Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal da l'energia

Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"

Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien

Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen von Gebäuden

Gabor Doka

Zürich

Untersuchung im Rahmen des IEA BCS Annex 31:
Energy Related Environmental Impact of Buildings

Mit Unterstützung des
Bundesamtes für Energie

Februar 2000

Impressum

Projekttitel:	IEA CBS Annex 31, "Energy Related Environmental Impact of Buildings"
Titel Teilprojekt:	**Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien - Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen von Gebäuden**
Auftraggeber:	Bundesamt für Energie, BfE
Projektleitung:	Annick Lalive d'Epinay Gruppe für Sicherheit und Umweltschutz Laboratorium für Technische Chemie Eidgenössische Technische Hochschule ETH 8092 Zürich
Auftragnehmer:	Gabor Doka Gruppe für Sicherheit und Umweltschutz Laboratorium für Technische Chemie Eidgenössiche Technische Hochschule ETH 8092 Zürich
Bezug:	EMPA Dübendorf ZEN, Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen Überlandstrasse 129 8600 Dübendorf

1. Auflage, Februar 2000

Dank

Ich möchte mich beim Bundesamt für Energie für die Finanzierung dieses Projektes herzlich bedanken. Mein Dank gilt auch Annick Lalive d'Epinay, ETH Zürich, für die Projektleitung und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Rolf Frischknecht, esu-services, Uster, hat mit seinem externen Review einen sehr wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet. Für diese detaillierte Stellungnahme möchte ich ihm ganz herzlich danken.

Für die Unterstützung in inhaltlichen Belangen und für die Belieferung mit Informationen möchte ich allen Beteiligten herzlich danken. Mein besonderer Dank gebührt folgenden Personen: Peter Staub, Abbruch-, Aushub- und Recyclingverband Schweiz; Thomas Lichtensteiger, EMPA Dübendorf; Karina Schenk, BUWAL Bern; Herr Textor, Ryteg AG, Münsingen; Herr Covelli, Tecova AG, Wohlen; Herr Brandl, Mikrobiologisches Institut der Universität Zürich.

Zürich, Februar 2000 Gabor Doka

Zusammenfassung

Die ökologische Beurteilung von Baumaterialien, Konstruktionen oder Gebäuden konzentriert sich meist auf die Herstellungs- und Gebrauchsphase. Die Entsorgung wird dabei meist vernachlässigt. Die Studie innerhalb des IEA Annex 31 *«Energy related Impact of Buildings»* zeigt nun, dass die Vernachlässigung der Entsorgung nicht generell gerechtfertigt ist.

Für verschiedene, in der Schweiz häufige verwendete Baumaterialien wurde eine Ökobilanz erstellt, welche neben dem Energieverbrauch auch die ökologischen Wirkungen von direkt oder indirekt entstehenden Schadstoffen berücksichtigt (Bewertungsmethoden: Eco-indicator95+ und Umweltbelastungspunkte). Die Belastungen aus der Entsorgung sind dabei für einzelne Baumaterialien höher als die Belastung der Herstellung. Dies kann insbesondere bei Baustoffen der Fall sein, welche in der Herstellung eine relativ geringe Belastung aufweisen.

In der Studie werden Entsorgungsinventare von rund 50 Materialien erarbeitetet. Sie sind geeignet die Ökoinventardaten der Herstellung von Baustoffen zu ergänzen. Die Entsorgung der Baumaterialien kann aber – anders als die Herstellung – nur im Zusammenhang mit einem konkreten, spezifischen Gebäude beurteilt werden. Die Konstruktionsweise, Verarbeitung und konkrete Baustellenlogistik beeinflusst die Verwertbarkeit. Die Lebensdauer eines Materials beeinflusst, welcher Anteil während einer Renovation anfällt. Wo möglich und plausibel wird in der Studie eine Entsorgung mit resp. ohne Verwertung betrachtet. Die Bauabfälle werden unterschieden in Erstellungs-, Renovations- und Abbruchabfälle, welche teilweise für identische Materialien unterschiedliche Belastungen erzeugen.

Die Systemgrenze der Bilanz erstreckt sich dabei von den Aufwendungen auf der Baustelle (z.B. Abbruchenergie), Transporten, Aufwendungen in einer Sortieranlage bis zur letztendlichen Entsorgung in einer Kehrichtverbrennungsanlage, Inertstoffdeponie, Reaktordeponie oder Sonderabfallverbrennungsanlage. Da in der Schweiz rund 46% der brennbaren Abfälle illegal entsorgt werden (1996), wird als Variante auch deren wilde Verbrennung in einem offenen Feuer bilanziert. Die Bilanzierung der Beseitigungsprozesse wie KVA und Reaktordeponie erfolgt materialspezifisch, d.h. die spezifische Zusammensetzung der einzelnen Baumaterialien wird berücksichtigt. Die Daten gelten nur für die Situation in der Schweiz.

Die Resultate der Studie werden verglichen mit Ökobilanzangaben der Herstellung von Baumaterialien. Um einen Eindruck der Relevanz der verschiedenen Baustoffe zu erhalten, wird auch die Entsorgung eines synthetischen Durchschnittshauses betrachtet.

Die Studie zeigt, dass die Entsorgung von Baumaterialien bei weitem nicht vernachlässigbar ist, manchmal sogar ein dominanter Beitrag ist, d.h. gewisse Baumaterialien erzeugen in der Entsorgung grössere Belastungen als in der Herstellung. Ein wichtiges Resultat ist die Feststellung dass Gipsprodukte sehr grosse Belastungen durch Schwefelwasserstoffemissionen erzeugen können, im Falle dass sie in Reaktordeponien d.h. zusammen mit Biomasse entsorgt werden. Auch bei Abfällen, die als relativ unproblematisch eingestuft werden, wie z.B. Beton ist die Berücksichtigung der Abbruchenergie wichtig für eine vollständige Beurteilung. Auch wenn lediglich der Primärenergieaufwand («graue Energie») zu einer Beurteilung herangezogen wird, ist der Entsorgungsaufwand nicht vernachlässigbar.

Summary

Ecological assessments of buildings, constructions, and building materials are often focussed on the production and use phase. Disposal is mostly disregarded. This study within the IEA Annex 31 "Energy related environmental impact of buildings" shows that excluding disposal is not generally justified.

A life cycle assessment of the disposal of various common building materials in Switzerland was conducted. It heeds energy consumption as well as directly or indirectly emitted pollutants. Valuation methods were Eco-indicator95+ and UBP (ecological scarcity).

The study specifies disposal inventories for about 50 building materials. They are fit to complement inventory data for the production of materials. Unlike production, the disposal can only be assessed in the light of a specific building or construction. The potential for recycling is influenced by type of construction, application, and site-specific logistics. Durability of a material determines what proportion will be disposed of in renovation activities. Wherever possible and likely disposal options with or without re-utilization are considered in the assessment. Building wastes are divided in construction wastes, renovation wastes, and demolition wastes, that can have quite different impact even for identical materials.

The system boundary in the assessment includes expenditures on the building site like demolition energies, transports, expenditures in a sorting plant and the final disposal in an incinerator or landfill. According to BUWAL 46% of all burnable building wastes in Switzerland are disposed of illegally. Hence, in one scenario the disposal in an open fire was assessed for burnable wastes. The assessments of the disposal processes are material-specific, i.e. the post use-phase composition of the materials is heeded. The data applies to the situation in Switzerland.

The results of the study are compared to the impacts of the production of building materials. To have some measure of the relevance of the disposal of various materials in a building context, the disposal of an average building was calculated.

The study concludes that disposal of building materials must not generally be assumed to be negligible, as is often done. Sometimes disposal is even more relevant than production, i.e. materials produce bigger impacts in disposal than in production. An important finding is that gypsum products can have huge impacts due to hydrogen sulfide emissions, in the case of disposal in reactive landfill i.e. together with biomass wastes. A complete assessment including demolition energies is important, sometimes even for wastes that are generally considered harmless, e.g. demolition energies for concrete. Disposal is not negligible, even if only primary energy demand ("embodied energy") is assessed.

I. Was ist wo?

1. Ausgangslage 1
Eine kurze Situierung des vorliegenden Berichtes

2. Einleitung 3
Allgemeine Angaben zu Bauabfällen in der Schweiz, Entsorgung von Gebäuden, Abgrenzung von Bauabfällen für die Studie und Charakteristiken von Bauabfällen.

3. Empfohlenes Vorgehen zur Baumaterial-Bilanzierung 11
Generelle Erläuterungen, wie in einer Ökobilanz der Konsum von Baumaterialien vollständig und korrekt bilanziert werden sollte.

4. Systemgrenzen der Bilanzierung 13
Systemgrenzen der Bilanzierung von Entsorgungsschritten von Baumaterialien, wie sie in der vorliegenden Studie angewendet wurden.

5. Methodisches zu Recycling 18
Eine allgemeine Erörterung wie mit Wiederverwendung und -verwertung in Ökobilanzen umgegangen werden kann, wie Recyclingprozesse zu vergleichen sind und wie in der vorliegenden Arbeit verwertende Prozesse inventarisiert werden.

6. Abbruch- und Rückbautechnologien 31
Beschreibung und Inventarisierung der Abbruchphase.

7. Sortiertechnologien 37
Beschreibung und Inventarisierung von Sortieranlagen.

8. Entsorgungstechnologien 44
Beschreibung und Inventarisierung von Entsorgungsprozessen.

9. Eingabedaten Datenmodule Entsorgungs-Optionen 62
Die in der Bilanz berücksichtigten Sachbilanzgrössen werden hier für verschiede Baumaterialien aufgelistet.

10. Bilanzierte Zusammensetzung von Altstoffen 85
Zusammensetzung von Baustoffen, die für die Berechnung der Emissionen bei der Beseitigung benötigt werden.

11. Hinweise zur Baustoffentsorgung für Bilanzierer 91
Hinweise, wie wichtige Baustoffe in der Praxis oft entsorgt werden. Erleichtert die Zuordnung des richtigen Entsorgungsmoduls.

12. Diskussion der Resultate 95
Präsentation der Bilanz-Resultate für die einzelnen Materialien und für ein hypothetisches Durchschnittshaus. Bewertet nach Eco-indicator 95, Umweltbelastungspunkten und Primärenergiebeanspruchung.

13. Ausblick 130
Hinweise auf zukünftige Veränderung von wichtigen Randbedingungen

14. Grenzen der Ökobilanzierung von Gebäuden 134
Kommentar zum Verständnis der Resultate

Anhang A Literaturangaben zu Baumaterialien und Entsorgung 136
Litaraturangaben zu verschiedenen Materialien, welche teilweise für die Sachbilanz benötigt wurden

Anhang B Ressourcenbewertung in Ökobilanzen 154
Exkurs über die Probleme bei der Bewertung von Ressourcenentnahmen in Ökobilanzen

Anhang C Simulation "Recycling/dump mining" 158
Illustration zur langfristigen Dynamik der Ressourcenknappheit und der Marktanteile verschiedener Material-Quellen.

Anhang D Belastung der Feinfraktion aus Sortieranlagen 167
Sammlung von Hypothesen, warum die Feinfraktion aus Sortieranlagen besonders schadstoffbelastet ist.

Anhang E Bewertungsfaktoren der Bewertungsmethoden 170
Verwendete Bewertungsfaktoren für Eco-indicator 95, Umweltbelastungspunkte und Primärenergiebeanspruchung

Anhang F Resultate 177
Resultate aller Entsorgungsoptionen nach Eco-indicator 95 und Umweltbelastungspunkten.

Anhang G Anleitung Gipsentsorgung USA 182
Hinweise des US-amerikanischen Verbandes der Gipshersteller

Anhang H Kritik Entsorgung Gips 183

Anhang I Literatur 186

Inhaltsverzeichnis

Dank i

Zusammenfassung iii

Summary iv

I. Was ist wo? v

II. Glossar xiv

I.I. Abkürzungen xiv
I.II. Begriffe xv

III. Über signifikante Dezimalstellen xviii

1. Ausgangslage 1

1.1. Zielsetzung 1
1.1.1. Einbettung von Ökobilanzresultaten in Entscheidungen 2

2. Einleitung 3

2.1. Bauabfallmengen in der Schweiz 3
2.2. Einige Angaben zur Schweizer Bauwirtschaft 4
2.2.1. Bauwirtschaft 4
2.2.2. Wohnbauten 4
2.3. Entsorgungsweg von Gebäuden 5
2.3.1. Abgrenzung "Was sind Bauabfälle?" 6
2.3.2. Nicht betrachtete Prozesse 6
Alternativen zu Abbruch 6
Altlasten und Brandschutt 6
Nicht mehr aktuelle Baustoffe 7
Abfälle aus anderen Produkte-Lebenszyklen 7
Abfälle aus der Herstellung von Baustoffen 8
2.4. Charakteristik von Bauabfällen 8

3. Empfohlenes Vorgehen zur Baumaterial-Bilanzierung . 11

3.1. Bauabfälle aus Lebenszyklusmengen 11

4. Systemgrenzen der Bilanzierung 13

4.1. Systemgrenze Sortieranlage 14
4.2. Bilanzannahmen 14
4.3. Systemgrenzen Wiederverwendung 15
4.4. Überblick Systemgrenzen 16
4.4.1. Zusammenfassung Systemgrenzen 16

5. Methodisches zu Recycling 18

5.1. Wiederverwendung und -verwertung in Ökobilanzen 18
5.1.1. Bisherige Methoden 18
Methode ISO-1: Erweiterung der Systemgrenzen 18
Methode ESU-ETH: 0% des Recyclings 18
Methode USA: 50% des Recyclings 19
Methode ISO-2: x % der Primäraufwendungen 19
Methode 100% der Primäraufwendungen 19
Gutschriften / Bonusvergabe für Recycling 20
5.2. Wann lohnt sich Recycling? 22
5.2.1. Ökologische Betrachtung des Recyclings 22
Ist der Systemvergleich "Primärmaterialproduktion" vs. "Rezyklatproduktion" gerecht? 23
5.2.2. Ökonomische Betrachtung des Recyclings 24
5.3. Markierungen für Umklassierungen 25
5.3.1. Inertstoff in KVA: Markierung 1 26
5.3.2. Reaktordeponiegut in KVA: Markierung 2 26
5.3.3. Brennbares in Inertstoffdeponie: Markierung 3 27
5.3.4. Reaktordeponiegut in Inertstoffdeponie: Markierung 4 27
5.3.5. Brennbares in Reaktordeponie: Markierung 5 27
5.3.6. Inertstoff in Reaktordeponie: Markierung 6 27
5.3.7. Fremdstoff in Verwertung: Markierung 7 27
5.3.8. Verwertbares in Beseitigung 28
5.4. Bilanz-Kennziffern für Kreislaufführung 28
5.5. Energienutzungs-Malus 28
5.6. Stoffnutzungs-Malus 30

6. Abbruch- und Rückbautechnologien 31

6.1. Abbruchtechnologien 31
Rückbau 32
6.2. Mehrmuldenkonzept SBV 32
6.3. Ökoinventare Abbruch 33
6.3.1. Kenngrössen für Baumaschinen 33
Emissionen 35

7. Sortiertechnologien 37

Nutzen und Ziele von Sortieranlagen 37
Störstoffe bei Sortieranlagen 37
7.1. Aussortieren 38
7.2. Zerkleinern 38
7.2.1. Brechen 38
7.2.2. Elektromechanische Zerkleinerungsverfahren 38
7.3. Nasse Verfahren 38
7.3.1. Dichtesortierung 39

7.4. Sortiercharakteristik von Sortieranlagen 39
7.5. Ökoinventar Sortieranlagen 40

8. Entsorgungstechnologien 44

8.1. Beseitigung 44
8.1.1. KVA 44
8.1.2. Technologiestand 46
8.1.3. Weitergehende Rauchgasreinigung der KVA (WRR) 46
8.1.4. Weitere Betriebsstoffe 47
8.1.5. Reststoffdeponie 48
Produktspezifische Auswirkungen 49
Prozessspezifische Aufwendungen 49
8.1.6. Schlackenkompartiment 50
Prozessspezifische Aufwendungen 50
8.1.7. Reaktordeponie 52
Grundlagen 52
Abbaubarkeit 53
Prozesspezifische Aufwendungen 54
8.1.8. Inertstoffdeponie 55
8.1.9. Sondermüll 56
Inventar SAVA 56
8.1.10. "Wilde" Entsorgung 57
8.1.11. Inventar der wilden Verbrennung 58
Produktspezifische Emissionen 58
Prozessspezifische Emissionen 59
Weitere Aufwendungen 60
8.2. Verwertung 60

9. Eingabedaten Datenmodule Entsorgungs-Optionen 62

9.1. unbewehrter Beton 63
9.1.1. bewehrter Beton 64
9.1.2. Zement (in Beton) und Mauermoertel 65
9.1.3. Betonkies 66
9.1.4. Backstein 67
9.1.5. Vollgipsplatte 68
9.1.6. Vollgipsplatte/Gipsputz 69
9.1.7. Gipskartonplatte 69
9.1.8. Gipsfaserplatte 70
9.1.9. Mineralwolle 71
9.1.10. EPS-Isolation flammgeschuetzt 71
9.1.11. Flachglas 72
9.1.12. Massiveisen 72
9.1.13. Kleinmetall (in brennbaren Verbunden) 73
9.1.14. Altholz unbehandelt 73

9.1.15. Altholz behandelt ... 74
9.1.16. Spanplatte (7.5%PU) ... 74
9.1.17. PUR-Schaum ... 74
9.1.18. Anstrichstoffe allgemeines ... 75
9.1.19. Anstrichresten bzw. -Ablauge ... 75
9.1.20. Anstrich auf Mauer ... 75
9.1.21. Anstrich auf Holz ... 75
9.1.22. Anstrich auf Metall ... 75
9.1.23. Alkydharzfarbresten bzw. -Ablauge ... 76
9.1.24. Dispersionsfarbresten bzw. -Ablauge ... 76
9.1.25. Dispersionsfarbe auf Mauer ... 76
9.1.26. Dispersionsfarbe auf Holz ... 76
9.1.27. Dichtungskitt (PUR) ... 76
9.1.28. PVC-Rohre und Profile ... 77
9.1.29. PVC-Produkte ... 77
9.1.30. PVC-Fensterrahmen ... 77
9.1.31. PE/PP-Produkte ... 78
9.1.32. PE-Rohre ... 78
9.1.33. PE-Anstrichgebinde und Baufolien ... 78
9.1.34. Holzzementplatte ... 78
9.1.35. EPS (in Leichtputz u. -beton) ... 79
9.1.36. Mineralischer Putz ... 79
9.1.37. Kunstputz ... 80
9.1.38. PVC-Dichtungsbahn ... 81
9.1.39. PE-Dichtungsbahn ... 81
9.1.40. PE-Dampfbremse flammgeschuetzt ... 82
9.1.41. Bitumenbahn ... 82
9.1.42. Elektrotechnische Anlagen ... 82
9.1.43. Elektrokabel ... 83
9.1.44. Pneu-Waschgrubensediment pro tkm ... 83
9.1.45. Glasfaserkunststoff-Element ... 83
9.1.46. Verpackungskarton ... 84

10. Bilanzierte Zusammensetzung von Altstoffen 85

10.1. Kunststoffe ... 85
10.1.1. Spezielle Kunststoffprodukte ... 87
PVC-Dichtungsbahn ... 87
PE-Dichtungsbahn ... 87
PE-Dampfbremsen flammgeschützt ... 87
EPS-Isolationen ... 87
Bitumenbahn ... 87
Glasfaserkunststoff ... 87
Kabel-Kunststoff ... 87
10.1.2. Gips ... 88

10.1.3. Karton ... 88
10.1.4. Unbehandeltes Abfallholz ... 88
10.1.5. Behandeltes Abfallholz ... 88
10.1.6. Spanplatten ... 88
10.1.7. Holzzementplatte ... 88
10.1.8. Kunststoffputz ... 88
10.1.9. Dispersionsfarbe ... 88
10.1.10. Alkydharzfarbe ... 89
10.1.11. Anstrichstoffe ... 89

11. Hinweise zur Baustoffentsorgung für Bilanzierer ... 91

11.1. Dichte von Baustoffen ... 94

12. Diskussion der Resultate ... 95

12.1. Bewertungsmethoden ... 95
12.1.1. Bewertungsmethode Eco-indicator 95+ ... 95
Auswahl der berücksichtigten Umwelteffekte ... 96
Berechnungsformel EI95+ ... 98
12.1.2. Bewertungsmethode der ökologischen Knappheit (UBP) ... 99
Auswahl der berücksichtigten Belastungen ... 99
Berechnungsformel UBP ... 100
12.1.3. Kumulierter Primärenergieaufwand (PE) ... 100
Der Unterschied zwischen Energiebilanzen und Ökobilanzen ... 101
Berechnung Primärenergieinhalt ... 101
12.1.4. Vor- und Nachteile der drei Methoden ... 103
12.2. Genauigkeit der Resultate ... 103
12.3. Resultate für einzelne Baumaterialien ... 105
12.3.1. Beitrag durch Beseitigungsprozesse ... 106
12.3.2. Beitrag durch Abbruchenergie ... 106
12.3.3. Beitrag durch Partikelemissionen ... 106
12.3.4. Beitrag Sortierung ... 107
12.3.5. Zeitliche Unterscheidung (ER, RE, AB) ... 107
12.4. Vergleich Entsorgung vs. Herstellung einzelner Baumaterialien ... 109
12.4.1. Entsorgung vs. Herstellung nach Eco-indicator 95+ ... 110
12.4.2. Entsorgung vs. Herstellung nach UBP97 ... 111
12.4.3. Energetische Ressourcen (Primärenergie) ... 111
12.4.4. Fazit ... 111
12.5. Wilde Verbrennung vs. KVA ... 112
12.6. Resultate für ein "Durchschnittshaus" ... 114
12.6.1. Bedeutung verschiedener Baumaterialien ... 115
12.6.2. Bedeutung verschiedener Entsorgungsschritte ... 116
12.6.3. Einfluss verschiedener Entsorgungsvarianten ... 118
12.6.4. Zeitliche Differenzierung (ER, RE, AB) ... 120
12.6.5. Verwertung, Störstoffe und unerwünschte Beseitigungskanäle ... 125

Stoffliche Verwertung 125
Ungeeignete Beseitigung 125
Energetische Verwertung 126
12.6.6. Herstellung vs. Entsorgung 127
12.6.7. Fazit 128

13. Ausblick 130

13.1. Zukünftige Baumaterialien 130
13.2. Entwicklung der Deponierung 130
13.2.1. Erfahrungen mit Gips in Deponien aus der Praxis 131
13.2.2. Entwicklung der Deponierung 132
13.3. Entwicklung des Recyclingmarktes 133
13.3.1. Kiesersatzstoffe 133
13.3.2. Sortieranlagen 133

14. Grenzen der Ökobilanzierung von Gebäuden 134

14.1. Massenprodukte vs. Einzelanfertigungen 134
14.2. Bilanzierung von Deponieemissionen 135

Anhang A Literaturangaben zu Baumaterialien und Entsorgung 136

A.1. Beton, Mauersteine und andere Massivbaustoffe 136
A.1.1. Zementprodukte 136
Beschreibung 136
Rückbauabfälle 136
Zusammensetzung 136
A.1.2. Leichtbeton/Leichtbausteine 136
A.1.3. Tonprodukte 136
Wiederverwendung 136
Verwertung 136
A.1.4. Gipsprodukte 137
Verwertung 137
Beseitigung 137
A.1.5. Kalksand- und Natursteine 138
A.2. Mörtel, mineralisch gebundene Putze und Kunststoffputze 138
A.2.1. Zusammensetzung 138
A.2.2. Rückbauabfälle 138
A.2.3. Gips/Anhydrit-Mörtel 139
Rückbauabfälle 139
Beseitigung 139
A.2.4. Kunststoffhaltige Putze/Mörtel 140
A.3. Glas 140
A.3.1. Zusammensetzung 140
Verwertung 140
A.4. Metallbaustoffe 140

Zusammensetzung 140
Verwertung 140
A.5. Holzwerkstoffe 141
Verwertung 141
Wiederverwendung 142
Beseitigung 142
A.5.1. Kunststoffgebundene Holzwerkstoffe 142
Spanplatten 142
A.5.2. mineralisch gebundene Holzwerkstoffe 142
Holzplatten 142
A.6. Klebstoffe 143
A.7. Fugendichtungen und Kitte 143
Zusammensetzung 143
Verwendung 144
A.8. Dichtungsbahnen und Schutzfolien 144
Beschreibung 144
Zusammensetzung 144
Verwertung 145
A.9. Wärmedämmstoffe 145
A.9.1. Steinwolle 145
A.9.2. Schaumglas 145
Entsorgung 145
A.9.3. Glaswolle 145
Verwertung 145
A.9.4. Kunststoff-Isolationen 145
Beschreibung 145
Verwertung 146
A.10. Bodenbeläge 146
Verwertung 146
A.11. Türen 146
A.12. Anstrichstoffe 146
Erstellungsabfälle 146
A.13. Massive Kunststoffbauteile 147
Verwendung 147
Entsorgung 150
Verwertung 150
Rohre 150
Fensterrahmen 151
A.14. Siedlungsabfallähnliche Abfälle 151
Verwertung 151
A.15. Tiefbauabfälle 151
Verwertung 151
Entsorgung 151
A.16. weitere Abfälle 151

Wiederverwendung 151
A.16.1. Elektronikgeräte 151
Zusammensetzung 152
Verwertung 152
A.16.2. Kabel 152
Zusammensetzung 152
Verwertung 152
Beseitigung 152
A.16.3. Waschgrubensedimente 153
Zusammensetzung 153

Anhang B Ressourcenbewertung in Ökobilanzen 154

B.1. Bedeutung von Ressourcen und Reserven 154
B.2. Probleme der Bewertung 154
B.3. Sekundär-Reserven 156
B.4. Tertiär-Reserven 156
B.5. Ressourcenschonung durch Recycling 157

Anhang C Simulation "Recycling/dump mining" 158

C.1. Modellannahmen 158
C.2. Modell-Implementierung 162
C.3. Resultate der Simulation 162

Anhang D Belastung der Feinfraktion aus Sortieranlagen 167

D.1 Wirkungskette: Oberfläche - Abrasion - Feinfraktion 167
D.2 Wirkungskette: Festigkeit - Feinfraktion 168
D.3 Hinweise aus der Literatur zu Feinstoffbelastung 168

Anhang E Bewertungsfaktoren der Bewertungsmethoden 170

E.1 Eco-indicator 95+ 170
E.2 Umweltbelastungspunkte (UBP) 173
E.2.1. Bestimmende Effekte bei UBP 173
E.2.2. Ökofaktoren UBP 175
E.3 Bewertung Primärenergieressourcen 176

Anhang F Resultate 177

Anhang G Anleitung Gipsentsorgung USA 182

Anhang H Kritik Entsorgung Gips 183

Anhang I Literatur 186

II. Glossar

I.I. Abkürzungen

AB	Abbruchabfall
AGH	Anorganisch gebundenen Holzwerkstoffe (Gipsgebundene Spanplatten, Holzzementplatten)
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
EPS	expandiertes Polystyrol
ER	Erstellungsabfall
FPO	Flexible Polyolefine
GF	Gipsfaser(platten)
GFK	Glasfaser-Kunststoff (Verbundelement)
GK	Gipskarton(platten)
ID	Inertstoffdeponie
KEL-CH	Ständige Konferenz für die Einsparung von Lösemitteln bei der Herstellung und Verwendung von Anstrichstoffen und Hilfsmitteln
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
MDF	Mitteldichte Faser(platten), Holzfaserplatte
MMK	Mehr-Mulden-Konzept
PAH/PAK	*polycyclic aromatic hydrocarbons,* dt. Polyzyklische, aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
PE	Polyethylen
PF	Phenol-Formaldehyd, mögliches Bindemittel bei Spanplatten
PMDI	Diisocyanat, mögliches Bindemittel bei Spanplatten
ppm	parts per million, ein Millionstel, in der vorliegenden Studie auf die Masse bezogen, d.h. 1 ppm = 1 mg/kg
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan (z.B. in Hartschaum)
PVC	Polyvinylchlorid
RE	Renovationsabfall
REA	Rauchgasentschwefelungs-Anlage (erzeugt u.a. Gips)
RkD	Reaktordeponie
RsD	Reststoffdeponie
SG	Schicksalsgemeinschaft(en) (beim Bau zusammengebrachte, danach gemeinsam entsorgte und später evt. wieder separierte Baustoffe, z.B. Armierungsstahl in Beton)
SM	Sondermüll oder Schwermetalle
TPO	Thermoplastische Polyolefine
TS	Trockensubstanz
TVA	Technische Verordnung über Abfälle vom 10.12.1990

UF	Harnstoff(Urea)-Formaldehyd, u.a. Bindemittel bei Spanplatten
VVS	Verordnung über den Verkehr mit Sonderabfällen vom 12.11.1986
WRR	Weitergehende Rauchgasreinigung (bei der KVA)
XPS	extrudiertes Polystyrol (Hartschaum)

I.II. Begriffe

Bauabfälle	Hochbauabfälle	Betonabbruch	separater Altbeton
		Mischabbruch/Bauschutt	vermischte mineralische Abfälle
		Brennbare Bauabfälle	vermischte brennbare Abfälle
		Bausperrgut	vermischte Bauabfälle (o. Sonderabfälle)
		Sonderabfälle	
	Tiefbauabfälle	Aushub (unverschmutztes Erdmaterial)	Oberboden/ Humus
		Ausbauasphalt (Altbelag)	Fräsasphalt Aufbruchasphalt
		Strassenaufbruch (Alt-Fundationsschichten)	

Altlast Mit Schadstoffen ungewöhnlich stark belastete Abfälle. Oft handelt es sich dabei um verschmutztes Erdreich bzw. verschmutzten Aushub von belasteten Standorten.

Aushub Unverschmutztes Erdmaterial, welches ohne Einschränkung wiederverwendet werden kann.

Bauabfälle Bezeichnung für alle Materialien, welche bei Bau- oder Abbrucharbeiten auf Baustellen zur Entsorgung anfallen. In Deutschland wird der Begriff explizit auch für die dem Siedlungsmüll ähnlichen, nichtmineralischen Abfälle aus dem Bausperrgut wie Verpackungen, Farben, Isolationen etc. verwendet [Gewiese 1998, p.4]. Das Synonym "Baurestmassen" ist weniger "abfällig" und wird z.B. in Österreich verwendet. Es wird hier aber wegen zu der missverständlichen Nähe zum Begriff "Reststoff" und "Reststoff-deponie" nicht verwendet.

Bauschutt Weitgehend inerte Bauabfälle, die ohne weitere Behandlung auf Inertstoffdeponien abgelagert, bzw. nach einer spezifischen Aufbereitung als Kiesersatz verwendet werden können.

Bausperrgut Vermischte Bauabfälle, die jedoch frei sind von Sonderabfällen. Sie können nicht in Inertstoffdeponien abgelagert werden. Sie werden im allgemeinen manuell oder maschinell sortiert.

Deponierung Erlaubte Ablagerung auf Deponien (Inertstoffdeponien, Reststoffdeponien oder Reaktordeponien).

Entsorgungsoptionen Bezeichnet die verschiedenen Möglichkeiten, wann und wie ein Bauabfall ab Baustelle entsorgt wird. Unterschieden wird nach Zeit (Erstellungsabfall, Renovation, Abbruchabfall) und Art der Entsorgung (in Beseitigung, in stoffliche Verwertung). Die Entsorgungsoptionen umfassen in der vorliegenden Bilanzierung

Energieaufwand für Abbruch, Abbruchemissionen (Partikel), Transporte, ggf. Aufwendungen in der Sortieranlage und Aufwendungen der Beseitigung nicht verwerteter Stoffe.

Inertstoffdeponie Deponie, in welcher nur inertes, gesteinsähnliches Material mit weniger als 5% Fremdanteilen (organisch oder löslich) eingelagert werden darf.

Reststoffdeponie Deponie, in welcher nur Abfall mit zu mindestens 95% bekannter Zusammensetzung, weniger als 5% organischem Kohlenstoff, weniger als 5% löslichen Anteilen und weniger als 1% chlorhaltigen Kohlenwasserstoffen eingelagert werden darf.

Reaktordeponie Deponie, für Abfälle, welche die Kriterien für die Inertstoffdeponie oder die Reststoffdeponie nicht erfüllen. Ab 2000 dürfen in der Schweiz keine brennbaren Abfälle mehr auf Reaktordeponien eingelagert werden.

Siedlungsabfälle Aus Haushalten stammende Abfälle sowie andere Abfälle vergleichbarer Zusammensetzung aus anderen Quellen (z.B. Gewerbe).

Sonderabfälle Abfälle, mit besonderem Gefährdungspotential, welche einer speziellen Behandlung bedürfen.

Sortierung Behandlung von Abfällen mit dem Ziel, in der weiteren Verwertung oder Behandlung unterschiedlich zu behandelnde Abfallfraktionen voneinander zu trennen.

Wiederverwendung Erneuter Einsatz von bereits einmal gebrauchten Produkten; Allenfalls mit einem Aufbereitungsschritt, aber ohne wesentliche Veränderung des Alt-Produktes, im Unterschied zu Verwertung eher eine "Auffrischung" oder Umnutzung von Altprodukten als eine Herstellung von Neuprodukten aus rezykliertem Material.

Verwertung auch Wiederverwertung, Recycling, Downcycling. Hier: Stoffliche Verwertung, d.h. Nutzung der Materialeigenschaften des Altproduktes als Rohmaterial zur Herstellung von neuen Produkten unter weitgehender Auflösung des Altproduktes; im Unterschied zu Wiederverwendung. Energetische Verwertung s. Beseitigung

Recycling Stoffliche Verwertung in der Herstellung von Neuprodukten, welche etwa *gleichwertige Eigenschaften* gegenüber entsprechenden Produkten aus Primärmaterial aufweisen, bzw. auch anteiliger Einsatz von Fabrikationsresten, Anwendungsresten oder Altmaterial in Neuprodukten (z.B. Herstellung von Polystyrolplatten aus PS-Verpackungen, Schaumglas aus Altglas). Da Recycling ein Modewort geworden ist, wird manchmal auch von "echtem" Recycling gesprochen, um die Gleichwertigkeit der Recyclatprodukte mit Primärmaterial–Produkten zu betonen. Bei Verwertung zu minderwertigen Produkten wird im Unterschied dazu von Downcycling (s.d.) gesprochen. Eine energetische Verwertung wird in der vorliegenden Studie als Beseitigung (s.d.) verstanden, da die Stoffmatrix in einem einmaligen, unwiederholbaren Prozess aufgelöst wird.

Downcycling Im engeren Sinne: Stoffliche Verwertung von Altprodukten in der Herstellung von Neuprodukten, welche *minderwertige Eigenschaften* gegenüber entsprechenden Produkten aus Primärmaterial aufweisen. Z.B. ist Altpapierverwertung ein Downcycling, da die Faserlängen verkürzt werden. Im weiteren Sinne: Stoffliche Verwertung zu Produkten mit minderem ökonomischen Wert (z.B. Ziegelschotter als Pistenbelag).

Altprodukt Produkt am Ende der Gebrauchsphase, welches zu entsorgen ist.

Neuprodukt Produkt am Anfang der Gebrauchsphase (egal, ob aus Primär- oder Sekundärmaterial)

Entsorgung Behandlung von Abfällen durch Wiederverwendung, Verwertung oder Beseitigung

Vollrecycling Recycling mit nur sehr geringen Behandlungsverlusten, d.h. 100% Altprodukt werden zu fast 100% in ein Neuprodukt übergeführt.

Beseitigung Deponierung oder Verbrennung von Abfall. Abfallbehandlung ohne stoffliche Nutzung, allenfalls unter Nutzung des Brennwertes des Abfalls (z.B. Einsatz als Ersatzbrennstoff oder Verbrennung in KVA mit Energienutzung).

Sekundärmaterial auch Rezyklat bzw. Downzyklat: Rohstoffe, die aus Altprodukten hergestellt werden (Materialinput stammt aus der Technosphäre).

Primärmaterial ungebrauchte Rohstoffe, die ursprünglich der Erdkruste entnommen werden (Materialinput stammt aus der Biosphäre).

Schicksalsgemeinschaft (SG) Zusammenschluss von beim Bau zusammengebrachten, danach gemeinsam entsorgten und später evt. wieder separierten Baustoffe, z.B. Armierungsstahl in Beton.

Aufwendungen Bei der Ökobilanzierung werden alle für einen Prozess direkt benötigten Materialien und Dienstleistungen (technischer Input) als Aufwendungen bezeichnet (Stufe Sachbilanz). Im weiteren Sinne werden damit aber auch alle direkt und indirekt erzeugten ökologischen Belastungen (Emissionen, Beanspruchung von Naturgütern) bezeichnet (Stufe Ökoinventar).

Bitumen Destillationsrückstand aus der fraktionierten Erdöldestillation bei 350°C.

Teer Bestandteil des Destillates der trockenen Destillation von Steinkohle bei 1000°C. Enthält weit mehr PAK als Bitumen. Heute nicht mehr gebräuchlich.

Sulfattreiben Alterungsprozess bei Beton. Transport von aus dem Beton stammenden Sulfatsalzen durch Kapillarwasser und oberflächennahe Auskristallisierung und Bildung sog. Ettringitphasen durch Verdunstung des Wassers. Durch den Kristallisationsdruck kann der Beton verformen oder abplatzen.

Technosphäre Summe aller Elemente im menschengemachten, technischen und ökonomischen System.

Biosphäre Summe aller Elemente des natürlichen, ökologischen Systems.

III. Über signifikante Dezimalstellen

Oft werden die in Daten angegebenen Dezimalstellen als Aussage zur Datengenauigkeit verstanden. In der vorliegenden Studie werden die Daten oft mit weit mehr als den signifikanten Dezimalstellen angegeben. Damit soll nicht impliziert werden, die Daten seien sehr genau. Im Gegenteil: Bei Ökobilanzierungen trifft man oft grosse Ungenauigkeitsbereiche an. Schwankungen von einer bis mehreren Grössenordnungen sind oft keine Seltenheit, z.B. bei Angaben zu Gehalten chemischer Elemente in Produkte-Zusammensetzungen.

In Ökobilanzen gibt es aber ungleich wie in den anderen quantitativen Wissenschaften oft keine genauen Formelsätze, um Daten herzuleiten. Die Daten werden direkt numerisch verrechnet, so wie sie benötigt werden. Daten werden oft aus Ökobilanz- oder anderen Publikationen entnommen und weiterverrechnet. D.h. die Daten *"diffundieren"*.

Alle, die Erfahrungen mit Ökobilanzen haben, wissen um die grossen Unsicherheitsbereiche der Daten. Nun können sich aber aufgrund der oft langen "Diffusionswege" der Daten, allein wegen der – an sich korrekten – Rundung auf signifikante Dezimalstellen, Rundungsfehler aufsummieren. Um diese unnötige Unsicherheitsquelle im speziellen Umfeld der Ökobilanzierung einzudämmen und auch um eine Weiterverwendung oder Anpassung der Daten zu erleichtern, werden die hier publizierten Daten ohne spezielle Rücksicht auf signifikante Dezimalstellen angegeben.

In der vorliegenden Studie beinhaltet die Anzahl angegebener Dezimalstellen keine Aussage zur Datengenauigkeit.

1. Ausgangslage

Ökobilanzen für Bauprodukte stützen sich bisher meist nur auf die **Herstellungsphase**. Baubiologische Überlegungen konzentrieren sich dagegen auf die **Gebrauchsphase** d.h auf das Verhalten während der Standzeit im Gebäude. In der Vergangenheit haben sich ökologische Kriterien für Bauprodukte v.a. aus diesen beiden Lebensabschnitten der Produkte herausgebildet. Für eine vollständige Beurteilung der ökologischen Belastungen während des gesamten Lebenszyklus' (*"cradle-to-grave"*) muss aber auch die **Entsorgung** der Materialien berücksichtigt werden. Die Beurteilung der Entsorgungsphase stützte sich bisher oft nur auf vage Klassierungen wie z.B. "Recycling möglich". Prozessspezifische Auswirkungen der Beseitigung wurden bisher – wenn überhaupt – nur aufgrund durchschnittlicher Abfallzusammensetzungen bilanziert; spezifische Aussagen zu einzelnen Produkten fehlen.

An der ETH Zürich wurden Bilanzmodelle entwickelt, welche die Bilanzierung der **spezifischen Auswirkungen einzelner Abfallkomponenten** in verschiedenen Abfallbehandlungsanlagen wie Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA), Reaktordeponien (RD) oder Sonderabfallverbrennungs-anlagen (SAVA) für die Situation in der Schweiz ermöglichen [ESU 1996b, Hellweg et al. 1998]. Damit können Lücken von Ökobilanzen im Bereich Beseitigung geschlossen werden.

1.1. Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Inventare und Bilanzen der **ökologischen Auswirkungen** aus der **Behandlung von Bauabfällen** zu erstellen. Diese sollen die bisher gängigen Ökoinventare und -bilanzen der Herstellung von Baumaterialien (*"cradle-to-gate"*) ergänzen und so zu einer ganzheitlicheren Beurteilung der ökologischen Belastung durch Baumaterialien führen. Die hier erstellten Bilanzen machen weniger Aussagen zu einem durchschnittlichen Bauabfallmix, sondern zu einzelnen Bauprodukten und -materialien, d.h die Bilanzen werden **bauproduktspezifisch** ausgeführt.

> *Die resultierenden Daten sollen zur ökologischen Beurteilung und Optimierung von geplanten Bauvorhaben dienen und nicht von bereits bestehenden Gebäuden.*

Da die hier erstellten Entsorgungs-Bilanzen die Herstellungs-Bilanzen ergänzen sollen, wird davon ausgegangen, dass die Leser mit der grundsätzlichen Ökobilanzmethodik vertraut sind. Auf eine allgemeine Einführung in Ökobilanzen wird hier verzichtet.

Im Allgemeinen werden Entsorgungsschritte als wenig relevant für den gesamten Lebenszyklus betrachtet. Für eine Vielzahl von Produkten mag dies zutreffen. Aufgrund der vorliegenden Anlayse ist es möglich, diejenigen Produkte zu identifizieren, wo diese generelle Aussage nicht zutrifft.

Im Entsorgungsschritt werden auch Themen wie Wiederverwertung und Wiederverwendung entschieden, welche in der Baubranche aufgrund des grossen Materialflusses eine besondere Bedeutung haben. Die Studie kann hier Ansätze für eine differenzierte Betrachtung und Integration des Recyclings in Ökobilanzen liefern.

1.1.1. Einbettung von Ökobilanzresultaten in Entscheidungen

Die Wahl eines Baustoffes hängt von vielen Kriterien ab. Eine Zusammenstellung dieser Kriterien findet sich in der Abbildung unten. Im Baufachbereich wird zur Berücksichtigung der "Ökologie" meistens auf Informationen zur grauen Herstellungsenergie, zu baubiologischen Eigenschaften, Rezyklierbarkeit, ev. Rezyklatgehalt abgestützt.

Die einzelnen Öko-Kriterien sind oft widersprüchlich. So kann z.B. ein rezyklierbarer Baustoff eine relativ hohe Herstellungsenergie aufweisen oder ein baubiologisch günstiges Material nur schlecht verwertbar sein. Für Baufachleute ideal wäre *eine* Masszahl, welche alle Kriterien gewichtet.

Kennzahlen wie **Graue Energie** können wesentliche Belastungen in einem Bereich abbilden (energetische Belastung während der Herstellung). Sie sind jedoch ungeeignet baubiologische Belastungen oder vollständige ökologische Belastungen abzubilden, weil diese nicht notwendigerweise mit einem Energieverbrauch verknüpft sind. **Baubiologische Eigenschaften** müssen oft stark gebäude- und fallspezifisch gewichtet bzw. relativiert werden und können daher nur schwer einem Material pauschal zugeordnet werden. Gängige **Ökobilanzmethoden** können eine Vielzahl der ökologischen Belastungen abbilden und betrachten dabei

a) den vollständigen Lebenszyklus und

b) eine Vielzahl von ökologischen Belastungen auch wenn sie nicht mit einem Energieverbrauch einhergehen.

Ziel dieser Arbeit ist es, für Baumaterialien die bisher im Lebenszyklus fehlenden oder stark vernachlässigten ökobilanzrelevanten Daten im Entsorgungsbereich bereitzustellen und so zu einer vollständigeren ökologischen Beurteilung von Baumaterialien zu gelangen.

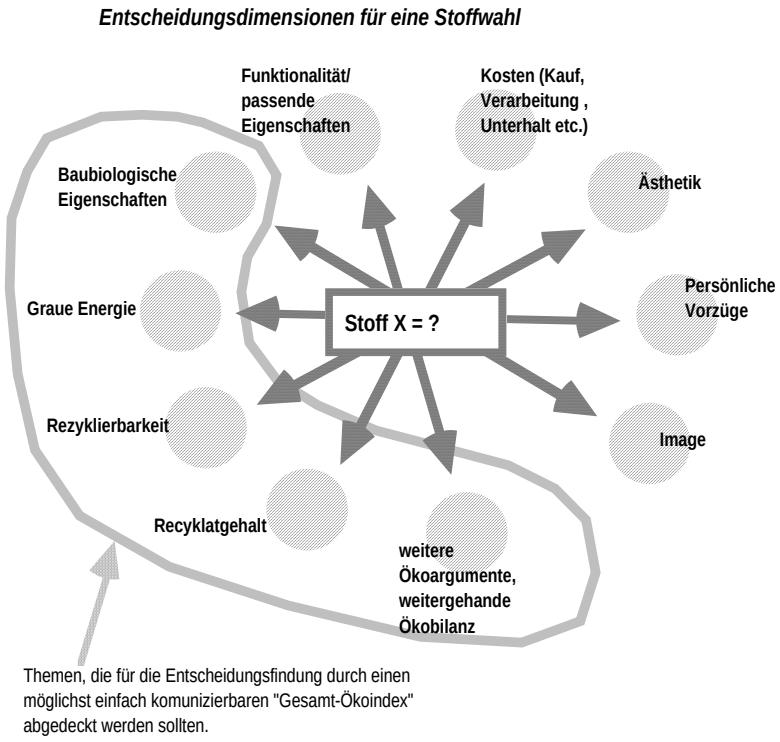


Abb. 1 Kriterien der Baustoffbeurteilung

2. Einleitung

2.1. Bauabfallmengen in der Schweiz

Als Bauabfälle werden alle Abfälle bezeichnet, die bei Bautätigkeiten (Erstellung, Renovation, Abbruch) anfallen. Im umfassenden Sinne sind dabei auch alle Tiefbauabfälle (sauberer Aushub, Strassenaufbruch, Tunnelausbruch etc.) mitgemeint.

Die Abfallmengen sind im Baubereich nur ungenau bekannt. Teilweise existieren keine separaten Erfassungen bei Entsorgungsanlagen, Angaben zu Aushubmengen fehlen ganz. In der Schweiz fielen zu Beginn der 90er ca. 7 Mio. Tonnen Bauabfälle pro Jahr (ohne Aushub) an [IP Bau 1991, p.15f.]. Diese Mengen übertreffen die Siedlungsabfallmengen von ca. 2.5 Mio. Tonnen pro Jahr. Aus dem Hochbau stammen rund 4.4 Mio Tonnen. Ca. 4 Mio. Tonnen sind weitgehend inerter oder relativ unproblematischer Bauschutt, welcher direkt verwertet oder als Inertstoff deponiert werden kann. Rund 3 Mio. Tonnen sind vermischte Baustellenabfälle (Bausperrgut), welche erst sortiert werden müssen. Ca. 0.5 – 0.8 Mio. Tonnen sind brennbare Abfälle, die nicht auf Inertstoffdeponien – und ab 1.1.2000 auch nicht auf Reaktordeponien – abgelagert werden dürfen [IP Bau 1991, p.15f.]. Ca. 0.23 Mio. Tonnen brennbare Abfälle werden wild entsorgt (verbrannt oder deponiert).

