



Entsorgung gefährlicher Abfälle in Bayern

Eine ökobilanzielle Analyse mit Kostenbetrachtung

Matthias Seitz
Dr. Siegfried Kreibe
René Peche
Thorsten Pitschke

Finanziert durch



Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



Impressum

Alle Rechte (insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung) sind vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil der bifa-Texte darf in irgendeiner Form ohne Genehmigung der Herausgeber reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Herausgeber

bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

Verfasser

Matthias Seitz
Dr. Siegfried Kreibe
René Peche
Thorsten Pitschke

Finanziert durch

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Druck

Klicks GmbH

1. Auflage 2012

© bifa Umweltinstitut GmbH

Entsorgung gefährlicher Abfälle in Bayern

Eine ökobilanzielle Analyse mit Kostenbetrachtung

Matthias Seitz
Dr. Siegfried Kreibe
René Peche
Thorsten Pitschke

Finanziert durch



Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Zusammenfassung..... | 1 |
| 2 | Veranlassung und Hintergrund | 5 |
| 3 | Methodik..... | 5 |
| 3.1 | Ökobilanzielle Betrachtung | 5 |
| 3.2 | Kostenbetrachtung | 7 |
| 4 | Untersuchungsrahmen | 8 |
| 4.1 | Untersuchungsgegenstand | 8 |
| 4.2 | Erkenntnisinteresse | 9 |
| 4.3 | Funktionelle Einheit | 10 |
| 4.4 | Systemgrenzen | 10 |
| 5 | Datenbasis | 13 |
| 5.1 | Ermittlung der Transportwege und -mengen zu den Entsorgungsvorgängen in Bayern..... | 13 |
| 5.2 | Ermittlung abfallseitiger Daten..... | 13 |
| 5.3 | Ermittlung verfahrensseitiger Daten..... | 14 |
| 5.4 | Ermittlung von Kostendaten | 14 |
| 6 | IST-Zustand der untersuchten Entsorgungswege..... | 15 |
| 6.1 | Erläuterungen zur Darstellung der Ergebnisse | 15 |
| 6.2 | Abfallschlüssel „Lösemittel“ | 18 |
| 6.3 | Abfallschlüssel „Öle“ | 25 |
| 6.4 | Abfallschlüssel „Boden“ | 32 |
| 6.5 | Abfallschlüssel „Weitere“..... | 37 |
| 6.6 | Gesamtergebnis über alle Abfallschlüssel | 45 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 7 | Szenarienanalyse..... | 46 |
| 7.1 | Vorgehensweise..... | 46 |
| 7.2 | Ökologie-Index – Erläuterung der Ergebnisdarstellung | 46 |
| 7.3 | Szenario 1: Energetischer Wirkungsgrad | 47 |
| 7.4 | Szenario 2: Stofflicher Nutzungsgrad | 49 |
| 7.5 | Szenario 3: Transportentfernung | 51 |
| 7.6 | Szenario 4: Transport Zug..... | 53 |
| 7.7 | Szenario 5: Entsorgungswege | 54 |
| 8 | Fazit..... | 57 |
| 9 | Literatur | 59 |

1 Zusammenfassung

Untersuchungsrahmen

Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG) hat die bifa Umweltinstitut GmbH (bifa) beauftragt, 18 in einer Vorstudie ausgewählte gefährliche Abfälle in einer Ökobilanz zu betrachten. Ziel war die Schaffung einer Grundlage zur Bewertung der ökologischen Wirkungen der Entsorgung gefährlicher Abfälle in Bayern und zur Identifizierung von Optimierungsansätzen.

Da eine Bilanzierung sämtlicher 405 als gefährlich eingestufte Abfallarten des AW-Abfallartenkataloges mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist, beschränkt sich diese Ökobilanz auf die in Tabelle 2.1 aufgeführten Abfallarten.

Tabelle 2.1: Für die Ökobilanz ausgewählte Abfallschlüssel mit „Kurzbeschreibung“ und Zuordnung zu den Gruppen „Lösemittel“, „Öle“, „Boden“ und „Weitere“.

| „Lösemittel“ | „Öle“ | „Boden“ | „Weitere“ |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 070104* „Lösemittel“ | 120107* „Altöl“ | 170301* „Bitumengemische“ | 060101* „Schwefelsäure“ |
| 070108* „Rückstand“ | 120118* „Metallschlämme“ | 170503* „Boden“ | 100315* „Aluminiumkrätze“ |
| 070204* „Lösemittel“ | 130205* „Altöl“ | 170507* „Gleisschotter“ | 191206* „Altholz“ |
| 070304* „Lösemittel“ | 130703* „Brennstoffe“ | | 200123* „Kühlgeräte“ |
| 070504* „Lösemittel“ | | | |
| 080111* „Farbe/Lack“ | | | |
| 140603* „Lösemittel“ | | | |

Datenbasis

Mit den Informationen aus dem Datenbestand des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) zum Abfallüberwachungssystem ASYS konnte zum einen ein Transportmodell für die gefährlichen Abfälle erstellt werden. Zum anderen konnten damit Betreiber von wichtigen Abfallentsorgungsanlagen ermittelt werden, um Prozessparameter der Entsorgungsverfahren sowie den Verbleib der aus der Entsorgung resultierenden Stoffe zu recherchieren.

Die Recherche von Daten zur Abfallanalytik aus Deklarationsanalysen erwies sich dagegen als deutlich weniger ergiebig, da die am Entsorgungsvorgang Beteiligten nur die für den Entsorgungsweg jeweils relevanten Formularwerte ausfüllen müssen. Diese decken sich nur teilweise mit den für die Ökobilanzierung erforderlichen Daten. Zudem war nur ein Teil der Deklarationsanalysen zugänglich, da das LfU erst seit 01.11.2005 als zentrale Behörde für die Überwachung der Entsorgung gefährlicher Abfälle zuständig ist.

Verfahrensbezogene Daten wurden aus der Literatur und durch Anfragen bei Anlagenbetreibern, unter anderem der gsb Sonderabfall-Entsorgung Bayern GmbH (GSB) gewonnen.

Die ursprünglich vorgesehene Analyse von Kostendaten konnte trotz intensiver Bemühung nicht realisiert werden. Hierfür war vor allem die große Varianz von Art und Zusammensetzung der analysierten Abfälle ursächlich. Selbst die Gewinnung von Preisdaten war wegen der Komplexität der Preisbildungsmechanismen nur begrenzt möglich. Auf die Gegenüberstellung von ökologischen und wirtschaftlichen Effekten in Form einer Ökoeffizienzanalyse wurde daher verzichtet. Soweit vorhanden, werden recherchierte Kostendaten in eigenen Abschnitten dargestellt.

Aufgrund der Komplexität der Abfallströme und der auszuwertenden Datenbestände liegen statistische Auswertungen zum Bereich gefährliche Abfälle immer erst mit mehreren Jahren Verzug vor. Bezugsjahr der Bilanzierung ist daher das Jahr 2007.

Ergebnisse zum IST-Zustand

Gruppe „Lösemittel“

Knapp 30 % der Abfalllösemittel gehen zur stofflichen Verwertung in Destillationsanlagen, 70 % gehen der thermischen Verwertung zu, Teilmengen daraus werden wegen zu hoher Schadstoffbelastung oder zu niedrigem Heizwert der Sonderabfallverbrennung zugeführt.

Das Netto-Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung weist für die Entsorgung von 101.820 t als gefährlich eingestufte Lösemittelabfälle Umweltentlastungen zwischen 1.700 und 15.800 Einwohnerwerten¹ aus. Einzige Ausnahme ist das Treibhauspotential, das im Netto-Ergebnis eine geringe Umweltbelastung in Höhe von ca. 23.980 t CO₂-Äquivalenten aufweist. Dies entspricht ungefähr dem von 2.120 Einwohnern pro Jahr in Deutschland verursachten Treibhauspotential.

Gruppe „Öle“

40 % der 82.930 t Abfälle aus dieser Gruppe werden der stofflichen Verwertung in Raffinerieanlagen und der Brikettierung zugeführt. 42 % der Abfallmenge gehen in die thermische Verwertung (Zement- und Kalkwerk). Die der Stabilisierung zugeführten 16 % stammen ausschließlich aus der Entsorgung ölhaltiger Metall-Schleifschlämme (AS 120118*), die sich durch ihre abweichende Zusammensetzung von den anderen eher altöltypischen Abfallschlüsseln der Gruppe unterscheiden. Mit mehr als 49.000 t werden knapp 60 % der Mengen über Sekundärerzeuger entsorgt. Damit spielt bei diesen Abfallschlüsseln die Zwischenlagerung eine wichtige Rolle.

Im Netto-Gesamtergebnis der Gruppe „Öle“ ergeben sich Umweltentlastungen für KEA fossil, Treibhauspotential, POCP und Schwefeloxide. Das terrestrische Eutrophierungspotenzial und die Stickoxide weisen dagegen bei der Entsorgung dieser Abfälle eine Netto-Umweltbelastung aus. Für das Treibhauspotential resultiert eine knappe Umweltentlastung in Höhe von 32.520 t CO₂-Äquivalenten. Dies entspricht ca. 2.390 Einwohnerwerten.

Gruppe „Boden“

Fast 60 % der 265.970 t der Abfälle aus dieser Gruppe werden durch Wiedereinsatz außerhalb des Deponiebaus verwertet. Mehr als 40 % der belasteten Böden werden auf Deponien verbracht, teilweise mit vorheriger Stabilisierung.

Für diese mit 265.970 t größte Abfallgruppe werden im Netto-Ergebnis für alle Wirkungskategorien und Einzelparameter negative Umweltwirkungen ausgewiesen. Trotz der großen Abfallmenge sind die Belastungen jedoch im Vergleich zu den übrigen Abfallgruppen recht gering. Im Gegensatz zu den anderen Abfallgruppen haben Transporte einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse. 35 % des Treibhauspotenzials sind auf Transporte zurückzuführen. Die Netto-Umweltbelastung in Höhe von

¹ Die im Rahmen der Normierung für jede Wirkungskategorie berechneten Einwohnerwerte erlauben einen größenordnungsbezogenen Vergleich der verschiedenen Wirkungsindikatorenergebnisse. Die Einwohnerwerte (EW) errechnen sich aus den jeweiligen Wirkungsindikator-/Sachbilanzergebnissen und den entsprechenden Gesamtemissionen in der Bundesrepublik. Je größer die Anzahl der Einwohnerwerte ist, desto bedeutender ist diese Wirkungskategorie für die ökologieorientierte Beurteilung der betrachteten Verfahren beziehungsweise Szenarien hinsichtlich ihres Beitrages zur Umweltbelastung.

5.030 t CO₂-Äquivalenten (ca. 450 Einwohnerwerte) ist jedoch bezogen auf die Abfallmenge sehr gering.

Gruppe „Weitere“

In der Gruppe „Weitere“ werden vier sehr unterschiedliche Abfallschlüssel zusammengefasst. 90% der enthaltenen Schwefelsäureabfälle werden in der Spaltanlage rezykliert. Die Abschäume aus der Aluminiumindustrie werden zu 100 % stofflich aufbereitet. Das belastete Altholz (Feinfraktion aus der Aufbereitung) wird komplett der thermischen Verwertung in BHKW zugeführt, und die erfassten FCKW-haltigen Kühlgeräte gelangen in die Kühlgeräteaufbereitung. Bezogen auf die Abfallmenge dominiert das Altholz die Gruppe „Weitere“.

Bis auf geringe Belastungen in der Wirkungskategorie Treibhauseffekt zeigen alle Netto-Ergebnisse für die Gruppe „Weitere“ Entlastungen der Umwelt. Die Entlastungen in der Wirkungskategorie KEA fossil sind getrieben durch Gutschriften aus der Altholzverbrennung (Ersatz fossiler Brennstoffe). Gleiches gilt für die Umweltentlastungen beim Treibhauseffekt. Diese werden jedoch durch die Umweltbelastungen, die bei der Entsorgung der FCKW-haltigen Kühlgeräte entstehen, überkompensiert. Die Netto-Umweltentlastung bei der Versauerung und dem Einzelparameter Schwefeloxide gehen zu etwa je der Hälfte auf die Entlastungen aus der Entsorgung der Schwefelsäure- und Altholzabfälle zurück.

In der Wirkungskategorie Treibhauseffekt trägt der Ersatz fossiler Energieträger durch die Verwertung belasteter Althölzer in BHKW mit 83 % zur Umweltentlastung bei. Dagegen stehen aber auch Umweltbelastungen aus den anderen Abfallschlüsseln der Gruppe. Letztlich ergeben sich als Netto-Ergebnis noch Belastungen in Höhe von 67.420 t CO₂-Äquivalenten. Dies entspricht etwa den von 5.960 Einwohnern pro Jahr in Deutschland verursachten Treibhausgasemissionen.

Szenarienanalyse

Die Stoff- und Energieflussmodelle zur Entsorgung der ausgewählten Abfallschlüssel bildeten die Grundlage zur Ermittlung von ökobilanziellen Potentialen und Risiken bei der Entsorgung gefährlicher Abfälle in Bayern. Auf dieser Basis wurden verschiedene Szenarien entwickelt und hinsichtlich ihrer ökobilanziellen Wirkungen analysiert.

- Szenario 1 – Energetischer Wirkungsgrad:
Die Verbesserung des energetischen Wirkungsgrades von Verbrennungsanlagen durch Nutzung der verfügbaren Abwärme ergibt klare ökologische Vorteile, vor allem in der Wirkungskategorie Treibhauspotential. Das Gesamtpotential umfasst eine Verbesserung der Umweltwirkungen um 77 % (gemessen in Ökologie-Index-Punkten).
- Szenario 2 – Stofflicher Nutzungsgrad:
Die Verbesserung des stofflichen Nutzungsgrades durch Ausschöpfung von Optimierungspotentialen bei der Prozessführung oder durch die Abfallbehandlung mit alternativen Verfahren ergab Umweltentlastungen. Das Gesamtpotential umfasst eine Verbesserung der Umweltwirkungen um 288 % (gemessen in Ökologie-Index-Punkten).
- Szenario 3 – Transportentfernung:
Die Reduzierung überregionaler Transportwege zu Deponien und Immobilisierungsanlagen² auf eine maximale Entfernung von 50 oder 80 km ergab ein geringes Entlastungspotential für alle

² Der Begriff ist abfallrechtlich nicht definiert, wird jedoch von Anlagenbetreibern verwendet. Im engeren Sinne ist die Anwendung von Verfahren gemeint, die zur *(vollständigen) Stabilisierung* oder *Verfestigung* der Abfälle führen.

Wirkungskategorien und Einzelparameter. Das Gesamtpotential umfasst eine Verbesserung der Umweltwirkungen um 46 % (gemessen in Ökologie-Index-Punkten).

- Szenario 4 – Transport Schiene:
Die Verlagerung von Ferntransporten zur Abfallverbringung auf die Schiene ab einer Entfernung von 300 km führt, bezogen auf die betroffenen Abfallschlüssel, nur zu einem sehr geringen Umweltentlastungspotential für alle Wirkungskategorien und Einzelparameter. Das Gesamtpotential umfasst eine Verbesserung der Umweltwirkungen um 1 % (gemessen in Ökologie-Index-Punkten).
- Szenario 5 – Entsorgungswege:
Die Verschiebung von Abfallmengen zwischen den bestehenden Entsorgungswegen, z.B. getrieben durch Kostenaspekte oder auch ordnungsrechtliche Maßnahmen, ergab ein sehr differenziertes Bild. Für einige der betroffenen Abfallschlüssel führt dieses Szenario zu klaren Umweltentlastungen, für andere Abfallschlüssel aber auch zu Umweltbelastungen. Das Gesamtpotential umfasst eine Verbesserung der Umweltwirkungen um 54 % (gemessen in Ökologie-Index-Punkten).

2 Veranlassung und Hintergrund

Als Grundlage zur Bewertung der Ökoeffizienz der bayerischen Entsorgungsstrukturen und zur Identifizierung von Optimierungsansätzen hat die bifa Umweltinstitut GmbH (bifa) im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit (StMUG) bereits ein umfangreiches Stoffstrommodell der bayerischen Siedlungsabfallwirtschaft entwickelt. Dieses Modell wurde im Jahr 2007 ergänzt und aktualisiert und deckt inzwischen die Entsorgung der wichtigsten Stoffströme aus den bayerischen Haushalten ab. Mit Hilfe des von bifa entwickelten Stoffstrommodells können die ökologischen und ökonomischen Wirkungen der bayerischen Entsorgungsstruktur quantifiziert und so in einen Vergleich zu anderen Entsorgungsstrukturen gesetzt werden.

Für den bedeutenden Bereich der gefährlichen Abfälle liegt bisher für Bayern keine Ökoeffizienzanalyse vor. Das StMUG beauftragte bifa daher zunächst zu prüfen, ob und gegebenenfalls auf welche Weise eine Erweiterung des Modells der bayerischen Entsorgungsstrukturen um den Bereich der gefährlichen Abfälle möglich wäre. Diese Voruntersuchung kam zu dem Ergebnis, dass eine Ökobilanz für ausgewählte Abfallarten durchgeführt werden kann. In der Vorstudie wurden über eine Mengenanalyse der Abfallstatistik 2006 und eine anschließende Expertenbefragung 18 Abfallschlüssel zur detaillierten Betrachtung in einer Ökobilanz vorgeschlagen. Im Anschluss wurde bifa mit der Bearbeitung dieser Untersuchung beauftragt. Die Ergebnisse der Untersuchung werden mit dieser Arbeit vorgelegt.

3 Methodik

3.1 Ökobilanzielle Betrachtung

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte ökobilanzielle Betrachtung³ orientierte sich an den Normvorgaben zur Durchführung von Ökobilanzen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 [DIN 2006, DIN 2009]. Dabei werden – ausgehend von der Zieldefinition im Rahmen der Sachbilanz – relevante Parameter erfasst und in der Wirkungsabschätzung hinsichtlich ihrer Umweltwirkung zusammengefasst. Anschließend werden die Ergebnisse mit Hilfe einer am bifa entwickelten Methode aggregiert [PITSCHKE ET AL. 2003]. Die Vorgehensweise orientiert sich soweit wie möglich an den Vorgaben des Umweltbundesamtes (UBA) zur Bewertung in Ökobilanzen. Die Methode ist transparent und nachvollziehbar und liefert als Ergebnis einen numerischen Wert pro Szenario.

Die Erstellung der Sachbilanz beinhaltet das Sammeln, die Ableitung und die Aufbereitung prozessspezifischer In- und Outputdaten, die System- und Prozessmodellierung sowie die Berechnung der Sachbilanzen. Letztere quantifizieren In- und Outputflüsse des kompletten Bilanzierungssystems oder spezifischer Teil- und Äquivalenzsysteme. Die Sachbilanzen sind Grundlage für die Wirkungsabschätzung und die Auswertung.

³ Da im Rahmen dieses Vorhabens aus Effizienzgründen nicht vorgesehen war, alle in den Normen vorgeschriebenen Aspekte in vollem Umfang umzusetzen, wird im Weiteren von ökobilanziellen Betrachtungen in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 ff. gesprochen.

Wesentlich für die Datenerhebung und die darauf basierende Bilanzierung ist die Modellierung der Systeme. Dafür ist es erforderlich, die für das jeweilige Systemmodell relevanten Prozesse zu identifizieren und die notwendigen Sachbilanzdaten zu erheben oder abzuleiten. Das Systemmodell bildet die Basis für die Datenerhebung, die Systemkalkulation und alle anschließenden Auswertungsschritte. Die Modellierung und Bilanzierung erfolgte mit der Software UMBERTO®.

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden dann die umfangreichen Ergebnisse der Sachbilanz komprimiert und für die Auswertung vorbereitet. Dazu werden die Sachbilanzergebnisse möglichst (potentiellen) Umweltwirkungen zugeordnet und innerhalb dieser Wirkungskategorien zu aggregierten Werten verrechnet. Jede Wirkungskategorie bezieht sich auf einen mehr oder weniger komplexen Wirkungsmechanismus, an dessen Ende unerwünschte Auswirkungen auf ein oder mehrere Umweltschutzgüter stehen. Am Anfang stehen die Freisetzung bestimmter Stoffe aus dem untersuchten System oder ein durch das System bedingter Eingriff in die Umwelt. Die Auswahl der verwendeten Wirkungskategorien orientiert sich an den aktuellen umweltbezogenen Kenntnissen sowie am projektspezifischen Erkenntnisinteresse, wobei von den vom Umweltbundesamt als relevant betrachteten Wirkungskategorien [PLINKE ET AL. 2000] ausgegangen wurde.

Den einzelnen Wirkungskategorien sind jeweils Sachbilanzparameter zuzuordnen. Die entsprechenden Sachbilanzergebnisse werden anschließend zu einem oder mehreren Wirkungsindikatorergebnissen verrechnet oder direkt als Wirkungsindikatorergebnis verwendet. Tabelle 2.1 zeigt die mit dem Auftraggeber abgestimmte Auswahl an Wirkungskategorien, die Zuordnung der Sachbilanzparameter sowie die den Wirkungsindikator kennzeichnende Einheit der Ergebnisse für die vorliegende Untersuchung.

Tabelle 2.1: Auswahl der Wirkungskategorien, Zuordnung der ergebnisbestimmenden Sachbilanzparameter zu den Wirkungskategorien und Einheit der Wirkungsindikatorergebnisse

| Wirkungskategorie | Ergebnisbestimmende Sachbilanzparameter | Indikatorergebnisse jeweils bezogen auf die funktionelle Einheit ¹ |
|---|---|---|
| Treibhauseffekt | CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O | kg CO ₂ -Äquivalente |
| Photochemische Oxidantienbildung (POCP) | NMVOC, VOC _{unspez.} , C ₃ H ₈ , CH ₄ | kg Ethen-Äquivalente |
| Versauerung | NO _x als NO ₂ , SO ₂ , NH ₃ | kg SO ₂ -Äquivalente |
| Terrestrische Eutrophierung | NO _x als NO ₂ , NH ₃ | kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalente |
| Toxische Schädigung des Menschen und von Organismen | SO ₂ | Angabe in kg |
| Toxische Schädigung von Organismen und Ökosystemen | NO _x | Angabe in kg |
| Kumulierter Energieaufwand (KEA) | KEA _{gesamt} | Angabe in MJ |

¹ Vergleichseinheit der ökobilanziellen Betrachtung (vgl. Abschnitt 4.3)

Voraussetzung für einen geschlossenen ökologischen Vergleich ist, dass die Einzelaussagen zu den Umweltbe- und -entlastungen, die anhand der Wirkungskategorien und Sachbilanzparameter für jedes Szenario getroffen werden, zu einem einzigen aussagekräftigen Wert zusammengefasst werden können. bifa definiert hierzu einen Ökologie-Index. Es handelt sich um eine modifizierte und erweiterte Version der vom Umweltbundesamt vorgeschlagenen Methodik. Abbildung 2.1 veranschaulicht die Schritte zur Aggregation der Wirkungskategorien und Sachbilanzparameter.

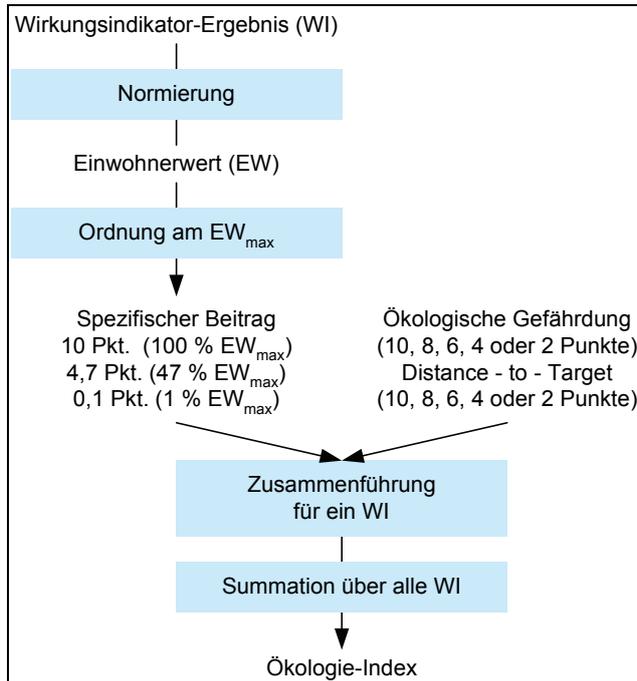


Abbildung 2.1:
Aggregation der Wirkungsindikator-
und Sachbilanzparameter zum
Ökologie-Index eines Szenarios

3.2 Kostenbetrachtung

Für in Anspruch genommene Entsorgungsdienstleistungen sind oft nur Preise zu ermitteln. Der Rückschluss von Preisen oder auch Gebühren auf Kosten ist kaum möglich. Preise unterliegen dem Markt und damit betriebswirtschaftlichen Interessen, Gebühren werden durch politische Veränderungen und Vorgaben und damit durch politische Interessen beeinflusst. In Preisen und Gebühren können Gewinnspannen, Zuzahlungen wie auch Quersubventionierungen (beispielsweise zwischen unterschiedlichen Abfallarten bzw. Entsorgungswegen, z.B. Abfälle zur Beseitigung und Abfälle zur Verwertung in SAV) enthalten sein.

Auch in der durchgeführten Analyse wurde vergeblich versucht, auf erhobene Gesamtkosten von laufenden Anlagen zurückzugreifen oder Literaturangaben zu verwenden, die z.B. Gesamtkosten aus Ausschreibungen oder Planungen berechnen. Für die untersuchten Prozesse waren insbesondere bezogen auf die jeweiligen Abfallschlüssel keine belastbaren Kostendaten erhältlich. Soweit verfügbar, werden Entsorgungs- und Annahmepreise angegeben.

4 Untersuchungsrahmen

4.1 Untersuchungsgegenstand

Eine Bilanzierung sämtlicher 405 als gefährlich eingestufte Abfallarten des AVV-Abfallartenkataloges ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Aus diesem Grunde wurde die Ökobilanz auf ausgewählte Abfallarten beschränkt.

Die folgende Tabelle zeigt die ausgewählten 18 Abfallarten mit den Mengenangaben aus dem Jahr 2007 sowie den absoluten und relativen Anteilen am Gesamtaufkommen gefährlicher Abfälle in Bayern. Die Abfallschlüssel (AS) werden in der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) nach Kapitel *K*, Gruppe *G* und Nummer *N* zugeordnet. Abfallarten, die laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz gefährlich sind, werden mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet.

