schlacke und ähnlichen Abfällen der Stahlherstellung nach Destatis (2024)

Gran. Schlacke, Zunder u.a. Abfälle der Stahlherst. [Proxy für Hochofenschlacke und LD-Schlacke]

| Jahr | Wert der zum Absatz bestimmten Produktion |
|-----------------------------|---|
| 2019 | 17,2 €/t |
| 2020 | 19,5 €/t |
| 2021 | 21,2 €/t |
| 2022 | 27,9 €/t |
| 2023 | 31,4 €/t |
| Mittelwert (5 Jahre) | 23,4 €/t |

Tabelle 3-4 Wert der zum Absatz bestimmten Produktion von Stabstahl aus niedrig legiertem Stahl, warmgewalzt nach Destatis (2024)

And. Stabstahl aus n. leg. Stahl, warmgewalzt u.Ä.

| Jahr | Wert der zum Absatz bestimmten Produktion |
|-----------------------------|---|
| 2019 | 824,0 €/t |
| 2020 | 776,9 €/t |
| 2021 | 918,3 €/t |
| 2022 | 1312,7 €/t |
| 2023 | 1282,2 €/t |
| Mittelwert (5 Jahre) | 1022,8 €/t |

Um die Stoffströme von Stahl und den Koppelprodukten Hochofenschlacke und LD-Schlacke abzubilden, werden Werte der ecoinvent Datenbank (Wernet et al. 2016) und Daten von Harder (2019) herangezogen. Abbildung 3-1 zeigt, welche Mengen an Hochofenschlacke und LD-Schlacke bezogen auf 1 t warmgewalzten Stahl entstehen.

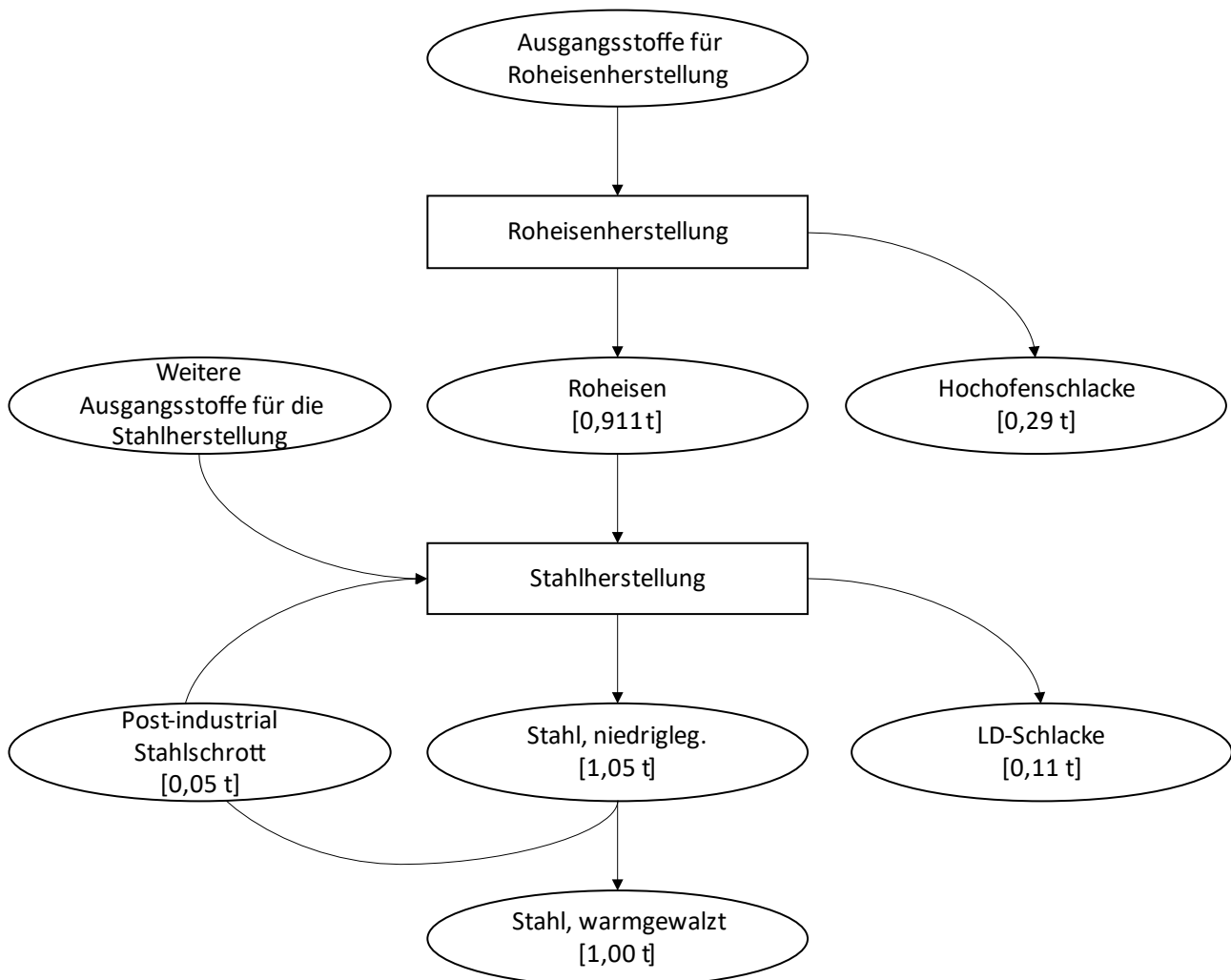


Abbildung 3-1 Massenbilanz im System Stahl, Hochofenschlacke und LD-Schlacke. Eigene Darstellung. Datenbasis: Wernet et al. (2016) und Harder (2019)

Auf Grundlage der Marktwerte und der Stoffstrombilanz kann die ökonomische Allokation durchgeführt werden. Die entsprechende Berechnung ist Gleichung 1 bis Gleichung 3 zu entnehmen. Die Werte beziehen sich jeweils auf 1 t warmgewalzten Stahl. Der referenzierte ecoinvent Prozess für warmgewalzten Stahl ist „steel production, low-alloyed, hot rolled - RER“¹⁵. Dieser Prozess wird so angepasst, dass ausschließlich Primärstahl betrachtet wird.

Nach der beschriebenen Allokation werden die Lasten dieses Prozesses zu 99,1 % der Stahlerzeugung alloziert, zu 0,65 % der Hochofenschlacke und zu 0,25 % der LD-Schlacke.

¹⁵ Im ursprünglichen ecoinvent Prozess wurde noch keine Allokation hinsichtlich Schlacke vorgenommen.

$$\begin{aligned}
 f_{All}[Hochofenschlacke] &= \frac{\left(23,4 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,29 \frac{t_{Schlacke}}{t_{Stahl}}\right)}{\left(23,4 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,29 \frac{t_{Schlacke}}{t_{Stahl}} + 23,4 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,11 \frac{t_{Schlacke}}{t_{Stahl}} + 1022,8 \frac{\text{€}}{t} \cdot 1 \frac{t_{Stahl}}{t_{Stahl}}\right)} \\
 &= 0,0066 t_{Stahl}^{-1}
 \end{aligned}
 \quad \text{Gleichung 1}$$

$$\begin{aligned}
 f_{All}[LD - Schlacke] &= \frac{\left(23,4 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,11 \frac{t_{Schlacke}}{t_{Stahl}}\right)}{\left(23,4 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,29 \frac{t_{Schlacke}}{t_{Stahl}} + 23,4 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,11 \frac{t_{Schlacke}}{t_{Stahl}} + 1022,8 \frac{\text{€}}{t} \cdot 1 \frac{t_{Stahl}}{t_{Stahl}}\right)} \\
 &= 0,0025 t_{Stahl}^{-1}
 \end{aligned}
 \quad \text{Gleichung 2}$$

$$f_{All}[Stahl] = 1 t_{Stahl}^{-1} - 0,0025 t_{Stahl}^{-1} - 0,0065 t_{Stahl}^{-1} = 0,991 t_{Stahl}^{-1} \quad \text{Gleichung 3}$$

3.2.2 Allokation im System SlagCEM-Material – Roheisen

Bei der Aufbereitung des SlagCEM-Materials wird Roheisen gewonnen, welches als Koppelprodukt wieder der Stahlproduktion zugeführt werden kann. Für die ökonomische Allokation werden die in ecoinvent hinterlegten Erlöse von Roheisen und der Zielprodukte (Klinker und Hüttensand) genutzt, dabei werden die Lasten der Prozesse zwischen dem erzeugten Roheisen und SlagCEM-Material alloziert. Diese Werte werden in der Annahme verwendet, dass bei Einsatz von SlagCEM-Material Hüttensand, bzw. Klinker substituiert wird und den gleichen Marktwert annehmen könnte. Da SlagCEM-Material gegenwärtig noch nicht eingesetzt wird, ist hierfür kein Marktwert vorhanden.

Ersetzt SlagCEM-Material Klinker, gilt Gleichung 4, ersetzt SlagCEM-Material Hüttensand, gilt Gleichung 5 zur Allokation. Dabei gilt: m = Masse, MW = Marktwert, S = SlagCEM-Material, K = Klinker, H = Hüttensand und R = Roheisen.

$$f_{All} = \frac{\left(MW_K \frac{\text{€}}{t} \cdot m_{S,gesamt} t\right)}{MW_K \frac{\text{€}}{t} \cdot m_{S,gesamt} t + MW_R \frac{\text{€}}{t} \cdot m_{R,Input \text{ des Prozessschrittes } t}} \quad \text{Gleichung 4}$$

$$f_{All} = \frac{\left(MW_H \frac{\text{€}}{t} \cdot m_{S,gesamt} t\right)}{MW_H \frac{\text{€}}{t} \cdot m_{S,gesamt} t + MW_R \frac{\text{€}}{t} \cdot m_{R,Input \text{ des Prozessschrittes } t}} \quad \text{Gleichung 5}$$

Die Werte und Allokationsfaktoren können an dieser Stelle nicht ausgewiesen werden, da sie lizenzrechtlich geschützt sind.

3.3 Modellierung der betrachteten Zementarten

Nachfolgend wird die Modellierung der betrachteten Zementarten erläutert. Hierzu werden zunächst deren Referenzzusammensetzungen dargestellt, d. h. es wird gezeigt, welche Zementbestandteile

in welcher Menge in den betrachteten Zementarten enthalten sind. In diesem Zusammenhang wird auch erläutert, welche Zementbestandteile in welcher Menge durch SlagCEM-Material ersetzt werden. Anschließend wird für die einzelnen Zementbestandteile beschrieben, wie diese modelliert werden. Darauf aufbauend wird schließlich die gesamte Prozesskette dargestellt.

3.3.1 Referenzzusammensetzung der betrachteten Zementarten

Für den Einsatz von SlagCEM-Material werden fünf Zementarten untersucht. Für die Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material werden (i) CEM II/B-M SV, (ii) CEM III/A und (iii) CEM V ausgewählt. Bei der Substitution von Klinker durch SlagCEM-Material fällt die Wahl auf (i) CEM II/A-LL und (ii) CEM III/A. Die Auswahl der betrachteten Zementarten und deren Zusammensetzung wurde durch die beiden Zementhersteller Spenner GmbH und Co. KG (Substitution Hüttensand) sowie CEMEX Deutschland AG (Substitution Klinker) getroffen.

Im Referenzfall (kurz: Ref 0) wird kein SlagCEM-Material eingesetzt. Bei einer Substitution durch SlagCEM-Material wird zwischen zwei Szenarien (kurz Sz low und Sz high) unterschieden. Die Substitutionsraten sind in nachstehender Tabelle 3-5 zusammengestellt.

Tabelle 3-5 Angesetzte Substitutionsraten in den Szenarien Sz low und Sz high

| Szenario | Substituierter Zementbestandteil | Substitutionsrate |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|
| Sz low | Hüttensand | 30 % des Hüttensands (anteilig) |
| | Portland-Zementklinker | 5 % des Klinkers (absolut) |
| Sz high | Hüttensand | 100 % des Hüttensands (anteilig) |
| | Portland-Zementklinker | 15 % des Klinkers (absolut) |

Aufbauend auf den Referenzzusammensetzungen der Zementarten und den Substitutionsraten können die Zementbestandteile für den Referenzfall und die beiden Szenarien Sz low und Sz high angegeben werden. Diese sind in Tabelle 3-6 zusammengestellt. Die Zementbestandteile, die sich über die Szenarien ändern sind rot hervorgehoben.

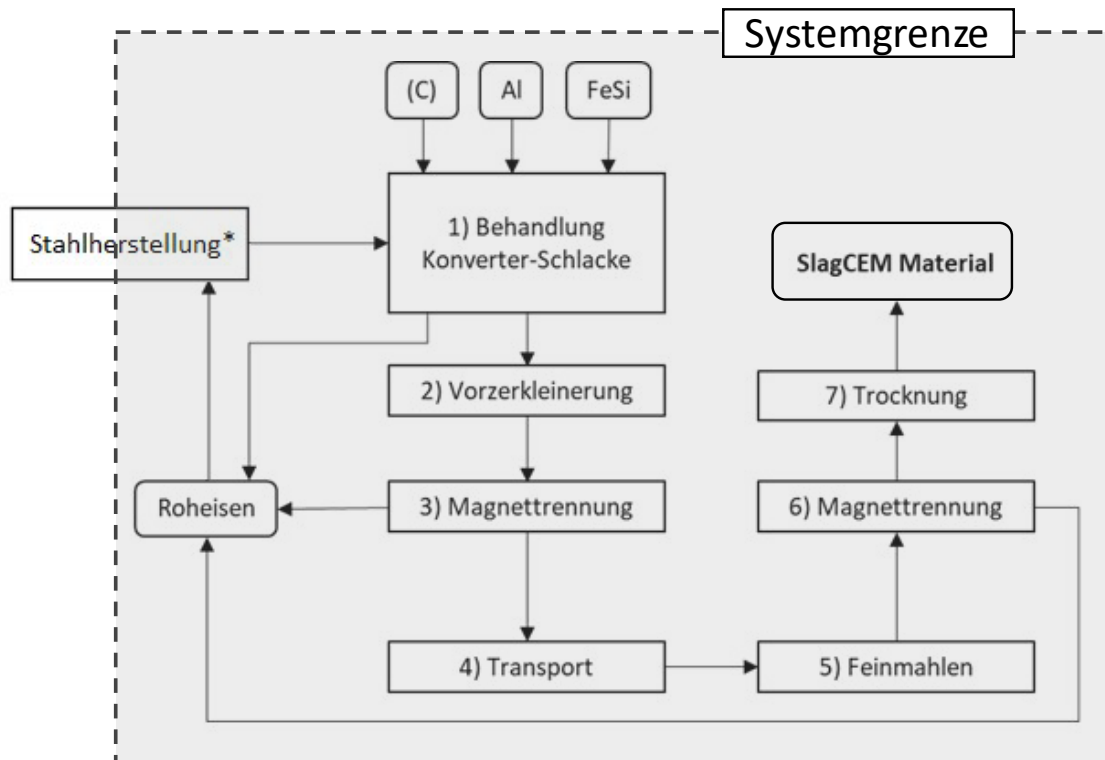
Tabelle 3-6 Zusammensetzung der betrachteten Zementarten für den Referenzfall ohne Substitution (Ref 0), geringen Anteil an Substitution (Sz low) und hohen Anteil an Substitution (Sz high) in m-%

| System | Kurzbeschreibung Zementart | Szenario | Portland-Zement- klinker | Hüttensand | Flugasche, kiesel- säurereich | Kalkstein | Nebenbestand- teile* | SlagCEM-Material |
|-------------------------|----------------------------|----------|-----------------------------|------------|----------------------------------|-----------|-------------------------|------------------|
| Substitution Hüttensand | CEM II/B-M SV | Ref 0 | 70 | 13 | 13 | | 4 | 0 |
| | | Sz low | 70 | 9,1 | 13 | | 4 | 3,9 |
| | | Sz high | 70 | 0 | 13 | | 4 | 13 |
| | CEM III/A | Ref 0 | 41 | 55 | | | 4 | 0 |
| | | Sz low | 41 | 38,5 | | | 4 | 16,5 |
| | | Sz high | 41 | 0 | | | 4 | 55 |
| | CEM V | Ref 0 | 48 | 26 | 22 | | 4 | 0 |
| | | Sz low | 48 | 18,2 | 22 | | 4 | 7,8 |
| | | Sz high | 48 | 0 | 22 | | 4 | 26 |
| Substitution Klinker | CEM II/A-LL | Ref 0 | 80 | | | 20 | | 0 |
| | | Sz low | 75 | | | 20 | | 5 |
| | | Sz high | 65 | | | 20 | | 15 |
| | CEM III/A | Ref 0 | 50 | 50 | | | | 0 |
| | | Sz low | 45 | 50 | | | | 5 |
| | | Sz high | 35 | 50 | | | | 15 |

* = jeweils 50 % Flugasche und Kalksteinmehl

3.3.2 Prozesskette zur Bereitstellung von SlagCEM-Material

Abbildung 3-2 zeigt das Prozessfließbild zur Herstellung des SlagCEM-Materials. Als Ausgangsmaterial dient LD-Schlacke. Der Schlacke werden entsprechend den Berechnungsgrundlagen in Kapitel 3.2.1 anteilig die Lasten aus der Stahlerzeugung alloziert. Die Lasten der Prozesse 1-6 werden entsprechend Kapitel 3.2.2 zwischen SlagCEM-Material und Roheisen aufgeteilt. Die Lasten werden in jedem Prozess abhängig von der zurückgewonnen Menge an Roheisen im Verhältnis zur SlagCEM-Materialmenge berechnet.



*anteilige Allokation der Lasten aus der Stahlerzeugung für die Bereitstellung von LD-Schlacke

Abbildung 3-2 Prozesskette zur Bereitstellung von SlagCEM-Material (eigene Darstellung)

Im ersten Schritt wird die LD-Schlacke durch Zugabe/unter Zuhilfenahme von:

- 13,3 kg Aluminium (ecoinvent Prozess „market for aluminium, primary, ingot – IAI Area, EU27 & EFTA“),
- 9 kg Eisensilikat (ecoinvent Prozess „market for ferrosilicon - GLO“),
- 30,1 kg Kohlenstoff (ecoinvent Prozess „coke production- DE“) und
- 0,8 Nm³ Stickstoff (ecoinvent Prozess „market for nitrogen, liquid - RER“)

reduziert. Für die Reduktion, sowie für das anschließende Brechen und Klassieren wird Strom benötigt. Für das Ausschütten in das Schlackenbeet wird zusätzlich Diesel benötigt. Ein Großteil des Roheisens (~ 90 %) setzt sich direkt nach der Reduktion ab und kann rückgeführt werden.

Anschließend an die Reduktion findet eine Vorzerkleinerung (2,5 kWh/t) statt (Schritt 2). Dies ist die Vorbereitung für die anschließende Magnettrennung (Schritt 3). Dabei wird etwa 5 % des in der Schlacke verbliebenen Roheisens abgetrennt.

In Schritt 4 erfolgt ein Transport vom Hochofen zu einem Zementwerk mithilfe eines LKWs (ecoinvent Prozess „market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 – RER“). Als Distanz wurde die mittlere Distanz zwischen den Hochofen zu Zementwerken in Deutschland angenommen (440 km).

Anschließend wird das Material fein gemahlen (Schritt 5; 77,4 kWh/t) und das restliche Roheisen mithilfe einer zweiten Magnettrennung entfernt (Schritt 6). Da das SlagCEM-Material noch eine Restfeuchte von 10 % aufweist, wird es unter Einsatz von Strom und Wärme im letzten Schritt getrocknet.

Für die Trocknung kann nach Heindl (2016) und Bennamoun et al. (2013) eine Trocknungsenergie-menge in Höhe von 920 kWh thermisch und 60 kWh elektrisch pro Tonne verdampftem Wasser angesetzt werden.

3.3.3 Prozesskette zur Bereitstellung von Zementklinker

Abhängig vom Zementwerk gestaltet sich die Bereitstellung von Zementklinker hinsichtlich der eingesetzten Rohstoffe und Brennstoffe leicht unterschiedlich. Ebenfalls können sich auch die Verfahrenstechnik und die eingesetzten Aggregate am Standort unterscheiden. Für diese Ökobilanz soll ein bundesdeutscher Durchschnittswert über alle Zementwerke modelliert werden. Auch trotz der genannten Unterschiede sind die einzelnen Prozessschritte zur Bereitstellung von Zementklinker immer ähnlich. Abbildung 3-3 zeigt ein Prozessfließbild mit den typischen Schritten vom Ausgangsmaterial des Zementklinkers bis zum fertigen Produkt.

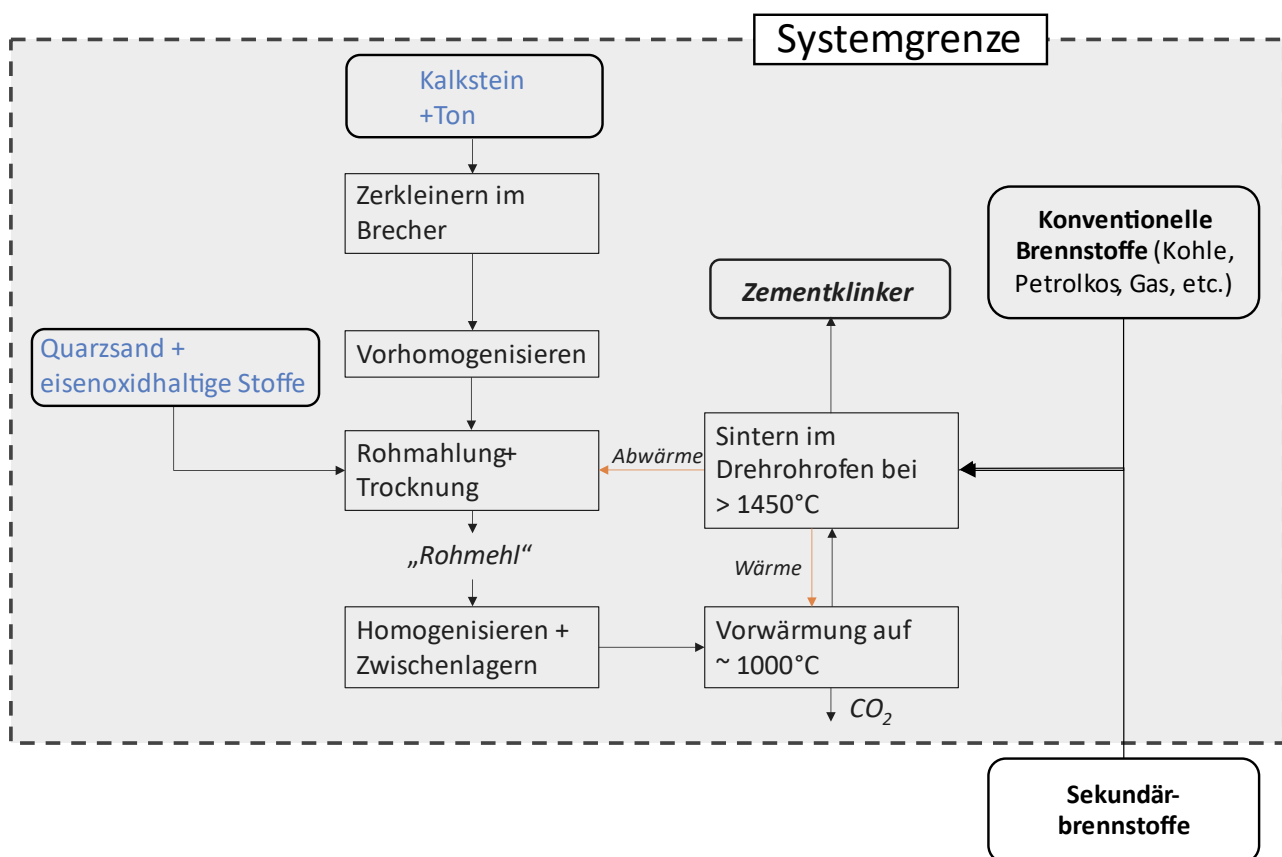


Abbildung 3-3 Prozesskette zur Bereitstellung von Zementklinker (eigene Darstellung, ohne Transporte)

Ausgangsmaterialien des Zementklinkers sind Kalkstein und Ton. Liegen diese als natürliches Gemisch vor spricht man von sog. Mergel. Kalkstein und Ton werden in der Regel vor Ort im Tagebau abgebaut und zunächst vorzerkleinert und homogenisiert. Anschließend werden Quarzsand und eisenoxidhaltige Stoffe als Korrekturmaterien zur besseren Sinterung hinzugegeben. Alle genannten Ausgangsmaterialien werden zu sog. Rohmehl aufgemahlen und mit der Abwärme des Drehrohrofens getrocknet. Es folgt ein Homogenisierungsschritt und das Rohmehl wird ggf. zwischengelagert. Anschließend wird das Rohmehl auf ~ 1000°C vorgewärmt. Dabei wird geogenes CO₂ aus

dem Aufgabengut ausgetrieben¹⁶. Abschließend erfolgt die Sinterung im Drehrohrföfen bei >1450 °C zu Zementklinker.

Für die Inventarisierung des Prozesses zur Klinkerproduktion wurde der ecoinvent Prozess „clinker production | clinker – Europe without Switzerland“ angepasst. Hierbei wurde zunächst der Energieeintrag angepasst. Der Stromverbrauch (ohne Mahlen und Zementversand) wurde nach vdz (2020) auf 82 kWh pro t Zementklinker gesetzt.¹⁷ Die benötigte Wärmeenergie wurde mit 3,14 GJ pro t Zementklinker inventarisiert¹⁸. Die Bereitstellung der Wärme wurde an den Brennstoffmix der deutschen Zementwerke 2022 angepasst (vdz 2023), wonach 28,4 % durch fossilstämmige Brennstoffe und 71,6 % durch Sekundärbrennstoffe bestritten werden. Die Sekundärbrennstoffe sind abfallstmmig und gehen lastenfrei in die Bilanz ein. Der Transport der Sekundärbrennstoffe wird aber dennoch berücksichtigt.¹⁹

Die Zusammensetzung des Brennstoffmix ist in Tabelle 3-7 dargestellt. Auf Grundlage der Brennstoffzusammensetzung und deren Elementarzusammensetzung²⁰ können Heizwert und Rauchgasvolumen berechnet werden. Unter Zuhilfenahme der Umweltdaten nach vdz (2022b) kann die Emissionsstruktur bei der Verbrennung der Energieträger ermittelt werden. Hilfs- und Betriebsstoffe bei der Verbrennung der Energieträger wurden aus Haupt et al. (2018) entnommen. Alternative Brennstoffe gehen lastenfrei in die Bilanz ein, die Rohstoffgewinnung der fossilen Brennstoffe wird berücksichtigt²¹.

Tabelle 3-7 Brennstoffmix der deutschen Zementwerke 2022 und deren Heizwert (vdz 2023; 2022b) und Kohlenstoffanteil (eigene Berechnungen)

| Brennstoff | Anteil (bezogen auf den Energiegehalt) | Heizwert [MJ/kg] | Kohlenstoffanteil [kg / kg Brennstoff] (C-fossil Anteil [kg /kg C]) |
|-------------------------|---|---------------------|---|
| Fossile Brennstoffe | 28,4 % | | |
| Braunkohle | 72,9 % | 22 | 55 % (100 %) |
| Erdgas | 2,5 % | 37 | 67 % (100 %) |
| Heizöl | 3,2 % | 41 | 80 % (100 %) |
| Petrolkoks | 4,9 % | 32 | 92 % (100 %) |
| Steinkohle | 16,9 % | 26 | 67 % (100 %) |
| Alternative Brennstoffe | 71,6% | | |
| Altreifen | 6,1 % | 28 | 66 % (70 %) |
| Altöl | 1,8 % | 25 | 53 % (100 %) |
| Zellstoff/PPK | 0,5 % | 5 | 18 % (<1%) |
| Kunststoff | 30,1 % | 22 | 55 % (100 %) |
| SBS | 31,2 % | 21 | 51 % (44 %) |
| Tiermehl/-fett | 3,3 % | 18 | 39 % (0 %) |

¹⁶ Durch die Gewinnung von Kalziumoxid aus Kalziumkarbonat wird CO₂ freigesetzt: CaCO₃ → CaO + CO₂

¹⁷ Nach vdz (2020) werden 119 kWh/t Zement benötigt. Der Klinkerfaktor wird mit ~0,71 angegeben. Der Stromverbrauch setzt sich folgendermaßen zusammen: 5 % Zementversand, 25 % Aufbereitung Rohmaterial, 46 % Zementmahlung, 24 % Klinkerkühlen/-brennen. Es gilt: (119 kWh/t x (0,25+0,24))/0,71 t/t=82 kWh/t Zementklinker.