Verwertung: Nach Angaben des BUWAL für 1996 wurden von ca. 3 Mio. Tonnen Hochbauabfällen nur 150'000 Tonnen (5%) einer stofflichen Verwertung zugeführt. Daneben wurden 200'000 Tonnen (7%) in KVAs verbrannt und dadurch teilweise energetisch genutzt [BUWAL 1999].

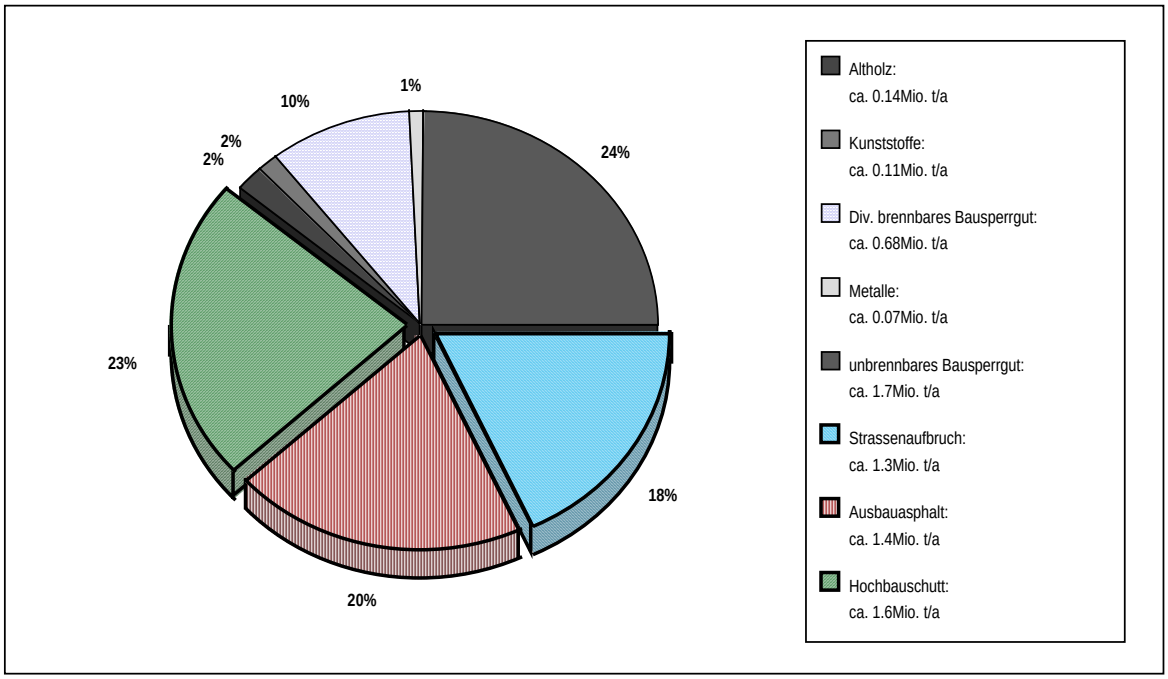


Abb1b. Schätzung der jährlichen Bauabfallmengen in der Schweiz (ohne Aushub). Nach [IP Bau 1991, p.15f.]

2.2. Einige Angaben zur Schweizer Bauwirtschaft

2.2.1. Bauwirtschaft

Die totalen Bauausgaben haben sich seit 1990 verflacht bzw. sind seither tendenziell leicht rückläufig. Die totalen Bauausgaben betragen 41 Milliarden Franken (1998) [BfS 1999].

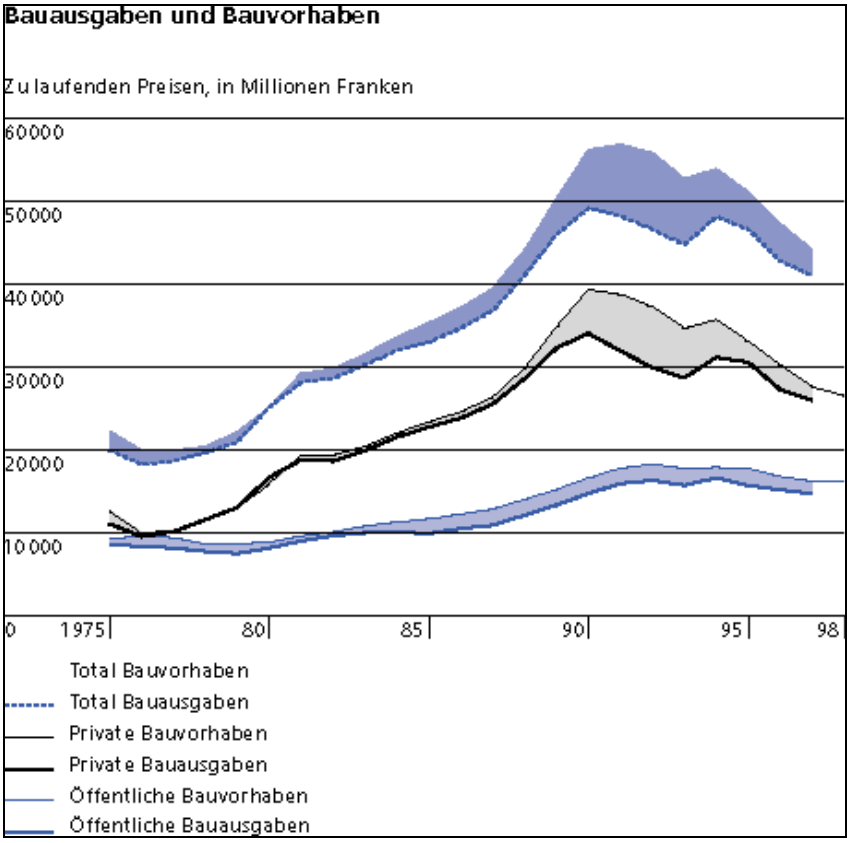


Abb. 2 *Öffentliche und private Bauvorhaben und Bauausgaben in der Schweiz in Millionen Franken [BfS 1999].*

2.2.2. Wohnbauten

Wohngebäudebestand nimmt stetig und fast linear zu, d.h. die Reinzugänge sind etwa konstant. In den letzten Jahren sind mehr Umbauten und weniger Abbrüche zu verzeichnen. Der Gesamtbestand betrug 3.474 Millionen Wohnbauten (1997) [BfS 1999]. Die Zuwachsrate beträgt durchschnittlich rund 1.3%.

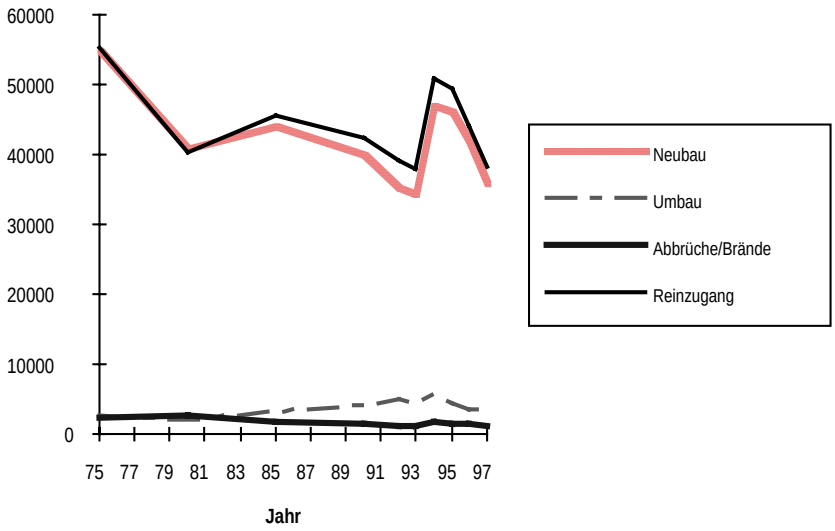


Abb. 3 Entwicklung der Zu- und Abgänge bei den Wohnbauten in der Schweiz [BfS 1999]

2.3. Entsorgungsweg von Gebäuden

Der Entsorgungsweg von Gebäuden gliedert sich in drei Phasen:

1. Gebäude-Abbruch

Dies bezeichnet den Rückbau bzw. Zertrümmerung des Gebäudes am Gebäudestandort. Hier wird wesentlich entschieden, welche Schicksalsgemeinschaften von Baumaterialien sich bilden. Bereits hier können beispielsweise durch ein Mehrmuldenkonzept und Handsortierung wichtige Sortierleistungen im Entsorgungsweg erbracht werden. Noch bessere Sortierung wird durch einen gezielten Rückbau erreicht. Bei der Wiederverwendung von intakten Bauteilen z.B. auf einer Bauteilbörse[1] kann auch hier bereits der Abfallanfall reduziert werden.

2. Abfall-Sortierung

Je nach gewähltem Entsorgungsweg stellt dies einen fakultativen aber zunehmend gebräuchlichen Schritt dar. Die beim Abbruch angefallenen Abfälle (überwiegend Muldengut) werden in spezialisierten Anlagen sortiert. Die resultierenden Sortiergüter sollen verwertbar sein (Recycling, Downcycling, energetische Verwertung) oder in eine Entsorgunganlage überführt werden können (Inertstoffdeponie, Reststoffdeponie, Reaktordeponie, KVA). Die Sortierung kann in feststehenden Anlagen oder durch mobile Anlagen am Gebäudestandort selbst erfolgen.

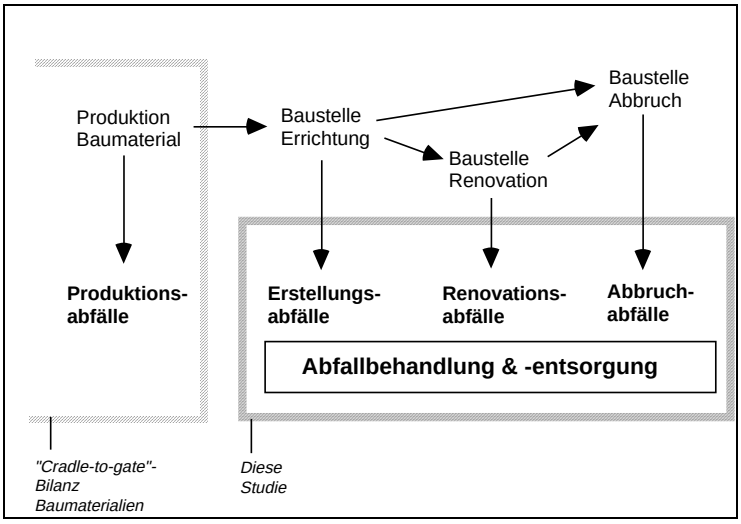
3. Abschliessende Entsorgung oder Wiederverwertung

Als letzter Schritt werden die soweit als nötig isolierten Abfälle einer Wiederverwertung oder einer Entsorgung zugeführt. Im Falle der Entsorgung sollen die Entsorgungskanäle nicht mehr spezifisch an Bauabfälle angepasst sein, sondern üblichen Verfahren entsprechen. Hier werden nur noch wenige Sortierleistungen erbracht (z.B. Magnetabscheidung von Eisen aus KVA-Schlacke, Metallaussortierung auf Deponie)

---

1 Siehe z.B. die Schweizerische Bauteilbörse unter http://www.bauteilnetz.ch

2.3.1. Abgrenzung "Was sind Bauabfälle?"



Tab. 1 Darstellung der in dieser Studie betrachteten Bauabfälle.

In der vorliegenden Studie werden Abfälle, die auf Baustellen im Hochbau entstehen und deren Behandlung ökologisch bilanziert. Unterschieden werden **Erstellungsabfälle**, die bei der Neuerrichtung eines Gebäudes anfallen, **Renovationsabfälle** aus der Unterhaltsphase des Gebäudes und **Abbruchabfälle** vom Ende des Gebäude-Lebensweges.

Diese Angaben sollen Bilanzen der Herstellung von Baumaterialien ergänzen, die meist zur ökologischen Beurteilung von Konstruktionen herangezogen werden. Diese Baumaterialbilanzen sind bisher üblicherweise *"cradle-to-gate"*-Bilanzen. D.h. die Systemgrenzen dieser Bilanzen enden am Fabriktor und berücksichtigen nicht die Entsorgung von Baumaterialien nach deren Einsatz. Um Doppelzählungen zu vermeiden, sind Abfälle, die bei der industriellen Produktion der Baumaterialien entstehen (Produktionsabfälle) ausgenommen. Diese Abfälle müssen in der "cradle-to-gate"-Ökobilanz der Baumaterialien selbst berücksichtigt werden.

Unter "Bauabfällen" werden also "Bau*stellen*abfälle" verstanden und nicht alle auftretenden Arten von "Bau*material*abfällen". Dies deckt sich auch mit der üblichen Terminologie.

2.3.2. Nicht betrachtete Prozesse

Alternativen zu Abbruch

Es werden in der vorliegenden Studie nur Prozesse am Gebäude betrachtet, die zu Entsorgungsprozessen führen. Alternativen dazu (z.B. Umnutzung statt Abriss) werden hier nicht betrachtet. Im Einzelfall können solche Entscheidungen die Ökobilanz des Gebäudes wesentlicher beeinflussen (Lebensdauerverlängerung!) als die Entsorgungsvarianten.

Altlasten und Brandschutt

In dieser Arbeit und der zugrundeliegenden Ökobilanz-Datenbank werden seltene Unfälle nicht in die Analyse einbezogen. Das Ziel ist es, den *üblichen* Ablauf von Prozessen zu beschreiben. Ökologische Auswirkungen von seltenen Unfällen wären im Rahmen einer parallel durchzuführenden Risikoanalyse zu untersuchen.

In diesem Sinn wird die Entsorgung von *Altlasten*, kontaminierten Industrie- und Gewerbebauten und *Brandschutt* hier nicht betrachtet. Die Brandhäufigkeit bei Bauten in der Schweiz beträgt ca. 1 Brand pro 10'000 Gebäude pro Jahr. Brandschutt kann durch Kontamination mit PAKs und Dioxinen zu Sondermüll werden. Zur Illustration wird hier eine Auswahl möglicher Brandgase verschiedener Baumaterialien aufgeführt [nach Rentz et al. 1997, p.53].

Brandgase verschiedener Baumaterialien

Organische Stoffe: Kohlenmonoxid, Kohlendioxid
Holz: Phenol, Kresol, Guajacol
Zellulose: Acrolein, Formaldehyd, Acetaldehyd, Aceton, Ameisen- und Essigsäure,
Harnstoff-Formaldehyd-Harze: Ammoniak
Chlorhaltige Substanzen: Chlorwasserstoff
Bromhaltige Substanzen (z.B. Flammschutzmittel): Bromwasserstoff, Bromierte Aromaten (Bemzole, Phenole, Biphenyle, Furane)
Polyurethan (PU): Isocyanate
Polyvinylchlorid (PVC): Polychlorierte Dioxine und Furane (PCDD, PCDF)
Polyethylen (PE): Acrolein, Ketone, Xylol, Styrol
Polypropylen (PP): Acrolein, Aldehyde, Ketone, Ameisen- und Essigsäure, Styrol, Naphtaline
Polystyrol (PS): Styrole, Xylole, Naphtaline, Benzaldehyd, phenylsubstituierte Verbindungen
Polyamid: Cyanwasserstoff (Blausäure), Ammoniak, Nitrile, Amine, Amide, Aldehyde, Ketone, Styrole, Mono- und Dicarbonsäure, Phenanthren, Naphtaline
Polyester: Aldehyde, Ketone, Styrole, Benzaldehyd

Die illegale, wlde Verbrennung als Entsorgungsweg wird in der vorliegenden Studie beleuchtet siehe Kapitel 8.1.10 "Wilde Verbrennung").

Nicht mehr aktuelle Baustoffe

Die hier erarbeiteten Grundlagen sollen für die approximative Beurteilung der Entsorgung von *geplanten* – und nicht von bestehenden – Gebäuden verwendet werden. Einzelne Problemkreise, die zwar heute bei der Entsorgung von Bauabfällen auftreten, aber bei den heute verarbeiteten Materialien keine Rolle mehr spielen dürften, werden deshalb nicht beleuchtet (z.B. ozonzerstörende FCKW in Schaumstoffen (heute verboten), stark PAK-haltige Teerbeläge (heute Asphalt-Alternativen), quecksilberhaltige Sportplatzbeläge wie Tartan, PCB-haltige Dichtungsmassen wie Thiokol etc.).

Gewerbe- und Industriebauten benötigen Baustoffe, die teilweise stark von üblichen Baustoffen abweichen (spez. Belastungen, Dauerfeuchtbereiche, Chemikalienresistenz). Die hier erhobenen Daten gelten in erster Linie für Wohn- und Dienstleistungsbauten.

Abfälle aus anderen Produkte-Lebenszyklen

Vorgängig zum Abruch von Gebäuden findet meist eine Entrümpelung statt, in der alle nicht befestigten Einrichtungsgegenstände wie z.B. Mobiliar, Teppiche, Vorhänge, Küchengeräte etc. entfernt werden. Die Entsorgung dieser Materalien wird nicht zu den Entsorgungsprozessen des Gebäudes gezählt. Die Abfälle können zwar zeitgleich entstehen und können daher bei der Entsorgungsplanung eine Rolle spielen; sie werden hier aber nicht als zum Gebäude zugehörig verstanden. Dies gilt für alle Gegenstände, die unabhängig vom Gebäude ausgetauscht werden können.

Abfälle aus der Herstellung von Baustoffen

Abfälle, die bei der industriellen Herstellung von Baumaterialien anfallen müssen in der *"cradle-to-gate"* Bilanzierung von berücksichtigt werden. Hier werden wie bereits erwähnt nur Abfälle betrachtet, die auf einer Baustelle entstehen.

2.4. Charakteristik von Bauabfällen

Bauabfall

In diesem Kapitel wird der Begriff "Bauabfall" genauer beschrieben und und differenziert. Als Oberbegriff kann der Ausdruck "Bauabfall" oder genauer "Baustellenabfall" gelten. Dieser umfasst alle Abfälle, welche auf einer Baustelle anfallen.

Die Bauabfälle können gemäss ihrer **zeitlichen Entstehung** innerhalb des Lebenszyklusses eines Gebäudes unterschieden werden.

wärend der Erstellung des Gebäudes: **Erstellungsabfälle**

während Unterhalts-/Renovationsarbeiten: **Renovationsabfälle**

aus dem Rückbau oder Abbruch des Gebäudes: **Abbruchabfälle**

Die Bauabfälle können auch gemäss ihren **Entsorgungskanälen** unterschieden werden. Daraus sind Begriffe wie "Bausperrgut", "Bauschutt" und "brennbare Bauabfälle" abgeleitet. Das Muldenkonzept des Schweizerischen Baumeisterverbandes (SBV) operiert mit der Zugehörigkeit zu einem Entsorgungkanal (s. Kapitel 6.2).

Schicksalsgemeinschaften im Bauabfall

Unter **Schicksalsgemeinschaften** [2] (SG) werden in der vorliegenden Arbeit Verbunde von verschiedenen Baumaterialien verstanden, die auf dem Entsorgungsweg zusammen behandelt werden, da sie durch die angewendeten Technologien nicht getrennt werden. Schicksalsgemeinschaften können je nach Abbruch- und Sortiertechnologie im Laufe des Entsorgungsweges auch (teilweise) aufgelöst werden. Beispiele sind: Armierungseisen in bewehrtem Beton, Kartonkaschierung von Gipskartonplatten, EPS in Leichtputz.

Durch das Erkennen von Schicksalsgemeinschaften können **Mitnehmereffekte** bei der Entsorgung erst modelliert werden. Dies ergibt eine detailliertere Modellierung, als die bisher übliche, idealisierte Annahme, dass alle entsorgten Baumaterialien stofflich rein anfallen. Durch Mitnehmereffekte gerät ein Teil der Baumaterialien in ungeeignete Entsorgungskanäle. Dies kann gegenüber dem idealisierten Modell zu höheren Belastungen führen

---

2 Die Wahl des Begriffes ist diskutabel, trifft aber den Kern der Sache. Begrifflich verwandte Wörter sind: Verhängnis, Fügung, Bündnis, Verband, Zusammenschluss. Aus der Petrographie stammt der verwandte Begriff "Phasenvergesellschaftung" für den Zusammenschluss verschiedener Stoffe (Phasen) [Zeltner 1998, p.196]. Der Begriff "Verbund(material oder -stoff)" ist hier irreführend, da nicht nur kommerzielle Verbund- oder Kompositmaterialien (z.B. Glasfaserkunststoff) bezeichnet werden sollen.

Schicksalsgemeinschaften bestehen nicht a priori, sondern sind abhängig von der angewendeten Technologie. Sie bilden sich bei der Entsorgung eines Gebäudes in Abhängigkeit der angewendeten Abbruch- und Sortiertechnologie. Einige Abbruch- und Sortiertechnologien sind imstande, gewisse Schicksalsgemeinschaften gar nicht erst entstehen zu lassen oder nachträglich aufzutrennen. Schicksalsgemeinschaften können also nur im Zusammenhang der behandelnden Abbruch- und Sortiertechnologien aufgezeigt werden.

Verbunde und Gemenge

Bei Schicksalsgemeinschaften können Verbunde und Gemenge unterschieden werden.

Bei **Verbunden** besteht eine feste, meist physikalische Verbindung zwischen zwei Stoffen (z.B. Holzschutzbehandlungsmittel im Holz).

Gemenge sind demgegenüber lediglich Mischungen von Baustoffen ohne feste Verbindung, aber mehr oder weniger starker Durchmengung (z.B. Backsteinstaub in Steinwolle, ein Stück Dachpappe im Bausperrgut).

Verbunde

Es können zwei Grundtypen von Verbunden unterschieden werden:

Oberflächenverbunde: Baumaterialien, die schichtenweise oder an Kontaktstellen zusammengefügt wurden, evt. unter Zuhilfenahme eines Klebstoffes. Z.B. Tapete auf Wand, PUR-Schaum in Hohlräumen, Gummiprofil in Fensterrahmen, Anstriche.

Volumenverbunde: Die Materialien der Schicksalsgemeinschaften stossen nicht lediglich an Oberflächen zusammen, sondern durchdringen einander oder Bilden eine eigentliche Mischung. Z.B. Armierungsstahl in Beton, Holzimprägnierung, Styroporanteil in Leichtbeton.

Die Grenzen zwischen diesen Bezeichnungen sind fliessend. Ein Mepla-Rohr (Rohr aus Kunststoff/Aluminum-Verbund) ist beispielsweise schwer einem der Begriffe zuzuordnen.

Es ist anzunehmen, dass die Trennung von Volumenverbunden tendenziell komplizierter oder aufwendiger ist, als die Trennung von Oberflächenverbunden. Dies hängt jedoch stark von den beteiligten Materialien ab.

Bei der Trennung von Oberflächenverbunden können, wie in der Abbildung unten gezeigt, mehr oder weniger grosse Verunreinigungen auf den Oberflächen beider Materialien verbleiben. Tritt dieser Effekt nicht auf, gibt es keinen Grund von Verbunden zu sprechen.

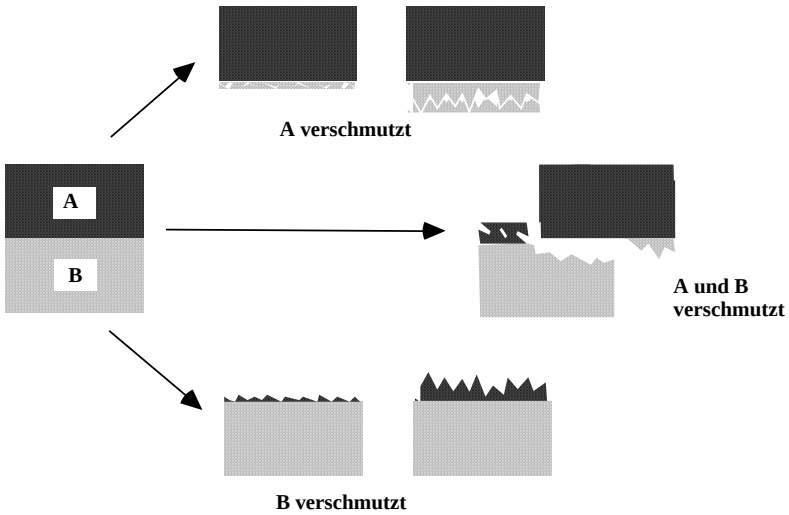


Abb. 4 Trennungs-Charakteristik von Oberflächenverbunden

Gemenge

Baumaterialien, die lediglich zusammen entsorgt werden, aber keine physikalische Verbindung aufweisen und daher keinen Verbund bilden, werden hier als **Gemenge** bezeichnet.

Ein Beispiel sind kleinere Holz- oder Stahlteile, die in eine Bauschuttmulde geworfen werden und dadurch in einer Inertstoffdeponie entsorgt werden.

Bezeichnung	**Volumenverbund**	**Oberflächenverbund**	**Gemenge**
Art der Verbindung	fest	fest	lose
Aussmass der Verbindung	durchdringend	oberflächlich	durchdringend

Tab. 2 Typen verschiedenener Schicksalsgemeinschaften

Dissipative und kompakte Gemenge

Mögliche Begriffe, die die Bestandteile von Gemengen charakterisieren, sind **dissipativ** (im Sinne von "sich verteilend") und **kompakt** (im Sinne von "festgefügt", "eine Einheit bildend"). Dissipative Abfälle sind zum Beispiel Putze, die sich während des Abbruchs mit anderen Anfällen relativ gut vermischen können. Dagegen bleibt z.B. ein Fensterrahmen gewöhnlich sogar im schlechtesten Fall ganz und kann relativ gut erkannt und abgetrennt werden.

Dissipative Abfälle können feine Gemenge erzeugen, die schwer zu trennen sind. Kompakte Abfälle sind dagegen auch in Gemengen gut erkennbar und können relativ leicht separiert werden.

3. Empfohlenes Vorgehen zur Baumaterial-Bilanzierung

3.1. Bauabfälle aus Lebenszyklusmengen

Bei der Bilanzierung von Gebäuden, Gebäudeteilen und Wandkonstruktionen wird oftmals nur die *im Bau verbleibende* Baumasse b_i erfasst (z.B. kg Putz pro m^2 Wand). Daneben wird meist auch die *unterschiedliche Lebensdauer* von Baumaterialien t_i berücksichtigt, um Lebenszyklus-Mengen zu erhalten. Zur Feststellung der effektiven Lebenszyklusmengen sind aber auch auf der Baustelle anfallende *Verschnitte und Resten* v_i zu berücksichtigen, die je nach Material im Bereich von bis zu 15% bezogen auf den Bruttoinput liegen können. In Abhängigkeit der angenommenen Standdauer der gesamten bilanzierten Einheit berechnen sich daraus die gesamthaft anfallenden Abfallströme von Baumaterialien.

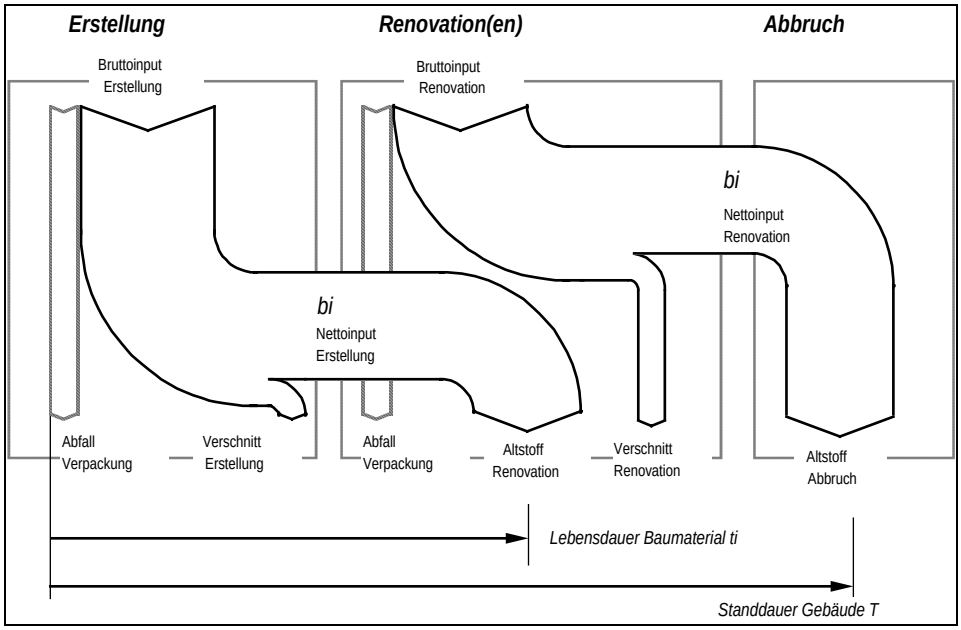


Abb. 5 Schematischer Stoffffluss eines Baumaterials während des Gebäudelebenszykluses

b_i die in einer Konstruktion enthaltene Menge eines Baumaterials *i*

t_i die Lebensdauer des Materials *i*

v_i der typische, spezifische Verschnitt beim Einbau des Materials *i* (Verschnitt-Menge / angelieferte Menge)

T Standdauer der gesamten bilanzierten Einheit (Gebäude/Konstruktion)

	Bruttoinput Neubaustoffe	*Output Verschnittabfall*	*Output Altstoffe*
Erstellung	Bruttoinput Erstellung: $b_i / (1-v_i)$	Verschnittabfall Erstellung: $b_i / (1/v_i - 1)$	–
Renovation(en)	Bruttoinput Renovation: $(T / t_i -1) * b_i / (1-v_i)$	Verschnittabfall Renovation: $(T / t_i -1) * b_i / (1/v_i - 1)$	Altstoffabfall Renovation: $(T / t_i - 1) * b_i$
Abbruch	–	–	Altstoffabfall Abbruch: b_i
Summe	$(T / t_i) * b_i / (1-v_i)$	$(T / t_i) * b_i / (1/v_i - 1)$	$(T / t_i) * b_i$

Tab. 3 *Bruttoinput Baustoffe, Verschnittabfall und Altstoffabfall. Mengen aus Erstellung, Renovatione(en) und Abbruch.*

In der vorliegenden Studie werden die Entsorgungskanäle von Erstellungsabfällen, Renovationsabfällen und Abbruchabfällen gesondert bilanziert. Verschnitte aus der Erstellungsphase eines Gebäudes (Erstbau) gelangen in die Entsorgung der Erstellungsabfälle, Verschnitte aus der Renovationsphase eines Gebäudes werden dagegen als Renovationsabfälle entsorgt.

Als Bauabfälle treten mitunter auch Materialien auf, welche nicht als Baustoffe gelten. Dies sind insbesondere *Verpackungsmaterialien* und *Hilfsstoffe*. Die mit den Neubaustoffen angelieferten Verpackungsmaterialien werden als Erstellungs- oder Renovationsabfälle entsorgt. Sind die spezifischen Verpackungsmengen s_{ij} bekannt, lassen sich in Abhängigkeit der insgesamt eingesetzten Baustoffe die Verpackungsabfälle berechnen.

s_{ij} spezifische Verpackungsmenge aus Stoff *j* (z.B. Karton, PE oder Holzpalette) für Baumaterial *i*

	Nettoinput Neubaustoffe	*Output Verpackungsabfall*
Erstellung	Nettoinput Erstellung: $b_i / (1-v_i)$	Verschnittabfall Erstellung: $b_i / (1-v_i) * s_{ij}$
Renovation(en)	Nettoinput Renovation: $(T / t_i -1) * b_i / (1-v_i)$	Verschnittabfall Renovation: $(T / t_i -1) * b_i / (1-v_i) * s_{ij}$

Tab. 4 *Nettoinput Baustoffe und Verpackungsabfall. Mengen aus Erstellung und Renovation(en).*

4. Systemgrenzen der Bilanzierung

Entsorgungsprozesse, welche eine Verwertung der entstehenden Output-Produkte erlauben, nehmen in der Bilanzierung von Lebenszyklen eine spezielle Stellung ein. Einerseits stellen sie das Ende des Lebenszykluses eines Altproduktes dar; zum anderen sind sie der Anfang eines Neuproduktes aus Sekundärmaterial. Es stellt sich die Frage wie die Aufwendungen der Sammlung, Sortierung, Aufbereitung und der dazwischenliegenden Transporte den entsorgten Altprodukten resp. den hergestellten Neuprodukten angelastet werden soll. Weiteres zur methodischen Behandlung von Recycling in Ökobilanzen im Kapitel "Bewertung von Recycling in Ökobilanzen". Im Bereich der Entsorgung von Bauabfällen sind folgende Vorgehen denkbar.

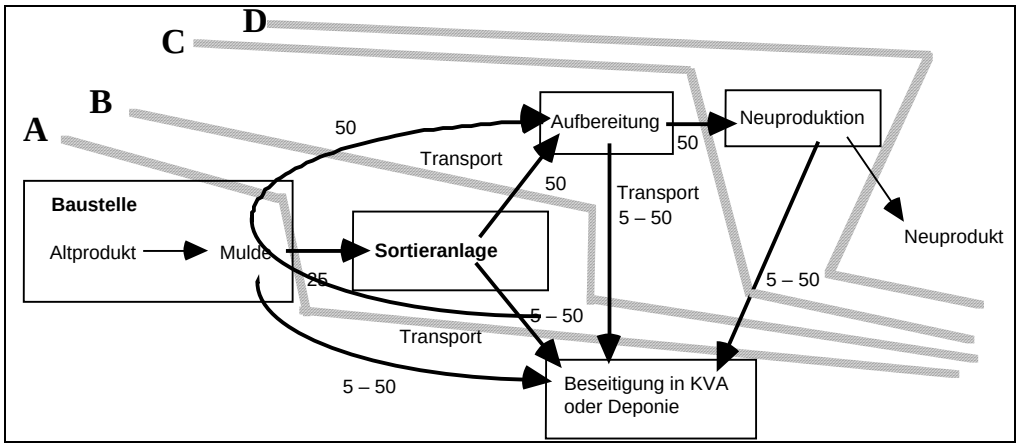


Abb.5b *Mögliche Stationen und Wege bei der Entsorgung eines Baustoffes, Zahlen geben die geschätzte Transportdistanz an.*

Systemgrenze A Nur der direkte Weg zu einer Beseitigung und die Beseitigung selbst werden zum Altprodukt gezählt. Die Sortierung, der Transport zur Sortierung und die Verwertung werden vollständig dem Neuprodukt angelastet.

Systemgrenze B Aufwendungen in der Sortieranlage und die entsprechenden Transporte werden zum Altprodukt gezählt. Die Weiterverarbeitung der verwertbaren Materialien aus der Sortierung werden dem Neuprodukt angelastet.

Systemgrenze C Die Aufbereitung des aussortierten Roh-Sekundärstoffes (Reinigung, Vorbereitung zur Produktion) und die daraus entstehenden Abfälle werden dem Altprodukt angelastet. Dies scheint dann gerechtfertigt, wenn der aufzubereitende Altstoff keinen Marktwert besitzt, d.h. ein unwillkommener Abfall ist und erst durch die Aufbereitung einen positiven Marktwert erlangt.

Systemgrenze D Auch Abfälle aus der Neuproduktion (Einsatz des Sekundärstoffes) werden noch dem Altprodukt angelastet. Diese eher extreme Ansicht würdigt die Tatsache dass Altstoffe wensentlich verschmutzter sein können als Primärrohstoffe. Die Verschmutzungen die noch aus dem Produktlebenszyklus des Altstoffes stammen sollen auch diesem angelastet werden.

Geeignete Allokationsansätze würden erlauben die Aufwendungen z.B. in der Aufbereitung auf Neu- und Altprodukt zuzuordnen. Siehe dazu das Kapitel 5.1 "Wiederverwendung und -verwertung in Ökobilanzen".

4.1. Systemgrenze Sortieranlage

Gehört die Sortieranlage zum Ende der Prozesskette eines Altstoffes oder zum Anfang einer anderen Prozesskette, nämlich derjenigen des erzeugten Sekundärmaterials, welches zu neuen Produkten verarbeitet wird? Heute wird nur sehr wenig Material aus den Sortieranlagen auch tatsächlich zu neuen Wertstoffen verarbeitet. Sortieranlagen werden in erster Linie betrieben, um Deponiequalitäten einhalten zu können und Entsorgungskosten zu sparen. Vor diesem Hintergrund können Sortieranlagen als Teil der Entsorgungsprozesse, die einem Altprodukt zugerechnet werden müssen, gesehen werden. Dies gilt in besonderem Mass für Abfälle, die auch nach der Sortierung beseitigt werden müssen.

In der vorliegenden Studie wird Systemgrenze B angewendet. Die Sortierung von Bauabfällen wird noch dem Altprodukt zugeordnet. Die bei der Sortierung als **nicht verwertbare Fraktionen** ausgeschiedenen Stoffe und deren Entsorgung werden **vollständig den Altprodukten angelastet** (z.B. Deponierung von Glasfasern aus armierten Gipsplatten).

Bei Stoffen von denen mit gutem Grund angenommen werden kann, dass sie zu einem hohen Anteil verwertet werden (z.B. von Metallen) könnte hingegen ein Teil oder der ganze Aufwand in der Sortieranlage bereits zum neuen Produktzyklus gerechnet werden (Systemgrenze A). Klärend kann in diesem Fall sein, ob die aussortierten Sekundärstoffe einen positiven Marktwert besitzen. Allenfalls ist aber auch hier der Transport von der Baustelle zur Sortieranlage noch der Entsorgung der Altstoffe anzulasten. Da diese Unterscheidung nicht einfach zu machen ist und eine gewisse Subjektivität beinhaltet (ab wann ist ein Altstoff ein begehrter Wertstoff?), wird an der Systemgrenze B festgehalten.

4.2. Bilanzannahmen

Bei der Bilanzierung wird vom Mehr-Muldenkonzept für Bauabfälle des Schweizerischen Baumeisterverbandes (SBV) ausgegangen. Die Bauabfälle werden noch *auf der Baustelle* nach Möglichkeit triagiert und in entsprechende Mulden (Verwertung, Bauschutt, RD-Gut, Brennbares, Metalle, Sondermüll etc.) zugeteilt. Es werden prinzipiell Entsorgungen mit bzw. ohne (stofflicher) Verwertung unterschieden (Entsorgungsoptionen ab Baustelle). Bei Renovationsabfällen wird aus Platzgründen von nur einer oder zwei Mulden für Bauschutt/-sperrgut ausgegangen und einer entsprechend kleinen Verwertungsquote für nichtmineralische Abfälle. Bauschutt und Bausperrgut werden in stationären Sortieranlagen trocken aufgetrennt. Die aussortierten mineralischen Grobfraktionen werden *in jedem Fall* einer Verwertung zugeführt – d.h. auch wenn eine nicht-verwertende Entsorgungsoption ab Baustelle gewählt wurde, können die Sortieranlagen doch einen Teil der Abfälle einer Verwertung zuführen. Aussortierte brennbare Reststoffe werden in einer KVA verbrannt.

Die Annahmen der Bilanzierung sind im Bezug auf die *heutige* Situation optimistisch. Da die Inventare aber für *künftig* anfallende Bauabfälle gelten sollen, werden dadurch Verbesserungen in der Bauabfallbehandlung berücksichtigt. Prognosen über die künftige Entwicklung existieren nicht, da selbst die statistische Erfassung der gegenwärtigen Situation mangelhaft ist.

	heute	*wahrscheinliche künftige Tendenz*	***diese Studie***
Verwendung von Sortiergut	va. Deponierung	Zunahme der Verwertung	Mineralische Stoffe werden **grösstenteils verwertet**, die Feinfraktion deponiert, Brennbares verbrannt
Brennbare Abfälle	46% wilde Entsorgung	Eindämmung der wilden Entsorgung	**keine wilde Entsorgung** anschliessend an gängige Entsorgungskanäle (Mulden, Sortieranlagen)
Sortiertechnologie	mobile, semi-mobile und stationäre Sortieranlage trocken	Verfahrensverbesserung zur Qualitätssteigerung der Sekundärrohstoffe, Vermutlich mehr nasse Verfahren, eher Zulieferbetrieb als Abfallbehandlung	**stationäre Sortieranlage trocken**

4.3. Systemgrenzen Wiederverwendung

Die Wiederverwendung ganzer, intakter Bauteile ist eine attraktive Entsorgungsoption im Sinne der Abfallvermeidungs-Strategie. Bei Einsatz als Produkt mit identischer Funktionalität entspricht die Wiederverwendung einer *Verlängerung der Lebensdauer* des Produktes. Wiederverwendbare Bauteile sind z.B. Türen, Geländer, Sanitäreinrichtungen, Backsteine, Holzbalken (s. Anhang A). In der Ökobilanz können die Aufwendungen für die Wiederverwendung (Transport, Reinigung/Aufbereitung) dem bedienten Folgeprodukt angelastet werden. Allenfalls ist denkbar, dass gewisse Entsorgungsaufwendungen, die sich bei der Wiederverwendung ergeben, dem Vorprodukt belastet werden. So zum Beispiel die Entsorgung von abgelaugten Altanstrichen bei der Wiederverwendung von Metallteilen. Oder die Entsorgung von Altmörtel bei der Wiederverwendung von Backsteinen.

4.4. Überblick Systemgrenzen

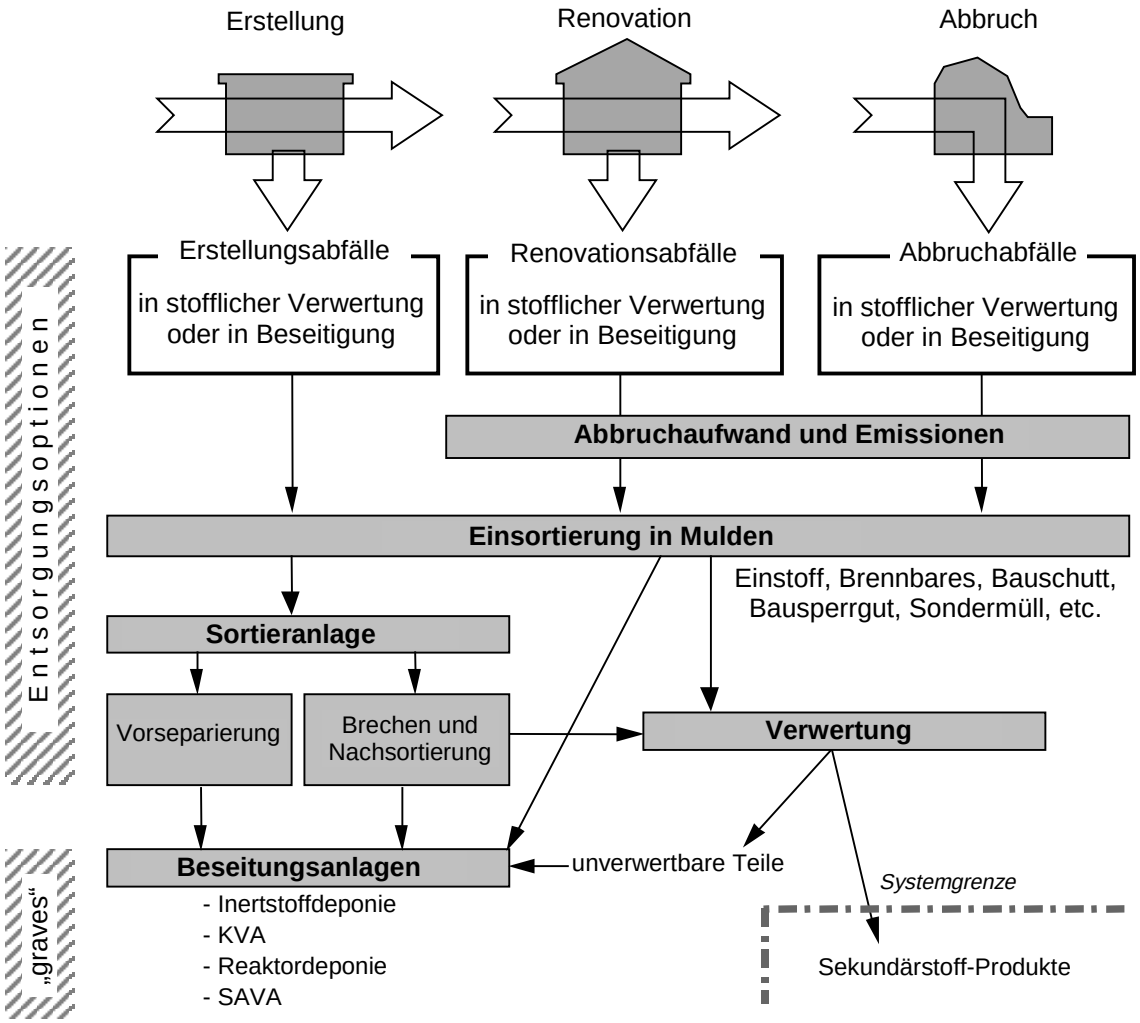


Abb.5c *Struktur der berücksichtigten Entsorgungsprozesse von Bauabfällen.*

4.4.1. Zusammenfassung Systemgrenzen

Die Baustellenabfälle werden unterteilt in Erstellungsabfälle, Renovationsabfälle und Abbruchabfälle. Erstellungsabfälle sind (unverbaute) Resten und Verschnitte. Bei Renovations- und Abbruchabfällen wird je nach Material eine Abbruchenergie und eine PM_{10}-Partikelemission inventarisiert. Für jede Abfallsorte ist wählbar, ob sie in Beseitigungskanäle gelangen soll oder in Verwertungskanäle. Dies beeinflusst die Einsortierung in Abfallmulden und die spätere Behandlung des Abfalls. Die Einsortierung in Mulden richtet sich nach den Richtlinien des Schweizerischen Baumeisterverbandes (SBV). Für Mischabbruch, Bausperrgut und Bauschutt wird eine Sortierung zwingend angenommen. Andere genügend einheitliche Muldeninhalte können direkt einer Verwertung oder Beseitigung zugeführt werden. Direkt oder nach einer Sortierung verwertbare Abfälle werden entsprechend bilanziert. Bei der Verwertung anfallende, nicht-verwertbare Teile aber werden noch der Bilanz der Baustoff-Entsorgung angerechnet. Nicht verwertbare Teile gelangen in Beseitigungsanlagen wie Deponien oder Verbrennungsanlagen.

Die Daten-Struktur des Inventars ist in den vertikalen Bezeichnungen links wiedergegeben. Die Prozesse in den Beseitigungsanlagen sind in separaten Datenmodulen ausgewiesen ("graves"). Die vorgelagerten Prozesse und die Bezüge zu den "graves" sind in separaten Datenmodulen

enthalten (Entsorgungsoptionen), welche Namen mit der Struktur "> ABFALL_XY: ER RE AB in Beseitigung" resp. "> ABFALL_XY: ER RE AB in stoffl. Verwertung" tragen [3].

[3] ER = Erstellungsabfälle, RE = Renovationsabfälle, AB = Abbruchabfälle

5. Methodisches zu Recycling

5.1. Wiederverwendung und -verwertung in Ökobilanzen

Wie kann Recycling in Ökobilanzen berücksichtigt werden? Hier wird die Frage v.a. im Zusammenhang mit Produkteökobilanzen für Standard-Dateninventare erörtert. Bei Prozessvergleichen für Investitionsentscheide (z.B. stoffliche vs. energetische Verwertung) oder Betriebs-Ökobilanzen können weitere methodische Aspekte wichtig werden.

5.1.1. Bisherige Methoden

Fallen in einem Prozess verwertete/verwertbare Abfälle an, so soll dies in einer Ökobilanz unterscheidbar vom Anfall nicht verwertbarer Abfälle sein. In der Bilanzierungspraxis gibt es dazu verschiedene Methoden, die hier vorgestellt werden sollen.

Methode ISO-1: Erweiterung der Systemgrenzen

Die Grenzen der Bilanzierung können erweitert werden, sodass nicht nur ein Lebenszyklus eines Produktes A bilanziert wird, sondern auch dessen Rezyklierung nach Gebrauch (statt einer Beseitigung). Dies ist die prioritär anzuwendende Methode bei Koppelprozessen nach ISO 14042.