Tabelle 2.2: Für die Ökobilanz ausgewählte Abfallarten. Mengenangaben: in Bayern angefallene Gesamtmenge (Primär- und Sekundärerzeuger) im Jahr 2007 und effektive Abfallmenge nach Auswertung der Begleitscheindaten für diese Studie.

| AS | | | Abfallart | Abfallmenge [t] | Anteil an gefährlichen Abfällen [Masse-%] | Effektiv zum Entsorger [t] |
|----|----|-----|--|-----------------|---|----------------------------|
| K | G | N | | | | |
| 06 | 01 | 01* | Schwefelsäure und schweflige Säure | 10.444 | 0,5 | 10.444 |
| 07 | 01 | 04* | andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen | 5.165 | 0,2 | 5.110 |
| 07 | 01 | 08* | andere Reaktions- und Destillationsrückstände | 7.684 | 0,4 | 7.684 |
| 07 | 02 | 04* | andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen | 18.760 | 0,9 | 17.490 |
| 07 | 03 | 04* | andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen | 5.033 | 0,2 | 4.920 |
| 07 | 05 | 04* | andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen | 8.775 | 0,4 | 8.775 |
| 08 | 01 | 11* | Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten | 7.581 | 0,3 | 6.740 |
| 10 | 03 | 15* | Abschaum, der entzündlich ist, oder in Kontakt mit Wasser entzündliche Gase in gefährlicher Menge abgibt | 11.318 | 0,5 | 11.170 |
| 12 | 01 | 07* | halogenfreie Bearbeitungsöle auf Mineralölbasis (außer Emulsionen und Lösungen) | 17.078 | 0,8 | 11.860 |
| 12 | 01 | 18* | öhlhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon-, und Lappschlämme) | 29.627 | 1,4 | 17.470 |
| 13 | 02 | 05* | nichtchlorierte Maschinen-, Getriebe- und Schmieröle auf Mineralölbasis | 78.009 | 3,6 | 48.720 |
| 13 | 07 | 03* | andere Brennstoffe (einschließlich Gemische) | 7.345 | 0,3 | 4.880 |

| AS | | | Abfallart | Abfallmenge [t] | Anteil an gefährlichen Abfällen [Masse-%] | Effektiv zum Entsorger [t] |
|----|----|-----|---|---------------------|---|----------------------------|
| K | G | N | | | | |
| 14 | 06 | 03* | andere Lösemittel und Lösemittelgemische | 60.459 | 2,8 | 51.100 |
| 17 | 03 | 01* | kohlenteerhaltige Bitumengemische | 125.009 | 5,7 | 175.890 ⁴ |
| 17 | 05 | 03* | Boden und Steine, die gefährliche Stoffe enthalten | 89.485 ⁵ | 4,1 | 87.720 |
| 17 | 05 | 07* | Gleisschotter, der gefährliche Stoffe enthält | 2.360 | 0,1 | 2.360 |
| 19 | 12 | 06* | Holz, das gefährliche Stoffe enthält | 209.127 | 9,6 | 209.130 ⁶ |
| 20 | 01 | 23* | gebrauchte Geräte, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten | 3.062 | 0,1 | 18.500 ⁷ |
| | | | SUMME | 2.181.175 | 32 | |

Anmerkung: Die Ergebnisse der fettgedruckten Abfallarten werden in Kapitel 6 ausführlich behandelt.

Die Ergebnisse zur Entsorgung gefährlicher Abfälle im Jahr 2007 werden im *Szenario IST-Zustand* zusammengefasst, das als Referenz für weitere Szenarien dient, in denen z.B. alternative Entsorgungswege oder optimierte Entsorgungssysteme untersucht werden. Jedes der Szenarien wird charakterisiert durch die

- betrachteten Stoffströme in Art und Menge,
- Entsorgungswege für die betrachteten Stoffströme und die
- mengenbezogene Aufteilung der Stoffströme auf die Entsorgungswege.

4.2 Erkenntnisinteresse

Mit der Ökobilanz sollten folgende Ziele erreicht werden:

- Erweiterung des bestehenden Modells der bayerischen Entsorgungsstrukturen um die Entsorgung gefährlicher Abfälle,
- Vergleich der spezifischen bayerischen Entsorgungsstruktur für gefährliche Abfälle mit möglichen alternativen Entsorgungswegen für ausgewählte Stoffströme und
- Abschätzung von Optimierungspotentialen der bestehenden bayerischen Entsorgungsstruktur für gefährliche Abfälle.

Für die untersuchten 18 Abfallarten – und damit für etwa ein Drittel der Gesamtmenge – stehen nun differenzierte Ergebnisse einschließlich konkreter Analysen zu noch ungenutzten Potentialen, zu den

⁴ inklusive Freistellungen in Höhe von 60.000 t [LfU 2010]

⁵ starke Veränderung ggü. der Vorstudie 2005: 723.694 t

⁶ Konstruktionshölzer aus Bauabbrüchen (A1-A3) werden in Holzverwertungsanlagen oft mit A4-Hölzern vermengt. Die großen Mengen des AS 191206* entstehen durch die Umschlüsselung von z.B. AS 170204* „Bauabfälle“. Geschätzt wären bei akkurater Trennung mindestens die Hälfte der Abfälle als nicht gefährlich einzustufen. [LfU 2011]

⁷ Wegen Freistellungen abgeschätzte Zahl direkt vom LfU [LfU 2010]

Umwelt- und insbesondere den Klimawirkungen der Entsorgung gefährlicher Abfälle in Bayern zur Verfügung. Ergänzend werden orientierende Angaben zu den Entsorgungspreisen gemacht.

4.3 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit dient als Bezugsgröße sowohl für die Gegenüberstellung der betrachteten Szenarien als auch für die Normierung der in der Sachbilanz ermittelten In- und Outputdaten.

Als funktionelle Einheit wurde die **Entsorgung des jeweiligen Abfallgemisches eines Abfallschlüssels (auf Mengengrundlage der Abfallstatistik 2007)** festgelegt.

4.4 Systemgrenzen

Nach DIN 2009 legt die Systemgrenze die Module fest, die in das zu modellierende System aufgenommen werden. Im Idealfall sollte das System so modelliert werden, dass Inputs und Outputs an ihren Systemgrenzen Elementarflüsse sind, also z.B. Emissionen in die Luft oder aus Lagerstätten entnommenes Rohöl.

Folgende Prozesse wurden innerhalb der Systemgrenzen berücksichtigt:

- die Entsorgung der Abfallstoffe (Verwertung oder Beseitigung) einschließlich der eventuell notwendigen Behandlung der dabei anfallenden Rest- oder Wertstoffe.⁸
- alle mit den Entsorgungsprozessen verbundenen relevanten Stoff- und Energieflüsse, von der Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen über die Bereitstellung von Betriebsmitteln und Ausgangsprodukten bis, soweit möglich, zur Entsorgung von dabei wiederum entstehenden Reststoffen.⁹

4.4.1 Datenlücken und Annahmen

Bei der Begrenzung der Komplexität der Modelle muss darauf geachtet werden, dass die Vergleichbarkeit der Szenarien erhalten bleibt. Dazu wurden die in diesem Abschnitt beschriebenen Kriterien für eine einheitliche Bestimmung der Systemgrenzen festgelegt.

Die Vorgaben der DIN 2009, dass der Stoff- und Energieeinsatz (Inputseite) sowie die Emissionen und Produkte (Outputseite) an ihren Systemgrenzen Elementarflüsse sein sollen, wurden bei der Modellierung soweit als möglich berücksichtigt. Für alle Inputstoffe und Energieträger, die innerhalb der nachfolgend beschriebenen Detailgrenzen liegen, wurden Vorketten beginnend bei der Gewinnung aus natürlichen Lagerstätten bis hin zur Bereitstellung für den jeweiligen Prozess modelliert. Waren keine belastbaren Daten verfügbar, wurden vergleichbare Prozesse herangezogen und Annahmen getroffen.

⁸ z.B. der Prozess der Reinigung und Trennung von Kies, Schotter und Überkorn in einer Bodenwaschanlage. Der durch die Reinigung anfallende belastete Filterkuchen wird stabilisiert und deponiert. Eine zudem anfallende Leichtfraktion aus Kunststoffen oder Wurzeln wird in einer MVA verbrannt.

⁹ Der für die Bodenwaschanlage benötigte Strom stammt z.B. aus einem Kohlekraftwerk. Hierfür muss die Ressource Kohle gefördert, aufbereitet und transportiert sowie ein Verbrennungs- und Stromerzeugungsprozess aufrecht erhalten werden. Entstehende Aschen und Schlacken müssen als Reststoffe entsorgt werden.

4.4.2 Abschneidekriterien

Vorgelagerte Prozesse (Vorketten)

Die Herstellung von Roh-, Betriebs- und Ausgangsstoffen in vorgelagerten Prozessen wurde nicht berücksichtigt, wenn die in diesem Abschnitt als Detailgrenzen definierten Abschneidekriterien zutrafen. In solchen Fällen wurde in der Sachbilanz anstelle des Elementarflusses der jeweilige Materialfluss ausgewiesen.

Die Detailgrenze für die Vernachlässigung der Modellierung der Vorketten von Input-Materialien wurde mit 3 Gew.-% eines Referenzflusses (meist gewünschter Output) festgelegt. Ausgenommen davon waren Materialien mit geringem Massenanteil, wenn in deren Vorkette Prozesse enthalten sind, die hinsichtlich toxischer oder energetischer Aspekte für die gesamte Ökobilanz bedeutsam sein konnten. Die Summe aller vernachlässigten Inputmaterialien eines Prozesses sollte jedoch nicht größer als jeweils 10 Gew.-% des Referenzflusses sein.¹⁰

Die Bereitstellung ubiquitärer Ressourcen, z.B. Luft, sowie Unterhalt der Infrastruktur (Bau, Wartung und Reparatur von Gebäuden, Maschinen, Industrieanlagen, Transportmittel und Verkehrswege) wurden grundsätzlich nicht berücksichtigt.

Nachgelagerte Prozesse (Nachketten)

Für Abfälle zur Beseitigung und zur Verwertung galten die gleichen Abschneidekriterien wie für die vorgelagerten Prozesse, d. h. die Entsorgung wurde dann modelliert, wenn die Abschneidekriterien nicht greifen und wenn die Beschreibung verwendeter Module oder Datensätze aus Bibliotheken oder Datenbanken nicht schon auf eine Berücksichtigung hinwies.

4.4.3 Verrechnung von Gutschriften in Äquivalenzsystemen

Neben dem in der funktionellen Einheit quantifizierten Hauptnutzen, der Entsorgung der gefährlichen Abfallmengen aus Bayern im Jahr 2007, können aus entstehenden Reststoffen oder der Verwertung der Abfälle zusätzliche Nutzen resultieren. Dazu zählen u.a. Sekundärrohstoffe aus der stofflichen Verwertung (z.B. Grundöle, Lösemittel oder Metallrecyclate) oder in anderen Fällen auch Strom und Wärme aus der Abfallverbrennung. Als Folge müssen die entsprechenden Energiemengen und Produkte nicht auf konventionellem Weg aus Primärrohstoffen hergestellt werden. Die Umweltauswirkungen, die mit der konventionellen Herstellung jedes einzelnen Zusatznutzens verbunden sind, werden somit „eingespart“ oder „vermieden“. Um den Vergleich der Szenarien zu vervollständigen, wurden diese „vermiedenen“ Umweltauswirkungen bilanziert und den Umweltauswirkungen des jeweiligen Verfahrens gutgeschrieben¹¹.

¹⁰ Zur Wäsche einer Tonne belasteten Bodens sind z.B. durchschnittlich 200 g Tenside und 300 g Flockungsmittel erforderlich. Die Herstellungsprozesse beider Betriebsmittel werden im Modell vernachlässigt, da diese mengenmäßig keine Relevanz haben. Würden für den Prozess hingegen jeweils 25 kg Tenside, Flockungsmittel, Entschäumer und Eisen-II-Sulfat benötigt (in Summe 10 Gew.-%) sollten die Systemgrenzen die Herstellung aller vier Betriebsstoffe mit einschließen.

Für die abgeschnittenen Betriebsstoffe wird erwartet, dass deren jeweilige Herstellung keinen übermäßig hohen Energieaufwand verursacht oder hohe Mengen toxischer oder für die betrachteten Umweltwirkungen maßgeblich relevanter Stoffe freisetzt. Kleine Mengen an FCKW sind z.B. beim Kühlgeräterecycling ergebnisbestimmend – diese Stoffflüsse dürfen nicht abgeschnitten werden.

¹¹ Die in der Bilanzierung der konventionellen Herstellung der Zusatznutzen erhaltenen Elementarflüsse (Gutschriften) werden von den Umweltauswirkungen des jeweiligen Bilanzierungsmodells (Bruttoergebnis) rechnerisch abgezogen; das führt zu einem Nettoergebnis. Damit können auch negative Nettoergebnisse auftreten.

Der konventionelle Herstellungs- und Produktionsprozess eines Zusatznutzens wird als „Äquivalenzprozess“ oder „Äquivalenzsystem“ bezeichnet. Für jeden quantifizierbaren Zusatznutzen wurde ein spezifisches Äquivalenzsystem modelliert, das den gleichen oder einen vergleichbaren funktionsäquivalenten Nutzen erzeugt. Dabei ersetzen Zusatznutzen aufgrund geringerer Qualität oder prozessbedingt nicht immer zu 100 % die Primärrohstoffe. Dieses Verhältnis wird durch einen so genannten Substitutionsfaktor beschrieben, der fall- oder stoffspezifisch angegeben wird.

Abbildung 2.2 veranschaulicht grafisch die notwendige Berücksichtigung der Äquivalenzprozesse und Gutschriften in vereinfachender Weise am Beispiel der Abfallverbrennung.

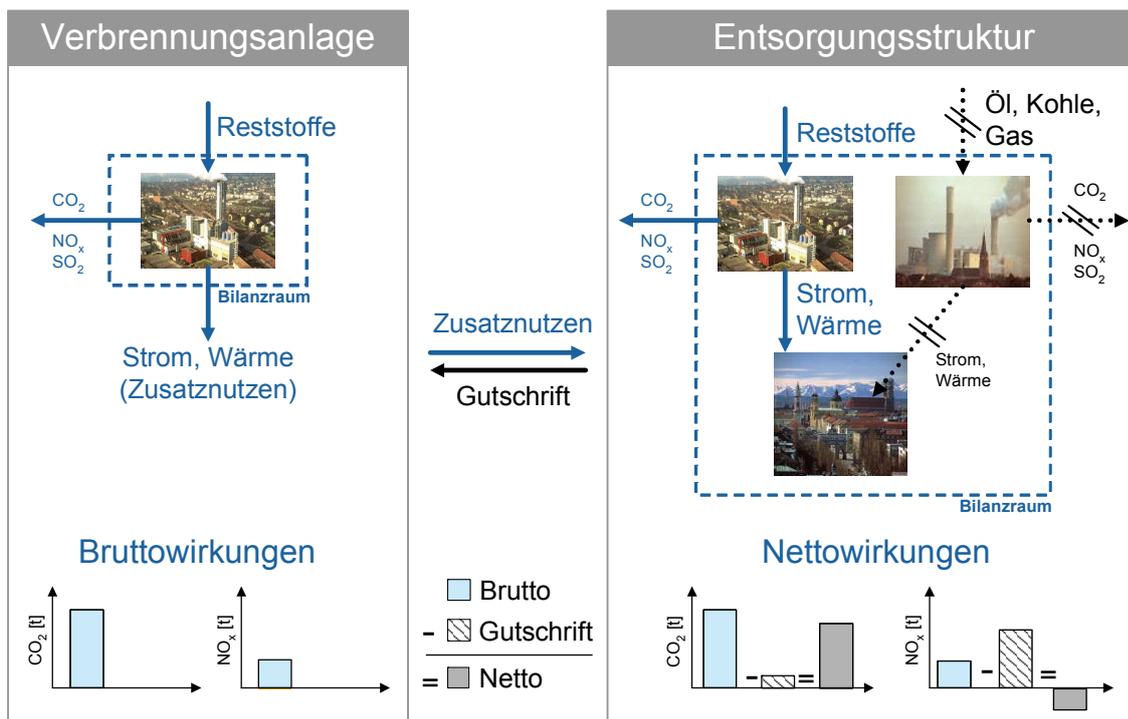


Abbildung 2.2: Berücksichtigung von Zusatznutzen der Entsorgung in Form von Gutschriften aus Äquivalenzsystemen am Beispiel der bei der thermischen Abfallbehandlung erzeugten Strom- und Wärmemenge

5 Datenbasis

Zu Beginn der Arbeiten erfolgte eine detaillierte Analyse von Informationen aus dem zur Überwachung der Entsorgung gefährlicher Abfälle eingesetzten Abfallüberwachungssystem ASYS. Die zugänglichen Entsorgungsnachweise, Begleitscheine und Deklarationsanalysen aus dem Jahr 2007 dienten als Basis der Studie. Darin sind Daten über die transportierten Mengen, deren Herkunft und Verbleib sowie deren Zusammensetzung ausdifferenziert nach Abfallschlüssel dokumentiert.

Die Dateien aus dem LfU-Datenbanksystem wurden zur genauen Auswertung der in Bayern 2007 entstandenen gefährlichen Abfälle mit Unterstützung des LfU detailliert aufbereitet. Zur Kontrolle wurden alle Mengen mit den Werten aus der Sonderabfallstatistik 2007 [WEBER 2009] verglichen. Geringe Abweichungen zwischen den Werten aus der Statistik und der Datenbank können aus dem Zeitversatz der Datenverarbeitung (z.B. Nachmeldungen) resultieren oder sich durch eine unterschiedliche Zuordnung zu Primär- und Sekundärerzeugern erklären [LFU 2010].

5.1 Ermittlung der Transportwege und -mengen zu den Entsorgungsvorgängen in Bayern

Auf Basis der Erzeuger-Entsorger-Beziehungen wurde mit Hilfe der Geocodierung von Postleitzahlen [OPENGEODB 2010] ein Berechnungstool für die Transportentfernungen erarbeitet. Sowohl die Anzahl der Fahrten als auch die wahrscheinliche LKW-Größe (Abfallmenge und Zuladung) wurden in der Modellierung berücksichtigt.

5.2 Ermittlung abfallseitiger Daten

Informationen über Eigenschaften und Zusammensetzung der Abfälle finden sich in den Deklarationsanalysen zu den Entsorgungsnachweisen (Abbildung 2.3). Während die Begleitscheindaten in elektronische Systeme übertragen werden und so über die Datenbankabfragen ausgewertet werden können, werden Deklarationsanalysen nur in Papierform archiviert.

Deklarationsanalyse zum Entsorgungsnachweis/SN Ersterstellung Änderung / Ergänzung zu Nr. _____ (nicht von Antragsteller auszufüllen) Ifd. Nr. _____ VE¹⁾

zu den Nachweiserklärungen (auszufüllen durch den Abfallerzeuger/einsammler in Abstimmung mit dem Abfallentsorger) Zutreffendes bitte ankreuzen oder ausfüllen.

Chemisch-/physikalische Behandlung oberirdische Deponie sonstige Behandlungsverfahren
 Verbrennung Untertagedeponie Verwertungsverfahren

Anzugeben sind die Parameter, die im Hinblick auf die Abfallart und den Entsorgungsvorgang erforderlich sind; ggf. sind diese zwischen Abfallerzeuger und Abfallentsorger festzulegen.

| | | | |
|-------------------------------|------------|--|-------------------------|
| 1. Arsen | _____ mg/l | 21. TOC | _____ mg/l |
| 2. Blei | _____ mg/l | 22. AOX | _____ mg/l |
| 3. Cadmium | _____ mg/l | 23. EOX | _____ mg/l |
| 4. Chrom-VI | _____ mg/l | 24. pH-Wert | _____ |
| 5. Kupfer | _____ mg/l | 25. Leitfähigkeit | _____ µS/cm |
| 6. Nickel | _____ mg/l | 26. schwerflüchtige lipophile Stoffe | _____ mg/l |
| 7. Quecksilber | _____ mg/l | 27. extrahierbarer Anteil der Originalsubstanz | _____ Gew. % |
| 8. Zink | _____ mg/l | 28. extrahierbare lipophile Stoffe | _____ Gew. % |
| 9. Fluorid | _____ mg/l | 29. Gührverlust des Trocknungsrückstandes | _____ Gew. % |
| 10. Chlorid | _____ mg/l | 30. wasserlöslicher Anteil | _____ Gew. % |
| 11. Cyanide (nicht beheizbar) | _____ mg/l | 31. Wassergehalt | _____ % |
| 12. Ammonium | _____ mg/l | 32. Rißgefahrfestigkeit | _____ kN/m ² |

Abbildung 2.3:
Auszug aus einem Formblatt zur Deklarationsanalyse

Ein Besuch der Zentralen Stelle Abfallüberwachung diente der Beschaffung von Daten aus den Deklarationsanalysen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse erwiesen sich jedoch aus verschiedenen Gründen als für das Vorhaben nicht aussagekräftig genug:

- Zu großen und damit wichtigen Stoffflüssen lagen keine Deklarationsanalysen vor, z.B. wegen Freistellung oder innerbetrieblicher Entsorgung.
- Es waren nur die für den jeweiligen Entsorgungsweg notwendigen Formularwerte ausgefüllt, z.B. bei Abfällen zur energetischen Verwertung der Heizwert, Flammpunkt und Chlorgehalt.
- Da ein Entsorgungsnachweis für fünf Jahre beantragt werden kann, liegen wegen Veränderungen der Zuständigkeiten im Analysezeitraum viele relevante Deklarationsanalysen nur den Landratsämtern vor. Das LfU wurde erst zum 01.11.2005 als zentrale Behörde für die Überwachung der Entsorgung gefährlicher Abfälle bestimmt. Eine Recherche in Landratsämtern war im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich.

Um die noch offenen Fragen zur Abfallanalytik zu klären, wurde u.a. auf das Online-Analysetool ABANDA des Landes Nordrhein-Westfalen zurückgegriffen und für jeden Abfallschlüssel eine Auswertung erstellt. Ein benutzergesteuerter Datenvergleich bietet hier über die Standardauswertungen hinaus die Möglichkeit, Datensätze auf einen selbstgewählten Probenumfang einzuschränken und damit z.B. die Aktualität der Ergebniswerte zu bestimmen [ABANDA 2010].

5.3 Ermittlung verfahrensseitiger Daten

Neben der stofflichen Zusammensetzung wurden durch eine ausführliche Internet- und Literaturrecherche die Verwertungs- und Beseitigungsverfahren der aus den Begleitscheindaten als relevant bestimmten Firmen ermittelt. Dabei ist die Verfügbarkeit verfahrensseitiger Daten im Bereich der gefährlichen Abfälle aus der Literatur wesentlich schlechter als im Bereich der nicht gefährlichen Abfälle. Siedlungs- und Gewerbeabfälle werden bereits seit Jahren umfangreich analysiert, wogegen für gefährliche Abfälle ähnliche Untersuchungen noch weitgehend fehlen. So sind Verbrauchsdaten zu einzelnen Anlagen grundsätzlich nur sehr eingeschränkt verfügbar. Emissionsdaten können zwar teilweise über Emissionsgrenzwerte im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung abgeschätzt werden, da die tatsächlichen Emissionsdaten jedoch zum Teil deutlich unter diesen Werten liegen, ist eine solche Abschätzung nur begrenzt verlässlich.

Ergaben die Recherchen keine verwertbaren Ergebnisse, war es in Folge der detaillierten Auswertung der Entsorgungsnachweisdaten möglich, gezielt für diejenigen Verfahren und Anlagen, in denen wesentliche Mengen der betrachteten Abfallarten entsorgt werden, eine Anfrage an die Anlagenbetreiber zu stellen. Deren Kooperationsbereitschaft vorausgesetzt konnten so weitere verfahrensbezogene Daten ermittelt werden. Eine direkte Zurechnung zu einzelnen Abfallarten war jedoch auch für die Anlagenbetreiber großteils nicht möglich.

5.4 Ermittlung von Kostendaten

Im Projektverlauf zeigte sich, dass sich im Untersuchungsbereich keine belastbaren veröffentlichten Kosten recherchieren lassen. Stattdessen musste auf die Ermittlung von Preisen für die Entsorgung der gefährlichen Abfälle zurückgegriffen werden. Aber auch hier war es aufgrund der Vielzahl von Entsor-

gungswegen mit wiederum teilweise unterschiedlichen Ausgestaltungen sowie der oft sehr stark einzelfallbezogenen Preisbildung nur begrenzt möglich, aussagekräftige Preise zu ermitteln.

So richtet sich die Festlegung der Preise für die Preisliste auch bei der GSB [GSB 2011A] nach einer pfadabhängigen oder prozessgerichteten Kalkulation, wobei Festpreise und spezifische Zuschläge erhoben werden. Der letztlich für ein Angebot veranschlagte Preis richtet sich hingegen nach dem jeweiligen gesichteten Abfall oder Abfallgemisch und berücksichtigt zudem die Marktlage (Konkurrenzpreise). Die Komplexität der Bepreisung wird von der GSB anhand des folgenden Beispiels dargelegt:

- Grundpreis = Preis für Tanklager (sofern Abfall neutral oder alkalisch)
- zzgl. Preiszuschlag, falls Schadstoffgehalt erhöht (für Eindüsung)
- zzgl. Preiszuschlag, falls Abfall sauer (Behandlung)
- zzgl. Preiszuschlag, falls Abfall nicht mischbar (zu entsorgende Monofraktion)
- zzgl. Preiszuschlag, falls Abfall Fassware (Handling)

Der Angabe von Preisspannen für die Entsorgung ausgewählter Abfallschlüssel erwies sich als kaum realisierbar, weil

- sich über die Abfallschlüssel keine aussagefähige preisliche Einordnung vornehmen lässt, was damit zusammenhängt, dass die AVV keine scharfe stoffliche Abgrenzung vornimmt,
- Preisschwankungen letztlich von Zuzahlungen (d.h. negativen Preisen) bis hin zu Preisen von über 1.000 €/t bestehen – z.B. durch umfangreiche Fassanalytik.

Die genannten Preise stellen also lediglich Orientierungspreise dar.

6 IST-Zustand der untersuchten Entsorgungswege

Im diesem Kapitel wird eine Übersicht der Bilanzierungsmodelle gegeben, die sich aus der Analyse der Begleitscheindaten ergeben haben. Dafür werden die wichtigsten zur Abfallentsorgung und -verwertung angewendeten Verfahren und Prozesse in Bezug auf die Handhabung der gefährlichen Abfälle vorgestellt und bewertet. Dies geschieht anhand der eingehenden Betrachtung von sieben ausgewählten Abfallschlüsseln (AS) und der Diskussion typischer Ergebnisse. Als Zwischenfazit wird jeweils ein Überblick über die Ergebnisse zu den definierten Abfallgruppen gegeben.

6.1 Erläuterungen zur Darstellung der Ergebnisse

6.1.1 Gruppenbildung

Aufgrund der Abfallzusammensetzungen, der ermittelten Entsorgungswege und der recherchierten Entsorgungsprozesse wurde eine Gruppierung der betrachteten Abfallschlüssel nach „Lösemittel“, „Öle“, „Boden“ und „Weitere“ vorgenommen. Getroffene Annahmen ließen sich auf mehrere Abfallschlüssel und ganze Gruppen anwenden. Gerade die Abfallschlüssel der Gruppe „Lösemittel“ weisen große Ähnlichkeiten auf, nicht nur bzgl. der Entsorgungsverfahren sondern auch bzgl. der mit der Entsorgung befassten Unternehmen.

Tabelle 2.3: Gruppierung der betrachteten Abfallschlüssel nach „Lösemittel“, „Öle“, „Boden“ und „Weitere“

| „Lösemittel“ | „Öle“ | „Boden“ | „Weitere“ |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 070104* „Lösemittel“ | 120107* „Altöl“ | 170301* „Bitumengemische“ | 060101* „Schwefelsäure“ |
| 070108* „Rückstand“ | 120118* „Metallschlämme“ | 170503* „Boden“ | 100315* „Aluminiumkrätze“ |
| 070204* „Lösemittel“ | 130205* „Altöl“ | 170507* „Gleisschotter“ | 191206* „Altholz“ |
| 070304* „Lösemittel“ | 130703* „Brennstoffe“ | | 200123* „Kühlgeräte“ |
| 070504* „Lösemittel“ | | | |
| 080111* „Farbe/Lack“ | | | |
| 140603* „Lösemittel“ | | | |

6.1.2 Entsorgungswege

Zur Darstellung der bestehenden Entsorgungswege werden Grafiken verwendet, die in Abbildung 2.4 erläutert sind.

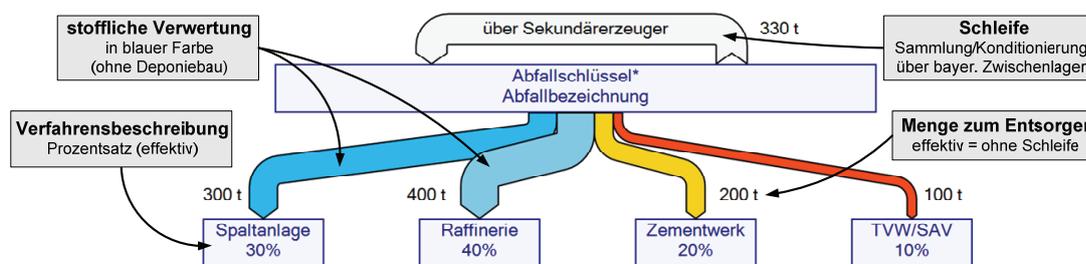


Abbildung 2.4: Erläuterung der grafischen Darstellung zur Bewertung der Entsorgungswege

Flusspfeile in blauer Farbe zeigen die Verfahren zur stofflichen Verwertung der gefährlichen Abfälle. Die Stabilisierung der Abfälle mit Verwertungsweg Deponiebau wird hier ausdrücklich nicht mit eingeschlossen.