¹⁸ Diese Abschätzung ergibt sich auf Basis eines thermischen Energiebedarfs bei der Klinkerherstellung von 3.060 bis 3.220 MJ/t Klinker (vdz 2020).

¹⁹ Nach Bulach et al. (2022) können 127 km angesetzt werden.

²⁰ Wichtiger Parameter ist dabei der Ausstoß an fossilem CO₂, weshalb der Kohlenstoffgehalt und der fossile Kohlenstoffgehalt der Energieträger gesondert in Tabelle 3-7 ausgewiesen ist.

²¹ Folgende Ecoinvent-Prozesse werden verwendet: Braunkohle: pulverised lignite production – DE; Erdgas: market group for natural gas, high pressure - Europe without Switzerland, Heizöl: market for light fuel oil - Europe without Switzerland; Petrolkoks: petroleum coke production, petroleum refinery operation - Europe without Switzerland, Steinkohle: market for hard coal - Europe, without Russia and Türkiye.

| Brennstoff | Anteil (bezogen auf den Energiegehalt) | Heizwert [MJ/kg] | Kohlenstoffanteil [kg / kg Brennstoff] (C-fossil Anteil [kg /kg C]) |
|---------------|---|---------------------|---|
| EBS | 18,7 % | 21 | 38 % (51 %) |
| Lösungsmittel | 4,4 % | 24 | 51 % (100 %) |
| Klärschlamm | 3,1 % | 3 | 12 % (20 %) |
| Altholz | 0,1 % | 14 | 49 % (10 %) |
| Sonstige | 0,8 % | 4 | 9 % (50 %) |

Abhängig davon, ob ein Zementwerk selbst Klinker produziert oder nicht, muss Klinker zum Zementwerk transportiert werden. Im Jahr 2020 gab es in Deutschland 54 Zementwerke, von denen 33 über eine eigene Klinkerproduktion verfügten. Um die Transporte abschätzen zu können wird auf Grundlage der Standorte der Zementwerke die durchschnittliche Distanz zwischen Zementwerken mit und ohne Klinkererzeugung berechnet. Diese beträgt ~400 km. Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass in 33 von 54 Fällen ein Transport für Klinker entfällt, weil Zementwerke selbst Klinker produzieren²². Als Transportmodalität wird im schlechtesten Fall davon ausgegangen, dass dieser per LKW stattfindet, auch wenn Klinker ebenso auch per Zug und Schiff transportiert wird (vergleiche vdz 2024, S. 33).

3.3.4 Prozesskette zur Bereitstellung von weiteren Zementrohstoffen

Zur Herstellung der verschiedenen Zementarten werden weitere Rohstoffe benötigt (siehe auch Kapitel 3.3.1). **Flugasche** geht als Abfallstrom lastenfrei in das System. Allerdings muss nach cut-off by classification auch der Transport zur Verwertungsanlage bilanziert werden. Hierbei werden nach Einschätzungen von Spenner GmbH & Co. KG 300 km angesetzt.

Die Bereitstellung von **Kalksteinmehl** erfolgt über den ecoinvent Prozess „*market for limestone, crushed, for mill - RoW*“.

Ausgangsprodukt von **Hüttensand** ist Hochofenschlacke. Entsprechend den Berechnungsansätzen in Kapitel 3.2.1 wird die Stahlproduktion anteilig der Hochofenschlacke alloziert. Die Aufbereitung von Hochofenschlacke zu Hüttensand wird an den ecoinvent Prozess „*granulated blast furnace slag production - BR*“ angelehnt. Granulierte Hochofenschlacke wird zum Zementwerk transportiert (440 km²³) und getrocknet (10 Masse-% Restfeuchte). Für die Trocknung kann nach Heindl (2016) und Bennamoun et al. (2013) eine Trocknungsenergiemenge in Höhe von 920 kWh thermisch und 60 kWh elektrisch pro Tonne verdampftem Wasser angesetzt werden.

Weiterer Rohstoff der Zementherstellung ist **Gips**. Dieser wird u. a. als Erstarrungsregler benötigt. Für die Bereitstellung wird angenommen, dass Naturgips verwendet wird. Dafür wird der ecoinvent Prozess „*market for gypsum, mineral - RER*“ genutzt.²⁴

²² Dieser Ansatz berücksichtigt keine Produktionsleistungen, die selbstverständlich über alle Zementwerke unterschiedlich ausfallen. Nach Einschätzungen des vdz könnte dieser Wert mit etwa 10% deutlich geringer ausfallen.

²³ Die Distanz ergibt sich in einer Abschätzung aus der Dichte an Zementwerken in Deutschland.

²⁴ Zusätzlich wird auch sogenannter REA-Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kohlekraftwerken verwendet. Dieser wird, auch aufgrund der zukünftig wegfallenden Mengen durch den Kohleausstieg in Deutschland, in dieser Studie vernachlässigt.

3.4 Darstellung der gesamten Prozesskette

Die Prozesskette zur Herstellung der in dieser Bilanz betrachteten Zementarten ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Die einzusetzenden Materialien werden unter Energieverbrauch (57,5 kWh_{el}/t) gemischt. Klinker (inkl. Flugasche und Kalksteinmehl) und Hüttensand, sofern diese eingesetzt werden, müssen zuvor fein gemahlen werden, während das SlagCEM-Material im Herstellungsprozess bereits eine Feinmahlung unterlaufen hat. Für das Mahlen von Hüttensand werden 77,4 kWh/t angesetzt. Für das Mahlen von Klinker mit Flugasche und Kalksteinmehl (sofern eingesetzt) werden je Zementart unterschiedliche Energieverbräuche für das Feinmahlen angesetzt:

- CEM II B-M SV: 53,7 kWh/t,
- CEM II A-LL: 49,3 kWh/t,
- CEM III A (beide Varianten): 50,2 kWh/t,
- CEM V: 44,1 kWh/t.²⁵

Gips²⁶ wird bei jeder Zementart in gleicher Menge zugegeben (4 m-% zusätzlich zur Gesamtmasse), während Flugasche und Kalksteinmehl nur bei einigen Zementarten benötigt werden (siehe Kapitel 3.3.1).

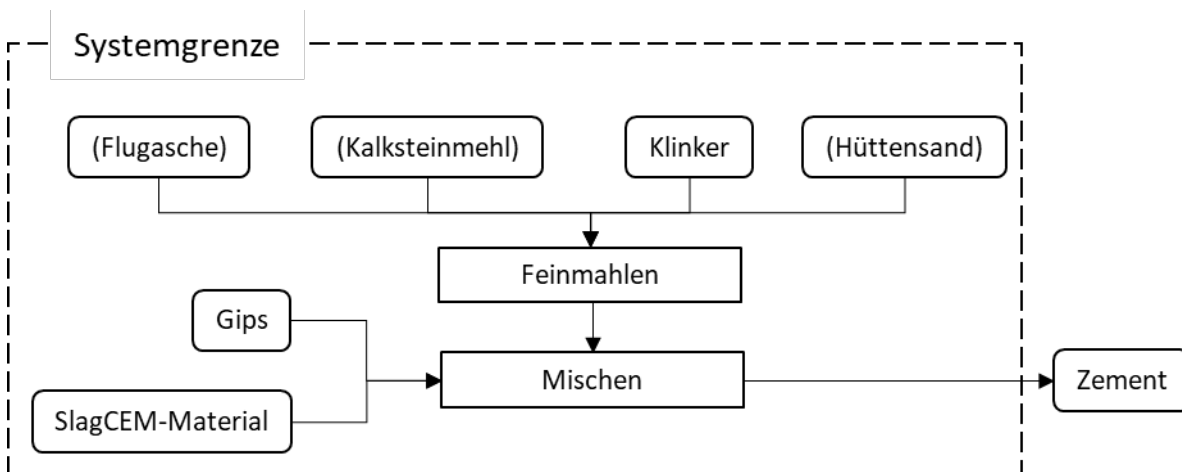


Abbildung 3-4 Prozesskette zur Herstellung verschiedener Zementarten

3.5 Einschätzung der Datenqualität

Zur Einschätzung der Datenqualität soll an dieser Stelle auf die Pedigree-Matrix nach Frischknecht et al. (2004) zurückgegriffen werden. Innerhalb der Matrix wird neben der technologischen, zeitlichen und geographischen Repräsentativität²⁷ auch die Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der Daten bewertet. Die Pedigree-Matrix ist zwischen den Bereichen 1 (sehr gut) und 5 (sehr schlecht) intervallskaliert. Das Bewertungsschema der Pedigree-Matrix ist in Anhang A-1 aufgeführt.

Bei der Bewertung werden lediglich die Datensätze des Vordergrundsystems betrachtet. Hierbei sollen die für die Bilanz drei maßgeblichen Zementbestandteile (SlagCEM-Material, Klinker und Hüttensand) eingeschätzt werden sowie der Verwertungsprozess der Zementbestandteile zu Zement.

²⁵ Die Energieverbräuche für das Mischen und Mahlen der Materialien stammen aus Angaben der Partner des Projektes.

²⁶ Gips wird standardmäßig nicht in der Referenzzusammensetzung aufgeführt.

²⁷ In der DIN EN 15804 (Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen) werden beispielsweise nur diese drei Indikatoren abgefragt.

Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 3-8 zusammengefasst. Da die Bewertung nach der Pedigree-Matrix immer einer starken subjektiven Einschätzung unterliegt, soll aufgezeigt werden, wie die Bewertungen zustande gekommen sind:

- **Bereitstellung von SlagCEM-Material:** Die Menge an Reduktionsmitteln und Betriebsmitteln zur Reduktion von LD-Schlacke wurde über ein internes Berechnungstool von ArcelorMittal errechnet (nähere Informationen sind dem Hauptband zu entnehmen). Die Werte für das Feinmahlen des Materials stammen aus gemessenen Daten im Industriemaßstab. Die Repräsentativität der SlagCEM-Material-Bereitstellung unbekannt. Die Daten wurden innerhalb der letzten 3 Jahre erhoben und stammen aus dem unter 2.2.6 definierten Untersuchungsgebiet. Die technologische Repräsentativität ist für den Industriemaßstab nicht gegeben, da der Prozess aus Untersuchungen im Labormaßstab abgeleitet wurde.
- **Bereitstellung von Zementklinker:** Die Bereitstellung von Zementklinker basiert größtenteils auf geprüften Daten, die über den vdz²⁸ bereitgestellt wurden und es wurden nur teilweise Annahmen getroffen (z.B. exakte Zusammensetzung des Brennstoffmix, Transport von Zementklinker zu Zementwerken). Die Daten decken den bundesdeutschen Durchschnitt repräsentativ ab und sind aktuell.
- **Bereitstellung von Hüttensand:** Bestimmte Prozessschritte innerhalb der Prozesskette basieren auf nicht verifizierten Daten bzw. Annahmen. Der ecoinvent Prozess „granulated blast furnace slag production - BR“ deckt nicht den deutschen Bezugsraum ab, sondern den brasilianischen. Der Prozess wurde nur hinsichtlich der Provider aber nicht hinsichtlich der Mengen angepasst (z. B. wurde die Mengen an Strom für den Prozess beibehalten, aber der Provider an den deutschen Strommix angepasst). Der ecoinvent Prozess deckt auch nur einen Standort ab und wurde 2017 erstellt. Der Transport zwischen Stahl- und Zementwerk spiegelt jedoch die deutschen Gegebenheiten wider.
- **Verarbeitung der Zementbestandteile zu Zement:** Der Prozess basiert auf geprüften/gemessenen Daten von wenigen Standorten im Industriemaßstab. Die Daten sind aktuell, passen zum geographischen Bezugsraum und sind technologisch repräsentativ.

Tabelle 3-8 Bewertung der Datenqualität anhand der Pedigree-Matrix

| | Zuverlässigkeit | Vollständigkeit | Zeitliche Repräsentativität | Geographische Repräsentativität | Technologische Repräsentativität |
|---|-----------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Bereitstellung von SlagCEM-Material | 1 | 5 | 1 | 1 | 5 |
| Bereitstellung von Zementklinker | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Bereitstellung von Hüttensand | 3 | 1 (Transport) 4 (Herstellung) | 3 | 1 (Transport) 4 (Herstellung) | 2-3 |
| Verarbeitung der Zementbestandteile zu Zement | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |

²⁸ insbesondere vdz (2023) vdz (2022b).

4. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung. Zunächst werden die Bilanzen für die Ausgangsmaterialien Klinker, SlagCEM-Material und Hüttensand dargestellt, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Bilanzen haben. Anschließend werden die Ergebnisse der verschiedenen Zementarten je Wirkungskategorie beschrieben.

4.1 Ökologische Wirkungen ausgewählter Zementbestandteile

Nachfolgend werden die ökologischen Wirkungen relevanter Zementbestandteile dargestellt. Dies umfasst die Klinkerproduktion, die Bereitstellung von Hüttensand und SlagCEM-Material. Da Klinker bzw. Hüttensand durch SlagCEM-Material substituiert werden, erklärt die Gegenüberstellung der drei Materialien bereits, wie sich die Ergebnisse durch Substitution ändern.

4.1.1 Klinkerproduktion

Abbildung 4-1 zeigt die Umweltwirkungen der Klinkerproduktion. Die Summe der Lasten innerhalb einer Wirkungskategorie sind auf 100 % normiert. In der Datentabelle unter der Grafik sind die absoluten Werte angegeben. Die Lasten sind unterteilt in die Bereitstellung der benötigten Rohstoffe (Ton, Kalkstein, Mergel) sowie Energie (Strom und Wärme). Da bei der Klinkerproduktion auch größere Mengen an geogenem CO₂ freigesetzt werden (vergleiche Kapitel 3.3.3) ist dies in der Kategorie GWP ebenfalls separat ausgewiesen. In der Kategorie ADP ist darauf zu verweisen, dass der große Anteil an „Sonstige“ v.a. auf den Bau des Zementwerks (Kapitalgut) zurückgeht.

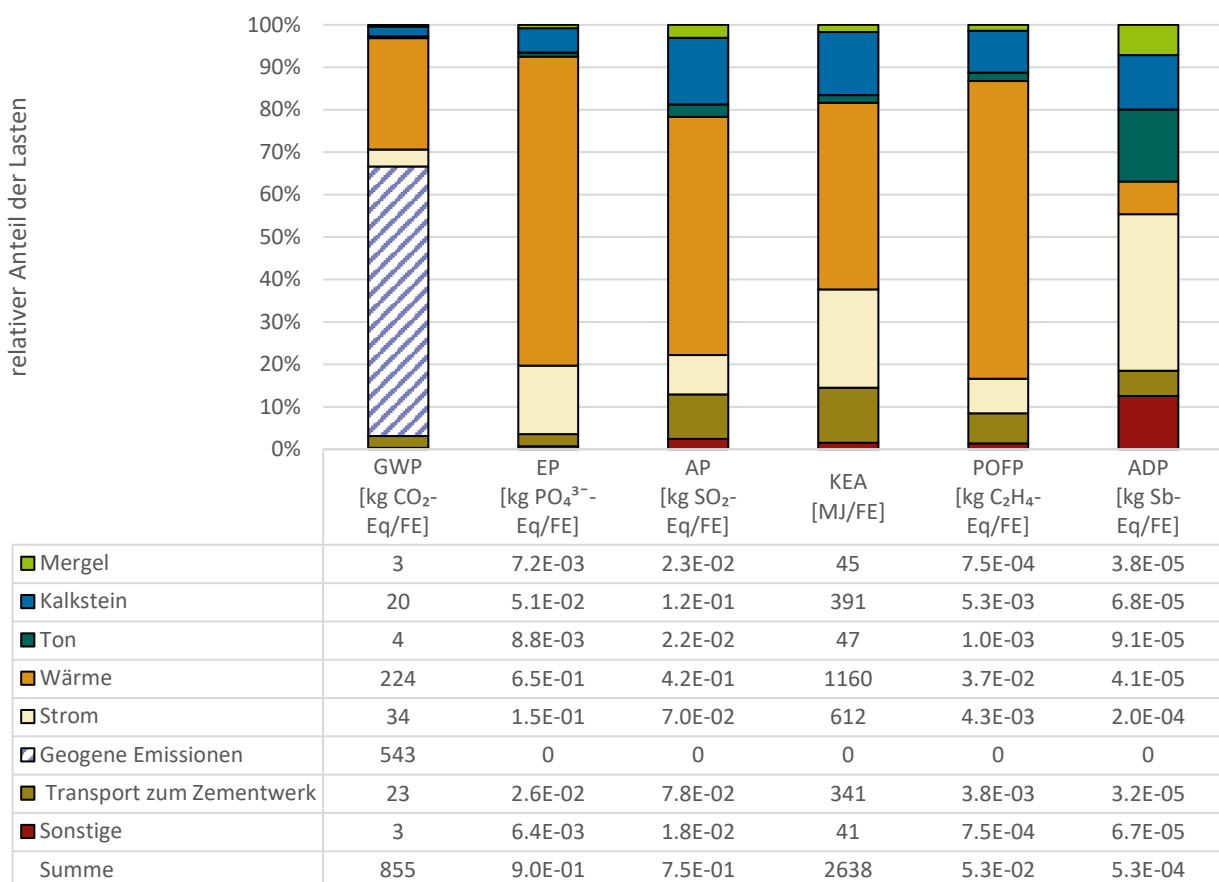


Abbildung 4-1 Umweltwirkungen der Klinkerproduktion

Das GWP der Klinkerproduktion wird mit ~65 % (543 kg CO₂-Eq/t Klinker) maßgeblich durch das Austreiben des geogenen CO₂ aus dem Aufgabengut beeinflusst. Die benötigte Wärmeenergie spielt mit ~25 % ebenfalls eine große Rolle. Das AP (55 %), EP (73 %), KEA (44 %) und POFP (70 %) hingegen werden von der benötigten Wärmeenergie dominiert. Das ADP wird durch den benötigten Strom (37 %), sowie den Einsatz von Ton und Kalkstein (in Summe 30 %) bestimmt.

4.1.2 Hüttensand

Wie Abbildung 4-2 zeigt, wird die Bereitstellung von Hüttensand über alle Wirkungskategorien durch den Transport des Materials zum Zementwerk (~30-60 % der Gesamtlasten) und die allozierten Lasten aus der Stahlherstellung (~30-50 % der Gesamtlasten) dominiert. Die Wärme zur Trocknung hat mit rund 15 % der Gesamtlasten ebenfalls einen bestimmenden Einfluss auf das Ergebnis (Ausnahme bildet die Kategorie ADP). Unter „Sonstige“ sind der Strom- und Wasserverbrauch der Granulation zusammengefasst (die sonstigen Lasten der Granulation, d.h., durch die Bereitstellung des Rohmaterials, fallen unter die allozierten Lasten aus der Stahlherstellung).

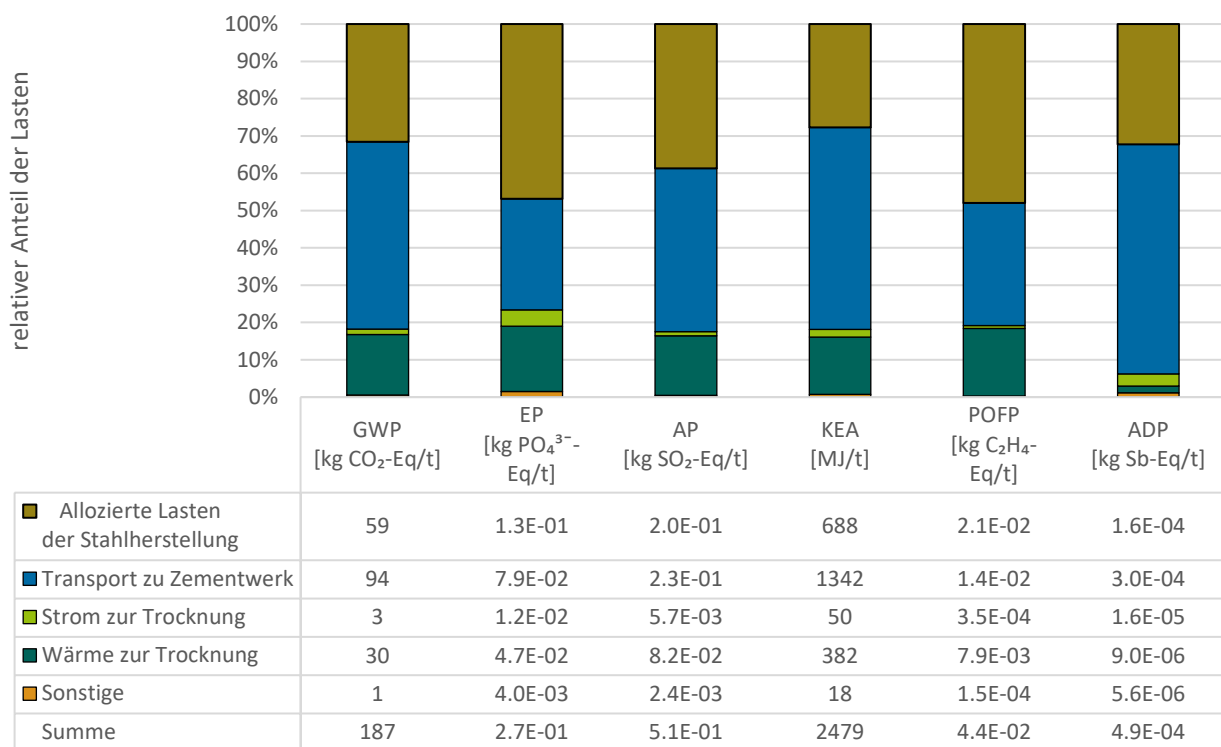


Abbildung 4-2 Umweltwirkungen der Produktion von Hüttensand

4.1.3 SlagCEM-Material

In Abbildung 4-3 sind analog zu Abbildung 4-1 die Umweltwirkungen der Produktion von SlagCEM-Material dargestellt. Bei allen betrachteten Wirkungskategorien dominiert die Behandlung der LD-Schlacke (Schritt 1: ~40-60% der Lasten). Die Behandlung der LD-Schlacke hat somit bei allen Wirkungskategorien den größten Anteil an den Lasten. Dies ist insbesondere auf den Einsatz von Aluminium bei der Reduktion zurückzuführen. Bei ADP führt allerdings auch der Einsatz von Eisensilikat zu hohen Lasten.

Weiterhin sind der Transport vom Stahlwerk zum Zementwerk (Schritt 4: ~10-25 % der Lasten) und das Feinmahlen (Schritt 5: ~5-15 %) Treiber der Umweltwirkungen bei der Produktion von SlagCEM-Material. Schließlich sind auch die allozierten Lasten der Stahlherstellung, trotz sehr geringem Allokationsfaktor (siehe 3.2.1) mit ~15-25 % der Gesamtlasten nicht unerheblich. Die Trocknung (Schritt 7) hat einen Einfluss von bis zu 8 % an den Umweltwirkungen, während die Vorzerkleinerung und Magnettrennungen (Schritte 2, 3 und 6) eine untergeordnete Rolle bei allen Wirkungskategorien spielen.

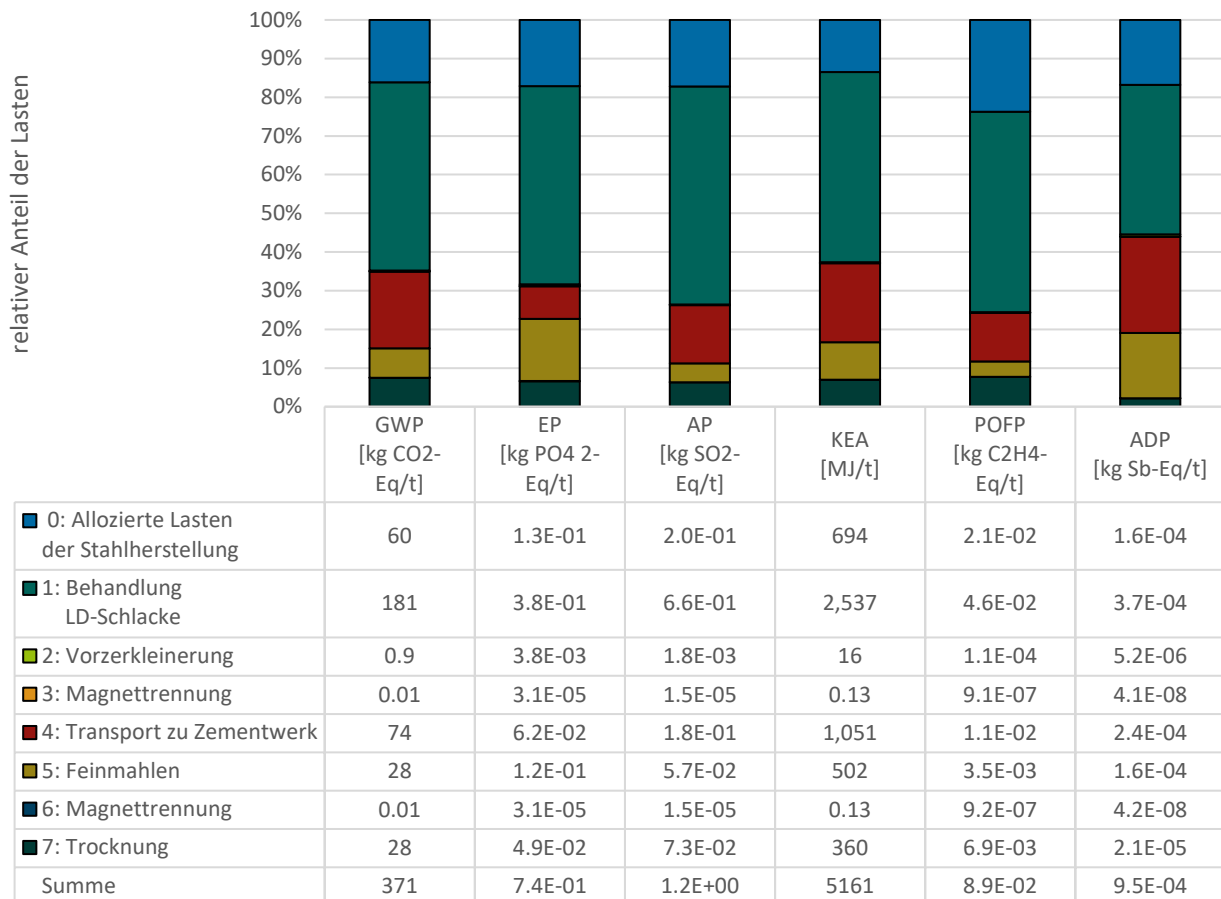


Abbildung 4-3 Umweltwirkungen der Produktion von SlagCEM-Material

4.1.4 Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Klinker, Hüttensand und SlagCEM-Material

Abschließend sollen die Umweltwirkungen von Klinker, Hüttensand und SlagCEM-Material gegenübergestellt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 4-4 gezeigt. In den Kategorien GWP und EP zeigt Klinker die höchsten Lasten, in den verbleibenden Kategorien zeigt SlagCEM-Material etwa doppelt so hohe Lasten wie Klinker und Hüttensand. Hüttensand zeigt mit Ausnahme der Kategorie KEA die niedrigsten Lasten über alle Wirkungskategorien. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material immer zu höheren Lasten führen wird. Bei der Substitution von Klinker durch SlagCEM-Material steigen die Lasten in den Kategorien AP, KEA, POFP und ADP.