Es ist hierbei zu beachten, dass sich die *funktionale Einheit* durch Einbezug des Recyclings *ändert*. Die Bilanzeinheit umfasst nach Erweiterung der Systemgrenzen den Lebenszyklus des Primärproduktes A *sowie* die Bereitstellung eines Sekundärrohstoffes aus A. Wird eine solche Bilanz mit einem anderen (nicht rezyklierten) Produkt B verglichen, ist darauf zu achten, dass die funktionale Einheit dieselbe ist. Die Bilanz von B ist *zusätzlich* mit der Bilanz der Herstellung eines dem Sekundärprodukt aus A vergleichbaren Materials zu ergänzen. Die Wahl des vergleichbaren Materials kann mehr oder weniger subjektiv ausfallen und ist daher kritisierbar.

Die Anwendbarkeit dieser Methode ist beschränkt. Insbesondere führt die Vergrösserung der funktionalen Einheit zu schwer kommunizierbaren "Konglomeraten". Die konsistente Weiterverwendung mehrerer solchermassen bilanzierte Prozesse wird sehr schnell verwirrend. Die Methode eignet sich daher nicht für Datenbanken mit Referenzdaten oder komplexe Prozessketten.

Methode ESU-ETH: 0% des Recyclings

In der Standard-Datenbank Ecoinvent der ETH Zürich wird bei Recyclingprozessen eine klare Abtrennung des Recyclingprozesses vorgenommen. D.h. die Aufbereitung des Altproduktes A wird vollständig dem daraus erzeugten Recyclatprodukt B angelastet. Allenfalls kann bei geringen Materialwerten der Transport zum Recyclingwerk dem Produkt A angelastet werden. Produkt A profitiert bei diesem Vorgehen davon, dass ihm keine Entsorgungsaufwendungen angelastet werden. Produkt B dagegen trägt zwar die vollen Recyclingaufwendungen. Diese sind aber - wenn Recycling ökologisch sinnvoll sein soll - kleiner als die Aufwendung für Entsorgung und Herstellung aus Neumaterial. Also hat auch Produkt B einen Vorteil.

Methode USA: 50% des Recyclings

Der Zustand des Altproduktes A beeinflusst die Aufwendungen, die beim Recyling zu einem verwertbaren Sekundärmaterial getrieben werden müssen. Es kann daher ungerecht erschienen den ganzen Reyclingaufwand nur dem Reyclatprodukt B anzulasten. Zum anderen richten sich die Anforderungen des Recyclingprozesses und damit die zu leistenden Aufwendungen an die Qualitätsansprüche des Produktes B. Ein pragmatischer, oft in der USA verwendeter Allokations-Ansatz "nullter Näherung" besteht darin, die Aufwendungen des Recyclings **zu je 50% beiden beteiligten Produkten** anzulasten. Dadurch werden die beiden Lebenszyklen von Produkt A und Produkt B vermischt, was einerseits in der Bilanz komplizierend wirkt, aber bei einem Kreislauf auch nicht anders zu erwarten ist [4].

Methode ISO-2: x % der Primäraufwendungen

Die ISO 14042-Norm sieht vor, die gesamten Aufwendungen für die Gewinnung und Aufbereitung von Primärmaterialien im Falle einer Kaskadennutzung des Materials **auf die verschiedenen Kaskadenstufen** (Produkte A, B, C, ... N, M, ... Y, Z) zu allozieren. Dies ist die in zweiter Linie anzuwendende Methode bei Koppelprozessen, wenn eine Erweiterung der Systemgrenzen nicht durchgeführt werden kann. Als Allokationsparameter soll ein **Qualitätsmerkmal des Materials** gewählt werden, das seine "Güte" d.h. technische Verwendbarkeit beschreibt. Ein Produkt N befinde sich z.B. irgendwo in der Mitte der Kaskade. Reduziert Produkt N während seines Lebenszyklus' die betrachtete Materialgüte, wird ihm ein entsprechender Teil der Primärmaterialaufwendungen angelastet.

Ein zwingend subjektiver, wertgeladener Schritt dieses Vorgehens ist dabei die schwierige und diskutable Wahl eines gerechten "Güte"-Parameters. Zum andern müssen in der Bilanz alle in der Kaskade beteiligten Produkte "voneinander wissen"

a) welches der verwendete Allokationsparameter ist, und

b) welches die aufzuteilenden Primärmaterialaufwendungen sind.

D.h. es muss vermieden werden, dass bei unabhängig voneinander erstellten Ökobilanzen Doppelzählungen oder "Nichtzählungen" entstehen. Das Vorgehen ist daher nur bei bereits gut etablierten, bekannten Kaskadennutzungen denkbar.

Weiter diskutabel dürfte bei mehrstufig aufbereiteten Primärmaterialien die Frage sein, wo die Primärmaterialaufbereitung endet und der Produktlebenszyklus des ersten Produktes A beginnt (z.B. bei Kunststoffen: soll bei der Erdöldestillation geschnitten werden, beim Cracking, bei der ersten Polymerisierung? Was soll passieren, wenn Produkt B ein direktes Polymer-Regranulat nutzt, Produkt C jedoch eine Monomerisation/Repolymerisation durchführt?).

Methode 100% der Primäraufwendungen

Eine vereinfachte, pointierte Variante des obigen ISO-Ansatzes besteht darin, bei einer Kaskadennutzung die gesamten Aufwendungen für die Gewinnung und Aufbereitung von Primärmaterialien ausschliesslich und vollständig dem **letzten Produkt Z der Kaskade** anzulasten. D.h. sofern ein Altprodukt noch (irgendwie) verwertbar ist, muss es keine Belastungen aus der Primärmaterialgewinnung tragen.

---

[4] Die meisten heute beschriebenen Lebens"zyklen" von Produkten müssen ja heute als lineare Ausschnitte aus einer zwar sehr vernetzt, aber stofflich hauptsächlich eingleisig operierenden Wirtschaft bezeichnet werden.

Der Ansatz ist elegant und relativ einfach in der Anwendung. Er betont stark den Aspekt der Ressourcenschonung, indem ein Produkt bestraft wird, welches keine Verwertung mehr zulässt d.h. wenn das Material der Ökonomie resp. der Anthroposphäre entzogen wird. Bei gut etablierten Kaskadennutzungen mit Materialien, die nur geringe Qualitätseinbussen erleiden, kann dieses Vorgehen sachgerecht sein. Häufiger dürfte aber der Fall sein, in dem die vorangehenden "Kaskadenpartner" zur *graduellen* Qualitätseinbusse des Materials beitragen und daher gerechterweise auch entsprechend belastet werden. Das Problem der Abgrenzung der Primärmaterialaufwendungen ist bereits oben erwähnt worden und trifft auch hier zu.

Diese 100%-Methode kann geeignet sein, um bei einem nicht kreislaufgerechten Prozess die entsprechende Schwachstelle aufzuzeigen. Bei Prozessen, die bereits aus Recyklaten produziert sind, sollten die Aufwendungen aus dem Recycling belastet werden. Dies führt dazu, dass das erste Produkt in der Kaskade *keine* Belastungen aus der Materialbereitstellung zu tragen hat (kein Rezyklatinput, Aufbereitung des Outputs zur Rezyklat wird dem Folgeprodukt belastet).

Gutschriften / Bonusvergabe für Recycling

Um den Anfall von verwertbarem Material in einer Ökobilanz zu berücksichtigen wird manchmal auch ein Bonus (Gutschrift) für dieses Material gewährt. Der Bonus besteht aus den Belastungen zur Herstellung einer dem verwertbaren Material äquivalenten Menge vergleichbaren Materials aus einer alternativen Quelle. Diese Belastungen werden in der Ökobilanz des Altprodukt-produzierenden Produktes *abgezogen*. So könnte zum Beispiel in einer Beton-Ökobilanz am Produktzyklusende anfallender Betonabbruch, der sich als Kiesersatz verwenden liesse, zu einer Gutschrift im Masse der Belastungen für den Abbau von natürlichem Kies führen.

Die Interpretation für dieses Vorgehen lautet: "Weil Produkt A auch noch x kg Rezyklat erzeugt, muss daher in einem andern Produkt nicht x kg *Neumaterial* verwendet werden, weil dafür das Rezyklat aus Produkt A eingesetzt werden kann. Würde Produkt A kein Rezyklat erzeugen, müsste dieses andere Produkt Neumaterial einsetzen". Das heisst die Bonusvergabe will den *Unterschied* zwischen zwei Prozessen ausdrücken; und zwar den Vorteil, den ein Produkt *mit* Rezyklatanfall gegenüber einem Produkt mit 100% Beseitigung und *ohne* Verwertung aufweist. In der Ökobilanzpraxis wird bei diesem Vorgehen meist die Produktion von Neumaterial als Bonus gutgeschrieben. Populär ist auch die Vergabe von Energie-Gutschriften bei Prozessen, die verwertbare Energie erzeugen.

Dieses Vorgehen kann der oben vorgestellten "Erweiterung der Systemgrenzen" gegenübergestellt werden. Statt wie dort die Produktion von äquivalenten Alternativstoffen zu *addieren* (bei Prozessen, die nicht selber Sekundärstoffe produzieren) werden hier diese Aufwendungen *subtrahiert* (bei Prozessen, die Sekundärstoffe produzieren).

In der folgenden Graphik sind die Unterschiede zwischen der Methode "Erweiterung der Systemgrenzen" und "Gutschrift" im Falle von Recycling dargestellt. Produkt A bezeichnet ein Produkt, welches am Ende des Lebenszyklus' vollständig rezykliert wird. Produkt B ist ein identisches Produkt, mit dem Unterschied, dass es am Ende des Lebenszyklus' vollständig beseitigt wird. Im Falle der Erweiterung der Systemgrenzen (links) erhält Produkt A eine Belastung durch die Recyclingaufwendungen; Produkt B eine Belastung für Entsorgungsaufwendungen und durch Neumaterialproduktion (da Produkt B kein Rezyklatmaterial bereitstellen kann). Im Falle der Methode Gutschriftvergabe (rechts) erhält Produkt A eine

Gutschrift (Entlastung) in Höhe der Neumaterialproduktion für entstandenes Rezyklatmaterial; Produkt B eine Belastung für Entsorgungsaufwendungen.

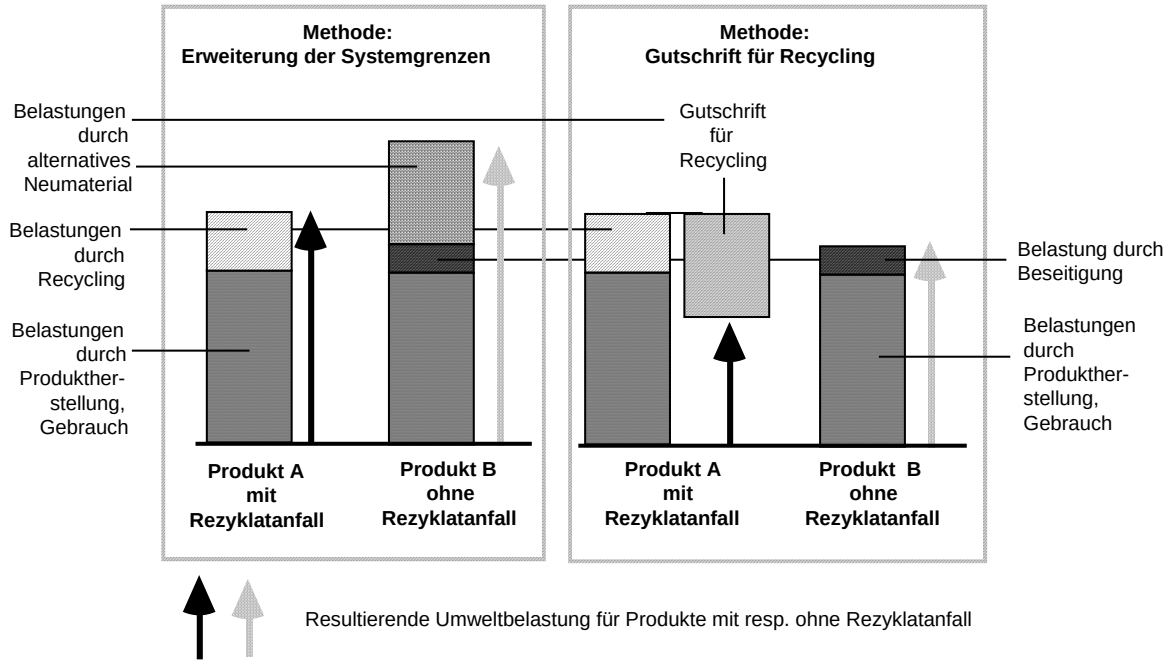


Abb. 6 *Schematischer Vergleich der Bilanzierung zweier Produkte A und B mit resp. ohne Rezyklatalfall. Methode der Erweiterung der Systemgrenzen (links) und Methode der Gutschriftvergabe für Recycling (rechts). Oft wird aber in der Praxis bei der Gutschriftvergabe für Recycling (rechts) unvollständigerweise die Belastung durch Recycling nicht bilanziert.*

Im Gegensatz zur Erweiterung der Systemgrenzen wird die funktionale Einheit bei der Bonusvergabe nicht verändert. D.h. die Einheit ist immer noch z.B. 1kg Beton (und nicht 1kg Beton *plus* 600 Gramm Kiesersatz). Dies macht das Vorgehen zwar pragmatisch, verschleiert aber auch leicht die Tatsache, dass so die Bilanz eines Produktes A mit einem subjektiv gewählten Prozess G verknüpft ist (z.B. Gutschrift von Erdölenergie bei der Wärmenutzung von Papier). Der gewählte Prozess A hat in Wirklichkeit oft keinerlei direkte Verknüpfung zum betrachteten Lebenszyklus des subjektiv gewählten Prozesses G.

Wie oben erläutert, ist das Ziel dieser Betrachtungsweise den *Unterschied* zwischen *zwei* Prozessen auszudrücken. Gegen dieses Bedürfnis ist nichts einzuwenden. Fragwürdig ist aber die Praxis, den Unterschied zwischen zwei Prozessen *einem Prozess allein* zuzuteilen [5]. Sie mag zwar für Einzelprozesse zu richtungssicheren Resultaten führen, aber

a) die Einzelprozesse können nicht ohne Konsistenzverlust weiterverknüpft werden, sind also ungeeignet für z.B. komplexe Prozessketten oder für weiterverwendete Referenzdaten,

und

5 Paul Watzlawick meint zu dieser Thematik: "Schon vor 70 Jahren verwies Bertrand Russell darauf, dass Aussagen über Dinge und Aussagen über Beziehungen streng zu trennen sind. 'Dieser Apfel ist rot', ist eine Aussage über die Eigenschaft *dieses* Apfels. 'Dieser Apfel ist grösser als jener' ist eine Aussage, die sich auf die Beziehung *zwischen den beiden Äpfeln* bezieht und daher nichts mit dem einen oder anderen Apfel allein zu tun hat. Die Eigenschaft des Grösserseins ist keine Eigenschaft eines der beiden Äpfel, und es wäre glatter Unsinn, sie einem der beiden zuschreiben zu wollen." [Watzlawick 1983, p.72]

b) durch die Subtraktion ergeben sich Verschiebungen von relativen Verhältnissen, die bei gewissen Betrachtungen wichtig sind (Dominanzanalyse, Rückzahldauern, relative Fehler).

Sind Neumaterial für Produkt A und das Material für die Gutschrift identisch, entspricht das Vorgehen dem oben beschriebenen 100%-Vorgehen.

5.2. Wann lohnt sich Recycling?

5.2.1. Ökologische Betrachtung des Recyclings

Recycling lohnt sich dann ökologisch, wenn die Gesamtbelastung eines Produktes aus Neumaterial grösser ist als die Gesamtbelastung eines Produktes aus Recyclat [6].

Diese Beurteilungen der ökologischen Gesamtbelastungen werden heute auf die existierenden Ökobilanzmethoden abgestützt, welche vor allem die Auswirkungen von **emittierten Schadstoffen** sowie evt. die **Beanspruchung energetischer Ressourcen** bewertet. Bei Baustoffen – aber auch anderen Produkten – müssten für eine vollständige Beurteilung zusätzlich Aspekte wie die **Beanspruchung nicht-energetischer Ressourcen** sowie **direkte Zerstörung von natürlichen Flächen** [7] berücksichtigt werden.

Dass die Bewertung von Emissionen nicht alle relevanten Schäden abdeckt, wird in folgendem Beispiel einsichtig: Die Schadstoffbelastung aus verbrannten Treibstoffen allein, die entsteht, um z.B. eine natürliche oder naturnahe Fläche mit Baumaschinen zu zerstören, ist vermutlich bei weitem kein Mass für den ökologischen Schaden, der insgesamt entsteht.

---

6 Wenn ein Recyclingprodukt nur teilweise aus Recyclat besteht, soll entsprechend der ersetzte Anteil Neumaterial betrachtet werden.

7 Dabei wird hier vor allem an den Rohstoffabbau von global gehandelten Materialien gedacht, welcher oft wertvolle Ökosysteme direkt beeinträchtigt. Bei der Entnahme von lokalen Rohstoffquellen wie Kies, Lehm etc. können aber unter Umständen und bei geeigneter Rücksichtnahme auch wertvolle Biotope *entstehen* (externer Nutzen).

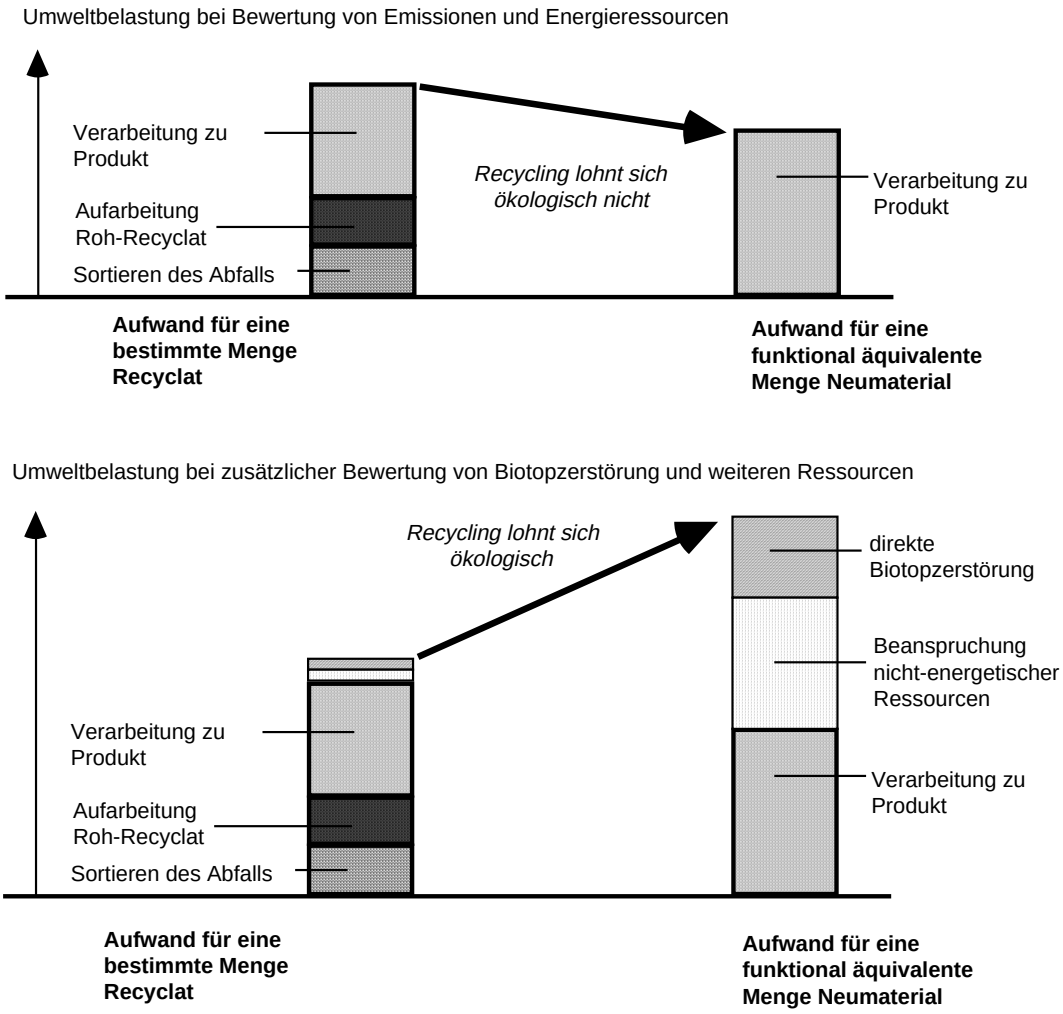


Abb. 7 *Illustration zu Unsicherheiten bei der Beurteilung von Recycling. Diese hängen bei gewissen Produkten u.a. auch von der bisher fehlenden Bewertung der direkten Biotopzerstörung und der Beanspruchung nicht-energetischer Ressourcen ab.*

Heute werden Recyclingprodukte meist nur aufgrund der fett ausgezogenen Beiträge in der obigen Abbildung beurteilt. Die neu entwickelte Bewertungsmethode Eco-indicator'99 erlaubt zusätzlich auch die integrale Bewertung der Beanspruchung nicht-energetischer Ressourcen sowie der direkten Zerstörung von natürlichen Flächen [Goedkoop et al. 1999].

Der ökologischen Beurteilung des Recyclings in der Schweiz förderlich ist, dass die entsprechenden Primärmaterialien oft in Ländern mit geringeren Umweltschutzauflagen gefördert und aufbereitet werden und so ökologisch stark belastet sind. Beim Vergleich Rezyklat vs. Primärmaterial wird dadurch bei genügender Datenlage das Rezyklat oft einen Vorteil erhalten.

Ist der Systemvergleich "Primärmaterialproduktion" vs. "Rezyklatproduktion" gerecht?

Beim obigen Vergleich von Rezyklat vs. Neumaterial kann bemängelt werden, dass die Prozesse aus folgendem Grund nicht vergleichbar sind: Während die einzige Funktion der Neumaterial-produktion die *Bereitstellung* von brauchbarem Material ist, beeinhaltet die Herstellung von Rezyklat daneben aber zusätzlich den Aspekt der *Entsorgung* von Altmaterial. Für einen

gerechten Vergleich müssen die funktionalen Einheiten der Bilanzobjekte vergleichbar gemacht werden. Unter Erweiterung der Systemgrenzen müsste die Neumaterialbereitstellung mit einer alternativen Entsorgung von Altmaterial ergänzt werden. Es bietet sich an, eine nicht-verwertende Entsorgung als diese alternativen Entsorgung zu wählen.

Das so erzeugte Bilanzsystem "Primärmaterial plus nicht-verwertende Entsorgung" entspricht dem Umgang mit Materialien bei 0%-Recycling d.h. dem Einsatz von **100% Primärmaterial** für Neuprodukte und **keinerlei Verwertung** von Altprodukten. Das gegenübergestellte System "Sekundärmaterial aus Altmaterial" entspricht dem Umgang mit Materialien bei sowohl **vollständiger Verwertung** von Altprodukten als auch Einsatz von **100% Rezyklat** bei Neuprodukten.

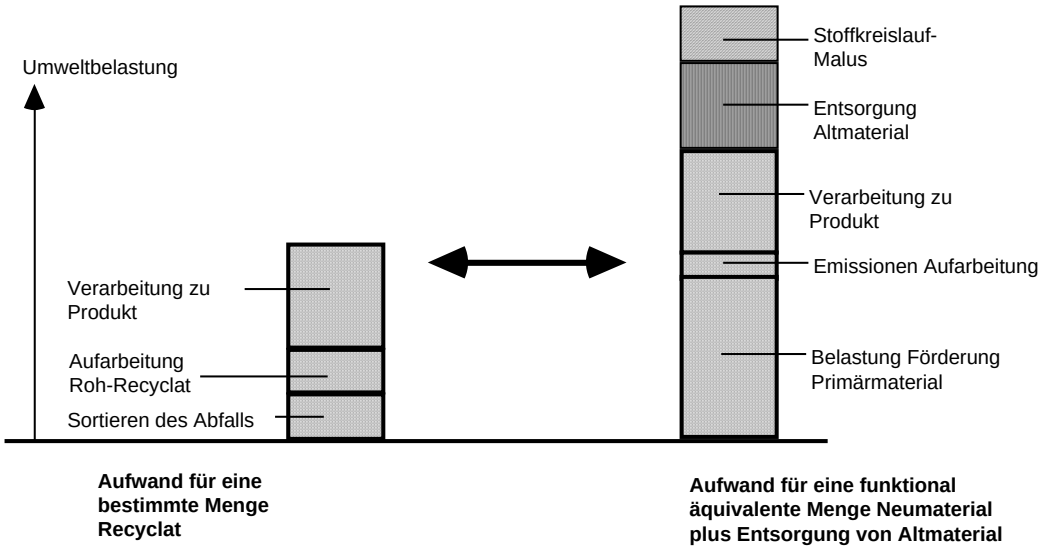


Abb. 8 *Vergleich der Entsorgung von Altstoffen und der Bereitstellung von Rohstoffen durch Recycling (links) und durch Beseitigung und Primärmaterial (rechts)*

5.2.2. Ökonomische Betrachtung des Recyclings

Die Verwertung eines Abfalls soll für den Abfallinhaber nicht teurer sein als dessen Beseitigung, da der Abfallinhaber ansonsten (ausser aus idealistischen Motiven) keinen Beweggrund zum Rezyklieren hat [SIA D093b, p.43]. Der Verwerter (Rezyklathersteller) soll daher insbesondere die Kosten für den Transport zur nächsten, geeigneten Aufbereitungsanlage übernehmen [8].

Das entstehende Recyklat soll dem Neumaterial sowohl qualitätsmässig und ökonomisch möglichst gleichwertig sein. Die Gewinnung von Rezyklat muss also auch für den Rezyklat-Hersteller gegenüber den aktuellen Primärmaterialpreisen wettbewerbsfähig sein. Dem Recycling hinderlich ist dabei, dass (nicht-lokale) Primärmaterialien häufig in Niedriglohnländern gefördert und aufbereitet werden.

8 Zur Zeit ist die Dichte der Beseitigungsanlagen in der Schweiz höher als die Dichte von Aufbereitungsanlagen, welche einen bestimmten Altstoff annehmen. Beseitigungsanlagen nehmen unspezifisch eine Vielzahl von Stoffen entgegen, während Aufbereitungsanlagen sich auf einzelne oder wenige Stoffe spezialisieren. Statistisch gesehen ist also die Transportdistanz von einem willkürlich gewählten Standort zur nächsten Beseitigungsanlage wahrscheinlich kleiner als die Transportdistanz zur nächsten Aufbereitungsanlage.

Umgekehrt kann in Niedriglohnländern durchgeführtes Recycling (Sortieren, Aufbereiten) ökonomisch vorteilhaft sein. Tatsächlich nimmt der internationale Handel mit verwertbaren Abfällen zu [9].

Sinnvolles und funktionierendes Recycling benötigt Investitionen und einen Lernprozess der Beteiligten, damit also auch mehr oder weniger Zeit. Es ist zu erwarten, dass das Recycling gewisser Stoffe daher anfangs durchaus als unattraktiv, ja sogar widersinnig erscheinen kann. Unter einer langfristigen Perspektive und mit einer nachhaltigen Zielsetzung dürfen diese Hindernisse aber nicht dazu verleiten, Recycling dieser anspruchsvolleren Stoffe generell abzulehnen.

Es ist jedoch zu erwarten, dass auch nach sorgfältigster Evaluation einige Materialien nicht für einen Stoffkreislauf geeignet sind. In einer nachhaltigen Gesellschaft müssten diese Materialien zwangsläufig durch andere ersetzt werden oder – falls die Verwertung zwar ökologisch sinnvoll, aber nicht ökonomisch durchführbar ist – deren Verwertung subventioniert werden.

Zu beachten ist ausserdem, dass sich der Entsorgungsmarkt zur Zeit stark ändert. So werden z.B. die verwertbaren Anteile im Bausperrgut in Zukunft vermehrt bereits auf der Baustelle aussortiert werden und die verbleibenden verwertbaren Mengen, die bei der Bausperrgut-sortierung anfallen, relativ geringer werden. Anfall und Zusammensetzung hat sich in der Vergangenheit stark geändert und wird sich auch weiterhin noch verändern. Die abzudeckenden Einzugsgebiete und Zusammensetzungen sind entsprechend einzuschätzen.

5.3. Markierungen für Umklassierungen

Im Laufe der Entsorgungsaktivitäten können Stoff in ungeeignete oder unnötig aufwendige Entsorgungskanäle gelangen. So zum Beispiel wenn brennbare Stoffe deponiert werden oder Inertstoffe unnötigerweise in Reaktordeponien gelangen. Diese unerwünschten Entsorgungen führen nicht in jedem Falle zu mehr Schadstoffen oder mehr Aufwendungen und daher auch nicht zu einem entsprechenden Signal in der Ökobilanz.

Ein reaktiver Stoff, welcher z.B. in eine Inertstoffdeponie gelangt, erzeugt aufgrund der Pufferfähigkeit der Inertstoffdeponie einen Bruchteil der Emissionen desselben Stoffes in einer Reaktordeponie. Auch die prozessspezifischen Aufwendungen in der Inertstoffdeponie sind geringer. Das heisst die *korrekte* Entsorgung eines reaktiven Stoffes in der Reaktordeponie schneidet bei den üblicherweise bewerteten Umwelteinwirungen einer Ökobilanz (va. Emissionen) *schlechter* ab, als die *unerwünschte* Entsorgung in der Inertstoffdeponie. Die unerwünschte Entsorgung erscheint so in der Ökobilanz fälschlicherweise als erstrebenswerter. Würde nun – theoretisch – nach Massgabe dieses Resultates gehandelt, verschwände der vermeintliche ökologische Vorteil sehr bald, da sich die Pufferfähigkeit der Inertstoffdeponie erschöpft.

Als Erweiterung für die Ökobilanz sollen hier Möglichkeiten geschaffen werden, diese unpassenden Entsorgungen zu verfolgen und ggf. zu bewerten. Verschiedene unerwünschte Entsorgungen können unterschieden werden.

---

9 Die ökonomischen und ökologischen Vor- und Nachteile eines internationalen Recycling-Handels wird zur Zeit in einer holländischen Dissertation untersucht. Siehe [van Beukering 1999].

	Korrekte Entsorgung (soll)		
	KVA	**ID**	**RD**
tatsächliche Entsorgung (ist) **KVA**	×	***1***	***2***
ID	***3***	×	***4***
RD	***5***	***6***	×
Recycling	***7***	***7***	***7***

KVA = Kehrichtverbrennung,
ID = Inertstoffdeponie,
RD = Reaktordeponie

1: Inertstoff in KVA
2: Reaktordeponiegut in KVA
3: Brennbares in Inertstoffdeponie
4: Reaktordeponiegut in Inertstoffdeponie
5: Brennbares in Reaktordeponie
6: Inertstoff in Reaktordeponie
7: Fremdstoff in Verwertung

5.3.1. Inertstoff in KVA: Markierung 1

Inerte Stoffe werden in der KVA vollständig in die Schlacke transferiert und deponiert. Die Abfälle gelangen so in das Schlackenkompartiment einer Reaktordeponie. Eine einfache Inertstoffdeponie hätte genügt. Die Entsorgung ist so aufwendiger und belastender als nötig. Da der Abfall nicht reagiert, entstehen aber auch keine produktspezifischen Emissionen.

Beispiele: Fensterglas, welches in den Rahmen als Sperrgut in die KVA gelangt. Kleinmetalle in Verbunden.

Heute betriebene KVAs sind auf einen bestimmten Heizwert des Abfalls ausgelegt. Dieser Heizwert steigt aufgrund von Separatsammlungen laufend und die Beschickung der Anlagen muss auf diesen Umstand Rücksicht nehmen. Die KVAs müssen aus diesen Gründen Unterlast gefahren werden, was die Verbrennungs-Kapazitäten einschränkt. Aus dieser Sicht ist es vielleicht nicht unwillkommen, inerte und den Heizwert-mindernde Abfälle der Verbrennung zuzuführen. Dies ist jedoch ein (aktuelles) Verfahrensproblem, das mit der Einführung von Kunststoff-Separatsammlungen oder der nächsten Generation von Entsorgungstechnologien gemindert oder verhindert werden kann. Generell ist es als unerwünscht einzustufen, leicht entsorgbare Abfälle einer aufwendigen Entsorgung zuzuführen.

5.3.2. Reaktordeponiegut in KVA: Markierung 2

Auf den ersten Blick scheint es sich hier nicht um eine unerwünschte Entsorgung zu handeln. Reaktordeponiegut vermehrt in KVAs zu verbrennen entspricht der Schweizerischen Abfallpolitik. Ab 1.1.2000 müssen brennbare Abfälle einer KVA zugeführt werden. Was hier aber gemeint ist, sind Abfälle, die eigentlich auf eine Reaktordeponie eingelagert werden *müssten*, weil sie sinnvollerweise nicht in einer KVA entsorgt werden sollten. Gelangen diese Abfälle trotzdem in die KVA werden sie in der Bilanz mit einer Markierung versehen.

In der vorliegenden Arbeit gibt es keine Beispiele für eine solche unerwünschte Entsorgung.

5.3.3. Brennbares in Inertstoffdeponie: Markierung 3

Wenn brennbare Abfälle in die Inertstoffdeponie gelangen, führen sie – bedingt durch ihre Abbaubarkeit – kurz-, mittel- oder langfristig ein Reaktivitätspotential ein. In Inertstoffdeponien dürfen nur Abfälle eingelagert werden, welche zu mehr als 95 G-% der Trockensubstanz aus gesteinsähnlichen Materialien bestehen [TVA 1996]. Allfällig entstehende Schadstoffe werden dann aufgrund der hohen Alkalinität der Inertstoffdeponie weitgehend gebunden, sodass keine schädlichen Emissionen entstehen. Aber jede Ablagerung reaktiver Abfälle zehrt an dieser Pufferfähigkeit. Eine übermässige Entsorgung dieser Art ist deshalb zu vermeiden, um die Ungefährlichkeit der Inertstoffdeponie zu garantieren.

Tatsächlich entstehen bei einer Entsorgung von brennbaren Abfällen in einer Inertstoffdeponie *weniger* Belastungen in Form von Emissionen oder Aufwendungen, da die Emissionen gut abgepuffert werden. Das Bedenkliche bei dieser Entsorgung ist das geringe, aber erhöhte Risiko, die Inertstoffdeponie zu einer schleichenden Altlast zu machen.

Beispiele: Kunststoff aus Mauer-Putzen von unsortiertem Mauerwerk (Mulde Inertes).

5.3.4. Reaktordeponiegut in Inertstoffdeponie: Markierung 4

Ähnlich wie Brennbares gehört Reaktordeponiegut nicht in eine Inertstoffdeponie, da dadurch ein Reaktivitätspotential eingeführt wird (vergl. oben: Brennbares in Inertstoffdeponie).

5.3.5. Brennbares in Reaktordeponie: Markierung 5

Ab 1.1.2000 müssen brennbare Abfälle einer KVA zugeführt werden und dürfen nicht mehr in einer Reaktordeponie gelagert werden. Auch hier will man das vorhandene Reaktivitätspotential der Deponie eindämmen und so das Risiko einer ungewissen langfristigen Entwicklung der Deponie vermindern. Brennbare Bestandteile kommen vor allem in Form von Verbunden in die Deponie, die nur schwer getrennt werden können und daher nicht verbrannt werden können.

Beispiele: Kunststoffe in Anstrichen und Fugen von sortiertem Mauerwerk (Feinfraktion), Karton von vollständig beseitigten Gipskartonplatten

5.3.6. Inertstoff in Reaktordeponie: Markierung 6

Inertstoffe in einer Reaktordeponie werden aufwendiger entsorgt als notwendig. Die Inertstoffe nehmen knappen Deponieplatz weg, der besser für andere Stoffe eingesetzt werden kann. Da der Abfall nicht reagiert, entstehen aber auch keine produktspezifischen Emissionen.

Beispiele: Betonkies, welcher nach einer Sortierung in die deponierte Feinfraktion gelangt; Glasfasern von vollständig deponierten, armierten Gipsplatten.

5.3.7. Fremdstoff in Verwertung: Markierung 7

Stoffe, für die es keine Verwertungsoption gibt und die deshalb beseitigt werden müssten, sollten nicht in Verwertungskanäle gelangen. Geschieht das trotzdem, sind diese Stoffe mehr oder weniger bedenkliche Störstoffe, die die Qualität der Sekundärressourcen und damit deren Wert und Einsatzmöglichkeit einschränkt.

Beispiele: Holzanstriche auf verwertetem Holz, Glasbruch, Zement, Gipsputz in sortiertem Kiesersatz.

5.3.8. Verwertbares in Beseitigung

Als Gegenstück zur Markierung 7 (nicht verwertbare Fremdstoffe in Verwertung) könnten auch für verwertbare Stoffe, die in eine Beseitigung gelangen, Markierungen gesetzt werden. Die nicht verwerteten Energie- und Stoffwerte werden in der vorliegenden Studie aber bereits mittels der Möglichkeit für Malusse für nicht erfolgte Energienutzung bzw. Stoffnutzung berücksichtigt (siehe Kapitel 5.5 "Energienutzungs-Malus" und 5.6 "Stoffnutzungs-Malus"). Auf eine parallelle Markierung wird verzichtet.

5.4. Bilanz-Kennziffern für Kreislaufführung

Theoretisch besitzen alle Stoffe ein Verwertungspotential. Wird bei einer Entsorgung dieses Potential genutzt, so ist dies im Sinne einer optimalen Ressourcenbewirtschaftung vorteilhafter, als eine Entsorgung, die dieses Potential verschwendet. Die Beurteilung von Entsorgungsverfahren sollte sich nicht allein auf die Entstehung von Emissionen stützen, sondern auch auf die Eignung des Abfall in einer nachhaltigen, schonenden und effizienten Wirtschaftsweise einbezogen werden zu können. Es soll deshalb hier in einem Ansatz versucht werden, Interpretationshilfen für diese "Kreislauffähigkeit" zu entwickeln.

Um den Begriff "Verwertung" zu differenzieren wird eine **energetische Verwertung** von einer **stofflichen Verwertung** unterschieden. Abfälle bzw. Reststoffe, welche einen Heizwert besitzen, besitzen theoretisch ein Energienutzungspotential (Energiekaskaden-Nutzung). Alle Stoffe besitzen ein theoretisches Verwertungspotential (Stoffkreislauf). Wird ein Abfall stofflich verwertet, bleibt sein Energienutzungspotential erhalten. Wird ein Abfall energetisch verwertet, geht sein stoffliches Nutzungspotential verloren. Bei einer stofflichen Verwertung sind spätere stoffliche oder auch energetische Kaskadennutzungen denkbar. Eine energetische Verwertung ist demgegenüber nur einmal durchführbar.

5.5. Energienutzungs-Malus

Abfälle mit einem Heizwert können theoretisch energetisch verwertet werden. Üblicherweise können Energie-Nebenproduktionen in Ökobilanzen durch Vergabe von Bonussen (Gutschriften) berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen hat aber verschiedenen Nachteile (siehe Kapitel 5.1 "Wiederverwendung und -verwertung in Ökobilanzen"). Für das Thema "Kreislauffähigkeit" bzw. "Verwertungseffektivität" interessiert nicht, wieviel Emissionen durch Energiesubstitution eingespart werden konnte (was die Aussage einer Gutschrift ist), sondern wieviel der bereits im Abfall vorhandenen Energie *tatsächlich einer Nutzung zugeführt* wurde, statt sie ungenutzt in die Umwelt zu entweichen zu lassen. Der Energienutzungs-*Malus* soll daher ausdrücken, wieviel, der im Abfall vorhandenen Energie bei einer Entsorgung verschwendet, d.h. *nicht* einer Nutzung zugeführt wurde. **Der Malus soll so Entsorgungen, die eine Energienutzung vorsehen, unterscheiden von Entsorgungen, die dies nicht tun.** Die Wirkungsgrade der nachfolgenden Energie-Umwandlungen werden dabei *nicht* betrachtet [10].

---

10 Dies hat folgenden Grund: Eine beispielsweise 100%ige Nutzung des Heizwertes als Wärmeenergie hat vielleicht einen Wirkungsgrad von 80%; die Nutzung in einem elektrischen Generator vielleicht 30%. Das bedeutet aber nicht, dass bei der Stromnutzung weniger Energie einer Verwertung zugeführt wurde. Beide Male wurden 100% der vorhandenen Energie einer Nutzung zugeführt. Der Energienutzungs-Malus sollte also bei beiden Verwertungen (Strom oder Wärme) gleich hoch ausfallen. Der Malus bezieht sich auf die Energie, die *keiner Nutzung* zugeführt

Berücksichtigt wird jedoch, wenn die im Wasserdampf enthaltene Energie nicht genutzt wird (Differenz zwischen oberem und unterem Heizwert). So können schlecht verwertbare Abfälle mit hohem Wassergehalt von gut verwertbaren, trockenen Abfällen unterschieden werden. Letztere eignen sich besser für eine Energienutzung und erhalten so einen kleineren Malus. Ist eine Verwertungsanlage jedoch kondensierend, so kann auch diese Energie einer Nutzung zugeführt werden.

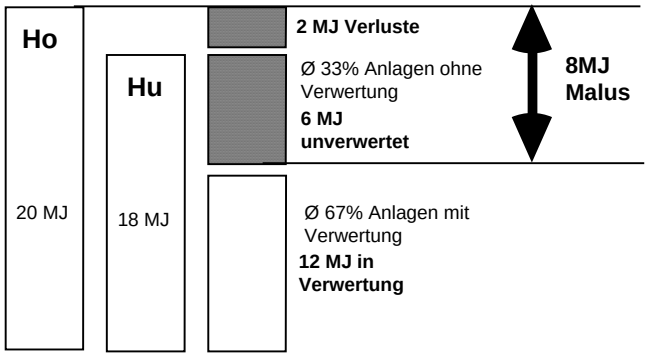


Abb. 9 Beispielrechnung Energienutzungs-Malus

Beispiel Energienutzungs-Malus: Ein Abfall habe einen oberen Brennwert von 20 MJ/kg und einen unteren Heizwert von 18 MJ/kg. Gelangt dieser Abfall nun in eine Entsorgung bei der durchschnittlich 67% der Anlagen eine energetische Nutzung aufweisen, so wird dadurch 12 MJ/kg in eine energetische Verwertung überführt. Sind die Anlagen nichtkondensierend, können sie die Wärme im Wasserdampf (2MJ/kg) nicht verwerten [11]. Weitere 6 MJ/kg gehen in den 33% Anlagen ohne Energienutzung verloren. Ein solcher Entsorgungsmix erhält für diesen Abfall also einen Energienutzungs-Malus von 8 MJ/kg für die nicht einer energetischen Verwertung zugeführte Energie.

Wie einleitend erwähnt, erhält ein energetisch genutzter Stoff einen vollständigen Stoffnutzungs-Malus (s. unten), da dabei die Stoffmatrix zerstört oder in eine unverwertbare Form übergeführt wird.

Bei thermischen Abfallbehandlungen (KVA, SAVA) kann argumentiert werden, dass auch ein Teil der nicht ausgekoppelten Energie einer energetischen Nutzung zugeführt wurde, nämlich zur Hygienisierung und Kompaktierung der verbrannten Abfälle. Da aber bei KVA und SAVA davon ausgegangen wird, dass der gesamte Abgasstrom und somit die gesamte Energie einem Dampfkessel zugeführt wird, ist die Verwertungsquote bereits sehr hoch und der Energie-nutzungs-Malus bereits minimal.

Reaktordeponien haben z.Z. noch eine Deponiegasfassung. 55% des Deponiegases wird verbrannt und 35% davon (also 19.2% des gesamten Gases) wird einer energetischen Verwertung zugeführt [ESU 1996b]. Ein Grossteil der Energie geht in der Reaktordeponie als mikrobielle Abwärme ins Sickerwasser verloren. In Zukunft sinkt der Anteil energiehaltiger Abfälle, da ab 1.1.2000 brennbare Abfälle einer Verbrennung zugeführt werden müssen. Eine Gasfassung und

---

wurde und nicht auf die Effizienz dieser Nutzung. Würden die Wirkungsgrade der Nutzungen berücksichtigt, so wäre im obigen Beispiel der Malus für die Stromnutzung grösser als der Malus für die Wärmenutzung, was für die beabsichtigte Aussage des Malus kaum sinnvoll erscheint.

11 Wären die Verwertungsanlagen kondensierend, so könnten trotzdem nur 67% der 2 MJ verwertet werden, da 33% der Abfälle ja in Anlagen ohne Energienutzung verbrannt werden.

Energienutzung wird sich dann immer weniger lohnen, da die Methanphase der Deponie nur noch schwach ausgeprägt sein wird. Der Energie-Malus (z.B. für auch in Zukunft mitdeponierten Kunststoffputz) wird dann in Reaktordeponien maximal.

5.6. Stoffnutzungs-Malus

Theoretisch können alle Materialien stofflich verwertet werden. Real passiert dies nur mit den lohnenden Materialien, d.h. denjenigen Materialien, die nach Anrechnung des Aufbereitungsaufwandes noch verkaufbare Produkte ergeben. Auch bei der stofflichen Verwertung wird, wie bei der energetischen Verwertung oft ein Bonus in Form einer Gutschrift der Belastung der Herstellung eines vergleichbaren Materials vergeben. Für das Thema "Kreislauffähigkeit" bzw. "Verwertungseffektivität" interessiert aber nicht, wieviel Emissionen durch den Einsatz von Rezyklat eingespart werden konnte (was die Aussage einer Gutschrift ist), sondern welche Menge des Abfalls *einer stofflichen Verwertung zugeführt* wurde; d.h. welcher Anteil des Abfalls (mit negativem ökonomischem Wert) in Sekundärprodukte (mit positivem ökonomischem Wert) umgewandelt wurde. Der Stoffnutzungs-*Malus* soll daher ausdrücken, wieviel, des Abfalls bei einer Entsorgungsoption *nicht* einer Nutzung zugeführt wurde.

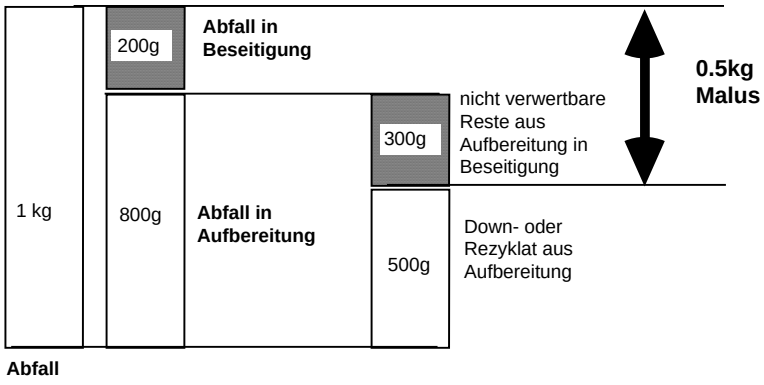


Abb. 10 Beispielrechnung Stoffnutzungs-Malus

Der Stoffnutzungs-*Malus* wird bei den Beseitigungsprozessen bilanziert, welche Stoffe in unverwertbare Abfälle überführen (KVA, Deponie, SAVA). Wenn während der Aufbereitung des Abfalls nicht verwertbare, d.h. zu beseitigende Teile anfallen, erhalten diese bei der Beseitigung einen Malus. Ein Abfall, der es vermeidet, in der Bilanzierung einen Malus zu erhalten, wird offenbar vollständig verwertet.

Die Frage nach der Qualität des Rezyklates wird hier vorerst ausgeklammert. Eine Unterscheidung zwischen Recycling (zu gleichwertigen Produkten) oder Downcycling (zu minderwertigen Produkten) wird nicht betrachtet.

6. Abbruch- und Rückbautechnologien

6.1. Abbruchtechnologien

Im folgenden werden verschiedene Abbruchtechnologien für Hochbauten vorgestellt.

Sprengen ist nur zweckmässig bei Bauten mit Bauteildicken von > 50cm und Bauteilmengen > 50m^3 [DAFSTB 1996, p.85].