Werden Abfälle über ein bayerisches Zwischenlager entsorgt, so hat der Sekundärerzeuger ebenfalls einen Entsorgungsnachweis für diesen Vorgang zu führen. Die Abfallmenge taucht also in den Begleitscheindaten wiederholt auf und muss von der effektiven Entsorgungsmenge in Abzug gebracht werden (= Menge „effektiv“). Erfolgt die Abfallentsorgung jedoch zu einem Zwischenlager außerhalb Bayerns, so wird der Transfer vom Sekundärerzeuger zum effektiven Entsorger des Abfalls nicht mehr in der bayerischen Abfallstatistik erfasst. Die Verbringung zum Zwischenlager gilt als Abfallexport in ein anderes Bundesland. Um die Entsorgungswege bayerischer Abfälle für diese Analyse vollständig abzubilden, wird für diesen Fall eine plausible Entsorgungsoption angenommen (z.B. zu einem großen Entsorger der betreffenden Region oder als Entsorgungs-Mix äquivalent der bayerischen Daten).

6.1.3 Ökobilanzielle Betrachtung

Bei einer ökobilanziellen Betrachtung fallen drei Ergebnissätze an. Das Bilanzierungsmodell liefert zum einen Brutto-Aufwandsergebnisse (Umweltbelastungen) und zum anderen Gutschriften (Umweltentlastungen). Aus der Verrechnung der Brutto-Aufwandsergebnisse und Gutschriften resultiert das Netto-Ergebnis für den betrachteten Abfallschlüssel, das anzeigt, ob die Umwelt durch dessen Entsorgung insgesamt belastet oder entlastet wird. Die ökobilanziellen Ergebnisse der untersuchten IST-Zustände werden jeweils mit einer zweigeteilten Grafik veranschaulicht (Abbildung 2.5).

Überblick Wirkungskategorien

Im linken Teil der Abbildung 2.5 werden die Netto-Ergebnisse aller fünf betrachteten Wirkungskategorien und zweier humantoxischer Einzelparameter gegenübergestellt. Die Balken zeigen, normiert auf Einwohnerwerte, wie groß der Beitrag der Wirkungskategorien zur Umweltbelastung ist (Balken nach rechts). Ergeben sich Netto-Umweltentlastungen zeigen die Balken dementsprechend nach links.

Treibhauspotential sektoral

Im rechten Teil der Abbildung 2.5 wird das Ergebnis zum Treibhauseffekt („Treibhauspotential“) in t CO₂-Äquivalenten weiter aufgeschlüsselt. Die Brutto-Aufwände (Balken nach oben), Gutschriften (Balken nach unten) und das sich ergebende Netto-Ergebnis werden getrennt voneinander ausgewiesen. Die sektorale Unterteilung in die Abschnitte

- Transporte (Abfallverbringung nach Begleitscheinen und alle weiteren Transportaufwendungen),
- Energien (Energiebereitstellung sowie energetische Verwertung) und
- Stoffe (stoffliche Vorketten, Prozessaufwendungen sowie Reststoffbehandlung)

erlaubt es, die relevanten Beiträge zum Gesamtergebnis zu identifizieren. Auf eine farblich unterteilte Darstellung des Netto-Balkens wurde verzichtet, da aufgrund der Verrechnung eine zweckdienliche Auflösung in Sektoren nicht möglich ist.

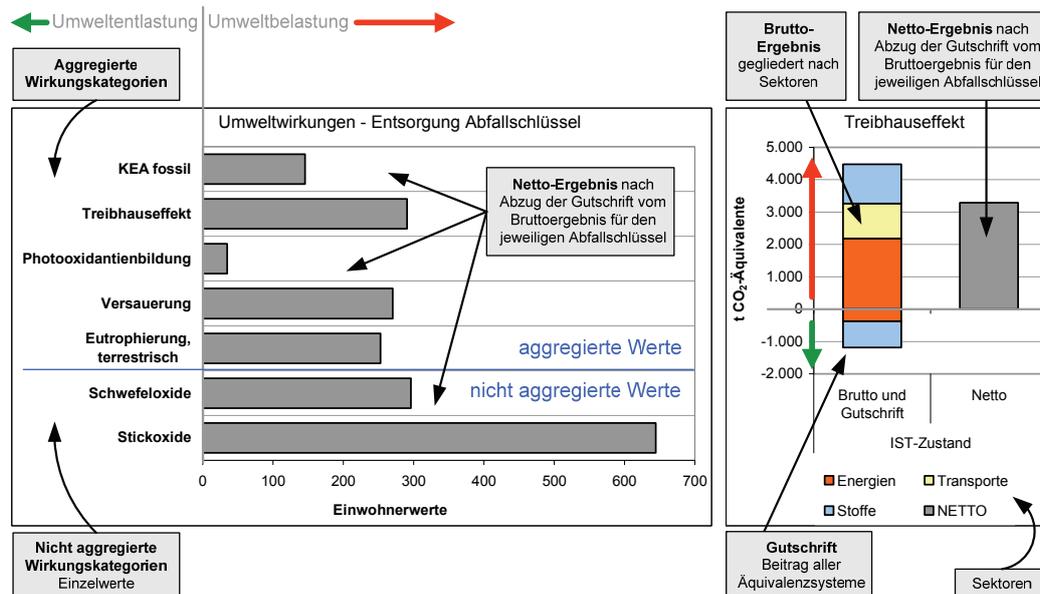


Abbildung 2.5: Erläuterung der grafischen Darstellung der Ergebnisse nach Wirkungskategorien für das Szenario IST-Zustand (links) mit sektoraler Darstellung für das Treibhauspotential (rechts)

6.2 Abfallschlüssel „Lösemittel“

Insgesamt sieben der 18 im Projekt betrachteten Abfallschlüssel werden der Gruppe „Lösemittel“ zugeordnet (vgl. Tabelle 2.3). Die Ergebnisse zum AS 070204* sind für die Entsorgung der *Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen* sowie der *Lösemittelgemische* typisch. Das Ergebnis des zweiten dargestellten Beispiels, des AS 080111* „lösemittelhaltige Farb- und Lackabfälle“, weicht hiervon ab, ergänzt die vorgestellten Entsorgungswege für alle betrachteten Lösemittelabfälle aber zur Vollständigkeit.

6.2.1 Beispielhafte Darstellung: AS 070204* – andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen

Abfallbeschreibung

Seit 1999 die Umstellung vom LAGA-Abfallartenkatalog zum Europäischen Abfallkatalog (EAK) und weiter 2002 zur Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) vollzogen wurde, wird nicht mehr ausschließlich nach Abfallarten, sondern verstärkt nach der industriellen Herkunft der Abfälle unterschieden. Damit entfällt die Trennung nach Lösemitteltypen wie z.B. Ethylenglykole, Benzol oder Kaltreiniger weitgehend. Dies verursachte im Rahmen der Bilanzierung erhebliche Schwierigkeiten bei der Charakterisierung des Abfalllösemittel-Gemisches innerhalb eines Abfallschlüssels. Befragte Akteure unterstreichen die große Diversität der Anwendungsbereiche sowohl bezogen auf die eingesetzten Lösemittel wie auch auf die Wassergehalte oder Verschmutzungsgrade der Abfälle. So ließe sich eine modellhafte Zusammensetzung immer nur anhand eines konkreten Beispiels definieren, wobei Fragen zum Einsatzgebiet, den technischen Möglichkeiten und dem wirtschaftlichen Hintergrund zu diskutieren wären [TK1 UND TK8 2010].

Soweit keine Literaturangaben zu Stoffgemischen vorlagen und für die Modellierung eine Parameterbestimmung notwendig war, wurde auf die Abfallanalysendatenbank ABANDA des Landes Nordrhein-Westfalen zurückgegriffen. Bei ausreichender Anzahl vorliegender Datensätze wurden die Auswertungen auf neuere Datensätze beschränkt, um z.B. nur mit Werten ab den Jahren 2000 oder 2005 zu arbeiten. [ABANDA 2010]

Quantifizierung der Entsorgungswege

Aus den Begleitscheinen wurden für das Jahr 2007 die Entsorgungswege wie in Abbildung 2.6 dargestellt ermittelt. Mit 14.128 t trägt der AS 070204* zu allen in dieser Studie betrachteten Lösemittel-Abfallschlüsseln über 50 % zur gesamten stofflichen Verwertung in Destillationsanlagen (25.983 t) bei.

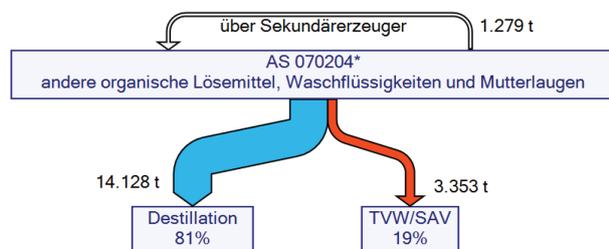


Abbildung 2.6:
Mengenmäßige Aufteilung der
Entsorgungswege des AS 070204*

Bilanzierungsmodell

Für den AS 070204* sind die beiden folgenden Entsorgungswege zu berücksichtigen:

Destillation von Abfalllösemitteln (Batch-Prozess):

Die Modellierung der Destillation von Abfalllösemitteln basiert auf Wertebereichen, die anhand einer umfassenden statistischen Analyse von 150 industriellen Destillationsprozessen der Schweizer Chemieindustrie berechnet wurden [CAPELLO 2006]. Wichtige Parameter der verbleibenden Destillatrückstände wie Restlösemittelgehalt und Heizwert werden nach GIEGRICH ET AL. 2002 bewertet und für die Rückstände eine Sonderabfallverbrennung angenommen. Die daraus wiederum entstehenden Verbrennungsrückstände wurden deponiert. Ebenso erfolgt eine der Destillation nachgeschaltete Reinigung der Abwässer.

Verbrennung von Lösemittelgemischen:

Als wesentliche Grundlage dieses Verwertungspfades werden die Ergebnisse und die Methodik einer Multi-Input-Allokationsmodellierung der Verbrennung von Abfalllösemitteln aus der chemisch-pharmazeutischen Industrie herangezogen [SEYLER 2003]. Unter Verwendung der ABANDA-Abfallanalysen wird diese Berechnungsmethodik übernommen und die Prozessparameter für den Abfallschlüssel bestimmt. Nachdem sich die Emissionswerte dieser Studie rein auf die Verbrennung des Abfalllösemittels beziehen, erfolgt die Berechnung der Emissionen aus der Verbrennung der benötigten Betriebsstoffe Erdgas und Heizöl in der hier erarbeiteten Bilanz über zwei Module zur Erzeugung industrieller Nutzwärme aus einer kommerziellen Datenbank [JUNGBLUTH ET AL. 2007, EMMENEGGER ET AL. 2007]. Für die in der Verbrennungsanlage erzeugte Menge elektrischer Energie wird ein Netto-Wirkungsgrad von 15 % angenommen, eine Nutzung der Abwärme erfolgt nicht.

Ökobilanzielle Betrachtung

Abbildung 2.7 zeigt, dass die Entsorgung von 17.490 t des AS 070204* für alle Wirkungskategorien bis auf das Treibhauspotential im Ist-Zustand zu einer Entlastung der Umwelt führt. Die sehr hohe Entlastung von Schwefeloxidemissionen resultiert hauptsächlich aus der Wiederverwendung der Lösemittel und dem Ersatz von Neuware im Äquivalenzsystem¹².

Die konträren Ergebnisse für die ansonsten oft korrelierenden Ergebnisse zu KEA fossil (Entlastung) und Treibhauspotential (Belastung) erklären sich durch die Tatsache, dass die „Herstellung“ der zu den betrachteten Abfällen gewordenen Lösemittel außerhalb der Systemgrenze liegt. Sie fallen daher im Bilanzraum an, ohne durch einen energetischen Aufwand belastet zu sein (KEA = 0). Werden die Abfälle einer Verbrennung zugeführt, entstehen dagegen durch den enthaltenen Kohlenstoffanteil Treibhausgasemissionen, die in die Bilanz Eingang finden (Treibhauspotential > 0). Hingegen trägt die Verbrennung fossiler Brennstoffe über das Äquivalenzsystem sowohl zum stofflichen Herstellungsaufwand (KEA > 0), als auch zu den Treibhausgasemissionen, die bei der Verbrennung anfallen (Treibhauspotential > 0) bei. Dies führt letztlich dazu, dass die Nettoergebnisse für KEA fossil immer besser bewertet werden, als die des Treibhausgaspotentials.

¹² Äquivalenzsystem: durch die Verwertung von Reststoffen (hier Lösemittelgemisch) erzeugter Nutzen (hier Regenerat) und mit dem Entfall der konventionellen Erzeugung dieses Nutzens (hier Herstellung von Lösemittel-Frischware) vermiedene Umweltbelastungen.

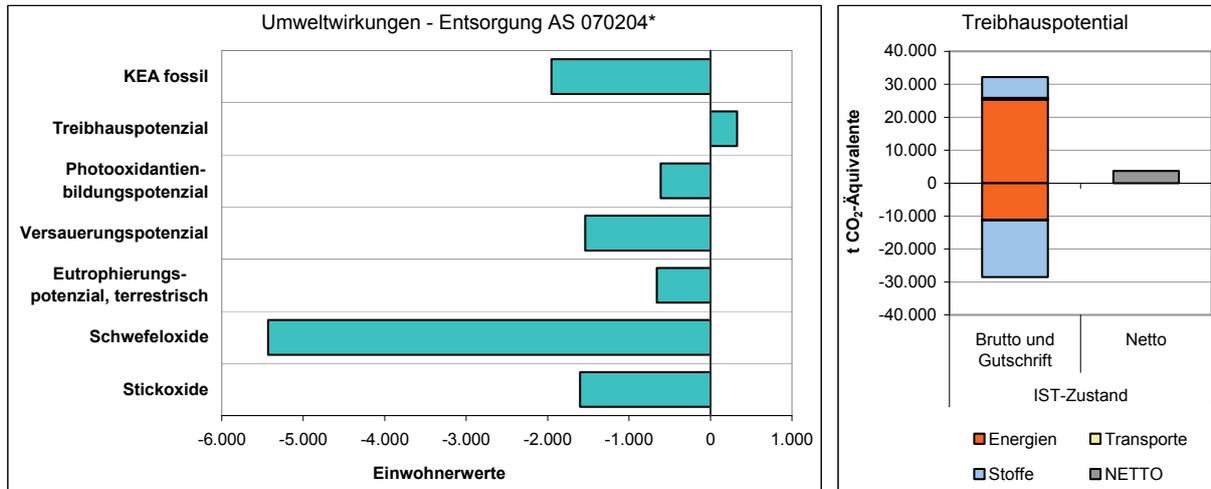


Abbildung 2.7: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 17.490 t des AS 070204* mit Sektoralanalyse für das Treibhauspotential

Die Treibhausgasemissionen betragen netto ca. 3.700 t CO₂-Äquivalente, was ungefähr dem von 330 Einwohnern pro Jahr in Deutschland verursachten Treibhauspotential entspricht. Die treibhauswirksamen Gase stammen hauptsächlich aus der stofflichen und energetischen Verwertung. Sie überwiegen die durch die Wiederverwendung der Lösemittelregenerate und die Substitution von fossilen Brennstoffen vermiedenen Emissionen geringfügig.

Entsorgungskosten

Die Heterogenität der Abfallanfallstellen und die Vielzahl der Entsorgungswege machen den Abfalllösemittelmarkt laut ERM-ABAG 1999 sehr intransparent. Die Entsorgungspreise orientieren sich im Wesentlichen an Heizwert und Störstoffen des Abfalls, da die stoffliche Verwertung immer in Konkurrenz zur energetischen Verwertung steht. Niedrigere Entsorgungspreise für die Destillationsrückstände (immerhin rund 30 Gew.-%) können aber andererseits auch die Kosten einer stofflichen Aufarbeitung reduzieren. Ein weiteres wichtiges Kriterium im Zusammenspiel der Entsorgungsoptionen ist der Marktpreis für Neuware. Die Destillationsausbeuten selbst werden somit im Rahmen der stofflichen und verfahrenstechnischen Gegebenheiten stark preis- und kostenoptimiert. [vgl. auch TK8 2010]

Tabelle 2.4 gibt einen orientierenden Überblick über die ermittelten Entsorgungskosten und deren Spannweiten [ERM-ABAG 1999 UND GSB 2011B]. Zudem werden beispielhafte Effekte angeführt, die die Entsorgungsstrukturen beeinflussen, etwa die Preisentwicklung bei Frischware, geringe Anteile hochwertiger Stoffe im Lösemittelabfall oder Marktgegebenheiten in unterschiedlichen Ländern [TK8 2010].

Tabelle 2.4: Beispielhafte Kosten, Erlöse (negativ) und Einflussgrößen zur Entsorgung von Abfalllösemitteln – orientierende Angaben [ERM-ABAG 1999, GSB 2011b, TK8 2010]

| Entsorgungskosten für Lösemittelabfälle [€/t] | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Destillation | SAV | TVW | Zementwerk |
| 50-200 / 300 | 75-150 / 130-180 | 0-50 / Erlös | 20-100 |
| Erlöse für Lösemittel und Chemikalien [€/t] | | | |
| Aceton | Frischware | -800 (Sep. 2010) | -1.000 (Mrz. 2011) |
| | Regenerat | -400 bis -700 | |
| Jod | z.B. 8-10 % des Abfall-lösemittels | -2.000 | |
| Marktunterschiede | | | |
| Hexan-Anteil im Regenerat | Deutschland | keine Akzeptanz (Geruch!) | |
| | Polen | Abnehmer vorhanden | |

6.2.2 Beispielhafte Darstellung: AS 080111* – Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten

Abfallbeschreibung

Die bei der Farb- und Lackherstellung, -lagerung und -anwendung anfallenden Nass- oder Flüssiglackreste, die noch nicht ausgehärtet sind, enthalten neben Wasser in der Regel noch weitere Lösemittel, vor allem in Form von aliphatischen oder aromatischen Kohlenwasserstoffen. Die Lösemittelgehalte können je nach Lacktyp zwischen 3 % und 85 % variieren. Ein Großteil der in Betracht kommenden organischen Lösemittel ist als entzündlich oder leicht entzündlich, gesundheitsschädlich und umweltgefährlich eingestuft. [IPA 2010A]

Die für die Modellierung verwendete Abfallanalytik dieses sehr heterogenen Abfallschlüssels basiert auf den Datensätzen der Abfallanalytischen Datenbank ABANDA ab dem Jahr 2000. [ABANDA 2010]

Quantifizierung der Entsorgungswege

Aus den Begleitscheinen ergeben sich für das Jahr 2007 die Entsorgungswege wie in Abbildung 2.8 dargestellt. Über 85 % der Abfälle werden demnach thermisch behandelt, nur knapp 15 % stofflich verwertet.

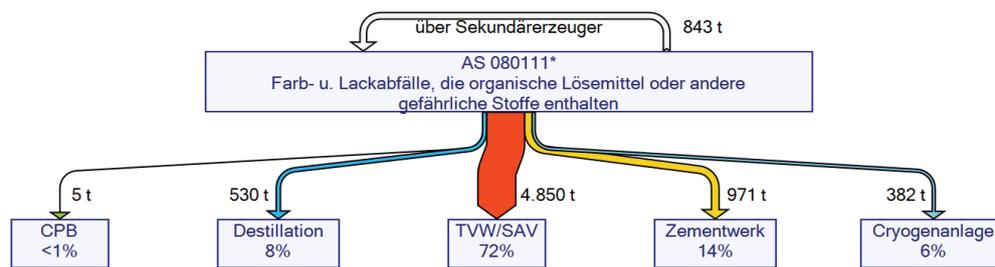


Abbildung 2.8: Mengenmäßige Aufteilung der Entsorgungswege des AS 080111*

Bilanzierungsmodell

Neben den im Abschnitt 6.2.1 besprochenen Entsorgungsprozessen *Destillation von Abfalllösemitteln* und *Verbrennung von Lösemittelgemischen zur Stromerzeugung* sind bei der Entsorgung des AS 080111* drei weitere Entsorgungswege zu bilanzieren:

Mitverbrennung im Zementwerk:

Die Bilanzierung des Abfalleinsatzes als Brennstoff in der Zementindustrie wird über ein Abfallverbrennungsmodul mit Anpassung der Transferkoeffizienten¹³ für den Klinkerbrennprozess angenähert [FEHRENBACH ET AL. 2007, GIEGRICH ET AL. 2002]. Die bei der Verbrennung entstehenden Aschen können im Drehrohr wieder eingesetzt werden. Durch Filter abgeschiedene Stäube werden dem Klinker oder dem Zement wieder zugesetzt. Dadurch werden alle anfallenden Aschen und Stäube intern verwendet. [WINTER ET AL. 2005]

Versprödung und Zermahlung in einer Cryogenanlage¹⁴:

Durch die eingesetzte Kältentrenntechnik werden Metall- und Kunststoffverpackungen von schädlichen Reststoffen befreit und danach stofflich verwertet. Der wichtigste Verfahrensschritt ist die Versprödung der Rest- und Verbundwerkstoffe durch Schockgefrieren mit flüssigem Stickstoff. Die brüchigen Rückstände und Anhaftungen lassen sich anschließend mechanisch abtrennen. [NEHLSSEN 2010] Die benötigte Kälteleistung wurde durch eine Expertenabschätzung ermittelt. Verbleibende Abfälle werden thermisch behandelt.

Chemisch-physikalische Behandlung:

Da die Menge zur chemisch-physikalischen Behandlung mit weniger als 3 % nur sehr gering ist, wird für die Modellierung ein bestehendes Datenbank-Modul zur Abwasserbehandlung eines flüssigen, kohlenwasserstoffhaltigen Abfalls herangezogen. [DOKA 2009A]

Ökobilanzielle Betrachtung

Die Entsorgung von 6.740 t des AS 080111* zeigt im Unterschied zum AS 070204* und allen anderen Abfallschlüsseln der Gruppe Lösemittel ein differenzierteres Bild der Wirkungskategorien (Abbildung 2.9). Neben dem Treibhauseffekt liegen hier nun auch Umweltbelastungen bei der Versauerung, der terrestrischen Eutrophierung und beim Einzelparameter Stickoxide vor. Die Belastungen entstehen zu

¹³ Transferkoeffizienten: hier: inputbezogene Kennwerte zur Ermittlung der entstehenden Emissionen.

¹⁴ Die dem Entsorgungsweg zugrunde liegenden Informationen aus den Begleitscheindaten sowie Informationen zu außerbayrischen Entsorgungsanlagen von der Zentralen Stelle Abfallüberwachung lassen darauf schließen, dass unter dem AS 080111* teilweise auch Gebinde mit schädlichen Verunreinigungen geführt werden.

etwa je einem Drittel in der Sonderabfallverbrennungsanlage, bei der Mitverbrennung im Zementwerk sowie durch die Transporte. Die Entlastung der Umwelt von Schwefeloxidemissionen resultiert zu 2/3 aus dem Ersatz von Strom, Heizöl und Kohle bei der Energiebereitstellung im Äquivalenzsystem sowie zu 1/3 aus der Wiederverwendung der Lösemittelregenerate und damit dem Ersatz von Frischware.

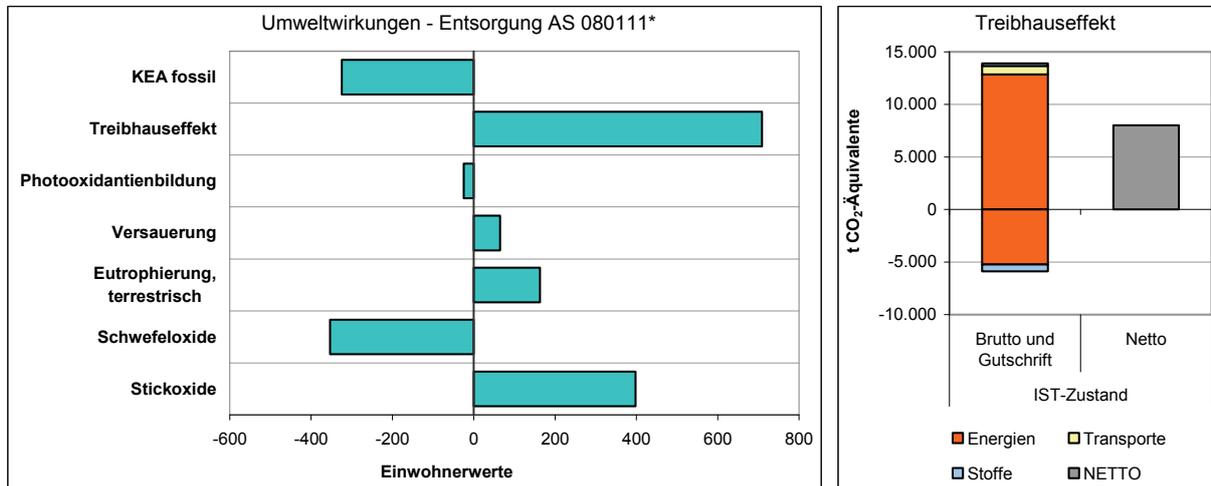


Abbildung 2.9: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 6.740 t des AS 080111* mit Sektoranalyse für das Treibhauspotential

Da die Beseitigungs- und Verwertungswege des Abfalls durch die Verbrennung dominiert werden (86 Gew.-% in thermische Verwertung oder Sonderabfallverbrennung (TVW/SAV) sowie Zementwerk), zeigt auch das Ergebnis zum Treibhauspotential hauptsächlich Wirkungen für den Sektor Energien. Die Transporte machen mit 6 % nur einen kleinen Anteil an der Gesamtbelastung aus. Bei allen anderen Abfallschlüsseln der Lösemittel-Gruppe liegen die Werte bei max. 3 %. Insgesamt ergeben sich für die Entsorgung des AS 080111* Treibhausgasemissionen in Höhe von 8.020 t CO₂-Äquivalenten. Dies entspricht den von 710 Einwohnern pro Jahr verursachten Treibhausgasemissionen.

Entsorgungskosten

Analog zu den Abfallschlüsseln für *andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlauge* sind für die Entsorgungskosten für *Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten* kaum aussagekräftige Daten zugänglich.

Tabelle 2.5: Kostenbeispiele für die Entsorgung des AS 080111* [GSB 2011B, TERSTEEG 2008]

| Entsorgungskosten für lösemittelhaltige Altfarben und -lacke [€/t] | | |
|--|--------------------------|-----------------|
| SAV | Handlingsaufschlag | ab Sammelstelle |
| 385 | bis zu +100 (z.B. Dosen) | 320-400 |

6.2.3 Gesamtergebnis der Gruppe „Lösemittel“

Quantifizierung der Entsorgungswege

Zusammenfassend ergibt sich für die Gruppe „Lösemittel“ im *Szenario IST-Zustand* die in Abbildung 2.10 dargestellte Verteilung der Entsorgungswege. Knapp 30 % der Abfalllösemittel gehen zur stofflichen Verwertung in Destillationsanlagen, 70 % gehen der thermischen Verwertung (TVW) zu und Teil-

mengen daraus wegen zu hoher Schadstoffbelastung oder zu niedrigem Heizwert auch in die Sonderabfallverbrennung (SAV).