SlagCEM-Material schneidet gegenüber Hüttensand über die Wirkungskategorien schlechter ab, da die Lasten der Reduktion von LD-Schlacke mithilfe der angegebenen Betriebsmittel deutlich höher ausfallen als bei der Reduktion von Hochofenschlacke. Abgesehen davon sind die Lasten aus den

unterschiedlichen Prozessen (Allozierte Lasten der Stahlherstellung, Trocknung, Transporte) gleich oder ähnlich.

Das System Zementklinker wird stark durch den Energieeintrag von Strom und Wärme beeinflusst. Dies hat in den Kategorien AP, KEA, POFP und ADP einen Einfluss von ~50-80 % am Gesamtergebnis. Die Lasten des Energieeintrages unterschreiten in den genannten Kategorien aber die Lasten der Reduktion im System SlagCEM. Dies wird als ursächlich für die höheren Umweltauswirkungen von SlagCEM-Material gegenüber Zementklinker gesehen.

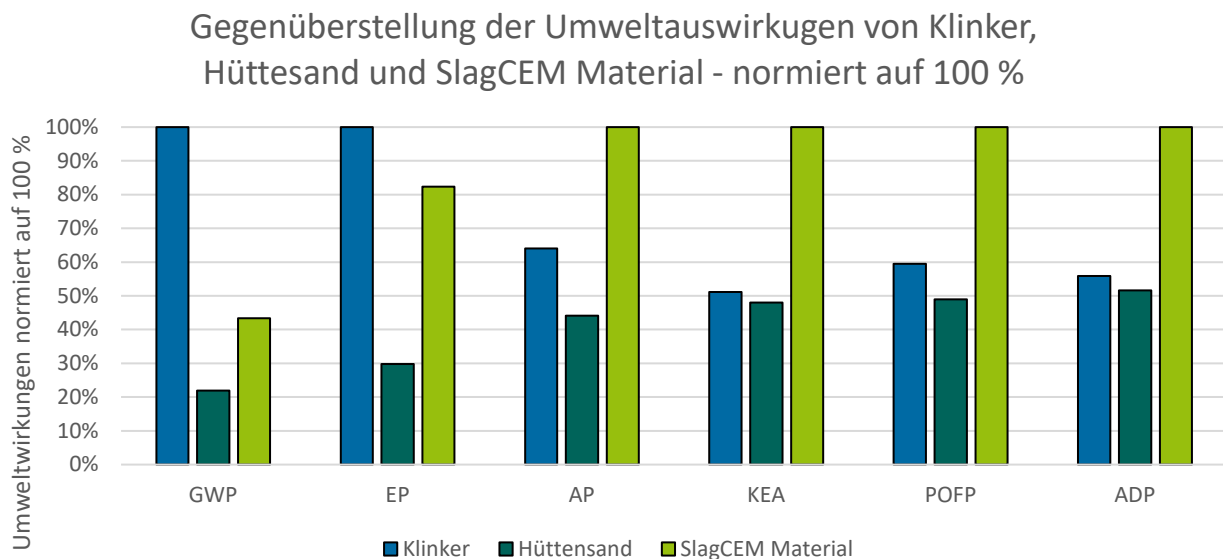


Abbildung 4-4 Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Klinker, Hüttensand und SlagCEM-Material

4.2 Ökologische Wirkungen der betrachteten Zementarten

Nachfolgend werden die ökologischen Wirkungen der betrachteten Zementarten dargestellt und wie sich diese ändern, wenn Hüttensand bzw. Klinker durch SlagCEM-Material ersetzt wird.

4.2.1 Erderwärmungspotenzial

Substitution Hüttensand

Abbildung 4-5 zeigt das Erderwärmungspotenzial (GWP) für Zementarten, bei welchen Hüttensand substituiert wird (CEM II/B-M SV, CEM III/A und CEM V). Die Ergebnisse beziehen sich auf die Bereitstellung von 1 t Zement (funktionelle Einheit) und werden in kg CO₂-Eq angegeben. Die Ergebnisse sind nach den Inputmaterialien SlagCEM-Material, Klinker, Hüttensand, Gips und Kalksteinmehl sowie dem Energieverbrauch für das Mahlen von Klinker und Hüttensand und dem Mischen aller Materialien getrennt dargestellt.

Für die Zementart **CEM II/B-M SV** weist das Referenzszenario ohne SlagCEM-Material das geringste GWP auf (660 kg CO₂-Eq/FE). Werden 30 % des Hüttensandes durch SlagCEM-Material ersetzt (Sz low), erhöht sich das GWP um 6 kg CO₂-Eq pro FE auf 666 kg CO₂-Eq/FE. Werden 100 % des Hüttensandes durch SlagCEM-Material substituiert (Sz high), steigt das GWP nochmal um 13 kg CO₂-Eq an (auf 679 kg CO₂-Eq). Da Hüttensand substituiert wird, bleibt der Anteil an

Klinker über alle drei Szenarien gleich. Dieser trägt mit knapp 583 kg CO₂-Eq zu rund 90 % des GWP bei. Das SlagCEM-Material, Hüttensand sowie die für das Mahlen und Mischen genutzte Energie haben in Summe einen Beitrag von rund 10 % am GWP. Die Bereitstellung von Flugasche, Kalksteinmehl und Gips trägt in Summe nur zu ~1 % des GWP bei.

Für die Produktion von CEM III/A und CEM V zeigen sich ähnliche Ergebnisse zu CEM II/B-M SV. **CEM III/A** weist im Referenzszenario ein GWP von 501 kg CO₂-Eq/FE auf, das um 24 kg CO₂-Eq/FE (Sz low) bzw. 80 kg CO₂-Eq/FE (Sz high) steigt. Der Klinker hat mit 351 kg CO₂-Eq/FE den größten Anteil am GWP (Ref 0: 70 %, Sz low: 67 %, Sz high: 60 %). Hüttensand hat in Ref 0 einen Anteil von 20 % und in Sz low von 13 % am GWP. Das SlagCEM-Material trägt zu 11 % (Sz low) und 34 % (Sz high) zum GWP bei. Die Prozesse Mischen und Mahlen haben einen Anteil von 6-11 % am GWP. Die Bereitstellung von Flugasche Kalkstein und Gips ist mit einem Anteil mit ~0,3 % am GWP vernachlässigbar.

Für **CEM V** ergibt sich im Referenzszenario das geringste GWP (461 kg CO₂-Eq/FE). Das GWP erhöht sich um 11 kg CO₂-Eq/FE in Sz low bzw. 37 kg CO₂-Eq/FE in Sz high. Die Bereitstellung von Klinker trägt mit 407 kg CO₂-Eq/FE zu rund 80% am meisten zum GWP bei. Der Hüttensand trägt zu 9 % (Ref 0) und 6 % (Sz low) bei, Mischen und Mahlen haben einen Anteil von 7-9 %. Die Bereitstellung von Flugasche, Kalkstein und Gips hat auf das Gesamtergebnis kaum einen Einfluss (maximal 2,3 % der Lasten).

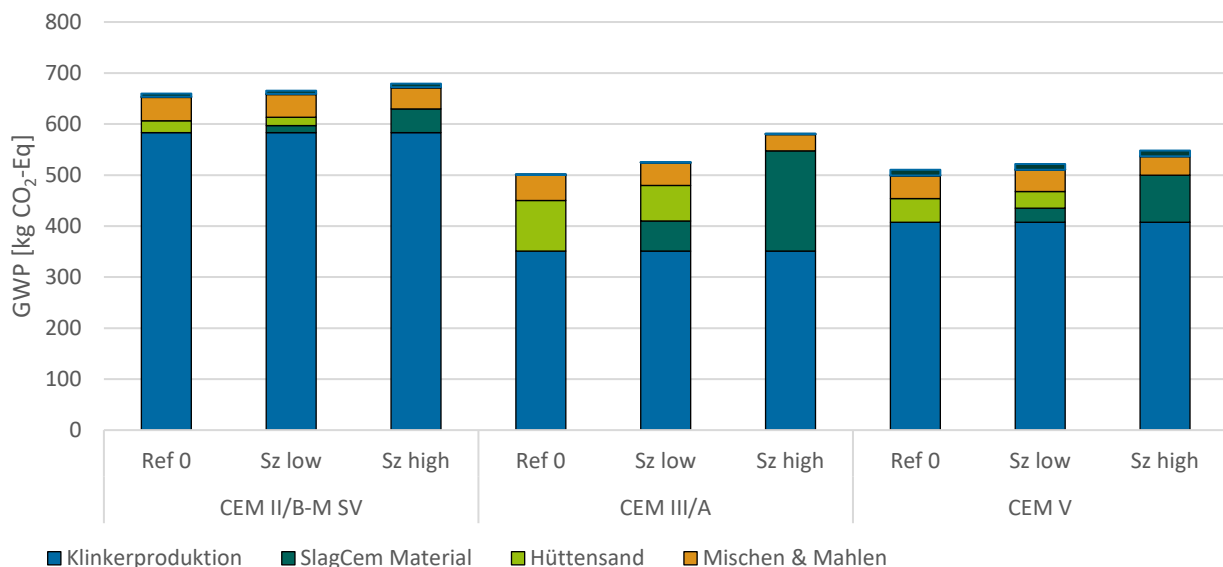


Abbildung 4-5 Erderwärmungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Substitution Klinker

Abbildung 4-6 zeigt die Auswirkungen der Substitution von Klinker auf das GWP anhand der Zementarten CEM II/A-LL und CEM III/A. Analog zu Abbildung 4-5 werden die Ergebnisse in kg CO₂-Eq je FE angegeben.

Das GWP der Produktion von **CEM II/A-LL** ist im Referenzszenario das höchste (711 kg CO₂-Eq). Das Mischen und Mahlen hat dabei einen Anteil von gut 6 % am GWP. Kalk und Gips tragen in Summe zu weniger als 1 % in allen Szenarien zum GWP bei. Die Klinkerproduktion hat wiederum

den größten Anteil (rund 90 %) am GWP. Mit steigender Substitution des Klinkeranteils durch SlagCEM-Material sinkt das GWP, um 3,4 % im Szenario Sz low (5 % des Klinkers werden durch SlagCEM-Material ersetzt). Im Szenario Sz high (15 % des Klinkers werden durch SlagCEM-Material ersetzt) sinkt das GWP insgesamt um 10,3 %.

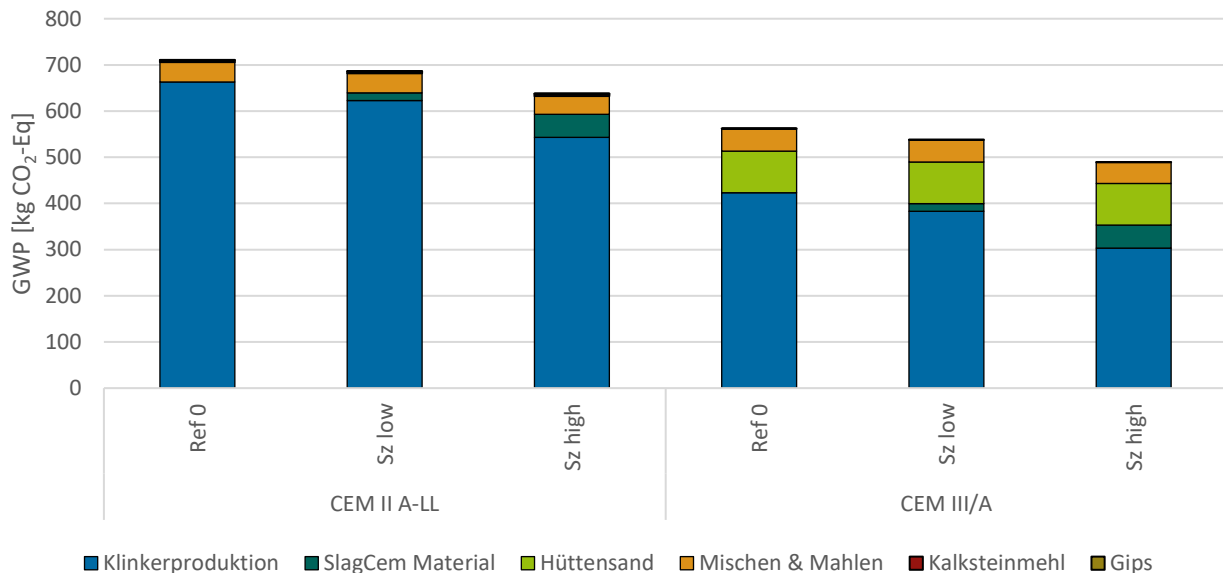


Abbildung 4-6 Erderwärmungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

CEM III/A weist ebenfalls im Referenzszenario das höchste GWP auf (562 kg CO₂-Eq) auf. Durch den Einsatz von SlagCEM-Material reduziert sich das GWP in Sz low um 4,3 % und in Sz high um 13,0 %. Die Klinkerproduktion dominiert in allen Szenarien das GWP (60-75 % der Lasten). Die Bereitstellung von Hüttensand sowie Mischen & Mahlen tragen in Summe zu gut 25 % bei. Die Bereitstellung von Kalk und Gips tragen kaum zum Ergebnis bei (<0,1 %).

4.2.2 Eutrophierungspotenzial

Substitution Hüttensand

In Abbildung 4-7 ist das Eutrophierungspotenzial (EP) für die Substitution von Hüttensand in kg PO₄³⁻ je FE dargestellt. Es zeigt sich die gleiche Tendenz innerhalb der Szenarien wie beim GWP. Mit zunehmender Substitution von Hüttensand steigt das Eutrophierungspotenzial. Zwischen Ref 0 und Sz high nimmt das EP respektive um 5 % (CEM II/B-M SV), 25 % (CEM III/A) und 12 % (CEM V) zu. Da Hüttensand ein geringeres EP aufweist als SlagCEM-Material kommt es zu einem Anstieg. Der große Anstieg bei CEM III/A liegt darin begründet, dass hier die größte Menge an Hüttensand durch SlagCEM-Material substituiert wird.

Die Auswertung lässt ebenfalls erkennen, dass die Klinkerproduktion den größten Anteil am EP ausmacht (etwa 50-70 %). Im Gegensatz zum GWP nimmt der Prozessschritt Mischen und Mahlen mit 15-30 % der Gesamtlasten einen deutlich höheren Anteil ein.

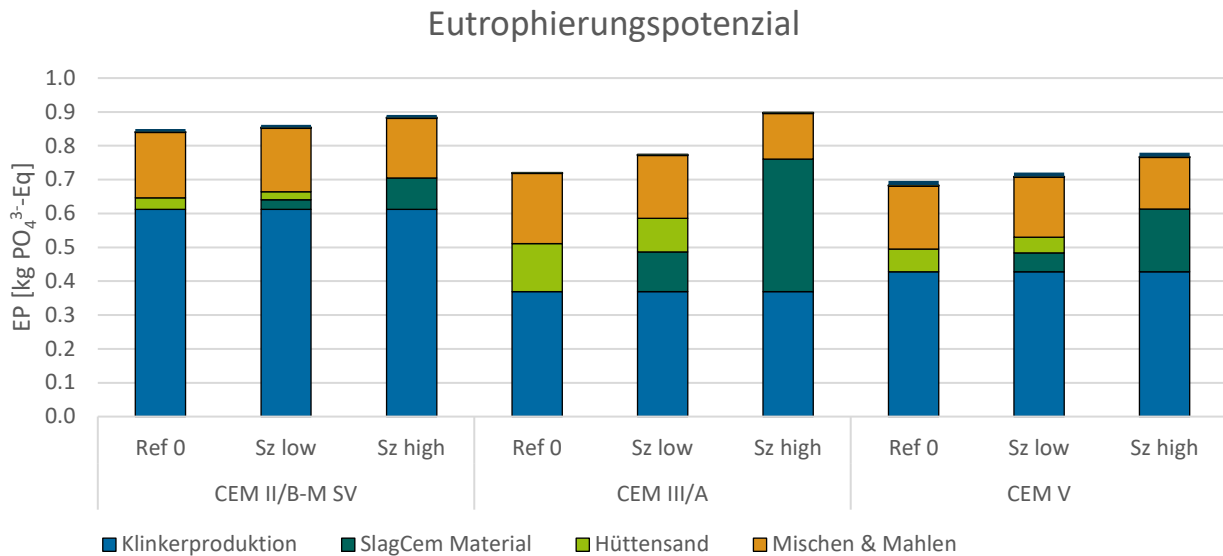


Abbildung 4-7 Eutrophierungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Substitution Klinker

Abbildung 4-8 zeigt das Eutrophierungspotenzial für die Substitution von Klinker in kg PO₄³⁻ je FE. Auch hier zeigen sich die gleichen Tendenzen wie beim GWP. Das EP nimmt um 4 % (CEM II/A-LL), bzw. 5 % (CEM III/A) von Ref 0 auf Sz high ab. Dies liegt darin begründet, dass SlagCEM-Material geringere spezifische Lasten als Klinker in der Kategorie EP aufweist. Insbesondere das hohe Eutrophierungspotenzial beim Wärmeeintrag führt zu hohen Lasten bei der Klinkerbereitstellung.

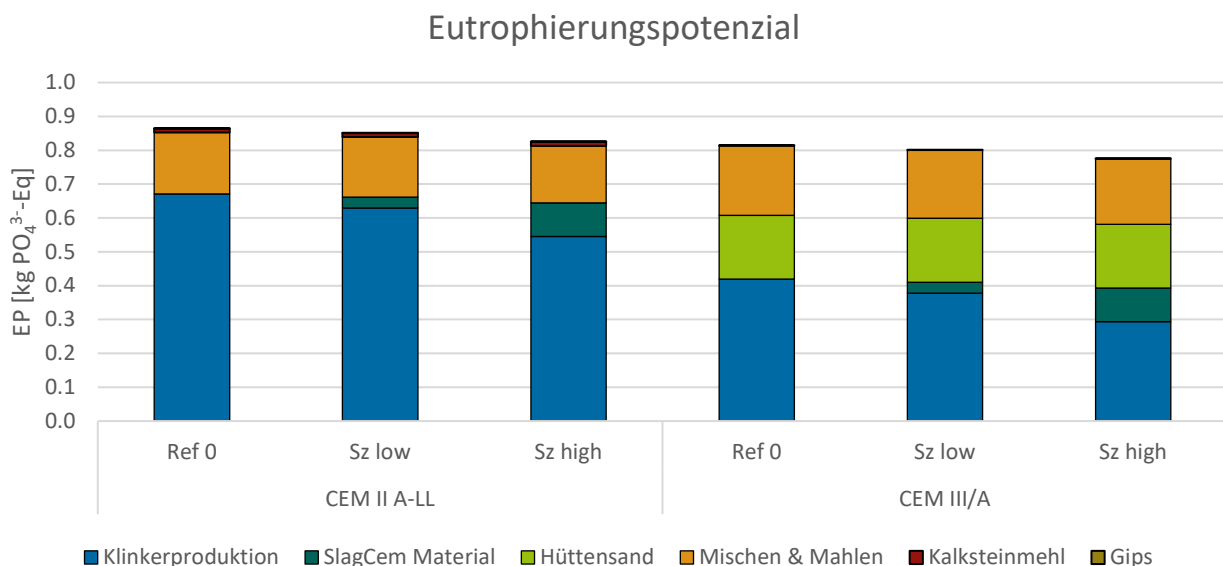


Abbildung 4-8 Eutrophierungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

4.2.3 Versauerungspotenzial

Substitution Hüttensand

Die Ergebnisse des Versauerungspotenzials (AP) für die Substitution von Hüttensand sind in Abbildung 4-9 dargestellt. Die Ergebnisse sind in kg SO₂-Eq/FE dargestellt. Bei CEM II/B-M SV hat die Klinkerproduktion mit ~70 % den höchsten Anteil am AP. Das AP nimmt von 0,71 kg SO₂-Eq/FE im Referenzszenario um rund 3 % (Sz low) bzw. 10 % (Sz high) zu. Flugasche, Gips und Kalksteinmehl tragen in Summe zu 4 % der Lasten in der Kategorie AP bei. Mischen und Mahlen trägt zu 10-15 % der Lasten bei.

Das AP der Zementart CEM III/A liegt in Ref 0 bei 0,72 kg SO₂-Eq. Die Klinkerproduktion hat dabei einen Anteil von 47 %, der Hüttensand von 38 %. In Sz high steigt das AP um 43 %, wobei das SlagCEM-Material nun einen Anteil von 60 % der Gesamtlasten in der Kategorie AP aufweist. Dies liegt auch hier an der großen Menge an Hüttensand, die substituiert wird.

Die Ergebnisse für CEM V zeigen in die gleiche Richtung wie die für CEM III/A. Hier steigt das AP um 23 % in Sz high im Vergleich zu Ref 0. In Sz high hat das SlagCEM-Material einen Anteil von 38 % der Gesamtlasten.

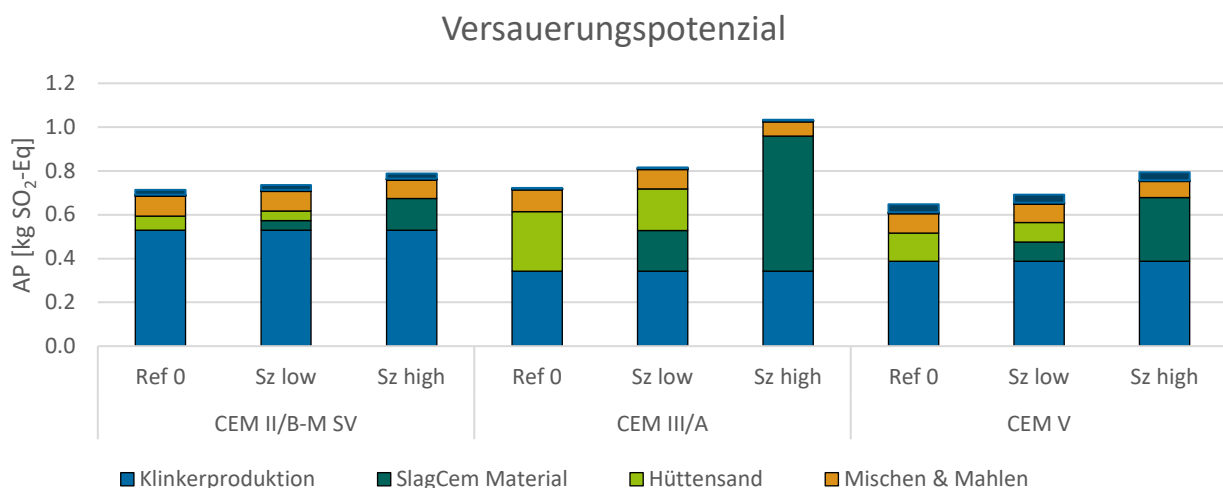


Abbildung 4-9 Versauerungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Substitution Klinker

Abbildung 4-10 zeigt das Versauerungspotenzial für die Zementarten bei denen Klinker substituiert wird. Für **CEM II/A-LL** liegt das AP in Ref 0 bei 0,71 kg SO₂-Eq je FE. In der Kategorie AP zeigt sich erstmals, dass die Substitution des Klinkers durch SlagCEM-Material einen Anstieg verursacht. Das AP steigt gegenüber Ref 0 in Sz low um 2,5 % und um 7,5% in Sz high. Die Klinkerproduktion hat den höchsten Anteil am AP in allen Szenarien (ca. 65-85 %). Mischen und Mahlen trägt mit ~12 % zu den Lasten bei. Der Beitrag des SlagCEM-Materials zum Gesamtergebnis liegt bei ~7 % in Sz low und bei knapp 20 % in Sz high.

Bei **CEM III/A** sind ähnliche Tendenzen in Bezug auf den Vergleich der Szenarien wie bei CEM II/A-LL zu beobachten. Das AP steigt gegenüber Ref 0 um 2 % (Sz low) und 7 % (Sz high) an. Die Lasten der Klinkerproduktion dominieren zwar das Ergebnis (53 % bei Ref 0, 48 % in Sz low und 38 % in

Sz high), jedoch trägt auch die Bereitstellung von Hüttensand mit ~30 % stark zu den Lasten bei. Mahlen und Mischen trägt mit ~15 % zum Gesamtergebnis bei.

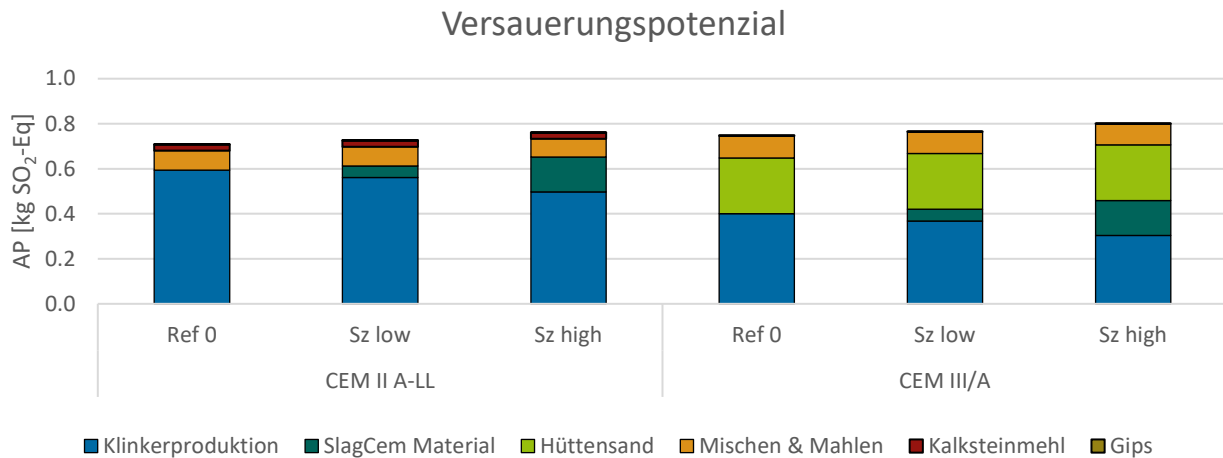


Abbildung 4-10 Versauerungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

4.2.4 Kumulierter Energieaufwand

Substitution Hüttensand

In Abbildung 4-11 ist der kumulierte Energieaufwand (KEA) für die Substitution von Hüttensand in MJ je FE dargestellt. Die Ergebnisse sind analog zu den Ergebnissen des Versauerungspotenzials (siehe Abbildung 4-9). Der KEA nimmt um 8 % (CEM II/B-M SV), 32 % (CEM III/A) und 17 % (CEM V) von Ref 0 auf Sz high zu. In der Grafik lässt sich gut erkennen, dass die Bereitstellung von Slag-CEM-Material einen mehr als doppelt so hohen Energieeintrag aufweist wie Hüttensand. Dadurch ergeben sich schließlich die steigenden Lasten über einen steigenden Anteil an SlagCEM-Material. Maßgeblicher Unterschied von SlagCEM zu Hüttensand ist die Verwendung von Reduktionsmitteln bei SlagCEM-Material und die damit verbundenen Lasten.