Einschlagen mit Schlagkugel (Abreissbirne) ist schnell und günstig; unter dem Aspekt der Wiederaufbereitung der anfallenden Materialien sind andere Abbruchverfahren zu bevorzugen [DAFSTB 1996, p.84]. Einschlagen ist nur wirtschaftlich bis zu einer Wanddicke von 50cm. Hohe Anforderungen an Geräte (Wartung, 40 bis 80t Gewicht) und Personal (Erfahrung). Nur geeignet für hohe Abbruchvolumen (teurer Gerätetransport). Hohe Umweltbelastung durch Staub, Lärm und Erschütterungen der Nachbargebäude mit erdbebenähnlichen Frequenzen von 3 bis 6 Hz [DAFSTB 1996, p.30].

Abgreifen eignet sich für Mauerwerk und schwach bewehrte Betonbauteile. Mit zunehmender Gebäudehöhe sinkt die Stundenleistung. Vorteilig ist die geringe Erschütterung, nachteilig der hohe Platzbedarf (Sicherheitsabstände) [DAFSTB 1996, p.24].

Abbruch durch reines **Eindrücken** ist begrenzt auf etwa 20m hohe Gebäude. Eignet sich nur für Vollabbruch. Hohe Umweltbelastung durch Staub, Lärm und Erschütterungen.

Das **Einreissen** (durch Seilzug oder Teleskoparm) von Wänden oder Stützsäulen benötigt einen hohen Platzbedarf, da das Abbruchmaterial nach aussen i.e. vom Gebäude weg stürzt. Umweltbelastung durch Lärm und Erschütterungen.

Demontage erfolgt durch Kräne.

Armierter Beton muss teilweise vorgetrennt werden um einen Abbruch/Rückbau zu ermöglichen. Dazu kann die Armierung durch Sägen oder Brennen getrennt werden. Pulverschneidbrenner schneiden sich mittels einer Brenngas/Sauerstoffflamme unter Zugabe von Eisen-Aluminium-Pulver durch Stahlbeton. Hohe Lärmbelastung von 90 - 106 bD(A).

Es können auch Plasmabrenner (T von >14'000 °C, Arbeitsgas und Kühlgas) oder Lichtbogenbrenner eingesetzt werden. Beide Verfahren erzeugen eine hohe Lärmbelastung, Rauchentwicklung, Hitze und hohen Energieverbrauch [DAFSTB 1996, p.51].

Stahlkonstruktionen können mit Sauerstoffkernlanzen oder Thermit gebrannt werden. Sauerstoffkernlanzen verbrennen eine Eisen/Aluminiumlanze unter Sauerstoffzufuhr bei 2200 – 2700°C und brennen sich so durch Stahl. Beim Thermitverfahren werden feuerfeste Formen mit pulverförmigen Thermitgemisch gezündet um eine Stahlkonstruktion zu zerlegen. Das Thermitgemisch besteht aus metallischem Aluminium und Eisenoxid oder anderen Metalloxiden. Die Thermitreaktion zu Eisen und Aluminiumoxid verläuft stark exotherm (240 Gramm Thermitgemisch entwicklen soviel Wärme, dass damit ca. ein Kilogramm Eisen geschmolzen werden kann).

Rückbau

Beim Rückbau geht es im Gegensatz zum Abbruch darum die Baustoff möglichst verwertbar aus dem Alt-Gebäude zu gewinnen. Gemäss [Schultmann 1997] ist eine EDV-gestützte Baustellenplanung mit einer detaillierten Gebäudeerfassung (Gebäudeaudit), sowie die Bestimmung der Demontagereihenfolge und Logistikplanung entscheidend für einen erfolgreichen Rückbau. Eine systematische Demontage erbrachte bei einem Fallbeispiel (Mauerwerkbauweise, Deutschland) **4 G-% direkt wiederverwendbare Bauelemente** wie Holzbalken, Mauerziegel, Bretter, Fensterrahmen aus Sandstein und Treppengeländer. Bei konventionellem Abbruch und nachfolgender Grobsortierung auf der Baustelle konnten dagegen nur 0.3 G-% direkt wiederverwendbare Bauelemente gewonnen werden. Die mineralische Fraktion aus dem Rückbau war von hoher Qualität (sehr wenig Gips und Schadstoffe). Dachziegel, unbehandeltes Holz, Glas, Metalle konnten stofflich verwertet werden. Ökonomisch nicht verwertbare Reststoffe (6 G-%) bestanden vorwiegend aus Gipsbestandteilen.

Eine **ökonomische Beurteilung** der Abbruchalternativen kann an verschiedenen Orten zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, da die Kosten stark von **Deponiegebühren** abhängen. Ein Teilrückbau kann eine finanziell attraktive Alternative zu einem vollen, systematischen Rückbau sein [Schultmann 1997].

6.2. Mehrmuldenkonzept SBV

Wichtige Sortierfunktionen der Abfallbehandlung werden bereits auf der Baustelle wahrgenommen. Der Schweizerische Baumeisterverband (SBV) propagiert seit Anfangs der 90er Jahre ihr praxisnahes Muldenkonzept zur groben Triagierung verschiedener Abfallstoffklassen auf der Abbruchstelle. Dieses Konzept wird durch die SIA-Empfehlung 430 ergänzt, welche für alle Bautätigkeiten, welche Abfälle verursachen, ein Entsorgungskonzept verlangt.

Die einzelnen Mulden werden dem Bedarf der aktuellen Bauphase und den örtlichen Gegebenheiten entsprechend bereitgestellt und mit den bezeichneten Materialien beladen. Um die Vermischung mit unerwünschten Stoffen zu vermeiden, werden die Mulden auf der Baustelle gesichert (z. B. mit Netzen) und kontrolliert. Sonderabfälle werden branchenspezifisch separat entsorgt.

Das Mehr-Mulden-Konzept unterscheidet gestützt auf die TVA folgende Muldentypen, die mit farbigen, aufgesteckten Tafeln gekennzeichnet sind:

Mulde 1: Einstoff-Mulde (grün) Enthält nur eine Sorte Material, welches sich für die Verwertung eignet: Aushub, Humus, Asphaltbelag, Beton, Back-/Ziegelsteine, Kies, Metall, Holz, Glas. Jedoch keine Sonderabfälle und kein Gips.

Mulde 2: Bauschutt, inerte Bauabfälle (grau) Mehrstoff-Mulde für Gemische von Inertstoffen: Backsteine/Ziegel, Asphaltbelag, Kies, Erde, Keramik, Naturstein, Ton, Zementwaren, Beton, Eternit. Jedoch keine Sonderabfälle und kein Gips.

Mulde 3: Brennbares Material in KVA (rot) Mehrstoff-Mulde für vermischte, brennbare Materialien, die nicht der Verwertung zugeführt werden können und deshalb über die Kehrichtverbrennungsanlage entsorgt werden. Zulässig sind: Papier, Karton, Isoliermaterial, offene Leergebinde, Holzanteile (zerlegte Paletten), Kunststoffe, Bauglas in kleinen Mengen. Keine Sonderabfälle.

Mulde 4: Bausperrgut, andere Bauabfälle (gelb) Mehrstoff-Mulde für Bausperrgut, d.h. nicht sortierte Bauabfälle jeglicher Art, jedoch keine Sonderabfälle, kein ölhaltiges Material, keine Chemikalien, keine geschlossenen Behälter, kein Kehricht. Diese Mulde muss zwingend einer Sortieranlage zugeführt werden, wo die weitere Trennung der Abfälle erfolgt. Die Mulde 4 für Bausperrgut wird auch eingesetzt, wenn aus Organisations- oder Platzgründen die notwendigen Einstoff-, Bauschutt- und KVA-Mulden nicht gestellt werden können.

Sonderabfälle Gemäss Verordnung über den Verkehr mit Sonderabfällen (VVS) müssen die Sonderabfälle von den Handwerkern und Unternehmern selber fachgerecht und der Branche entsprechend entsorgt werden. Sie sind deshalb von diesen wieder mitzunehmen und einer geeigneten Entsorgungsfirma oder offiziellen Annahmestelle zu übergeben. Es ist in jedem Falle verboten, Sonderabfälle mit den übrigen Bauabfällen zu vermischen.

Das vollständige Muldenkonzept wird va. bei Errichtungs- und Abbruch-Baustellen realisiert. Bei Renovationen ist oft zu wenig Platz vorhanden, um alle nötigen Mulden aufzustellen. Dann müssen zwei Mulden (Bauschutt M2 und Bausperrgut M4) oder nur eine Mulde (Bausperrgut M4) aufgestellt werden [IP Bau 1991, p.36].

Das Muldenkonzept ist, neben einer möglichen Verwertung, motiviert durch die einzusparenden Deponierungskosten. Daneben existieren auch gesetzliche Auflagen: Das Abfallgesetz[12] und die TVA[13] verlangen eine Trennung von unverschmutztem Aushub, Bauschutt, Bausperrgut und Sonderabfällen.

Trotz Muldenkonzept wird nur ein geringer Teil der Bauabfälle in der Schweiz verwertet. Nach Angaben des BUWAL für 1996 wurden von 3 Mio. Tonnen Hochbauabfällen nur 150'000 Tonnen (5%) einer stofflichen Verwertung zugeführt. 200'000 Tonnen – rund 7% – wurden in KVAs verbrannt und dadurch teilweise energetisch verwertet. Der Rest wurde in Inertstoff- oder Reaktordeponien deponiert [BUWAL 1999].

Dies kann so interpretiert werden, dass Bauschutt-Sortieranlagen in der Schweiz zur Zeit vor allem zur Sicherstellung von Deponiequalitäten betrieben werden und nur in zweiter Linie zur Erzeugung von Rezyklat-Baustoffen.

6.3. Ökoinventare Abbruch

6.3.1. Kenngrössen für Baumaschinen

In [ESU 1996a] wurden verschiedene dieselgetriebene Baumaschinen für Erdbewegungen und andere maschinellen Einsätze bilanziert. Für erdbewegende Maschinen ist die funktionale Einheit

12 §17 AbfallG, Übrige Abfälle: "Die Inhaber von Abfällen aus Unternehmungen (ausgenommen Siedlungsabfälle) sorgen für deren Behandlung und tragen die Kosten. Unternehmungen haben die zumutbaren Massnahmen zur Vermeidung, Verminderung und Verwertung von Abfällen zu treffen und ihre Anlagen hinsichtlich Umwelt- und Gewässerschutz dem Stand der Technik anzupassen. Bauabfälle sind an Ort und Stelle mindestens nach den Kategorien unverschmutzter Aushub, Bauschutt, Bausperrgut und Sonderabfälle zu trennen. Die Gemeinden können eine weitergehende Trennung auf der einzelnen Baustelle verlangen."

13 Art. 9 TVA, Bauabfälle: "1) Wer Bau- oder Abbrucharbeiten durchführt, darf Sonderabfälle nicht mit den übrigen Abfällen vermischen und muss die übrigen Abfälle, soweit betrieblich möglich, auf der Baustelle wie folgt trennen: a) unverschmutztes Aushub- und Abraummaterial; b) Abfälle, die ohne weitere Behandlung auf Inertstoffdeponien abgelagert werden dürfen; c) andere Abfälle. 2) Die Behörde kann eine weitergehende Trennung verlangen, wenn dadurch Teile der Abfälle verwertet werden können." [TVA 1996]

"m^3 bewegtes Erdreich", für andere Baumaschinen "Terajoule verbrauchter Dieselkraftstoff". Hier sollen diese Angaben auf die üblichere und für Abbrüche gebräuchlichere Einheit "Betriebseinsatz in Stunden" umgerechnet werden. Dies ist mit den Angaben in [ESU 1996a, p.B.55] möglich.

Baumaschine bilanzierte Datenmodule in [ESU 1996a]	funktionale Einheit (f.u.) in ECOINVENT	Leistung bei mittlerem Einsatz	Betriebsdauer pro 1 f.u.
Frontladerraupe	m^3 bewegtes Erdreich	150 m^3/h	24.12 sec
Hydraulikbagger	m^3 bewegtes Erdreich	150 m^3/h	24.12 sec
Baumaschinen allgemein	TJ verbrauchter Diesel	813.2 MJ /h (19 kg Diesel /h)	1230 Stunden
	um 1h Baumaschineneinsatz zu bilanzieren, müssen folgende Mengen der Datenmodule bezogen werden:		Dieseleinsatz MJ pro Stunde
Frontladerraupe	150 f.U. / h		885
Hydraulikbagger	150 f.U. / h		735
Baumaschinen allgemein	$8.132 \cdot 10^{-4}$ f.U. / h		813.2

Tab. 5 Umrechnungen der funktionalen Einheit (f.u.) für Datenmodule von Baumaschinen auf Einsatz in Betriebsstunden.

In [DAFSTB 1996, p.85] findet sich eine Übersicht von typischen Abbruchleistungen für verschiedene Verfahren und Konstruktionen.

Dauerleistung verschiedener Abbruchverfahren (1990) [DAFSTB 1996, p.85]	Stahlbeton h/fm^3	unbewehrter Beton h/fm^3	Mauerwerk h/fm^3
Abtragen mit handgeführten Werkzeugen	**6 – 15**	**2 – 10**	**1 – 4**
Abtragen mit Werkzeugen an Trägergeräten (>5t)	0.25 – 5	0.1 – 2	0.1 – 0.6
Abtragen mit hydraulischen Felsmeissel an Trägergeräten (>5t)	0.2 – 1	0.1 – 0.8	0.1 – 0.5
Abgreifen mit Greifern	–	0.1 – 0.5	0.1 – 0.5
Abgreifen mit Betonzangen	**0.6 – 6**	**0.3 – 0.5**	**0.2**
Einschlagen mit Fallbirne	0.1 – 1.5	0.07 – 0.2	0.05 – 0.1
Eindrücken mit Gerätehydraulik	0.3	0.1 – 0.4	0.05 – 0.1
Einreissen mit Gerätehydraulik	0.1 – 0.3	0.07 – 0.2	0.05 – 0.1
Sprengen mit Explosivstoffen	0.4	0.25	0.25
Sägen mit Betonsägen	0.5 – 10	0.4 – 6	3

Tab. 6 Dauerleistungen verschiedener Abbruchverfahren in Stunden pro Kubikmeter (Festkubikmeter, fm^3) [DAFSTB 1996, p.85]

Die angegebene Dauerleistung ist die erreichbare Tagesleistung unter Berücksichtigung einer Auslastung von 50% bis 60% in einem Achtstunden-Arbeitstag und ist geringer als die momentane Nennleistung des Gerätes [DAFSTB 1996, p.82].

Für die vorliegende Studie werden durchschnittliche Leistungen definiert, die sich aus den Verfahren "Abtragen mit handgeführten Werkzeugen" und "Abgreifen mit Betonzangen" zusammensetzen. Es wird geschätzt, dass 10% des Materials handgeführt und 90% maschinell abgebrochen wird. Zur Umrechnung von Stunden pro Kubikmeter in Energieaufwand pro Kilogramm wird ein spezifischer Dieselverbrauch von 813.2 MJ/h bilanziert.

		Stahlbeton	unbew. Beton	Mauerwerk
Leistung Hand	h/fm3	10	6	2.5
Leistung Maschinell	h/fm3	3.5	0.4	0.2
Diese Studie (10% Hand , 90% Maschinell)	h/fm3	4.15	0.96	0.43
Verbrauch Diesel (813.2 MJ/h)	MJ/m3	3375	781	350
typ. Dichte Baumaterial	kg/m3	2400	2300	1600
Verbrauch Diesel in Baumaschine **Diese Studie**	**MJ/kg**	**1.41**	**0.34**	**0.22**

Tab. 7 Spezifische Abbruchenergien (gerundete Angaben)

Es ist plausibel, dass die nötige Abbruchdauer pro Kubikmeter mit zunehmender Dichte auch zunimmt. Der oben auf Kilogramm – und nicht auf Kubikmeter – bezogene spezifische Dieselverbrauch des Abbruchs ermöglicht so eine Berücksichtigung der geringeren Abbruchenergie für weniger dichte Baustoffe.

Emissionen

Die direkten Emissionen, welche mit der Anwendung von Diesel in Baumaschinen verbunden sind, werden im entsprechenden Ecoinvent-Datenmodul "Diesel in Baumaschine" bereits verbucht und müssen hier nicht erörtert werden. Es gibt aber noch weitere, bauspezifische Emissionen.

Partikel (PM_{10})

In Europa stammen PM_{10}-Emissionen[14] zum grossen Teil von Verbrennungsprozessen. Aber auch *mechanische Bearbeitungsprozesse können zu sehr feinen Staubbelastungen führen.* In England wurden die PM_{10}-Emissionen für 1994 aus Quellen wie Gebäudeerstellungen und -abbruch, Renovation, Altanstrichentfernung aber auch Autobahnunterhalt auf 4000 Tonnen pro Jahr geschätzt [DOE 1999]. Auch aus der Kies- und Sandgewinnung sind PM_{10}-Emissionen möglich.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die PM_{10}-Belastung weitgehend von den mineralischen Baumaterialien ausgehen. Der Anfall an mineralischen Bauabfällen in Grossbritannien kann auf ca. 50 Mio. Tonnen/Jahr geschätzt werden [15]. Der Emissionsfaktor für mineralische Bauabfälle beträgt dann **80 mg PM_{10} pro kg mineralischer Bauabfall**. Dieser Wert wird in Ermangelung an detaillierteren Daten für alle Abtragungen von mineralischen Baustoffen eingesetzt d.h. bei Abbruch und Renovation [16].

---

14 Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von <10µm, welche dadurch gut lungengängig sind.

15 Die Schweiz erzeugt bei rund 6.9 Mio. Einwohnern 6 Mio. Tonnen mineralische Baubafälle. Für Grossbritannien kann bei 56.6 Mio. Einwohnern mit rund 50 Mio. Tonnen mineralischen Baubafällen gerechnet werden.

16 Die Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent der ETH Zürich kennt nur eine Kategorie Partikel, welche keine Grössenunterscheidung macht. Unterschieden werden jedoch die Quellen der Emissionen nach mobilen und stationären Verbrennungsquellen sowie prozesspezifischen Emissionen (Suffixe m, s, p). In der Zuordnung der Ökobilanz-Gewichtungsfaktoren (Eco-indicator95+, UBP) zu den Emissionen wurde für Ecoinvent entschieden, dass lediglich die mobilen und stationären Verbrennungsemissionen als PM_{10} zu werten sind und die prozesspezifischen Partikel-Emissionen durchwegs aus groben, nicht lungengängigen Partikeln bestehen. Diese Annahme steht im Widerspruch zur vorliegenden Information. Da hier prozessspezifische aber trotzdem lungengängige Partikel

Emissionen ins Wasser

Mulden oder Bauschutthalden, welche der Witterung ausgesetzt sind, werden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit natürlich beregnet werden. Zum Teil werden Bauabfälle auch künstlich berieselt, um einer Staubbildung vorzugreifen.

Erfahrungen aus der nassen Bauschuttaufbereitung zeigen, dass sich Schadstoffe in gewissem Masse auswaschen lassen und in der Grössenordnung von 5% – 20% in das Abwassersediment gelangen [Schachermayer et al. 1998, p.66]. Es scheint also wahrscheinlich, dass ein Teil der Schadstoffe auch bei einer vergleichsweise weniger intensiven Wäsche noch auf der Baustelle, während des Transports oder bei der Lagerung unkontrolliert ausgewaschen werden können und in die Umwelt gelangen. Bauschuttsortieranlagen besitzen jedoch auch Auffangbecken.

Die hier vermuteten Emissionen können nicht weiter quantifiziert werden und werden deshalb nicht bilanziert.

bilanziert und auch entsprechend gewichtet werden sollen, werden die Emissionen der Abbruchs als "Partikel s" (s für stationär) bilanziert, obwohl sie *nicht* aus einer stationären Verbrennung stammen, aber in Ecoinvent nur so korrekt gewichtet werden.

7. Sortiertechnologien

Bei Sortieranlagen für Bauschutt werden drei Typen unterschieden.

• *mobile Anlagen*

• *semi-mobile Anlagen*

• *stationäre Anlagen*

Mobile Anlagen werden in Gebieten mit geringem Bauschuttaufkommen eingesetzt, erzeugen aber nur relativ mindere Produktqualitäten. Der Betriebsstrom stammt aus Dieselaggregaten. Problematisch sind Lärm und Staubemissionen.

Semi-mobile Anlagen bestehen aus transportfähigen Einheiten und können je nach Aufwand eine bessere Produktequalität als mobile Anlagen liefern. Ansonsten treten die gleichen Nachteile wie bei mobilen Anlagen auf.

Stationäre Anlagen können durch differenzierte Anlagentechnik hochwertige Produktqualitäten erreichen. Problematisch kann hingegen der nicht immer gesicherte Absatz der Produkte in der Region sein. Lärm- und Staubemissionen können gemindert werden durch Einhausung und Bewässerung [Bilitewski et al. 1993, p.30ff.]. Bei kleinen Abrissvolumina ist allenfalls eine Zwischenlagerung des Abbruchgutes denkbar, solange bis eine wirtschaftlich verwertbare Menge Bauschutt zum Transport in eine Sortieranlage zusammengekommen ist [DAFSTB 1996, p.79].

Nutzen und Ziele von Sortieranlagen

Der Aufwand in den Sortieranlagen bemisst sich u.a. nach dem gewünschten Sortierergebnis. Die Sortierung von Baustellenabfällen kann aus zweierlei Motivationen erfolgen:

Kostenersparnis: Reduktion von Deponiekosten durch Aussortierung von brennbaren, mineralischen, metallischen Bestandteilen.

Ressourcenschonung: Gezielte Wiederverwertung einzelner Materialien: Die brennbare Fraktion wird weitersortiert in Holz, Kunststoffe, Karton. Die grobe mineralische Fraktion wird einer Bauschuttsortieranlage zugeführt zur Gewinnung von Zuschlagstoffen und Kiesersatz. [Wrage 1993, p.259]

Die Erzeugung von wiederverwertbaren Fraktionen verlangt eine bessere Trennleistung und somit einen höheren Aufwand als die Sortierung in Abfallkategorien. Die nötigen Produktqualitäten sind nicht ohne manuelle Sortierstufen erreichbar [Wrage 1993, p.262].

Störstoffe bei Sortieranlagen

Im folgenden werden in der Sortieranlage unerwünschte Stoffe aufgezählt, welche die Produktequalität der Sekundärbaustoffe und damit deren Verwertbarkeit mindert.

Glas

Alkalilösliche Silikate (Kieselsäure, H_2SiO_3) können in Betonzuschlag zu Alkali-Silikattreiben ("Alkalireaktion") führen. [DAFST 1996, p.151]. Das Alkali-Silikattreiben läuft langsamer ab als das Sulfattreiben (s.u.) und kann daher schwer vorausgesehen werden.

Chlorid

Chlorid (Cl^-) kann die Korrosion von Armierungseisen im Beton bewirken. Chlorid kann z.B. aus Tausalz in Alt-Strassenbeton stammen.

Sulfat

Sulfat (SO_4^{2-}) erzeugt Sulfattreiben. Beim Sulfattreiben werden Sulfatsalze (sog. Ettringitphasen) durch Kapillarwasser aus dem Betonkörper transportiert und oberflächennah auskristallisiert. Durch den Kristallisationsdruck kann der Beton verformen oder abplatzen. Sulfat kann z.B. aus Gipsprodukten stammen.

Wasseraufnahme (Quellfähige Bestandteile)

Die Wasseraufnahme von Betonzuschlag beeinflusst Betoneigenschaften (Druckfestigkeit, Verarbeitbarkeit, Frost-Tausalz-Widerstand). Stark saugendes Feinkorn <4mm kann diese Eigenschaften beeinträchtigen, was zu einem höheren Zementbedarf oder zur Verwendung verflüssigender Zusatzmittel bei der Herstellung führen kann [DAFST 1996, p.156]. Der Einsatz von netzmittelhaltigen Fliessmitteln und Verflüssigern kann ungünstige Folgen bei der Verarbeitung von (stark saugenden) Recyclingzuschlägen haben.

7.1. Aussortieren

In Sortieranlagen können grössere Fremdstoffstücke (z.B. Bleche, Masten, Fenster) vor dem Brechen aussortiert werden. Nach dem Brechen können kleinere Störstoffanteile durch verschiedene Verfahren abgetrennt werden (Windsichtung, Siebung, Handsortierung, Magnetabscheider, Wirbelstromabscheider). Manchmal wird das Material auch schon vor dem Brechen gesiebt.

7.2. Zerkleinern

7.2.1. Brechen

Sortiermaschinen zerkleinern das aufgegebene Sortiergut, um eine bessere Trennung zu erreichen. Es gibt verschiedene mechanische Brechverfahren. Beim verbreiteten **Prallbrecher** wird das Brechgut auf eine vertikal rotierende Konstruktion gegeben. Diese schleudert das Material mit hoher Wucht auf Prallplatten. Beim **Backenbrecher** wird das Brechgut zwischen einem feststehenden und einem rhythmisch bewegten "Kiefer" zermahlt.

7.2.2. Elektromechanische Zerkleinerungsverfahren

Elektromechanische Zerkleinerungsverfahren (Leistungsschallimpuls) können Beton sehr gut in den ursprünglichen Zuschlagstoff und Zementstein auftrennen. Dieses Verfahren ist jedoch aufgrund seines hohen Energiebedarfs (ca. 12 kWh/t Betonbruch) im Vergleich zu herkömmlichen mechanischen Zerkleinerungsmethoden (Prallbrecher: ca. 1.5 kWh/t Betonbruch) noch nicht konkurrenzfähig [Müller 1998, p.3].

7.3. Nasse Verfahren

Zur Zeit wird vorrangig die konventionelle Trockenaufbereitung von Bauschutt mit Hilfe verschiedener Windsichttechnologien in Kombination mit Überbandmagneten o.ä. durchgeführt. Dies liegt in erster Linie daran, dass kein Wasserkreislauf und somit auch keine Schlammaufbereitung erforderlich ist. Bei der Trockenaufbereitung ergeben sich allerdings z.T.

Probleme, wenn eine hohe Qualität erreicht werden soll. So ist der Trennerfolg vor allem vom Feuchtigkeitsgehalt des Materials abhängig und der Anteil an Störstoffen liegt nach der Aufbereitung häufig noch in Grössenordnungen vor, die einen hochwertigeren Einsatz weitgehend ausschliessen. Zusätzlich stellt sich das Problem von z.T. unerwünschten Feinstkornanhaftungen. Demgegenüber zeigen sich Vorteile bei der Nassaufbereitung. Sie bietet eine annähernd 100%ige Störstoffentfernung, ist feuchtigkeitsunabhängig und es ergeben sich keine Probleme durch Feinstkornanhaftungen [Mesters et al. 1997].

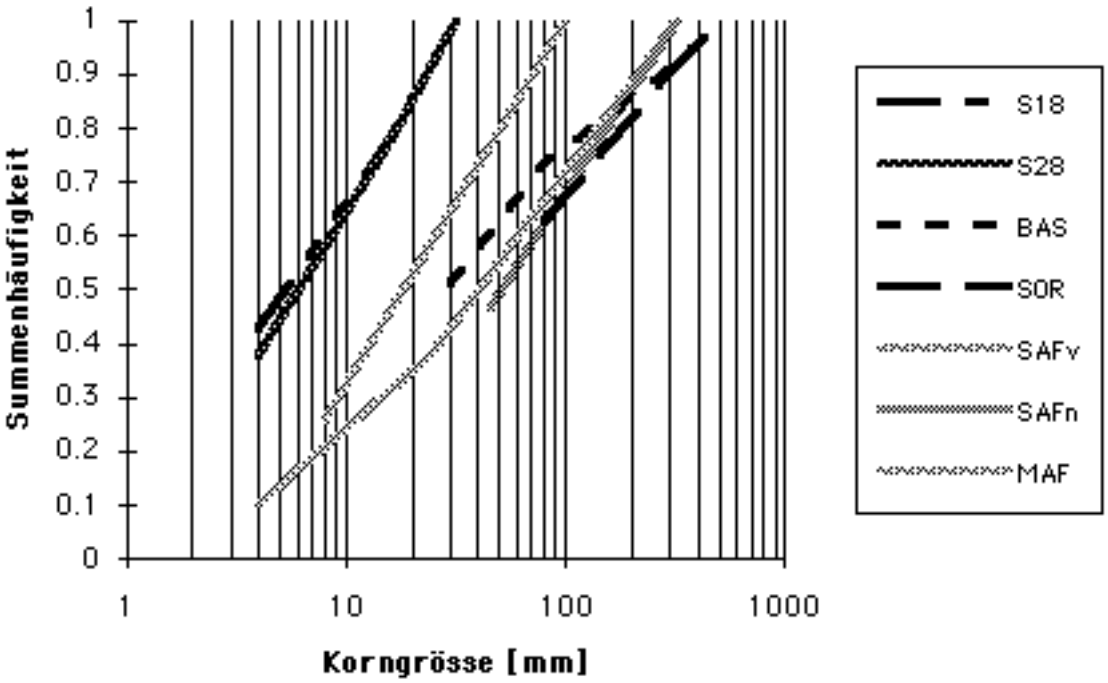
7.3.1. Dichtesortierung

Die aus dem Bergbau bekannte Dichtesortierung wurde in deutschen Pilotprojekten für Bauschutt angewendet. Bei der Technologie der Dichtesortierung wird das Rohmaterial in eine Setzmaschine aufgegeben. Durch pulsierendes Wasser werden die einzelnen Körner in Schwebe gebracht. Als Folge der Pulsation schichtet (d.h. "setzt") sich das Stoffgemisch nach der Dichte des eingebrachten Materials, d.h. schwere Partikel reichern sich im unteren Bereich des Wasserbades an, während sich leichte Partikel im oberen Teil anreichern. Das aufschwimmende Material (Störstoffe wie Holz, Papier, Porenbeton u.ä.) kann unmittelbar an der Wasseroberfläche abgezogen werden, das schwere und leichte Material durch zwei untereinanderliegende Ausläufe nach schweren und leichten Fraktionen entsprechend getrennt werden. Der anfallende Schlamm, der Sand und das Leichtgut nach der 1. Trennstufe machen rund 30% aus [Mesters et al. 1997].

7.4. Sortiercharakteristik von Sortieranlagen

Sortieranlagen setzen verschiedene Sortierverfahren ein. Das Ziel ist eine möglichst gut verwertbare Kiesfraktion ohne Störstoffe zu erhalten. Parallel fällt dabei eine mehr oder weniger grosse Feinfraktion an, in welcher die Schadstoffe wie Schwermetalle und Störstoffe wie Zement, Putz und Gips konzentriert sind. D.h. die Feinfraktion ist oft stark belastet und kann nicht verwertet werden. Verschiedene Hypothesen zu den Gründen, weshalb sich Schadstoffe in der Feinfraktion konzentrieren finden sich im Anhang D.

Da die Menge der produzierten Feinfraktion die Verwertungsquote bestimmt, interssiert für diese Studie die Korngrössenverteilung der produzierten mineralischen Outputstoffe. Aus verschiedenen Literaturquellen wurden die typischen Werte für verschiedene Anlagen zusammengestellt (s. Abbildung 11). Die stationären Verfahren sind recht ähnlich. Die feuchten Verfahren erzeugen einen geringeren Anteil Feinstoffe.



S18	[Schachermayer et al. 1998, p.18]	feuchte Bauschutt Sortieranlage
S28	[Schachermayer et al. 1998, p.29]	feuchte Bauschutt Sortieranlage
BAS	[Schachermayer et al. 1998, p.50]	trockene Bausperrgut Sortieranlage BASORAG
SOR	[Schachermayer et al. 1998, p.53]	trockene Bausperrgut Sortieranlage SORTAG
SAFv	[Rentz et al. 1997, p.165/171]	stationäre Sortieranlage, Siebfraktionen vor Brecher
SAFn	[Rentz et al. 1997, p.165/171]	stationäre Sortieranlage, Siebfraktionen nach Brecher
MAF	[Rentz et al. 1997, p.171]	mobile Sortieranlage

Abb. 11 Korngrössenverteilungen von mineralischen Fraktionen von verschiedenen Sortieranlagen.

Die Feinfraktion 0–8mm von sortiertem Bau*schutt* muss aufgrund des Schadstoffgehaltes in einer Reaktordeponie entsorgt werden [Staub 1999]. Dies sind rund 30G-% des trocken sortierten Bauschutts. Diese Angabe stimmt auch mit [DAFST 1996, p.148] überein. Wenn vermischtes Bau*sperrgut* entsorgt wird, muss die Feinfraktion 0–30mm entsorgt werden [Staub 1999]. Dies entspricht etwa 40-60% des sortierten Bausperrguts.

7.5. Ökoinventar Sortieranlagen

Energiebedarf von Sortieranlagen

In [DAFSTB 1996, p.123] wird für die durchschnittlich zu erwartenden Betriebskosten einer *stationärer* Bauschuttsortieranlage bei einer Bearbeitungsmenge von 200 kt/a mit einem Elektrizitätsverbrauch von 535'700 kWh/a, also **9.6 MJ_{el}/t** gerechnet. Dazu kommen für Radlader zur Beschickung und Verladung 740'600 MJ Diesel, also **3.7MJ_{th}/t.**

Der relativ häufig eingesetzte Prallbrecher benötigt allein bereits 5.4 $MJ_{el.}/t$, also rund 56% der oben berechneten elektrischen Betriebsenergie der gesamten Anlage. Eine elektromechanische Schallimpulszerkleinerung (hier nicht angenommen) benötigt dagegen das 8fache des Prallbrechers, 43.2 $MJ_{el.}/t$ [Müller 1998, Kap.3].

In [Bilitewski et al. 1993, p.60ff.] werden wirtschaftliche Kostenrechnungen für *mobile und semimobile* Baureststoff-Sortieranlagen aus [Offermann 1988] vorgestellt. Sie enthalten auch Angaben über Energiekosten (Preisbasis 1987/88).

	Semimobile Anlage:	*Mobile Anlage:*
Durchsatzbereich	50 bis 120 t/h	50 bis 100 t/h
Spezifische Kosten	10 bis 6.70 DM/t	9.50 bis 7.50 DM/t
davon Energiekosten	40 bis 27Pf/t	29 bis 60Pf/t
Annahme Energiepreis	10Pf/kWh (Netz-Elektrizität)	0.97 DM/l (Diesel 36 $MJ_{th.}$/l)
Spezifischer Energie-verbrauch	**14.4 $MJ_{el.}$/t bis 9.7 $MJ_{el.}$/t**	**10.8 MJ_{th}/t bis 22.3 MJ_{th}/t**

Tab. 8 *Spezifische Energiekosten und -verbrauch für semimobile und mobile Bausperrgut-Sortieranlagen [Offermann 1988]. Annahme: Volle Auslastung der Anlage.*

Vergleich mit anderen Prozessen: Die gefundenen elektrischen Betriebsenergieverbräuche in der Grössenordnung von 10 $MJ_{el.}$/t liegen einiges unter den Energieverbräuchen einiger vergleichbarer Prozesse aus der Baustoffherstellung, wie z.B. stückigen Kalkstein mahlen (68 $MJ_{el.}$/t), Kalkstein brechen und verpulvern (372 $MJ_{el.}$/t), natürlichen Anhydrit brechen (230 $MJ_{el.}$/t). Andere vergleichbare Prozesse liegen jedoch in einer ähnlichen Grössenordnung, so z.B. Gipsrohstein brechen (5.3 $MJ_{el.}$/t), Bruchkies waschen, sieben und sortieren (5.8 $MJ_{el.}$/t), Flusskies aufbereiten (12 $MJ_{el.}$/t), Rohbraunkohle fördern und sortieren (2.2 $MJ_{el.}$/t) [ESU 1995, p.6.4ff.; ESU 1996a, p.VI.27].

Der elektrische Betriebsenergieverbrauch wird für Sortieranlagen zu **10 $MJ_{el.}$/t** festgelegt und als Mittelspannungsstrom Schweiz inkl. Importe verbucht. D.h. es werden stationäre Anlagen betrachtet. Es wird angenommen, dass der Stromverbrauch vor allem durch das Brechen und die dem Brechen nachgelagerten Prozesse verursacht wird (Siebung, Sortierstrassen). Der Betriebsenergieverbrauch wird daher nur für Materialien verbucht, welche nicht vor dem Brecher aussortiert werden.

Vorsortierung

In stationären Sortieranlagen werden grössere, sperrige Fremdstoffe (z.B. Bleche, Masten, Fenster) vor dem Brechen aussortiert. Nach dem Brechen können kleinere Störstoffanteile durch verschiedene Verfahren abgetrennt werden (Windsichtung, Siebung, Handsortierung, Magnetabscheider).

Es wird angenommen, das die schweren Teile vor dem Brechen mit einem Bagger entfernt werden. Es wird geschätzt, dass eine Baggerbewegung Teile von durchschnittlich 100kg Holz resp. 200kg Metall bewegt und eine Baggerbewegung etwa 15 Sekunden dauert. Pro Kilogramm Holz resp. Metall sind also 0.15 resp. 0.075 Sekunden Baggerbetrieb nötig [17].

Auf- und Ablad

Der Ablad der Abfälle und der Auflad des Sortierguts erfolgt durch Frontladerraupen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ladebewegungen des Baggers seinen hauptsächlichen Energieverbrauch verursachen und das Gewicht der gehobenen Güter einen untergeordneten Einfluss hat. Somit spielt die Dichte der gehobenen Güter eine Rolle. Eine Baggerschaufel dichtes Material verursacht *pro Kilogramm* weniger Energieverbrauch als eine Baggerschaufel

17 Der in Ecoinvent bilanzierte Hydraulikbagger hat eine funktionale Einheit von "m^3 bewegter Aushub", welche einer Betriebsdauer von 24 Sekunden/m^3 entspricht [ESU 1996b, p.B.55] .

leichtes Material. Die Angaben in [ESU 1996a, p.B.55] beziehen sich auf Aushub und werden unten auf andere Materialien umgerechnet.

Material	*Dichte kg/m3*	*Leistung Sek/kg*	
Ausub	1900	0.0126	durchschnittliche Leistung in [ESU 1996a]
Beton	2300	0.0104	extrapoliert nach Dichte
Leichtbeton	600	0.04	extrapoliert nach Dichte
Gips	1000	0.024	extrapoliert nach Dichte
Backstein	1600	0.015	extrapoliert nach Dichte
Glas	2600	0.0092	extrapoliert nach Dichte

Tab. 9 *Ladezeit für je 1kg Auf- oder Abladmaterial. 1 Sekunde Baggerbetrieb entspricht 0.0416 m^3 bewegten Aushubs oder 0.246 MJ Diesel [ESU 1996a].*

Betriebsgebäude

Neben der Abfallbehandlung wird Energie für das Betriebsgebäude benötigt. Hier werden die entsprechenden Angaben für eine Reaktordeponie bilanziert. Es werden 0.54 MJ Strom und 1.62 MJ Brennstoffe pro Tonne für das Betriebsgebäude verbraucht [ESU 1996b]. Es wird Niederspannungsstrom Schweiz inkl. Importe. bzw. "Heizöl EL in Heizung 10 kW" verbucht.

Flächenbeanspruchung

Die Minimalfläche für eine stationäre Bauschuttaufbereitungsanlage mit 100kt/a beträgt 10'000 m^2 [Bilitewski et al. 1993, p.57]. Für die durchschnittlich zu erwartenden Betriebskosten einer stationärer Bauschuttsortieranlage wird mit einer Produktionsmenge von 200 kt/a mit einer Betriebsfläche von 15'000 m^2 gerechnet [DAFSTB 1996, p.123].

Wird eine Betriebsdauer von 50 Jahren mit nachfolgender Rekultivierung angenommen, ergeben sich für die durchschnittlichen Angaben folgende Flächenbeanspruchungen:

Flächenbeanspruchung II-IV: 0.075 m^2a/t

Flächenbeanspruchung IV-III: 0.0075 m^2a/t

Flächenbeanspruchung III-II: 0.0675 m^2a/t

Emissionen Luft

Neben den Verbrennungs-Emissionen der dieselbetriebenen Geräte ergeben sich auch Staubemissionen durch die sortierten Baumaterialien. Diese Stäube können durchaus auch die lungengängige und damit gesundheitsrelevante Grösse von <10µm (PM_{10}) erreichen. Diese Emissionen können hier nicht quantifiziert werden [18].

18 PM10-Emissionen des Abbruchs werden im entsprechenden Kapitel berücksichtigt.

Zusammenstellung:

	Bilanzierte Prozesse für vorsortierte Materialien	Bilanzierte Prozesse für vorsortierte Materialien, welche den Brecher durchlaufen
Ablad	*Frontladerraupen gemäss Dichte*	*Frontladerraupen gemäss Dichte*
Vorsortierung	*Frontladerraupen gemäss Dichte*	–
Brechen	–	Strom und Diesel
Auflad	–	*Frontladerraupen gemäss Dichte*
Betriebsgebäude (Infra)	Strom und Brennstoffe	Strom und Brennstoffe
Flächenbeanspruchung (Infra)	Gelände	Gelände

Tab. 10 *Überblick über die bilanzierten Prozesse für vorsortierte und gebrochene und nachsortierte Materialien. Kursive Prozesse können materialspezifisch unterschiedlich ausfallen.*

8. Entsorgungstechnologien

8.1. Beseitigung

In der vorliegenden Arbeit wird die Entsorgung einzelner Baumaterialien aufgrund ihrer Zusammensetzung spezifisch bilanziert. Die Bilanz-Modelle der verschiedenen Entsorgungstechnologien sollten daher auf verschiedenste Abfallzusammensetzungen anwendbar sein.

8.1.1. KVA

Die Inventarisierung der KVA wurde gemäss [ESU 1996b] und der Modellanpassung gemäss [Hellweg et al. 1998] durchgeführt. Berücksichtigt werden der Transport zu KVA, Behandlung der Rohgase in der weitergehenden Rauchgas-Reinigung (WRR), Entsorgung der anfallenden Schlacke in einem Schlackenkompartiment sowie Entsorgung der Reststoffe (Kesselasche, Elektrofilterasche, Schlämme aus der Abwasserbehandlungsanlage (ABA)).

Die Mengen und die Zusammensetzung der anfallenden Outputstoffe (Reinluft, Schlacke, Kesselasche, Elektrofilterasche, Abwasserschlamm, Abwasser) wurde für verschiedene chemische Elemente *i* gemäss der spezifischen Abfallzusammensetzung *c* und aufgrund von elementaren Transferkoeffizienten in der KVA *TK* berechnet. Bei **inerten, unbrennbaren Abfallstoffen** (z.B. Glas, Keramik, Metallen) wird angenommen, dass der Abfall vollständig in die Schlacke überführt wird. Die Zusammensetzung von durchschnittlichem Abfall $c_{Ø,i}$ und die durchschnittlichen Transferkoeffizienten der KVA $TK_{Ø,output,i}$ sind bekannt. Ebenfalls bekannt ist die Zusammensetzung von brennbaren Abfällen $c_{brennbar,i}$ (Papier, Biomasse Kunststoffe etc.) und deren Anteile am durchschnittlichem Abfall. Aufgrund der Masseerhaltung gilt :

$$c_{Ø,i} * TK_{Ø,output,i} = c_{inert,i} * TK_{inert,output,i} + c_{brennbar,i} * TK_{brennbar,output,i}$$

Da auch die Zusammensetzungen der inerten Abfälle $c_{inert,i}$ bekannt sind, können die *angepassten Transferkoeffizienten für brennbare Abfälle* $TK_{brennbar,output,i}$ berechnet werden.

Die Bilanz erfolgt aufgrund der Zuordnung eines Abfallstoffes als entweder inerter (unbrennbarer) Abfall oder als brennbarer Abfall. Je nachdem werden verschiedene Transferkoeffizientensätze ($TK_{inert,output,i}$ oder $TK_{brennbar,output,i}$) angewendet.

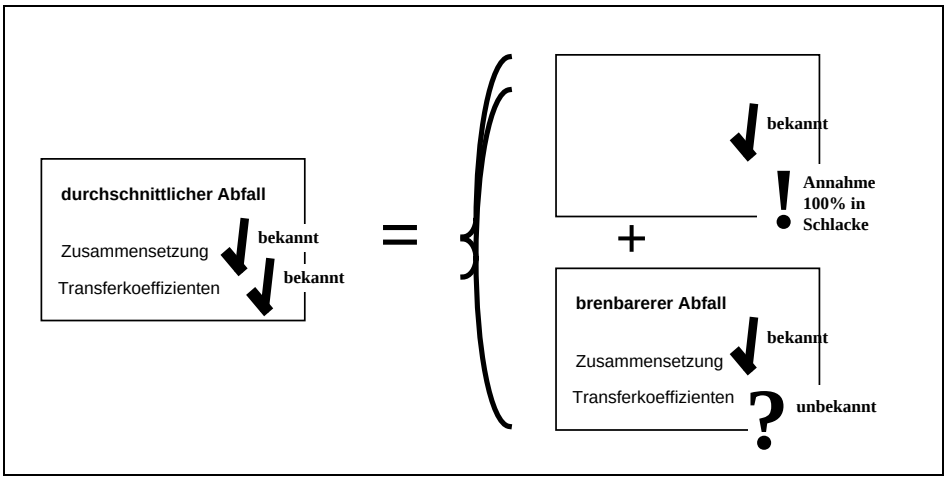


Abb. 12 *Darstellung der Ableitung der elementaren Transferkoeffizienten für brennbare Abfälle in der KVA ("unbekannt") aus bekannten oder plausibel angenommenen Grössen.*

	Reinabluft	Schlacke	Kesselasche	Elektrofilter-asche	Abwasser	ABA-Schlamm
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
O	917	69.8	2.04	10.2	0	0.981
H	1000	0	0	0	0	0
C	994	4.51	0.304	1.01	0.0971	0.0971
S	76.3	254	160	213	256	40.9
N	989	10	0	0	0.96	0
P	2.96	880	20	50	0.96	46.1
Cl	43.2	17.3	10.8	151	767	10.4
Br	16.4	10	20	800	9.6	144
F	12.4	430	100	400	9.6	48
As	2.56	550	30	380	0.096	37.4
Ba	1.36	880	10	100	0	8.64
Cd	15.4	30.8	77.1	770	1.06	106
Co	0.896	850	10	120	0.0096	19.2
Cr	2.86	455	31.9	446	3.06	61.2
Cu	3.35	798	49.2	123	2.36	23.6
Hg	130	5.74	2.09	262	10	591
Mn	0.496	860	10	120	0.0096	9.6
Ni	1.26	591	25.4	355	2.44	24.4
Pb	4.75	70.1	204	650	0.178	71.3
Sb	7.58	16	18.2	820	0.175	138
Se	14.6	80.1	130	707	0.113	67.9
Sn	2.6	496	19.9	451	0.0127	30.6
V	0.496	890	10	90	0.0096	9.6
Zn	5.75	180	114	637	0.157	62.7
Si	0.317	834	23.3	140	0.00223	2.23
Fe	0.454	896	33.4	66.8	0.0032	3.2
Ca	0.227	881	33.3	83.4	0.0016	1.6
Al	0.212	795	31.2	172	0.0015	1.5
K	0.498	749	30.1	211	1.93	7.72
Mg	0.708	780	29.7	180	6.78	3.01
Na	1.2	764	28.2	188	13.5	4.52

Tab. 11 ***Transferkoeffizienten für brennbare Abfälle*** *für den bilanzierten KVA-Technologiestand (96% mit WRR, 4% ohne WRR). Auf 3 Stellen gerundet .*

	Reinabluft	Schlacke	Kesselasche	Elektrofilter-asche	Abwasser	ABA-Schlamm
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
alle Elemente	0	1000	0	0	0	0

Tab. 12 ***Transferkoeffizienten für inerte Abfälle***

Die festen Abprodukte (inkl. ABA-Schlamm) werden deponiert. Die Auswirkungen in der Deponie werden aufgrund der effektiv aus dem bilanzierten Abfall anfallenden Zusammensetzung bilanziert, d.h. Schlacke und Reststoffzusammensetzungen werden *abfallspezifisch* bilanziert.

8.1.2. Technologiestand

Der Technologiestand der KVA wird auf den durchschnittlichen Technologiestand der schweizerischen KVAs abgestützt. Die in der Tabelle unten gezeigten durchschnittlichen Anteile für das Jahr 1995 werden für die Bilanzierung verwendet. Der Anteil der KVAs mit Eisenabscheidung beträgt 40%.