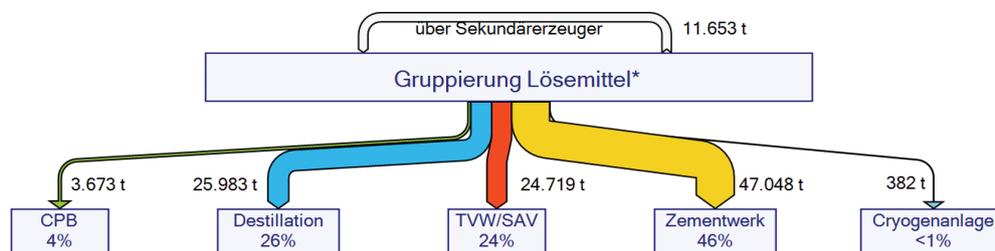


Abbildung 2.10: Mengenmäßige Aufteilung der Entsorgungswege der Gruppe „Lösemittel“

Ökobilanzielle Betrachtung

In Abbildung 2.11 sind die ökobilanziellen Ergebnisse der Gruppe „Lösemittel“ zusammengestellt. Die Abbildung basiert auf der im Abschnitt 6.1.3 vorgestellten Betrachtungsweise, differenziert jedoch für die Wirkungskategorien und Einzelparameter zwischen den Umweltbelastungen, die bei der Entsorgung der Abfälle entstehen (Balken nach rechts) und den Entlastungen, die über das Äquivalenzsystem verursacht werden (Balken nach links). Als Netto-Ergebnis (graue Balken) ergeben sich aus der Entsorgung von 101.820 t gefährlichen Abfalls, mit Ausnahme des Treibhauseffekts, ausschließlich Umweltentlastungen zwischen 1.700 und 15.800 Einwohnerwerten.

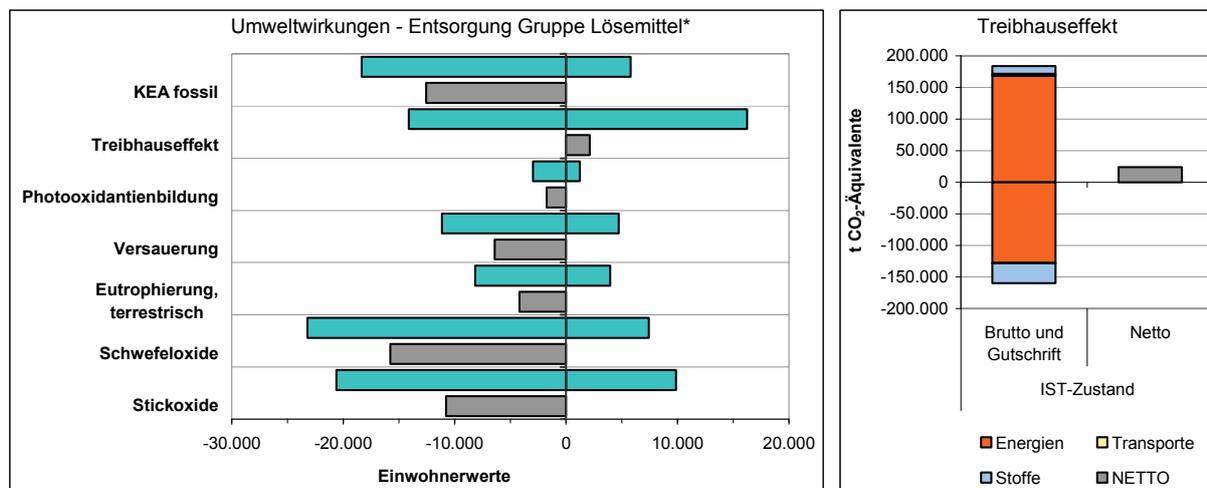


Abbildung 2.11: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 101.820 t aller Abfallschlüssel der Gruppe „Lösemittel“ mit Sektoralanalyse für das Treibhauspotential

Im rechten Teil der Abbildung 2.11 wird deutlich, dass sich in Bezug auf das Treibhauspotential die Umweltbe- und Entlastungen für die Sektoren Energien und Stoffe beinahe aufheben. Netto verbleiben ca. 23.980 t CO₂-Äquivalente, was ungefähr dem von 2.120 Einwohnern pro Jahr in Deutschland verursachten Treibhauspotential entspricht.

Tabelle 2.6 weist die Beiträge der in der Gruppe „Lösemittel“ zusammengefassten Abfallschlüssel zu allen Wirkungskategorien und Einzelparametern aus.

Tabelle 2.6: Abfallschlüssel-Gruppe „Lösemittel“ – Beiträge zur Umweltbelastung und -entlastung nach Abfallschlüssel (EW = Einwohnerwert).

| Parameter | Beitrag zur Umweltbelastung (positiv) und -entlastung (negativ) | | | | | | |
|--|---|-------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| | AS 070104* | AS 070108* | AS 070204* | AS 070304* | AS 070504* | AS 080111* | AS 140603* |
| Aggregierte Werte | | | | | | | |
| KEA fossil | -57.265 MJ (-448 EW) | -39.293 MJ (-307 EW) | -249.819 MJ (-1.952 EW) | -61.272 MJ (-479 EW) | -72.640 MJ (-568 EW) | -41.535 MJ (-325 EW) | -1.084.242 MJ (-8.474 EW) |
| Treibhauspotential [CO ₂ -Äquivalente] | 1.132 t (100 EW) | 4.041 t (357 EW) | 3.714 t (328 EW) | 1.381 t (122 EW) | 8.080 t (714 EW) | 8.024 t (709 EW) | -2.387 t (-211 EW) |
| Photooxidantienbil- dung [Ethen-Äquivalente] | -2.042 kg (-130 EW) | -254 kg (-16 EW) | -9.625 kg (-613 EW) | -2.311 kg (-147 EW) | -596 kg (-38 EW) | -389 kg (-25 EW) | -12.251 kg (-780 EW) |
| Versauerungspotential [SO ₂ -Äquivalente] | -8.814 kg (-261 EW) | -4.248 kg (-126 EW) | -51.849 kg (-1.538 EW) | -11.356 kg (-337 EW) | -6.899 kg (-205 EW) | 2.190 kg (65 EW) | -135.470 kg (-4.019 EW) |
| Eutrophierungs- potential terrest. [PO ₄ -Äqu.] | -454 kg (-86 EW) | -69 kg (-13 EW) | -3.480 kg (-657 EW) | -715 kg (-135 EW) | -780 kg (-147 EW) | 862 kg (163 EW) | -17.519 kg (-3.308 EW) |
| Nicht aggregierte Einzelparameter | | | | | | | |
| Schwefeldioxide | -6.186 kg (-1.031 EW) | -3.694 kg (-615 EW) | -32.607 kg (-5.432 EW) | -7.300 kg (-1.216 EW) | -2.315 kg (-386 EW) | -2.123 kg (-354 EW) | -40.515 kg (-6.749 EW) |
| Stickoxide | -3.124 kg (-198 EW) | -872 kg (-53 EW) | -25.180 kg (-1.600 EW) | -5.078 kg (-323 EW) | -6.190 kg (-393 EW) | 6.271 kg (398 EW) | -135.252 kg (-8.592 EW) |

6.3 Abfallschlüssel „Öle“

In der Gruppe „Öle“ werden alle ölhaltigen Abfallschlüssel zusammengefasst (Tabelle 2.3). Zur exemplarischen Darstellung der Ergebnisse wird zum einen auf den AS 120118* eingegangen, der sich durch seine eher pastöse Konsistenz von den drei anderen typischen Altölabfällen unterscheidet. Zum anderen wird der eher gruppentypische AS 130205* beispielhaft vorgestellt. Somit werden die wichtigsten Entsorgungswege zur Behandlung oder Beseitigung der ölhaltigen gefährlichen Abfälle diskutiert.

6.3.1 Beispielhafte Darstellung: AS 120118* – ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon-, und Lappschlämme)

Abfallbeschreibung

Ölhaltige Metallschlämme („Schleifschlämme“) entstehen überwiegend bei der mechanischen Oberflächenbehandlung von Metallen, z.B. beim Schleifen, Honen oder Läppen. Der Abfall entsteht ebenso bei der spanenden Bearbeitung durch Drehen, Bohren und Fräsen. Als Prozesshilfsmittel kommen u.a. Läpppasten oder Kühlschmierstoffe zum Einsatz. Die feinen Späne und Metallteilchen werden aus dem Bearbeitungsprozess ausgetragen und das Werkstück wird gekühlt. Die Abtrennung der Metallschlämme erfolgt mittels Filtration, wobei die Konsistenz (schuhcremeartig bis Stahlwolle) vom Bearbeitungsverfahren und dem verwendeten Prozesshilfsmittel abhängig ist. Die gängigen hierzu eingesetzten

Kohlenwasserstoffe sind als wassergefährdend und umweltgefährlich eingestuft. Zudem können weitere wasserlösliche Schadstoffe wie Additive aus Emulsionen enthalten sein. Schwermetalle wirken reizend, wasser- und umweltgefährdend oder toxisch. [IPA 2010B]

Informationen zur Zusammensetzung des Abfallschlüssels sind der Tabelle 2.7 zu entnehmen. Detaillierte Abfallparameter wurden über ABANDA ermittelt (Datensätze ab 2000). [ABANDA 2010]

Tabelle 2.7: Zusammensetzung ölhaltiger Metallschlämme (Schleifschlämme) [ABAG 2006, HEYER 1999]

| Inhaltsstoffe | Gehalt | Inhaltsstoffe | Gehalt | Inhaltsstoffe | Gehalt |
|---------------------|---------|------------------------|---------|---------------------|--------|
| Metall | 10-80 % | Öle/Ester | 15-50 % | Emulsionen/Lösungen | 1-20 % |
| Schleifmittelabrieb | 2-75 % | Filtrationshilfsmittel | 0-80 % | Wasser | 5-75 % |

Quantifizierung der Entsorgungswege

Die Begleitscheine dokumentieren für den AS 120118* große Abfallmengen, deren Entsorgung über den Zwischenschritt der Zwischenlagerung und Konditionierung verläuft. Letztlich werden fast 80 % der Metallschlämme eingebunden und stabilisiert. Bei nur knapp 20 % werden Metalle zurückgewonnen (Abbildung 2.12).

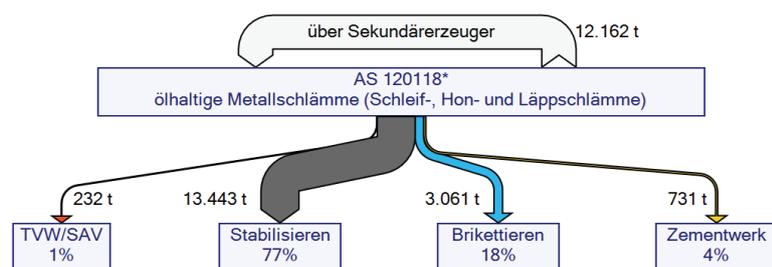


Abbildung 2.12:
Mengenmäßige Aufteilung
der Entsorgungswege des AS 120118*

Bilanzierungsmodell

Für diesen Abfallschlüssel treten zwei bisher noch nicht erläuterte Entsorgungsoptionen auf, für eine weitere erfolgt eine Anpassung. Auf die Bilanzierung dieser Optionen wird im Folgenden eingegangen:

Stabilisierung mit hydraulischen Bindemitteln (Einbindungsverfahren):

Zum Teil wird eine Vorkonditionierung und Reduzierung des Öl- und Feuchtegehalts der Metallschlämme vorgenommen, wobei die abgetrennte Ölphase der energetischen Verwertung zugeführt wird. Hauptbestandteil aller Verfahren ist die physikalische Einkapselung durch Puzzolane oder Zementbildner. Der Einschluss in eine möglichst dauerhaft beständige Matrix ermöglicht abschließend eine Verwertung der Abfälle als Deponiebaustoff. [TK2 UND TK3 2010, SUC 2010] Die energetischen Aufwendungen für Mischanlagen konnten u.a. aus Firmenangaben von WIRTGEN 2008 und AMMAN 2008 abgeleitet werden, die im Besonderen die Modellierung des AS 170301* (kohlenteeerhaltige Bitumen-gemische) aus der Gruppe „Boden“ betreffen.

Brikettierung mit Altölverwertung:

Die ölhaltigen Metallschlämme werden beim Brikettierverfahren mit Drehspänen so vermischt und verpresst, dass die benötigte Stabilität zur Verwertung metallischer Bestandteile erreicht wird. Der Restölgehalt kann durch einen vorherigen Extraktionsprozess reduziert werden oder verringert sich beim Pressprozess selbst so stark, dass die Briketts im Stahlwerk oder in Gießereien eingesetzt werden

können. [PIKHARD & PRETZ 2009] Die Prozessdaten basieren auf einer Anlagenstudie, die Angaben zum Verfahrensablauf, zum Verwertungsprodukt und Kriterien zum stofflichen Einsatz enthält. [HEYER 1999]

Mitverbrennung im Zementwerk:

Für den AS 080111* erfolgt eine Anpassung des Moduls aus Abschnitt 6.2.2, da im Unterschied zu Brennstoffen eisenhaltige Hon-, Lapp- und Schleifschlämme in der Zementindustrie als eisenhaltiger Zuschlagstoff eingesetzt werden. Bei Einbringung an geeigneter Stelle im Zementherstellungsprozess (z.B. Primärbrennzone) wird eine hinreichend vollständige Verbrennung der organischen Bestandteile bei optimaler Energienutzung und Schadstoffzerstörung erreicht. Der Eisenanteil nimmt an der Klinkerbildungsreaktion teil und dient dadurch als Ersatz für den ansonsten benötigten Zuschlagstoff Eisen in oxidischer Form. [LUBW 1996]

Ökobilanzielle Betrachtung

Abbildung 2.13 zeigt für drei Wirkungskategorien eine geringe Entlastung der Umwelt und für vier Wirkungskategorien eine geringe Belastung der Umwelt durch die Entsorgungsvorgänge des AS 120118*. Die beinahe ausgeglichenen Ergebnisse ergeben sich durch die Höhe der Gutschriften (Umweltentlastungen) aus dem Äquivalenzsystem, die die jeweiligen Brutto-Umweltbelastungen nahezu oder vollständig aufwiegen.

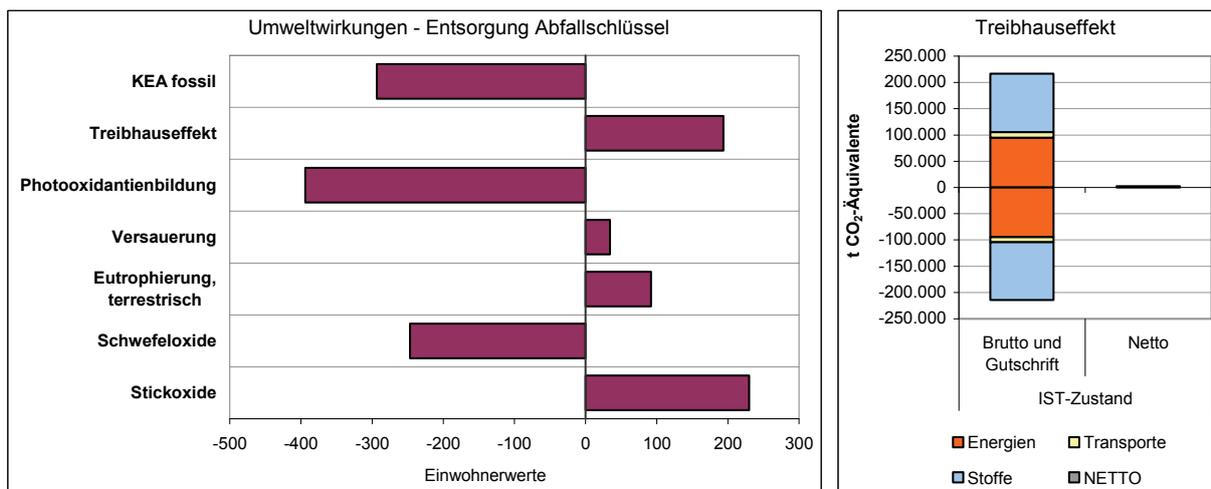


Abbildung 2.13: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 17.470 t des AS 120118* mit Sektoralanalyse für das Treibhauspotential

Auch aus der sektoralen Betrachtung der Wirkungskategorie Treibhauseffekt wird deutlich, dass sich die Be- und Entlastungen aller Bereiche nahezu aufheben. Das Ergebnis wird dabei sowohl im Sektor Stoffe als auch im Sektor Energien durch die metallurgischen Prozesse dominiert. Es verbleiben nach Gutschriftenverrechnung 2.190 t CO₂-Äquivalente als Umweltbelastung, was einem von ca. 194 Einwohnern verursachten Treibhauspotential entspricht.

Entsorgungskosten

Bzgl. der Entsorgungskosten gibt HEYER 1999 einen Überblick zu üblichen Beseitigungswegen, deren Erhebung aber bereits einige Zeit zurück liegt (vgl. Tabelle 2.8). Nach persönlicher Mitteilung eines Firmenkontaktes liegen die Kosten für die Abfallentsorgung aktuell bei höchstens 300 €/t. Der Fokus liege aber deutlich auf der Ölrückgewinnung und den hierüber zu generierenden Erlösen [TK9 2011].

Deutlich wird auch bei diesem Abfallschlüssel, dass eine große Abhängigkeit von den Marktgegebenheiten und -entwicklungen besteht. Einflüsse wie aktuelle Schwankungen der Schrottpreise oder die Kostenentwicklung für Kühlschmierstoffe lassen die Entsorger zu einen oder zur anderen Entsorgungsoption tendieren.

Tabelle 2.8: *Kosten für die Entsorgung von ölhaltigen Metall-Schleifschlamm – orientierende Angaben [Heyer 1999]*

| Entsorgungskosten für ölhaltige Metall-Schleifschlamm [€/t] | | | | |
|---|---------|---------|-----------------|-------------------|
| Brikettieren | Deponie | SAV | Zementindustrie | Sintern+Verhütten |
| 150-300 | 200 | 300-420 | 125 | 150-300 |

6.3.2 Beispielhafte Darstellung: AS 130205* – nichtchlorierte Maschinen-, Getriebe- und Schmieröle auf Mineralölbasis

Abfallbeschreibung

Für die stoffliche Zusammensetzung von Altölen gilt laut UBA 2010, wie schon für die Abfalllösemittel, dass „im Zuge der Entsorgung sehr unterschiedliche Produkte übernommen und verarbeitet werden. Um eine differenzierte Einstufung vornehmen zu können, müssen die aufgenommenen Altöle einer umfangreichen analytischen Beurteilung unterzogen werden.“ Im Besonderen für die Kategorie der als gefährliche Abfälle einzustufenden *nichtchlorierten Maschinen-, Getriebe- und Schmieröle auf Mineralölbasis* waren bifa solche Auswertungen nicht zugänglich. Es liegen jedoch Studienergebnisse zu den betroffenen Altölverwertungsanlagen vor, die auf einer typischen Zusammensetzung der verwerteten Altöle aufbauen.

Darüber hinaus konnten für die Modellierung benötigte Parameter wiederum auf Basis der Abfallanalytendatenbank des Landes NRW bestimmt werden, mit Datensätzen ab dem Jahr 2000. [ABANDA 2010].

Quantifizierung der Entsorgungswege

Für das Jahr 2007 ergeben sich aus den Begleitscheindaten die Entsorgungswege nach Abbildung 2.14. Etwa die Hälfte des AS 130205* wird jeweils einer stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt. Mit fast 30.000 t, die über den Zwischenschritt einer Zwischenlagerung/Konditionierung erfasst werden, gehen nur knapp 40 % dieses Abfallschlüssels direkt zum Entsorger.

Diese sehr häufigen Umschlagvorgänge führen dazu, dass die in den Begleitscheinen erfasste Gesamtmenge von 78.000 t (Primär- und Sekundärerzeuger) nur einem effektiven Abfallaufkommen von 48.720 t entspricht. Dabei ist der vollständige Entsorgungsweg von ca. 90 % aller zwischengelagerten Abfälle in den Begleitscheindaten erfasst, da die Stoffströme von bayerischen Zwischenlagern (Sekundärerzeugern) ausgehen. Für die Entsorgung der restlichen Mengen aus außerbayerischen Zwischenlagern (hierzu liegen keine bayerischen Begleitscheine vor) wird zur Weiterverarbeitung ein äquivalenter Verfahrensmix wie für die Mengen ab bayerischen Zwischenlagern angenommen.

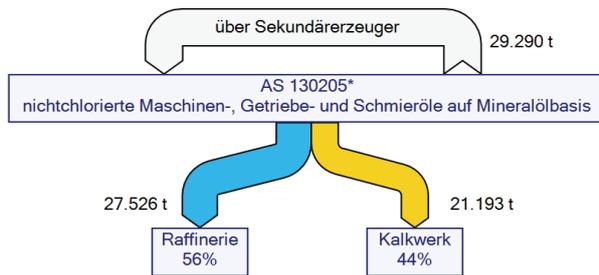


Abbildung 2.14:
Mengenmäßige Aufteilung
der Entsorgungswege des
AS 130205*

Bilanzierungsmodell

Die wichtigsten Prozesse für die Entsorgung der nichtchlorierten Mineralöle sind:

Raffination von Altölen:

Das Bilanzierungsmodell baut für zwei von drei Raffinerien auf Prozesswerten von 2003 und 2004 auf, die die Vakuum/Flash-Destillation und die katalytische Wasserstoffbehandlung der beiden Altölrecycler beschreiben [FEHRENBACH 2005]. Für die dritte relevante Anlage liegen Sachbilanzdaten aus einem Branchenkonzept von MÖLLER 1999 vor. Dargestellt wird ein im Jahr 1999 neu eingeführtes Einrohrreaktorverfahren. Die Anlage befindet sich mittlerweile im Betrieb. Minderwertige Nebenprodukte verwenden alle drei Raffinerien zur Energieerzeugung direkt am Standort.

Mitverbrennung im Kalkwerk:

Die vorliegende Ökobilanzierung unterscheidet nicht zwischen dem Einsatz des Abfalls als Brennstoff im Kalkwerk oder der Zementindustrie (vgl. Abschnitt 6.2.2).

Zwischenlagerung:

Alle Stoffflüsse, die über Zwischenlager oder Abfallkonditionierer laufen, werden im Modell jeweils mit Pumpenergien beaufschlagt. Zur Ermittlung der effektiven Abfallmenge wird wie unter Abschnitt 6.1.2 beschrieben vorgegangen.

Ökobilanzielle Betrachtung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind in Abbildung 2.15 dargestellt. Bis auf die terrestrische Eutrophierung und die Stickoxidemissionen zeigen alle Netto-Ergebnisse Entlastungen der Umwelt durch die Entsorgung des AS 130205* an. Die Entlastungen bei der Photooxidantienbildung sind getrieben durch Gutschriften für Schmieröle, die Entlastungen bei den Schwefeldioxidemissionen durch Gutschriften für Diesel und Heizöl im Äquivalenzsystem. Die höchsten Beiträge zu den Belastungen aus der Photooxidantienbildung und an Stickoxidemissionen stammen mit 70 und 90 % aus der Verbrennung der Abfälle im Zementwerk.

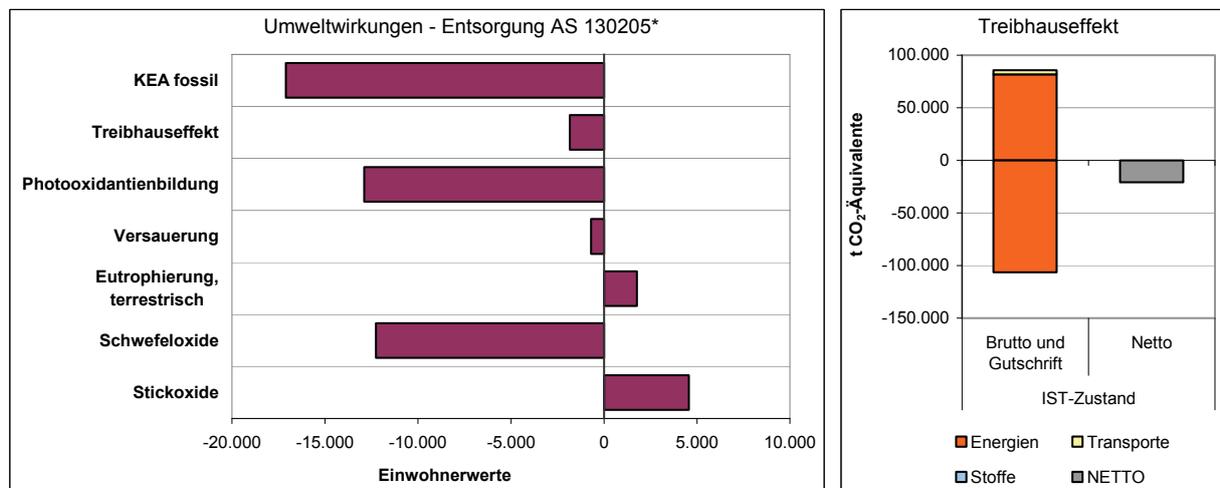


Abbildung 2.15: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 48.720 t des AS 130205* mit Sektoralanalyse für das Treibhauspotential

In der Wirkungskategorie Treibhauseffekt trägt die Verwertung der Altöle in der Zementindustrie, und damit als Ersatz fossiler Energieträger, zu 80 % der Brutto-Einsparung in Höhe von 20.860 t CO₂-Äquivalenten bei. Dies entspricht etwa dem Gleichwert der von 1.840 Einwohnern pro Jahr in Deutschland verursachten Treibhausgasemissionen.

Entsorgungskosten

Eine Trennung nach Altöl-Typen lässt sich für die nichtchlorierten Mineralöl-Abfälle, wie bereits in der Abfallbeschreibung geschildert, nicht vornehmen. Dementsprechend sind auch nur näherungsweise Angaben zu Entsorgungspreisen möglich (Tabelle 2.9).

Tabelle 2.9: Kosten und Erlöse (negativ) im Umgang mit der Entsorgung von Altölen – orientierende Angaben [Tersteeg 2008, LRAM 2010 und GVG/BAV 2010]

| Kosten bzw. Erlöse bei der Entsorgung von Altölen [€/t] | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| | <1m ³ | >1m ³ | >2m ³ |
| 1 bis 10 l | | | |
| bis 10 | -65,00 | -68,50 | -70,00 |

6.3.3 Gesamtergebnis der Gruppe „Öle“

Entsorgungswege

Für die Gruppe „Öle“ ergibt sich die in Abbildung 2.16 dargestellte Verteilung der Entsorgungswege im Szenario IST-Zustand. Die Aufteilung weist 40 % der 82.930 t gefährlicher Abfälle zur stofflichen Verwertung in Raffinerieanlagen und zur Brikettierung aus. Gut 40 % der Abfallmenge geht in die thermische Verwertung (Zement- und Kalkwerk). Die 16 % zur Stabilisierung stammen ausschließlich aus der Entsorgung der ölhaltigen Metall-Schleifschlämme (AS 120118*).

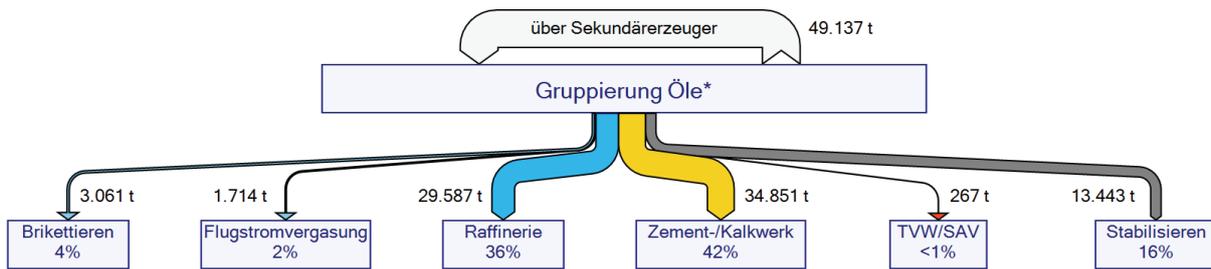


Abbildung 2.16: Mengenmäßige Aufteilung der Entsorgungswege der Gruppe „Öle“

Ökobilanzielle Betrachtung

Das Netto-Gesamtergebnis der Gruppe „Öle“ (Tabelle 2.17) stellt sich ähnlich differenziert dar wie das des AS 130205*. So ergeben sich Umweltentlastungen für den KEA fossil, das Treibhauspotential, POCP und die Schwefeloxide. Das terrestrische Eutrophierungspotential und die Stickoxide weisen dagegen bei der Entsorgung dieser gefährlichen Abfälle eine Netto-Umweltbelastung aus.