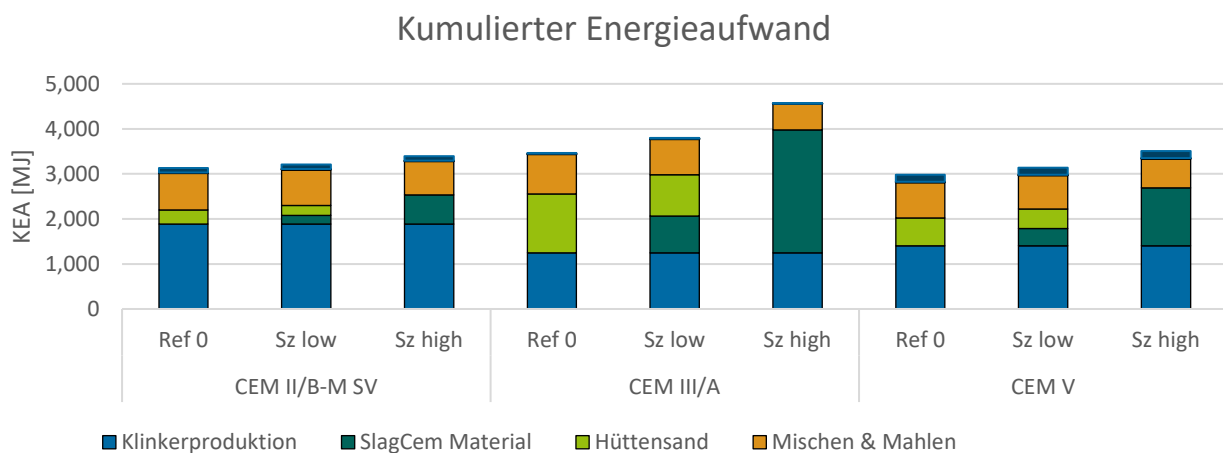


Abbildung 4-11 Kumulierter Energieaufwand CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Substitution Klinker

Abbildung 4-12 zeigt den kumulierten Energieaufwand für die Klinkersubstitution in MJ je FE. Auch hier zeigen sich analoge Ergebnisse zum Versauerungspotenzial (siehe Abbildung 4-10). Der KEA nimmt um 10 % (CEM II/A-LL) und 11 % (CEM III/A) von Ref 0 auf Sz high zu. Auch hier macht sich bemerkbar, dass der Energieeintrag für die Produktion von SlagCEM-Material doppelt so hoch ist wie für die Produktion von Klinker. Dieses Ergebnis wirkt kontraintuitiv, da für die Bereitstellung von Klinker hohe Energiemengen benötigt werden. Da diese aber zu einem großen Anteil (siehe 3.3.3) durch abfallstämmige Brennstoffe gedeckt werden, schlägt die im Abfall gebundene Energiemenge im KEA nicht zu Buche.²⁹

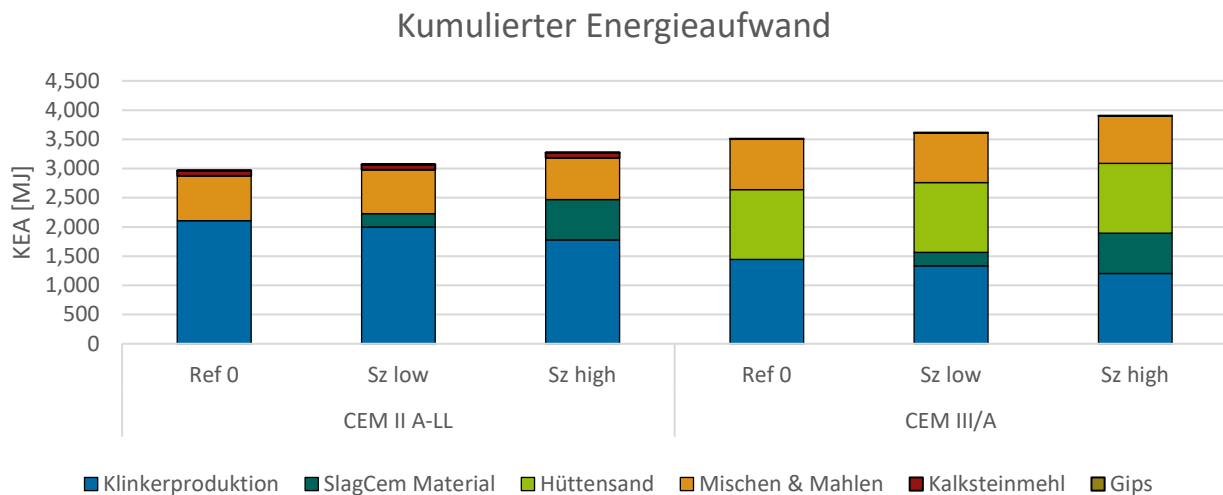


Abbildung 4-12 Kumulierter Energieaufwand CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

4.2.5 Photochemisches Ozonbildungspotenzial

Substitution Hüttensand

Die Ergebnisse für das photochemische Ozonbildungspotenzial (POFP) sind in Abbildung 4-13 in kg C₂H₄-Eq je FE dargestellt. Es zeigen sich ebenfalls ähnliche Ergebnisse wie beim Versauerungspotenzial. Das POFP für SlagCEM-Material ist deutlich höher als das für Hüttensand. In der Konsequenz steigt das POFP um 10 % (CEM II/B-M SV), 42 % (CEM III/A) und 23 % (CEM V) von Ref 0 auf Sz high.

²⁹ Wie in der Sachbilanz beschrieben werden 3,14 GJ pro t Zementklinker an Wärmeenergie eingesetzt. Davon werden (bezogen auf den Energiegehalt) 71,6 % durch Sekundärbrennstoffe gedeckt, i.e. 2,25 GJ pro t Zementklinker.

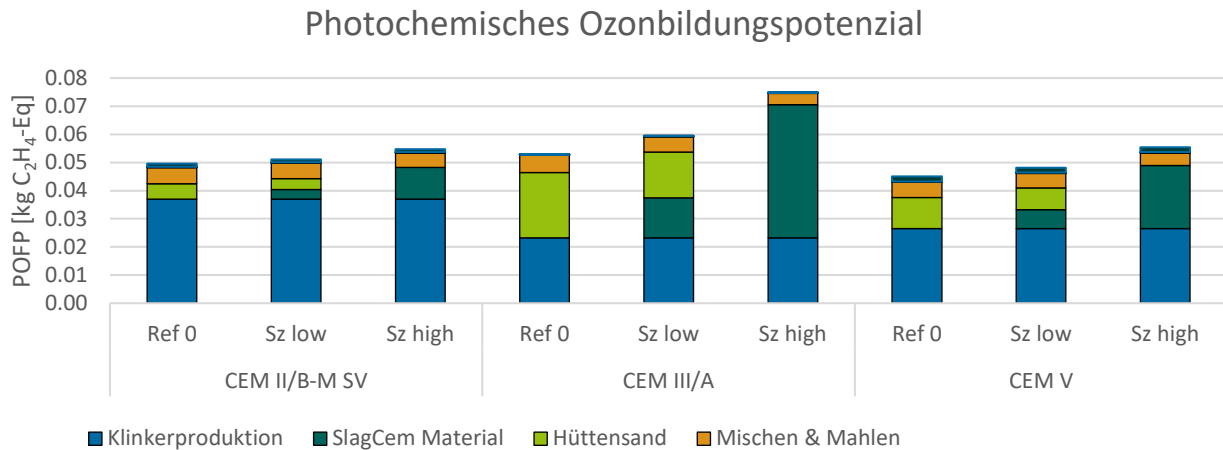


Abbildung 4-13 Photochemisches Ozonbildungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Substitution Klinker

Abbildung 4-14 zeigt das photochemische Ozonbildungspotenzial in kg C₂H₄-Eq je FE. Die Anteile der jeweiligen Prozessschritte gestalten sich analog zum AP. Das POFP steigt für beide Zementarten um rund 10 % von Ref 0 auf Sz high.

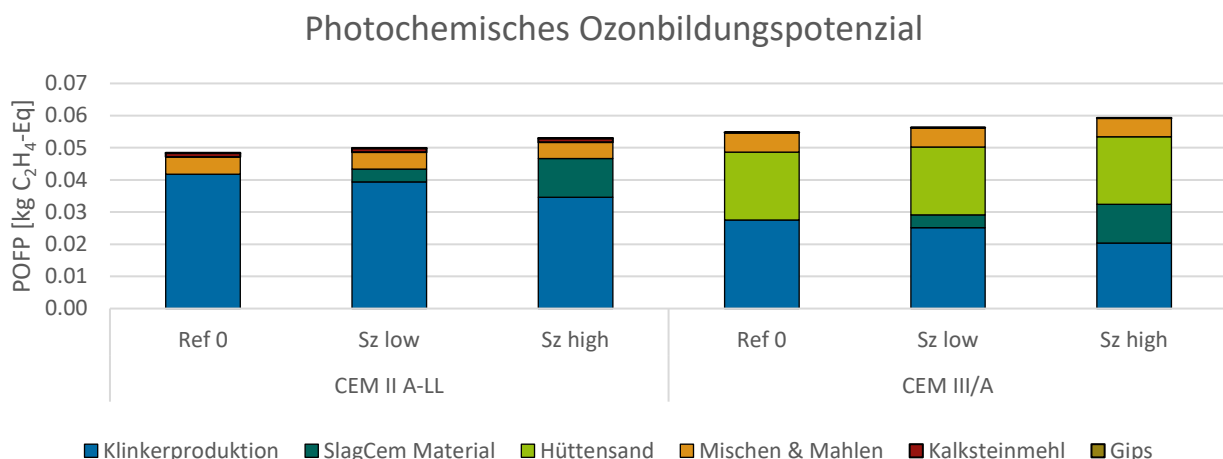


Abbildung 4-14 Photochemisches Ozonbildungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

4.2.6 Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen

Substitution Hüttensand

In Abbildung 4-15 ist das Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen (ADP) für die Substitution von Hüttensand in kg Sb-Eq dargestellt.

Bei CEM II/B-M SV haben die Klinkerproduktion (rund 50 %) und das Mischen und Mahlen (30-40 %) einen so großen Einfluss auf das ADP, dass die Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material kaum ins Gewicht fällt. Die Lasten in der Kategorie ADP steigen zwischen Ref 0 und Sz low bzw. Sz high um 1 % und 5 %.

Bei CEM III/A werden die Lasten im Basisfall Ref 0 zu etwa gleichen Teilen durch Hüttensand (34 %), Klinker (30 %) und Mischen und Mahlen (34 %) bestritten. Eine Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material führt zu einem Anstieg der Lasten um 6 % in Sz low und 19 % in Sz high (jeweils gegenüber Ref 0).

Das ADP von CEM V wird in Ref 0 durch die Bereitstellung von Klinker (40 %) und das Mischen und Mahlen (39 %) bestimmt. Die Bereitstellung von Hüttensand hat einen Anteil von 19 % an den Lasten. Die Lasten steigen in Sz low und Sz high um 3 % und 11 %.

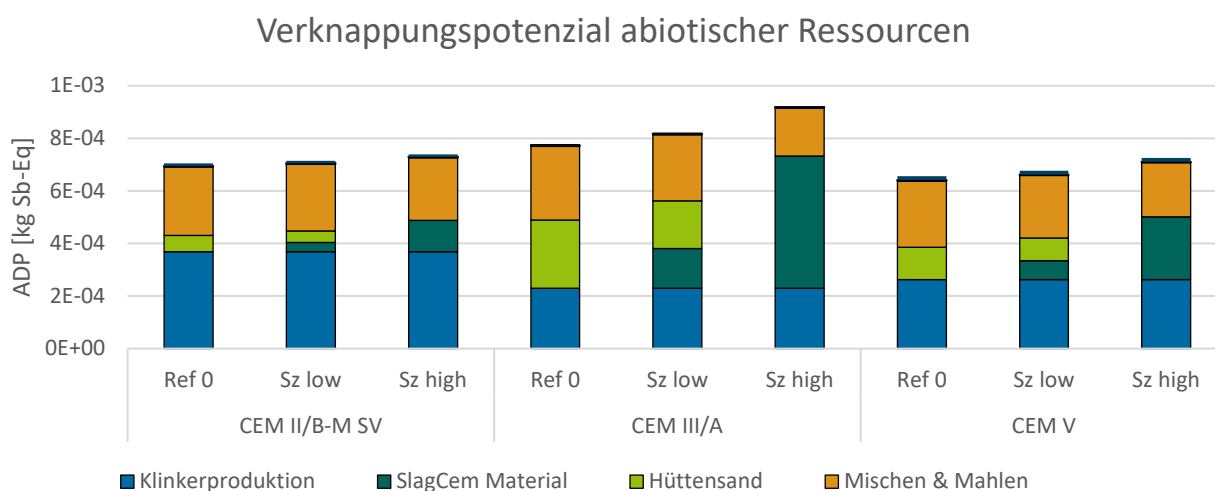


Abbildung 4-15 Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Substitution Klinker

Abbildung 4-16 zeigt das ADP in kg Sb-Eq für die Zementarten bei welchen Klinker durch SlagCEM-Material substituiert wird. Zwischen Ref 0, Sz low und Sz high steigt das Potenzial leicht an. Die Zunahme von Ref 0 auf Sz high beträgt 6 % (CEM II/A-LL) bzw. 5 % (CEM III/A).

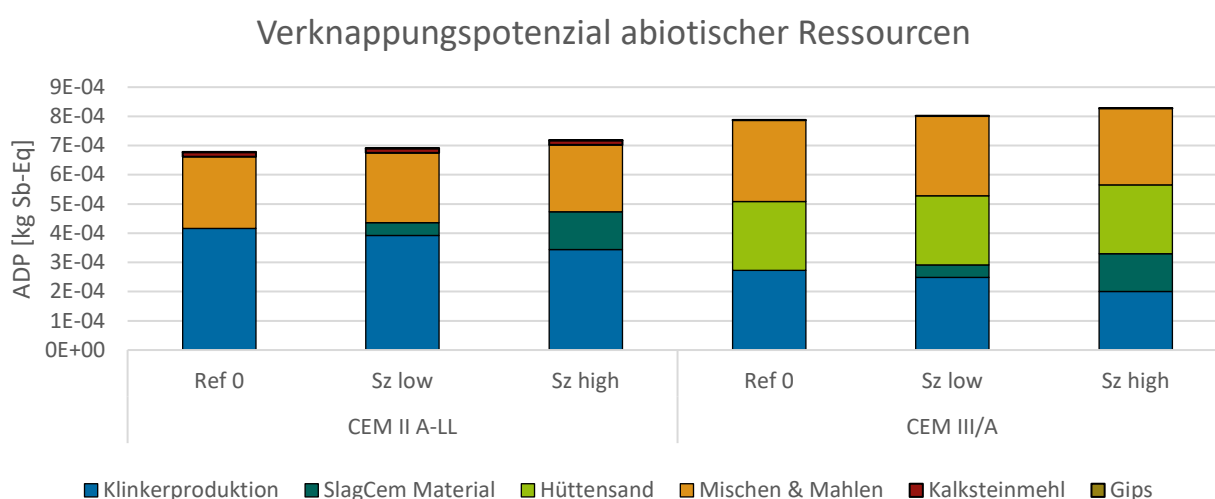


Abbildung 4-16 Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

5. Auswertung der Ökobilanz

Im folgenden Kapitel werden die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse ausgewertet. Zunächst erfolgt eine Darstellung der Parameter und Annahmen, welche die Ergebnisse der Ökobilanz wesentlich beeinflussen (Kapitel 5.1). Anschließend erfolgt eine Beurteilung der Relevanz der Aussagen der Ökobilanz, beginnend mit der Prüfung der Vollständigkeit (Kapitel 5.2.1), darauffolgend mit einer Erörterung der Konsistenz der Ergebnisse (Kapitel 5.2.2) und einer Analyse der Beeinflussung des Ergebnisses durch variierte Einflussgrößen (Sensitivitätsanalysen, Kapitel 5.2.3). Abschließend werden in Kapitel 5.3 zusammenfassend Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen dargestellt, die sich aus der Ökobilanz ergeben.

5.1 Identifizierung der signifikanten Parameter

In Kapitel 4 wird bereits anhand der ausgewählten Wirkungskategorien beschrieben, welchen Einfluss die unterschiedlichen Prozessschritte/Materialien auf das Gesamtergebnis haben. Folgend soll dies zusammengefasst werden:

- **Klinkerproduktion:** Die Klinkerproduktion trägt erwartungsgemäß über alle Wirkungskategorien und Zementarten hinweg entscheidend bis maßgeblich zum Ergebnis bei. Dominiert wird sie durch die geogenen Emissionen (nur GWP) und den Energieverbrauch (siehe Abbildung 4-1).
- **SlagCEM-Material:** Der Einsatz von SlagCEM-Material hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Insbesondere bei der Substitution von Hüttensand der Zementart CEM III/A ist das SlagCEM-Material in Sz high maßgeblich. Dies liegt daran, dass bei dieser Zementart die höchste Menge an Hüttensand (55 m-%) substituiert wird. Entscheidend für das SlagCEM-Material ist v. a. der erste Behandlungsschritt (Behandlung LD-Schlacke), aber auch der Transport vom Stahlwerk zum Zementwerk, die allozierten Lasten der Stahlherstellung und die Trocknung sind nicht unerheblich (siehe Abbildung 4-3).
- **Hüttensand:** Hüttensand hat, je nach eingesetzter Menge, ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Dominiert wird er durch den Transport des Materials und die allozierten Lasten aus der Stahlherstellung (siehe Abbildung 4-2).
- **Mischen & Mahlen:** Die Energie für das Mischen und Mahlen hat einen mittleren Einfluss auf das Ergebnis, der beim KEA und ADP etwas größer ist. Der Einfluss ist über die drei Szenarien und die Zementarten relativ konstant.
- **Flugasche, Kalksteinmehl, Gips:** Diese Materialien haben, auch aufgrund der geringen Einsatzmenge, kaum Einfluss auf das Ergebnis.

Resümee: Als wichtigste Parameter wurden die geogenen Emissionen und der Energieverbrauch bei der Klinkerproduktion, der Reduktionsschritt und die Transporte bei SlagCEM-Material sowie der Transport von Hüttensand ermittelt.

5.2 Beurteilung

Zur besseren Beurteilung der Ergebnisse werden diese auf Vollständigkeit und Konsistenz geprüft. Die Robustheit wird mittels Sensitivitätsprüfungen erhöht.

5.2.1 Vollständigkeitsprüfung

Es wurden innerhalb der Systemgrenzen alle Prozessschritte vom Schlackenfall bzw. der Rohstoffgewinnung über die Aufbereitung bis hin zur Bereitstellung des Zements berücksichtigt. Über eine Allokation wurde ebenfalls das Nebenprodukt Roheisen erfasst. Weiterhin wurden auch für die Koppelprodukte Hüttensand und SlagCEM-Material die Lasten der Stahlerzeugung alloziert. Innerhalb der Prozesse wurden alle bekannten Inputs und Outputs betrachtet.

5.2.2 Konsistenzprüfung

Es wurden alle Systeme einheitlich nach der cut-off-Methode (cut-off by classification) bilanziert. Die Bilanzierung wurde einheitlich mit einer Datenbank (ecoinvent v. 3.10) und innerhalb einer Software (openLCA) durchgeführt. Durch die Verwendung von generischen Datensätzen entstehen teilweise Inkonsistenzen bezüglich der zeitlichen und geographischen Bezüge. Die Charakterisierungsfaktoren für die Wirkungskategorien Eutrophierung, Versauerung und Bildung von photochemischem Ozon stammen aus einer einheitlichen Quelle, während für die Erderwärmung (IPCC) und den kumulierten Energieaufwand (Berechnung nach dem Heizwert der Energieträger) andere Quellen genutzt wurden. Für das Vordergrundsystem wurde für alle betrachteten Systeme der gewählte zeitliche und geographische Bezugsraum angepasst (Deutschland 2023).

5.2.3 Sensitivitätsprüfung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ökobilanz auf ihre Sensitivität gegenüber einer Variation von ausgewählten, ergebnisrelevanten Einflussgrößen hin überprüft. Dafür werden Parameter ausgewählt, die sowohl einen signifikanten Einfluss auf das Gesamtergebnis haben (siehe Kapitel 5.1) als auch unsicher sind. Folgende Sensitivitäten werden durchgeführt:

1. **Reduktion des SlagCEM-Materials ohne Kohlenstoff:** Der erste Behandlungsschritt bei der Aufbereitung des SlagCEM-Materials hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Bilanzergebnis. Gleichzeitig ist die Reduktion auch ohne Zugabe von Kohlenstoff möglich und soll daher in einer Sensitivität betrachtet werden.
2. **Allokationen:** Nach 4.3.4.1 der ISO 14044 „*muss eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt [werden], wenn mehrere alternative Allokationsverfahren zulässig erscheinen, um die Folgen des Abweichens vom ausgewählten Ansatz darzustellen*“. Wie im Kapitel 3.2 beschrieben werden im Vordergrundsystem an zwei Stellen Allokationen durchgeführt, und zwar (i) für das Koppelprodukt Roheisen bei der Bereitstellung von SlagCEM-Material und (ii) zwischen Stahl, Hüttensand und SlagCEM-Material. Zu diesem Zweck werden zwei weitere Allokationsansätze verfolgt: (i) es wird eine physikalische statt einer ökonomischen Allokation durchgeführt und (ii) eine Allokation wird durch Gutschriften vermieden (Substitutionsmethode). Die Substitutionsmethode wird nur im Vordergrundsystem angewandt (bei der Rückgewinnung von Roheisen und beim Einsatz von Schlacke im System Stahl-Hüttensand-SlagCEM-Material). Im Hintergrundsystem bleibt die von ecoinvent vorgegebene Allokation bestehen und die physikalische Allokation bzw. Substitutionsmethode wird nicht angewandt, da der Aufwand im Rahmen dieser Studie zu hoch wäre. Dennoch werden diese Allokationsansätze in Erwartung eines Erkenntnisgewinns bilanziert.
3. **Transportdistanz:** Die Transportdistanz hat einen entscheidenden Einfluss auf die Systeme Hüttensand und SlagCEM-Material. Die Transportdistanz soll daher innerhalb sinnvoller Grenzen variiert werden.

Eine Sensitivitätsprüfung für den signifikanten Parameter Klinkerproduktion wurde nicht durchgeführt, da dies kein unsicherer Parameter ist. Mischen & Mahlen ist bei allen Zementarten und Szenarien relativ konstant, daher hat eine Veränderung dieses Parameters kaum Einfluss auf den Vergleich der Szenarien.

Die Sensitivitätsanalysen erfolgen primär für die Wirkungskategorie Erderwärmung, die Ergebnisse der weiteren Wirkungskategorien sind im Anhang A-2 dargestellt.

Sensitivität 1: Reduktion ohne Kohlenstoff

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, kann die Reduktion der LD-Schlacke auch ohne Kohlenstoff durchgeführt werden. In dieser Sensitivität wird überprüft, wie sich dies auf das Gesamtergebnis auswirkt. Tabelle 5-1 zeigt die Menge der eingesetzten Reduktionsmittel bei einer Reduktion mit und ohne Kohlenstoff.

Tabelle 5-1 Einsatzmenge der Reduktionsmittel bei der Reduktion von Konverterschlacke pro t aufbereiteter Schlacke

| | Ecoinvent Prozess | Reduktion mit Kohlenstoff (Basisfall) | Reduktion ohne Kohlenstoff (Sensitivitätsanalyse) |
|--------------|---|--|--|
| Aluminium | <i>market for aluminium, primary, ingot - IAI Area, EU27 & EFTA</i> | 13,3 kg | 20,4 kg |
| Eisensilikat | <i>market for ferrosilicon - GLO</i> | 9 kg | 20,4 kg |
| Kohle | <i>coke production - DE</i> | 30,1 kg | 0 kg |
| Stickstoff | <i>market for nitrogen, liquid - RER</i> | 0,8 Nm ³ | 0,8 Nm ³ |

In Abbildung 5-1 ist das Ergebnis für die Substitution von Hüttensand und in Abbildung 5-2 für die Substitution von Klinker dargestellt. Die Reduktion ohne Kohlenstoff ist durch das Suffix „Red_no_C“ gekennzeichnet. Da sich diese Sensitivität nur auf die Produktion von SlagCEM-Material auswirkt, gibt es in Ref 0 keine Änderungen. Das GWP erhöht sich um 0,1-1,3 % gegenüber dem Basisfall. Den höchsten Anstieg gibt es bei der Substitution von Hüttensand bei CEM III/A, der Zementart mit dem höchsten Hüttensand-Anteil. Der Anstieg des GWP ist durch den höheren Bedarf an Aluminium und Eisensilikat bedingt.

Bei der Auswertung weiterer Wirkungskategorien (siehe auch Anhang A-2) zeigt sich ebenfalls ein Anstieg des Ergebnisses. Während dieser beim EP ebenfalls moderat ist (unter 2 %), beträgt der Anstieg bei den übrigen Wirkungskategorien bis zu 18 % (AP).

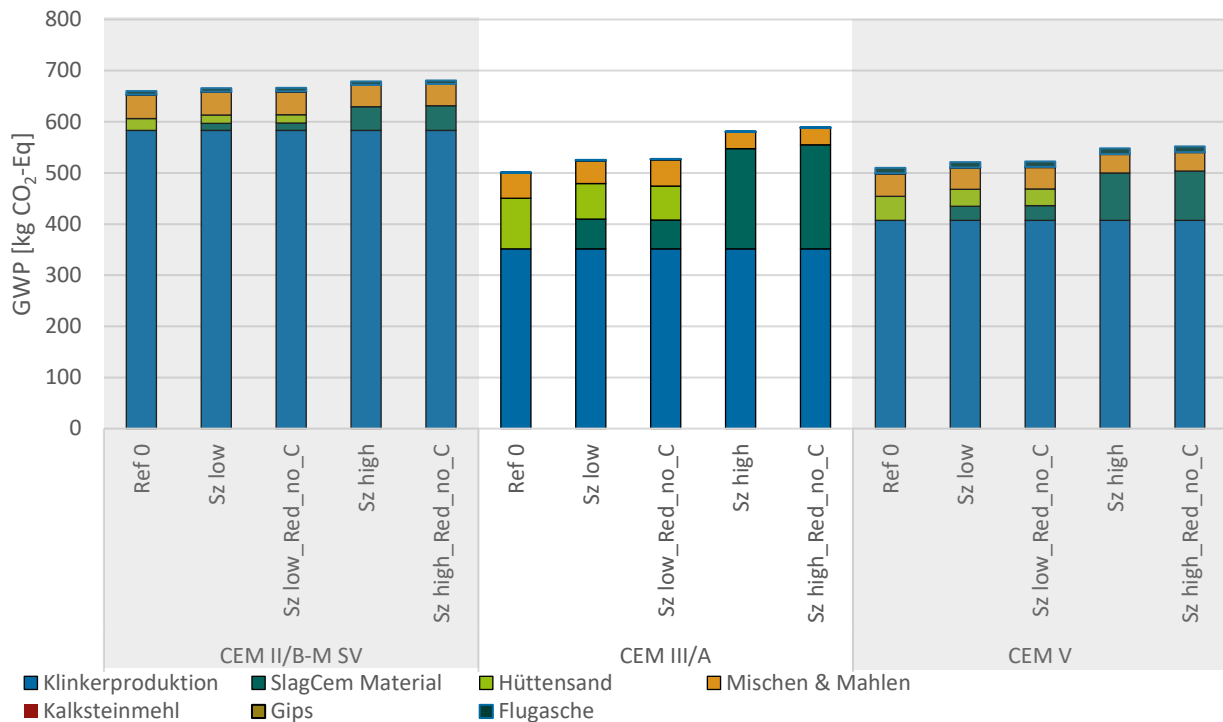


Abbildung 5-1 Sensitivität 1: Reduktion ohne Kohlenstoff – Erderwärmungspotenzial. CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

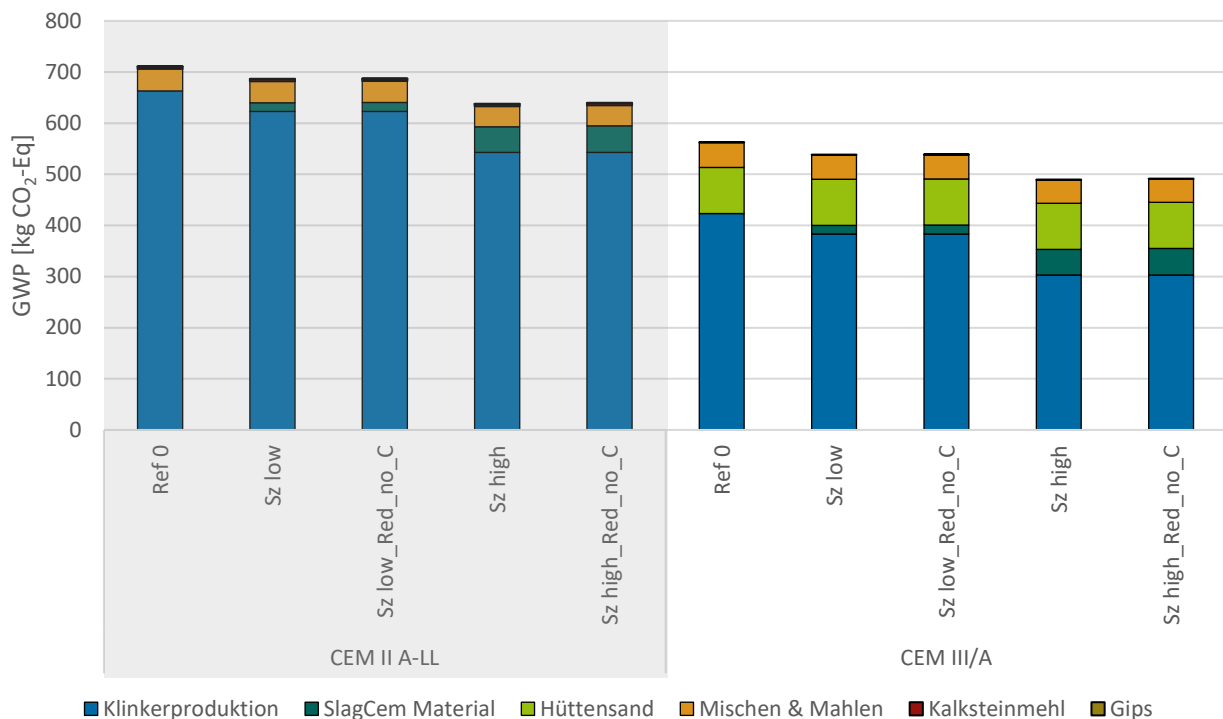


Abbildung 5-2 Sensitivität 1: Reduktion ohne Kohlenstoff - Erderwärmungspotenzial. CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

Abschließend soll in Tabelle 5-2 qualitativ gezeigt werden, wie sich die gewählten Reduktionsmittel auf die Wirkungskategorien auswirken. Als Referenz wird Zement gewählt, bei dem kein Hüttensand oder Klinker substituiert wird (Ref 0). Erhöhen sich die Lasten gegenüber Ref 0 durch Einbringen

von SlagCEM-Material, wird dies durch ↑ angezeigt. Eine Verringerung der Lasten wird durch ↓ angezeigt.