Gewählter Technologie-Mix:	**CH ø 1995**
Anteil KVAs ohne WRR	4%
Anteil KVAs mit WRR	96%
% davon ohne DeNOx	56%
% davon mit SNCR	25%
% davon mit SCR-Low Dust	10%
% davon mit SCR-High Dust	9%

Tab. 13: Durchschnittliche Verteilung des Technologiestandes bei den hier bilanzierten KVAs nach [ESU 1996b].

8.1.3. Weitergehende Rauchgasreinigung der KVA (WRR)

Die Aufwendungen in der WRR werden gemäss den effektiv im Rohgas bzw. in der ABA anfallenden Mengen bilanziert, d.h. ein stickstoffhaltiger, unbrennbarer Abfall belastet z.B. die DeNOx-Anlage weniger, als ein brennbarer Abfall. Der Stickstoff gelangt in diesem Fall vor allem in die Schlacke. Cadmium in einem Kunststoff führt zu einem Verbrauch an Schwermetallfällungsmittel (TMT) in der ABA; Cadmium in einer Legierung nicht. Ausführliche Beschreibungen der Methode und der Daten sind in [ESU 1996b] nachzuschlagen.

Emissionen kg N-Verbindung pro kg N im Rohgas		
Stickstoffgas, N_2	kg / kg N	0.976
Brennstoff-NO_x als NO_2	kg / kg N	0.0712
Lachgas, N_2O	kg / kg N	0.00387
Cyanid, CN	kg / kg N	0.000762
NH_3-Schlupf	kg / kg N	0.000419
DeNOx-Betriebsstoffe pro kg N im Rohgas		
Ammoniak	kg / kg N	0.11
Erdgas	MJ / kg N	1.94

Tab. 14: Spezifische Aufwendungen und Emissionen der DeNOx-Anlage, welche dem Anteil Brennstoffstickstoff im Abfall, der ins Rohgas gelangt zugeteilt wurde; nach [ESU 1996b].

Stoff	Allokationsgrösse	spezifischer Verbrauch g unverdünnter Stoff pro g Allokationsgrösse
Natronlauge, NaOH	S in der ABA	2.5
	N in der ABA	0.478
	P in der ABA	0.432
	Cl in der ABA	0.189
	Br in der ABA	0.0837
	F in der ABA	0.352
Gebrannter Kalk, CaO	N in der ABA	2.69
	P in der ABA	2.43
	Cl in der ABA	1.06
	Br in der ABA	0.471
	F in der ABA	1.98
TMT*	Hg in der ABA	3.54
	Cd in der ABA	6.31
Salzsäure, HCl	Alle Elemente in der ABA	0.00191
Polyelektrolyt*	Alle Elemente in der ABA	0.00319
Eisenchlorid, $FeCl_3$**	Alle Schwermetalle in der ABA	0.58

*Tab. 15: Abfallspezifisch zugeteilte Betriebsstoffaufwendungen in der WRR; nach [ESU 1996b]. *) Bilanzierung als "organische Chemikalien", **) Bilanzierung als "anorganische Chemikalien".*

8.1.4. Weitere Betriebsstoffe

Falls ein Abfall rezyklierbares Eisen enthält, wird dieses bei 40% der KVAs aus der Schlacke abgeschieden. Der Stromverbrauch für die Abscheidemagneten beträgt gemäss [ESU 1996b] 0.125MJ/kg abgeschiedenes Eisen.

Nicht produktspezifisch zugeteilte Emissionen und Aufwendungen in der KVA werden pauschal pro Kilogramm Abfall verbucht. Als prozessspezifische Emissionen werden verschiedene Verbindungen bilanziert, deren Entstehen bei der Verbrennung nicht oder nicht eindeutig einem einzelnen chemischen Element im Abfall zugordnet werden können oder welche stark von der Verbrennungstechnik abhängen. Dies sind insbesondere Kohlenmonoxid, thermisch gebildete Stickoxide und Dioxine. Die prozessspezifischen Aufwendungen sind der Wasserverbrauch sowie die Aufwendungen in der DeNOx-Anlage, die durch thermisch gebildetes Stickoxid verursacht werden (s. Tab. 16).

Prozessspezifische Emissionen KVA CH ø 1995		… pro kg Abfall	Verknüpfung in EcoInvent
Kohlenmonoxid; CO	g	0.185	CO Kohlenmonoxid s
Methan; CH_4	g	0.00666	CH4 Methan s
Nicht-Methan VOC; NMVOC	g	0.0403	NMVOC s
Thermisches NO_x	g	0.704	NOx Stickoxide als NO2 s
NH_3-Schlupf wegen thermischem NO_x	g	0.00415	NH3 Ammoniak s
Benzol	g	0.000443	Benzol s
Toluol	g	0.000889	Toluol s
Pentachlorbenzol	g	0.00000271	Pentachlorbenzol s
Hexachlorbenzol; HCB	g	0.00000063	Hexachlorbenzol HCB s
Pentachlorphenol; PCP	g	0.000000449	Pentachlorphenol PCP s
Benz(a)pyren	g	1.02E-08	BaP Benzo(a)pyren s
Dioxine, Furane; PCDD/F in ng TEQ	ng	24.2	TCDD-Aequivalente
Abwärme aus DeNOx-Erdgas (th.NO_x)	MJ	0.0192	Abwaerme in Luft p
Prozessspezifische Betriebsstoffe		… pro kg Abfall	
Wasserverbrauch	g	980	Wasser
Ammoniak wegen thermischem NO_x	g	1.08	Ammoniak
Erdgas wegen thermischem NO_x	MJ	0.0192	Erdgas HD-Abnehmer Euro

Tab. 16: Prozessspezifische Emissionen und Aufwendungen pro Kilogramm Abfall für den verwendeten Technologiestand Schweiz 1995; nach [ESU 1996b].

Ebenfalls pauschal pro Kilogramm Abfall werden die Infrastrukturaufwendungen der KVA in der Bilanz angelastet.

Prozessspezifische Infrastruktur		… pro kg Abfall	
Stahl	g	1	[s. unten]
hochlegiert	g	0.02	Stahl hochlegiert
unlegiert	g	0.98	Stahl unlegiert
Beton	g	10	Beton (ohne Armierungseisen)
Bitumen	g	0.0002	Bitumen ab Raffinerie UCPTE
Kies, Sand	g	2.5	Sand fuer Bau
Flächenbeanspruchung	m^2a	0.0000169	Flaeche II-IV
(Baufläche: 50% Kat.II; 50% Kat.III)	m^2a	0.0000169	Flaeche III-IV

Tab. 17: Bilanzierte Infrastrukturaufwendungen in der KVA pro Kilogramm Abfall nach [ESU 1996b].

8.1.5. Reststoffdeponie

Gemäss [TVA 1996] muss die Zusammensetzung der auf Reststoffdeponien zugelassenen Abfälle zu 95% der Trockensubstanz (TS) bekannt sein. Sie müssen zudem weniger als 0.5% organischen Kohlenstoff (TOC) und weniger als 0.5% lösliche Anteile enthalten. Die Abfälle sollen eher alkalisch oder säureresistent sein.

Die aus der KVA stammenden Reststoffe (Kesselasche, Elektrofilterasche, ABA-Schlamm) werden mit 0.6 kg Zement und 0.4 kg Wasser pro Kilogramm Reststoff verfestigt und dann in die Deponie transportiert.

Produktspezifische Auswirkungen

Aus den angegebenen Zusammensetzungen der eingelagerten Abfälle werden mittels der *durchschnittlichen* elementaren Transferkoeffizienten die Emissionen ins Sickerwasser berechnet (i.e. die Transferkoeffizienten der Reststoffdeponie werden nicht produktspezifisch angepasst). Es wird unterschieden zwischen Emissionen während der überwachten Phase der Deponie (40 Jahre) und dem maximal möglichen Emissionspotential. Die nach der überwachten Phase folgenden Langzeit-Emissionen (LT; *long term*) werden in einem separaten Datenmodul ausgewiesen. Die Transferkoeffizienten für die überwachte Phase stammen aus Berechnungen mittels Exponentialansatz und gemessenen Sickerwasserkonzentrationen. Das maximale Potential wurde aus Auslauge-Experimenten (sog. Availability-Test) abgeleitet [ESU 1996b].

Die Entstehung von Luftemissionen wird als vernachlässigbar eingestuft. Eine Sickerwasserbehandlung während der überwachten Phase wird nicht betrachtet.

Transferkoeffizienten, g/kg	überwachte Phase <40 Jahre	maximales Potential
O	0	0
H	0	50
C	5.84	1000
S	19.5	1000
Cl	274	1000
F	21.3	1000
Cd	0.06	438
Cr	1.17	35
Cu	0.227	223
Hg	0.02	300
Pb	0.022	115
Zn	0.01	420
Fe	0	35
Ca	0.28	450

Tab. 18: In dieser Studie verwendete elementare Transferkoeffizienten der Reststoffdeponie nach [ESU 1996b]. Auf 3 Stellen gerundet.

Prozessspezifische Aufwendungen

Diese Aufwendungen werden für alle Abfälle pauschal pro Kilogramm und unabhängig von ihrer Zusammensetzung bilanziert. Es handelt sich einerseits um Materialeinsatz und Dienstleistungen zur Bereitstellung der Infrastruktur der Deponie (Tab. 19); andererseits um Aufwendungen während des Betriebs der Deponie (Tab. 20). Die Flächenbeanspruchung wird nicht als Infrastrukturaufwendung verbucht, da sie effektiv durch das bilanzierte Produkt erfolgt. Dies im Gegensatz zu anderen technischen Anlagen, bei denen die behandelten Produkte im Durchfluss bearbeitet werden und die Flächenbeanspruchung durch die Infrastruktur alleine erfolgt.

Infrastrukturaufwendungen für die Reststoffdeponie pro kg Reststoff		
Diesel in Baumaschinen	TJ/kg	2.2E-09
Aushub Frontlader (Raupe pro m^3)	m^3/kg	0.000156
Aushub Hydraulikbagger (Bagger pro m^3)	m^3/kg	0.000156
Transport LKW 16 t	tkm/kg	0.0136
Betonkies (Schotter)	kg/kg	0.18
Bitumen ab Raffinerie CH (aus Bitumenbeton)	t/kg	0.00000398
PE HD (Kunststoff (HDPE))	kg/kg	0.000263
Stahl niedriglegiert (Betonarmierung)	kg/kg	0.000493

Tab. 19: Eingabedaten für die spezifischen Infrastrukturaufwendungen der Reststoffdeponie pro Kilogramm Deponiegut nach [ESU 1996b].

Prozesspezifisches Reststoffdep. pro kg		
Diesel in Baumaschine	TJ/kg	0.000000027
Heizoel EL in Heizung 10 kW	TJ/kg	1.62E-09
Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ/kg	5.4E-10
Abwaerme in Luft p	TJ/kg	5.4E-10
Transport LKW 16 t	tkm/kg	0.05
Flaeche II-IV	m^2a/kg	0.00219
Flaeche II-III	m^2a/kg	0.00313
Deponiebeanspruchung UBP	UBP/kg	500

Tab. 20: Eingabedaten für die prozessspezifischen Aufwendungen der Reststoffdeponie pro Kilogramm Deponiegut nach [ESU 1996b].

8.1.6. Schlackenkompartiment

Die Schlacke wird in der KVA mittels Elektromagneten von massiven Eisenteilen befreit und gelangt in das Schlackenkompartiment einer Deponie. Das Schlackenkompartiment wird methodisch ähnlich wie die Reststoffdeponie behandelt.

Prozessspezifische Aufwendungen

Diese Aufwendungen werden für alle Abfälle pauschal pro Kilogramm und unabhängig von ihrer Zusammensetzung bilanziert. Es handelt sich einerseits um Materialeinsatz und Dienstleistungen zur Bereitstellung der Infrastruktur der Deponie; andererseits um Aufwendungen während des Betriebs der Deponie. Wie bereits bei der Reststoffdeponie erwähnt, wird die Flächenbeanspruchung nicht als Infrastrukturaufwendung verbucht, da sie effektiv durch das bilanzierte Produkt erfolgt.

Infrastrukturaufwendungen Schlackekompartiment pro kg Schlacke		
Diesel in Baumaschinen	MJ/kg	0.00172
Betonkies (Schotter)	kg/kg	0.129
Bitumen ab Raffinerie CH (für Bitumenbeton)	kg/kg	0.00283
Beton	kg/kg	0.01788
Stahl niedriglegiert (Bewehrung 2% des Betons)	kg/kg	0.00036
PE HD (Kunststoff (HDPE))	kg/kg	0.000348
Transport LKW 16 t	tkm/kg	0.00966
Aushub Frontladerraupe	m^3/kg	0.000114
Aushub Hydraulikbagger	m^3/kg	0.000114

Tab. 21: Aufwendungen der Infrastruktur im Schlackenkompartiment pro Kilogramm eingelagerte Schlacke

Aufwand			Ecoinvent-Modul
Verteilung/Einwalzen	MJ/kg	0.027	Diesel in Baumaschine
Heizung	MJ/kg	0.00162	Heizoel EL in Heizung 10 kW
Stromverbrauch	MJ/kg	0.00054	Strom Niederspannung - Bezug in UCPTE
Abwärme aus Stromverbrauch	MJ/kg	0.00054	Abwaerme in Luft p
Transport zur Deponie	tkm/kg	0.04	Transport LKW 16 t
Flächenbeanspruchung Bau- , Betriebs- und Abschlussphase	m^2a/kg	0.00156	Flaeche II-IV
Flächenbeanspruchung Rekultivierungsphase	m^2a/kg	0.00222	Flaeche II-III
Deponiebenaspruchung UBP	UBP/kg	500	

Tab. 22: Prozessspezifische Aufwendungen im Schlackenkompartiment pro Kilogramm eingelagerte Schlacke

Mittels der produktspezifischen Transferkoeffizienten in der KVA wird eine produktspezifische Schlacke berechnet. Die direkten Emissionen aus der entsorgten Schlacke werden mittels *durchschnittlichen* Tansferkoeffizienten für das Schlackenkompartiment berechnet (i.e. die Transferkoeffizienten des Schlackenkompartimentes werden nicht produktspezifisch angepasst). Analog zur Reststoffdeponie werden kurzfristige und langfristige Emissionen gesondert ausgewiesen. Die kurzfristigen Emissionen des Schlackenkompartimentes treten während der überwachten Phase von 75 Jahren auf. Die danach auftretenden Emissionen werden als Langzeit-Emissionen in einem gesonderten Datenmodul (Präfix "LT") verbucht. Die Entstehung von Luftemissionen wird als vernachlässigbar eingestuft. Eine Sickerwasserbehandlung wird nicht betrachtet.

Transferkoeffizienten, g/kg	überwachte Phase <75 Jahre	maximales Potential
O	0	0
H	0	50
C	2.83	50
S	82.6	1000
N	220	1000
Cl	946	1000
Cd	4.15	330
Cr	0.14	35
Cu	0.043	225
Hg	32.8	300
Pb	0.083	5
Zn	0.067	340
Fe	0.0058	35
Ca	5.53	450

Tab. 23: In dieser Studie verwendete elementare Transferkoeffizienten des Schlackenkompartimentes nach [ESU 1996b]. Auf 3 Stellen gerundet.

8.1.7. Reaktordeponie

Grundlagen

Die Inventarisierung der Reaktordeponie wird gemäss der Arbeit [ESU 1996b] durchgeführt. Zur abfallspezifischen Berücksichtigung der Auswirkungen werden Transferkoeffizienten aus Berechnungen und Availability-Tests verwendet (analog zum Vorgehen bei den anderen Deponien). Aufgrund der Abbaubarkeit eines Abfalles wird entschieden, ob er vor allem in der überwachten Phase oder dannach abgebaut wird. Abbau während der überwachte Phase führen zu Luft- und Sickerwasseremissionen. Abfälle, die nur sehr langsam abgebaut werden führen dagegen vor allem zu langfristigen Sickerwasseremissionen (*long term emissions*; LT).

Die berücksichtigten Auswirkungen sind in Fig. F 4.1 dargestellt. Sie beinhalten die Behandlung der Sickerwassermengen der überwachten Phase in der ARA (2° Prozess), die Entsorgung des daraus entstehenden Klärschlamms in der Landwirtschaft (49%) bzw. Verbrennung in der KVA (51%) sowie die Emissionen aus der Deponierung der Schlacke und Reststoffe aus der Klärschlammverbrennung (4° Prozess). Die Entsorgung von Klärschlamm in der Reaktordeponie (als 3° Prozess) wird vernachlässigt, da der Klärschlamm während der überwachten Phase der Reaktordeponie von 150 Jahren anfällt und die Reaktordeponien in Zukunft durch die anderen beiden Entsorgungsoptionen ersetzt werden.

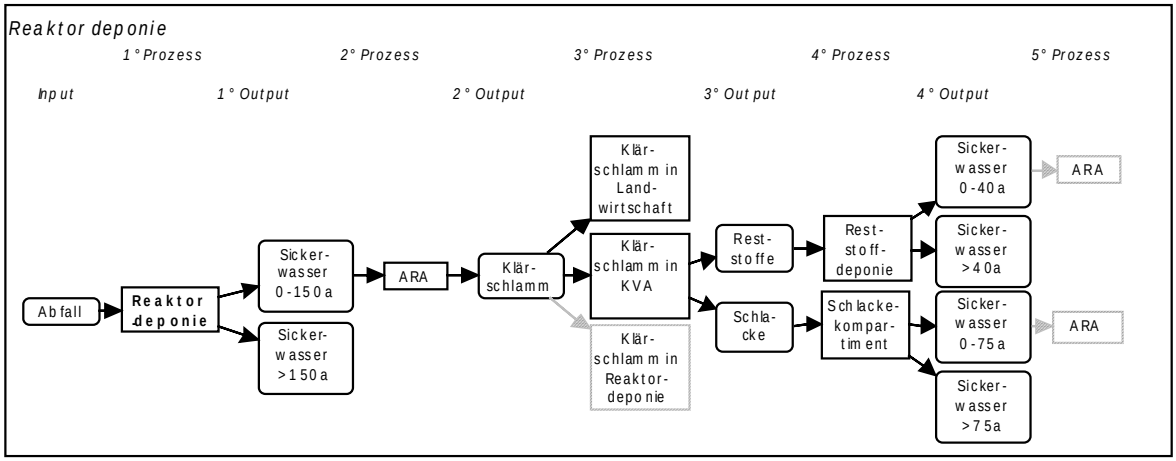


Fig. 24: *Systemschema der berücksichtigten Prozesse im System Reaktordeponie. Nicht berücksichtigte Prozesse sind schraffiert dargestellt. Pfeile geben die Richtung des Materieflusses an.*

In Tab. 25 sind die Transferkoeffizienten der Reaktordeponie angegeben, welche – gewichtet mit der Abbaubarkeit des Abfalls – zur Berechnung der direkten Emissionen verwendet werden. Das entstehende Deponiegas wird zu 53% verbrannt und teilweise energetisch genutzt. Der Rest wird unverbrannt in die Luft emittiert. Die Wasseremissionen der überwachten Phase werden einer ARA zugeführt.

g/kg Element	1) Gasphase	1) Sickerwasser	2) Sickerwasser
O	485	14.5	1000
H	971	29.1	1000
C	971	29.1	1000
S	358	642	1000
N	64.2	936	1000
P	0	1000	1000
Cl	14.1	986	1000
F	838	162	1000
Cd	4.37	656	660
Cu	0.12	450	450
Hg	209	391	600
Pb	0.00333	10	10
Zn	0.151	680	680
Fe	0.0175	70	70

Tab. 25: *Verwendete Transferkoeffizienten (TK) für die Bilanzierung der Reaktordeponie. 1) TK, wenn der Abfall vollständig während der überwachten Phase (150 a) abgebaut wird. 2) TK, wenn der Abfall aussschliesslich nach der überwachten Phase abgebaut wird (Langzeitemissionen). Die Abbaubarkeit des Abfalls während 150 Jahren wird benutzt, um die effektiv verwendeten Transferkoffizienten proportional zwischen diesen beiden Grenzfällen einzupassen. Nach [ESU 1996b].*

Abbaubarkeit

Zur Bilanzierung der Auswirkungen eines Abfalls in der Reaktordeponie muss neben der Zusammensetzung die Abbaubarkeit des Abfalls bekannt sein. Als Abbaubarkeit wird hier

gemäss [ESU 1996b] der Anteil des Abfalls in Masseprozent verstanden, welcher sich während der überwachten Phase der Reaktordeponie vollständig mineralisiert resp. zersetzt. Die überwachte Phase dauert 150 Jahre. Während dieser Zeit werden Sickerwässer der Deponie gefasst und einer ARA zugeführt.

Besitzt ein Abfall eine gute Abbaubarkeit, wird ein Grossteil seiner Bestandteile während der überwachten Phase mineralisiert und führt dadurch zu Belastungen des Sickerwassers, welches in der ARA behandelt wird. Ein Teil eines gut abbaubaren Abfalls kann – je nach Zusammensetzung – auch im Deponiegas anfallen.

Nach der überwachten Phase findet sehr wahrscheinlich keine nennenswerte Gasproduktion mehr statt. Die Luftemissionen nach der überwachten Phase werden daher in [ESU 1996b] wie auch in der vorliegenden Arbeit vernachlässigt. Dies bedeutet, dass ein schlecht abbaubarer Abfall vorwiegend zu Sickerwasserbelastungen führt, die unbehandelt (i.e. ohne Behandlung in der ARA) in Gewässer emittiert werden.

Für einen gegebenen Abfall gibt es meist keine Informationen zu Abbaubarkeiten in der Reaktordeponie. Die Abbaubarkeit des Abfalls muss daher aufgrund der chemischen Identität, des physikalischen Zustandes und den dadurch gegebenen Möglichkeiten eines mikrobiellen oder physikalischen Abbaus abgeschätzt werden. Anhaltspunkte zu Abbaubarkeiten finden sich Tabelle F 4.2. Generell gilt, dass strukturierte und feinteilige Materialien meist einen Abbau begünstigen.

	Abbaubarkeit Reaktordeponie (150a)
Papier	100%
Karton	100%
Holz allgemein	100%
Massivholz	<= 100%
Kunststoffe allgemein	~ 1 bis 2%
PE	~ 2% (bis 75% ?)
PP	~ 2% (bis 50% ?)
PS	~ 2% (bis 25% ?)
PET	~ 1 bis 2%
PVC	~ 1%
Abfall-Mischungen	*)
Verbundstoffe	*)

*Tab. 26: Grob geschätzte Abbaubarkeiten in der Reaktordeponie nach 150 Jahren (überwachte Phase) nach [ESU 1996b]. *) Das Deponiemodell aus [ESU 1996b] ist für die Bilanzierung von stark heterogenen Stoffen nicht geeignet.*

Prozesspezifische Aufwendungen

Die prozesspezifischen Aufwendungen werden für alle Abfälle pauschal pro Kilogramm und unabhängig von ihrer Zusammensetzung bilanziert. Es handelt sich einerseits um Materialeinsatz und Dienstleistungen zur Bereitstellung der Infrastruktur der Deponie (Tab. 27); andererseits um Aufwendungen während des Betriebs der Deponie (Tab. 28). Wie bereits bei der Reststoffdeponie erwähnt, wird die Flächenbeanspruchung nicht als Infrastrukturaufwendung verbucht, da sie effektiv durch das bilanzierte Produkt erfolgt.

Infrastrukturaufwendungen Reaktordeponie		pro kg Abfall
Diesel in Baumaschine	MJ	0.00119
Betonkies	kg	0.145
Bitumen ab Raffinerie CH	t	0.00000319
PE (HD)	kg	0.000301
Beton (ohne Armierungseisen)	kg	0.0186
Transport LKW 16 t	tkm	0.0108
Aushub Frontladerraupe	m3	0.000162
Aushub Hydraulikbagger	m3	0.0000925
Stahl niedriglegiert	kg	0.000373

Tab. 27: Eingabedaten für die spezifischen Infrastrukturaufwendungen der Reaktordeponie pro Kilogramm Deponiegut; nach [ESU 1996b].

Prozessspezifischer Betriebsaufwand		pro kg Abfall	verbucht als
Kompaktierung	MJ/kg	0.0467	Diesel in Baumaschine
weiterer Stromverbrauch	MJ/kg	0.00054	Strom Niederspannung - Bezug in CH
Abwärme aus Stromverbrauch	MJ/kg	0.00054	Abwaerme in Luft p
Heizung	MJ/kg	0.00162	Heizoel EL in Heizung 10 kW
Flächenbeanspruchung Bau- , Betriebs- und Abschlussphase	m_2a	0.002	Fläche II-IV
Flächenbeanspruchung Rekultivierungsphase	m_2a	0.0025	Fläche II-III
Deponiebeanspruchung UBP	UBP/kg	500	

Tab. 28: Eingabedaten für die prozessspezifischen Aufwendungen der Reaktordeponie pro Kilogramm Deponiegut; nach [ESU 1996b].

8.1.8. Inertstoffdeponie

Auf Inertstoffdeponien dürfen gemäss TVA nur Abfälle eingelagert werde, welche zu mehr als 95 G-% der Trockensubstanz aus gesteinsähnlichen Materialien bestehen. Dies gilt auch für in Inertstoffdeponien eingelagerte Bauabfälle [19]. Darüber hinaus dürfen die Abfälle gewisse Gehalte an Schwermetallen und gewisse Konzentrationen von Schadstoffen in Eluattests nicht überschreiten.

Inertstoffe können ohne wesentliches Schadstoffpotential deponiert werden, da die Abfälle reaktionsträge und gesteinähnlich sind. Es werden deshalb auch keinerlei abfallspezifischen Emissionen bilanziert. Aufwendungen für Transport, Infrastruktur und Einbringung werden aber verbucht.

Beim Bau einer Deponie wird je nach Standort ein Übergang von kultivierter oder modifizierter auf bebaute Fläche (II/III - IV) vollzogen. Für die Qualität der ursprünglichen Fläche werden hier 30% modifiziert und 70% kultiviert angenommen. Nach der Nutzungsphase wird das Deponiegelände rekultiviert, wodurch wieder die ursprüngliche Flächenkategorie hergestellt

19 In einer früheren Fassung der TVA durften Bauabfälle bis zu 10% nicht-gesteinsähnliche Materialien enthalten [TVA 1990, Anhang 1, Ziffer 12, p.23]. Dies wurde in der aktuellen Fassung revidiert [TVA 1996, Anhang 1, Ziffer 12, p.22].

werden soll. Da in der Regel eine etappenweise Deponienutzung vorgesehen ist, kann die Bau-, Betriebs- und Rekultivierungsphase auf etwa 12 Jahre beschränkt werden. Für die Inertstoffdeponie werden keine Materialaufwendungen verrechnet. Die Flächenbeanspruchung wird nicht als Infrastrukturaufwendung verbucht, da sie effektiv durch das bilanzierte Produkt erfolgt.

Die Bauprozesse werden auf 1 dm^3 bewegtes Erdreich pro Kilogramm Deponiegut veranschlagt.

Aufwendungen pro kg		
Fläche III - IV	m^2a/kg	$3.7*10^{-4}$
Fläche II - III	m^2a/kg	$6.7*10^{-4}$
Fläche II - IV	m^2a/kg	$1.6*10^{-4}$
Aushub Frontlader-Raupe	m^3/kg	$1*10^{-3}$

Tab. 29: Aufwendungen für den Betrieb von Inertstoffdeponien pro Kilogramm Inertstoffabfall. Die direkten Luft- und Wasseremissionen werden nicht berücksichtigt.

8.1.9. Sondermüll

Sondermüll ist eine sehr uneinheitliche Klasse von Stoffen, die auch ganz unterschiedlich entsorgt werden. Baustoff-Sondermüll besteht vor allem aus Resten von Anstrichstoffen und Malereihilfsmittel (Verdünner, Abbeizen). Daneben können auch Elektronikinstallationen und Kabel aus der Gebäudeverkabelung anfallen.

Inventar SAVA

Die Abfälle werden über eine geschätzte, durchschnittliche Distanz von insgesamt 50km mit einem LKW 16t zur SAVA transportiert.

Die spezifischen Zusammensetzungen der verbrannten Sonderabfälle werden mit den folgenden Transferkoeffizienten verrechnet.

	SAVA		
Element	TK Luft	TK Wasser	TK Reststoff
H2O	1	0	0
O	0	0	1
H	1	0	0
C	1	0	0
S	0.00597	0.0993	0.895
N	0.0761	0.0793	0
P	0.00067	0.151	0.849
B	0.0035	0.997	0
Cl	0.00095	0.81	0.189
Br	0.01	0.01	0.98
F	0.0005	0.266	0.734
J	0	0	0
Ag	0	0	0
As	0.001	0.0001	0.999
Ba	0	0	0
Cd	0.008	0.102	0.89
Co	0.005	0.01	0.985
Cr	0.000245	0.0216	0.978
Cu	0.00226	0.01	0.988
Hg	0.044	0.106	0.85
Mn	0	0	0
Mo	0	0	0
Ni	0.005	0.021	0.974
Pb	0.005	0.115	0.88
Sb	0.00141	0.0957	0.903
Se	0.00903	0.0614	0.93
Sn	0.00184	0.0125	0.986
V	0	0	0
Zn	0.003	0.102	0.895
Si	0	0	1
Fe	0	0	1
Ca	0	0	1
Al	0.000156	0.00000156	1
K	0	0	1
Mg	0	0	1
Na	0	0	1

Tab. 30 Transferkoeffizienten für SAVA nach [ESU 1996a, p.F.31ff.]. Gerundet auf drei Stellen.

Die entstehenden Reststoffe werden unverfestigt einer Reststoffdeponie zugeführt (Transportdistanz 50km). Die Emissionen in der Reststoffdeponie werden aufgrund des oben vorgestellten Modells und der berechneten Zusammensetzung, d.h. abfallspezifisch ermittelt.

8.1.10. "Wilde" Entsorgung

Mit "wilder" Entsorgung von Abfällen ist die unkontrollierte Ablagerung und Verbrennung im Freien gemeint. Eigentlich gehört diese Art der Beseitigung nicht in das Kapitel der Entsorgungs-*technologien*. Leider ist der Anteil dieser Entsorgung bei brennbaren Bauabfällen aber seit Jahren konstant sehr hoch. Gemäss Schätzungen des BUWAL ist der Anteil der unkontrolliert entsorgten, brennbaren Bauabfälle mit 46% (1996) nicht vernachlässigbar und liegt weit über

dem entsprechenden Anteil bei den Siedlungsabfällen (1%) [20]. Dieser Anteil hat sich trotz den wesentlichen Verschiebungen von der Deponierung zur KVA-Verbrennung gehalten [BUWAL 1996]. Es ist daher damit zu rechnen, dass diese Entsorgungspraxis auch noch in der Zukunft wichtig beiben wird. Es obliegt den Kantonen die unkontrollierte Entsorgung zu unterbinden. Die unkontrollierte Verbrennung ist wegen massiv höheren Schadstofffrachten auch in Kleinmengen nicht zu dulden. Bei einer offenen Verbrennung können leicht über tausendmal mehr Schadstoffe in die Umwelt gelangen als bei der Verbrennung in einer KVA. So emittiert z.B. ein Kilogramm wild verbrannter Abfall gleich viel Dioxin wie gut 400'000 Kilogramm Abfall, der in einer modernen KVA verbrannt wird [21].

Es kann davon ausgegangen werden, dass auf der Baustelle oder in Anlagen sortierte Bauabfälle nicht wild entsorgt werden. Die genauen Kanäle der Bauabfälle werden zur Zeit vom BUWAL untersucht [Schenk 1999]. In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass die brennbaren Abfälle generell in KVAs verbrannt werden. Um den Unterschied zu wild entsorgten Abfällen aufzuzeigen, werden auch Inventare der wilden Verbrennung erstellt.

in 1000 t/a	**brennbare Bau-abfälle 1992**		**1994**		**1996**		**Siedlungsabfälle 1996**	
KVA	100	15%	200	38%	210	42%	1990	80%
Reaktordeponie	290	43%	100	19%	60	12%	490	20%
"Wilde" Entsorgung	290	**43%**	230	**43%**	230	**46%**	30	1%
Total	680	100%	530	100%	500	100%	2510	100%

Tab 30b. Legale und illegale Entsorgungskanäle von brennbaren Bauabfällen 1992 - 1996. Zum Vergleich Siedlungsabfälle 1996 [BUWAL 1996]

8.1.11. Inventar der wilden Verbrennung

Bei der wilden Entsorgung werden Abfälle ausserhalb von technischen Anlagen (Deponien, KVA) auf offenem Gelände entsorgt. Daher gelangen Schadstoffe direkt und unbehandelt in die Umwelt. Die Verbrennung ist wahrscheinlich oft unvollständig, wobei viele unverbrannte Bestandteile emittiert werden. Bei der Verbrennung auf tiefem Temperaturniveau können zudem bedeutende Mengen an Dioxinen entstehen. Die Ablagerung ohne Verbrennung (wilde Deponie) wird hier nicht betrachtet.

Produktspezifische Emissionen

Die Emissionen der wilden Verbrennung werden aus der elementaren Zusamensetzung des Abfalls und den dazugehörigen Transferkoeffizienten in Luft (Luftemissionen) und in Boden (Rückstände) berechnet. Die Transferkoeffizienten werden aus den Angaben einer KVA ohne weitergehende Rauchgasreinigung (WRR) abgeleitet [ESU 1996b]. Es wird angenommen, dass sich die chemischen Elemente vergleichbar zur KVA in Luftemissionen und Asche aufteilen. Die Transferkoeffizienten ins Reingas und in die Elektrofilterasche werden zum Transfer-koeffizienten "Luft" der wilden Verbrennung zusammengefasst (in der Elektrofilterasche finden

20 Illegal deponierte Abfälle bestehen aus 30'000 t/a Siedlungsabfällen und 230'000 t/a Bauabfällen. Rund die Hälfte der Altlasten in der Schweiz sind gemäss BUWAL auf illegale Abfallentsorgung zurückzuführen (23'000 Standorte). 2000 Altlasten sind Unfallstandorte; 25'000 Altlasten sind Betriebsstandorte.

21 Holz, welches in einem offenen Feuer verbrannt wird, emittiert 262'500 ng TEQ TCDD-Dioxin pro Kilogramm [Jungbluth 1997]. Eine moderne KVA erreicht heute Reingaswerte von 0.6 ng TEQ TCDD-Dioxin pro Kilogramm Abfall [BUWAL 1997b, p.150].

sich luftgängige Aschepartikel, die nur mittels Elektrofilter aus dem Abgasstrom entfernt werden können). Analog werden die Transferkoeffizienten in die Schlackefraktion und in die Kesselasche zum Transferkoeffizienten "Rückstände" der wilden Verbrennung zusammengefasst. Von den Rückständen wird angenommen, dass ein Teil der Asche durch Regen ausgewaschen wird und so in die Hydrosphäre emittiert wird. Die verbleibende Asche wird als Emission in den Boden bilanziert. Der auswaschbare Ascheanteil wird aufgrund der Sickerwasser -Transferkoeffizienten einer Reststoffdeponie bestimmt [ESU 1996b].

Transferkoeffizienten wilde Verbrennung in g Element/kg Element im Abfall	in Luft aus Verbrenn-ungsgasen	in Wasser aus Rückständen	in Boden aus Rückständen
O	991.22	0	8.7831
H	1000	0	0
C	991.87	8.1289	0
S	585.76	414.24	0
N	990	0	10
P	100	0	900
B	0	0	0
Cl	983.24	16.756	0
Br	970	0	30
F	470	530	0
J	0	0	0
Ag	0	0	0
As	420	0	580
Ba	110	0	890
Cd	894	46.373	59.623
Co	140	0	860
Cr	511.23	17.107	471.67
Cu	177.2	183.07	639.72
Hg	992.93	2.1196	4.9458
Mn	130	0	870
Mo	0	0	0
Ni	459.15	0	540.85
Pb	772.25	26.191	201.56
Sb	974.11	0	25.886
Se	790.02	0	209.98
Sn	877.74	0	122.26
V	100	0	900
Zn	842.16	66.291	91.544
Si	138.48	0	861.52
Fe	72.815	32.451	894.73
Ca	110.26	400.38	489.36
Al	173.39	0	826.61
K	221.09	0	778.91
Mg	208.69	0	791.31
Na	244	0	756

Tab. 31 Elementare Transferkoeffizienten für die produktspezifischen Emissionen in Luft, Wasser und Boden der wilden Verbrennung (gerundet auf 5 Stellen).

Prozessspezifische Emissionen

Neben den produktspezifischen Emissionen, die von der Zusammensetzung des verbrannten Abfalls abhängen, werden auch prozessspezifische Emissionen verbucht. Diese können nicht –

oder nicht eindeutig kausal – einem einzelnen chemischen Element zugeordnet werden. Sie hängen vielmehr von der Art und Weise der Feuerung ab (Temperaturen, Durchmischung, Sauerstoffzufuhr etc.). Thermisches Stickoxid wird nicht aus Brennstoff-Stickstoff gebildet, sondern aus Luft-Stickstoff. Prozessspezifische Emissionen werden unabhängig von der Zusammensetzung des Abfalls für jedes Kilogramm Abfall pauschal verbucht. Die meisten Emissionen werden aus Angaben für ein offenes Holzfeuer für Kochzwecke ("3 Steinefeuer") übernommen [Jungbluth 1997]. Die Umrechnung der Emissionen pro TJ Holz auf Emissionen pro kg Holz erfolgt mit einem Heizwert H_u von 15MJ/kg.

Schadstoff	Einheit pro Kilogramm Abfall	**Offenes Feuer** [Jungbluth 1997]	KVA: *nicht oder gering gereinigte Rohgase*	
NMVOC	mg	**45'000**	131	KVA-Abgas ohne WRR [ESU 1996b, p.B.91]
Methan	mg	**7'500**	9	KVA-Rohgas vor WRR [ESU 1996b, p.B.92]
Kohenmonoxid	mg	**120'000**	339	KVA-Abgas ohne WRR [ESU 1996b, p.B.91]
Benzol	mg	**3'855**	0.6	KVA-Rohgas vor WRR [ESU 1996b, p.B.92]
Toluol	mg	**1'282.5**	1.2	KVA-Rohgas vor WRR [ESU 1996b, p.B.92]
Xylole	mg	**513**	–	
Alkane	mg	**3'855**	–	
Alkene	mg	**12'405**	–	
Partikel	mg	**4'500**	–	
Formaldehyd	mg	**513**	–	
Acetaldehyd	mg	**256.5**	–	
Ethylbenzol	mg	**128**	–	
NOx	mg	1500 *)	**105** **)	KVA-Abgas ohne DeNOx [ESU 1996b, p.B.89]
NH3	µg	136 *)	**0.6** **)	KVA-Abgas ohne DeNOx [ESU 1996b, p.B.89]
Pentachlorphenol	µg	**–**	**3.47**	KVA-Rohgas vor WRR [ESU 1996b, p.B.92]
Benzo(a)pyren	µg	**24.9**	0.008	do.
Pentachlorbenzol	µg	**–**	**6.7**	do.
Hexachlorbenzol	µg	**–**	**0.84**	do.
Dioxin TCDD	ng TEQ	**262'500**	90	KVA-Abgas ohne WRR [ESU 1996b, p.B.92]

Tab. 32 *Von der Abfallzusammensetzung unabhängige, prozessspezifische Emissionen der wilden Verbrennung pro Kilogramm Abfall. Zum Vergleich: spezifische Mengen in wenig oder nicht gereinigtem Rohgas einer KVA.* ***fett = diese Studie*** **) gesamte Menge im Abgas. **) nur aus thermischem NOx (produktunspezifisch).*

Weitere Aufwendungen

Da Abfälle vor allem zur Einsparung von Zeit und Entsorgungskosten wild verbrannt werden, ergeben sich nur wenige zusätzliche Aufwendungen. Es wird angenommen, dass der Abfall mit einem Kleinlaster (<16t) von der Baustelle 5 km weit transportiert wird und dann verbrannt wird. Eine Auslastung von 40% ist berücksichtigt.

8.2. Verwertung

Als Verwertung wird in der vorliegenden Studie im engeren Sinne die stoffliche Verwertung verstanden. Die Verbrennung von Altstoffen unter (teilweiser) Nutzung des Heizwertes wird als Beseitigung (Zerstörung der Stoffmatrix) verstanden. Bauabfälle können auf verschiedenen Stufen der Entsorgung einer Verwertung zugeführt werden:

A) Vor dem Abbruch:

- Umnutzungen/Renovation (Lebensdauerverlängerung Gebäude)
- Bauteilbörse/Brockenhandel (Lebensdauerverlängerung Bestandteile)

B) Während des Abbruchs:

- 1-Stoff-Verwertung

C) Nach dem Abbruch:

- Sortieranlagen

Die unter A) aufgeführten Verwertungen werden in diese Studie nicht betrachtet, da sie einer Lebensdauerverlängerung gleichkommen. Diese Prozesse sind bei der Bilanzierung eines Gebäudes entsprechend zu bilanzieren resp. szenarieren.

Die anderen beiden Verwertungen nach B) und C) interessieren in der vorliegenden Studie nur insofern, als dass die auftretenden Belastungen den Altprodukten anzulasten sind. Inwieweit dies erfolgt ist im Kapitel "Systemgrenzen der Bilanzierung" erläutert.

9. Eingabedaten Datenmodule Entsorgungs-Optionen

Im folgenden wird ein Überblick über die generelle Vorgehensweisen der Bilanzierung gegeben. Genaueres ist den entsprechenden Kapiteln der Bilanzierung der Einzelprozesse zu entnehmen.

- Es wird zwischen Entsorgung als **Beseitigung** (ohne stofflicher Verwertung) und Entsorgung als **stofflicher Verwertung** unterschieden. Wurde für einen bestimmten Abfall kein Datenmodul zur stofflichen Verwertung definiert, so bedeutet dies im Allgemeinen, dass der betreffende Stoff auf dieser Stufe normalerweise nicht verwertet werden kann.
- Es wird von einer heutigen "state-of-the-art" Entsorgung ausgegangen, die sich an den realen heutigen Gegebenheiten und Prozessen orientiert. Vereinzelt existierende Pilotanlagen für Verwertung werden nicht berücksichtigt.
- **Erstellungsabfälle** (ER), **Renovationsabfälle** (RE) und **Abbruchabfälle** (AB) werden gesondert behandelt. Wo dabei keine Unterschiede bestehen, wird nur ein entsprechendes Datenmodul definiert (z.B. deutet ein "ER __ AB" im Modulnamen darauf hin, dass dieses Modul sowohl Erstellungsabfälle als auch Abbruchabfälle bilanziert).
- Bei **Renovationsabfällen** wird grundsätzlich von knappen **Platzverhältnissen** ausgegangen. Es können nur wenige Abfall-Mulden aufgestellt werden und ein Aussortieren verwertbarer Fraktionen ist eingeschränkt. Die meisten Renovationsabfälle gelangen in Bauschutt- oder Bausperrgutmulden und müssen aussortiert werden. Sonderabfälle werden aber auch bei Renovationsabfällen gesondert behandelt.
- Für den Rückbau von massiven, strukturellen Altbaustoffen, werden **spezifische Abbruchenergien** verbucht (6.3 Kapitel "Ökoinventare Abbruch"). Dies ist bei der Erzeugung von Renovationsabfällen und Abbruchabfällen der Fall. Bei den Erstellungabfällen, die in der Regel aus Verschnitten und Resten bestehen, werden keine Abbruchenergien verbucht.
- **Transporte** von der Baustelle zu Sortieranlagen und/oder Entsorgunganlagen werden hier verbucht. In der Regel handelt es sich um LKW-Transport. Für einzelne Stoffe (Beton, Backstein und Begleit-Materialien) wird auch ein teilweiser Bahntransport bilanziert.
- Der Inhalt von **Bausperrgut- und Bauschuttmulden** (v.a. bei Renovationsabfällen) wird **in jedem Fall einer Sortieranlage zugeführt**. D.h. unabhängig von der Zuteilung "Beseitigung als Entsorgung" oder "Verwertung als Entsorgung" gelangen diese Abfälle in die Sortierung und können deshalb teilweise verwertet werden. Verwertungsquoten von Material aus Bausperrgutmulden sind kleiner als die Verwertung von Bauschuttgut, da wegen stärkerer Verunreinigung ein grösserer Teil der Feinfraktion entsorgt werden muss. Poröse und bröckelige Materialien gelangen besonders leicht in die Feinfraktion.
- Die Bilanzeinheit (funktionale Einheit) ist bei jedem Abfall 1 Kilogramm (Ausnahme: Pneu-Waschgrubensediment wird als Anfall pro Tonnenkilometer LKW-Transport bilanziert).

9.1. unbewehrter Beton

unbewehrter Beton als Renovationsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> unbewehrter Beton: __ RE __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. Insgesamt können 50% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.5kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

unbewehrter Beton als Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> unbewehrter Beton: __ __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. Insgesamt können 70% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.3kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

unbewehrter Beton als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> unbewehrter Beton: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Inertstoffdeponie einsortiert. 1kg wird als Inertstoff: in ID beseitigt.

unbewehrter Beton als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> unbewehrter Beton: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. Insgesamt können 50% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.5kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

unbewehrter Beton als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> unbewehrter Beton: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80

µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. Insgesamt können 70% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.3kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

9.1.1. bewehrter Beton

bewehrter Beton als Renovationsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> bewehrter Beton: __ RE __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 1.41 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.14kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00087 m^3) bilanziert. Insgesamt können 51.5% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.485kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

bewehrter Beton als Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> bewehrter Beton: __ __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 1.41 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.14kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00087 m^3) bilanziert. Insgesamt können 70.9% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.291kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

bewehrter Beton als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> bewehrter Beton: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 1.41 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.14kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00087 m^3) bilanziert. Insgesamt können 51.5% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.485kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

bewehrter Beton als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> bewehrter Beton: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 1.41 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.14kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00087 m^3) bilanziert.Insgesamt können 70.9% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.291kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

9.1.2. Zement (in Beton) und Mauermoertel

Zement (in Beton) und Mauermoertel als Renovationsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Zement (in Beton) und Mauermoertel: __ RE __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. 1kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Zement (in Beton) und Mauermoertel als Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Zement (in Beton) und Mauermoertel: __ __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.68kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Zement (in Beton) und Mauermoertel als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Zement (in Beton) und Mauermoertel: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Inertstoffdeponie einsortiert. 1kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in ID beseitigt.

Zement (in Beton) und Mauermoertel als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Zement (in Beton) und Mauermoertel: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur

Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. 1kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Zement (in Beton) und Mauermoertel als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Zement (in Beton) und Mauermoertel: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.68kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

9.1.3. Betonkies

Betonkies als Renovationsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Betonkies: __ RE __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. Insgesamt können 96% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.04kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Betonkies als Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Betonkies: __ __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. Insgesamt können 97.6% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.024kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Betonkies als Erstellungsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Betonkies: ER __ __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Betonkies als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Betonkies: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. Insgesamt können 96% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.04kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Betonkies als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Betonkies: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.339 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.37kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000909 m^3) bilanziert. Insgesamt können 97.6% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.024kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

9.1.4. Backstein

Backstein als Erstellungsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Backstein: ER __ __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Backstein als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Backstein: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Inertstoffdeponie einsortiert. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). 1kg wird als Inertstoff: in ID beseitigt.

Backstein als Renovationsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Backstein: __ RE __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das

Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 7.38kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00125 m^3) bilanziert. Insgesamt können 96% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.04kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Backstein als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Backstein: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 7.38kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00125 m^3) bilanziert. Insgesamt können 96% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.04kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Backstein als Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Backstein: __ __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Backstein als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Backstein: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Inertstoffdeponie einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). 1kg wird als Inertstoff: in ID beseitigt.

9.1.5. Vollgipsplatte

Vollgipsplatte als Erstellungsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Vollgipsplatte: ER __ __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Vollgipsplatte als Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Vollgipsplatte: __ __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.136875 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

9.1.6. Vollgipsplatte/Gipsputz

Vollgipsplatte/Gipsputz als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Vollgipsplatte/Gipsputz: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Reaktordeponie einsortiert. 1kg wird als Gips in RD beseitigt.