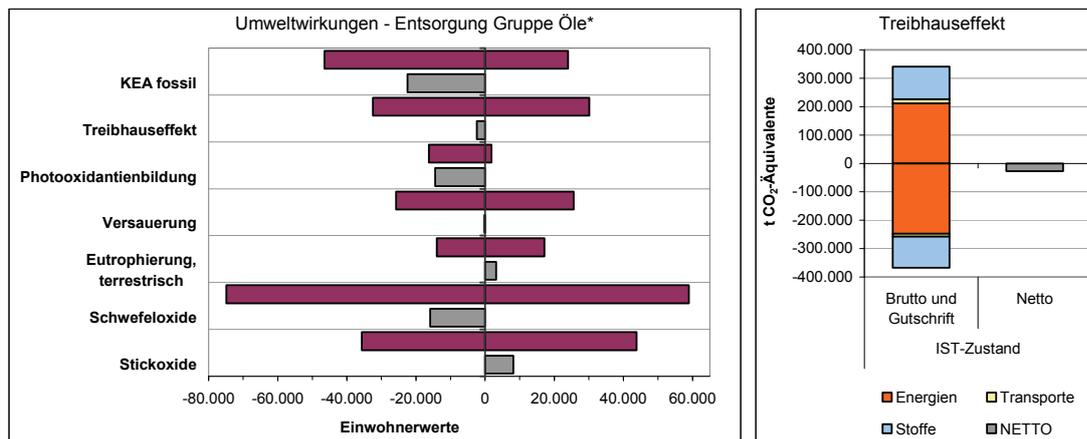


Abbildung 2.17: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 82.930 t aller Abfallschlüssel der Gruppe „Öle“ mit Sektoralanalyse für das Treibhauspotential

Beim sektoral aufgeschlüsselten Treibhauspotential gleichen sich die Be- und Entlastungen in etwa aus. Letztlich resultiert eine verhältnismäßig geringe Umweltentlastung in Höhe von 32.520 t CO₂-Äquivalenten. Dies entspricht dem Gleichwert von ca. 2.390 Einwohnern.

Tabelle 2.10 weist die Beiträge der in der Gruppe „Öle“ zusammengefassten Abfallschlüssel zu allen Wirkungskategorien und Einzelparametern aus.

Tabelle 2.10: Abfallschlüssel-Gruppe „Öle“ – Beiträge zur Umweltbelastung und -entlastung nach Abfallschlüssel (EW = Einwohnerwert)

| Parameter | Beitrag zur Umweltbelastung (positiv) und -entlastung (negativ) | | | |
|--|---|-------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| | AS 120107* | AS 120118* | AS 130205* | AS 130703* |
| Aggregierte Werte | | | | |
| KEA fossil | -473.522 MJ (-3.701 EW) | -37.540 MJ (-293 EW) | -2.189.935 MJ (-17.115 EW) | -172.884 MJ (-1.351 EW) |
| Treibhauspotential [CO ₂ -Äquivalente] | -5.884 t (-520 EW) | -2.192 t (-194 EW) | -20.865 t (-1.844 EW) | -2.521 t (-223 EW) |
| Photooxidantienbildung [Ethen-Äquivalente] | -14.640 kg (-932 EW) | -6.193 kg (-394 EW) | -202.622 kg (-12.895 EW) | -3.247 kg (-207 EW) |
| Versauerungspotential [SO ₂ -Äquivalente] | 7.942 kg (236 EW) | 1.166 kg (35 EW) | -23.420 kg (-695 EW) | 8.278 kg (246 EW) |
| Eutrophierungspotential terrestrisch [PO ₄ -Äquivalente] | 4.278 kg (808 EW) | 487 kg (92 EW) | 9.393 kg (1.774 EW) | 2.579 kg (487 EW) |
| Nicht aggregierte Einzelparameter | | | | |
| Schwefeldioxide | -14.997 kg (-2.498 EW) | -1.482 kg (-247 EW) | -73.576 kg (-12.256 EW) | -5.587 kg (-931 EW) |
| Stickoxide | 32.840 kg (2.086 EW) | 3.620 kg (230 EW) | 71.867 kg (4.565 EW) | 19.788 kg (1.257 EW) |

6.4 Abfallschlüssel „Boden“

Am Beispiel des AS 170503* *Boden und Steine, die gefährliche Stoffe enthalten* werden alle Verfahren, die auch bei den anderen Abfallschlüsseln der Gruppe „Boden“ (AS 170301* „kohlenteerhaltiger Straßenaufbruch“ und AS 170507* „Gleisschotter“) Anwendung finden, vorgestellt sowie das Ergebnis diskutiert.

6.4.1 Beispielhafte Darstellung: AS 170503* – Boden und Steine, die gefährliche Stoffe enthalten

Abfallbeschreibung

Ein für die Bodenbehandlung sehr wichtiger Parameter ist der Feuchte- bzw. der Wassergehalt des verunreinigten Bodens. Dieser Wert kann je nach Bodenstruktur sehr unterschiedlich sein und starken Schwankungen unterliegen. Für die Festlegung eines „Durchschnittsbodens“ wurde auf Basis von ABANDA und Expertenabschätzungen ein mittlerer Wert von 14 % angenommen. Des Weiteren wurde festgelegt, dass die Böden eine sandige bis schluffige Zusammensetzung aufweisen und die maximale Wasserkapazität bei 30 % liegt. Die Auswertung der ABANDA Datenanalysen ergab zudem, dass sich die meisten Proben mit einem pH-Wert von 7,5 etwa im neutralen Bereich befinden (Datensätze ab 2006) [ABANDA 2010]. Auf Basis von Entsorgerauskünften aus dem Bereich der Bodenwäsche [TK4 2010] wurde die Parameterbestimmung vervollständigt (Tabelle 2.11).

Tabelle 2.11: Beispielhafte Bodenzusammensetzung [TK4 2010]

| Material | Anteil in Gew.-% | Material | Anteil in Gew.-% |
|-----------------------------------|------------------|---------------------|------------------|
| Eisen | bis 1 | Schotter (32-70 mm) | ca. 20 |
| Leichtfraktion (Wurzeln, Plastik) | 2 bis 3 | Kies (2-32 mm) | 30 bis 40 |
| Überkorn (>70 mm) | bis 10 | Sand (0,063-2 mm) | 20 bis 30 |

Soweit keine genaueren Angaben zur Verfügung standen, wurde für die Belastungswerte auf die Abfallanalytik des Landes NRW ab den Jahren 2006 zurückgegriffen [ABANDA 2010].

Quantifizierung der Entsorgungswege

Wie aus den Begleitscheinen für das Auswertungsjahr 2007 hervorgeht, dominiert ein Entsorgungsvorgang die mengenmäßige Verteilung der Entsorgungswege deutlich, da zur Sanierung eines großen Chemiestandortes allein 1/3 der belasteten Böden in einer thermischen Verwertungsanlage behandelt wurde. Etwas mehr als ein Drittel des AS 170503* wird auf Deponien verbracht, zur einen Hälfte direkt in die Beseitigung (Deponie: 20 %) und zur anderen Hälfte in eine deponiebauliche Verwertung (nach Stabilisierung: 17 %).

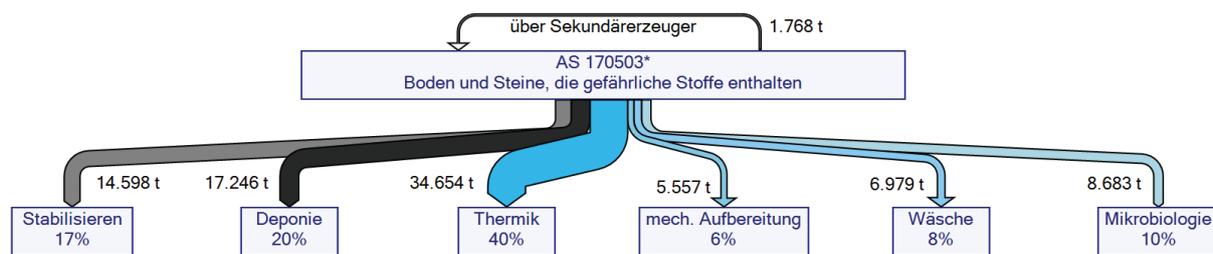


Abbildung 2.18: Mengenmäßige Aufteilung der Entsorgungswege des AS 170503*

Bilanzierungsmodell

Für die Modellierung der Entsorgung/Verwertung von *Böden und Steinen, die gefährliche Stoffe enthalten*, sind folgende Prozesse von Bedeutung:

Thermische Behandlung durch Vakuumdestillation:

Schadstoffe werden in der thermischen Anlage unter Unterdruck aus dem Boden destilliert. Vom Anlagenbetreiber konnten für die Modellierung wichtige Prozessparameter eingeholt werden [TECHNO SAN 2010 UND TK5 2010]. Die energetischen Aufwendungen mussten dagegen rechnerisch abgeschätzt werden.

Deponierung, teilweise mit vorhergehender Stabilisierung:

Die Vorgänge während der Deponierung werden mittels Daten zu Inertstoffdeponien modelliert. Im Wesentlichen sind hier aber nur die Transporte zur Deponie ergebnisrelevant. Die teilweise vorhergehende Stabilisierung der Schadstoffe im Boden wird im Modell über ein Kaltmischverfahren mit puzzolan-hydraulischen Bindemitteln abgebildet (in Anlehnung an TK2; WIRTGEN 2008, AMMAN 2008).

Bodenwäsche:

Über ein Unternehmen, das eine Bodenwaschanlage betreibt, konnten detaillierte Prozessdaten zu diesem Verfahren ermittelt werden [A-Z-B 2010A UND GN2 2010]. Allgemein ist die Modellierung eines durchschnittlichen Bodenwaschverfahrens jedoch schwierig, da sich die Anlagenparameter bzgl. des Durchsatzes, des spezifischen Wasser- und des Energieverbrauchs stark unterscheiden.

Mikrobiologische Bodenbehandlung:

In Zusammenarbeit mit bifa-Experten aus dem Bereich Mikrobiologie wurden für die mikrobiologische Bodensanierung eines mit Kohlenwasserstoffen belasteten Bodens analog der Vorgehensweise von A-Z-B 2010B eine Behandlungsoption mit Nährstoff- (NPK-Dünger), Wasser- und Luftzugabe definiert. Die Grundlage zur Annahme der Kohlenwasserstoffbelastung boten u.a. Werte aus den Abfallanalytiken des Landes NRW [ABANDA 2010].

Mechanische Aufbereitung (klassierende Bodenbehandlung):

Bei der klassierenden Bodenbehandlung wird die Bodenmatrix mit mehreren in Reihe geschalteter Klassieraggregaten fraktioniert. Da der Großteil der Kontamination in der Regel an der Feinstkornfraktion adsorbiert ist, ist das Ziel des Verfahrens, diese abzutrennen und einer Weiterbehandlung bzw. Reststoffentsorgung zuzuführen. [BRACKE & KLÜMPEN 2005] Die für die Bilanzierung benötigten Energiekennzahlen zum Umgang mit Mineralsplittgemischen, etwa für Bandanlagen, eventuelles Brechen, den eigentlichen Klassiervorgang oder eine Abluftentstaubung können FFE 2003 entnommen werden.

Ökobilanzielle Betrachtung

Abbildung 2.19 zeigt, dass sich die Verwertung/Entsorgung von AS 170503* in allen Wirkungskategorien ausschließlich umweltbelastend auswirkt. Der Transport fällt bei diesem AS, bedingt durch die Dichte des Abfalls, so deutlich ins Gewicht, dass daraus über 60 % der Belastungen der Wirkungskategorien Versauerung, terrestrische Eutrophierung und an Stickoxid-Emissionen resultieren, im Falle der Photooxidantienbildung und der Schwefeloxidemissionen sind es noch über 44 %. Bezogen auf die große Tonnage sind die Absolutwerte der Belastungen jedoch relativ gering.

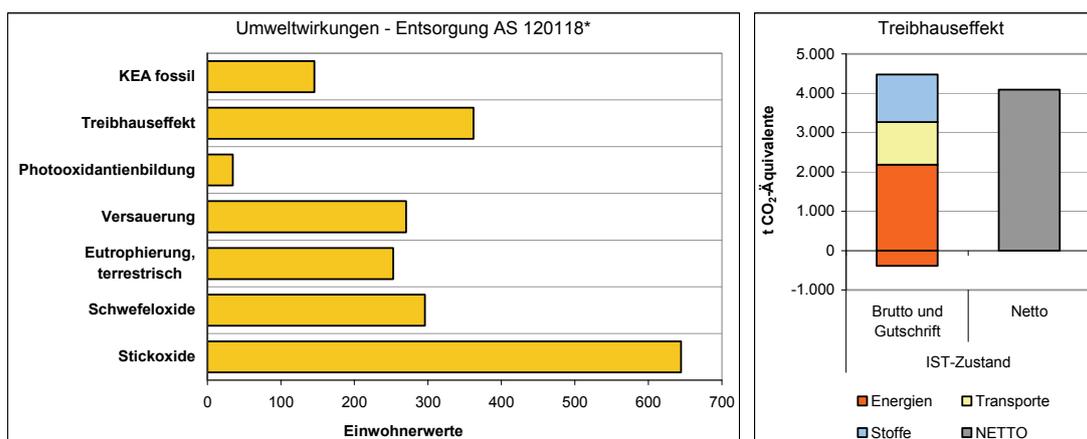


Abbildung 2.19: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 87.720 t des AS 170503* mit Sektoranalyse für das Treibhauspotential

Auch bei der Wirkungskategorie Treibhauseffekt zeigt sich der gegenüber anderen Abfallarten deutlich höhere Einfluss der Transporte, die etwa ein Viertel der CO₂-Äquivalente verursachen. Der Wert für den

Sektor Stoffe ist durch den Einsatz von gebrannten Kalkprodukten zur Stabilisierung bedingt, bei deren Herstellung große Mengen an Kohlendioxid entstehen. Die treibhausrelevanten Emissionen aus der Energiebereitstellung kommen hauptsächlich aus der thermischen Bodenbehandlung, mit der im Jahr 2007 ein sehr großer Mengenanteil behandelt wurde. Netto ergeben sich Umweltbelastungen in Höhe von 4.090 t CO₂-Äquivalenten (ca. 362 Einwohnerwerte).

Aufgrund der hohen Verfügbarkeit werden den „Boden und Steinen“ im Äquivalenzsystem keine Gutschriften für etwaige Boden-„Produkte“ gegenübergestellt [auch LFU 2011]. Aber selbst die Annahme hoher Substitutionsfaktoren, für z.B. Sand oder Kies, würde das Netto-Ergebnis nur unwesentlich verbessern.

Entsorgungskosten

Tabelle 2.12 gibt einen orientierenden Überblick zu den ermittelten Entsorgungskosten. Grundsätzlich gilt wiederum, dass Preis- und Kostenaussagen nur im Einzelfall und unter genauerer Kenntnis der Zusammensetzung des Abfallgemisches getroffen werden können. Die angegebenen Spannweiten innerhalb einer Verfahrensoption verdeutlichen dies.

Tabelle 2.12: Kosten für die Entsorgung kontaminierter Böden – orientierende Angaben [GSB 2011B, KLEINE ET AL. 2004, LFU 2002, LUBW 1993, TK4 2010]

| Entsorgungskosten für schadstoffbelastete Böden [€/t] | | | |
|---|--|--|----------|
| Thermik | Mikrobiologie | Bodenbehandlung/-wäsche | Deponie |
| 45 / 50-150 | Mieten: 19-43 und mehr Biobeet: 15-40 und mehr Reaktor: 23 allgemein: 45-80 | klassierend: 61-110 und mehr hochdruck: 74-92 und mehr allgemein: 40-120 | 23 / 200 |

6.4.2 Gesamtergebnis der Gruppe „Boden“

Quantifizierung der Entsorgungswege

Für die drei Abfallschlüssel der Gruppe „Boden“ ergibt sich in der Gesamtbetrachtung des *Szenarios IST-Zustand* die in Abbildung 2.20 dargestellte Aufteilung nach Entsorgungswegen. Dabei werden fast 60 % der 265.970 t gefährlicher Abfälle stofflich verwertet (im Sinne eines Wiedereinsatzes außerhalb des Deponiebaus). Der größte Anteil wird in mechanischen Aufbereitungsanlagen von den Schadstoffen befreit (38 %). Mehr als 40 % der belasteten Böden werden auf Deponien verbracht, teilweise mit vorheriger Stabilisierung.

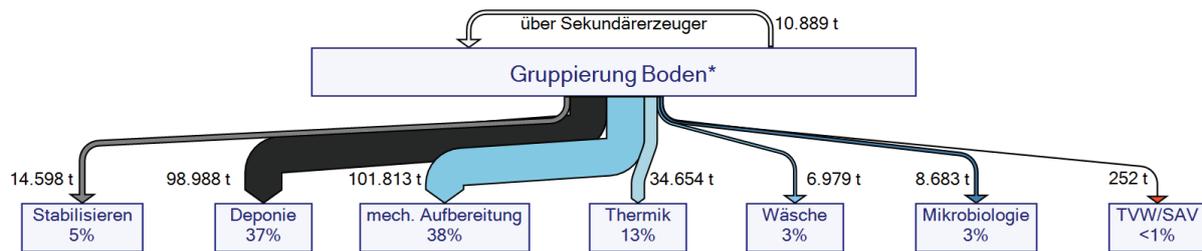


Abbildung 2.20: Mengenmäßige Aufteilung der Entsorgungswege der Gruppe „Boden“

Ökobilanzielle Betrachtung

Für die größte Abfallgruppe „Boden“ mit einer Gesamtabfallmenge von 265.970 t zeigt Abbildung 2.21 negative Umweltwirkungen für alle Wirkungskategorien und Einzelparameter. Im Vergleich zu allen anderen Abfallschlüssel-Gruppen sind jedoch hier die, bezogen auf die große Abfallmenge, viel niedrigeren Absolutwerte zu berücksichtigen. So entspricht die Belastung an Stickoxiden in Höhe von etwa 1.000 Einwohnerwerten nur etwa der Hälfte der Stickoxidbelastung der Gruppe „Öle“, deren Abfallmenge mit 82.930 t nicht einmal ein Drittel der Abfallmenge der Gruppe „Boden“ ausmacht.

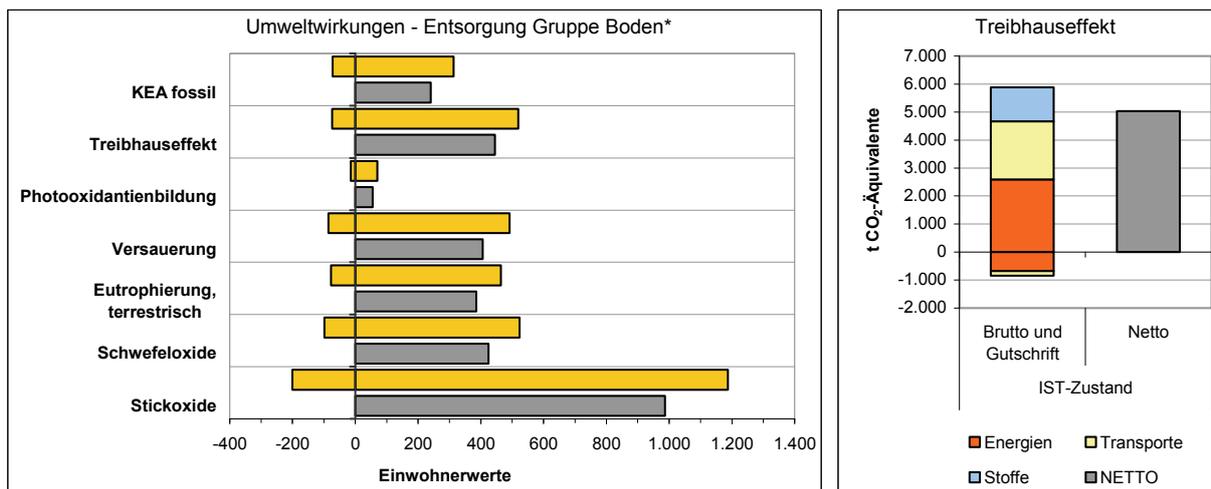


Abbildung 2.21: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 265.970 t aller Abfallschlüssel der Gruppe „Boden“ mit Sektoranalyse für das Treibhauspotential

Die Wirkungskategorie Treibhauspotential zeigt gegenüber den anderen Ergebnissen der Abfallgruppen den stark negativen Einfluss der Transporte auf das Netto-Ergebnis. 35 % der Umweltbelastungen sind darauf zurückzuführen. Die Netto-Umweltbelastung von 5.030 t CO₂-Äquivalenten (ca. 450 Einwohnerwerte) ist bezogen auf die Abfallmenge wiederum relativ gering. Tabelle 2.13 weist die Beiträge der in der Gruppe „Boden“ zusammengefassten Abfallschlüssel zu allen Wirkungskategorien und Einzelparametern aus.

Tabelle 2.13: Abfallschlüssel-Gruppe „Boden“ – Beiträge zur Umweltbelastung und -entlastung nach Abfallschlüssel (EW = Einwohnerwert)

| Parameter | Beitrag zur Umweltbelastung (positiv) und -entlastung (negativ) | | |
|--|---|-----------------------|-------------------|
| | AS 170301* | AS 170503* | AS 170507* |
| Aggregierte Werte | | | |
| KEA fossil | 11.621 MJ (91 EW) | 18.617 MJ (146 EW) | 577 MJ (5 EW) |
| Treibhauspotential [CO ₂ -Äquivalente] | 887 t (78 EW) | 4.095 t (362 EW) | 52 t (5 EW) |
| Photooxidantienbildung [Ethen-Äquivalente] | 319 kg (20 EW) | 548 kg (35 EW) | 6 kg (0,4 EW) |
| Versauerungspotential [SO ₂ -Äquivalente] | 4.423 kg (131 EW) | 9.113 kg (270 EW) | 144 kg (4 EW) |
| Eutrophierungspotential terrestrisch [PO ₄ -Äquivalente] | 683 kg (129 EW) | 1.339 kg (253 EW) | 20 kg (4 EW) |
| Nicht aggregierte Einzelparameter | | | |
| Schwefeldioxide | 739 kg (123 EW) | 1.777 kg (296 EW) | 34 kg (6 EW) |
| Stickoxide | 5.242 kg (333 EW) | 10.142 kg (644 EW) | 152 kg (10 EW) |

6.5 Abfallschlüssel „Weitere“

Vier der 18 Abfallschlüssel werden der gemischten Abfallgruppe „Weitere“ zugeordnet (vgl. Tabelle 2.3). Aus dieser Gruppe werden der AS 100315* „Aluminiumkrätze“ und der AS 200123* „Kühlgeräte“ beispielhaft vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. Die Prozesse der Aluminiumindustrie sind bekanntermaßen sehr energieintensiv. Die Entsorgung der „Kühlgeräte“ verursacht erhebliche Treibhausgasbelastungen und ist seit Jahren Gegenstand der öffentlichen Diskussion.¹⁵

6.5.1 Beispielhafte Darstellung: AS 100315* – Abschaum, der entzündlich ist oder in Kontakt mit Wasser entzündliche Gase in gefährlicher Menge abgibt

Abfallbeschreibung

Nach BOIN ET AL. 2000 beträgt der Metallgehalt (Aluminium und Eisen) einer durchschnittlichen Krätze (Abschaum) aus der Aluminiumerzeugung ca. 52 %. Nach Durchlaufen verschiedener Trenn- und Aufbereitungsverfahren stehen die in Tabelle 2.14 aufgeführten Fraktionen zur stofflichen Weiterverwendung bereit.

¹⁵ z.B. Stellungnahmen der Deutschen Umwelthilfe DUH [ELANDER 2008 und RESCH ET AL. 2011]

Tabelle 2.14: Wichtigste Fraktionen zur stofflichen Wiederverwendung aus der Entsorgung des AS 100315*

| Trennschritt | Fraktion | Anteil pro t Al-Krätze |
|--|-------------------------------------|------------------------|
| 1. Krätzeaufbereitung | Gröbe zur Sekundäraluminiumschmelze | 50,0 % ¹ |
| 2. Magnetscheidung | Eisenanteil | 8,2 % |
| 3. Mahlstaub in Salzschlackeaufbereitung | Tonerderückstand | 25,0 % |
| | Aluminiumgranulat | 8,4 % |
| | Mischsalz (NaCl-KCl: 70/30) | 4,2 % |

¹ davon ca. 70 % metallisches Aluminium, der Rest besteht u.a. aus Oxiden und Salzen

Zur Plausibilisierung der Zuordnung dieser Modellwerte zu dem hier betrachteten Abfallschlüssel kann BMLFUW 2010 herangezogen werden. Danach würde Aluminiumkrätze mit einem Gehalt von mindestens 45 % an metallischem Aluminium das Gefahrenmerkmal H 4.3 in der Regel unterschreiten (Freisetzung von mehr als 1 Liter Wasserstoff/kg/h; entzündliche Eigenschaften).

Quantifizierung der Entsorgungswege

Aus den Begleitscheinen lassen sich für das Jahr 2007 die Entsorgungswege wie in Abbildung 2.22 dargestellt ermitteln. So gut wie alle Abfälle werden einem Metallrecycling zugeführt.

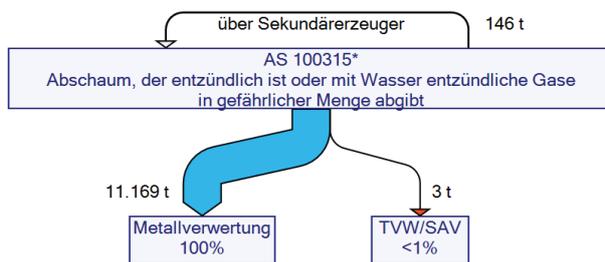


Abbildung 2.22:
Mengenmäßige Aufteilung der
Entsorgungswege des AS 100315*
(TVW = thermische Verwertung,
SAV = Sonderabfallverbrennung)

Bilanzierungsmodell

Al-Krätzeaufbereitung und Salzschlackeaufbereitung:

Der mehrstufige Prozess der Aufbereitung von Aluminiumkrätze beginnt mit einem mechanischen Aufschluss, dessen Ergebnis das Vorliegen eines Feinanteils (Kugelmühlenstaub) und der sogenannten Gröbe mit einem Metallgehalt von etwa 75 % ist. Die Gröbe wird im nächsten Schritt einer Magnetscheidung unterzogen, wobei der Eisenanteil abgetrennt wird. Durch die Anreicherung beträgt der Aluminiumgehalt der Gröbe danach ca. 70 %. Diese kann nun dem Schmelzprozess für Sekundäraluminium zugeführt werden.

Im Kugelmühlenstaub aus dem ersten Verfahrensschritt verbleibt ein kleinerer Aluminiumanteil. In der Salzschlackeaufbereitung (Löse-Kristallisationsverfahren) wird dieser Stoff weiter aufgeschlossen, wobei die Anteile von etwa 60 % Tonerderückstand, 20 % Aluminium-Granulat und 10 % Mischsalz aus dem Kugelmühlenstaub zurückgewonnen werden. Das Mischsalz und das Aluminium-Granulat wie auch die Gröbe werden der Aluminiumschmelze zugegeben, wobei das Salz den Einsatz von Neusalz beim Schmelzprozess deutlich reduziert. Lediglich der Tonerderückstand findet außerhalb der Sekundäraluminiumherstellung als Al_2O_3 -Träger in der Zementherstellung Einsatz. [BOIN ET AL. 2000]

Somit werden alle Anteile stofflich verwertet. Dies wird im Äquivalenzsystem entsprechend berücksichtigt.