Tabelle 5-2 Einfluss der Reduktionsmittel auf die verschiedenen Wirkungskategorien. ↑=Die Lasten sind erhöht gegenüber keiner Substitution von Hüttensand oder Klinker (Ref 0). ↓=Die Lasten sind geringer gegenüber keiner Substitution von Hüttensand oder Klinker (Ref 0).

| Wirkungskategorie | Substitution von... | Reduktion ohne Kohlenstoff (Basisfall) | Reduktion mit Kohlenstoff (Sensitivitätsanalyse) |
|-------------------|---------------------|--|--|
| GWP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↓ | ↓ |
| EP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↓ | ↓ |
| AP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| KEA | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| POFP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| ADP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |

Sensitivität 2 a: Physikalische statt ökonomischer Allokation

Durch die Aufbereitung der LD-Schlacke fällt Roheisen an, das weiter genutzt werden kann. Weiterhin wird durch die Stahlerzeugung Hochofenschlacke und LD-Schlacke als Koppelprodukt erzeugt. In der Bilanz wird bisher eine ökonomische Allokation durchgeführt. In dieser Sensitivität wird dargestellt, wie sich die Ergebnisse ändern, wenn stattdessen eine physikalische Allokation gewählt wird.

Für das GWP sind die Ergebnisse für die Substitution von Hüttensand in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Auswirkung zeigt eindrücklich, dass die physikalische Allokation (gekennzeichnet in der Grafik durch das Suffix „phys_Allok“) zu deutlich höheren Lasten bei allen Zementarten führt. Maßgeblich daran beteiligt ist die Allokation im System Stahl-Hüttensand-SlagCEM-Material. Die Allokation für die Rückgewinnung von Roheisen ist in diesem Zusammenhang eher vernachlässigbar. Durch diese Allokationsmethode ergeben sich zwar deutlich höhere Lasten in den betrachteten Systemen, die Tendenzen bei der Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material bleibt aber gleich: Die Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material führt zu höheren Lasten.

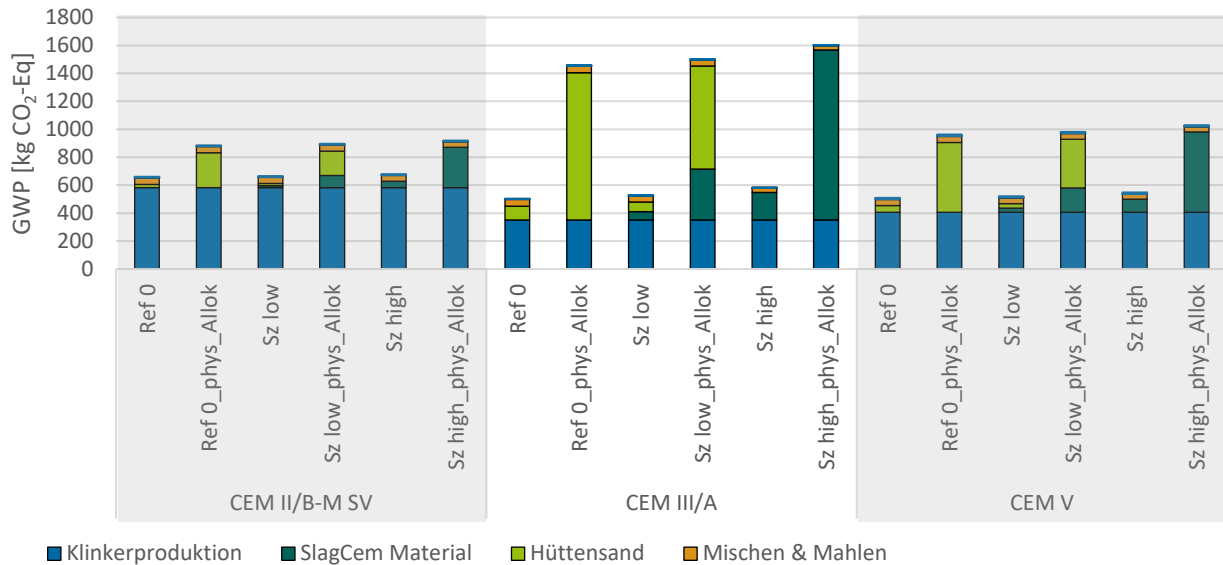


Abbildung 5-3 Sensitivität 2 a: Physikalische statt ökonomische Allokation - Erderwärmungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Abbildung 5-4 zeigt das GWP der physikalischen Allokation für die Substitution von Klinker. Auch hier zeigt sich, dass die physikalische Allokation zu einer deutlichen Erhöhung der Lasten führen kann. Das ist insbesondere bei CEM III/A der Fall. Die Lasten für Hüttensand und SlagCEM-Material steigen durch die physikalisch allozierten Lasten der Stahlerzeugung stark an. Die Allokationsmethode spielt für die Allokation zwischen SlagCEM-Material und Roheisen eine eher untergeordnete Rolle. Durch die Wahl der physikalischen Allokation stellen sich die Ergebnisse nun so dar, dass eine Substitution von Klinker durch SlagCEM-Material zu einem zunehmenden Anstieg der Lasten führt. Das stellt eine Veränderung gegenüber den vorherigen Ergebnissen dar.

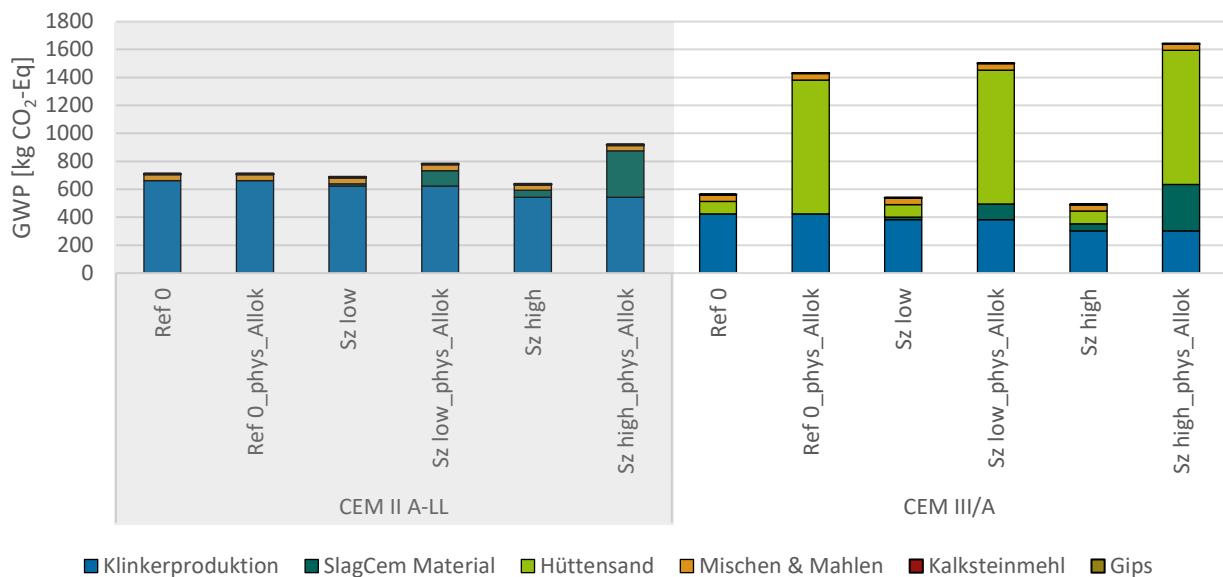


Abbildung 5-4 Sensitivität 2 a: Physikalische statt ökonomische Allokation - Erderwärmungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

Abschließend soll in Tabelle 5-3 qualitativ gezeigt werden, wie sich die physikalische Allokation gegenüber einer ökonomischen Allokation auf alle Wirkungskategorien auswirken. Als Referenz wird Zement gewählt, bei dem kein Hüttensand oder Klinker substituiert wird (Ref 0). Erhöhen sich die Lasten gegenüber des Referenzfalls durch Einbringen von SlagCEM-Material, wird dies durch ↑ angezeigt. Eine Verringerung der Lasten wird durch ↓ angezeigt. Zeigt sich zwischen den gewählten Allokationsansätzen eine Abweichung in der Tendenz der Ergebnisse (↑ bzw. ↓), wird dies durch einen roten Pfeil hervorgehoben. Dies ist der Fall für die Wirkungskategorien GWP und EP bei der Substitution von Klinker.

Tabelle 5-3 Einfluss der Reduktionsmittel auf die verschiedenen Wirkungskategorien.
 ↑=Die Lasten sind erhöht gegenüber keiner Substitution von Hüttensand oder Klinker (Ref 0). ↓=Die Lasten sind geringer gegenüber keiner Substitution von Hüttensand oder Klinker (Ref 0).

| Wirkungskategorie | Substitution von... | Ökonomische Allokation (Basisfall) | Physikalische Allokation (Sensitivitätsanalyse) |
|-------------------|---------------------|------------------------------------|---|
| GWP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↓ | ↑ |
| EP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↓ | ↑ |
| AP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| KEA | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| POFP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| ADP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |

Es zeigt sich, dass bei der Wahl der physikalischen Allokation, die Substitution von Hüttensand und Klinker durch SlagCEM-Material immer zu höheren Lasten führt.

Sensitivität 2 b: Vermeidung von Allokation durch Gutschriften (Substitutionsmethode)

In dieser Sensitivität wird dargestellt, wie sich das Ergebnis verändert, wenn anstelle einer physikalischen oder ökonomischen Allokation eine Allokation durch Systemerweiterung vermieden wird. Hierbei wird von der Substitutionsmethode Gebrauch gemacht. In Folge der Substitutionsmethode müssen die bestehenden Allokationen für das Koppelprodukt Roheisen aus der Bereitstellung von SlagCEM-Material sowie die Bereitstellung von Schlacken aus der Stahlproduktion angepasst werden müssen. Abbildung 5-5 zeigt schematisch, wie sich die Vermeidung von Allokationen durch Systemerweiterung darstellt.

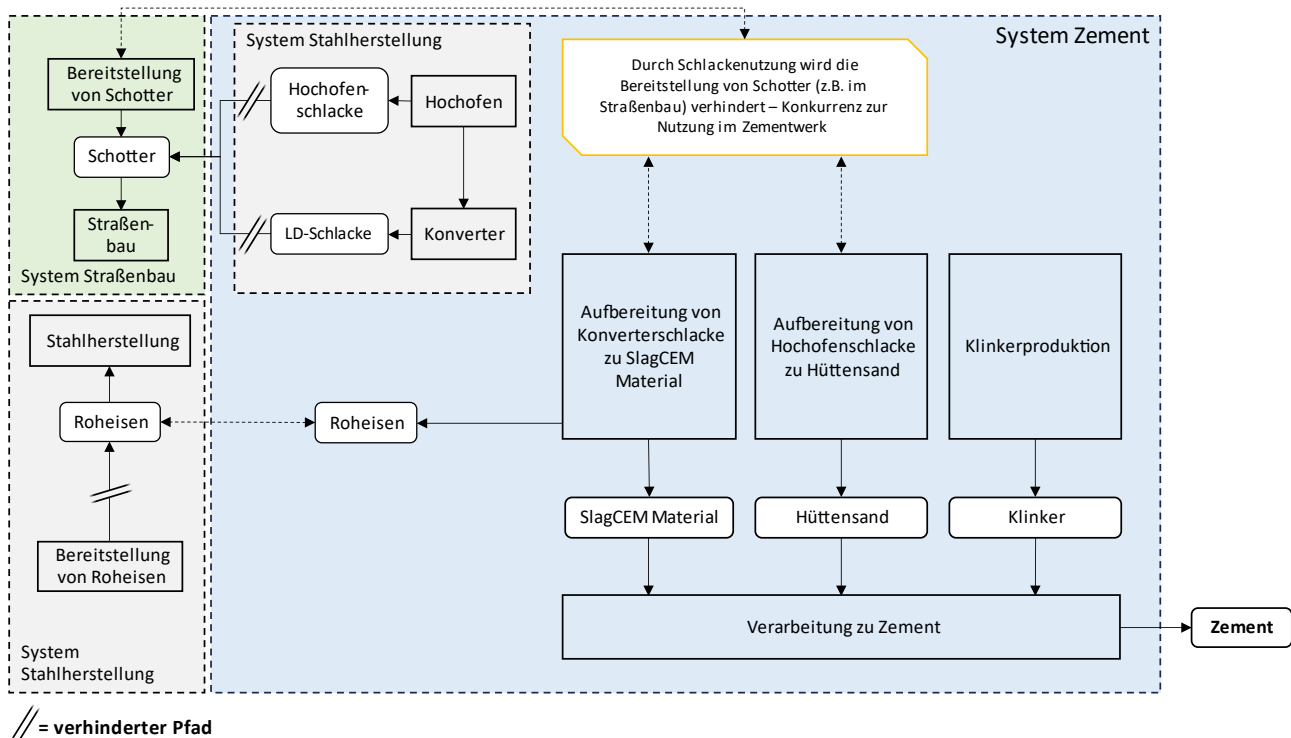


Abbildung 5-5 Schematische Darstellung der Berechnung des Systems bei einer Vermeidung von Allokationen durch Systemerweiterung (Substitutionsmethode).

Die Berechnung gemäß der Substitutionsmethode lässt sich anhand der Nutzenkorbmethode erläutern. Im Nutzenkorb finden sich neben der Bereitstellung von 1 t Zement (funktionelle Einheit) auch die Koppelprodukte. Die Koppelprodukte sind eine bestimmte Menge an Roheisen und Schlacke.

Konkret erfolgt die Modellierung folgendermaßen:

- Bei den Koppelprodukten, wie den Schlacken aus der Stahlproduktion, muss deren alternative Nutzung berücksichtigt werden. Schlacken, die in der Zementproduktion verwendet werden, stehen nicht mehr für konkurrierende Nutzungspfade zur Verfügung. Obwohl Schlacken vielseitig einsetzbar sind, wird in einer vereinfachten Annahme davon ausgegangen, dass durch die Nutzung von Hochofenschlacke und LD-Schlacke Schotter substituiert wird. Für die Bereitstellung von Schotter wird der ecoinvent Prozess „market for gravel, crushed – CH“ (mit an Deutschland angepasstem Strommix) herangezogen.
- Bei der Bereitstellung von Roheisen über die SlagCEM-Route entfällt die Bereitstellung von Roheisen über die Primärroute. Die zurückgewonnene Menge an Roheisen wird gegenüber der Primärroute von Roheisen gutgeschrieben. Die Primärroute von Roheisen wird über den ecoinvent Prozess „market for pig iron - RER“ abgebildet.

Für die Berechnung der Lasten für das Gesamtsystem wird zuerst der Nutzenkorb dargestellt. Daraus wird die Gleichung zur Berechnung des Gesamtergebnisses dargestellt.

$$\begin{aligned}
 \text{Nutzenkorb} &= \text{Bereitstellung von 1 t Zement} \\
 &+ \text{Bereitstellung einer gewissen Menge Roheisen}^a \\
 &+ \text{Bereitstellung einer gewissen Menge Schlacke}^a
 \end{aligned}
 \qquad \text{Gleichung 6}$$

^{a)} abhängig von der Zementart / SlagCEM-Menge

$$\begin{aligned}
 &\text{Gesamtergebnis} \\
 &= \text{Bereitstellung von 1 Zement} \\
 &- \text{Lasten Roheisen (Primärroute)}^a \\
 &+ \text{Lasten Schotter (Primärroute)}^b
 \end{aligned}
 \qquad \text{Gleichung 7}$$

^{a)} vermiedene Lasten bezogen auf die Menge an zurückgewonnenem Roheisen aus SlagCEM-Material, ^{b)} bezogen auf die Menge an Schlacke die im Zement eingesetzt wurde.

Für das GWP sind die Ergebnisse für die Substitution von Hüttensand in Abbildung 5-6 dargestellt. Ergebnisse, die nach der Substitutionsmethode gerechnet wurden, sind in der Grafik mit dem Suffix „_Subst“ gekennzeichnet. Die für Roheisen vergebenen Gutschriften betreffen das SlagCEM-Material und sind separat als negative Werte ausgewiesen. Die daraus resultierende Nettolast (Summe aller Lasten - Gutschrift für eingespartes Roheisen) ist als schwarzer Rhombus dargestellt.

Im Gegensatz zum Basisfall, bei welchem das GWP mit zunehmendem Gehalt an SlagCEM-Material ansteigt, sinkt das GWP leicht in dieser Sensitivität mit zunehmendem Gehalt an SlagCEM-Material. Im Vergleich zu Ref 0_Subst³⁰ sinkt das GWP bei allen drei betrachteten Zementarten um 0,1-0,6 % (Sz low) bzw. 0,3-1,9 % (Sz high). Die Ergebnisse für die weiteren Kategorien ist in Anhang A-2 dargestellt. Dabei kann in den betrachteten Wirkungskategorien folgendes beobachtet werden:

- In der Kategorie AP, EP, KEA und ADP steigen die Lasten weiterhin mit einer Zunahme an SlagCEM-Material an (keine Veränderung zum Basisfall).
- In der Kategorie POFP sinken die Lasten deutlich um 5-23 % im Fall Sz low und um 17-77 % im Fall Sz high (Veränderung zum Basisfall).

³⁰ Der Vergleich muss hier gegenüber Ref0_Subst erfolgen, weil die Substitutionsmethode auch im Basisfall beim Stoffstrom Hüttensand zum Tragen kommt.

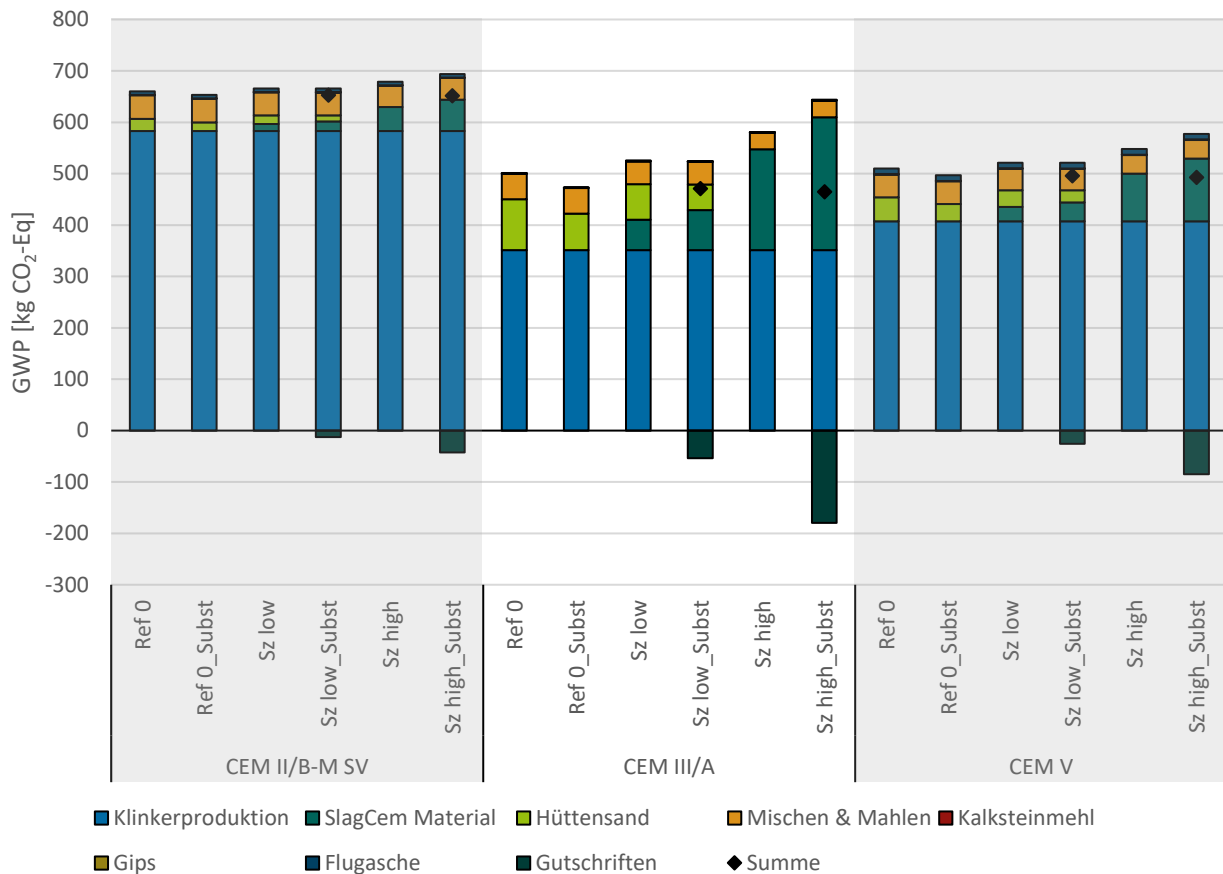


Abbildung 5-6 Sensitivität 2 b: Substitutionsmethode - Erderwärmungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Abbildung 5-7 zeigt die Ergebnisse der zweiten Sensitivitätsanalyse für die Substitution von Klinker anhand des GWP. Analog zum Basisfall sinkt bei beiden Zementarten das GWP mit zunehmendem Anteil an SlagCEM-Material. Die Reduktion des GWP gegenüber Ref 0_Subst ist jedoch etwas stärker ausgeprägt, sodass das GWP in Sz high um 14,2 % (CEM II A-LL) bzw. 18,9 % (CEM III/A) sinkt. Die Auswertung für weitere Wirkungskategorien befindet sich in Anhang A-2. Dabei zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Für die Kategorien KEA, AP und ADP zeigt sich wie im Basisfall ein Anstieg der Lasten mit steigendem SlagCEM Anteil
- Beim EP sinken wie im Basisfall die Lasten mit steigendem Anteil an SlagCEM-Material
- In der Kategorie POFP sinken die Lasten gegenüber Ref 0_Subst um ~10 % in Sz low und um ~25 % (CEM II A) in Sz high. Dies stellt eine geänderte Tendenz im Vergleich zum Basisfall dar.

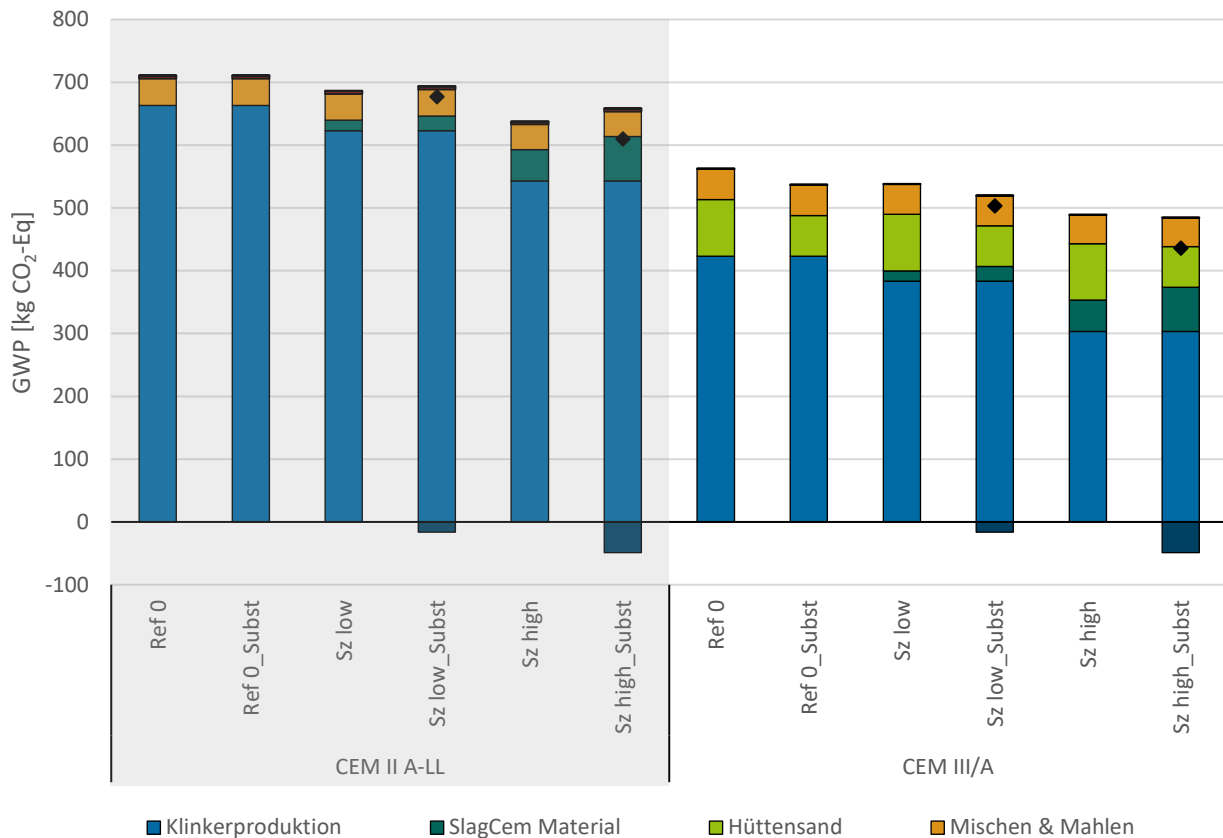


Abbildung 5-7 Sensitivität 2 b: Substitutionsmethode - Erderwärmungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

Tabelle 5-4 zeigt abschließend qualitativ, wie sich die gewählte Substitutionsmethode auf die Ergebnisse im Gegensatz zu einer ökonomischen Allokation auswirkt. Als Referenz wird Zement gewählt, bei dem kein Hüttensand oder Klinker substituiert wird (Ref 0 bzw. Ref 0_Subst). Erhöhen sich die Lasten gegenüber dieses Referenzfalls durch Einbringen von SlagCEM-Material wird dies durch ↑ angezeigt. Eine Verringerung der Lasten wird durch ↓ angezeigt. Zeigt sich zwischen den gewählten Allokationsansätzen eine Abweichung in der Tendenz der Ergebnisse (↑ bzw. ↓), wird dies durch einen roten Pfeil hervorgehoben. Dies ist beim GWP für Hüttensand der Fall, die Lasten sinken nun mit steigendem Anteil an SlagCEM-Material. Weiterhin sinken auch in der Kategorie POFP die Lasten mit steigendem Anteil an SlagCEM-Material. Dies ist sowohl der Fall bei der Substitution von Hüttensand als auch bei Klinker.