Vollgipsplatte/Gipsputz als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Vollgipsplatte/Gipsputz: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Reaktordeponie einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.137 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. 1kg wird als Gips in RD beseitigt.

Vollgipsplatte/Gipsputz als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Vollgipsplatte/Gipsputz: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.137 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 11.8kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.002 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.68kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Gips in RD beseitigt.

9.1.7. Gipskartonplatte

Gipskartonplatte als Erstellungsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Gipskartonplatte: ER __ __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 83.4% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.166kg wird als Karton in KVA beseitigt.

Gipskartonplatte als Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Gipskartonplatte: __ __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.136875 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Insgesamt können 83.4% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.166kg wird als Karton in KVA beseitigt.

Gipskartonplatte als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Gipskartonplatte: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Reaktordeponie einsortiert. 0.834kg wird als Gips in RD beseitigt. 0.166kg wird als Karton in RD beseitigt.

Gipskartonplatte als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Gipskartonplatte: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Reaktordeponie einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.136875 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80

µg/kg PM10-Partikel. 0.834kg wird als Gips in RD beseitigt. 0.166kg wird als Karton in RD beseitigt.

Gipskartonplatte als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Gipskartonplatte: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.136875 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 11.8kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.002 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.56712kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Gips in RD beseitigt. 0.11288kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Karton in RD beseitigt.

9.1.8. Gipsfaserplatte

Die enthaltenen (Altpapier-)Fasern werden als Karton approximiert.

Gipsfaserplatte als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Gipsfaserplatte: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.136875 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Gipsfaserplatte als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Gipsfaserplatte: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Reaktordeponie einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.136875 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. 0.85kg wird als Gips in RD beseitigt. 0.15kg wird als Karton in RD beseitigt.

Gipsfaserplatte als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Gipsfaserplatte: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.136875 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 11.8kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.002 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.578kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Gips in RD beseitigt. 0.102kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Karton in RD beseitigt.

9.1.9. Mineralwolle

Mineralwolle als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Mineralwolle: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Mineralwolle als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Mineralwolle: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Inertstoffdeponie einsortiert. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. 1kg wird als Inertstoff: in ID beseitigt.

Mineralwolle als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Mineralwolle: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.0208 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 236kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.04 m^3) bilanziert. 1kg wird als Inertstoff: in ID beseitigt.

9.1.10. EPS-Isolation flammgeschuetzt

EPS-Isolation flammgeschuetzt als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> EPS-Isolation flammgeschuetzt: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff bzw. in geeignete Gebinde einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

EPS-Isolation flammgeschuetzt als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> EPS-Isolation flammgeschuetzt: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als EPS-Isolation in KVA beseitigt.

EPS-Isolation flammgeschuetzt als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> EPS-Isolation flammgeschuetzt: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.0208 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 590kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.1 m^3) bilanziert. 1kg wird als EPS-Isolation in KVA beseitigt.

9.1.11. Flachglas

Nur unbeschichtetes, sauberes Flachgals kann verwertet werden (z.B. zu Schaumglas). Der Sammelbegriff "Flachglas" bezeichnet beschichtetes *und* unbeschichtetes Flachglas (i.e. es gibt keine gesonderten Module für beschichtetes Flachglas).

Flachglas unbeschichtet als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Flachglas unbeschichtet: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Flachglas als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Flachglas: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Inertstoffdeponie einsortiert. 1kg wird als Inertstoff: in ID beseitigt.

Flachglas als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Flachglas: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00313 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 4.54kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000769 m^3) bilanziert. 96% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.04kg wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Flachglas (in brennbarem Rahmen) als Renovationsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Flachglas (in brennbarem Rahmen): __ RE AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als Inertstoff: in KVA beseitigt.

9.1.12. Massiveisen

Unter Massiveisen werden aussortierbare metallische Träger, Platten etc. verstanden. Nicht jedoch Klein- und Verbundteile.

Massiveisen als Erstellungsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Massiveisen: ER __ __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 10% (Rest LKW 28t). Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Massiveisen als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Massiveisen: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall kann auf der Baustelle *nicht* in eine Metallrecycling-Mulde einsortiert werden (s. oben) und wird deshalb in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 10% (Rest LKW 28t). Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00313 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und

Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 1.51kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000255 m^3) bilanziert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Massiveisen als Renovationsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Massiveisen: __ RE AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Als Abbruchenergie wird 1.41 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 10% (Rest LKW 28t). Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Massiveisen als Renovationsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Massiveisen: __ RE AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 1.41 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 10% (Rest LKW 28t). Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00313 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 1.51kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.000255 m^3) bilanziert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

9.1.13. Kleinmetall (in brennbaren Verbunden)

Kleinmetall (in brennbaren Verbunden) als Erstellungsabfall, Renovationsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Kleinmetall (in brennbaren Verbunden): ER RE AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als Inertstoff: in KVA beseitigt.

9.1.14. Altholz unbehandelt

Altholz unbehandelt als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Altholz unbehandelt: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Altholz unbehandelt als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Altholz unbehandelt: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als unbehandeltes Altholz: in KVA beseitigt.

Altholz unbehandelt als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Altholz unbehandelt: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird

19.7kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00333 m^3) bilanziert. 0.1% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.999kg wird als unbehandeltes Altholz: in KVA beseitigt.

9.1.15. Altholz behandelt

Altholz behandelt als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Altholz behandelt: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als behandeltes Altholz: in KVA beseitigt.

Altholz behandelt als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Altholz behandelt: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 19.7kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00333 m^3) bilanziert. 0.1% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.999kg wird als behandeltes Altholz: in KVA beseitigt.

9.1.16. Spanplatte (7.5%PU)

Spanplatte (7.5%PU) als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Spanplatte (7.5%PU): ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 0.925kg wird als unbehandeltes Altholz: in KVA beseitigt. 0.075kg wird als PU in KVA beseitigt.

Spanplatte (7.5%PU) als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Spanplatte (7.5%PU): __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 18.2kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00308 m^3) bilanziert. 0.5% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.92kg wird als unbehandeltes Altholz: in KVA beseitigt. 0.075kg wird als PU in KVA beseitigt.

9.1.17. PUR-Schaum

PUR-Schaum als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PUR-Schaum: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als PU in KVA beseitigt.

PUR-Schaum als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PUR-Schaum: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird

in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.0208 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 394kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.0667 m^3) bilanziert. 1kg wird als PU in KVA beseitigt.

9.1.18. Anstrichstoffe allgemeines

Wenn Farben nicht abgelaugt oder abgeschliffen werden, verbleiben sie bis zum Abbruch in der Baumasse und werden mit dem angestrichenen Material entsorgt. Der Aufwand für Abschleifen (Elektrische Energie und Emissionen) oder Ablaugen (Chemische Hilfsmittel) wurde hier nicht bilanziert.

9.1.19. Anstrichresten bzw. -Ablauge

Anstrichresten bzw. -Ablauge als Erstellungsabfall, Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Anstrichresten bzw. -Ablauge: ER RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Sondermüll (SAVA) einsortiert. 1kg wird als Anstrich in SAVA beseitigt.

9.1.20. Anstrich auf Mauer

Der Anstrich wird zusammen mit Mauerwerk entsorgt.

Anstrich auf Mauer als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Anstrich auf Mauer: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 13.9kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00235 m^3) bilanziert. 1kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Anstrich in RD beseitigt.

9.1.21. Anstrich auf Holz

Der Anstrich wird zusammen mit einer Holzkonstruktion entsorgt.

Anstrich auf Holz als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Anstrich auf Holz: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als Anstrich in KVA beseitigt.

9.1.22. Anstrich auf Metall

Der Anstrich wird zusammen mit einer Metallkonstruktion entsorgt.

Anstrich auf Metall als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Anstrich auf Metall: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 10% (Rest LKW 28t). 100% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal.

9.1.23. Alkydharzfarbresten bzw. -Ablauge

Alkydharzfarbresten bzw. -Ablauge als Erstellungsabfall, Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Alkydharzfarbresten bzw. -Ablauge: ER RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Sondermüll (SAVA) einsortiert. 1kg wird als Alkydharz in SAVA beseitigt.

9.1.24. Dispersionsfarbresten bzw. -Ablauge

Dispersionsfarbresten bzw. -Ablauge als Erstellungsabfall, Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Dispersionsfarbresten bzw. -Ablauge: ER RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Sondermüll (SAVA) einsortiert. 1kg wird als Dispersion in SAVA beseitigt.

9.1.25. Dispersionsfarbe auf Mauer

Dispersionsfarbe auf Mauer als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Dispersionsfarbe auf Mauer: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 13.9kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00235 m^3) bilanziert. 1kg wird als Dispersion in RD beseitigt.

9.1.26. Dispersionsfarbe auf Holz

Dispersionsfarbe auf Holz als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Dispersionsfarbe auf Holz: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als Dispersion in KVA beseitigt.

9.1.27. Dichtungskitt (PUR)

Dichtungskitt (PUR) als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Dichtungskitt (PUR): ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Sondermüll (SAVA) einsortiert. 1kg wird als PU in SAVA beseitigt.

Dichtungskitt (PUR) als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Dichtungskitt (PUR): __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird

9.86kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00167 m^3) bilanziert. 1kg gelangt in die Feinfraktion und wird als PU in RD beseitigt.

Dichtungskitt (PUR) als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Dichtungskitt (PUR): __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 9.86kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00167 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.68kg gelangt in die Feinfraktion und wird als PU in RD beseitigt.

9.1.28. PVC-Rohre und Profile

PVC-Rohre und Profile als Erstellungsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PVC-Rohre und Profile: ER __ __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

9.1.29. PVC-Produkte

PVC-Produkte als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PVC-Produkte: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als PVC in KVA beseitigt.

PVC-Produkte als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PVC-Produkte: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut/Bauschutt einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 8.44kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00143 m^3) bilanziert. 1kg wird als PVC in KVA beseitigt.

9.1.30. PVC-Fensterrahmen

PVC-Fensterrahmen in Beseitigung können als "PVC-Produkte in Beseitigung" bilanziert werden (s. oben).

PVC-Fensterrahmen als Erstellungsabfall, Renovationsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PVC-Fensterrahmen: ER RE AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

9.1.31. PE/PP-Produkte

PE/PP-Produkte als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE/PP-Produkte: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als PE in KVA beseitigt.

PE/PP-Produkte als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE/PP-Produkte: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut/Bauschutt einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 12.3kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00208 m^3) bilanziert. 1kg wird als PE in KVA beseitigt.

9.1.32. PE-Rohre

PE-Rohre in Beseitigung können als "PE/PP-Produkte in Beseitigung" bilanziert werden (s. oben).

PE-Rohre als Erstellungsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE-Rohre: ER __ __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

9.1.33. PE-Anstrichgebinde und Baufolien

PE-Anstrichgebinde und Baufolien in Beseitigung können als "PE/PP-Produkte in Beseitigung" bilanziert werden (s. oben).

PE-Anstrichgebinde und Baufolien als Erstellungsabfall, Renovationsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE-Anstrichgebinde und Baufolien: ER RE __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

9.1.34. Holzzementplatte

Holzzementplatte als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Holzzementplatte: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Holzzementplatte als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Holzzementplatte: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. 0.1% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.999kg wird als Holzzementplatte in KVA beseitigt.

Holzzementplatte als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Holzzementplatte: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 9.86kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00167 m^3) bilanziert. 0.1% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.999kg wird als Holzzementplatte in KVA beseitigt.

9.1.35. EPS (in Leichtputz u. -beton)

Der EPS-Anteil wird zusammen mit den mineralischen Komponenten entsorgt.

EPS (in Leichtputz u. -beton) als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> EPS (in Leichtputz u. -beton): ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Inertstoffdeponie einsortiert. 1kg wird als PS in ID beseitigt.

EPS (in Leichtputz u. -beton) als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> EPS (in Leichtputz u. -beton): __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 394kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.0667 m^3) bilanziert. 1kg wird als PS in RD beseitigt.

EPS (in Leichtputz u. -beton) als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> EPS (in Leichtputz u. -beton): __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 394kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.0667 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.68kg wird als PS in RD beseitigt.

9.1.36. Mineralischer Putz

Mineralischer Putz als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Mineralischer Putz: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Inertstoffdeponie einsortiert. 1kg wird als Inertstoff: in ID beseitigt.

Mineralischer Putz als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Mineralischer Putz: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.9kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.001 m^3) bilanziert. 1kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

Mineralischer Putz als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Mineralischer Putz: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.9kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.001 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.68kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Inertstoff: in RD beseitigt.

9.1.37. Kunstputz

Kunstputz als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Kunstputz: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Reaktordeponie einsortiert. 1kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Kunstputz in RD beseitigt.

Kunstputz als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Kunstputz: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.9kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.001 m^3) bilanziert. 1kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Kunstputz in RD beseitigt.

Kunstputz als Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Kunstputz: __ __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bauschutt einsortiert. Als Abbruchenergie wird 0.219 MJ Diesel in Baumaschine verbucht. Beim Abbruch entstehen 80 µg/kg PM10-Partikel. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Der Anteil Bahntransport beträgt dabei 50% (Rest LKW 28t). Das Material durchläuft in der Sortieranlage den Brecher. Dafür werden 0.01 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht.

Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 5.9kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.001 m^3) bilanziert. 32% des Abfalls gelangt als Störstoff in einen Verwertungskanal. 0.68kg gelangt in die Feinfraktion und wird als Kunstputz in RD beseitigt.

9.1.38. PVC-Dichtungsbahn

PVC-Dichtungsbahn als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PVC-Dichtungsbahn: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

PVC-Dichtungsbahn als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PVC-Dichtungsbahn: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als PVC-Dichtungsbahn in KVA beseitigt.

PVC-Dichtungsbahn als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PVC-Dichtungsbahn: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 9.86kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00167 m^3) bilanziert. 1kg wird als PVC-Dichtungsbahn in KVA beseitigt.

9.1.39. PE-Dichtungsbahn

PE-Dichtungsbahn als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE-Dichtungsbahn: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

PE-Dichtungsbahn als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE-Dichtungsbahn: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als PE-Dichtungsbahn in KVA beseitigt.

PE-Dichtungsbahn als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE-Dichtungsbahn: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 11.8kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.002 m^3) bilanziert. 1kg wird als PE-Dichtungsbahn in KVA beseitigt.

9.1.40. PE-Dampfbremse flammgeschuetzt

PE-Dampfbremse flammgeschuetzt als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE-Dampfbremse flammgeschuetzt: ER __ AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

PE-Dampfbremse flammgeschuetzt als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE-Dampfbremse flammgeschuetzt: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als PE-Dampfbremse flammgeschuetzt in KVA beseitigt.

PE-Dampfbremse flammgeschuetzt als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> PE-Dampfbremse flammgeschuetzt: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 11.8kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.002 m^3) bilanziert. 1kg wird als PE-Dampfbremse flammgeschuetzt in KVA beseitigt.

9.1.41. Bitumenbahn

Bitumenbahn als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Bitumenbahn: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als Bitumenbahn in KVA beseitigt.

Bitumenbahn als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Bitumenbahn: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 9.27kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00157 m^3) bilanziert. 1kg wird als Bitumenbahn in KVA beseitigt.

9.1.42. Elektrotechnische Anlagen

Elektrotechnische Anlagen als Renovationsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Elektrotechnische Anlagen: __ RE AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle separat entsorgt. Die Transportdistanz zur Elektronikschrott-Sortieranlage beträgt 25 km. Dort wird der Abfall in die Bestandteile aufgetrennt. Dafür werden 0.234 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Insgesamt können 71.92% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden (Metalle). 0.0308kg wird als Inertstoff: in RD beseitigt (Glas und Keramik). 0.125kg wird als langlebige Kunststoffe in KVA beseitigt. 0.125kg wird als PVC in KVA beseitigt.

9.1.43. Elektrokabel

Elektrokabel als Erstellungsabfall, Renovationsabfall, Abbruchabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Elektrokabel: ER RE AB in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle separat entsorgt. Die Transportdistanz zur Elektronikschrott-Sortieranlage beträgt 25 km. Dort wird der Abfall in die Bestandteile aufgetrennt. Dafür werden 0.234 MJ/kg Schweizer Mittelspannungsstrom verbucht. Insgesamt können 38.5% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden. 0.615kg wird als Kabelkunststoff in KVA beseitigt.

Elektrokabel als Erstellungsabfall, Renovationsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Dieses Modul ist für *Kleinmengen* von Kabeln gedacht. Grössere Mengen werden lohnenderweise verwertet.

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Elektrokabel: ER RE AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 0.615kg wird als Kabelkunststoff in KVA beseitigt. 0.385kg wird als Kupfer in KVA beseitigt.

9.1.44. Pneu-Waschgrubensediment pro tkm

Bei diesem Modul ist gedacht, dass es in der Ökobilanz der Bauaktivitäten pro Tonnenkilometer (tkm) LKW-Transportaktivität zur oder ab Baustelle verbucht wird.

Pneu-Waschgrubensediment pro tkm als Erstellungsabfall, Renovationsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [tkm].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Pneu-Waschgrubensediment pro tkm: ER RE AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Reaktordeponie einsortiert. 0.003kg wird als Waschgrubensediment in RD beseitigt.

9.1.45. Glasfaserkunststoff-Element

Glasfaserelemente können verwertet werden. Die Mengen sind heute in der CH aber zu gering. Die Elemente werden heute verbrannt. Der inerte Glasanteil (hier 60%) gelangt über die Schlacke in eine Reaktordeponie (Schlackenkompartiment).

Glasfaserkunststoff-Element als Erstellungsabfall in stoffl. Verwertung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Glasfaserkunststoff-Element: ER __ __ in stoffl. Verwertung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Einstoff einsortiert. Insgesamt können 100% des Abfalls einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

Glasfaserkunststoff-Element als Erstellungsabfall, Abbruchabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Glasfaserkunststoff-Element: ER __ AB in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als Glasfaserkunststoff in KVA beseitigt.

Glasfaserkunststoff-Element als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Glasfaserkunststoff-Element: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km.

Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 6.73kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00114 m^3) bilanziert. 1kg wird als Glasfaserkunststoff in KVA beseitigt.

9.1.46. Verpackungskarton

Verpackungskarton als Erstellungsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Verpackungskarton: ER __ __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Brennbares einsortiert. 1kg wird als Karton in KVA beseitigt.

Verpackungskarton als Renovationsabfall in Beseitigung [kg].

Der Name des Datenmoduls in Ecoinvent lautet "> Verpackungskarton: __ RE __ in Beseitigung". Der Abfall wird auf der Baustelle in die SBV-Mulde Bausperrgut einsortiert. Der Abfall wird einer Sortieranlage zugeführt. Die Transportdistanz zur Sortieranlage beträgt 25 km. Das Material wird in der Sortieranlage vor dem Brecher aussortiert. Dafür werden 0.00625 m^3/kg Aushub Frontladerraupe verbucht. Für den Ab- und Auflad des Abfalls in der Sortieranlage wird 39.4kJ Diesel für 'Aushub Frontladerraupe' (0.00667 m^3) bilanziert. 1kg wird als Karton in KVA beseitigt.

10. Bilanzierte Zusammensetzung von Altstoffen

In [ESU 1996b] wurden aus Literaturangaben eine Vielzahl von elementaren Zusammensetzungen von Abfallfraktionen wie Kunststoffen, Papier und Karton zusammengestellt. Diese erlauben eine Bilanzierung einer durchschnittlichen Zusammensetzung einer bestimmten Abfallfraktion. Wo spezifische Angaben für Bauprodukte vorliegen, wurden diese Zusammensetzungen berücksichtigt.

Die unteren und oberen Heizwerte wurden soweit als möglich aus gemessenen Werten aus der Literatur übernommen. Wo dies nicht möglich ist, wurden sie aus der bilanzierten Zusammensetzung berechnet.

10.1. Kunststoffe

Die Zusammensetzung verschiedener Kunststoffsorten (PE, PP, PVC, PU, PS) wurde aus Literaturangaben zusammengetragen. Es handelt sich dabei zur Hauptsache um Zusammensetzungen von Kunststoffen *im Abfall* und nicht von Neu-Kunststoffen ab Werk. Allfällige Verunreinigungen aus der Gebrauchsphase sind hier also mitenthalten. Wie bei den meisten Produktezusammensetzungen können die Spurenelementangaben um mehrere Grössenordnungen schwanken. Hier werden die Mittelwerte der gefundenen Literaturangaben verwendet. Die Zusammensetzungen müssen als typische mögliche und durchschnittliche Werte aufgefasst werden, die im Einzelfall (d.h. für ein bestimmtes Markt-Produkt) relativ stark abweichen können. Für gewisse Produkte wurde soweit bekannt die spezifische Zusammensetzung berücksichtigt (s. unten).

Es treten auch Datenlücken in den Spurengehalten auf, d.h. z.B. für PE sind mehr Angaben zu Spurengehalten bekannt als für PVC. Diese Datenlücken können zu einer Verzerrung in der Beurteilung einer Kunststoffsorte führen. Damit diese Datenlücken nicht zu ungerechten Beurteilungen führen, werden die fehlenden Angaben mit Angaben aus der Fraktion "Kunststoff-Mischungen" ergänzt.

		PE und PP (Polyolefine)	PS	PVC	PU	Kunststoff-Mischungen	Langlebige, technische Plastikprodukte
Ho	MJ/kg	42.6	38.2	22.7	26.0	31.0	24.0
Hu	MJ/kg	34.8	37.1	19.5	24.3	26.3	17.9
H2O	kg/kg	0.0473	0.0529	0.0312	0.00203	0.071	0.165
O	kg/kg	0.0368	0.0369	0.0164	0.179	0.081	0.0288
H	kg/kg	0.117	0.0741	0.0533	0.0844	0.116	0.0922
C	kg/kg	0.787	0.825	0.428	0.641	0.696	0.657
S	kg/kg	0.000409	0.000645	0.00103	0.000203	0.00154	0.000897
N	kg/kg	0.00124	0.00185	0.00103	0.061	0.00671	*0.00708*
P	kg/kg	0	0	0	0	0	0
B	kg/kg	0	0	0	0	0	0
Cl	kg/kg	0.0014	0.00108	0.461	0.0244	0.0199	0.0407
Br	kg/kg	0.00000918	0.000838	*0.0000717*	*0.000071*	0.0000717	0.000162
F	kg/kg	0.0000138	*0.0000135*	*0.0000151*	*0.0000149*	0.0000151	0.0000216
J	kg/kg	0	0	0	0	0	0
Ag	kg/kg	0	0	0	0	0	0
As	kg/kg	*0.00000174*	*0.00000175*	*0.00000195*	*0.00000193*	0.00000195	0.00000108
Ba	kg/kg	0.00023	*0.000172*	*0.000191*	*0.000189*	0.000191	*0.000202*
Cd	kg/kg	0.0000325	0.0000222	0.0000832	0.0000824	0.0000832	0.000196
Co	kg/kg	0.00000161	*0.0000291*	*0.0000323*	*0.000032*	0.0000324	0.0000443
Cr	kg/kg	0.0000119	*0.0000376*	0.0000645	*0.0000415*	0.0000419	0.0000452
Cu	kg/kg	0.0000396	0.000102	0.0000574	*0.000322*	0.000326	0.0000465
Hg	kg/kg	4.59E-08	*0.000000782*	*0.000000869*	*0.000000861*	0.00000087	3.94E-08
Mn	kg/kg	0.0000288	*0.0000736*	*0.0000818*	*0.0000811*	0.0000819	0.00000965
Mo	kg/kg	0	0	0	0	0	0
Ni	kg/kg	0.000000918	*0.000019*	0.0000584	*0.0000209*	0.0000211	0.0000148
Pb	kg/kg	0.0000216	0.0000142	0.000478	0.000474	0.000479	0.000869
Sb	kg/kg	0.00000964	*0.0000396*	*0.000044*	*0.0000436*	0.000044	0.0000464
Se	kg/kg	*0.00000193*	*0.00000193*	*0.00000215*	*0.00000213*	0.00000215	*0.00000227*
Sn	kg/kg	0.00000365	*0.0000241*	0.00038	*0.0000266*	0.0000269	0.0000283
V	kg/kg	0.00211	*0.000265*	*0.000295*	*0.000292*	0.000295	0.000311
Zn	kg/kg	0.000327	0.000793	0.000572	0.000567	0.000573	0.000366
Si	kg/kg	0	0	0	0	0	0
Fe	kg/kg	0.00147	*0.00343*	*0.00381*	*0.00378*	0.00382	*0.00403*
Ca	kg/kg	0.00248	0	0	0	0	0
Al	kg/kg	*0.000184*	*0.000184*	*0.000205*	*0.000203*	0.000205	*0.000216*
K	kg/kg	0	0	0	0	0	0
Mg	kg/kg	0.0000918	0	0	0	0	0
Na	kg/kg	*0.00135*	*0.00135*	*0.0015*	*0.00149*	0.0015	*0.00158*

Tab. 33 *Zusammensetzung und Spurengehalte von verschiedenen Kunststofffraktionen im Abfall. Kursive Angaben: Fehlende Angaben wurden ergänzt aus der Fraktion "Kunststoff-Mischungen". Alle Angaben sind auf 100% Massenbilanz bereinigt und auf drei Stellen gerundet.*

Literaturquellen:

PE und PP (Polyolefine): Brahms et al. 1989 nach Haber et al. 1990, p.247; Frankenhaeuser et al. 1995; Mark et al. 1995; Mayestre et al. 1994; Tillmann 1991, p.237f.

PS: Brahms et al. 1989 nach Haber et al. 1990, p.247; Mark et al. 1995; Mayestre et al. 1994; Tillmann 1991, p.237f

PVC: Brahms et al. 1989 nach Haber et al. 1990, p.247; Mayestre et al. 1994; Tillmann 1991, p.237f; Rentz et al. 1997, p.40

PU: Tillmann 1991, p.237f.

Kunststoff-Mischungen: Bildingmaier 1990; Brahms et al. 1989 nach Haber et al. 1990, p.247; Bilietewski et al. 1991; Frankenhaeuser et al. 1995; IFEU 1991; IFEU 1992; Mark et al. 1994, p.2; Mark et al. 1995, p.1; Stumpf 1994; Tillman 1991, p.245f

Langlebige, technische Plastikprodukte: Brahms et al. 1989 nach Haber et al. 1990, p.247; BUWAL 1996-248, p.32 nach Bilietewski et al. 1991; Frankenhaeuser et al. 1995

10.1.1. Spezielle Kunststoffprodukte

PVC-Dichtungsbahn

PVC-Dichtungsbahnen enthalten 1.46 G-% Blei aus Stabilisatoren. Es wurde angenommen, dass die Hälfte der Stabilisatoren Sulfate sind, und dadurch der Schwefelgehalt 0.1 G-% beträgt. Die bilanzierte Dichtungsbahn enthält neben 53.9% PVC auch 33.4% Weichmacher, 1.7% Glasvlies und 11% Füllstoff (bilanziert als Naturkalk).

PE-Dichtungsbahn

Die bilanzierten PE-Dichtungsbahnen enthalten 0.5 G-% Zink aus Stabilisatoren. Der PE-Gehalt beträgt 85%, der Füllstoffgehalt (Kalk) 13.5%, Anteil Glasflies 1.2%.

PE-Dampfbremsen flammgeschützt

Die bilanzierten PE-Dampfbremsen (100% Polyethylen) enthalten 6.7 G-% Brom aus Flammschutzmitteln

EPS-Isolationen

Die bilanzierten EPS-Isolationsplatten (100% PS) enthalten 6.7 G-% Brom aus Flammschutz-mitteln.

Bitumenbahn

Die bilanzierte Bitumenbahn enthält 63% Bitumen, 24% Abstreuung und Filler (Annahme inert), 6% Trägervlies (Annahme PE) und 7% Elastomer (PS) [ESU 1995, p.9.3]. Die Zusammensetzung von Raffinerie-Bitumen wurde aus [ESU 1996a, p.F.44] übernommen.

Glasfaserkunststoff

Das bilanzierte Glasfaserkunststoff-Element besteht zu 60% aus Glasfasern (inert) und 40% Polyester, welcher als langlebiger Kunststoff bilanziert wurde.

Kabel-Kunststoff

Die nicht verwerteten Umhüllungen von Elektrokabeln bestehen zu 66.3% aus PVC, zu 31.2% aus PE und enthalten 2.5% Kupfer [Gewiese 1998, p.95]. Das Kupfer wurde als brennbarer Teil der Kunststoffmatrix angenommen, da es sehr fein verteilt ist (Abrieb) und sich in einer sehr gut brennbaren Umgebung befindet. Die Kupferverunreinigungen gelangen dadurch in der KVA vermehrt in die Kessel- und Elektrofilterasche und weniger in die KVA-Schlacke.

10.1.2. Gips

Eine Vollgipsplatte resp. der Gipsanteil von Gipsfaser- und Gipskartonplatten wird zu als 100% Naturgips angenommen. Die Zusammensetzung stammt aus Angaben in [Renz et al. 1997, p.25/23; Lorenz et al. 1998, p.61f.]. REA-Gips, aus welchem Gipsplatten manchmal teilweise bestehen, wird nicht berücksichtigt. Die Gipswerke in Deutschland, welche die Schweiz beliefern, verwenden zu einem sehr hohen Anteil Naturgips. In Holland gibt es hingegen Gipswerke, welche 100% REA-Gips verwenden. REA-Gips hat insbesondere bei Quecksilber und Blei zwar höhere Gehalte als Naturgips; bei Chlor, Chrom und Nickel aber auch tiefere als Naturgips.

10.1.3. Karton

Die Zusammensetzung von Karton für Verpackungskarton, Karton von Gipskartonplatten sowie den Zellulosefasern von Gipsfasernplatten wird aus [ESU 1996a] übernommen.

10.1.4. Unbehandeltes Abfallholz

Die Zusammensetzung von unbehandeltem Abfallholz für Holzabfälle wird aus [ESU 1996a] übernommen.

10.1.5. Behandeltes Abfallholz

Es handelt sich um imprägniertes Holz mit hohen Chrom-, Kupfer- und Fluorgehalten. Ein grosser Teil des aufgewendeten Imprägniersalzes wird im Laufe der Standzeit ausgewaschen und gelangt nicht in die Entsorgung. Es werden hier die abgereicherten Mengen an Imprägniersalzen bilanziert [ESU 1996a, p.F.11].

10.1.6. Spanplatten

Die Spanplatte wird als 92.5% unbehandeltes Abfallholz mit 7.5% Polyurethan bilanziert.

10.1.7. Holzzementplatte

Die bilanzierte Holzzementplatte (Duripanel) wird als 36% unbehandeltes Holz, 49.5% Portlandzement und Zuschlagsstoffe bilanziert. Der Rest von 14.5% ist in der Platte fixiertes Kristallwasser.

Die Zusammensetzung von Portlandzement wird nach Angaben aus [GTK 1997] und [Renz et al. 1997, p.21] bilanziert.

10.1.8. Kunststoffputz

Feuchter Kunststoffputz enthält 80 G-% inerte Füllstoffe (als Kalk) und 4% Ethylen-Vinylacetat-Vinylchlorid-Terpolymerisat. Es wird die trockene Zusammensetzung bilanziert. Die Spurengehalte stammen aus Angaben für entsorgte Kunststoffputze von [Bare et al. 1995, p.31].

10.1.9. Dispersionsfarbe

Feuchte Dispersionsfarbe enthält 22.5 G-% inerte Füllstoffe (als Kalk), 22.5% Ttiandioxid-Pigmente (inert) und 34% Ethylen-Vinylacetac-Vinylchlorid-Terpolymerisat. Es wird die trockene Zusammensetzung bilanziert [von Arx 1995, p.86].

10.1.10. Alkydharzfarbe

Trockene Alkydharzfarbe wurde als Phtalsäureglycerid berechnet. Aus Trockenstoffen stammen 750ppm Kobalt und 7500ppm Kupfer [von Arx 1995, p.59]. Weitere Spurengehalte stammen aus entsorgtem Schleifstaub von Kunstharzfarben in [Bare et al. 1995, p.31].

10.1.11. Anstrichstoffe

In [Bare et al. 1995, p.31f] sind die Zusammensetzungen von Malereiabfällen aufgeführt. Die Angaben werden ergänzt durch die Annahme eines Phtalsäureglycerids als Kunstharzmatrix und werden stellvertretend für eine grosse Bandbreite von Anstrichstoffen bilanziert.

		Alkyd-harzfarbe	Anstrich-stoffe	behandeltes Abfallholz	Bitumen	Bitumenbahn	Dispersions-farbe trocken	EPS-Isolation	Gips	Glasfaser-kunststoff (GFK)	Holzzement-platte
Ho	MJ/kg	24	23.9	16.4	41.4	31.3	11.1	33.2	0	9.6	5.9
Hu	MJ/kg	23	23.2	15	39.4	29.5	10.5	32.2	0	7.16	4.6
H2O	kg/kg				0.0136	0.0151		0.0499	0.194	0.066	0.145
O	kg/kg	0.292	0.29	0.404	0.01	0.139	0.21475804	0.0348	0.375	0.332	0.339
H	kg/kg	0.0365	0.0363	0.0666	0.1	0.0752	0.03170803	0.0699		0.0369	0.0239
C	kg/kg	0.657	0.653	0.502	0.831	0.629	0.26832847	0.778		0.263	0.18
S	kg/kg			0.00208	0.04	0.0253		0.000608	0.188	0.000359	0.0073
N	kg/kg			0.0229	0.005	0.00335		0.00174		0.00283	0.00821
P	kg/kg				0.000004	0.00000252		0		0	0.000342
B	kg/kg					0		0		0	0.00000103
Cl	kg/kg			0.000486		0.000159	0.08646535	0.00101	0.000404	0.0163	0.000726
Br	kg/kg					0.0000592		0.0582		0.0000648	0
F	kg/kg			0.0000551		0.00000177		0.0000128	0.000505	0.00000864	0
J	kg/kg					0		0		0	0
Ag	kg/kg					0		0		0	0
As	kg/kg					2.27E-07	4.4122E-07	0.00000165	0.00000197	4.32E-07	0.00000437
Ba	kg/kg					0.0000258		0.000162		0.0000806	0
Cd	kg/kg	5.9121E-06	5.0622E-06	0.000002		0.0000035	1.6849E-08	0.0000209	9.6E-08	0.0000784	0.00000161
Co	kg/kg	0.00053209	0.00038823	7.71E-07		0.00000213		0.0000274		0.0000177	6.85E-08
Cr	kg/kg	0.00098043	0.00104074	0.0000347		0.00000335	1.248E-06	0.0000355	0.00000758	0.0000181	0.0000411
Cu	kg/kg			0.00037	0.000005	0.0000127		0.0000963	0.00000717	0.0000186	0.00000303
Hg	kg/kg			3.87E-07		5.75E-08	8.5442E-09	7.37E-07	1.11E-07	1.58E-08	1.17E-07
Mn	kg/kg			0.00000154		0.00000688		0.0000694		0.00000386	0.00045
Mo	kg/kg	3.9414E-05	3.8619E-05			0		0		0	0.00000103
Ni	kg/kg				0.0001	0.0000644	9.5527E-07	0.0000179	0.00000794	0.00000591	0.0000313
Pb	kg/kg	0.00745584	0.01524635	0.000498	0.000001	0.00000292	6.4946E-07	0.0000134	0.00000224	0.000348	0.000114
Sb	kg/kg					0.00000335		0.0000373		0.0000186	0
Se	kg/kg					2.51E-07		0.00000182		9.08E-07	0
Sn	kg/kg	0.00024634	0.00025678	0.0000185		0.00000191		0.0000227		0.0000113	0
V	kg/kg				0.00025	0.000303		0.00025		0.000125	0
Zn	kg/kg	0.00374434	0.00325148	0.000887		0.0000751	6.5444E-06	0.000747	0.0000141	0.000147	0.000209
Si	kg/kg					0.112	0.28480732	0		0.28	0
Fe	kg/kg				0.000075	0.000376		0.00323		0.00161	0.0153
Ca	kg/kg	0.00164226				0.000149	0.11392293	0	0.242	0	0.253
Al	kg/kg					0.0000239		0.000174		0.0000864	0.0202
K	kg/kg					0		0		0	0.000223
Mg	kg/kg					0.00000551		0		0	0.0000617
Na	kg/kg					0.000175		0.00127		0.000633	0.00547
Abbau	G-%	1	1	1	0.02	0.0152	1	0.03	1	0.004	0.36

Tab. 34 Bilanzierte Zusammensetzung, Heizwerte und Abbaubarkeit in der Reaktordeponie von Abfallstoffen

		Kabel-Kunststoff	Karton	Kunststoff-putz trocken	Naturgips	PE-Dampf-bremse flamm-geschuetzt	PE-Dichtungs-bahn	Portland-zement	PVC-Dichtungs-bahn	un-behandeltes Abfallholz
Ho	MJ/kg	28.3	17.9	1.3	0	36.9	33.2	0	24.1	16.4
Hu	MJ/kg	23.7	15.9	1.1	0	30.1	27.1	0	21.7	15
H2O	kg/kg	0.0355	0.104		0.19399019	0.0445	0.0401		0.0164	
O	kg/kg	0.0224	0.393	0.46551973	0.3750477	0.0347	0.102	0.39247193	0.125	0.40336799
H	kg/kg	0.072	0.0578	0.00350639		0.11	0.0998		0.0605	0.06646211
C	kg/kg	0.529	0.433	0.14011553		0.742	0.684		0.484	0.50082449
S	kg/kg	0.000809	0.00178		0.18752385	0.000385	0.000347	0.01323702	0.00106	0.00207474
N	kg/kg	0.00107	0.00258			0.00117	0.00106		0.000538	0.02281739
P	kg/kg	0				0	0	0.00062174	0	9.5175E-05
B	kg/kg	0				0	0		0	2.8552E-06
Cl	kg/kg	0.307	0.00717	0.00956167	0.00040415	0.00132	0.00119		0.242	0.00201764
Br	kg/kg	0.0000504				0.058	0.0000078		0.0000376	
F	kg/kg	0.0000143			0.00050518	0.000013	0.0000117		0.00000787	
J	kg/kg	0				0	0		0	
Ag	kg/kg	0				0	0		0	
As	kg/kg	0.00000184	0.00000117	1.4746E-06	1.9702E-06	0.00000164	0.00000148	8.8247E-06	0.00000102	9.816E-07
Ba	kg/kg	0.000198	0.0000572			0.000216	0.000194		0.0001	
Cd	kg/kg	0.0000119	9.33E-07	1.4873E-05	9.5985E-08	0.0000306	0.0000276	3.05E-06	0.0000436	2.8552E-07
Co	kg/kg	0.000022	9.18E-07	0.00011021		0.00000151	0.00000136		0.000017	1.9035E-07
Cr	kg/kg	0.0000315	0.00000924	4.551E-05	7.5777E-06	0.0000112	0.0000102	8.218E-05	0.0000338	1.1611E-06
Cu	kg/kg	0.025	0.0000351		7.1736E-06	0.0000373	0.0000336		0.0000301	8.426E-06
Hg	kg/kg	5.91E-07	3.01E-07	2.8556E-08	1.1114E-07	4.33E-08	3.9E-08	6.6185E-08	4.56E-07	2.3491E-07
Mn	kg/kg	0.0000633	0.0000952			0.0000271	0.0000244	0.0008545	0.0000429	7.614E-05
Mo	kg/kg	0		2.3796E-05		0	0		0	2.8552E-06
Ni	kg/kg	0.0000143	0.0000106	3.1926E-06	7.9415E-06	8.65E-07	0.00000078	6.2876E-05	0.0000306	4.7587E-07
Pb	kg/kg	0.0000171	0.000029	0.00013088	2.238E-06	0.0000204	0.0000183	0.00014285	0.0146	0.00012008
Sb	kg/kg	0.0000322	4.6E-09			0.00000908	0.00000818		0.0000231	
Se	kg/kg	0.00000203	0.00000311			0.00000182	0.00000164		0.00000113	
Sn	kg/kg	0.000253	0.00000675	0.0001578		0.00000344	0.0000031		0.000199	
V	kg/kg	0.000855				0.00199	0.00179		0.000155	
Zn	kg/kg	0.000141	0.0000633	6.8414E-05	1.4095E-05	0.000309	0.00457	0.00038608	0.0003	5.1012E-05
Si	kg/kg	0				0	0.0056		0.00793	
Fe	kg/kg	0.00299				0.00138	0.00125	0.03085321	0.002	2.0938E-05
Ca	kg/kg	0.000774		0.3807405	0.24248774	0.00234	0.0561	0.50936578	0.044	0.00123727
Al	kg/kg	0.000193				0.000173	0.000156	0.04087904	0.000107	8.5657E-06
K	kg/kg	0				0	0		0	0.00061864
Mg	kg/kg	0.0000287				0.0000865	0.000078		0	0.00017131
Na	kg/kg	0.00142				0.00127	0.00114	0.01103085	0.000787	1.9035E-05
Abbau	G-%	0.0129	1	1	1	0.02	0.0171	1	0.172	1

Tab. 35 Bilanzierte Zusammensetzung, Heizwerte und Abbaubarkeit in der Reaktordeponie von Abfallstoffen (Fortsetzung).

11. Hinweise zur Baustoffentsorgung für Bilanzierer

Beton kann in die Bauschuttaufbereitung gegeben werden und wird weitgehend verwertet. Der Zementanteil gelangt aber zu rund zwei Dritteln in die Feinfraktion, die deponiert wird. Kunststoffgebundene und -veredelte Betonteile müssen in Reaktordeponien entsorgt werden. Es wird von 3% Bewehrungsstahl ausgegangen. Bewehrter Beton hat eine höhere Abbruchenergie als unbewehrter Beton. Die Entsorgung von bewehrtem Beton sollte deshalb nicht mit den Daten für unbewehrtem Beton erfolgen.

Ist bewehrter Beton in der Stoffbilanz eines Gebäudes separat als Beton plus Stahl bilanziert worden (d.h als x kg Beton und y kg Stahl) sind folgende Vorgehen möglich:

1.) beträgt der Stahl etwa 3% des Betongewichtes, d.h. (y / (x+y)) = ca. 3%, kann die Entsorgung von bewehrtem Beton als (x+y) kg "bewehrter Beton in Entsorgung" bilanziert werden.

2.) Ist wesentlich *mehr als 3% Stahl* in bewehrtem Beton verbaut worden, d.h. (y / (x+y)) >3%, kann die Entsorgung als (x *103%) kg "bewehrter Beton in Entsorgung" *plus* (y - x*3%) "Massiveisen in Entsorgung" bilanziert werden.

3.) Ist wesentlich *weniger als 3% Stahl* in bewehrtem Beton verbaut worden, d.h. (y / (x+y)) <3%, kann die Entsorgung als (x *103%) kg "bewehrter Beton in Entsorgung" *minus* (x*3% - y) "Massiveisen in Entsorgung" bilanziert werden.

Bei "Massiveisen in Entsorgung" als Renovations- und Abbruchabfall wurde die Abbruchenergie von bewehrtem Beton verbucht.

Analog ist vorzugehen, wenn Beton als Zement plus Betonkies plus Wasser bilanziert wurde.

Leichtbeton und Leichtbausteine dürfen nicht via Bauschuttaufbereitung entsorgt werden. Eine sortenreine Verwertung ist möglich.

Tonprodukte: reiner Ziegelsplitt oder ausgebaute Ziegelsteine können verwertet werden. Mischabbruch kann in Recyclingbaustoffen verwertet werden.

Gipsbaustoffe: Gips gilt als Störstoff bei der Bauschuttaufbereitung und muss separat entsorgt werden. Wegen der Löslichkeit kann Gips nicht in Inertstoffdeponien beseitigt werden. Für eine Verwertung sind die Baustoffe meist zu verschmutzt. Gips muss in Reaktordeponien entsorgt werden.

Kalksandstein: reiner, d.h. unverschmutzter Kalksandstein ist gut verwertbar.

Mörtel und mineralische Putze gelangen bei der Bauschuttsortierung weitgehend in die Feinfraktion, die deponiert wird.

Kunststoffputze gelangen bei der Bauschuttsortierung weitgehend in die Feinfraktion, die deponiert wird.

Unbeschichtetes Silikatglas kann sortenrein verwertet werden. Ansonsten kann es als Inertstoff deponiert werden. Ein grosser Teil des Glases dürfte zusammen mit den Rahmen als Sperrgut entsorgt werden und so auch in KVA-Schlacken und Schlackenkompartimente von Reaktordeponien gelangen. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute aber auch "wild" entsorgt.

Beschichtete Gläser werden in der Inertstoffdeponie beseitigt. Ein grosser Teil des Glases dürfte zusammen mit den Rahmen als Sperrgut entsorgt werden und so auch in KVA-Schlacken und Schlackenkompartimente von Reaktordeponien gelangen. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

Unbehandeltes Holz kann einer stofflichen Verwertung (Spanplattenproduktion) zugeführt werden. Unbehandelte Hölzer stammen v.a. aus dem Verpackungsbereich, von Massivholz-Verschnitten und Bauhilfshölzern. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

Beschichtete, behandelte, beklebte Hölzer müssen in geeigneten Anlagen verbrannt werden. Das bilanzierte "Altholz unbehandelt" bezieht sich auf Chrom/Kupfer-imprägniertes Holz (Nässeschutz). Anstriche können separat als "Anstrich auf Holz" bilanziert werden. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt. Fenster und Türen können über eine Bauteilbörse theoretisch wiederverwendet werden, müssen aber nachisoliert und gedichtet werden.

Klebstoffe und Anstrichstoffe: Erstellungsresten werden in einer SAVA verbrannt. Verbaute Klebstoffe und Anstrichstoffe verbleiben am behandelten Objekt. Angestrichenes Holz wird verbrannt. Bei angestrichenen mineralischen Bauteilen gelangen die Stoffe zum einen in die Feinfraktion der Sortieranlage, welche deponiert wird; zum anderen als Störstoff in die Verwertung oder Inertstoffdeponie. Bei angestrichenen Metallen fallen die Stoffe als Gichtgas, resp. als Schlacke an.

Fugendichtungen und Kitte: Erstellungsresten werden in einer SAVA verbrannt. Verbaute Klebstoffe und Anstrichstoffe verbleiben am behandelten Objekt. Sie fallen in der Sortieranlage in der Feinfraktion an, die deponiert wird.

Dichtungsbahnen: glasfaserarmierte PE- und PVC-Dichtungsbahnen werden in der KVA verbrannt. Die Recyclingrate in der Schweiz beträgt 3% bezogen auf das Abfallaufkommen. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

Bitumen-Anstrichmittel s. Klebstoffe

Steinwolle/Glaswolle/Mineralwolle kann auf Inertstoffdeponien eingelagert werden. Die Recyclingrate ist z.Z. sehr klein.

Zellstoff-Isolationen (Isofloc) kann rezykliert werden; sonst Verbrennung in KVA. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

EPS-Isolationen können vollrezykliert oder für Leichtbeton verwendet werden. Die Verwertungsquote wird z.Z. auf 3% des Abfallaufkommens geschätzt. Der Grossteil von Alt–EPS wird also verbrannt. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

Schaumglas: Sauberer Verschnitt kann vollrecycliert werden. Verklebtes Schaumglas kann höchstens bei der Ziegelfertigung oder als Schottermaterial verwertet werden. Allenfalls muss Altschaumglas wegen Kleberresten auf einer Reaktordeponie deponiert werden; sonst Inertstofffdeponie.

Tapeten aus Papier oder PVC müssen in KVAs verbrannt werden. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

Bodenbeläge (textil und elastisch) werden zum grossen Teil verbrannt. In Deutschland exisitert eine Recyclinganlage. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

PVC-Fensterrahmen können in Deutschland verwertet werden. Die Recyclingquote in der Schweiz dürfte ca. 2% des Abfallaufkommens sein. Nicht verwertete PVC-Fenster werden als Sperrmüll in KVAs verbrannt. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

Kunststoffrohre: (PE, PP, PVC) Heute wird v.a. Verschnitt aus der Verarbeitung und aus Erstellungsabfällen rezykliert; Altrohre kaum. Nicht verwertete Rohre werden als Sperrmüll in KVAs verbrannt. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

PE-Baufolien: Die Verwertungsquote wird z.Z. auf ca. 9% des Abfallaufkommens geschätzt. Der Rest wird verbrannt. Ein wesentlicher Teil der brennbaren Bauabfälle (46%) wird in der Schweiz heute "wild" entsorgt.