Ökobilanzielle Betrachtung

Abbildung 2.23 zeigt, dass die Entsorgung von 11.170 t des AS 100315* für alle Wirkungskategorien im Ist-Zustand zu einer Entlastung der Umwelt führt. Die hohen Entlastungen an Schwefeloxiden resultieren zu über 40 % aus dem Ersatz von Strom, Heizöl und Erdgas bei der Energiebereitstellung im Äquivalenzsystem, zu weiteren über 40 % aus eingesparten Produktionsemissionen bei der Aluminiumherstellung sowie zu knapp 20 % aus vermiedenen Transportemissionen.

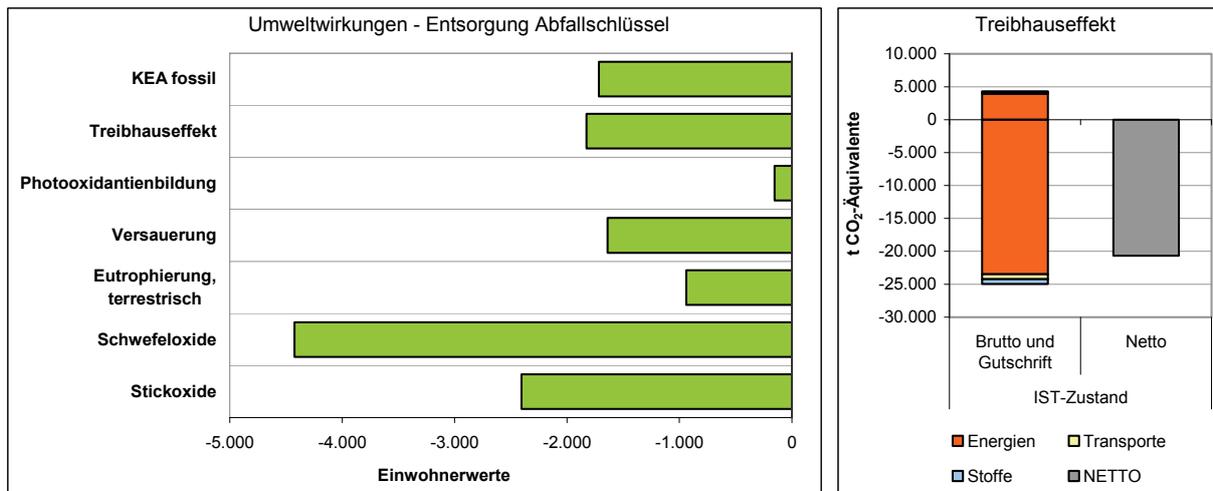


Abbildung 2.23: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 11.170 t des AS 100315* mit Sektoralanalyse für das Treibhauspotential

Das Treibhauspotential wird durch die energetischen Einsparungen dominiert, die sich über das Äquivalenzsystem durch die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Aluminium ergeben. Insgesamt werden durch die Entsorgung des AS 100315* Treibhausgasemissionen in Höhe von 20.673 t CO₂-Äquivalenten eingespart. Dies entspricht etwa dem in Deutschland von 1.830 Einwohnern pro Jahr verursachten Treibhauspotential.

Entsorgungskosten

Bei der Entsorgung von Krätzen sprechen die Schmelzwerke nicht von Abfällen, sondern von einem Rohstoff und Wirtschaftsgut, das diese, genauso wie z.B. andere Schrotte, Fehlgüsse, Späne oder Dosenabfälle, über ihren Einkauf beziehen müssen. Den Betreiberangaben zufolge wird vor der Gattierung¹⁶ immer eine genaue Analytik aller eingesetzten „Abfall“-Rohstoffe durchgeführt, um beispielsweise die sehr hohen Ansprüche der Automobilindustrie erfüllen zu können. Firmenintern entstehende Krätzen werden wegen der hohen Wertigkeit grundsätzlich wieder im eigenen Betrieb eingesetzt. Nach den in Tabelle 2.15 zusammengestellten Angaben würde der Zukauf einer Al-Krätze mit 50% verwertbarem Metallgehalt einer einfachen Legierung etwa 500 €/t kosten. [TK10 UND TK11 2011]

¹⁶ EDV-gestützte Chargenzusammenstellung für Öfen zum stoffstrom- oder erlösoptimierten Schrotteeinsatz für eine spezifikationsgerechte Legierungszusammensetzung [BRUCH 2011]

Tabelle 2.15: Erlöse (negativ) im Umgang mit der Entsorgung von Al-Krätzen – orientierende Angaben [TK10 2011]

| Erlöse bei der Entsorgung von Al-haltigen Krätzen [€/t Metallausbeute] | | |
|--|--------------------------|--------------------|
| Universalliegierungen | Höherwertige Legierungen | Legierungsgemische |
| ca. -1.000 ¹ | zusätzlich -50 bis -100 | deutliche Abzüge |
| ¹ z.B. VDS-Liste 226 D: sehr gut gießbar, sehr gute mechanische Bearbeitbarkeit, mäßige chemische Beständigkeit [ALU-LAUFEN 2006] | | |

6.5.2 Beispielhafte Darstellung: AS 200123* – gebrauchte Geräte, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten

Abfallbeschreibung

Aufgrund ihrer Funktionsweise werden Kühlgeräte in Kompressor-, Absorber- und thermoelektrische Kühlgeräte eingeteilt. Da Kühlgeräte mit Kompressoren mit über 90 % den größten Marktanteil abdecken, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf diese Gerätebauart. Des Weiteren werden die Geräte nach ihrem Nutzinhalt in Kühlschränke (bis 180 l), Kühl-Gefrierkombinationen (180–350 l) und Gefriertruhen/Gefrierschränke (bis 500 l) eingeteilt. [LANUV 2009] Nach DEHOUST & SCHÜLER 2007 und den Ergebnissen eines 2011 abgeschlossenen Feldtestes [SCHIAMANN ET AL. 2011] wurde die Zusammensetzung eines durchschnittlichen FCKW-haltigen Gerätes mit ca. 40 kg Gewicht definiert (vgl. Tabelle 2.16).

Tabelle 2.16: Durchschnittliche Zusammensetzung eines intakten FCKW-Kühlgerätes mit FCKW-Schäumung

| Material | Gewicht [kg] | Material | Gewicht [kg] |
|---|------------------|------------------|--------------------|
| Stahlschrott ohne Kompressor | 16,3 | R11 (FCKW-Gerät) | 0,253 ³ |
| Kompressor | 9,7 | R12 (FCKW-Gerät) | 0,120 ⁴ |
| NE-Fraktion aus Gehäuse | 1,5 ¹ | Glas | 0,5 |
| Kabel | 0,2 | Wasser | 0,3 |
| Kunststoffe ohne PUR | 6,7 ² | Öl | 0,2 |
| PUR | 4,5 | Rest | 0,2 |
| ¹ 85% als Aluminium, 15% als Kupfer | | | |
| ² 45% als Polystyrol, hohe Reinheit | | | |
| ³ Dynamischer Orientierungswert (durch Bestimmung der im Feldtest genommenen Proben) | | | |
| ⁴ Gemäß TA Luft intakte Geräte: Restdruck im Kältekreislauf wird als intakt gewertet | | | |

Es wird ein Anteil von 20 % der Geräte angenommen, die der Kompressoren beraubt wurden. Hierbei emittiert die volle Menge an R12. Die Ergebnisse des Feldtestes mit einem Anteil von nur 5 % beraubter Kühlgeräte werden im Vergleich zu Betreiberangaben an das LfU als zu niedrig erachtet [LFU 2011]. Des Weiteren enthalten nach den Auswertungen von SCHIAMANN 15 % der mit FCKW-Kältemittel betriebenen Geräte keine FCKW-Schäumung. Auch dieser Wert wurde nach Abstimmung mit dem LfU auf 25 % erhöht [LFU 2011].

Quantifizierung der Entsorgungswege

Alle 2007 erfassten Kühlgeräte, die FCKW enthalten, wurden einem Kühlgeräterecycling zugeführt (Abbildung 2.24).

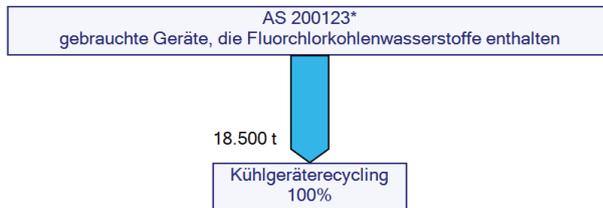


Abbildung 2.24:
Mengenmäßige Aufteilung
der Entsorgungswege des
AS 200123*

Bilanzierungsmodell

Kühlgeräterecycling Stufe 1

Die Stufe 1 beinhaltet die Absaugung des FCKW R12 und des Kältemaschinenöls aus dem Kältekreislauf sowie die Demontage von Kompressor, Glas, Kondensatoren, Abdeckungen und losen Kunststoffteilen. Direkte R12-Emissionen fallen dabei nur in geringem Umfang an. Das Kühlmittel sowie das Altöl werden anschließend in einer SAV verbrannt, der Kompressor, das Kupfer aus den Kabeln und das Glas werden stofflich verwertet. Die verunreinigten Mischkunststoffe gehen in eine MVA. [DEHOUST & SCHÜLER 2007]

Kühlgeräterecycling Stufe 2

„In Stufe 2 werden die Gehäuse in einem gekapselten Shredder zerkleinert, und es erfolgt eine Auftrennung in die Fraktionen PUR-Schaum, verschiedene Kunststofffraktionen (Polystyrol und weitere Kunststofffraktionen unterschiedlicher Reinheit), Eisen-Schrott und eine NE-metallhaltige Fraktion. Anschließend werden die PUR-Schäume, sofern sie FCKW-haltig sind, aufgemahlen oder auf sonstige Art aufgeschlossen, um die Porenstruktur zu zerstören und eine maximale Entgasung des im Schaum enthaltenen FCKW zu erreichen. Die Abluft wird erfasst und gereinigt.“ [DEHOUST & SCHÜLER 2007] Das erfasste Kältemittel R11 wird wiederum der Sonderabfallverbrennung zugeführt. Geringe Mengen der im PUR-Schaum verbleibenden Reste werden letztlich freigesetzt. Die Metalle sowie das Polystyrol werden recycelt und die Mischkunststoffe thermisch verwertet. [DEHOUST & SCHÜLER 2007]

Ökobilanzielle Betrachtung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind in Abbildung 2.25 dargestellt. Bis auf den Treibhauseffekt zeigen alle Netto-Ergebnisse Entlastungen der Umwelt durch die Entsorgung der FCKW-haltigen Kühlgeräte und die daraus entstehenden Gutschriften im Äquivalenzsystem. Die Gutschriften sind hauptsächlich auf die Einsparungen bei der Herstellung von Eisenmetall und Polystyrol aus Erzen und fossilen Rohstoffen zurückzuführen.

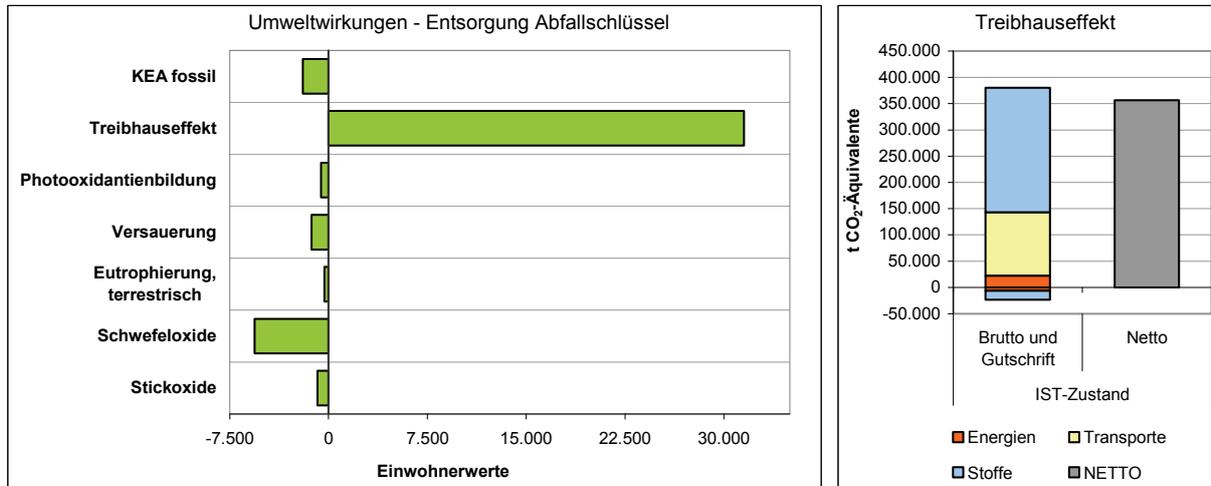


Abbildung 2.25: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 18.500 t des AS 200123* mit Sektoranalyse für das Treibhauspotential

Die hohen Belastungen in der Wirkungskategorie Treibhauseffekt resultieren aus der hohen Wirksamkeit der Treibgase R12 und R11. Dem Sektor Transporte sind in Abbildung 2.25 die Verluste durch defekte Kühlkreisläufe zugerechnet, die bei kompressorberaubten Geräten entstehen. Dieser Effekt verursacht 47 % der Treibhausgasbelastung. Aus dem eigentlichen Kühlgeräte recycling (Sektor Stoffe) tragen weitere R12-Emissionen zu 31 % und R11-Emissionen zu 13% zur gesamten Belastung bei. Der Großteil der erfassten FCKW-Mengen wird dagegen in der Hochtemperaturverbrennung vernichtet, woraus 9 % der Belastung resultieren. Das Netto-Ergebnis zeigt eine Belastung des Treibhauspotentials in Höhe von 356.620 t CO₂-Äquivalenten (ca. 31.520 Einwohnerwerte).

Entsorgungskosten

Nach dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) werden Elektro-Altgeräte, darunter auch Kühlgeräte, kostenlos an kommunalen Sammelstellen zurückgenommen. Für die Verwertung und Entsorgung der Geräte sind die Hersteller verantwortlich. Die Tabelle 2.17 gibt Brancheninformationen der Deutschen Umwelthilfe wieder. [ELANDER 2008]

Tabelle 2.17: Kosten für die Entsorgung von AS 200123* – orientierende Angaben [Elander 2008]

| Entsorgungskosten für FCKW-haltige Kühlgeräte | [€/t] | [€/Gerät] |
|--|---------|-----------|
| Deutschland | 50 | 2 |
| Österreich | 170-195 | 7-8 |
| Ehemalige Veranschlagung der Kühlgerätehersteller ¹ | 250 | 10 |
| Branchenannahme für umweltgerechtes Kühlgeräte recycling | 200 | 8 |

¹ Vor Inkrafttreten des ElektroG im Jahr 2006

6.5.3 Gesamtergebnis der Gruppe „Weitere“

Zur Gruppe „Weitere“ zählen neben den beiden bereits ausführlich beschriebenen Abfallschlüssel noch der AS 060101* Schwefelsäure und schweflige Säure und der AS 191206* Holz, das gefährliche Stoffe enthält (Feinfraktion aus der Aufbereitung).

Entsorgungswege

Beinahe 90% der Schwefelsäureabfälle werden in der Spaltanlage eines großen deutschen Schwefelspezialisten zur Wiederverwendung aufbereitet, kleinere Mengen dienen in einem Produktionsprozess zur Einstellung des pH-Wertes im Abwasserbereich (CPB), die restlichen Mengen gehen zur SAV. Das belastete Altholz wird laut den Begleitscheindaten komplett in der thermischen Verwertung verschiedener BHKW entsorgt. Zusammenfassend dominiert dieser Stoffstrom bezogen auf die Abfallmenge die Gruppe „Weitere“ deutlich.

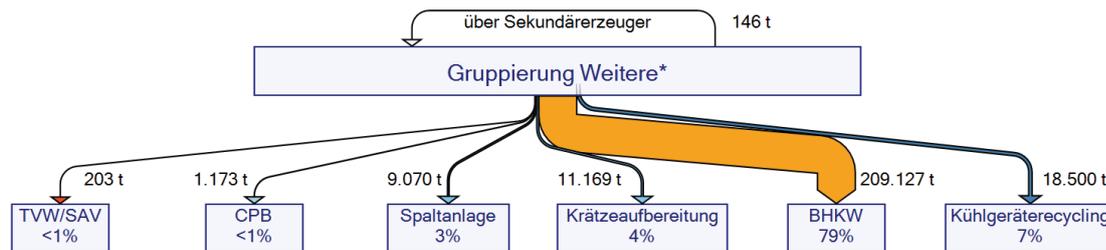


Abbildung 2.26: Mengenmäßige Aufteilung der Entsorgungswege der Gruppe „Weitere“

Ökobilanzielle Betrachtung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Gruppe „Weitere“ sind in Abbildung 2.27 dargestellt. Bis auf den Treibhauseffekt zeigen alle Netto-Ergebnisse Entlastungen der Umwelt durch die Entsorgung der als gefährlich eingestuft Abfälle.

Die Entlastungen beim KEA fossil sind getrieben durch Gutschriften aus der Altholzverbrennung (AS 191206*) und damit den Ersatz fossiler Brennstoffe im Äquivalenzsystem. Gleiches gilt für die Umweltentlastungen beim Treibhauseffekt. Diese werden jedoch durch die Treibhausgasbelastungen, die bei der Entsorgung der FCKW-haltigen Kühlgeräte (AS 200123*) entstehen, überkompensiert. Die Netto-Umweltentlastung bei der Versauerung und dem Einzelparameter Schwefeloxidemissionen gehen zu etwa je der Hälfte auf die Entlastungen aus der Entsorgung der AS 060101* „Schwefelsäure“ und AS 191206* „Altholz“ zurück.

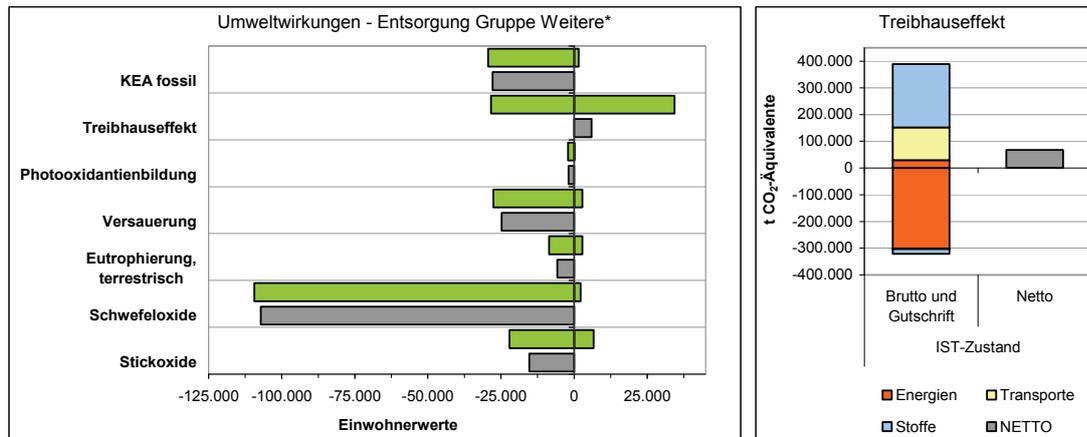


Abbildung 2.27: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 249.240 t aller Abfallschlüssel der Gruppe „Weitere“ mit Sektoranalyse für das Treibhauspotential

Bezogen auf die Wirkungskategorie Treibhauseffekt trägt die Verwertung der Althölzer in BHKW und damit der Ersatz fossiler Energieträger zu 83 % zur Umweltentlastung im Sektor Energien bei. Dem gegenüber stehen die in Abschnitt 6.5.2 dargestellten Umweltbelastungen. Letztlich ergeben sich als Netto-Ergebnis für den Treibhauseffekt noch Belastungen in Höhe von 67.420 t CO₂-Äquivalenten. Dies entspricht etwa den von 5.960 Einwohnern pro Jahr in Deutschland verursachten Treibhausgasemissionen. Tabelle 2.18 weist die Beiträge der in der Gruppe „Weitere“ zusammengefassten Abfallschlüssel zu allen Wirkungskategorien und Einzelparametern aus.

Tabelle 2.18: Abfallschlüssel-Gruppe „Weitere“ – Beiträge zur Umweltbelastung und -entlastung nach Abfallschlüssel (EW = Einwohnerwert)

| Parameter | Beitrag zur Umweltbelastung (positiv) und -entlastung (negativ) | | | |
|--|---|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| | AS 060101* | AS 100315* | AS 191206* | AS 200123* |
| Aggregierte Werte | | | | |
| KEA fossil | -8.757 MJ (-68 EW) | -219.614 MJ (-1.716 EW) | -3.080.019 MJ (-24.071 EW) | -250.230 MJ (-1.956 EW) |
| Treibhauspotential [CO ₂ -Äquivalente] | 434 t (38 EW) | -20.673 t (-1.827 EW) | -268.963 t (-23.770 EW) | 356.621 t (31.518 EW) |
| Photooxidantienbildung [Ethen-Äquivalente] | -50 kg (-3 EW) | -2.426 kg (-154 EW) | -18.612 kg (-1.184 EW) | -8.988 kg (-572 EW) |
| Versauerungspotential [SO ₂ -Äquivalente] | -316.812 kg (-9.398 EW) | -55.323 kg (-1.641 EW) | -420.067 kg (-12.461 EW) | -43.576 kg (-1.293 EW) |
| Eutrophierungspotential terrestrisch [PO ₄ -Äquivalente] | 105 kg (20 EW) | -4.972 kg (-939 EW) | -23.977 kg (-4.527 EW) | -1.689 kg (-319 EW) |
| Nicht aggregierte Einzelparameter | | | | |
| Schwefeldioxide | -317.238 kg (-52.845 EW) | -26.557 kg (-4.424 EW) | -265.499 kg (-44.226 EW) | -33.738 kg (-5.620 EW) |
| Stickoxide | 818 kg (52 EW) | -37.862 kg (-2.405 EW) | -191.566 kg (-12.169 EW) | -13.216 kg (-840 EW) |

6.6 Gesamtergebnis über alle Abfallschlüssel

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Gesamtumweltwirkungen aller untersuchten Abfallgruppen. Abbildung 2.28 fasst die Ergebnisse zusammen und zeigt die Umweltbe- und Entlastungen der jeweiligen Abfall-Gruppen „Lösemittel“, „Öle“, „Boden“ und „Weitere“.

Die Auswirkungen der Gruppe „Boden“ sind trotz ihres Anteils von 38 % am Abfallaufkommen für alle Wirkungskategorien und die beiden Einzelparameter von sehr geringer Bedeutung. Die Mengenanteile zur Entsorgung der anderen Gruppen liegen bei: „Lösemittel“ 15 %, „Öle“ 12 % und „Weitere“ 36 % (davon allein 30 % „Altholz“). Insgesamt ergeben sich für alle vier Gruppen und damit bei allen 18 in der Untersuchung betrachteten Abfallschlüsseln Umweltbelastungen nur beim Treibhauseffekt. Alle anderen Ergebnisse, die sich aus der Entsorgung gefährlicher Abfälle in Bayern für das Szenario IST-Zustand ergeben, zeigen Umweltentlastungen zwischen 6.400 Einwohnerwerten bei der terrestrischen Eutrophierung und ca. 138.400 Einwohnerwerten bei den Schwefeloxidemissionen (Netto-Balken).

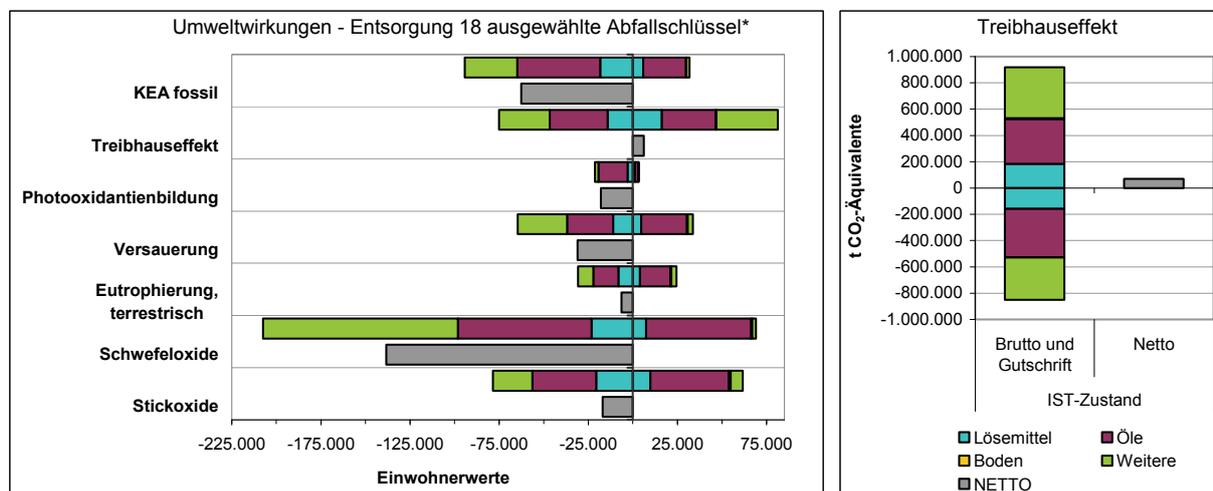


Abbildung 2.28: Wirkungsabschätzung der Entsorgung von 699.960 t aller 18 untersuchten Abfallschlüssel nach Gruppierung mit Sektoralanalyse für das Treibhauspotential

Die Umweltbe- und -entlastungen heben sich für den Treibhauseffekt fast auf, wobei eine Netto-Belastung von ca. 69.360 t CO₂-Äquivalenten verbleibt. Dies entspricht etwa dem von 6.130 Einwohnern verursachten Treibhauspotential. Dabei weisen die Gruppen „Lösemittel“ und „Öle“ eine Be- und Entlastung in etwa der gleichen Höhe aus (+24.000 und -27.000 t CO₂-Äquivalente). Die Netto-Belastung aus der Gruppe „Weitere“ bestimmt das Ergebnis.

7 Szenarienanalyse

7.1 Vorgehensweise

Mit den Stoff- und Energieflussmodellen zum *Szenario Ist-Zustand* der Entsorgung aller ausgewählten Abfallschlüssel wurde die Grundlage zur Ermittlung ökobilanzieller Potentiale bei der Entsorgung gefährlicher Abfälle in Bayern geschaffen. Darauf aufbauend werden weitere Szenarien entwickelt und analysiert, um folgende Fragestellungen zu beantworten:

Welche Auswirkungen auf die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung hätte:

- eine Verbesserung des energetischen Wirkungsgrades von Verbrennungsanlagen durch deren gesamtenergetische Optimierung mit zusätzlicher Nutzung der verfügbaren Abwärme?
> *Szenario 1 – Energetischer Wirkungsgrad* <
- eine Verbesserung des stofflichen Nutzungsgrades durch die Ausschöpfung weiterer Optimierungspotentiale bei der Prozessführung oder durch die Abfallbehandlung mit alternativen Verfahren?
> *Szenario 2 – Stofflicher Nutzungsgrad* <
- die Reduzierung überregionaler Transportwege zu Deponien und Immobilisierungsanlagen¹⁷ auf eine maximale Entfernung von 50 oder 80 km?
> *Szenario 3 – Transportentfernung* <
- die Verlagerung von Ferntransporten zur Abfallverbringung auf die Schiene ab einer Entfernung von über 300 km?
> *Szenario 4 – Transport Schiene* <
- die Verschiebung von Abfallmengen zwischen den bestehenden Entsorgungswegen, z.B. getrieben durch Kostenaspekte oder auch ordnungsrechtliche Maßnahmen?
> *Szenario 5 – Entsorgungswege* <

Dabei schließen die Szenarien nicht alle 18 Abfallschlüssel gleichermaßen mit ein. Betrachtet werden jeweils nur die Veränderungen der im Szenario betroffenen Abfallschlüssel, z.B. „Lösemittel“ und „Boden“ im *Szenario 1*. Da die Lösemittelabfälle über keine weiten Entfernungen zur Entsorgung transportiert werden, finden diese im *Szenario 3* keine Betrachtung.