Tabelle 5-4 Einfluss der Allokationsmethode auf die verschiedenen Wirkungskategorien. ↑=Die Lasten sind erhöht gegenüber keiner Substitution von Hüttensand oder Klinker (Ref 0). ↓=Die Lasten sind geringer gegenüber keiner Substitution von Hüttensand oder Klinker (Ref 0).

| Wirkungskategorie | Substitution von... | Ökonomische Allokation (Basisfall) | Substitutionsmethode |
|-------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|
| GWP | Hüttensand | ↑ | ↓ |
| | Klinker | ↓ | ↓ |

| Wirkungskategorie | Substitution von... | Ökonomische Allokation (Basisfall) | Substitutionsmethode |
|-------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|
| EP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↓ | ↓ |
| AP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| KEA | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| POFP | Hüttensand | ↑ | ↓ |
| | Klinker | ↑ | ↓ |
| ADP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |

Sensitivität 3: Verringerung der Transportdistanz

Im Basisfall beträgt die mittlere Distanz zwischen Hochöfen und Zementwerken in Deutschland 440 km (vergleiche Kapitel 3.2). In dieser Sensitivität wird überprüft, wie sich die Ergebnisse ändern, wenn stattdessen die geringste Distanz, d. h., der Transport zum nächstgelegenen Zementwerk, angenommen wird (220 km). Diese Veränderung beeinflusst die Prozesse:

- Bereitstellung von SlagCEM-Material und
- Bereitstellung von Hüttensand.

In Abbildung 5-8 sind die Ergebnisse anhand des GWP für die Substitution von Hüttensand dargestellt. Die Ergebnisse, die auf einer verringerten Transportdistanzen basieren sind mit dem Suffix „_Transp“ gekennzeichnet. Eine Verringerung der Transportdistanzen führt zu einer minimalen Verringerung (über alle Zementarten und Szenarien <5 %) des GWP gegenüber den ursprünglich angesetzten Distanzen. Dies trifft auf alle Zementarten zu. Trotzdem ändert sich die Aussage der Gesamtbilanz nicht. Das GWP steigt weiterhin mit zunehmender Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material.

Die Auswertung für weitere Wirkungskategorien befindet sich in Anhang A-2. Auch für alle weiteren Wirkungskategorien führt die Reduzierung der Transportdistanzen zu einer geringfügigen Verringerung der ökologischen Wirkungen, weil die Transportlasten sich für Hüttensand und SlagCEM-Material gleichermaßen verringern. Die Aussage bleibt bestehen, dass eine Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material in allen betrachteten Wirkungskategorien zu einer Erhöhung der Lasten führt.

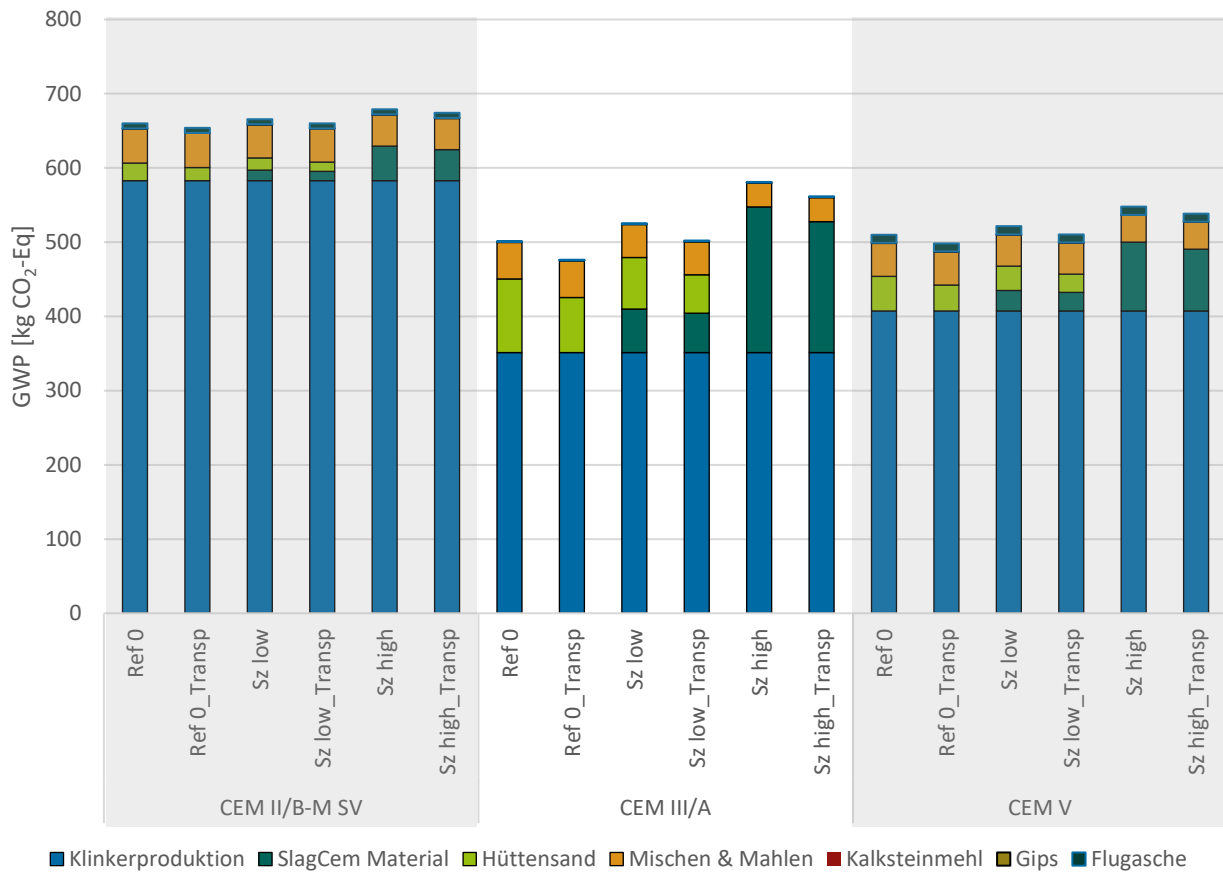


Abbildung 5-8 Sensitivität 3: Verringerung der Transportdistanz - Erderwärmungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE. Substitution von Hüttensand.

Abbildung 5-9 stellt das Ergebnis für die Substitution von Klinker dar³¹. Eine Reduzierung der Transportdistanzen führt zu einer Verringerung der Lasten um bis zu 6 % in den betrachteten Systemen. Durch die Verringerung der Transportdistanzen ändert sich nicht die Grundaussage der Bilanz: Je mehr Klinker durch SlagCEM-Material substituiert wird, desto stärker sinkt das GWP.

³¹ Da bei der Zementart CEM II A-LL kein Hüttensand in der Zusammensetzung enthalten ist, verändert sich das Ergebnis im Szenario Ref 0 nicht.

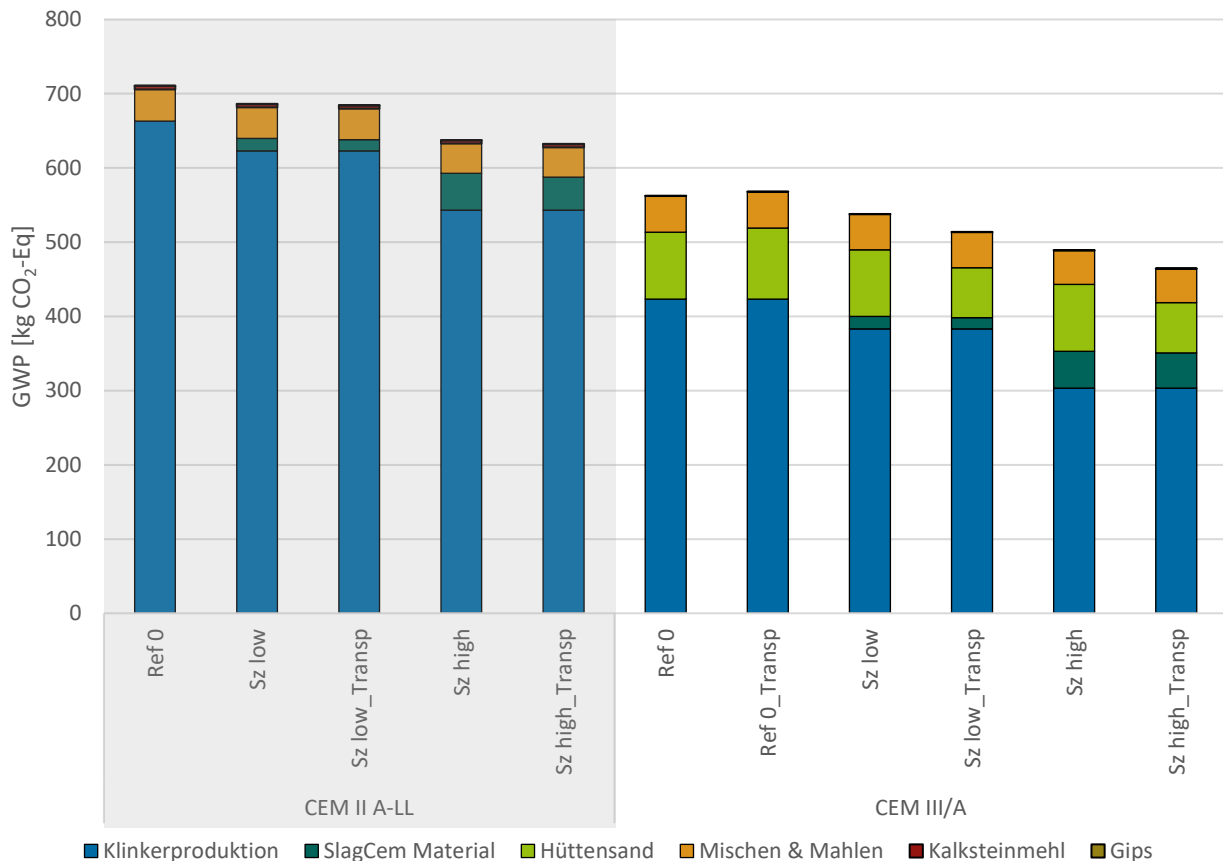


Abbildung 5-9 Sensitivität 3: Verringerung der Transportdistanz - Erderwärmungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE. Substitution von Klinker.

Für die Kategorie EP sind die Ergebnisse analog zum GWP zu bewerten: sowohl gegenüber Ref 0 als auch Ref 0_Transp (für CEM III/A) sinken die Lasten mit steigendem Anteil an SlagCEM-Material. Für die verbleibenden Kategorien zeigt sich für die Zementart CEM III/A, dass die ökologischen Wirkungen gegenüber dem Referenzfall um 9-15 % sinken. Daher sind die Ergebnisse nun abweichend vom Basisfall sowohl in Sz low als auch Sz high geringer als in Ref 0. Dennoch steigen im Vergleich zu Ref 0_Transp weiterhin die Lasten mit steigendem Anteil an SlagCEM-Material. Bei der Zementart CEM II A-LL zeigt sich, dass die Lasten im Vergleich zum Basisfall sinken, im Vergleich zu Ref 0 jedoch mit steigendem Anteil an SlagCEM-Material steigen.

Abschließend soll in Tabelle 5-5 qualitativ gezeigt werden, wie sich die verringerte Transportdistanz auf die Ergebnisse auswirkt. Als Referenz wird Zement gewählt, bei dem kein Hüttensand oder Klinker substituiert wird (Ref 0_Transp³²). Erhöhen sich die Lasten gegenüber dieses Referenzfalls durch Einbringen von SlagCEM-Material wird dies durch ↑ angezeigt. Eine Verringerung der Lasten wird durch ↓ angezeigt. Zeigt sich eine Abweichung in der Tendenz der Ergebnisse (↑ bzw. ↓), wird dies durch einen roten Pfeil hervorgehoben. Durch die Veränderung der Transportdistanzen ergeben sich keine die Aussage betreffenden Änderungen.

³² Im Falle von CEM II A-LL ist Ref 0 identisch zu Ref 0_Transp

Tabelle 5-5 Einfluss der Transportdistanz auf die verschiedenen Wirkungskategorien.
 ↑=Die Lasten sind erhöht gegenüber keiner Substitution von Hüttensand oder Klinker (Ref 0). ↓=Die Lasten sind geringer gegenüber keiner Substitution von Hüttensand oder Klinker (Ref 0).

| Wirkungskategorie | Substitution von... | Mittlere Transportdistanz (Basisfall) | Minimale Transportdistanz (Sensitivitätsanalyse) |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|--|
| GWP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↓ | ↓ |
| EP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↓ | ↓ |
| AP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| KEA | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| POFP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |
| ADP | Hüttensand | ↑ | ↑ |
| | Klinker | ↑ | ↑ |

5.3 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.3.1 Sensitivitätsanalysen

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Ergebnisse robust gegenüber einer Veränderung der Transportdistanzen und einer Veränderung des Reduktionsmittels sind. Die Wahl der Allokation kann Einfluss auf die Aussage der Ergebnisse nehmen:

- Bei einer physikalischen Allokation zeigt sich, dass die Substitution von Klinker durch SlagCEM-Material über alle Wirkungskategorien zu einer Erhöhung der Lasten führt. Im Basisfall (ökonomische Allokation) ist das für die Wirkungskategorien GWP und EP nicht der Fall.
- Für das GWP und das POFP zeigen sich relevante Änderungen, wenn statt einer ökonomischen Allokation die Substitutionsmethode angewendet wird. Bei der Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material zeigt sich, dass die Lasten in den Kategorien GWP und POFP sinken. Dies ist auch bei der Substitution von Klinker durch SlagCEM-Material in der Kategorie POFP zu beobachten. Im Basisfall (ökonomische Allokation) steigen die Lasten in den genannten Kategorien und Fällen.
- Bei der Reduktion des SlagCEM-Materials ohne Kohlenstoff steigen die Lasten bei allen Wirkungskategorien minimal bis moderat und haben keinen Einfluss auf die Aussage der Ergebnisse.
- Eine Verringerung der Transportdistanzen führt zu einer Verringerung der Ergebnisse gegenüber den ursprünglich angesetzten Distanzen. Die Aussage der Gesamtbilanz ändert sich nicht.

5.3.2 Einschränkungen

Einschränkungen ergeben sich zunächst durch die Datenqualität (siehe auch 3.5). Beim Vergleich zwischen Klinker, Hüttensand und SlagCEM-Material liegt eine unterschiedliche Datenlage vor:

- Die Prozessschritte zur Bereitstellung von SlagCEM-Material wurden durch Expert*innen innerhalb des Projektes erhoben und aktuelle Primärdaten finden Einzug in die Bilanz.
- Die Klinkerproduktion konnte über Sekundärdaten (hauptsächlich die des vdz) abgebildet werden.
- Hüttensand wurde anhand von Sekundärdaten modelliert. Bei der Bereitstellung von Hochofenschlacke (Vorprodukt des Hüttensandes) sind geographischer Bezugsraum und zeitliche Repräsentativität des ecoinvent Datensatzes („*granulated blast furnace slag production - BR*“) wenig passend für Ziel und Untersuchungsrahmen des Projektes. Schlussendlich sind aber die sich daraus ergebenden Lasten über die gesamte Prozesskette gesehen von untergeordneter Natur. So hat auch eine Verringerung der Transportdistanzen (Sensitivität 3) keinen Einfluss auf die Gesamtaussage der Ergebnisse.

Eine weitaus größere Einschränkung der Bilanz ergibt sich daraus, dass die Daten zur Bereitstellung des SlagCEM-Materials einen nicht ausgereiften Stand der Technik widerspiegeln. Damit SlagCEM-Material zukünftig in Zement eingesetzt werden kann, ist eine bedeutende Prozessoptimierung notwendig. Das kann dazu führen, dass sich auch der Einsatz der Reduktionsmittel ändert. Daraus kann sich als unmittelbare Folge ergeben, dass sich die Gesamtaussage der Bilanz verändert. Folglich muss die Forschung dahingehend abgeschlossen werden, dass eine Aussage möglich ist, ob und in welchem Umfang SlagCEM-Material eingesetzt werden kann. Gleichzeitig muss der Prozesspfad so verbessert werden, dass es keine (bzw. tolerierbare) Qualitätseinbußen gibt. Dieser Bericht kann also nur als Zwischenstand zum Einsatz von LD-Schlacke in Zement verstanden werden.

Eine weitere nicht zu vernachlässigende Einschränkung ergibt sich durch die ökonomische Allokation im System Stahl-Hüttensand-SlagCEM-Material. Das teilweise Allokieren der Lasten der Stahlerzeugung auf die Produkte Hüttensand und SlagCEM-Material hat einen maßgeblichen Einfluss an den Gesamtlasten der beiden Produkte. Wird Hüttensand durch SlagCEM-Material ersetzt, nivellieren sich die Auswirkungen, weil für beide Produkte der gleiche ökonomische Wert angesetzt wurde. Bei der Substitution von Klinker durch SlagCEM-Material können die gewählten Allokationsfaktoren aber ausschlaggebend für die Bilanz sein.³³ Da ökonomische Werte immer Schwankungen unterliegen, ergeben sich (quasi entkoppelt von den tatsächlichen Umweltauswirkungen) Verschiebungen bei den Ergebnissen. Dem wird auf der einen Seite zwar dadurch entgegengewirkt, dass ein fünf-Jahres Mittel für den Marktwert von Schlacke und Stahl angesetzt wurde, andererseits ist es möglich, dass der Datensatz „*Gran. Schlacke, Zunder u.a. Abfälle der Stahlherst.*“ den ökonomischen Wert von Schlacke unterschätzt.³⁴

Weiterhin ergeben sich Einschränkungen in den Sensitivitäten bei der physikalischen Allokation und Substitutionsmethode, da das jeweilige Hintergrundsystem nicht angepasst wurde. Hierdurch ergibt sich eine Schräglage in der Methodik und es kann nicht bilanziert werden, inwiefern diese Ansätze aus dem Hintergrundsystem heraus einen Einfluss auf das Ergebnis nehmen könnten.

³³ Die physikalische Allokation kann als Grenzwertbetrachtung verstanden werden, nach derer Schlacke und Stahl den gleichen Marktwert haben.

³⁴ Der Datensatz ist eine Aggregation von verschiedenen Koppel- und Abfallprodukten der Stahlherstellung, die teilweise einen niedrigeren Marktwert als granuliert Hochofenschlacke haben.

Abschließend soll noch hervorgehoben werden, dass die Bilanz in Art und Methodik nicht den Normen einer Umweltproduktdeklaration (EN 15804) folgt. Ebenso werden EPDs auch vielfach in „LCA for experts“ und nicht in ecoinvent erstellt. Bei der Erstellung des Berichts wurden keine Daten zurückgehalten, weshalb es möglich ist auf dieser Basis eine EPD zu erstellen. Die Erstellung einer EPD wird allerdings erst relevant, sobald es sich bei SlagCEM-Material um ein marktfähiges Produkt handelt.

5.3.3 Fazit

Maßgeblichkeit des Projektes: Die Zementindustrie ist nach vdz (2020) mit einem Ausstoß von ~20 Mio. t CO₂-Eq/a (Stand Deutschland 2019)³⁵ einer der großen Emittenten von Treibhausgasen. Viele führende Zementunternehmen und Branchenverbände, wie der vdz oder die Global Cement and Concrete Association (GCCA), sehen vor bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen. Derzeit werden bestehende Maßnahmen, wie eine Optimierung des Energieverbrauchs, die Substitution fossiler Brennstoffe durch (idealerweise biogene) Sekundärbrennstoffe oder die Zement einsparung durch differenzierten Zementeinsatz im Beton weiter ausgereizt.

In diese Maßnahmenliste gliedert sich auch die Reduzierung des Klinkerfaktors, wie dies durch den Einsatz von SlagCEM-Material stärker forciert werden könnte. Können CO₂-Eq. Emissionen durch diese Maßnahmenliste nicht mehr weiter reduziert werden, muss in letzter Instanz auf kostenintensive und technisch aufwändige Carbon-Capture-and-Utilization- (CCU) oder Carbon-Capture-and-Storage- (CCS) Lösungen zurückgegriffen werden.

Die Erschließung alternativer Rohstoffe für die Zementherstellung ist auch deswegen elementar, da die Verfügbarkeit von Hüttensand perspektivisch zurückgehen wird. Langfristig führt also auch die Substitution von Hüttensand zur Substitution von Zementklinker, weil durch die Nutzbarmachung von LD-Schlacke mehr Ressourcen zur Zementklinkersubstitution zur Verfügung stehen. Die Nutzbarmachung von Stahlwerksschlacken wie der LD-Schlacke ist daher ein Imperativ. Weitere Forschungsvorhaben, die beispielsweise auch den Einsatz von Elektroofenschlacke testen (Märker Gruppe 2024), finden bereits statt.

Rahmenbedingungen der Bilanzierung: Bilanziert wird von der Rohstofferschließung bis zur Bereitstellung von Zement. Die ökobilanzielle Abbildung des SlagCEM-Materials setzt beim Stand der Forschung an und quantifiziert die Lasten des Materials im Ex-Ante Ansatz. Referenz ist dabei Deutschland im Jahr 2023. Es wird also simuliert, dass der Einsatz von SlagCEM-Material bereits im großtechnischen Maßstab ohne Probleme möglich ist. Bei der Modellierung lautet die Prämisse, dass SlagCEM-Material entweder Klinker und/oder Hüttensand im Verhältnis 1:1 ersetzen kann.

Ergebnisse der Bilanzierung: Unter diesen Rahmenbedingungen stellen sich die **Ergebnisse** folgendermaßen dar:

- Bei einer **Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material** ergibt sich bei den betrachteten Wirkungskategorien immer eine Schlechterstellung der Ergebnisse. Da die spezifischen Lasten pro t SlagCEM-Material im Vergleich zu Hüttensand teilweise mehr als doppelt so hoch ausfallen, können sich auch die Gesamtlasten pro Zementart erheblich erhöhen.
- **Kurzbegründung:** Die Prozessketten von Hüttensand und SlagCEM-Material weisen über weite Teile eine hohe Kongruenz auf, allerdings führt die Reduktion von SlagCEM-Material insbesondere durch den Einsatz der entsprechenden Reduktionsmittel (Aluminium, Eisensilikat und ggf.

³⁵ Zum Vergleich der bundesdeutsche Gesamtausstoß beträgt 710 Mio. t CO₂ in 2019 (UBA 2024).

Kohle) zu deutlich höheren Umweltauswirkungen (in den betrachteten Kategorien) als das bei Hüttensand der Fall ist.

- Bei der **Substitution von Klinker** ergibt sich über die Wirkungskategorien ein gemischtes Ergebnis. Die Klinkerproduktion zeigt für das GWP und das EP höhere Lasten als das SlagCEM-Material, und niedrigere Lasten für AP, KEA, POFP und ADP. Dies bewirkt, dass bei der Substitution von Klinker die Lasten für das GWP und EP sinken, während sie bei den weiteren Wirkungskategorien ansteigen.
- **Kurzbegründung:** Die Klinkerherstellung erfordert einen deutlich höheren Strom- und Wärmeinsatz als die Bereitstellung von SlagCEM-Material. Zudem entstehen bei der Kalzinierung prozessbedingte geogene CO₂-Emissionen. Dies führt insbesondere beim GWP sowie beim EP zu deutlich höheren Umweltlasten im Vergleich zum SlagCEM-Material. In den übrigen Kategorien übersteigen jedoch die Umweltlasten der SlagCEM-Materialherstellung diejenigen der Klinkerherstellung. Dies liegt an der Kombination aus dem energieintensiven Schlackenreduktionsprozess, den allokierten Umweltlasten der Stahlproduktion und den längeren Transportwegen.

Einordnung der Ergebnisse: Als Ziel der Bilanz wurde formuliert, dass die Substitution von Klinker durch SlagCEM-Material zu einer Reduzierung der Umweltlasten führt und die Substitution von Hüttensand zu keiner maßgeblichen Schlechterstellung führt.

Die ökobilanzielle Berechnung zeigt trotz der genannten Rahmenbedingungen zunächst nicht die gewünschten Ergebnisse. Allerdings ergibt sich bei der Substitution von Klinker durch SlagCEM-Material in der Bilanz eine Reduktion im GWP. Die Erreichung dieses Ziels ist wichtig, denn für die Zementindustrie steht vor allem die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vordergrund. Damit hat SlagCEM-Material das Potenzial, einen Beitrag zur Dekarbonisierungsstrategie der Zementindustrie zu leisten. Die Substitution von Hüttensand durch SlagCEM-Material zeigt aber ernüchternde Ergebnisse. Die Umweltlasten sind für SlagCEM-Material in der Regel um den Faktor 2 höher als bei Hüttensand.

Zielpfad für SlagCEM-Material: Derzeit findet LD-Schlacke vielseitige Anwendungen, beispielsweise als Tragschicht im Straßenbau, als Drainagematerial im Landschaftsbau oder im Küstenschutz zur Sicherung von Bauwerken im Meer. Die Nutzung von LD-Schlacke im Zementsystem kann jedoch als der „Königsweg“ betrachtet werden. Plakativ ausgedrückt ersetzt die LD-Schlacke in diesem Fall nicht mehr eine vergleichsweise geringwertige Gesteinskörnung, sondern idealerweise Klinker – ein hochverarbeitetes Material mit einer hohen Umweltlast. Gelingt dieser Königsweg, profitieren Zementwerke und Stahlwerke gleichermaßen. Die Zementindustrie bekommt eine neue Ressource an die Hand, die insbesondere der Verknappung von Hüttensand entgegenwirken und gleichzeitig zur Dekarbonisierung beitragen kann. Die Stahlindustrie steigert die Attraktivität und damit perspektivisch auch den Marktwert eines ihrer Koppelprodukte.

Damit SlagCEM-Material aber Fuß fassen kann, müssen zwei große Hürden genommen werden. Im ersten Schritt muss sichergestellt werden, dass der Einsatz von SlagCEM-Material nicht die materialtechnischen Eigenschaften des Zielproduktes korrumpiert, also Zement mit definierten Qualitätseigenschaften. Diese Thematik und die sich daraus ergebende Forschungsbedarfe werden im Hauptband adressiert.

Im zweiten Schritt muss die Prozesskette für SlagCEM-Material so angepasst werden, dass die Umweltauswirkungen reduziert werden. Dabei könnte man z. B. die Umweltauswirkungen von Hüttensand als Benchmark heranziehen. Wie bereits angesprochen unterscheiden sich die Prozesspfade für Hüttensand und SlagCEM-Material hauptsächlich beim Reduktionsschritt. In der Folge muss also genau hier angesetzt werden, wenn verringerte Umweltlasten erzielt werden sollen.

Der Gestaltungsraum ist allerdings eingeschränkt, da bei der Reduktion gewisse Elemente (Fe, Si, Al) in die LD-Schlacke eingebracht werden müssen, damit SlagCEM-Material später die geforderte Zielzusammensetzung erreicht. Allerdings ist denkbar, dass diese Zuschlagsmaterialien nicht wie in dieser Studie aus Primärmaterial mit fest definierten Eigenschaften stammen, sondern diese Materialien teilweise oder vollständig abfallstämmige Sekundärmaterialien sind. Damit ließe sich (in der hier gewählten Bilanzierungsmethodik) ein hohes Minderungspotential erschließen.