Verpackungsabfälle: Die beim Baumaterialbezug mitgelieferten Verpackungen (Paletten, Folien, Stahlbänder, Papiersäcke etc.) fallen als Erstellungs- und Renovationsabfälle an und müssen als Bauabfälle entsorgt werden. Die Herstellung der spezifischen Mengen Verpackungsabfälle sollten bei der Baumaterialbilanzierung berücksichtigt worden sein (kg Verpackung pro kg Baumaterial). Die entsprechenden Mengen sollten auch in die Entsorgung gelangen. Mengenangaben finden sich z.B. in [ESU 1995].

Kabel: Alt-Kabel werden geshreddert und das enthaltene Kupfer rezykliert. Reststoffe (Isolationen) dürfen ab 2000 nicht mehr deponiert werden und werden verbrannt.

Waschgrubensedimente: Ölfreie Waschgrubensedimente müssen in einer Reaktordeponie entsorgt werden. Öl- und fetthaltige Waschgrubensedimente werden als Sonderabfälle in einer SAVA (evt. Zementwerk) verbrannt.

11.1. Dichte von Baustoffen

	Dichte, kg/m^3		Dichte, kg/m^3
unbewehrter Beton	2200	Alkydharzfarbe	850
bewehrter Beton	2300	Dispersionsfarbe	850
Zement (in Beton) und Mauermoertel	2200	Dichtungskitt (PUR)	1200
Betonkies	2200	PVC-Produkte	1400
Backstein	1600	PE/PP-Produkte	960
Vollgipsplatte	1000	Holzzementplatte	1200
Gipsputz	1000	EPS (in Leichtputz u. -beton)	30
Gipskartonplatte	1000	Mineralischer Putz	2000
Gipsfaserplatte	1000	Kunstputz	1300
Mineralwolle	50	PVC-Dichtungsbahn	1200
EPS-Isolation flammgeschuetzt	20	PE-Dichtungsbahn	1000
Flachglas	2600	PE-Dampfbremse flammgeschuetzt	1000
Massiveisen	7850	Bitumenbahn	1270
Kleinmetall (in brennbaren Verbunden)	7850	Elektrotechnische Anlagen	500
Altholz	600	Elektrokabel	4100
Spanplatte (7.5%PU)	650	Pneu-Waschgrubensediment pro tkm	2200
PUR-Schaum	30	Glasfaserkunststoff-Element	1750
Anstrich	850	Verpackungskarton	300

12. Diskussion der Resultate

Die Resultate der Umweltbelastung für Entsorgungsoptionen verschiedener Baumaterialien befinden sich im Anhang F und auf der Resultatediskette.

Die Resultatediskette (HD, 1.4 MB) enthält folgende Files im Text-Format:

cat53Res.rel kumulierte (direkte und indirekte) Emissionen in die Biosphäre und Ressourcenentnahmen für alle bilanzierten Entorgungsoptionen und Beseitigungsprozesse (826kB). Durch die Gewichtung mit den verschiedenen Bewertungsmethoden wurden die hier diskutierten Ökobilanz-Resultate erhalten.

cat53Ein.rel Sachbilanzen der direkten Aufwendungen für alle bilanzierten Entorgungsoptionen und Beseitigungsprozesse (76kB).

Diese Files können auch online unter http://www.unite.ch/doka/baucat53.htm heruntergeladen werden.

12.1. Bewertungsmethoden

Die Auswertungen der Resultate wurde mit verschiedenen vollaggregierenden Bewertungsmethoden vorgenommen. Es handelt sich um Eco-indicator 95+, Umweltbelastungspunkte '97 und Primärenergie (EI95+, UBP, PE).

12.1.1. Bewertungsmethode Eco-indicator 95+

In [Goedkoop 1995] wurde die Bewertungsmethode "Eco-indicator 95" vorgestellt, welche eine Vollaggregation von neun wichtigen Umwelteffekten erreicht. So können diese Umweltbelastungen gewichtet zu einer einzigen "Umweltbelastungszahl" summiert werden. Eco-indicator 95 bewertet 80 Luft- und 16 Wasseremissionen[22].

Es wird angenommen, dass je weiter die gegenwärtige Intensität eines Umwelteffektes von einer nachhaltigen bzw. akzeptablen Intensität entfernt ist, desto schwerwiegender dieser Umwelteffekt zu gewichten ist (sog. *distance-to-target*-Ansatz).

In einem ersten Schritt wurde daher festgestellt, wie gross die *gegenwärtigen Belastungen* durch die verschiedenen Umwelteffekte in Europa sind. Dies sind die sogenannten Normalisierungswerte.

In einem zweiten Schritt wurde evaluiert, wie gross die *nachhaltigen resp. akzeptablen Belastungen* sein dürfen. Zu diesem Zweck muss zuerst festgelegt werden, was eine nachhaltige oder akzeptable Belastungssituation ist. In anderen Worten, es müssen sogenannte Schutzsubjekte des Umweltschutzes bezeichnet werden ("Was soll überhaupt geschützt werden?"). Zudem muss das akzeptable Ausmass festgelegt werden in dem diese Schutzsubjekte beeinträchtigt werden dürfen, da eine Nullbelastung utopisch ist. In [Goedkoop 1995] wurden als

22 Die in [Goedkoop 1995] angegebenen und in diesen Zahlen nicht miteingeschlossenen Bewertungsfaktoren für *Pestizide* wurden für dieses Projekt nicht benötigt. Pestizidemissionen werden in [ESU 1996] nicht aufgeführt, sind aber für Ökobilanzen von z.B. Landwirtschaftsprodukten wichtig.

äquivalente Schutzsubjekte die **menschliche Gesundheit** sowie **Lebensraumerhaltung für Ökosysteme** festgelegt. Als akzeptable Beeinträchtigungen wurden dabei - als explizit subjektiver Arbeitsansatz – 1 zusätzlicher Toter pro 1 Million Einwohner *pro Jahr* bzw. 5% *langfristige* Ökosystemzerstörung als gleich bedenklich betrachtet. Damit konnte bestimmt werden, wie gross Umwelteffekte sein müssten, damit deren Auswirkungen als akzeptabel bezeichnet werden können. Dies sind die sogenannten Zielwerte. Als Quotient von gegenwärtigen Werten und Zielwerten ergeben sich die jeweiligen *Reduktionsfaktoren*, die gut mit internationalen Forderungen verglichen werden können.

In [Jungbluth 1999] wurden die im Eco-indicator95 [Goedkoop 1995] vorgestellten Charakterisierungen der Umwelteffekte aufgrund neuer Erkenntnisse aktualisiert, teilweise korrigiert und durch eine Charakterisierung für Energieressourcen und radioaktive Emissionen ergänzt. Die Methode wird als Eco-indicator 95+ bezeichnet und im folgenden mit EI95+ abgekürzt.

Auswahl der berücksichtigten Umwelteffekte

Die verschiedenen berücksichtigten Umwelteffekte wurden aufgrund ihrer Wichtigkeit an der Schädigung der menschlichen Gesundheit sowie der Beeinträchtigung von Ökosystemen ausgewählt [Goedkoop 1995]. Die Berücksichtigung von radioaktiven Emissionen ist motiviert durch den Wunsch, die Bewertung der in der nuklearen Brennstoffkette erzeugten Belastungen besser abzubilden und orientiert sich an den gleichen Schutzsubjekten wie die originale Ecoindicator-Methode [Frischknecht 1998, p.129].

Charakterisierter Umwelteffekt	**einige typische brücksichtigte Emissionen**
Treibhauseffekt	CO_2, Methan, Lachgas, div. Halone, SF_6
Ozonloch	div. Freone, Halone, chlorierte/bromierte Verbindungen
Sommersmog	div. Organika (VOC), NO_x
Versauerung	NO_x, SO_x, NH_3, HCl, HF
Überdüngung	Phosphate, NH_4, NO_3, COD
Schwermetalle	Sb, As, Ba, Pb, B, Cd, Cr, Mn, Mo, Ni, Hg
Karzinogene	Benzol, Benzo(a)pyren, Polyzyklische Aromaten, Dioxine, As, Ni, Cr
Wintersmog	NO_x, SO_x, Partikel
Radioaktivität	radioaktive Isotope wie z.B. ^{222}Rn, ^{14}C, ^{129}I, ^{3}H, ^{85}Kr
Energieressourcen	Rohöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Uran, Wasser (Hydroelektrizität)

Tab. 36: Berücksichtigte Umwelteffekte aus der Bewertungs-Methode "Eco-indicator95+" [Jungbluth 1999]

Im folgenden seien die betrachteten Umwelteffekte kurz vorgestellt.

Treibhauseffekt: Muss kaum vorgestellt werden. Hier werden alle Emissionen gemäss ihrer Wirkung gewichtet zusammengefasst, die das Wärmerückhaltevermögen der Atmosphäre erhöhen und so den natürlichen Treibhauseffekt verstärken. Der betrachtete Zeitraum der Wirkung beträgt hierbei 100 Jahre.

Ozonloch: Hier werden die Substanzen zusammengefasst, welche das stratosphärische Ozon abbauen und so die UV-absorbierende Ozonschicht ausdünnen.

Sommersmog: bezeichnet die Bildung von bodennahem Ozon in der Troposphäre, die lichtinduziert ist und daher v.a. im Sommer auftritt (Photosmog). Sommersmog verursacht Atemwegskrankheiten.

Versauerung: Säuren oder Substanzen, die in der Atmosphäre zu Säuren umgewandelt werden und so Pflanzen und Boden schädigen, werden hier zusammengefasst (Acidification, saurer Regen).

Überdüngung: Luft- und Wasserschadstoffe, die in Gewässern die Nährstoffbilanz erhöhen, werden hier zusammengefasst (Eutrophierung). Überdüngung vermindert die Biodiversität.

Schwermetalle: Hier werden Schwermetallemissionen in Luft und Wasser zusammengefasst, welche verschiedene Schadwirkungen auf Organe haben.

Karzinogene: Krebsauslösende Substanzen werden hier gewichtet zusammengefasst.

Wintersmog: Wintersmog ist im Gegensatz zu Sommersmog nicht lichtinduziert und wird von Aerosolen und Partikeln bzw. deren Vorgängern verursacht. Diese werden verstärkt bei Inversionslagen im Winter über Ballungsgebieten konzentriert. Wintersmog verursacht Atemwegskrankheiten.

Radioaktivität: Radioaktive Strahlung von diversen Isotopen werden hier gemäss ihrer Schadwirkung auf den Menschen bezüglich tödlicher Krebserkrankungen gewichtet zusammengefasst. Erbgutschädigung und nicht-tödliche Krebserkrankungen bleiben unberücksichtigt.
Energieressourcen: Die Bewertung von Energieressourcen entspricht neben dem Schutz der menschliche Gesundheit und der natürlichen Ökosysteme einem dritten Schutzsubjekt, welchens neu aufgenommen wurde. Hier soll die Knappheit energietischer Ressourcen bewertet werden, und die Wünschbarkeit sie in aussreichendem Mass auch folgenden Generationen zur Verfügung stellen zu können.

Die Zusammenfassung verschiedener Emissionen zu einem Umwelteffekt oder Wirkungskategorie (sog. Charakterisierung) erfordert eine *quantitative Gewichtung* der Emissionen relativ zueinander. In der Praxis wird dies am besten so gelöst, dass eine Leitsubstanz bezeichnet wird, z.B. Kohlendioxid für den Treibhauseffekt, Ethen für den Sommersmog etc. Die Wirkungen der übrigen Emissionen derselben Kategorie werden in Einheiten *relativ zu dieser Leitsubstanz* ausgedrückt. Also z.B. Kohlendioxid-Äquivalente für den Treibhauseffekt (sog. Charakterisierungswerte). Die benötigten Wirkungen pro Einzelsubstanz werden meist aus Modellen der Ökosphäre abgeleitet.

Für Treibhausgase und ozonabbauende Substanzen existieren international abgestimmte Charakterisierungswerte der IPCC und WMO[23] aus globalen Atmosphärenmodellierungen. In der sogenannten CML[24]-Methode der NOH[25] sind daneben weitere Charakterisierungswerte u.a. für Sommersmog, Versauerung, Überdüngung aufgeführt [Heijungs et al. 1992]. Die Werte für Sommersmog basieren auf Modellen der UNECE[26] für Europa. Die Werte für Versauerung und Überdüngung basieren auf Überlegungen zum chemischen-biologischen Verhalten der Substanzen. Die Klassifizierung und die Charakterisierungswerte für Schwermetalle,

23 Intergovernmental Panel on Climate Change und World Meteorological Organisation.

24 Centrum voor Milieukunden, Leiden (Zentrum für Umweltforschung), Holland.

25 Netherlands National Reuse of Waste Research Programme, Holland

26 United Nations Economic Commisson for Europe

Karzinogene und Wintersmog gehen auf die Eco-indicator95-Methode zurück [Goedkoop 1995], welche ebenfalls Teil des holländischen NOH-Programmes ist. Diese basieren auf den 'Air Quality Guidelines' und den 'Quality Guidelines for Drinking Water' der WHO[27], welche Grenzwerte für langanhaltende, niedrigkonzentrierte Belastungen präsentieren. Diese Charakterisierungswerte wurden aufgrund neuer Erkenntnisse in [Frischknecht 1998] ergänzt und teilweise angepasst. Die Wirkungspotentiale von radioaktiven Nukliden in [Frischknecht 1998] stützt sich auf regionale Atmosphärenmodellierungen über Ausbreitung und Exposition in den ExternE-Untersuchungen des JOULE-Programms der EC[28] [ExternE 1995]. Energieressourcen werden aufgrund ihres oberen Heizwertes bilanziert. Siehe dazu auch die Heizwerte bei der Primärenerigebilanzierung.

Berechnungsformel EI95+

Zur Gewichtung werden zuerst die einzelnen Emissionen E_j mit den Charakterisierungswerten C_{ij} der verschiedenen Umwelteffekte *i* multipliziert. Die charakterisierten Umwelteffekte durch die jeweiligen Normalisierungswerte N_i dividiert und mit dem Reduktionsfaktor r_i multipliziert (s. Tab. E.1). Da dabei dimensionslose Zahlen resultieren, werden die resultierenden Einheiten als *Ecoindicator-Punkte* bezeichnet. Da meist sehr kleine Zahlen resultieren, werden die Punkte mit 10^9 multipliziert und als *Nano-Punkte* bezeichnet [29]. Die Ecoindicatorpunkte, die aus den verschiedenen Umwelteffekten resultieren, dürfen zu einer "Umweltbelastungszahl" zusammengezählt werden.

impact score $= \sum_{ij} (\text{Emission}_j * C_{ij} / N_i * R_i) * 10^9$

$= \sum_{ij} (\text{Emission}_j * C_{ij} / T_i) * 10^9$ wobei $N_i = T_i * R_i$

impact score:	Umweltbelastung ausgedrückt in Eco-indicator 95+-Nano-Punkten
Emission_j:	kumulierte Emission *j* in [kg] pro betrachtete funktionale Einheit
C_{ij}:	Charakterisierungsfaktor für Substanz *j* bezüglich Umwelteffekt *i* , ausgedrückt in kg Leitsubstanzäquivalenten für Effekt *i* pro kg Substanz *j*
N_i	Normalisierungswert$_i$ = gesamte aktuelle jährliche Belastung in Europa durch Umwelteffekt *i* , ausgedrückt in kg Leitsubstanzäquivalenten für Effekt *i* pro Jahr
R_i	Reduktionsfaktor für Umwelteffekt *i* um die aktuellen Belastungen auf ein tolerierbares Mass zu senken [-]
T_i	Zielwert$_i$ = gesamte tolerierbare jährliche Belastung in Europa durch Umwelteffekt *i* , ausgedrückt in kg Leitsubstanzäquivalenten für Effekt *i* pro Jahr

27 World Health Organisation

28 Commission of the European Comunities, Directorate General XII Science, Research and Development

29 Die geringe Grösse der Resultatzahlen ist kein Zufall, da im Normalisierungsschritt durch die *gesamte, aktuelle jährliche Umweltbelastung in Europa* dividiert wird. Nachfolgend wird mit dem Reduktionsfaktor (aktuelle Belastung ÷ tolerierbare Belastung) multipliziert. Zusammengenommen bedeutet dies, dass pro Umwelteffekt durch die gesamte *tolerierbare* jährliche Umweltbelastung in Europa T_i dividiert wird. Ein Ecoindicator-Punkt (i.e. 10^9 Nano-Punkte) würde daher der langfristig tolerierbaren, europäischen Beeinträchtigung eines der Schutzsubjekte pro Jahr entsprechen. Da es in Ecoindicator bisher zwei Schutzsubjekte gibt, entspricht ein Wert von zwei Ecoindicator-Punkten der gesamten, in Ecoindicator berücksichtigten, tolerierbaren Umweltbelastung in Europa pro Jahr.

Die verwendeten Normalisierungswerte, Reduktionsfaktoren und die resultierenden Gewichtungsfaktoren für die verschiedenen Umwelteinwirkungen finden sich im Anhang E.1.

12.1.2. Bewertungsmethode der ökologischen Knappheit (UBP)

Ähnlich wie die Ecoindicator-Methode erlaubt die Methode der ökologischen Knappheit eine Vollagragation von verschiedenen Umweltbelastungen aufgrund ihrer Wirkung. Im folgenden wird die Methode mit UBP (Umweltbelastungspunkte) abgekürzt.

Die Methode wurde erstmals 1990 publiziert. Für diese Arbeit wird die neue Version verwendet. Für verschiedene Emissionen von Einzelstoffen werden in [BUWAL 1998] sogenannte Ökofaktoren hergeleitet. Diese Ökofaktoren stellen die Gewichtungsfaktoren der Methode dar. Durch Multiplikation der Emissionen mit den Ökofaktoren ergeben sich Umweltbelastungspunkte (UBP). Eine vorgängige, quantitative Zuordnung zu verschiedenen Umwelteffekten (Charakterisierung) findet grösstenteils nicht statt. Für jede Substanz wird ein einzelner kritischer Umwelteffekt bestimmt, zu dem die Substanz beiträgt. Der Ökofaktor wird gemäss der Wirksamkeit für diesen einen Umwelteffekt berechnet [30].

Ähnlich wie beim Eco-indicator 95 wird bei der Methode der ökologischen Knappheit ein *distance-to-target*-Ansatz gewählt. Das heisst der Gewichtungsfaktor (hier Ökofaktor) leitet sich aus einem Vergleich der aktuellen Belastungssituation mit der tolerierbaren Belastungssituation ab. Die tolerierbare Belastungssituation wird auch 'kritische Fracht' genannt. Die kritische Fracht wird meist aus der schweizerischen Umweltpolitik abgeleitet, fusst teilweise aber auch auf anderen Einschätzungen (z.B. bei Endlagerkapazitäten für radioaktive Abfälle).

Bei der Methode der ökologischen Knappheit werden nicht nur stoffliche Emissionen bewertet, es wird auch der Verbrauch von knappen Gütern berücksichtigt. Als knappe Güter werden energetische Ressourcen (Primärenergie) und Beanspruchung von Deponieraum für feste Abfälle sowie Endlagerraum für radioaktive Abfälle berücksichtigt.

Auswahl der berücksichtigten Belastungen

Die Auswahl der berücksichtigten Belastungen ist historisch von früher 22 Schadstoffen und vier weiteren Belastungen auf rund 80 Schadstoffe und vier weitere Belastungen gewachsen. Sie stützt sich auf Vorgaben der Schweizerischen Umweltpolitik, was bestehende internationale Vereinbarungen, schweizerische Gesetztestexte oder Verordnungen, aber auch Entwürfe dazu

---

30 Da UBP sich bei der Berechnung der Ökofaktoren auf jeweils nur *einen* Umwelteffekt pro Substanz abstützt, werden Substanzen mit Kombinationswirkungen nicht vollständig bewertet. Bei Kombinationswirkungen wird derjenige Effekt berücksichtigt, welcher den höheren Ökofaktor ergibt [BUWAL 1998, p.12, 46]. So werden beispielsweise gewisse Kältemitel nur aufgrund ihrer Wirksamkeit bezüglich Treibhauseffekt *oder* Ozonzerstörungspotential bewertet – aber nicht aufgrund der Kombinationswirkung. Dies obwohl diese Substanzen während ihrer atmosphärischen Lebensdauer als Treibhausgase wirken und nach ihrer Zerstörung in der Ozonschicht auch zum katalytischen Abbau des Ozons beitragen, also ein einzelnes Molekül durchaus fähig ist, real zu *beiden* Effekten beizutragen. Ähnliche Überlegung lassen sich zu den Kombinationswirkungen von Stickoxiden (NO_X) machen, welche in UBP nur bezüglich der Wirkung als Photooxidantien (Sommersmog) gewichtet werden. Ihre Beiträge zur Versauerung werden als weniger bedeutend betrachtet und daher nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu werden bei der Bewertung von Ammoniakemissionen die Gesamtstickstoffdepositionswirkung, welche zu Versauerung und Überdüngung führen, integral berücksichtigt.

oder Zielsetzungen von Bundesämtern sein können. Die Auswahl richtet sich nicht nach einem einheitlichen Kriterium. So werden z.B. Chlorid- und Sulfatemissionen aufgrund ihrer kleinen Bedeutung in der Schweiz nicht berücksichtigt; Nitrate werden ebenfalls als unbedeutend in der Schweiz betrachtet, jedoch aufgrund ihrer Wirkung in der Nordsee (und einer bestehenden Vereinbarung) trotzdem berücksichtigt. AOX werden hingegen berücksichtigt ohne die Relevanz für die Schweiz abzuklären, weil der Wunsch besteht "eine als störend empfundenen Lücke" bei der Bewertung der Emissionen der Papierherstellung zu schliessen [BUWAL 1998, p.70]. Die wichtigsten Umweltbelastungen in der Schweiz scheinen jedoch mit der UBP-Methode grösstenteils abgedeckt. Nicht berücksichtigt werden radioaktive Emissionen [31].

Eine ausführliche Liste mit allen berücksichtigten Umweltbeeiträchtigungen der UBP-Methode und des zugehörigen Umwelteffektes, aus dem der Ökofaktor abgeleitet wurde, findet sich im Anhang E.2.

Berechnungsformel UBP

Wie erwähnt, wird bei der Methode der ökologischen Knappheit ein *distance-to-target*-Ansatz gewählt. Der genaue Berechnungsalgorithmus unterscheidet sich jedoch von der Eco-indicator-Methode. Bei Eco-indiactor wird der charakterisierte Umwelteffekt durch die *aktuelle* Belastung in Europa N_i dividiert und mit dem Reduktionsfaktor für diesen Effekt r_i multipliziert. Bei der Methode der ökologischen Knappheit wird die einzelne Emission durch die *kritische, tolerierbare* Fracht in der Schweiz K_j dividiert und mit dem Reduktionsfaktor für diese Emission R_j multipliziert.

Umweltbelastungspunkte $= \sum_i (\text{Emission}_i / K_i * A_i / K_i) * c$

$= \sum_i \mathbf{(\text{Emission}_i / K_i * r_i) * c}$ wobei $A_i = K_i * r_i$

$= \sum_i (\text{Emission}_i / (K_i)^2 * A_i) * c$

Umweltbelastungspunkte:	Umweltbelastung ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten
Emission_i :	kumulierte Umwelteinwirkung *i* in [kg] pro betrachtete funktionale Einheit
K_i:	Kritische jährliche Fracht der Umwelteinwirkung *i* in der Schweiz
A_i:	Aktuelle jährliche Fracht der Umwelteinwirkung *i* in der Schweiz
c:	Faktor 10^{12}/[a] für handliche Einheiten
r_i:	Nötiger Reduktionsfaktor für die Umwelteinwirkung *i* in der Schweiz

12.1.3. Kumulierter Primärenergieaufwand (PE)

Bei der Betrachtung von ganzheitlichen Prozessketten von der Wiege bis zur Bahre können auch die gesamtheitlich beanspruchten *Energieträger* interessieren. Im Sinne des Lebenszyklus-ansatzes einer Ökobilanz werden dabei alle direkt ("weiss") und indirekt ("grau") benötigten Energieträger bilanziert. Man spricht dabei von *kumuliertem* Primärenergie-Aufwand, da alle Energiebezüge bis zur Entnahme aus der Biosphäre (Primärenergie) zurückverfolgt werden.

31 Die Berücksichtigung von radioaktivem Abfall in UBP bezieht sich nur auf die Knappheit der Endlagerkapazitäten und nicht auf Emissionen.

Sämtliche Verluste an Energie bei der Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung von Energieträgern sowie alle indirekten Energieaufwendungen für Transporte und Infrastruktur in der Energiekette werden dabei detailliert berücksichtigt.

Das Konzept der grauen Energie wird angewendet, weil erkannt wurde, dass der indirekte Energieaufwand durch die Gebäudeinfrastruktur für die ganzheitliche Energiebilanz eines Gebäudes wesentlich ist und bei sinkendem Verbrauch während der Nutzungsphase relativ immer wichtiger wird.

Der Begriff "graue Energie" wurde in der Schweiz ursprünglich für den Energieaufwand importierter Güter bezogen [Spreng et al. 1995, p.46].

Der Unterschied zwischen Energiebilanzen und Ökobilanzen

Eine Primärenergie-Bilanz berücksichtigt alle Energieträger wie z.B. Erdöl, Erdgas, Uran oder Meteorwasser allein aufgrund ihres Energieinhaltes in Megajoule. Bei Ökobilanzen werden hingegen möglichst *alle ökologisch relevanten Einwirkungen berücksichtigt*, und zwar *unabhängig davon, ob sie mit einem Energieverbrauch verbunden sind* oder nicht. Diese Einwirkungen werden aufgrund ihrer ökologischen Wirkung differenziert gewichtet und bewertet. Primärenergieaufwendungen enthalten hingegen keine Gewichtung aufgrund der *ökologischen Auswirkungen* aus der Bereitstellung oder dem Verbrauch der Energieträger durch Emissionen oder Flächenverbrauch etc. noch wird die unterschiedliche *Knappheit der Energieressourcen* quantitativ berücksichtigt.

Eine Verbindung von reinen Energiebilanzen zu ökologischen Aussagen besteht nur in dem Sinne, dass durch einen energieverzehrenden Prozess auch meist die Umwelt wesentlich belastet wird. Energieverzehrende Prozesse sind also mit grosser Wahrscheinlichkeit auch umweltbelastende Prozesse. **Nur der Umkehrschluss, dass eine Umweltbelastung mit einem Energieverbrauch verbunden sein muss, trifft nicht zu.** Der Energieaufwand der Wasserbelastung aufgrund der Korrosion von Kupferdächern ist beispielsweise null.

> ***Beim Vergleich von zwei unterschiedlichen Systemen garantiert ein tieferer Primärenergieverbrauch nicht automatisch eine tiefere ökologische Belastung.***

Berechnung Primärenergieinhalt

Eine Ökobilanz, liefert Aussagen zu den kumuliert entstehenden Umweltbelastungen, aber auch zu den kumuliert benötigten Mengen an Materialien und Ressourcen. Aus einer Ökobilanz kann leicht eine Energiebilanz erhalten werden, indem nur die energetischen Ressourcen allein betrachtet werden. Insbesondere werden bei diesem Vorgehen auch Verbräuche von energetischen Ressourcen zu nicht-energetischen Zwecken berücksichtigt (sog. nicht-energetischer Verbrauch NEV, z.B. Erdöl für Kunststoffe, Holz für Baustoffe, Papier, Karton).

Der Primärenergieinhaltes ist aber nur scheinbar eine objektive Grösse, da die Berechnung auf verschiedene, diskutable Arten erfolgen kann. Die Berechnung des Primärenergieinhaltes stützt sich im Allgemeinen (oft unausgesprochen) auf folgende Thesen:

- Ressourcen haben einen schützenswerten Eigenwert, sofern sie nicht ohne spezielle Aufbreitung überall und in geologischen Zeiträumen unerschöpflich zur Verfügung stehen.
- Die aus den Ressourcen mit heutiger Technik nutzbare Energie bestimmt deren Eigenwert.

Der Indikator Primärenergie bildet somit Schäden an dem schützenswerten Gut "natürliche (energetische) Ressourcen" ab. Schäden an anderen möglichen Schutzgütern wie "menschliche Gesundheit" oder "Schädigung der Ökosysteme" sind darin jedoch nicht eingeschlossen.

Aus diesen Thesen lässt sich die Berechnungsweise ableiten. Die erfasste Primärenergie umfasst in der vorliegenden Studie:

- Aufbereitete und gehandelte Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle, Uran, Holz, Wasser(kraft), aggregiert auf der Basis des Bedarfs an Ressourcen und gewichtet mit ihrem oberen Heizwert.
- Uran, aggregiert auf der Basis des Bedarfs an spaltbarem Uran und gewichtet mit der in einem modernen Leichtwasserreaktor gewinnbaren Energiemenge (Spaltwärme).

Zur Berechnung des kumulierten Primärenergieaufwandes werden die kumuliert benötigten Mengen an Primärenergieträgern aus dem Inventar der Ökobilanz mit den jeweiligen Energieinhalten multipliziert (siehe Anhang E.3) [32].. Überall vorhandene Umgebungsenergie (Sonne, Wind, Umgebungs- und Bodenwärme), die nicht speziell aufbereitet werden muss, wird hier nicht berücksichtigt. Bei gehandelten Brennstoffen wird dabei der obere Heizwert (Brennwert H_o) angesetzt. Bei Wasserkraft wird der Nutzinhalt des Speichersees resp. die hydroelektrisch umgewandelte, potentielle Energie berücksichtigt.

Bei Uranerz wird in [ESU 1996a] festgehalten, dass in einem KKW nicht das ganze spaltbare Uran gespalten wird. Die verbleibende Spaltenergie wird jedoch nicht dem Erzkonsum angerechnet, da es theoretisch noch verwertet werden kann. Real wird jedoch ca. ein Drittel des noch spaltbaren Urans während der Aufbereitung endgelagert. Der Rest des spaltbaren Urans kann theoretisch in Wiederaufarbeitungsanlagen verwertet werden. Die Konvention in [ESU 1996a] ist, dass abgebautes, aber nicht gespaltenes Uran in der Primärenergiebilanz nicht berücksichtigt wird. Dadurch werden bessere Übereinstimmungen mit etablierten Primärenergieberechungen erreicht. Diese Konvention wird hier übernommen.

Die vorliegende Berechnungsweise unterschiedet sich von der Interpretation z.B. in [Kasser et al. 1995, BUWAL 1998] durch den Einschluss von Holz als Träger von Energie [33].

---

32 In anderen Publikationen wird die graue Energie manchmal relativ grob aus direkten Bezügen an Endenergie (z.B. Heizöl und Strom) und der *pauschalen* Multiplikation von Strom mit einem Faktor 2 oder 3 berechnet. Die hier angewendete Berechnungsweise ist detaillierter und damit aussagekräftiger.

33 Die Interpretation und Berechnung der Primärenergie ist wie erwähnt nicht eindeutig und subjektiv. Bei [Kasser et al. 1995, p.13] werden *"nur die [...] fossilen Rohstoffe mit ihrem Heizwert"* berücksichtigt, wobei *"als Ausnahme"* auch Wasserkraft berücksichtigt wird. Dies mit der Begründung, dass Wasserkraft zur Elektrizitätsproduktion benötigt wird, und der Konsum von Strom vollständig abgebildet werden soll. Strom aus heute wenig verbreiteten Quellen (Solar, Wind) wird aber trotzdem nicht berücksichtigt.
Bei [BUWAL 1998, p.87] werden die *"dezentral genutzten, erneuerbaren Energien (Sonne, Wind, Biomasse) von der Bewertung ausgenommen, weil hier kein Aufbrauchen stattfindet [...]. Hingegen wird Wasserkraft einbezogen, weil hier das nutzbare Potential schon zu signifikanten Anteilen realisiert ist und ein weiterer Ausbau auf umweltpolitische Grenzen stösst (Flächennutzung, Restwassertmengen)"*. Gemäss [Rutschmann 1997] werden aber heute in der Schweiz bereits 42% des verfügbaren Energieholzes genutzt. Falls die Ausschöpfung des nutzbaren Potentials ein Kriterium zum Einschluss eines Energieträgers sein soll, ist sie somit beim Holz kaum

12.1.4. Vor- und Nachteile der drei Methoden

	Vorteile	Nachteile
Eco-indicator 95+	Vollaggregierung: ökologische Aussage in einer einzigen Zahl Einheitliche Grundlage der Bewertung von ökologischen Schäden (explizite Schutzsubjekte) Offengelegte (statt verborgener) Subjektivität in Bewertungsschritten moderne, klar strukturierte, ausbaufähige und damit zukunftsträchtige Bewertungskaskade Erlaubt Berücksichtigung neuester Erkenntnisse International bekannte und verwendete Grundmethode Berücksichtigung von radioaktiven Emissionen Bewertet rund 230 Emissionen	Gewichtung aufgrund der Situation in Europa für weltweite Belastungen Für genaues Verständnis ist einiges an ökologischem Vorwissen notwendig Methode mit einer Konsolidierungsphase in kundigen Wissenschaftskreisen, bezüglich breitem gesellschaftlichem Konsens unter Laien jedoch beanstandbar
ökologische Knappheit 97 (UBP)	Vollaggregierung: ökologische Aussage in einer einzigen Zahl Bekannte Methode in der Schweiz, teilweise auch im Ausland angewendet Bewertung von Umwelteffekten nach einer politischen Konsolidierung und daher gesellschaftlich akzeptiert Berücksichtigung von Ressourcen-beanspruchungen (Energie, Deponie) Bewertet rund 100 Emissionen	Verborgene Subjektivität in Bewertungsschritten. Mangelhafte Struktur zur Erkennung von subjektiven (politischen) Bewertungsschritten Gewichtung aufgrund der Situation in der Schweiz für weltweite Belastungen Nur Bewertung von Schäden, die bereits erkannt und im politischen Konsens reguliert sind. Dies ergibt teilweise Verzerrungen gegenüber dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand. Durch Konsolidierungsprinzip wenig fortschrittlich. Für genaues Verständnis ist einiges an ökologischem Vorwissen notwendig
Primärenergie-aufwand	Einfacher kommunizierbar bzw. wird weniger hinterfragt als echte ökologische Bewertungen infolge Aussage in bekannten physikalischen Einheiten (Megajoule) Hier spezifische Bewertung von 9 Primärenergieträgern	keine zwingende Korrelation zu ökologischen Belastungen (wie oft angenommen) Verborgene Subjektivität in Gewichtungsschritten (Auswahl Energieträger, Spaltungswärme Uran)

12.2. Genauigkeit der Resultate

Die Resultate der bilanzierten Entsorgungsoptionen können als typische Werte der geordneten Entsorgung in der Schweiz verstanden werden. In Fallbeispielen sind aber Abweichungen möglich. Abweichungen können beispielsweise aus abweichenden Abbruchenergien oder unterschiedlichen Zusammensetzungen der Abfallmaterialien stammen.

---

vernachlässigbar.

In der vorliegenden Studie wird der Begriff Primärenergie ausschliesslich als Mass für einen Energieaufwand verstanden (weder für die Knappheit oder Erneurbarkeit einer Ressource, noch für entstehende Umweltschäden) . Es sollen Energieträger berücksichtigt werden, welche aufbereitet, verteilt und verkauft werden. Mit Primärenergie sollen nur Energieaufwendungen per se ausgedrückt werden; für Masszahlen die Umweltschäden repräsentieren gibt es differenzierte und angemessenere Indikatoren wie Eco-indicator oder UBP.

Der Ausschluss von Solar- und Windenergie ist irrelevant, da der Anteil an der kommerziellen Energieversorgung sehr klein sind.

Die angewendeten ökologischen Bewertungsmethoden sind ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet. So werden z.B. die aus Atmosphärenmodellen abgeleiteten, international verwendeten Gewichtungsfaktoren für Treibhausgase (GWP) mit einer Genauigkeit von +/- 35% angegeben. Aufgrund der Unsicherheiten in Ökobilanzen dürfen Schlussfolgerungen nicht auf kleinsten Unterschieden in den Resultaten basieren. Als Faustregel kann gelten: **Relative Unterschiede im Bereich unter 20% sind als nicht signifikant anzusehen.** Auch die Berechnung der Primärenergie enthält Unsicherheiten, die aber eher auf Unterschiede in der subjektiven Bewertung zurückzuführen sind.

Zur Datengenauigkeit der hier publizierten Zahlen siehe auch Kapitel III "Über signifikante Dezimalstellen".

12.3. Resultate für einzelne Baumaterialien

Die Resultate der Bilanzierung gemäss Eco-indicator 95+ und UBP97 finden sich in der Resultate-Tabelle im Anhang F.

Die Entsorgungsoptionen für verschiedenen Bauabfälle umfassen je nach Abfall

- **Energieaufwand für Abbruch,**
- **Abbruchemissionen (Partikel),**
- **Aufwendungen in der Sortieranlage und**
- **Aufwendungen der Beseitigung nicht verwerteter Stoffe (KVA, SAVA, Reaktordeponie).**

In der Resultate-Tabelle im Anhang F ist angegeben, wie stark diese Beiträge zum Resultat beitragen.

Im folgenden werden die Resultate für einzelne Baustoffe (pro Kilogramm) diskutiert. Weiter unten werden die Effekte der Baustoffe in repräsentativen Mengen eines Durchschnittshauses diskutiert.

Pro Kilogramm Baumaterial erzeugen **Gipsprodukte** die höchsten Belastungen gemäss Eco-indicator 95+. Der Grund dafür ist die Löslichkeit des Gipses. Aufgrund der Löslichkeit darf Gips nicht als Inertstoff deponiert werden. Gips gilt auch als Störstoff bei der Verwertung mineralischer Baustoffe. Wenn Gips nicht direkt verwertet werden kann (was z.Z. nur mit sauberen Abfällen möglich ist), fällt er nach der Sortierung in der Feinfraktion an. Die Feinfraktion muss in einer Reaktordeponie beseitigt werden. Dort gelangt der Sulfatschwefel von Gips einerseits ins Sickerwasser und andererseits als Schwefelwasserstoff (H_2S) ins Deponiegas. In der Deponiegasverbrennung resp. in der Atmosphäre wird Schwefelwasserstoff zu Schwefeldioxid SO_2 oxidiert. Da Gips ($CaSO_4 \cdot H_2O$) rund 19 G-% Schwefel enthält, sind die entstehenden Mengen beträchtlich und die ökologische Belastung entsprechend hoch. Pro Kilogramm Gips in Reaktordeponie entstehen nach dem angewendeten Deponiemodell 134 Gramm Schwefeldioxidemissionen in Luft. Der restliche Schwefel gelangt als Sulfat (361 Gramm SO_4^{2-} pro Kilogramm Gips) ins Sickerwasser der Deponie, welches einer Kläranlage zugeführt wird. Sulfat wird in der Kläranlage nicht entfernt und verbleibt im Abwasser [ESU 1996b, p.C.26]. Sulfat kann Korrosion in den Sickerwasserleitungen begünstigen, hat aber in den angewendeten Bewertungsmethoden keine ökologischen Wirkungen.

Zur weiteren Diskussion der Entsorgung von Gips siehe Kapitel 13.2. "Entwicklung der Deponierung" und eine vorläufige Reaktion der Gipsindustrie im Anhang H.

Kunststoffe und Anstrichstoffe erzeugen meistens auch relativ hohe Belastung pro Kilogramm. Verantwortlich sind hier oft Kohlendioxid- und Schwermetallemissionen bei der Beseitigung in KVA oder SAVA. Die Schwermetalle gelangen in die Luft oder in die Rückstände. Die Rückstände werden deponiert und langsam ausgewaschen. Bei der Bewertung nach UBP sind oft die Kunststoffe belastender als Gipsprodukte.

Vergleichsweise unproblematisch sind erwartungsgemäss inerte Baustoffe wie **Beton, Backstein und Mineralwolle**. Hier können aber v.a. Abbruchenergien eine wichtige Rolle spielen (s.u.).

Die Beseitigung von **Glasfaserkunststoffelementen** (GFK) in Kehrichtverbrennungsanlagen ist gemäss Eco-indicator 95+ weniger belastend als die Entsorgung von Holzbaustoffen. Dies ist vor allem auf den hohen Anteil unbrennbarer, inerter Glasfasern zurückzuführen (60 G-%). Durch die Glasfasern ist aber die zu deponierende KVA-Schlackenmenge gross.

Gemäss UBP wird die Deponieraumbeanspruchung gesondert bewertet. Bei Gewichtung nach UBP macht die Deponiebeanspruchung durch Glasfasern allein rund 25% der Belastungen der Beseitigung von GFK-Elementen aus. Doch auch ohne die Bewertung der Deponiebeanspruchung wäre die Entsorgung von Glasfaserkunststoffelementen in Kehrichtverbrennungsanlagen gemäss UBP belastender als z.B. die Entsorgung von Holzbaustoffen. Diese Aussagen stützen sich auf die Belastungen pro Kilogramm. Baurelevante Aussagen sind nur möglich, wenn Herstellung und Entsorgung von funktional äquivalenten Holz- resp. GFK-Konstruktionen bilanziert und verglichen werden.

12.3.1. Beitrag durch Beseitigungsprozesse

Die wichtigsten Beiträge zur ökologischen Belastung stammen bei den meisten Materialien aus der Beseitigung der Materialien (KVA, SAVA, Reaktordeponie), d.h den schlussendlichen Senken der Abfälle (*"graves"*). Der Beitrag durch die Abbruch- und Sortieraufwendungen ist meist relativ klein. Diese Belastungen werden nur dann dominant, wenn die Belastung durch den letztendlichen Beseitigungsprozess relativ unbelastend ist. Dies ist bei Inertstoffen (Zement, Glas, Beton) der Fall. Insbesondere bei brennbaren Abfällen und Gips dominiert aber der Beseitigungsprozess selbst.

12.3.2. Beitrag durch Abbruchenergie

Direkte Energieaufwendungen beim Abbruch von Baumaterialien werden für folgende Abfälle verbucht.

- **bewehrter Beton**
- **Massiveisen**
- **Betonkies**
- **unbewehrter Beton**
- **Zement (in Beton) und Mauermoertel**
- **Backstein**
- **EPS (in Leichtputz u. -beton)**
- **Kunstputz**
- **Mineralischer Putz**
- **Gipsfaserplatte**
- **Gipskartonplatte**
- **Vollgipsplatte**
- **Gipsputz**

Die Abbruchenergie wird dabei nur bei Renovations- und Abbruchabfällen verbucht. Bei den Erstellungsabfällen wird von Verschnitten resp. Resten ausgegangen. Bei allen anderen Baustoffen wird davon ausgegangen, dass sie ohne wesentlichen Energieaufwand bzw. manuell abgetragen werden.

Relativ wichtig wird die Abbruchenergie bei Massiveisen und bei bewehrtem Beton.

Bei Entsorgungen mit Verwertung wird die Abbruchenergie relativ wichtiger als bei Beseitigungen, da die Verwertung im Rahmen der vorliegenden Systemgrenzen in der Regel zu geringeren Belastungen führt als die Beseitigung. So kann z.B. die Abbruchenergie einer Vollgipsplatte rund 90% der Entsorgungsbelastungen ausmachen, wenn die Platte verwertet wird, aber nur 0.2% bei einer Beseitigung der Platte in einer Reaktordeponie (nach Eco-indicator 95+). Es kann also nicht generell über die Relevanz bzw. Vernachlässigbarkeit der Abbruchenergie entschieden werden.

12.3.3. Beitrag durch Partikelemissionen

Eine Emission von 80µg PM_{10}-Partikeln pro Kilogramm Abfall wurde beim Abbruch und der Renovation folgender Materialien verbucht.

- **Backstein**
- **bewehrter Beton**
- **unbewehrter Beton**
- **Zement (in Beton) und Mauermoertel**
- **Betonkies**
- **Holzzementplatte**
- **Mineralwolle**
- **Gipsfaserplatte**
- **Gipskartonplatte**
- **Vollgipsplatte**
- **Gipsputz**
- **Kunstputz**
- **Mineralischer Putz**
- **EPS (in Leichtputz u. -beton)**
- **Anstrich auf Mauer**
- **Dispersionsfarbe auf Mauer**

Die Emission stammt aus den Abbruchmaterialien selbst und nicht etwa aus den Dieselemissionen. Die Emission wird bei Materialien relativ wichtig, welche ansonsten wenig belastende Entsorgungswege aufweisen. Bei Mineralwolleabfällen (inert) machen die Partikelemissionen einen Grossteil der Entsorgungsaufwendungen aus. Bei Backsteinen sind sie ebenfalls stark spürbar. Verschwindend werden diese Emissionen z.B. bei Anstrichstoffen, da dort der Beseitigungsprozess wesentlich belastender ist.

12.3.4. Beitrag Sortierung

Die Aufwendungen, die in der Sortieranlage anfallen, werden nur bei wenigen Abfällen relevant. Es sind dies Massiveisen, Flachglas und Mineralwolle, im Fall, dass diese nicht als Einstoff entsorgt oder verwertet werden, sondern ins Bausperrgut gelangen und sortiert werden müssen.

Die bilanzierte Sortieranlage ist eine grosse, stationäre Anlage. Bei kleineren, mobilen Anlagen kann die spezifische Belastung grösser sein.

Die Sortierung spielt eine grosse Rolle bei der Verwertung von Materialien. So wurde für alle sortierten mineralischen Baumaterialien eine gewisse Verwertungsquote angenommen. Hier können aber auch gewisse Fraktionen der Beseitigung entgehen, indem sie als Störstoff in die Verwertung gelangen (siehe Kapitel 9 "Eingabedaten"). D.h. unabhängig von der Zuteilung "Beseitigung als Entsorgung" oder "Verwertung als Entsorgung" werden sortierte Abfälle teilweise verwertet und die Belastung durch die Beseitigung so vermindert.

12.3.5. Zeitliche Unterscheidung (ER, RE, AB)

Die Unterscheidung in Erneuerungs-, Renovations- und Abbruchabfälle spielt teilweise eine entscheidende Rolle, da bei gewissen Abfällen ganz verschiedene Entsorgungskanäle beansprucht werden.

Bei inerten Bauabfällen (i.e. kleinen Belastungen durch die Beseitigung) kann die Unterscheidung zwischen Renovationsabfall und Abbruchabfall leicht eine ganze Grössenordnung ausmachen (z.B. Flachglas und Mineralwolle, EI95+). Ein wichtiger Umstand ist dabei, dass bei Renovationen generell Platzknappheit auf der Baustelle angenommen wird. Renovationsabfälle können daher nur schlecht einsortiert werden und gelangen in Mischabfallmulden (Bauschutt resp. Bausperrgut), welche extern sortiert werden. Bei Abbruchabfällen können dagegen inerte Stoffe z.B. direkt in eine Mulde Inertes einsortiert werden und direkt beseitigt oder ohne Sortierung verwertet werden.

In denjenigen Fällen, wo ein Abfall sowieso sortiert wird, spielt die Unterscheidung von Renovationsabfällen ebenfalls eine wichtige Rolle. Bei sortiertem Bausperrgut (Mischabfall) muss im Gegensatz zu Bauschutt oder Einstoffmuldengut ein grösserer Teil der Feinfraktion deponiert werden. Bei Einstoff- oder Bauschuttmaterial, muss nur ein kleiner Teil deponiert werden und die Verwertungsquote ist höher. Bei verwertbaren Stoffen (Kies, Beton,

Backsteinen) stellt dieser Verlust durch die Deponierung eine Belastung dar, da die Deponierung belastender ist als die Verwertung.

Bei zu deponierenden Stoffen (z.B. nicht verwertbarer Gips) stellt die Sortierung von Renovationsabfällen paradoxerweise eine *Entlastung* dar, da durch die Sortierung ein Teil des Abfalls in die mineralische Baustoffverwertung gelangt. Das Recycling führt innerhalb der Systemgrenzen zu keiner weiteren Belastung, obwohl sich der Störstoff nicht für ein Recycling eignet. Diese Art der Umklassierung wird mittels der Markierung 7 "Störstoff in Verwertung" erfasst, kann aber im Rahmen der Methodik nicht bewertet werden.