7.2 Ökologie-Index – Erläuterung der Ergebnisdarstellung

Mit der in Abbildung 2.1 vorgestellten Aggregationsmethode werden die Wirkungsindikator- und Sachbilanzparameterergebnisse zum Ökologie-Index zusammengefasst, der ein Maß für die Gesamtheit der Umweltbelastungen ist.

Der Ökologie-Index des *Szenarios IST-Zustand* wird in der folgenden Betrachtung dem Ökologie-Index jeweils eines weiteren Szenarios gegenübergestellt (Abbildung 2.29). Alle von diesem Vergleichsszenario betroffenen Abfallschlüssel sowie die sich daraus ergebenden Netto-Ergebnisse sind jeweils aufgeführt.

¹⁷ Der Begriff ist abfallrechtlich nicht definiert, wird jedoch von Anlagenbetreibern verwendet. Im engeren Sinne ist die Anwendung von Verfahren gemeint, die zur (*vollständigen*) *Stabilisierung* oder *Verfestigung* der Abfälle führen.

Veränderungen eines Balkenanteils drücken je nach Richtung – Balken nach oben für Umweltbelastung, Balken nach unten für Umweltentlastung – eine Verbesserung oder Verschlechterung der Umweltwirkungen aus (vgl. „AS Lösemittel“: hier Reduzierung der Umweltbelastung). Die Unterschiede zwischen den beiden Netto-Balken drücken die Gesamtdifferenz der Ökologie-Index-Punkte aus, die sich zwischen dem *Szenario IST-Zustand* und dem jeweiligen Vergleichsszenario ergibt.

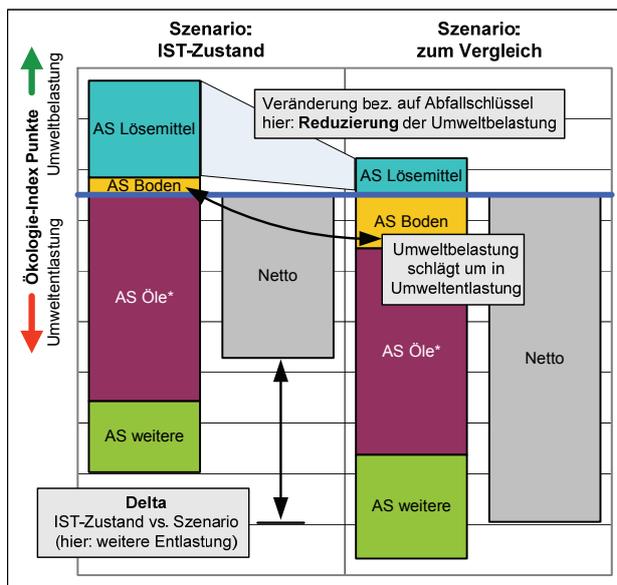


Abbildung 2.29:
Prinzip der Darstellung der Ökologie-Index-Punkte des Szenarios IST-Zustand im Vergleich zu einem weiteren Szenario für die jeweils betroffenen AS

7.3 Szenario 1: Energetischer Wirkungsgrad

7.3.1 Beschreibung

Mit Hilfe dieses Szenarios soll die Frage geklärt werden, welches Umweltentlastungspotential durch eine Verbesserung des energetischen Wirkungsgrades der thermischen Verwertung von gefährlichen Abfällen in Bayern besteht. Hierzu wurden ausgehend vom *Szenario IST-Zustand* die effektiven elektrischen und thermischen Wirkungsgrade aller modellierten Abfallverbrennungsanlagen erhöht. Bei kombinierter Wärme- und Stromgewinnung lassen sich unter der Voraussetzung bedienbarer Wärmesenken Gesamtwirkungsgrade um 80 % erzielen [vgl. DEHOUST ET AL. 2008, DOKA 2009B]. Mögliche energetische Potentiale bei Zementwerken und industriellen Verbrennungsanlagen der Raffinerien (u.a. bei den Abfallschlüsseln der Gruppe „Öle“) wurden in dieses Szenario nicht mit einbezogen, da bereits für das *Szenario IST-Zustand* von einem hohen Eigennutzungsanteil der anfallenden Wärme ausgegangen wird. Tabelle 2.19 zeigt die für beide Szenarien angenommenen Wirkungsgrade.

Tabelle 2.19: Angenommene elektrische und thermische Wirkungsgrade bei der Abfallverbrennung

| Szenario | Wirkungsgrad | SAV | Industrieeigene Anlagen |
|----------------------------|--------------|-----|-------------------------|
| IST-Zustand | elektrisch | 15 | 10 |
| | thermisch | 0 | 30 |
| Energetischer Wirkungsgrad | elektrisch | 6 | |
| | thermisch | 74 | |

7.3.2 Ökologische Wirkungen

Die Ergebnisse für das *Szenario Energetischer Wirkungsgrad* sind in Abbildung 2.30 dargestellt. Die Umweltbelastung durch den AS 170503* „Boden und Steine“ wird um 24 % reduziert. Die Umweltentlastungen durch die Abfallschlüssel aus der Gruppe „Lösemittel“ steigern sich im Bereich von 10 % bis fast 350 %.

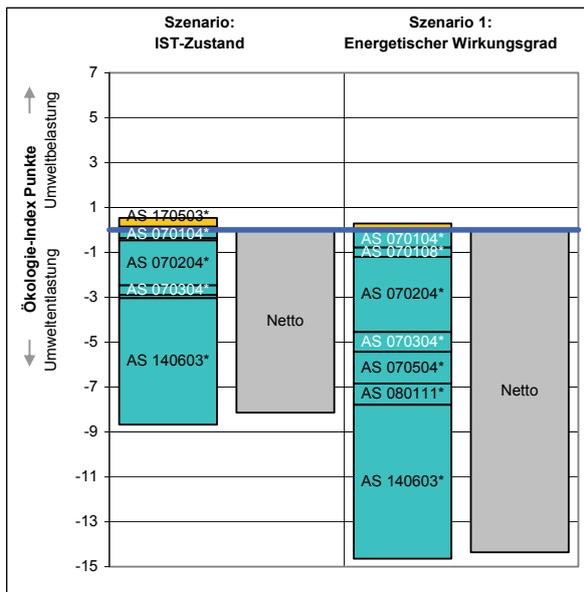


Abbildung 2.30:
Ökologie-Index des Szenarios IST-Zustand im Vergleich zum Szenario Energetischer Wirkungsgrad für die jeweils betroffenen AS

Tabelle 2.20 zeigt die prozentualen Abweichungen der Ökologie-Index-Punkte der einzelnen Wirkungskategorien und Einzelparameter für alle am Szenario beteiligten Abfallschlüssel. Für das *Szenario Energetischer Wirkungsgrad* sind ausschließlich Umweltentlastungen zu verzeichnen. Für den Treibhauseffekt ergibt sich z.B. eine Umweltentlastung von 144 %, die Entlastungen für die einzelnen Abfallschlüssel liegen dabei zwischen 18 % und 325 %.

Insgesamt schneidet für alle Abfallschlüssel das *Szenario Energetischer Wirkungsgrad* deutlich besser ab als das *Szenario IST-Zustand*. Die in Ökologie-Index-Punkten gemessene Umweltentlastung über alle Wirkungskategorien und Einzelparameter steigt um 77 %.

Tabelle 2.20: Prozentuale Abweichung der Ökologie-Index-Punkte des Szenarios Energetischer Wirkungsgrad vom Szenario IST-Zustand für alle betroffenen Abfallschlüssel

| Abweichung der Ökoindex Punkte zum IST-Zustand [%] | AS 170503* | AS 070104* | AS 070108* | AS 070204* | AS 070304* | AS 070504* | AS 080111* | AS 140603* | Gesamt |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|
| KEA fossil | -57 % | -72 % | -87 % | -55 % | -71 % | -146 % | -216 % | -10 % | -36 % |
| Treibhauseffekt | -18 % | -257 % | -59 % | -259 % | -220 % | -95 % | -81 % | -325 % | -144 % |
| POCP | -16 % | -32 % | -108 % | -19 % | -29 % | -403 % | -536 % | -17 % | -38 % |
| Versauerung | -21 % | -111 % | -145 % | -58 % | -89 % | -437 % | -1.183 % | -21 % | -69 % |
| Eutrophierung, terrest. | -8 % | -170 % | -494 % | -63 % | -110 % | -358 % | -280 % | -14 % | -57 % |
| Schwefeloxide | -75 % | -90 % | -112 % | -55 % | -80 % | -661 % | -616 % | -38 % | -84 % |

| Abweichung der Ökoindex Punkte zum IST-Zustand [%] | AS 170503* | AS 070104* | AS 070108* | AS 070204* | AS 070304* | AS 070504* | AS 080111* | AS 140603* | Gesamt |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|
| Stickoxide | -8 % | -190 % | -319 % | -67 % | -119 % | -347 % | -297 % | -14 % | -57 % |
| Gesamt | -24 % | -123 % | -252 % | -68 % | -103 % | -919 % | -703 % | -22 % | -77 % |

Anmerkung: neg. Werte entsprechen einer Umweltentlastung ggü. dem IST-Zustand, pos. Werte einer Umweltbelastung.

7.4 Szenario 2: Stofflicher Nutzungsgrad

7.4.1 Beschreibung

Für drei der betrachteten Abfallschlüssel konnten Optimierungspotentiale bei der Prozessführung und alternative Verfahren der Abfallbehandlung definiert werden, die zu einer Steigerung des stofflichen Nutzungsgrades beitragen. Der Großteil der recherchierten Quellen setzt sich mit der Abfallreduzierung innerhalb der Erzeugerbetriebe und deren Verarbeitungsprozessen auseinander. Die diskutierten Techniken zielen u.a. darauf ab, die gefährlichen Abfälle innerbetrieblich am Entstehungsort nachzubehandeln und dadurch eine erste Trennung zu realisieren – klassische End-of-pipe Technologien. Ebenso werden Verfahren vorgestellt, die bereits während des Produktionsprozesses zu einer Reduzierung des Schadstoffanfalls führen – sogenannter Produktionsintegrierter Umweltschutz. Beide Varianten liegen außerhalb der betrachteten Systemgrenze und finden in dieser Arbeit keine Betrachtung.

Folgende Änderungen im Vergleich zum *Szenario IST-Zustand* werden im *Szenario Stofflicher Nutzungsgrad* angenommen:

AS 100315* – Rückgewinnung von Metall aus Aluminiumkrätze in einem verschleißbaren Rotations- oder Vibrationsofen

Im *Szenario Stofflicher Nutzungsgrad* wird für den AS 100315* ein Krätzeaufbereitungsverfahren bilanziert, in dem nicht erst die abgekühlte Krätze mechanisch aufbereitet, sondern diese nach dem Abziehen ohne Abkühlung umgehend in einem Schmelzofen unter Inert-Atmosphäre wiederverflüssigt wird. Der verwertbare Metallanteil lässt sich dabei unter Rotations- oder Vibrationsbewegungen von den Metalloxiden und anderen Störstoffen abtrennen. Nach Ablassen des wiedergewonnenen Aluminiumanteils werden die weiterhin nicht rückgewinnbaren Metallanteile unter Zugabe von Sauerstoff oxidiert und dienen der Wiederbeheizung des Ofens. Die daraus gewonnene Energie wird in der Ofenwand gespeichert und reicht zum Schmelzen einer Folgecharge aus. Ein großer Vorteil des Verfahrens ist, dass das abgetrennte Aluminium ohne Probleme zur Mutterschmelze zurückgegossen werden kann, da die rückgewonnene Legierung die gleiche Zusammensetzung hat. [PATENTDE 1997] Im Gegensatz zur mechanischen Krätzeaufbereitung besteht ein weiterer Vorteil in der Steigerung des rückgewinnbaren Aluminiummetallanteils. Durch den Verzicht auf eine mechanische Trennung in Gröbe und Kugelmühlstaub werden Verunreinigungen vermieden, die sich auf die beiden Stoffströme störend auswirken.

AS 120118* – „trockene Wäsche“ von Metallschleifschlämmen mit überkritischem CO₂

„Das Verfahren zur Entölung von Metallschleifschlämmen nutzt das Löse- und Extraktionsvermögen von überkritischem CO₂ für Öle, Fette und unpolare bis wenig polare Stoffe aus und kann dadurch [...] die Öle aus den Metallschleifschlämmen herauslösen.“ [SCHÖN ET AL. 2003] Der Vorteil dieses in der Lebensmittel- und Naturstoffindustrie seit langem angewendeten Verfahrens liegt u.a. in der direkten

Verwendbarkeit der zurückgewonnenen Stoffe, da diese lösemittelfrei und trocken sind. Ferner ist CO₂ preisgünstig, nicht brennbar und im überkritischen Zustand technisch gut handhabbar. [SCHÖN ET AL. 2003]

Das Verfahren hat sich z.B. für hochlegierte Stähle nicht durchsetzen können, könnte aber zukünftig für den AS 120118* für die direkte metallurgische Rezyklierung eines mittlerweile höheren Aufkommens von Leichtmetallspänen und -schlämmen interessant werden. Die Einführung von Multifunktionsölen in der Metallbearbeitung könnte zudem zu einer einheitlicheren Belastung der Schlämme mit dem gleichen Öl führen. Dies würde logistische Probleme bei der Verarbeitung von relativ kleinen Abfallmengen reduzieren. [SCHÖN ET AL. 2003]

AS 200123* – Verbesserung der FCKW-Entnahmekquote durch Steigerung der Anlagendichtigkeit sowie bessere Aufspaltung FCKW-haltiger Isolierschäume.

Aus der Feldstudie von SCHIEMANN ergibt sich für Stufe 1 des Kühlgeräterecyclings eine FCKW-Entnahmekquote von 79 %, für Stufe 2 eine Quote von 82 %. Im *Szenario stofflicher Nutzungsgrad* wird für die Entsorgung *gebrauchter Geräte, die FCKW enthalten*, die Frage der ökologischen Auswirkungen einer Erhöhung der FCKW-Entsorgungsquoten beantwortet. Hierzu werden weitere Verbesserungen bei der Anlagendichtigkeit sowie beim Aufschluss von FCKW-haltigen Isolierschäumen angenommen. Für die Berechnung des Szenarios wird das Erreichen der Entnahmekquoten von jeweils 90 % für die Stufen 1 und 2 angenommen.

7.4.2 Ökologische Wirkungen

Die Ergebnisse zum *Szenario Stofflicher Nutzungsgrad* sind in Abbildung 2.31 dargestellt. Die Umweltbelastung aus dem AS 200123* „Kühlgeräte“ wird um über 60 % reduziert. Die geringe Umweltentlastung aus dem AS 120118* „Metallschlämme“ verbessert sich deutlich (-3.719 %) und die Umweltentlastung aus dem AS 100123* „Aluminiumkrätze“ erhöht sich um annähernd 150 %.

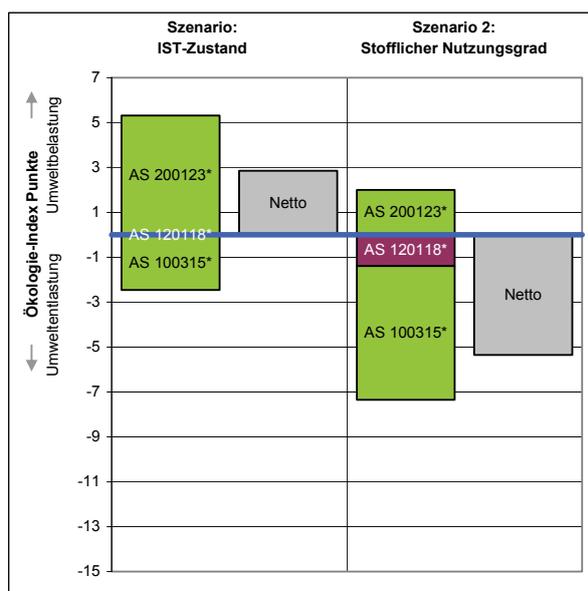


Abbildung 2.31:
Ökologie-Index des Szenarios IST-Zustand im Vergleich zum Szenario Stofflicher Nutzungsgrad für die jeweils betroffenen AS

Tabelle 2.21 gibt die prozentualen Abweichungen der Ökologie-Index-Punkte der einzelnen Wirkungskategorien und Einzelparameter für alle im Szenario veränderten Abfallschlüssel wieder. Gegenüber

dem *Szenario IST-Zustand* ergeben sich für den AS 120118* sehr hohe Umweltentlastungen durch die erhöhte stoffliche Nutzung der Metalle und Schmieröle im Äquivalenzsystem (z.B. POCP und Versauerung). Einzig das Treibhauspotential zeigt eine höhere Umweltbelastung. Zusammenfassend sind für das *Szenario Stofflicher Nutzungsgrad* ausschließlich Umweltentlastungen zu verzeichnen. Im Fall des AS 200123* ist nur der Treibhauseffekt von Veränderungen betroffen, da die Vermeidung von FCKW-Emissionen nur in dieser Kategorie wirken. Die zusätzlichen Umweltentlastungen beim AS 100315* verteilen sich relativ gleichmäßig über alle Wirkungskategorien und Einzelparameter.

Insgesamt schneidet für alle beteiligten Abfallschlüssel das *Szenario Stofflicher Nutzungsgrad* gegenüber dem *Szenario IST-Zustand* deutlich besser ab, wobei aus einer Umweltbelastung eine Umweltentlastung wird (vgl. Netto-Balken Abbildung 2.31). Die in Ökologie-Index-Punkten gemessene Umweltbelastung wird um etwa 280 % reduziert.

Tabelle 2.21: Prozentuale Abweichung der Ökologie-Index-Punkte des Szenarios Stofflicher Nutzungsgrad zum Szenario IST-Zustand für alle betroffenen Abfallschlüssel

| Abweichung der Ökoindex Punkte zum IST-Zustand [%] | AS 200123* | AS 120118* | AS 100315* | Gesamt |
|--|--------------|----------------|---------------|--------------|
| KEA fossil | 0 % | -196% | -146 % | -78% |
| Treibhauseffekt | -46 % | 960% | -150 % | -52% |
| POCP | 0 % | -1.691% | -92 % | -607% |
| Versauerung | 0 % | -1.785% | -143 % | -102% |
| Eutrophierung, terrest. | 0 % | -318% | -68 % | -80% |
| Schwefeloxide | 0 % | -1.050% | -206 % | -114% |
| Stickoxide | 0 % | -336% | -68 % | -80% |
| Gesamt | -62 % | -3.719% | -146 % | -288% |

Anmerkung: neg. Werte entsprechen einer Umweltentlastung ggü. dem IST-Zustand, pos. Werte einer Umweltbelastung.

7.5 Szenario 3: Transportentfernung

7.5.1 Beschreibung

Mit dem *Szenario Transportentfernung* soll die Frage beantwortet werden, wie sich eine Reduzierung überregionaler Transportwege ökologisch auswirkt. Betroffen sind alle Abfalltransporte zu entfernt liegenden Deponien oder zu entfernt liegenden Immobilisierungsanlagen. Die maximale Entfernung wird für das fiktive Szenario auf 50 km als Entsorgungsweg zur nächstgelegenen Deponie oder auf 80 km als Entsorgungsweg zur nächstgelegenen Immobilisierungsanlage beschränkt [LFU 2011].

7.5.2 Ökologische Wirkungen

Von den geänderten Transportentfernungen betroffen sind der AS 170503* „Boden und Steine“, der AS 170301* „Bitumengemische“ und der AS 120118* „Metallschlämme“. Für alle Abfallschlüssel ergeben sich im *Szenario Transportentfernung* reduzierte Umweltbelastungen gegenüber dem *Szenario*

IST-Zustand (-30 %, -38 % und -156 %). Der Netto-Ökologie-Index Wert ist im Vergleich zum Szenario IST-Zustand insgesamt etwas höher, die Umweltbelastung ist um ca. 46 % reduziert (Abbildung 2.32).

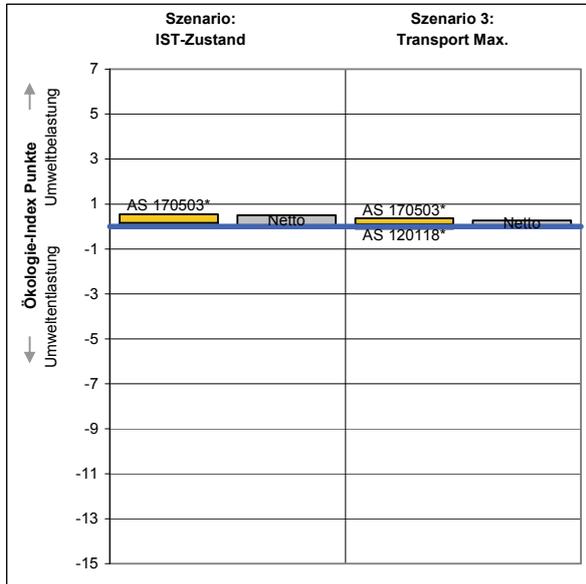


Abbildung 2.32:
Ökologie-Index des Szenarios IST-Zustand im Vergleich zum Szenario Transportentfernung für die jeweils betroffenen AS

Tabelle 2.22 stellt die prozentualen Abweichungen der Ökologie-Index-Punkte der einzelnen Wirkungskategorien und Einzelparameter für alle am Szenario beteiligten Abfallschlüssel dar. Da die Prozentwerte ausschließlich negativ sind, sind für das Szenario Transportentfernung im Vergleich zum Szenario IST-Zustand nur Umweltentlastungen zu verzeichnen. Für alle drei Abfallschlüssel verteilen sich die einzelnen Umweltentlastungen relativ gleichmäßig über die jeweiligen Wirkungskategorien und Einzelparameter.

Tabelle 2.22: Prozentuale Abweichung der Ökologie-Index-Punkte des Szenarios Transportentfernung zum Szenario IST-Zustand für alle betroffenen Abfallschlüssel

| Abweichung der Ökoindex Punkte zum IST-Zustand [%] | AS 170503* | AS 170301* | AS 120118* | Gesamt |
|--|--------------|--------------|--------------|-------------|
| KEA fossil | -42 % | -39 % | -12% | -227% |
| Treibhauseffekt | -15 % | -39 % | -15% | -18% |
| POCP | -26 % | -23 % | -1% | -5% |
| Versauerung | -33 % | -38 % | -138% | -43% |
| Eutrophierung, terrest. | -35 % | -38 % | -51% | -39% |
| Schwefeloxide | -27 % | -38 % | -18% | -100% |
| Stickoxide | -36 % | -38 % | -53% | -40% |
| Gesamt | -30 % | -38 % | -165% | -46% |

Anmerkung: neg. Werte entsprechen einer Umweltentlastung ggü. dem IST-Zustand, pos. Werte einer Umweltbelastung.

7.6 Szenario 4: Transport Zug

7.6.1 Beschreibung

Wie im *Szenario Transportentfernung* sollen im *Szenario Transport Zug* die ökologischen Auswirkungen veränderter Transportparameter betrachtet werden. Hierzu wird angenommen, dass alle über die Begleitscheindaten ermittelten Transporte (sofern sie nicht bereits per Bahn abgewickelt werden) ab einer Entfernung von 300 km mit dem Zug zum Entsorger erfolgen. In Anlehnung an die Standardtransportverteilung aus FRISCHKNECHT ET AL. 2007 wird angenommen, dass ein Kilometeranteil von 1/7 für die Zulieferung bzw. Abholung mit dem LKW verbleibt.

7.6.2 Ökologische Wirkungen

Das *Szenario Transport Zug* umfasst die drei AS 170503* „Boden und Steine“, 120118* „Metallschlämme“ und 060111* „Schwefelsäure“ (Abbildung 2.33). Für die AS 170503* und 120118* ergeben sich im *Szenario Transport Zug* gegenüber dem *Szenario IST-Zustand* um 15 % und 86 % reduzierte Umweltbelastungen. Die Umweltentlastung des AS 060111* bleibt nahezu unverändert. Der Ökologie-Index Wert für das *Szenario Transport Zug* ist durch den hohen Einfluss des Ergebnisses für „Schwefelsäure“ insgesamt nur minimal höher als für das *Szenario IST-Zustand*. Die Netto-Umweltentlastung reduziert sich um nur etwa 1 %.

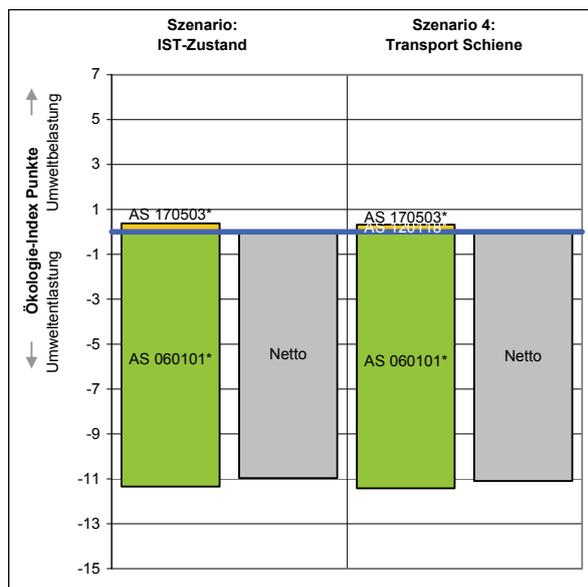


Abbildung 2.33:
Ökologie-Index des Szenarios IST-Zustand im Vergleich zum Szenario Transportentfernung für die jeweils betroffenen AS

Tabelle 2.23 zeigt für das *Szenario Transport Zug* zu allen Wirkungskategorien sowie Einzelparametern durchweg eine Umweltentlastung gegenüber dem *Szenario IST-Zustand* (alle Werte negativ). Beim AS 200123* ist für die nur geringfügige Verbesserung bei der Versauerung und dem Einzelparameter Schwefeloxide der bereits sehr hohe Bezugswert im *Szenario IST-Zustand* ausschlaggebend.

Tabelle 2.23: Prozentuale Abweichung der Ökologie-Index-Punkte des Szenarios Transport Zug zum Szenario IST-Zustand für alle betroffenen Abfallschlüssel

| Abweichung der Ökoindex Punkte zum IST-Zustand [%] | AS 170503* | AS 120118* | AS 060111* | Gesamt |
|--|--------------|-------------|---------------|-------------|
| KEA fossil | -21 % | -6% | -38 % | -35% |
| Treibhauseffekt | -6 % | -7% | -52 % | -10% |
| POCP | -1 % | -0,1% | -29 % | 0% |
| Versauerung | -16 % | -73% | -0,4 % | -1% |
| Eutrophierung, terrest. | -18 % | -27% | -186 % | -29% |
| Schwefeloxide | -14 % | -10% | -0,1 % | -0,2% |
| Stickoxide | -18 % | -28% | -184 % | -30% |
| Gesamt | -15 % | -86% | -0,4 % | -1 % |

Anmerkung: neg. Werte entsprechen einer Umweltentlastung ggü. dem IST-Zustand, pos. Werte einer Umweltbelastung.

7.7 Szenario 5: Entsorgungswege

7.7.1 Beschreibung

Die Fragestellung, welche ökologischen Potentiale oder Risiken mit einer Verschiebung von Abfallmengen zwischen den bestehenden Entsorgungswegen verbunden sein können, wurde mit dem *Szenario Entsorgungswege* untersucht. Veränderungen könnten z.B. durch Kostenaspekte, Markteinflüsse oder auch ordnungsrechtliche Maßnahmen getrieben sein. Die grundsätzlich bestehende Überlassungspflicht für gefährliche Abfälle zur Beseitigung an die GSB gemäß dem bayerischen Abfallwirtschaftsgesetz (BayAbfG Art.10) bleibt von dieser Überlegung unberührt. Allgemein besteht für die in der Studie betrachteten Abfallschlüssel im *Szenario IST-Zustand* eine starke Tendenz zur Abfallverwertung.