Empfehlungen: Der vorliegende Bericht konnte nicht alle Fragen zum Einsatz von SlagCEM-Material abschließend beantworten. In der Folge ergeben sich für die Wissenschaft und Zementindustrie folgende Empfehlungen:

- Innerhalb der **Zementindustrie** muss ein Umgang mit der durch die Transformation hin zu „grünem“ Stahl wegfallende Hochofenroute, inklusive des aus der Hochofenschlacke gewonnenen Hüttensands, gefunden werden. Auch wenn die Umweltwirkungen von SlagCEM-Material höher als die von Hüttensand sind, sind sie, zumindest was GWP und EP betrifft, geringer als bei Klinker. Das heißt, bevor wegfallender Hüttensand durch einen wieder steigenden Klinkerfaktor ausgeglichen werden muss, ist ein Alternativmaterial wie SlagCEM-Material die bessere Möglichkeit, um CO₂-Eq einzusparen. Weiterhin ist derzeit der Klinkerfaktor noch so hoch, dass keine Konkurrenzsituation zwischen Hüttensand und einem zukünftigen Produkt wie SlagCEM-Material besteht: die Wahrscheinlichkeit, dass SlagCEM-Material Klinker ersetzen wird, ist deutlich höher, als dass SlagCEM-Material Hüttensand verdrängen könnte.
- Für die Etablierung von LD-Schlacke im Zementssystem bis zur Marktreife sind weitere **wissenschaftliche Untersuchungen** erforderlich. Dabei steht die Minimierung der mit dem SlagCEM-Material verbundenen Umweltbelastungen im Fokus. Zur Sicherstellung einer umweltgerechten Entwicklung ist die kontinuierliche ökobilanzielle Begleitung des Materials essenziell. Darüber hinaus ist eine aktualisierte Ökobilanz erforderlich, sobald in der Zementindustrie Fortschritte im Zusammenhang mit dem SlagCEM-Material oder alternativen Substituten für Hüttensand und Klinker erzielt werden. Auf einer übergeordneten Ebene sollte zudem analysiert werden, wie sich die Gesamtheit der Umweltbelastungen aus der Stahl- und Zementindustrie. Beide Industriezweige sind zur Zeit im Umruch begriffen und durch zukünftige Veränderungen wie beispielsweise durch die Einführung von direkt reduziertem Stahl, den Wegfall von Hochofenschlacke, die Nutzbarmachung alternativer Rohstoffe oder den Einsatz von CCSU-Technologien (Carbon Capture, Storage and Utilization), zeichnen sich maßgebliche Änderungen der Umweltlasten ab.

6. Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2023): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, Daten für die Jahre von 1990 bis 2022. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/>.
- AG Fernwärme (2023): Hauptbericht 2022. Frankfurt. Online verfügbar unter <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht>.
- ArcelorMittal (2022): Granulated Blast Furnace Slag, Environmental Product Declaration. Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hg.). Online verfügbar unter https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/re-source/sources/76f95cff-60d0-4e13-8c77-6f4ce3296b08/Granulated_Blast_Furnace_Slag_14785.pdf?version=00.02.000.
- Bennamoun, L.; Arlabosse, P.; Léonard, A. (2013): Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, S. 29–43. DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.043.
- Bulach, W.; Dehoust, G.; Mayer, F.; Möck, A. (2022): Öko-/Klimabilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings im Auftrag der workinghead GmbH & Co. KG. Unter Mitarbeit von Green Delta GmbH. Öko-Institut e.V.
- CML (2016): CML-IA Characterisation Factors. Universiteit Leiden (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>.
- Destatis (2024): Produktion im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis (9-Steller), 42131-0004. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=42131-0004&bypass=true&levelindex=0&levelid=1727183499231#abreadcrumb>.
- Europäische Kommission (2021): EMPFEHLUNG (EU) 2021/2279 DER KOMMISSION vom 15. Dezember 2021 zur Anwendung der Methoden für die Berechnung des Umweltfußabdrucks zur Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen entlang ihres Lebenswegs ((EU) 2021/2279), Anhang I. Methode zur Berechnung des Produktumweltfußabdrucks. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:75e0de0f-5e6d-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_2&format=PDF.
- Fraunhofer ISE (2024): Energy-Charts, Nettostromerzeugung in Deutschland, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme. Online verfügbar unter https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE.
- Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Althaus, H.-J.; Doka, G.; Dones, R.; Heck, T.; Hellweg, S.; Hischier, R.; Nemecek, Thomas; Rebitzer, Gerald; Spielmann, M. (2004): The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp) (10, 3–9). *Int J Life Cycle Assessment* (Hg.).
- GreenDelta (2024a): Download | openLCA.org. GreenDelta (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.openlca.org/download/>, zuletzt aktualisiert am 24.05.2024, zuletzt geprüft am 24.05.2024.
- GreenDelta (2024b): openLCA LCIA methods. Version v.2.3.2. Berlin.
- Harder, J. (2019): Recycling von Schlacke. Bauverlag BV GmbH (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.recovery-worldwide.com/de/artikel/recycling-von-schlacke-3528045.html>.
- Haupt, M.; Kägi, T.; Hellweg, S. (2018): Modular life cycle assessment of municipal solid waste management. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 79, S. 815–827. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.035.
- Heindl, A. (2016): Praxisbuch Bandtrocknung, Grundlagen, Anwendung, Berechnung 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- IPCC (2023): Climate change 2022, Mitigation of climate change : Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- ISO 14040: DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006_ + Amd_1:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14040:2006_ + A1:2020, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 14044: DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006_ + Amd_1:2017_ + Amd_2:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_ + A1:2018_ + A2:2020, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 14067: DIN EN ISO 14067:2019-02, Treibhausgase_ - Carbon Footprint von Produkten_ - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO_14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14067:2018, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Märker Gruppe (2024): Innovatives Forschungsprojekt „WAGEOS2SHS“ erhält Förderung. Online verfügbar unter <https://www.maerker-gruppe.de/innovatives-forschungsprojekt-erhaelt-foerderung/>.
- UBA (2024): Kohlendioxid-Emissionen, Treibhausgasemissionen in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxid-emissionen#herkunft-und-minderung-von-kohlendioxid-emissionen>.
- vdz (2020): Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.). Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf.
- vdz (2022a): Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.). Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.vdz-online.de/ressourcenschonung>.
- vdz (2022b): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.). Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_Environmental_Data_2022.pdf.
- vdz (2023): Zementindustrie im Überblick 2023/2024. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.). Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://vdz.info/ziue23>.
- vdz (2024): Anforderungen an eine CO2-Infrastruktur in Deutschland, Voraussetzungen für Klimaneutralität in den Sektoren Zement, Kalk und Abfallverbrennung. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.). Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_CO2-Infrastruktur-Deutschland.pdf.
- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.

7. Anhang

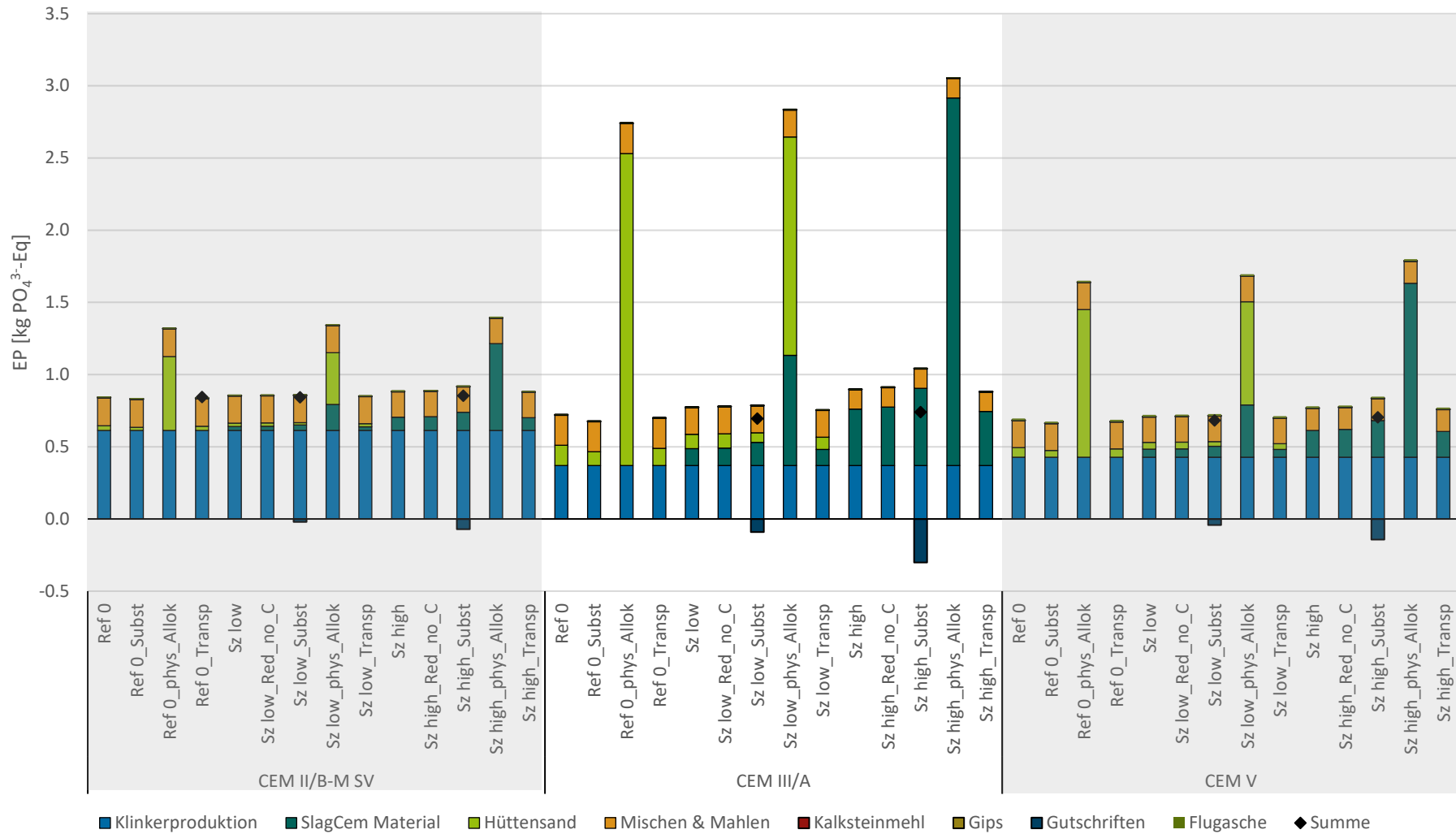
A-1. Pedigree-Matrix

Tabelle A 1 Pedigree-Matrix nach Frischknecht et al. (2004)

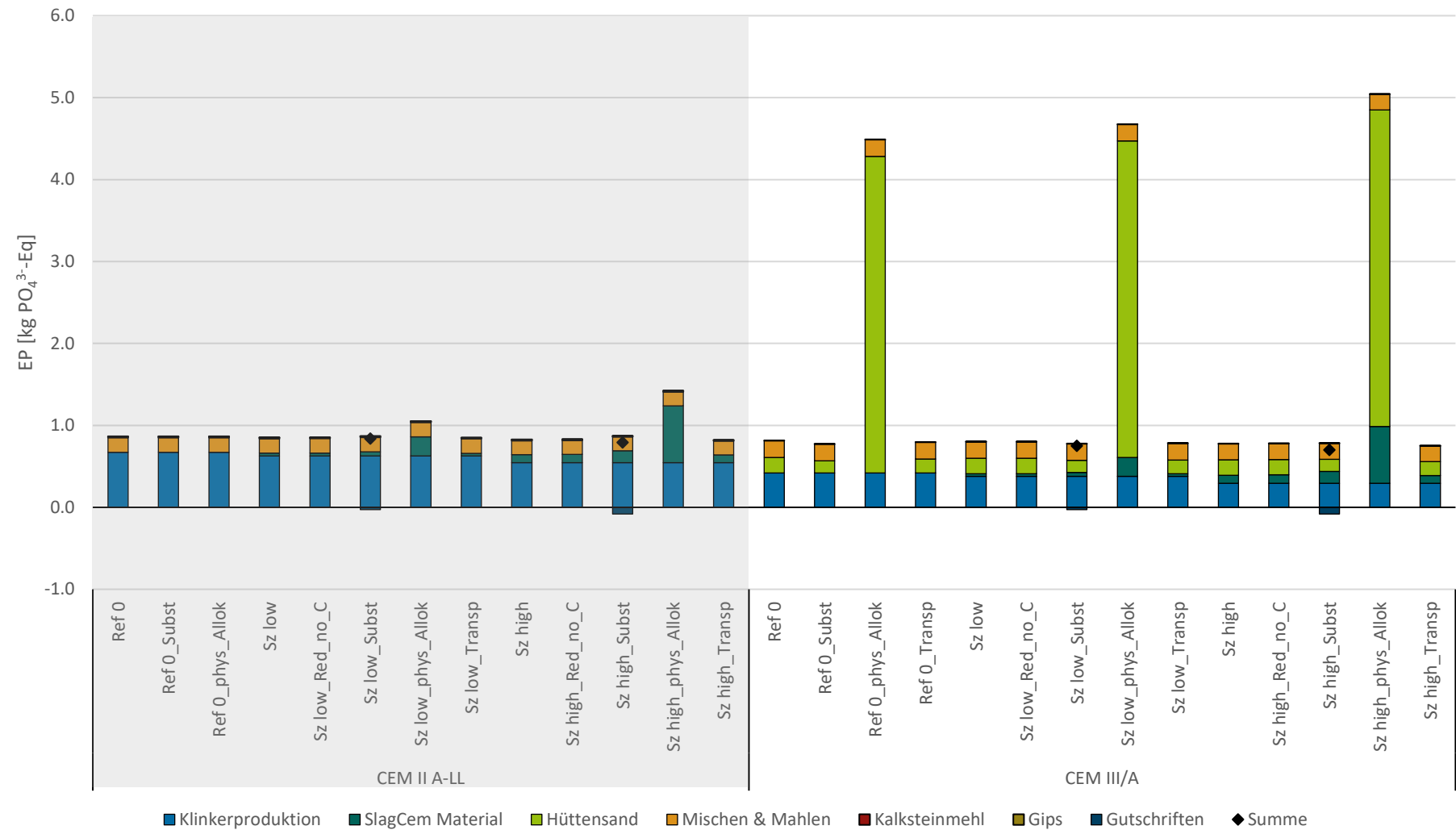
| Indikator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|--|--|--|--|--|
| Zuverlässigkeit der Daten | geprüfte Daten auf der Grundlage von Messungen | geprüfte Daten teilweise auf der Grundlage von Annahmen | nicht verifizierte Daten, die teilweise auf Annahmen beruhen | Qualifizierte Schätzungen | Nicht-qualifizierte Schätzungen |
| Vollständigkeit | Repräsentative Daten von allen Standorten, die für den betrachteten Markt relevant sind, über einen angemessenen Zeitraum, um normale Schwankungen auszugleichen | Repräsentative Daten von > 50% der für den betrachteten Markt relevanten Standorte über einen angemessenen Zeitraum, um normale Schwankungen auszugleichen | Repräsentative Daten von nur einigen Standorten (<< 50%), die für den betrachteten Markt relevant sind, oder > 50% der Standorte, aber aus kürzeren Zeiträumen | Repräsentative Daten von nur einem Standort, der für den betrachteten Markt relevant ist, oder von mehreren Standorten, aber aus kürzeren Zeiträumen | Repräsentativität unbekannt oder Daten von einer kleinen Anzahl von Standorten und aus kürzeren Zeiträumen |
| Zeitliche Korrelation | Weniger als 3 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes | Weniger als 6 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes | Weniger als 10 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes | Weniger als 15 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes | Alter der Daten nicht bekannt oder mehr als 15 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes |
| Geographische Korrelation | Daten aus dem untersuchten Gebiet | Durchschnittsdaten aus einem größeren Gebiet, in dem das untersuchte Gebiet enthalten ist | Daten aus Gebieten mit ähnlichen Produktionsbedingungen | Daten aus einem Gebiet mit leicht ähnlichen Produktionsbedingungen | Daten aus unbekanntem oder deutlich anderem Gebiet (Nordamerika statt Naher Osten, OECD-Europa statt Russland) |
| Technologische Korrelation | Daten aus den untersuchten Unternehmen, Prozessen und Materialien | Daten von untersuchten Verfahren und Materialien (d. h. identische Technologie), aber von verschiedenen Unternehmen | Daten aus den untersuchten Prozessen und Materialien, aber aus einer anderen Technologie | Daten über verwandte Verfahren oder Materialien | Daten über verwandte Prozesse im Labormaßstab oder aus anderen Technologien |

A-2. Sensitivitätsanalysen – weitere Wirkungskategorien

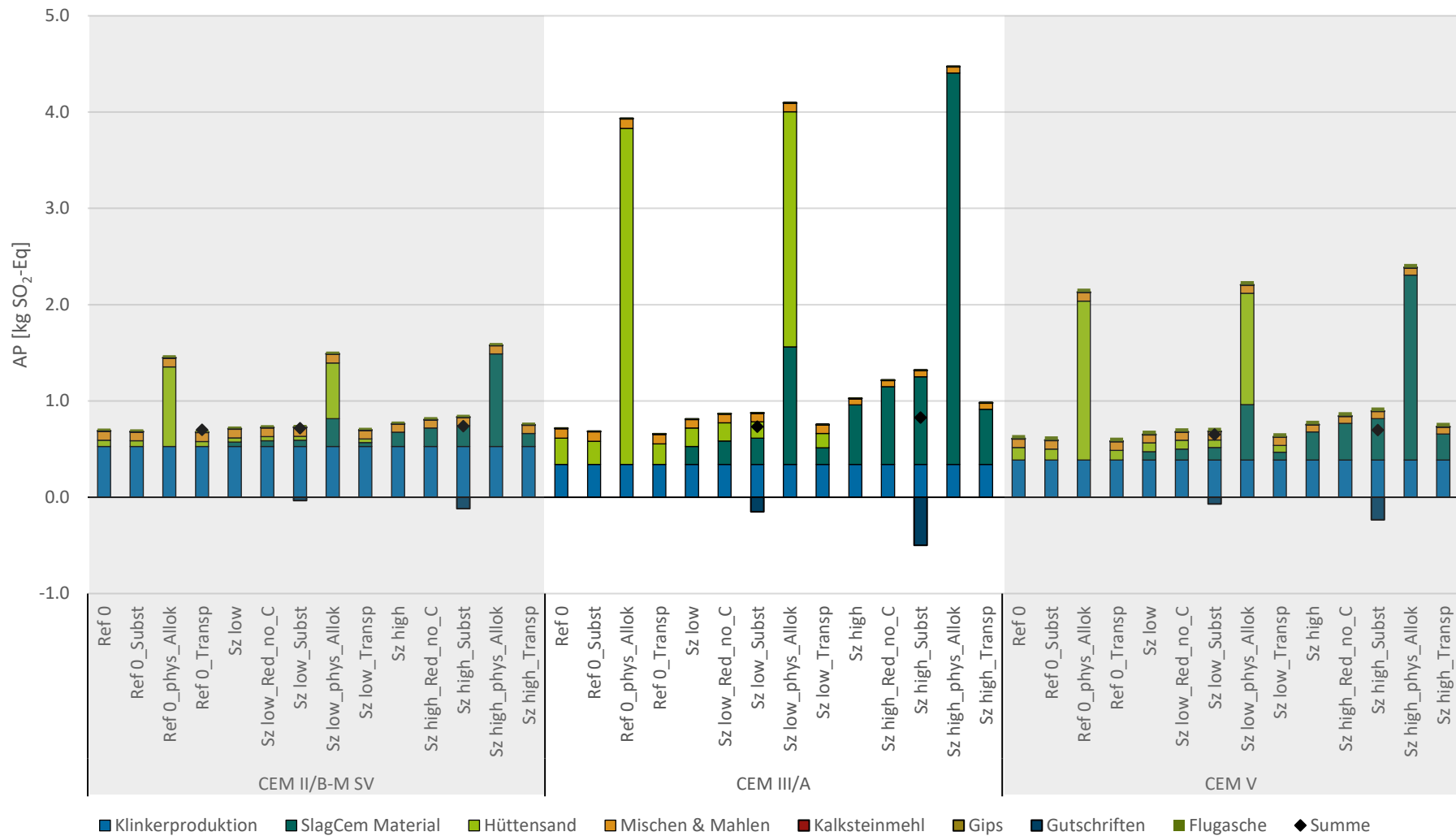
Sensitivitätsanalysen: Eutrophierungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE



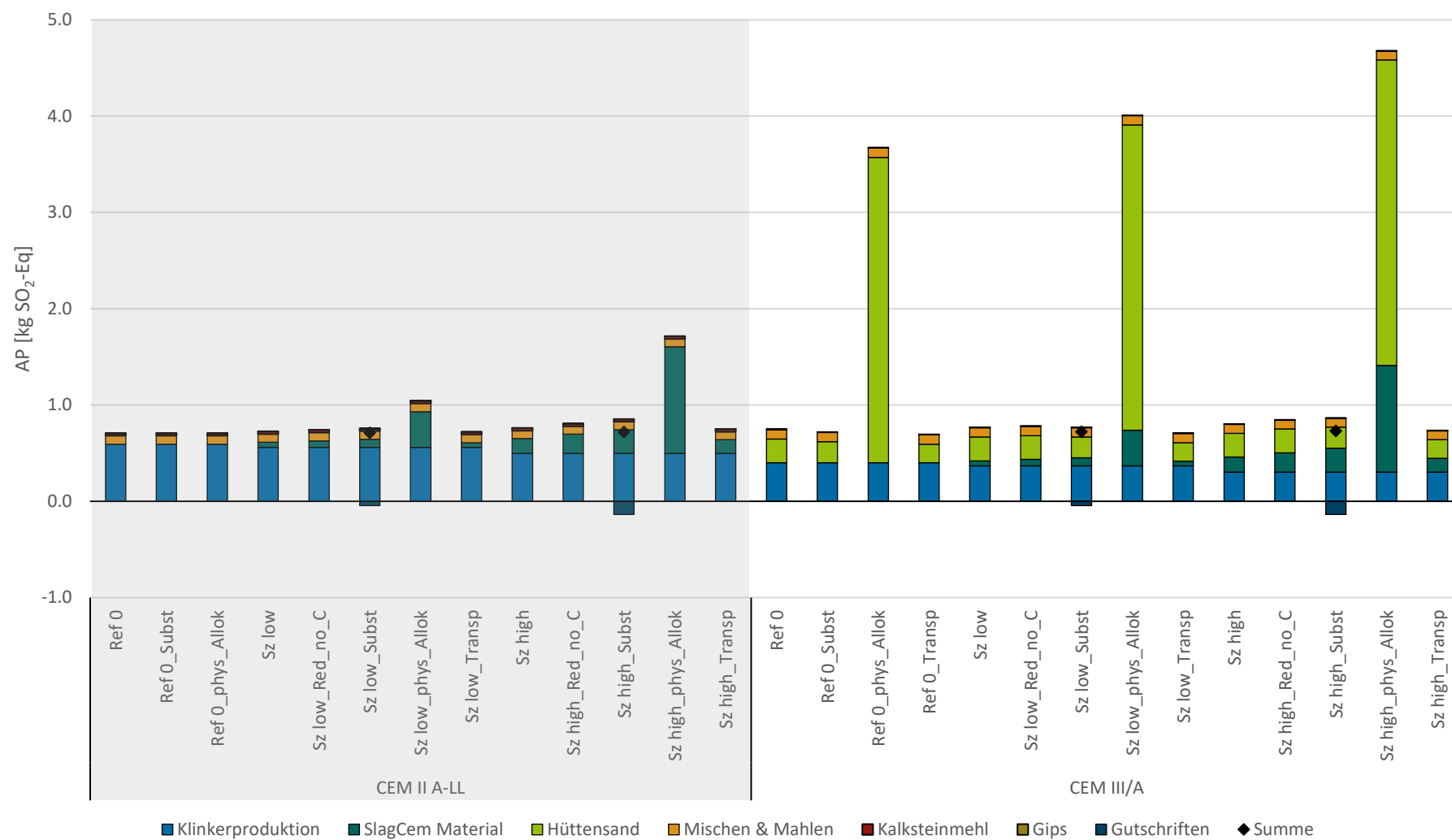
Sensitivitätsanlaysen: Eutrophierungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE



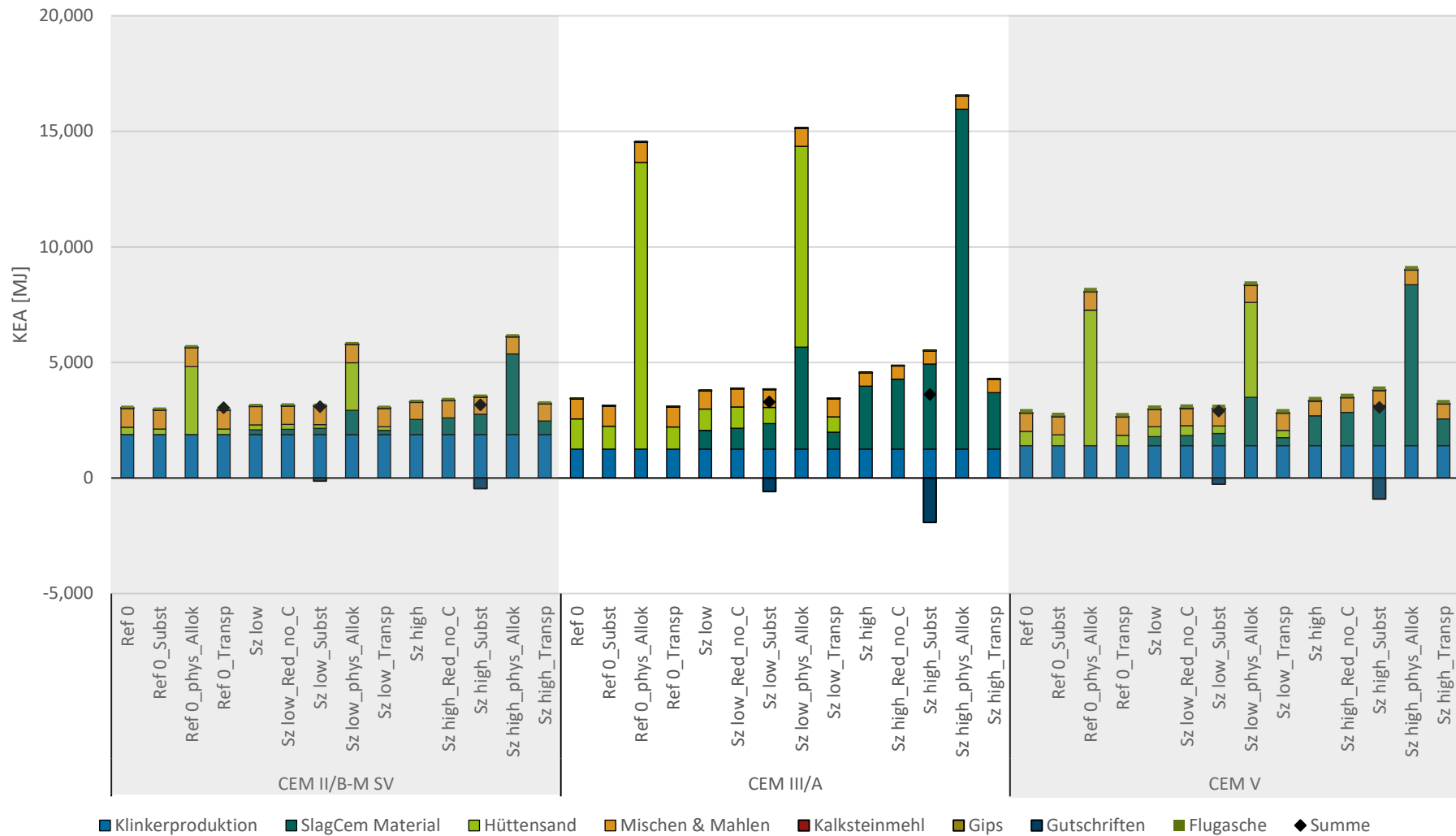
Sensitivitätsanalysen: Versauerungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE



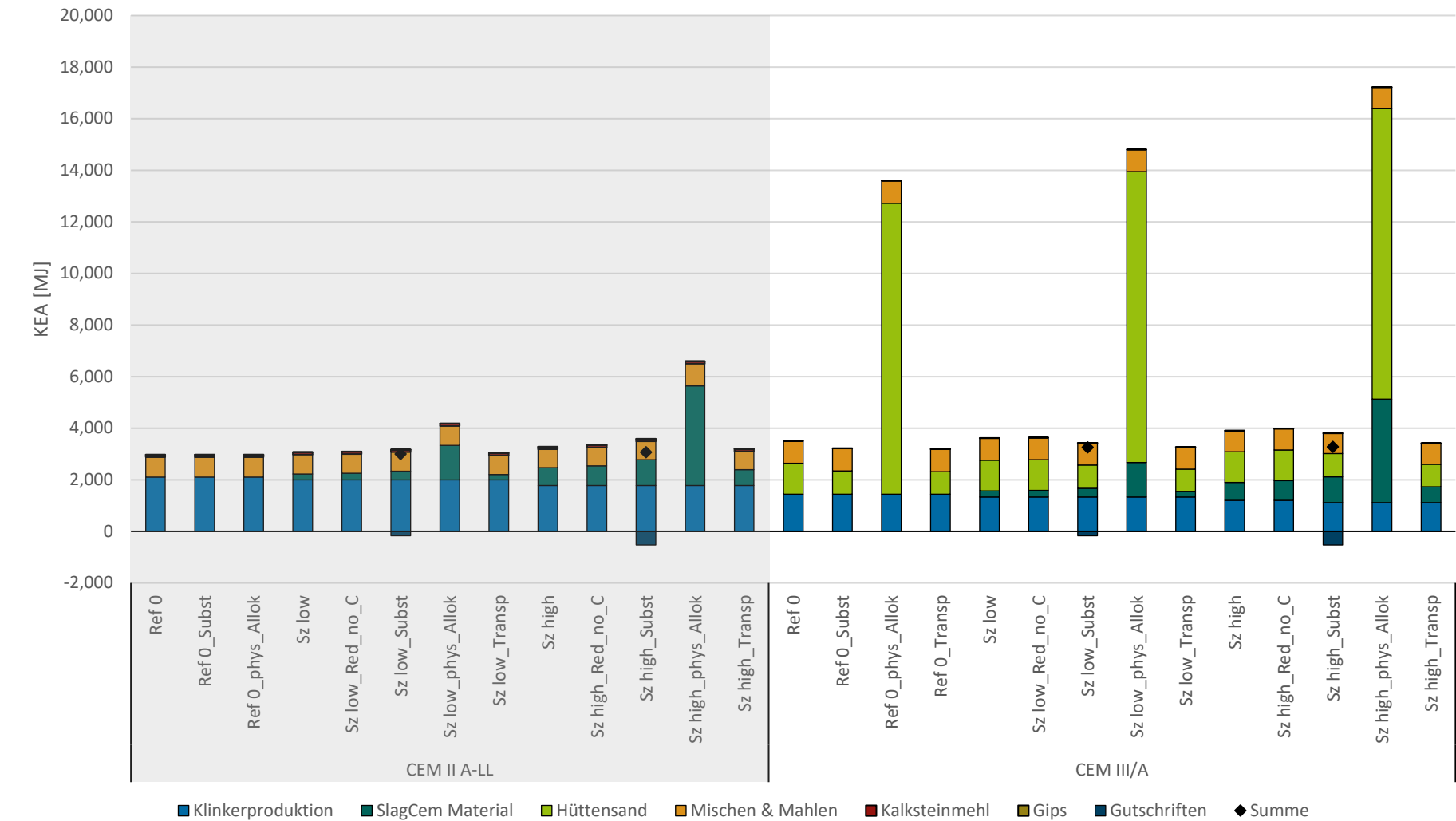
Sensitivitätsanalysen: Versauerungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE



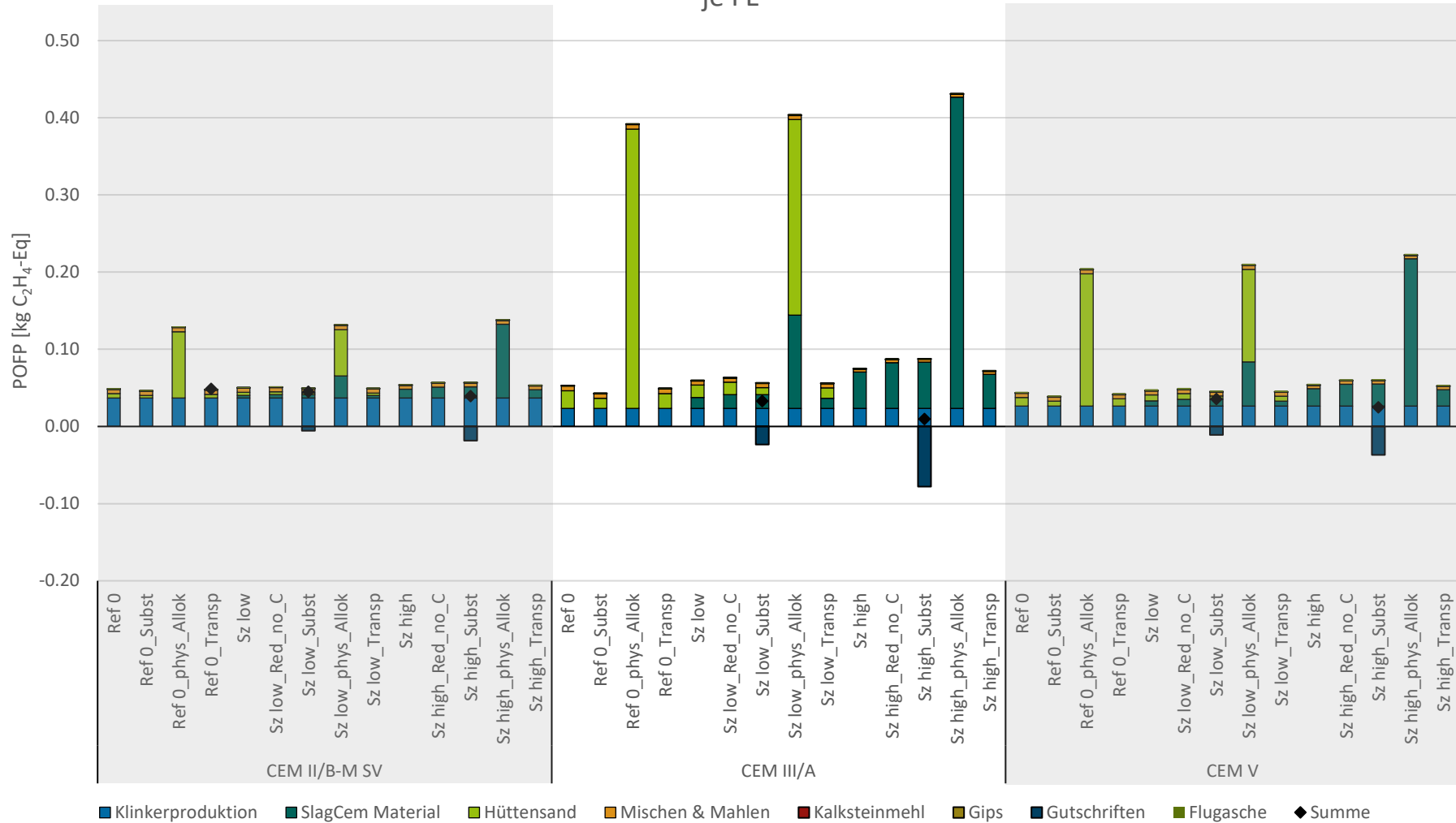
Sensitivitätsanalysen: Kumulierter Energieaufwand CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE



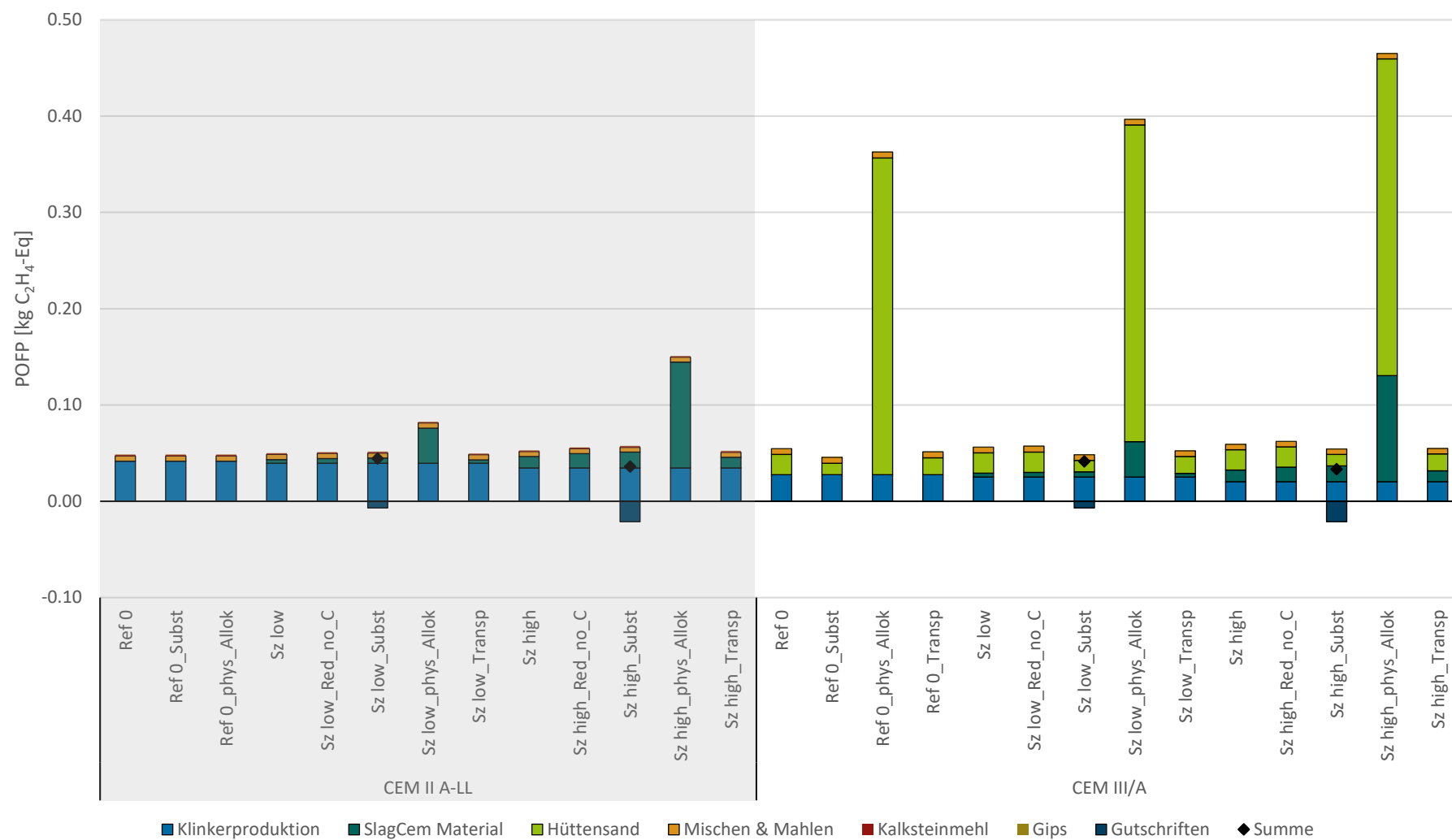
Sensitivitätsanlaysen: Kumulierter Energieaufwand CEM II/A-LL und CEM III/A je FE



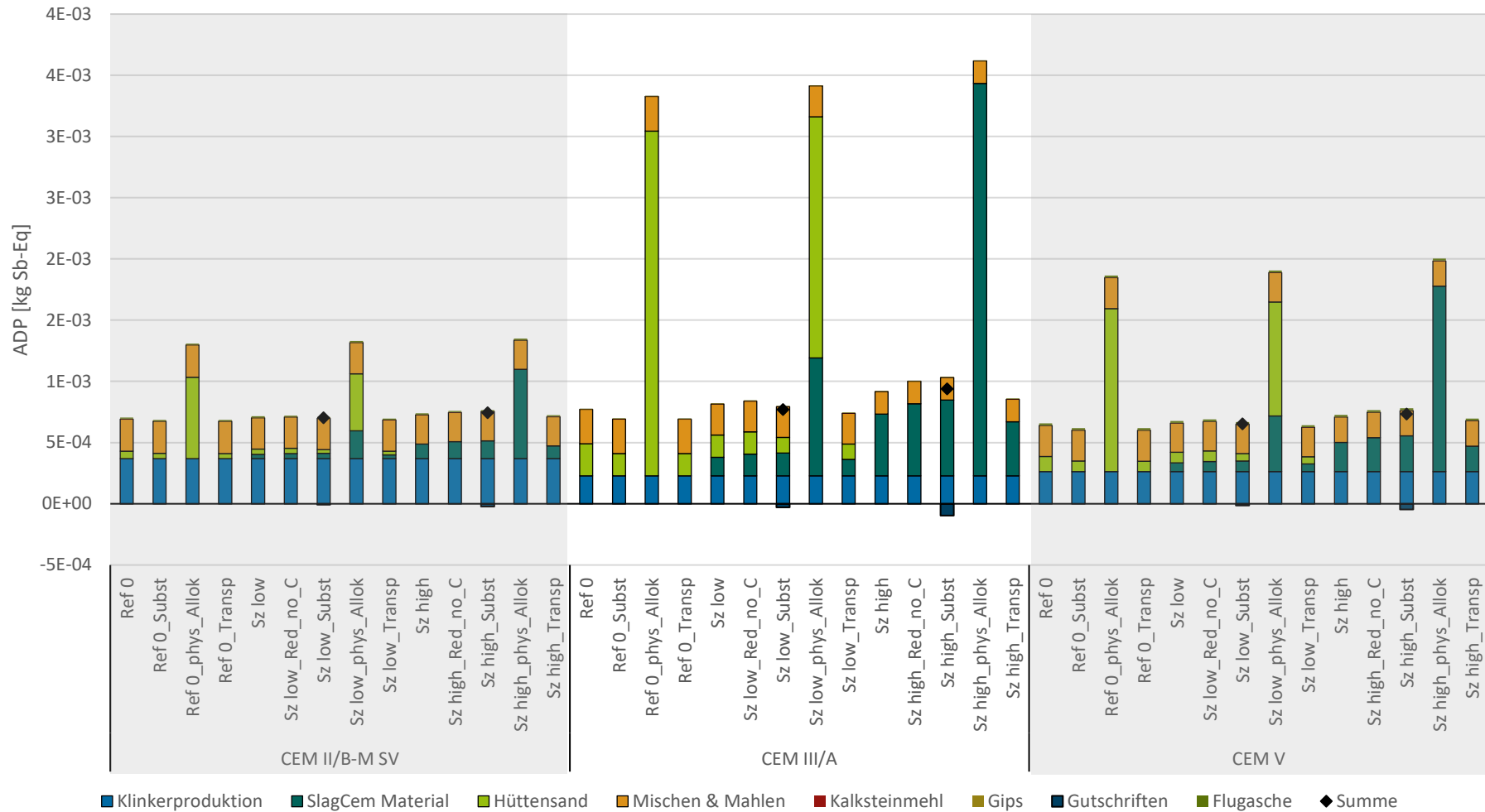
Sensitivitätsanlaysen: Photochemisches Ozonbildungspotenzial CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE



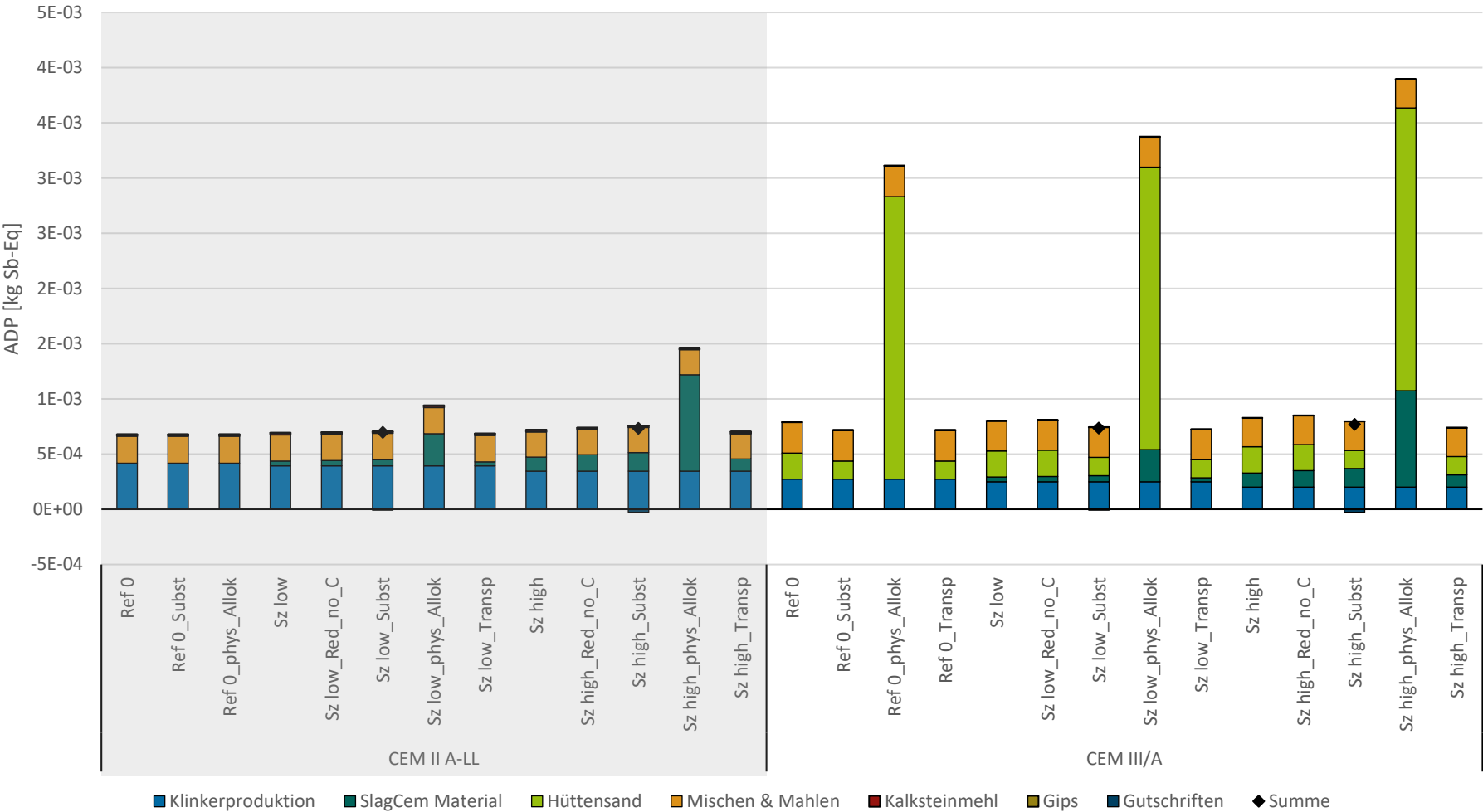
Sensitivitätsanalysen: Photochemisches Ozonbildungspotenzial CEM II/A-LL und CEM III/A je FE



Sensitivitätsanlaysen: Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen CEM II/B-M SV, CEM III/A, CEM V je FE



Sensitivitätsanlaysen: Verknappungspotenzial abiotischer Ressourcen CEM II/A-LL und CEM III/A
je FE





ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH

Wilckensstr. 3
D - 69120 Heidelberg
Telefon +49 (0)6 221. 47 67 - 0
Telefax +49 (0)6 221. 47 67 - 19
www.ifeu.de

Benedikt Kauertz Tel.-57
E-Mail benedikt.kauertz@ifeu.de

Christian Dierks Tel.-602
E-Mail christian.dierks@ifeu.de

Joachim Reinhardt Tel.-59
E-Mail joachim.reinhardt@ifeu.de

Kritische Begutachtung der Studie „Ökobilanz zur Gewinnung von hochwertigen Zementen aus Stahlwerksschlacken und Rückgewinnung von Sekundärmetallen“

Abschlussbericht der kritischen Prüfung vom 15. Januar 2025

Hintergrund und Ziel der kritischen Prüfung

Der Prüfbericht bezieht sich auf die Studie „Ökobilanz zur Gewinnung von hochwertigen Zementen aus Stahlwerksschlacken und Rückgewinnung von Sekundärmetallen“ vom Dezember 2024, die vom Öko-Institut e.V. Darmstadt im Rahmen des Projektes „SlagCEM – Hochwertige Zemente und Roheisen aus Stahlwerksschlacken“ durchgeführt wurde. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (Re-Min)“ gefördert. Autor*innen der Ökobilanz sind Dr. Felix Mayer und Hannah Bachmann.

15.01.2025

Bei der Studie handelt es sich um eine Ökobilanz, die nach den Methoden der ISO 14040 und ISO 14044 erstellt wurde. Die kritische Prüfung erfolgt durch das ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, vertreten durch Benedikt Kauertz, Christian Dierks und Joachim Reinhardt. Das Review wurde Projektbegleitend durchgeführt. Ziel des kritischen Review-Prozesses ist es zu überprüfen, ob das wissenschaftliche Vorgehen der Studie den Anforderungen der ISO-Norm entspricht. Das Ifeu ist unabhängig von allen Parteien, die ein kommerzielles Interesse an der Studie haben. Ziel der kritischen Prüfung war es, sicherzustellen, dass

- die Ziele und Rahmenbedingungen der Studie vollständig mit den zugrunde liegenden Forschungsfragen übereinstimmen und die Forschungsfragen durch die untersuchten Szenarien vollständig abgedeckt werden.
- die Systemgrenzen ausreichend definiert und die Ergebnisse transparent und nachvollziehbar sind.
- die den Ergebnissen zugrundeliegenden Parameter und Datensätze angemessen verwendet werden und deren Verwendung nachvollziehbar begründet ist.
- die Schlussfolgerungen und formulierten Ergebnisse die Varianz der Parameter widerspiegeln.



Geschäftsführung: Andreas Detzel (Dipl.-Biol.), Lothar Eisenmann (Dipl.-Phys.), Prof. Dr.-Ing. Martin Pehnt (Dipl.-Phys.)
Prokuristen: Horst Fehrenbach (Dipl. - Biol.), Bernd Franke (Biol.), Hans Hertle (Dipl. - Ing. (FH)), Dr. Ulrich Höpfner (Dipl. - Chem.), Benedikt Kauertz (Dipl.-Ing.), Udo Lambrecht (Dipl. - Phys.), Dr. Guido Reinhardt (Biol. / Chem. / Math.)
Ehrevorsitzender: Dr. Ulrich Höpfner (Dipl.-Chem.) **Handelsregister:** Amtsgericht Mannheim HRB 334263
Sitz der Gesellschaft: Heidelberg **Steuernummer:** 32489/20374 beim Finanzamt Heidelberg **UID - Nr.:** DE 143446610
Bankverbindung: HypoVereinsbank Heidelberg, IBAN DE53 6722 0286 4880 1912 04, Swift (BIC)HYVEDEMM479

● Prozess der kritischen Prüfung

Die Arbeitsatmosphäre während der kritischen Überprüfung war ausgesprochen konstruktiv. Der kritische Überprüfungsprozess umfasste:

- eine Präsentation des Ziels und des Rahmens der Studie inkl. aller methodischen Festlegungen für das Bilanzmodell sowie eine Diskussion der getroffenen Annahmen.
- eine Überprüfung und Kommentierung des Berichts zur Ziel- und Rahmenedefiniton sowie eine Diskussion der Anmerkungen der Gutachter und der vorgeschlagenen Änderungen durch die Autor*innen.
- Überprüfung einer ersten vollständigen Version des Berichts anhand der oben genannten Ziele der kritischen Prüfung.
- die Erstellung einer Liste mit Kommentaren und Verbesserungsvorschlägen zum Bericht.
- eine Online-Sitzung zur Diskussion der Kommentare und Änderungsvorschläge zum Bericht.
- eine weitere Runde zur Diskussion und Abstimmung letzter Anmerkungen der kritischen Gutachter zur finalen Version.
- eine Überprüfung des überarbeiteten Abschlussberichts, auf den sich diese kritische Stellungnahme bezieht.

2/3

Fazit der kritischen Prüfung

Die kritische Prüfung der Studie kommt zu dem Schluss, dass diese Ökobilanzstudie den Anforderungen der internationalen Normen für Ökobilanzen (ISO 14040:2006 und 14044:2006) folgt und mit ihnen übereinstimmt. Es kann festgestellt werden, dass

- der Bericht die Forschungsfrage beantwortet.
- die Systemgrenzen für die Analyse angemessen und nachvollziehbar sind.
- die verwendeten Parameter und Datensätze für die Darstellung des Untersuchungsgegenstandes geeignet sind.
- die Schlussfolgerungen durch die Ergebnisse der Studie gestützt werden.
- die Ergebnisse gut ausgearbeitet, interpretiert und auf ihre Plausibilität untersucht sind.
- Annahmen und Einschränkungen der Studie klar beschrieben sind.

Eine Excel-Tabelle mit den detaillierten Anmerkungen zu den einzelnen Berichtsversionen, den jeweiligen Antworten der Studienautor*innen und den abschließenden Bewertungen der kritischen Gutachter ist Bestandteil des Berichts zur kritischen Prüfung und kann auf Anfrage bei den Autor*innen der Studie angefordert werden.



● Empfehlungen der kritischen Prüfung

Auf der Grundlage der bei der kritischen Prüfung gewonnenen Erkenntnisse empfehlen wir den Autor*innen und Auftraggeber*innen der Studie Folgendes:

- Vor dem Hintergrund, dass die berechneten Vergleichsergebnisse nicht in vollem Umfang den Erwartungen der Projektbeteiligten entsprechen, ist zu befürchten, dass die Studie nicht die Aufmerksamkeit erhält, die ihr aufgrund der Relevanz des Themas und des hohen fachlichen Niveaus der Arbeit zusteht. Den Autorinnen und Autoren der Studie wird daher empfohlen, die Ergebnisse nach Möglichkeit an anderer Stelle zu platzieren und insbesondere bei zukünftigen Prognoseszenarien zu berücksichtigen.
- Da es sich bei Ökobilanzen um Entscheidungshilfe handelt – in diesem Fall bezüglich der möglichen Einführung von neuartigen Bindemitteln bzw. Betonen, die diese enthalten – sollte grundsätzlich ein konsequenzieller und/oder prospektiver Modellierungsansatz geprüft werden, welcher die Konsequenzen der zu unterstützenden Entscheidung in der Zukunft abbildet bzw. Unsicherheiten diesbezüglich adressiert. Mit der Prüfung der Sensitivität bezüglich eines Substitutionsansatzes zur Vermeidung von Allokationen im Vordergrundsystem wurde in dieser Studie bereits ein Schritt in diese Richtung gegangen – dies könnte noch ausgeweitet werden.
- Den Autor*innen sei eine Weiterverfolgung des Themas und ggf. Beteiligung an Zukunftsprojekten zur Aktualisierung der Ökobilanz im Falle grundlegender zusätzlicher Erkenntnisse durch einen sich entwickelnden Stand der Technik empfohlen.

3/3

Eine vollständige Veröffentlichung der Studie und Kommunikation der Ergebnisse dieser und zukünftiger Ergebnisse an die Zement- und Stahlindustrie wird empfohlen. Zudem möchten wir die Autor*innen ermutigen die Ergebnisse der Studie im Rahmen eines wissenschaftlichen Fachartikels zu verwerthen und/oder im Rahmen einer Fachkonferenz für Ökobilanzen vorzustellen.



(Benedikt Kauertz)



(Christian Dierks)



(Joachim Reinhardt)