Abfallschlüssel Gruppe „Lösemittel“ – Erhöhung des Anteils zur stofflichen Verwertung um 10 % (hier: Destillation)

Dieses fiktive Szenario betrifft alle Abfallschlüssel der Gruppe „Lösemittel“ mit Ausnahme des AS 070108*, der nur in der Sonderabfallverbrennung oder einer Abwasserbehandlungsanlage behandelt wird. Der Mengenanteil aller Abfälle zur Destillation wird im Szenario um 10 % erhöht. Die Mengen zur Entsorgung in anderen Verfahren werden dementsprechend reduziert, die Aufteilung auf die Entsorgungsverfahren bleibt dabei unverändert.

AS 120118* – Erhöhung des Anteils zur stofflichen Verwertung um 10 % (hier: Metallschlamm-Brikettierung)

Zum AS 120118* wird für das *Szenario Entsorgungswege* eine zehnpromtente Erhöhung der Abfallmengen zur Brikettierung auf 28 % angenommen. Die Abfallmenge zur Stabilisierung und letztlich zur Deponierung (Deponiebau) wird um den gleichen Teil reduziert. Die in den so umgelenkten Schleifschlämmen enthaltenen Metalle verbleiben somit im Stoffkreislauf und werden nicht auf Deponien abgelagert.

AS 200123* – Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung unsachgemäßer Entnahme von wertigen Bauteilen („Kompressorenklau“)

Wie im Kapitel 6.5.2 erörtert, trägt die Beraubung von Kompressoren einen großen Anteil zum Gesamtergebnis in der Wirkungskategorie Treibhauseffekt bei. Die zurückgewinnbare FCKW-Menge bei der Entsorgung *gebrauchter Geräte, die FCKW enthalten* ließe sich dadurch erhöhen, dass die unsachgemäße Demontage dieser Bauteile unterbunden wird.¹⁸ Um dies zu erreichen wäre die Einführung eines noch intensiver überwachten oder verbesserten Rücknahmesystems erforderlich – z.B. eine geschlossene, gesicherte Lagerung oder ein Pfandwert-System der Hersteller für die Rücknahme intakter Geräte. Die durch den Altmetallpreis bedingte hohe Wertigkeit der Kompressoren dürfte auch für die offiziellen Entsorger Anreize bieten, Verbesserungen dieser Art umzusetzen. Im *Szenario Entsorgungsweg* wird der Anteil kompressorberaubter Geräte bei der Entsorgung des AS 200123* halbiert.

7.7.2 Ökologische Wirkungen

Wie Abbildung 2.34 zeigt, fallen die Veränderungen im Ergebnis des *Szenarios Entsorgungsweg* gegenüber dem *Szenario IST-Zustand* differenziert aus: Die Umweltbelastung des AS 200123* „Kühlgeräte“ verringert sich deutlich, die geringe Umweltentlastung des AS 120118* „Metallschlämme“ erhöht sich. Zudem ergeben sich für drei der Abfallschlüssel der Gruppe „Lösemittel“ weitere Umweltentlastungen, die anderen drei Abfallschlüssel dieser Gruppe verschlechtern sich dagegen. Insgesamt ist die Netto-Veränderung neben dem AS 140603* vor allem durch den AS 200123* dominiert.

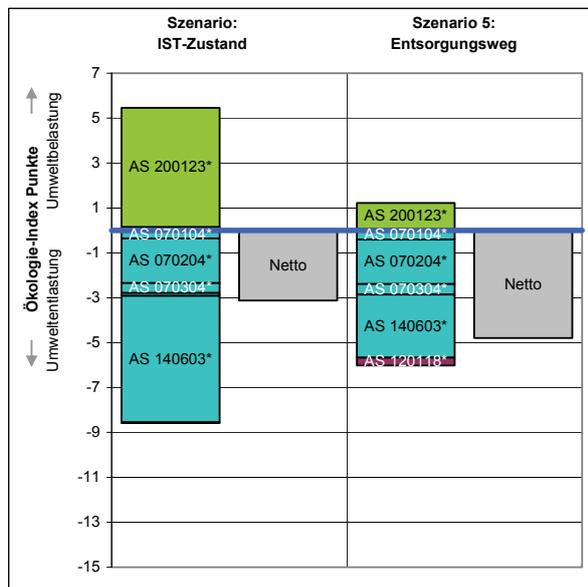


Abbildung 2.34:
Ökologie-Index des Szenarios IST-Zustand im Vergleich zum Szenario Transportentfernung für die jeweils betroffenen AS

Dabei verändern sich Umweltwirkungen und Einzelparameter innerhalb der Abfallschlüssel sehr heterogen (Tabelle 2.24). Für den AS 200123* zeigt sich die alleinige Auswirkung im Treibhauseffekt. Für den AS 120118* zeigen sich für alle Wirkungskategorien Verbesserungen. Im Detail nähert sich die verbleibende Umweltbelastung beim Treibhauseffekt einem fast ausgeglichenen Nettoergebniswert an.

¹⁸ Die Menge an recyceltem Altmetall bleibt von diesem Szenario unberührt, da auch die Kompressoren beraubter Geräte im *Szenario IST-Zustand* letztlich ins Metallrecycling gelangen.

Bei den Lösemittelabfällen verschlechtern sich beispielsweise bei den AS 070104*, 070204* und 070304* (im *Szenario IST-Zustand* gehen große Abfallmengen in die Destillation) die Gesamtentlastungen kaum oder verzeichnen sogar meist Umweltentlastungen für alle Wirkungskategorien und Einzelparameter. Bei den AS 070504* und 140603* (im *Szenario IST-Zustand* zum Großteil thermisch verwertet) ergeben sich durch die Verschiebung der Entsorgungswege teilweise Umweltentlastungen, teilweise aber auch Umweltbelastungen, die wiederum beide Gesamtergebnisse dominieren. Für den AS 080111* (im *Szenario IST-Zustand* ebenso größtenteils thermisch verwertet) trifft dies nicht zu. Hier ist eine klare Umweltentlastung im *Szenario Entsorgungsweg* festzustellen. Für dieses Ergebnis ist der sehr hohe Stickstoffanteil des Abfalls entscheidend.

Insgesamt ergibt sich durch die Veränderung der Entsorgungswege gegenüber dem *Szenario IST-Zustand* eine zusätzliche Umweltentlastung in Höhe von 47 % der Ökologie-Index-Punkte.

Tabelle 2.24: Prozentuale Abweichung der Ökologie-Index-Punkte des Szenarios Entsorgungsweg zum Szenario IST-Zustand für alle betroffenen Abfallschlüssel

| Abweichung der Ökoindex Punkte zum IST-Zustand [%] | AS 200123* | AS 070104* | AS 070204* | AS 070304* | AS 070504* | AS 080111* | AS 140603* | AS 120118* | Gesamt |
|--|--------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| KEA fossil | 0 % | -5 % | 2 % | -3 % | 0 % | -11 % | 4 % | -69% | 1% |
| Treibhauseffekt | -58 % | -21 % | -24 % | -35 % | -3 % | -10 % | 13 % | -91% | -56% |
| POCP | 0 % | -13 % | -7 % | -12 % | -41 % | -102 % | -17 % | -60% | -18% |
| Versauerung | 0 % | -15 % | 2 % | -4 % | 77 % | -92 % | 73 % | -585% | 37% |
| Eutrophierung, terrest. | 0 % | -20 % | 6 % | 5 % | 144 % | -20 % | 112 % | -167% | 85% |
| Schwefeloxide | 0 % | -13 % | 0 % | -10 % | -31 % | -51 % | -15 % | -164% | -9% |
| Stickoxide | 0 % | -21 % | 7 % | 7 % | 141 % | -19 % | 112 % | -172% | 87% |
| Gesamt | -78 % | -15 % | 1 % | -8 % | 100 % | -57 % | 50 % | -863% | -54% |

Anmerkung: neg. Werte entsprechen einer Umweltentlastung ggü. dem IST-Zustand, pos. Werte einer Umweltbelastung.

8 Fazit

Für die Bearbeitung dieses komplexen Vorhabens war eine Recherche zahlreicher Quellen notwendig. Alle für die Analyse notwendigen Basisdaten zu den Entsorgungsvorgängen wurden von der Zentralen Stelle Abfallüberwachung am LfU bereitgestellt. Zudem haben Mitarbeiter des LfU Hintergrundwissen zu bestimmten Abfallschlüsseln oder Verwertungswegen beige-steuert. Sehr wichtig für die Verfahrensbeschreibungen waren neben der Verwerterdatenbank Bayern Expertenbefragungen in Unternehmen, unter anderem bei der GSB. Hierüber konnten Erfahrungen aus der Praxis in die Arbeit einfließen. Die Informationsplattform Abfall des Landes NRW lieferte Daten zu weiteren Parametern. Hier waren vor allem die elektronisch auswertbaren Deklarationsanalysen oder Kurzbeschreibungen betroffener Entsorgerfirmen und deren Verfahrenslinien hilfreich. Schließlich konnten über verschiedene Landes- und Bundesämter sowie eine umfangreiche Literaturrecherche Informationen zu Entsorgungsverfahren oder Abfallfraktionen gewonnen werden.

Nur auf Grundlage dieser breiten Datenbasis konnte bifa das *Szenario IST-Zustand der Entsorgungsstrukturen gefährliche Abfälle in Bayern für das Jahr 2007* berechnen und darauf aufbauend erste Optimierungsansätze definieren und analysieren.

Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Umweltwirkungen wurden mit Hilfe von Szenarienanalysen für folgende Ansätze analysiert:

- Eine Steigerung der **Energieeffizienz** durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme ist grundsätzlich einer ausschließlichen Stromerzeugung vorzuziehen. Durch die zusätzliche Wärmenutzung wird eine höhere Umweltentlastung insbesondere beim Treibhauseffekt erreicht. In der Praxis fehlen jedoch häufig industrielle Wärmeabnehmer mit hoher Ausnutzungsdauer in näherer Umgebung. Insgesamt ergab das *Szenario Energetischer Wirkungsgrad* ein Einsparungspotential von Treibhausgasen in Höhe von 40.540 t CO₂-Äquivalenten.
- Im Bereich **Logistik** führt eine Reduzierung der LKW-Transportaufwendungen zu Treibstoffeinsparung und damit zur Reduzierung von Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Eine Verlagerung der Haupttransportleistung von der Straße auf das Transportsystem Schiene führt zu Umweltentlastungen als Folge der höheren Energieeffizienz. Dennoch haben Einsparungen durch optimierte Transportsysteme in Relation zu den Umweltwirkungen der eigentlichen Entsorgungsprozesse meist nur geringe Auswirkungen auf das Gesamtergebnis. Für die *Szenarien Transportentfernung* und *Transport Zug* ergaben sich Einsparungspotentiale von Stickoxidemissionen in Höhe von 7.520 t und 4.340 t.
- Jede Reduzierung **direkt umweltwirksamer Emissionen** führt zu einer Umweltentlastung. So würde eine Verbesserung der FCKW-Entnahmekquote beim Kühlgeräterecycling aufgrund der hohen Klimawirksamkeit der Kältemittel R12 und R11 zu einer beachtlichen Reduzierung der Treibhausgasemissionen führen (Potential in Höhe von 164.590 t CO₂-Äquivalenten). Eine Verminderung des Anteils defekter FCKW-Kühlkreisläufe birgt zudem ein enormes Entlastungspotential (206.610 t CO₂-Äquivalente).
- Durch **alternative Verfahren** zur stofflichen Verwertung können ebenfalls ökologische Verbesserungen erzielt werden. So könnte eine Reinigung von Metall-Schleifschlamm mit überkritischem CO₂ gegenüber den bestehenden Entsorgungswegen große Vorteile haben. Derzeit scheint das Verfahren gegenüber den anderen Optionen der Abfallentsorgung allerdings nicht wirtschaftlich zu sein. Das in der Aluminiumindustrie eingesetzte alternative Krätzeaufbereitungsverfahren weist durch die Nutzung der Restwärme des Abfalls eine wesentlich höhere Energieeffizienz auf als das derzeit etablierte Verfahren, mit dem die bereits erkaltete Krätze behandelt

wird. Zudem ist der stoffliche Nutzungsgrad bei der Rückgewinnung des Aluminiummetalls höher als im Vergleichsverfahren mit mechanischer Aufbereitungsstufe. Das *Szenario Stofflicher Wirkungsgrad* ergab für beide Alternativen ein Einsparungspotential für den kumulierten Energieaufwand in Höhe von 393.500 MJ.

- Die Auswirkungen, die sich durch eine Verschiebung von Stoffströmen zwischen bestehenden **Entsorgungswegen** ergeben, können sowohl zu positiven wie auch negativen Veränderungen der ökobilanziellen Ergebnisse führen. So schneidet die Metallschlamm-Brikettierung durch den erhöhten stofflichen Nutzungsgrad der Metalle gegenüber der Immobilisierung mit meist deponiebaulicher Verwertung besser ab. Die erhöhte Recyclingrate von Abfalllösemittel beeinflusst bei fünf der betroffenen Abfallschlüssel den Treibhauseffekt positiv, für einen Abfallschlüssel verschlechtert sich das Ergebnis hingegen. Die Wirkungskategorie terrestrische Eutrophierung und die Stickoxidemissionen verbessern sich bei nur zwei Abfallschlüsseln der Gruppe „Lösemittel“. Insgesamt ergab das *Szenario Entsorgungsweg*, ohne Einbezug der Emissionen aus defekten Kühlkreisläufen bei der Entsorgung von FCKW-Geräten, ein Einsparungspotential von Treibhausgasen in Höhe von 4.348 t CO₂-Äquivalenten.

In Bezug auf die humantoxikologischen und ökotoxikologischen Wirkungen können aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit, aber auch wegen noch fehlender methodischer Grundlagen in der Ökobilanzierung Ergebnisse nur in Form ausgewählter Einzelemissionen ermittelt werden. Eine differenzierte Analyse dieser Umweltwirkungen wäre nur mit großem Aufwand und nur an ausgesuchten Einzelbeispielen durchführbar. Die übrigen untersuchten Umweltwirkungen, insbesondere der Treibhauseffekt, konnten methodisch und hinsichtlich der Datenlage fundiert analysiert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Entsorgung von fast 700.000 t Abfällen der 18 ausgewählten Abfallschlüssel, abgesehen vom Treibhauseffekt, in Summe nur Umweltentlastungen verursacht werden. Die Belastung der Umwelt mit Treibhausgasen ist mit 99 kg CO₂-Äquivalenten pro entsorgter Tonne Abfall sehr gering.

9 Literatur

- [ABAG 2006] ABAG-itm: Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg – Metallbearbeitung und Galvanotechnik. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), Stuttgart 2006, www.umweltschutz-bw.de, pdf-Download, Mai 2010
- [ABANDA 2010] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV): Abfallanalysendatenbank ABANDA: benutzergesteuerter Datenvergleich nach Abfallschlüssel. www.abfall-nrw.de, Download Mrz. 2010 bis Jan. 2011
- [ALU-LAUFEN 2006] Aluminium Laufen: Aluminium-Legierungen für Kokillenguss und Niederdruckguss. www.alu-laufen.ch, pdf-Download, Jun. 2010
- [AMMAN 2008] Amman Group: Asphalt-Mischanlagen – mobil bis stationär. Amman Schweiz (Hrsg.), Langenthal 2008. www.amman-group.com, pdf-Download, Mrz. 2010
- [A-Z-B 2010A] Aufbereitungs-Zentrum-Biburg: ARGE Betreibergesellschaft AZ Biburg – Vereinfachtes Verfahrensschema der Bodenwäsche. www.azbiburg.de, gelesen Jun. 2010
- [A-Z-B 2010B] Aufbereitungs-Zentrum-Biburg: ARGE Betreibergesellschaft AZ Biburg – Fließschema Mikrobiologische Bodensanierung. www.azbiburg.de, gelesen Jun. 2010
- [BMLFUW 2010] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Richtig sammeln. Ist doch logisch! – Aluminiumkrätze. www.richtig sammeln.at, gelesen Juli 2010
- [BOIN ET AL. 2000] Boin, U.; Linsmeyer, T.; Neubacher, F.; et al.: Stand der Technik in der Sekundäraluminiumherzeugung im Hinblick auf die ICCP-Richtlinie. Umweltbundesamt Wien (Hrsg.), Wien 2000
- [BRACKE & KLÜMPEN 2005] Bracke, R.; Klümpen, C.: Leistungsbuch Altlasten und Flächenentwicklung. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW) (Hrsg.), Essen 2005
- [Bruch 2011] Metallhüttenwerke Bruch: Lexikon G. www.bruch.de, gelesen Jun. 2010
- [CAPELLO 2006] Capello, C.: Environmental Assessment of Waste-Solvent Treatment in the Swiss Chemical Industry. ETH Zürich (Hrsg.), Zürich 2006
- [DEHOUST & SCHÜLER 2007] Dehoust, G.; Schüler, D.: Ökobilanzielle Untersuchung zur Verwertung von FCKW- und KW-haltigen Kühlgeräten. Öko-Institut (Hrsg.), Darmstadt 2007
- [DEHOUST ET AL. 2008] Dehoust, G.; Schüler, D.; Bleher, D.; et al.: Optimierung der Abfallwirtschaft in Hamburg unter dem besonderen Aspekt des Klimaschutzes. Öko-Institut (Hrsg.), Darmstadt 2008
- [DIN 2006] Deutsches Institut für Normung DIN e. V.: DIN EN ISO 14044 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Beuth Verlag, Berlin 2006
- [DIN 2009] Deutsches Institut für Normung DIN e. V.: DIN EN ISO 14040 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag, Berlin 2009
- [DOKA 2009A] Doka, G.: Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services: Wastewater treatment. Final ecoinvent report Data v2.1 No. 13. / part IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, St. Gallen 2009
- [DOKA 2009B] Doka, G.: Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Final ecoinvent report Data v2.1 No. 13. / part IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, St. Gallen 2009
- [ELANDER 2008] Elander, M.: DUH-Hintergrundpapier – Immer noch erhebliche Defizite beim Kühlgeräterecycling in Deutschland. Deutsche Umwelthilfe e.V. (Hrsg.), Berlin 2008
- [EMMENEGGER ET AL. 2007] Faist-Emmeneger, M.; Heck, T.; Jungbluth, N.; et al.: Sachbilanzen von Energiesystemen: Erdgas. Final report ecoinvent Data v2.0 No. 6 / part V, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf und Villingen 2007

- [ERM-ABAG 1999] ERM Lahmeyer International & ABAG-itm: Aufkommen und Entsorgung von organischen Lösemitteln (nicht halogenhaltig), Forschungsvorhaben 297 35 503, Umweltbundesamt Berlin (Hrsg.), Berlin 1999
- [FEHRENBACH 2005] Fehrenbach, H.: Ecological and energetic assessment of re-refining used oils to base oils: Substitution of primarily produced base oils including semi-synthetic and synthetic compounds. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung (Hrsg.), Heidelberg 2005
- [FEHRENBACH ET AL. 2007] Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Schmidt, R.: Ökobilanz thermischer Entsorgungssysteme für brennbare Abfälle in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Düsseldorf 2007
- [FFE 2003] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse, Teil 2. VDI-Arbeitskreis „Energiekennzahlen“, Berlin 2003. www.ffe.de, pdf-Download, Mrz. 2010
- [FRISCHKNECHT ET AL. 2007] Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Althaus, H.-J.; et al.: Overview and Methodology. Final report ecoinvent Data v2.0 No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf 2007
- [GIEGRICH ET AL. 2002] Giegrich, J.; Fehrenbach, H.; Knappe, F.; et al.: Bewertung der Umweltverträglichkeit von Entsorgungsoptionen. In Reihe Abfall, Heft 63, Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg (Hrsg.), Heidelberg 2002
- [GSB 2011A] gsb Sonderabfall Entsorgung: Weiterführende Angaben im Rahmen der Projektbearbeitung. Persönliche Informationen aus Vor-Ort-Terminen und fernmündlich, Baar-Ebenhausen und Augsburg 2010 und 2011.
- [GSB 2011B] gsb Sonderabfall Entsorgung: Preisinformation gültig ab 01.01.2009. Email vom 13. Jan. 2011, Baar-Ebenhausen 2011
- [GVG/BAV 2010] Gewerbeabfallsortierung und Verwertung Gesellschaft Köln, Baustellenabfall-Verwertung Köln: Preisliste – gültig ab 1. Januar 2010. pdf-Download, Aug. 2010
- [HEYER 1999] Capello, C.: Environmental Assessment of Waste-Solvent Treatment in the Swiss Chemical Industry. ETH Zürich (Hrsg.), Zürich 2006
- [IPA 2010B] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV): Informations-Portal-Abfallbewertung: Abfallsteckbrief 1201 Bearbeitungsschlämme. www.abfallbewertung.org, gelesen Mai 2011
- [IPA 2010A] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV): Informations-Portal-Abfallbewertung: Abfallsteckbrief 0801 Farb- und Lackschlämme. www.abfallbewertung.org, gelesen Mai 2011
- [JUNGBLUTH ET AL. 2007] Jungbluth, N.; Hirschler, R.; Martin, Á.; et al.: Sachbilanzen von Energiesystemen: Erdöl. Final report ecoinvent Data v2.0, No. 6 / part IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf und Villingen 2007
- [KLEINE ET AL. 2004] Kleine, A.; Saling, P.; von Hauff, M.: Ökoeffizienz-Analyse zu Entsorgungsoptionen Mineralölkohlenwasserstoff-kontaminierter Böden. SAM Rheinland-Pfalz (Hrsg.), Mainz 2004
- [LANUV 2009] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV): Entsorgung FCKW-haltiger Haushaltskühlgeräte in Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen 2009
- [LFU 2002] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Veranst.): Bodenbehandlung, Stand der Technik und neue Entwicklungen: Fachtagung 11. Juni 2002. Augsburg 2002
- [LFU 2010/2011] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Weiterführende Angaben im Rahmen der Projektbearbeitung. Persönliche Informationen aus Projektsitzungen und fernmündlich, Kulmbach und Augsburg 2010 und 2011
- [LRAM 2010] Landratsamt München: Entsorgungskosten auf einen Blick – Stand: März 2010. www.landkreis-muenchen.de, pdf-Download, Aug. 2010

- [LUBW 1993] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Handbuch Bodenwäsche. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), Karlsruhe 1993
- [LUBW 1996] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Handbuch Abfall 1 - Untersuchung von Betrieben der spanenden Metallbearbeitung. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), Karlsruhe 1996
- [MÖLLER 1999] Möller, U. J.: Rohrreaktor zur Aufarbeitung von Altölen und Kühlschmierstoffen. ABAG-itm (Hrsg.), Fellbach 1999
- [NEHLSSEN 2010] Nehlsen: Cryogenanlage. www.nehlsen.com, Sonderabfall-Brochüren, pdf-Download, Dez. 2010
- [OPENGEODB 2010] OpenGeoDB: Datenbank mit Geokoordinaten zu Orten und Postleitzahlen - www.opengeodb.de und www.sourceforge.net, Download Version 0.2.4d, Feb. 2010.
- [PATENTDE 1997] Rückgewinnung von Metall aus Aluminiumkrätze - Dokument DE69701283T2. www.patent-de.com, gelesen Mrz. 2011
- [PIKHARD & PRETZ 2009] Pikhard, O.; Pretz, T.: Sammellogistik und Konditionierung zur Schleifschlammverwertung. ABAG-itm (Hrsg.), Fellbach 1999
- [PITSCHKE ET AL. 2003] Pitschke, T.; Roth, U.; Hottenroth, S.; Rommel, W.: Optimierung von Entsorgungsstrukturen. Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik (bifa) im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Augsburg 2003
- [PLINKE ET AL. 2000] Plinke, E.; Schonert, M.; Meckel, H.; Detzel, A.; Giegrich, J.; Fehrenbach, H.; Ostermayer, A.; Schorb, A.; Heinisch, J.; Luxenhofer, K.; Schmitz, S.: Ökobilanz für Getränkeverpackungen II - Hauptteil. UBA-Texte 37/00, Umweltbundesamt, Berlin 2000
- [RESCH ET AL. 2011] Resch, J.; Elander, M.; Rosenkranz, G.: DUH-Pressemitteilung - Mangelhaftes Recycling von FCKW aus Kühlgeräten belastet die Atmosphäre. Deutsche Umwelthilfe e.V. (Hrsg.), Berlin 2011. www.duh.de, gelesen Mai 2011
- [SCHÖN ET AL. 2003] Schön, K. Buchmüller, N.; Dahmen, N.; et al.: EMSIC - Ein pfiffiges Verfahren zur Entölung von Metall- und Glas-Schleifschlämmen. Forschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.), Karlsruhe 2003
- [SEYLER 2003] Seyler, C.: Ein inputabhängiges Ökoinventar-Modell für die thermische Verwertung von Abfall-Lösungsmittel in der chemisch-pharmazeutischen Industrie. ETH Zürich (Hrsg.), Zürich 2003
- [SUC 2010] SUC Sächsische Umweltschutz Consulting: Stabilisierung von Abfällen - Standort Seelingstädt. www.suc-gmbh.de, gelesen Mai 2010
- [TECHNOSAN 2009] TechnoSan: Thermische Behandlungsanlage EcoSan. www.technosan.de, pdf-Download, Jun. 2010
- [TERSTEEG 2008] Tersteeg: Entsorgungskosten bis 31.12.08, Innungspreisliste. www.tersteeg.de, pdf-Download, Aug. 2010
- [TK1 2010] Telefonkontakt 1: Abfalllösemittelrecycling. Gesprächsnotiz, Augsburg, 11. Mai 2010
- [TK2 2010] Telefonkontakt 2: Immobilisierung von Schadstoffen. Gesprächsnotiz, Augsburg 18. Mai 2010
- [TK3 2010] Telefonkontakt 3: Immobilisierung von Schadstoffen. Gesprächsnotiz, Augsburg 18. Mai 2010
- [TK4 2010] Telefonkontakt 4: Bodenwaschanlage. Gesprächsnotiz, Augsburg, 24. Jun. 2010
- [TK5 2010] Telefonkontakt 5: Thermische Bodenbehandlung. Emailkontakt und Gesprächsnotiz, Augsburg, 23. und 29. Jun., 01. Jul., 27. Aug., 01. Okt. 2010
- [TK6 2010] Telefonkontakt 6: Abfalllogistik und Entsorgungskosten. Emailkontakt und Gesprächsnotizen, Augsburg, 03. Sep. und 26. Okt. 2010
- [TK7 2010] Telefonkontakt 7: Abfalllogistik und Entsorgungskosten. Emailkontakt und Gesprächsnotiz, Augsburg, 10. Sep. 2010

- [TK8 2010] Telefonkontakt 8: Abfalllösemittelrecycling. Emailkontakt und Gesprächsnotizen, Augsburg, 14. Sep., 4. und 25. Nov. 2010
- [TK9 2011] Telefonkontakt 9: Metallschlamm-Verwertung. Emailkontakt und Gesprächsnotiz, Augsburg, 28. und 29. Apr., 16. Mai 2011
- [TK10 2011] Telefonkontakt 10: Al-Krätzeaufbereitung. Gesprächsnotiz, Augsburg, 28. Jun 2011
- [TK11 2011] Telefonkontakt 11: Al-Krätzeaufbereitung. Gesprächsnotiz, Augsburg, 28. Jun 2011
- [UBA 2010] Umweltbundesamt Berlin: Abfallwirtschaft - Sonderabfälle, gefährliche Abfälle und besonders überwachungsbedürftige Abfälle - Altöl. www.umweltbundesamt.de, gelesen Jul. 2010
- [WEBER 2009] Weber, C.: Sonderabfallstatistik 2007 für Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg 2009
- [WINTER ET AL. 2005] Winter, B.; Szednyj, I.; Reisinger, H.; et al.: Abfallvermeidung und -verwertung: Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich. Umweltbundesamt Wien (Hrsg.), Wien 2005
- [WIRTGEN 2008] Wirtgen Group: Mobile Kaltrecycling-Mischanlage KMA 220. Wirtgen (Hrsg.), Windhagen 2008. www.wirtgen.de, pdf-Download, Mrz. 2010

bifa Umweltinstitut GmbH

Am Mittleren Moos 46

86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0

Fax. +49 821 7000-100

www.bifa.de