Die Unterscheidung in Erneuerungs-, Renovations- und Abbruchabfälle sollte insbesondere bei der Entwicklung von Aussagegrössen zu Verwertung berücksichtigt werden, da dabei verwertungs-relevante Entscheidungen fallen.

12.4. Vergleich Entsorgung vs. Herstellung einzelner Baumaterialien

Oft wird die Entsorgung im Vergleich zur Herstellung von Baumaterialien als wenig relevant eingestuft. Durch Vergleich der Belastungen der Herstellung und der Entsorgung kann gezeigt werden, ob und wo dies der Fall ist. Die Angaben über Belastungen der Herstellung von Baumaterialien stammen dabei aus [ESU 1995]. Als Entsorgungsoption wurde jeweils eine Beseitigung (KVA oder Deponie) in der Regel aus Abbruchabfällen angenommen. Dadurch wird die Bedeutung der Entsorgung betont. Die weitgehende Beseitigung entspricht aber auch der aktuellen Situation in der Schweiz, wo 1996 nur etwa 5% der Hochbauabfälle stofflich verwertet werden [BUWAL 1999].

Folgende Materialien wurden verglichen.

Herstellung gemäss [ESU 1995]	*Entsorgung gemäss vorliegender Studie*
Herstellung bis zum Fabriktor (*"cradle-to-gate"*)	Abbruch bis Beseitigung (*"grave"*)
Armierungsstahl	> Massiveisen: __ RE AB in Beseitigung
Aussenputz organisch	> Kunstputz: __ __ AB in Beseitigung
Backstein	> Backstein: __ __ AB in Beseitigung
Baustahl	> Kleinmetall (in brennbaren Verbunden): ER RE AB in Beseitigung
Beton pc150	> unbewehrter Beton: ER __ __ in Beseitigung
Betonkies	> Betonkies: __ __ AB in Beseitigung
Bitumendichtungsbahn	> Bitumenbahn: ER __ AB in Beseitigung
Dampfbremse flammschutz	> PE-Dampfbremse flammgeschuetzt: ER __ AB in Beseitigung
Einschicht Glattputz	> Vollgipsplatte/Gipsputz: ER __ __ in Beseitigung
Gipskartonplatte	> Gipskartonplatte: __ __ AB in Beseitigung
Glas (Flach-) unbeschichtet	> Flachglas: ER __ AB in Beseitigung
Innenputz mineralisch	> Mineralischer Putz: __ __ AB in Beseitigung
Karton (Verpackungs-)	> Verpackungskarton: __ RE __ in Beseitigung
PE (LD)	> PE/PP-Produkte: ER __ AB in Beseitigung
PE-Dichtungsbahn	> PE-Dichtungsbahn: ER __ AB in Beseitigung
Polystyrol EPS	> EPS-Isolation flammgeschuetzt: ER __ AB in Beseitigung
PUR-Hartschaum	> PUR-Schaum: ER __ AB in Beseitigung
PVC schlagfest	> PVC-Produkte: ER __ AB in Beseitigung
PVC-Dichtungsbahn	> PVC-Dichtungsbahn: ER __ AB in Beseitigung
Schnittholz kant-	> Altholz unbehandelt: ER __ AB in Beseitigung
Spanplatte	> Spanplatte (7.5%PU): ER __ AB in Beseitigung
Steinwolle	> Mineralwolle: ER __ AB in Beseitigung
Zementmoertel	> Zement (in Beton) und Mauermoertel: ER __ __ in Beseitigung

Tab. 37 *Zuordnung einiger Baumaterialien zu Entsorgungsoptionen für den Vergleich Herstellung vs. Entsorgung*

Zur Darstellung der relativen Bedeutung der Entsorgung werden die *Belastungen der Herstellung* durch die *Belastungen der Entsorgung* dividiert. Dabei ergeben sich für alle Bewertungsmethoden dimensionslose Zahlen. Bei Werten >1 ist die Entsorgung wichtiger als die Herstellung.

	Eco-indicator 95+	Umweltbelastungs-punkte	Bedarf energetischer Ressourcen
Einschicht Glattputz	**86.3**	**76.8**	*0.554*
Gipskartonplatte	**84.5**	**63.9**	*0.548*
Betonkies	**5.97**	**8.11**	**3.46**
Schnittholz kant-	**1.79**	**3.86**	0.0108
Spanplatte	**1.35**	**5.46**	0.0079
Innenputz mineralisch	*0.624*	**3.36**	*0.505*
Aussenputz organisch	*0.42*	**2.73**	*0.136*
Bitumendichtungsbahn	*0.385*	*0.779*	0.0151
Armierungsstahl	*0.38*	*0.449*	*0.187*
Karton (Verpackungs-)	*0.33*	*0.704*	0.00922
Backstein	*0.255*	**3.93**	*0.117*
Baustahl	*0.103*	*0.427*	0.0645
PE-Dichtungsbahn	0.0944	*0.41*	0.00375
PE (LD)	0.0903	*0.269*	0.00216
PUR-Hartschaum	0.0891	*0.196*	0.0056
Dampfbremse flammschutz	0.0731	*0.174*	0.00469
Polystyrol EPS	0.069	*0.229*	0.00453
PVC-Dichtungsbahn	0.0483	*0.528*	0.0418
PVC schlagfest	0.0321	*0.428*	0.056
Beton pc150	0.0214	**12.3**	0.0176
Zementmoertel	0.007	**3.66**	0.00516
Steinwolle	0.0069	*0.61*	0.000484
Glas (Flach-) unbeschichtet	0.00186	*0.994*	0.000567

Tab. 38 *Vergleich der Entsorgung vs. Herstellung von Baumaterialien. Die angegebenen Zahlen entsprechen Belastung Entsorgung ÷ Belastung Herstellung. Ein Wert von >1 bedeutet, dass die Entsorgung belastender ist als die Herstellung (**Fettdruck**); ein Wert von <1 bedeutet die Entsorgung weniger belastend ist als die Herstellung. Kursive Werte bedeuten, das die Entsorgung zwar untergeordnet ist, aber mehr als 10% der Herstellung ausmachen.*

12.4.1. Entsorgung vs. Herstellung nach Eco-indicator 95+

Die Beseitigung von **Gipsprodukten** ist wesentlich – fast zwei Grössenordnungen! – belastender als deren Herstellung. Die Herkunft der Belastungen bei der Beseitigung von Gipsprodukten wurde oben diskutiert.

Auch bei der isolierten Betrachtung des **Betonkies**-Anteils im Beton (ohne Zement) ist dessen Beseitigung aufgrund der Abbruchenergie relativ belastender als dessen Herstellung. Bei Betonkies ist die Herstellung resp. die Gewinnung aus Kiesgruben im Vergleich zur Entsorgung nicht besonders aufwendig. Umgekehrt ist beim **Zement** die Herstellung wesentlich belastender als die Beseitigung.

Bei **Holzbaustoffen** (Schnittholz, Spanplatte) wird bei der Beseitigung biogenes Kohlendioxid frei. Bei der Herstellung (i.e. dem Holzwachstum im Wald) wurde in Ecoinvent vom Baum assimiliertes Kohlendioxid als negative Emission mit einer entsprechenden ökologischen Entlastung bilanziert. Bei der Entsorgung freiwerdendes Kohlendioxid führt nun zu einer Belastung. D.h die Verteilung der Lebenszyklusbelastung ist zu Ungunsten der Entsorgung verschoben. Dies sagt nichts über die gesamte Belastung von Holzbaustoffen aus. Die Entsorgung soll bei Holzbaustoffen aber sicher berücksichtigt werden; mindestens mit einer ausgeglichenen CO_2-Bilanz; besser aber mit der hier erfolgten expliziten Berechnung der Belastungen der Beseitigung.

Bei den meisten **Kunststoffprodukten** spielt die Entsorgung nur eine untergeordnete Rolle (max. 38% bei Bitumendichtungsbahn). Hier sind die Belastungen aus der Herstellung (Erdölgewinnung, -transport und -raffinierung) grösser als die Beseitigung.

12.4.2. Entsorgung vs. Herstellung nach UBP97

UBP zeigt ähnliche Tendenzen wie die Resultate von Eco-indicator 95+. Auch hier ist die Entsorgung von **Gips** und **Holzprodukten** wesentlich belastender als deren Herstellung. Unterschiede zu Eco-indicator 95+ stammen hauptsächlich von dem knappen Gut "Deponieraum", welches in UBP speziell gewichtet wird, während eine entsprechende Gewichtung in Eco-indicator 95+ nicht gemacht wird. Dies führt dazu, dass bei UBP auch bei relativ unproblematischen, inerten Deponiegütern wie **Backstein** und **Beton** eine hohe Belastung von deren Deponierung ausgeht. Bei der Beseitigung von brennbaren Abfällen in der KVA wird ebenfalls Deponieraum über Schlacke- und Reststoffdeponierung beansprucht und im UBP-Bewertungsmodell gesondert bewertet.

Generell ist zu beobachten, dass bei UBP die Entsorgung stets ein spürbarer Teil der Lebenszyklusbelastung bleibt, während bei Eco-indicator 95+ die Entsorgung für gewisse Materialien vernachlässigbar wird.

12.4.3. Energetische Ressourcen (Primärenergie)

Die Betrachtung der Primärenergiebeanspruchung ergibt nicht dieselben Schlüsse wie die der ökologischen Betrachtungen. Dies muss nicht erstaunen, da die Primärenergiebilanz keinerlei Abbildungsvermögen für umweltschädliche Emissionen aufweist.

Lediglich bei (verbautem) Betonkies nimmt die Entsorgung aufgrund der aufgewendeten Abbruchenergie dominate Ausmasse an. Für Beton selbst ist die energetische Bedeutung der Entsorgung jedoch gering.

12.4.4. Fazit

Die Relevanz der Entsorgung ist bei vielen wichtigen Baustoffen gegeben. Ein genereller Ausschluss der Entsorgung aus Lebenszyklusbetrachtugen von Gebäuden ist daher nicht angemessen.

12.5. Wilde Verbrennung vs. KVA

Nach Schätzungen des BUWAL werden 46% der brennbaren Bauabfälle in der Schweiz illegal entsorgt [BUWAL 1996]. Die Ergebnisse der Bilanzierung der illegalen Verbrennung können hier mit der Verbrennung in einer KVA verglichen werden. Dadurch kann der ökologische Schaden durch die illegale Verbrennung quantifiziert werden.

Eco-indicator 95+	**Wilde Verbrennung**	**KVA**	Wild ÷ KVA
	Nanopunkte pro kg	Nanopunkte pro kg	[–]
Anstrichstoffe	0.249	0.00282	88.3
PVC-Dichtungsbahn	0.248	0.00498	49.8
PU	0.0982	0.00344	28.5
PVC	0.0905	0.00588	15.4
behandeltes Abfallholz	0.0413	0.00187	22.1
unbehandeltes Abfallholz	0.035	0.00183	19.1
Glasfaserkunststoff (GFK)	0.0283	0.00127	22.3
Holzzementplatte	0.0218	0.000925	23.6
Dispersionsfarbe	0.0214	0.00184	11.6
Bitumenbahn	0.0213	0.00278	7.7
EPS-Isolation	0.0153	0.0018	8.5
PE	0.0149	0.00168	8.9
PE-Dampfbremse flammgeschuetzt	0.0144	0.00171	8.4
PE-Dichtungsbahn	0.0143	0.00152	9.4
Inertstoff	0.00625	0.000783	8.0

Tab. 39 *Umweltbelastung von 15 Bauabfällen bei wilder Verbrennung und Verbrennung in der KVA gemäss Eco-indicator 95+.*

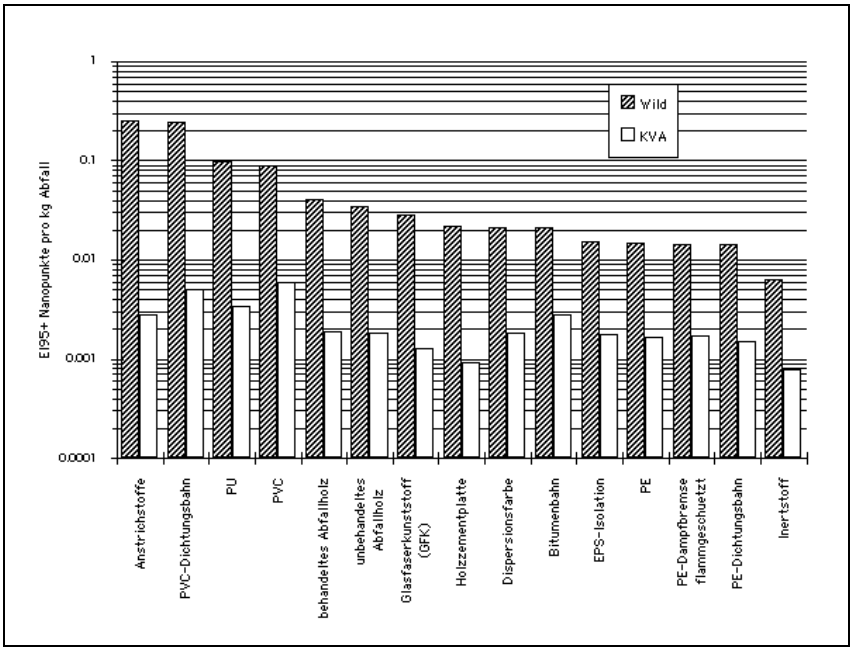


Abb. 13 *Vergleich der Umweltbelastung von 15 Abfällen bei wilder Verbrennung vs. Verbrennung in der KVA gemäss Eco-indicator 95+. Bitte den logarithmischen Massstab beachten.*

Von 15 Bauabfällen wurden in der vorliegenden Studie sowohl die Verbrennung in einer KVA als auch die illegale Verbrennung bilanziert (bei identischer Zusammensetzung des Abfalls). Bei

allen Bauabfällen liegen die Belastungen durch die illegale Verbrennung wie zu erwarten war weit über den Belastungen der KVA. Wild verbrannte Anstrichstoffe (z.B. als Anstrich von wild verbranntem Holz) belasten die Umwelt gemäss Eco-indicator 95+ ca. 88mal stärker als die Entsorgung in der KVA (Maximalwert). Eine illegal verbrannte Bitumenbahn immerhin noch rund 8mal stärker (Minimalwert). Der etwas höhere technische Aufwand in der KVA wird also durch die wesentlich belastenderen Verbrennungsemissionen der wilden Verbrennung bei weitem aufgehoben.

Bei der Bewertung der Umweltschäden mittels UBP fällt der Unterschied zwischen wilder Verbrennung und KVA etwas geringer aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass UBP eine geringere Anzahl Schadstoffe bewertet. Zum anderen wird die Verbrennung in der KVA über die Beanspruchung von Schlacke- und Reststoffdeponien bei UBP stark belastet; eine entsprechende Belastung durch Deponiebeanspruchung entfällt bei der wilden Verbrennung. Die Belastung bei wilder Verbrennung macht aber bei UBP immer noch ein Vielfaches der Verbrennung in der KVA aus (4- bis 35-fach).

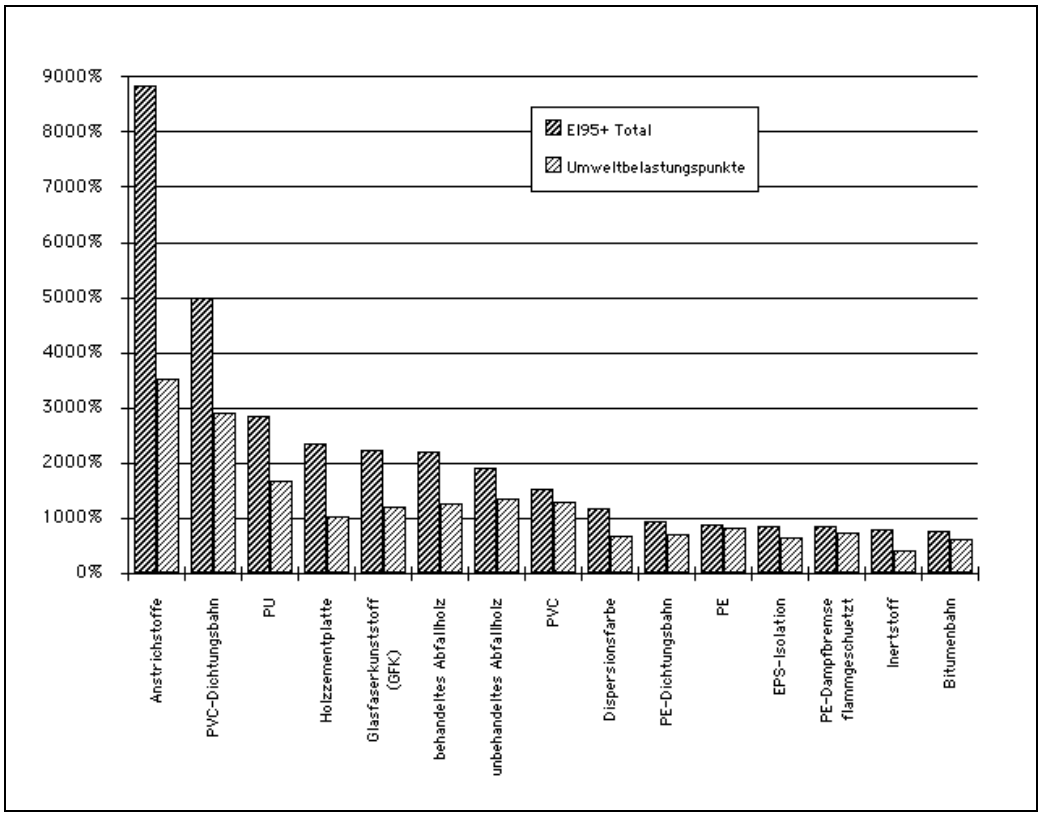


Abb. 14 *Darstellung der Belastung bei wilder Verbrennung relativ zur Verbrennung in der KVA (=100%). Gemäss Eco-indicator 95+ und UBP.*

Fazit: Im Interesse einer ökologischeren Bauweise sollten die Kantone auf einen Vollzug der Abfallgesetzgebung auch im Baubereich Wert legen.

12.6. Resultate für ein "Durchschnittshaus"

Um darzustellen, welche Entsorgungsprozesse für ein Gebäude tatsächlich relevant werden können, wurde hier ein Durchschnittshaus definiert. Die Zusammensetzung beruht auf Angaben verschiedener Quellen[34] und wurde mit eigenen Annahmen ergänzt. Wichtig ist hier, dass nicht nur die im Bau verbliebenen Materialien (b_i) bilanziert werden, sondern die gesamten Lebenszyklusmengen. Für die verschiedenen Baumaterialien wurden unterschiedliche Lebensdauern (t_i) abgeschätzt und die Lebenszyklusmengen für eine Gebäudelebensdauer T von 80 Jahren berechnet. Miteinbezogen wurden auch die spezifischen Verschnittmengen beim Einbau der Materialien (v_i).

Nicht betrachtet wurden aber die Verpackungsabfälle für die Baumaterialien. Eine Abschätzung für PE-Folien und Holzpaletten ergab, dass sich die Bedeutung für das Schlussresultat im Promillebereich bewegt.

Als funktionale Einheit wird **ein Kilogramm Durchschnittshaus** betrachtet.

pro Kilogramm Durchschnittshaus	**Massenanteil im Gebäude b_i**	Material-spez. Lebens-dauern t_i [Jahre]	Materialspez. Verschnitt-raten v_i	**Lebenszyklus-Massen für T = 80 Jahre**	Zusammen-setzung
Beton bewehrt	**0.468**	80	1%	**0.473**	41.83%
Beton unbewehrt	**0.241**	80	1%	**0.244**	21.55%
Innenputz	**0.0257**	40	1%	**0.0519**	4.59%
Aussenputz	**0.0128**	25	2%	**0.0419**	3.71%
Backstein	**0.181**	80	2%	**0.184**	16.29%
Gips	**0.0156**	20	5%	**0.0656**	5.80%
Glas	**0.00137**	30	1%	**0.00368**	0.33%
Stahl	**0.0154**	80	1%	**0.0155**	1.37%
PVC	**0.000806**	29	8%	**0.00241**	0.21%
PE	**0.000483**	24	8%	**0.00175**	0.16%
EPS	**0.000129**	40	10%	**0.000287**	0.03%
PUR	**0.000103**	40	10%	**0.00023**	0.02%
PVC-Dichtungsbahn	**0.0000327**	30	8%	**0.0000947**	0.01%
PE-Dichtungsbahn	**0.0000463**	30	8%	**0.000134**	0.01%
Farben	**0.00036**	20	10%	**0.0016**	0.14%
Holz behandelt	**0.00807**	70	5%	**0.00971**	0.86%
Holz unbehandelt	**0.0289**	70	5%	**0.0348**	3.08%
Elektro-Kabel	**0.0000693**	40	5%	**0.000146**	0.01%
Summe	**1 kg**			**1.13 kg**	100.000%

Tab. 40 *Zusammensetzung des hypothetischen Durchschnittsgebäudes und resultierende Lebenszyklusmassen.*

[34] [IP Bau 1991, p.14], [Lichtensteiger et al. 1998, p.5f.], [Rentz et al. 1997, p.106,197,211f.], [Wagner et al. 1993, p.325]

12.6.1. Bedeutung verschiedener Baumaterialien

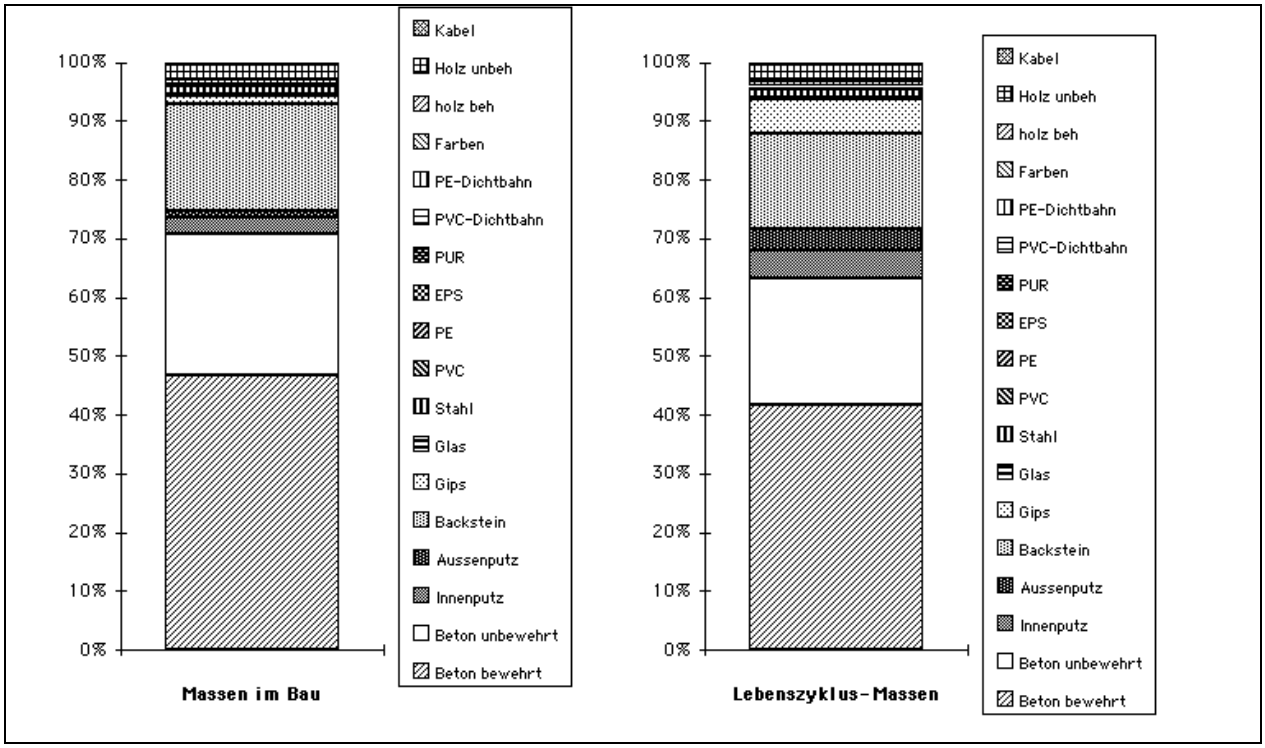


Abb. 15 *Zusammensetzung der Massen im Gebäude und der gesamten Lebenszyklusmassen an Baumaterialien des hypothetischen Durchschnittshauses (in Massen-%).*

Bei der Gebäudezusammensetzung sind die massemässig bedeutendsten Materialien Beton und Backsteine. Die anderen Materialien sind nur von untergeordneter Bedeutung. Bei der Betrachtung der Lebenszyklusmassen, welche Lebensdauern und Verschnitte berücksichtigt, werden insbesondere Putze und Gips etwas wichtiger. Dies sind aber nur Betrachtungen nach Masse ohne irgendeine ökologische Gewichtung.

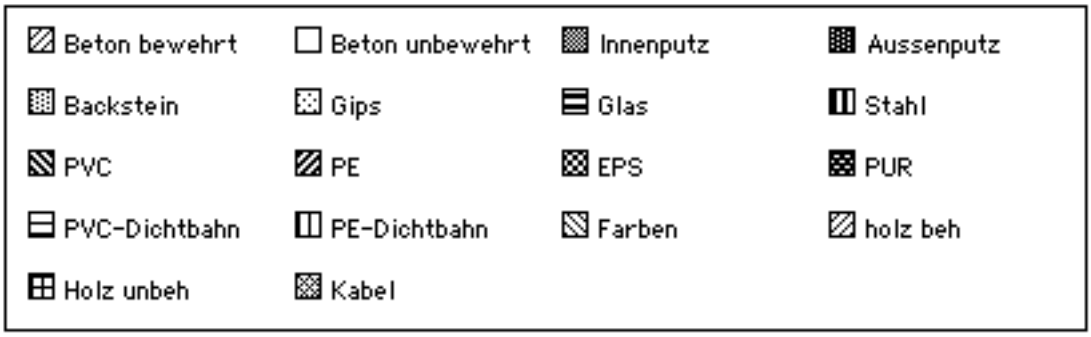


Abb. 16 *Legende für Materialien des Durchschnittshauses*

Werden die Entsorgungsprozesse für die Materialien dieses Gebäudes ökologisch bewertet ergeben sich folgende Beiträge. Dabei wurde die Entsorgungsvariante mit maximaler Beseitigung und minimaler Verwertung angenommen (vergl. Entsorgungsvarianten unten).

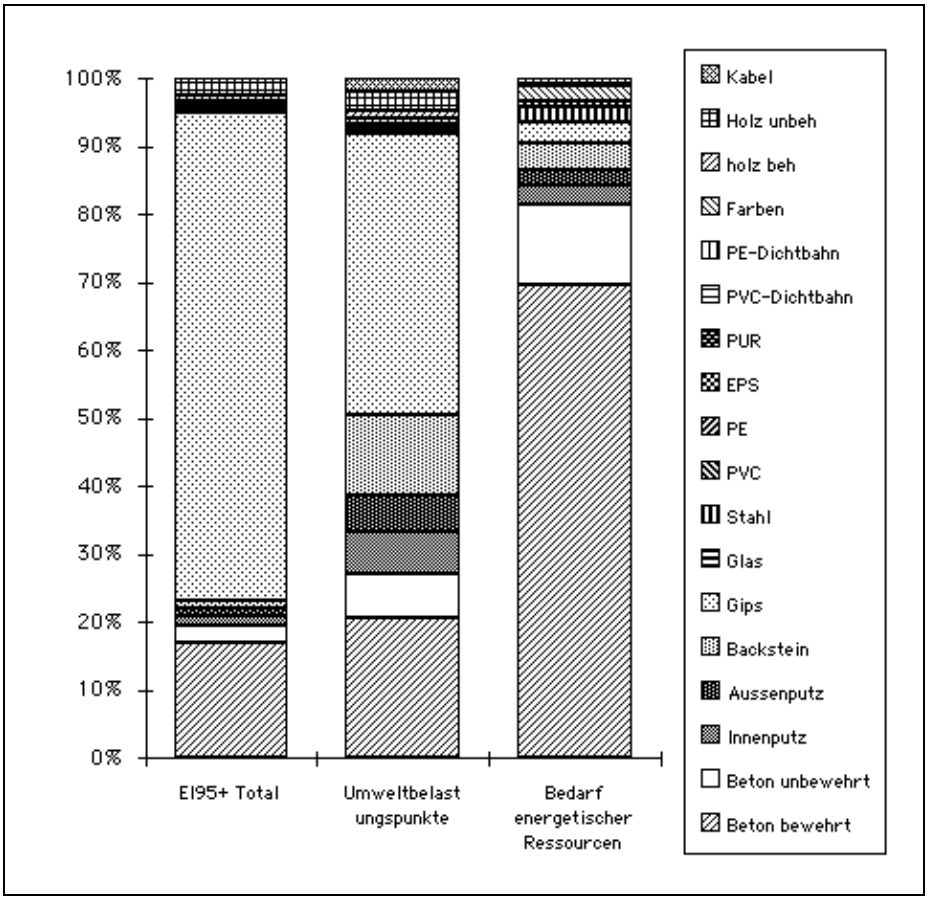


Abb. 17 *Dominanzanalyse der Materialien für die Belastung durch die Entsorgung des Durchschnitthauses. Gewichtet nach Eco-indicator 95+, Umweltbelastungspunkten 97 und Primärenergiebedarf. Die Belastung der gesamten Entsorgung (mit maximaler Beseitigung) wurde zu 100% definiert.*

Gips, welcher lediglich 1.6 Massenprozent der Gebäudezusammensetzung und 5.8 Massenprozent der Lebenszyklusmassen ausmacht, wird bei der ökologischen Bewertung der Entsorgung sehr wichtig (EI95+: 72%, UBP: 41%). Dies ist auf die Reaktordeponierung von Gipsprodukten und die dabei entstehenden Schwefeldioxid-Fracht zurückzuführen (s. oben).

Die Bedeutung von Gips ist bei der Bewertung mit UBP relativ geringer, da UBP jedes Kilogramm Deponiegut (egal welcher Qualität) mit 500 UBP belastet (knappes Gut "Deponieraum"). Dadurch nimmt die Bedeutung der Entsorgung anderer Materialien relativ zu.

Bei Betrachtung des Primärenergieverbrauchs ist die Entsorgung von bewehrtem Beton der dominanteste Beitrag (70%). Dies ist auf die gegenüber unbewehrtem Beton höhere Abbruchenergie zurückzuführen.

12.6.2. Bedeutung verschiedener Entsorgungsschritte

Die Entsorgung von Bauabfällen kann in verschiedene Teilprozesse unterteilt werden:

1) Aufwendungen auf der Baustelle (Abbruchenergie, Partikelemissionen)
2) Aufwendungen in der Sortieranlage (Transport, Prozessaufwand)
3) Aufwendungen bei der letztendlichen Beseitigung (Transport, Prozessaufwand, Emissionen)

Die Bedeutung der Teilprozesse auf Ebene der einzelnen Materialien wurde oben diskutiert. Hier soll eruiert werden, welche Teilprozesse für die Entsorgung des Durchschnittsgebäudes relevant werden können. Dazu wird folgende Unterteilung betrachtet:

Abbruch) Rückbau-/Abbruchenergie

Partikel) Emissionen von PM10-Emissionen während des Rückbau

Sort.) Aufwendungen in der Sortieranlage (Transport, Prozessaufwand)

Beseit.) Aufwendungen bei der Beseitigung (Transport, Prozessaufwand, Emissionen)

Es wird die Entsorgungsvariante mit maximaler Beseitigung betrachtet, d.h. alle Bauabfälle werden in Kanäle zur (regulären) Beseitigung gegeben. In der Bilanz der Entsorgung der Materialien werden generell die Entsorgungsoptionen *"...in Beseitigung"* verbucht.

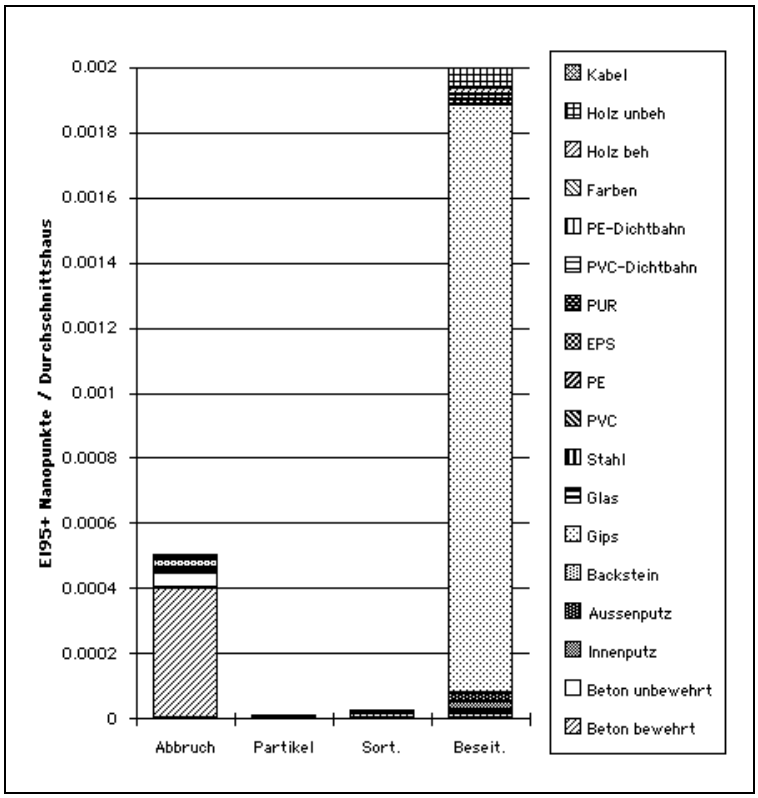


Abb. 18 *Umweltbelastung der Entsorgung des Durchschnittsgebäudes nach Eco-indicator 95+. Aufgetrennt nach Teilprozessen der Entsorgung (Abbruch, Partikelemissionen, Sortieraufwand, Beseitigung) und nach Beiträgen der Materialien.*

Bei der Bewertung nach Eco-indicator 95+ stellen die letztendlichen Beseitigungsprozesse in KVA und Deponien die wichtigsten Belastungen dar. Die Entsorgung von Gips dominiert hier wieder die ganze Bilanz. Nicht vernachlässigbare Beiträge stammen aber auch aus der Abbruchenergie; dort vor allen aus bewehrtem Beton. Die Bedeutung der Aufwendung in der Sortieranlage und der Partikelemissionen sind vernachlässigbar. Dies bedeutet das aus ökologischer Sicht es durchaus lohnend sein könnte, bei der Sortierung etwas mehr Aufwand zu leisten, wenn dadurch die Verwertungquote erhöht und die Beseitigungsmenge vermindert werden kann.

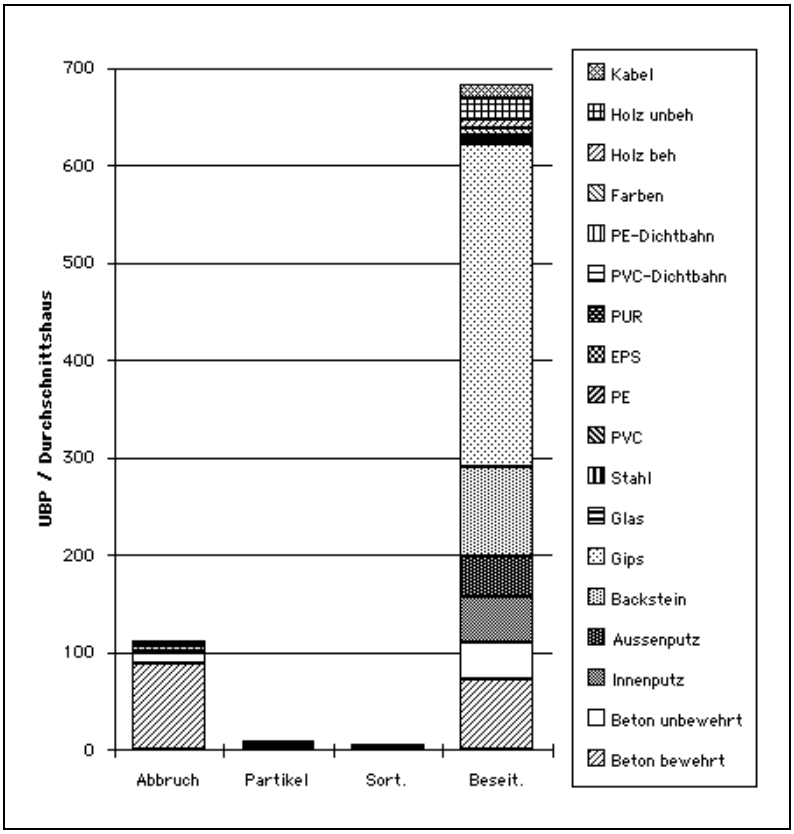


Abb. 19 *Umweltbelastung der Entsorgung des Durchschnittsgebäudes nach UBP. Aufgetrennt nach Teilprozessen der Entsorgung (Abbruch, Partikelemissionen, Sortieraufwand, Beseitigung) und nach Beiträgen der Materialien.*

Das Bild bei der Bewertung nach UBP präsentiert sich ähnlich wie beim Eco-indicator 95+: Dominant ist die Beseitigung und die Abbruchenergie ist spürbar. Im Gegensatz zu Eco-indicator 95+ spielen bei der Beseitigung neben Gips aber auch andere Abfälle ein Rolle (z.B. Beton, Backsteine, Putze). Dies ist wie schon im oberen Kapitel erwähnt auf die Deponierung pauschal mit 500 UBP/kg belastet (knappes Gut "Deponieraum"). Dies erhöht die relative Bedeutung anderer Materialien neben Gips.

12.6.3. Einfluss verschiedener Entsorgungsvarianten

Für die Entsorgung des Durchschnittshauses werden hier drei Varianten unterschieden:

Variante 1 **Entsorgung mit wilder Verbrennung (*"worst case"*):**
alle brennbaren Bauabfälle (4.5 G-%) werden direkt ab Baustelle wild, d.h. in einem offenem Feuer verbrannt. Die restlichen Abfälle (95.5 G-%) werden in Kanäle zur regulären Beseitigung gegeben.

Variante 2 **Entsorgung mit maximaler Beseitigung (*"average case"*):**
Alle Bauabfälle werden in Kanäle zur (regulären) Beseitigung gegeben. D.h. in der Bilanz der Entsorgung der Materialien werden generell die Entsorgungsoptionen *"...in Beseitigung"* verbucht.

Variante 3 **Entsorgung mit maximaler Verwertung (*"best case"*):**
Alle Bauabfälle werden wenn möglich in Kanäle zur stofflichen Verwertung gegeben. D.h. in der Bilanz der Entsorgung der Materialien werden wo möglich die Entsorgungsoptionen *"...in stoffliche Verwertung"* verbucht.

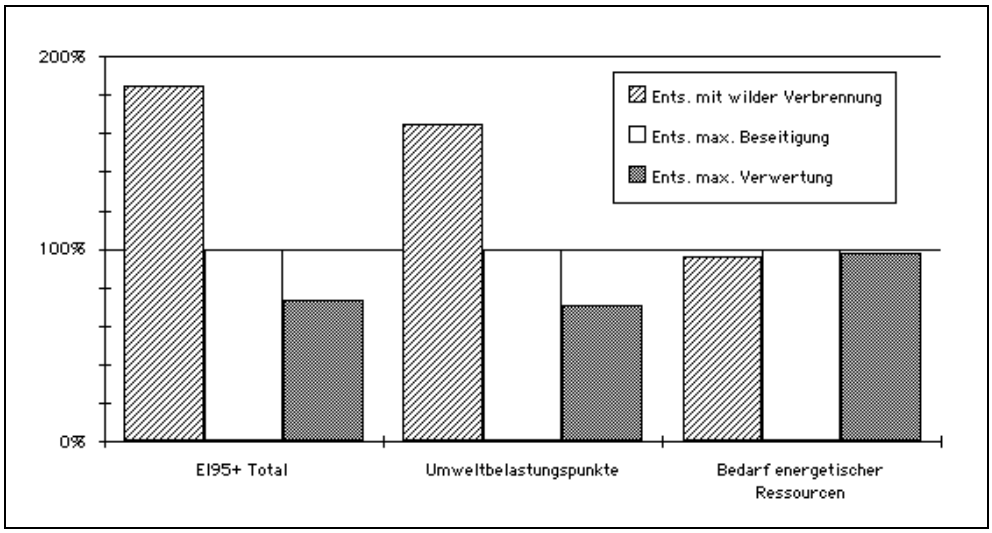


Abb. 20 *Vergleich der Belastungen der Entsorgung des Durchschnittshauses bei drei verschiedenen Entsorgungsvarianten. Gewichtet nach Eco-indicator 95+, Umweltbelastungspunkten 97 und Primärenergiebedarf. Die Belastung der 2. Variante wurde zu 100% definiert.*

Die Belastungen nehmen bei der Gewichtung mit ökologischen Bewertungsmethoden – wie zu erwarten war – in der Reihenfolge "Wild" > "max. Beseitigung" > "max. Verwertung" ab. Die relativen Verhältnisse der drei Entsorgungsvarianten sind recht ähnlich. Die wilde Verbrennung ist etwa 60% – 100% belastender als die Variante mit maximaler Beseitigung. Die Variante mit maximaler Verwertung ist etwa ein Drittel entlastender als die Variante mit maximaler Beseitigung.

Bei der Bewertung nach Energieressourcenbedarf sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Entsorgungsvarianten festzustellen. Die hauptsächliche Belastung stammt hier aus den Abbruchenergien. Dass Primärenergiebilanzen nicht für ökologische Aussagen geeignet sind, zeigt sich hier an der Tatsache, dass die besonders schädliche wilde Verbrennung nicht von einer geordneten Entsorgung unterscheidbar ist. Die wilde Verbrennung ist sogar leicht (insignifikant) weniger energiekonsumierend als die geordnete Beseitigung oder Verwertung, da die Enegieaufwendungen der Sortierung und Beseitigung für die brennbaren Abfälle wegfallen.

Im Folgenden wird ersichtlich, welche Materialien aus dem Durchschnittshaus die Unterschiede in den Entsorgungsvarianten ausmachen.

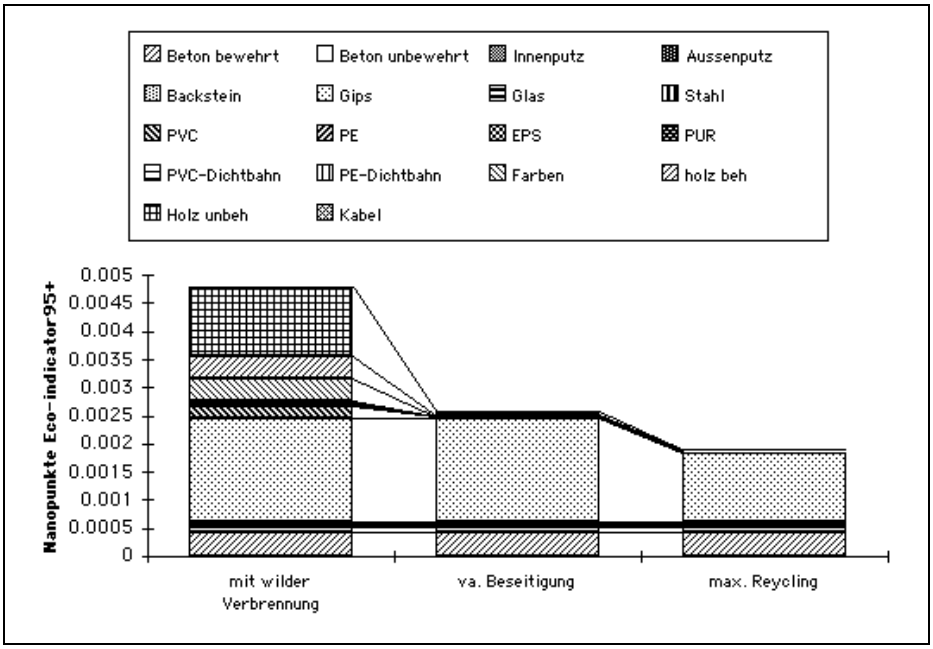


Abb. 21 *Belastungen der Entsorgung für drei verschiedenene Entsorgungsvarianten für ein Durchschnittshaus; gemäss Eco-indicator 95+ in Nanopunkten. Funktionale Einheit: Lebenszyklusmassen für 1 Kilogramm Durchschnittshaus.*

Als Basisfall kann von der Variante 2 mit maximaler Beseitigung (in der Mitte) ausgegangen werden. Werden alle brennbaren Abfälle wild verbrannt, verdoppelt das fast die Belastungen aus der Entsorgung des Gebäudes. Die wild verbrannten brennbaren Abfälle machen dabei nur 4.5% der Lebenszyklusmassen des Durchschnittsgebäudes aus. Die wichtigsten zusätzlichen Belastungen stammen dabei aus Holz, Farben und PVC.

Bei maximaler stofflichen Verwertung (Variante 3) sinken die Belastungen hingegen um ca. einen Drittel. Die Entlastung ist vor allem auf die Verwertung von Gips resp. die Vermeidung der Deponierung von Gips zurückzuführen. Relativ unbedeutend sind die Entlastungen durch die Verwertung der brennbaren Abfälle.

Die Belastungen durch die inerten, mineralischen Baustoffe wie Beton und Backstein sind praktisch konstant für alle drei Varianten. Bei diesen Materialien ist der ökologische Unterschied zwischen Deponierung und Verwertung klein – mindestens im Rahmen der angewendeten Bewertungsmethode Eco-indicator 95+. Auch wurde bei der Bilanzierung angenommen, dass Bauschutt und Bausperrgut in jedem Fall sortiert wird und die mineralische Fraktion so teilweise einer Verwertung zugeführt werden kann, auch wenn auf der Baustelle keine Verwertung vorgesehen ist. Der Unterschied zwischen z.B. "Beton in Beseitigung" und "Beton in Verwertung" ist daher gering.

Da heute ungefähr 46% der brennbaren Bauabfälle wild entsorgt werden [BUWAL 1996] und nur etwa 5% der Hochbauabfälle verwertet werden [BUWAL 1999] bewegt sich die heutige Entsorgungs-Realität zwischen der Entsorgungsvariante 1 und 2.

12.6.4. Zeitliche Differenzierung (ER, RE, AB)

Unter zeitlicher Differenzierung der Entsorgungsbelastungen wird die Unterscheidung in Erstellungsabfälle (bei der Gebäude-Errichtung, ER), Renovationsabfälle (während der Standdauer des Gebäudes, RE) und Abbruchabfälle (beim Gebäude-Lebensende, AB) verstanden.

Kilogramm	Erstellungs-abfall	Zusammen-setzung	Renovations-abfall	Zusammen-setzung	Abbruchabfall	Zusammen-setzung
Beton bewehrt	0.00473	**32.63%**	0	0.00%	0.468	**46.830%**
Beton unbewehrt	0.00244	**16.81%**	0	0.00%	0.241	**24.124%**
Innenputz	0.000259	1.79%	0.0259	**22.31%**	0.0257	2.569%
Aussenputz	0.000262	1.81%	0.0288	**24.79%**	0.0128	1.284%
Backstein	0.00368	**25.42%**	0	0.00%	0.181	**18.054%**
Gips	0.00082	5.66%	0.0492	**42.31%**	0.0156	1.559%
Glas	0.0000138	0.10%	0.0023	1.98%	0.00137	0.137%
Stahl	0.000155	1.07%	0	0.00%	0.0154	1.539%
PVC	0.000068	0.47%	0.00154	1.32%	0.000806	0.081%
PE	0.0000399	0.28%	0.00123	1.06%	0.000483	0.048%
EPS	0.0000144	0.10%	0.000144	0.12%	0.000129	0.013%
PUR	0.0000115	0.08%	0.000115	0.10%	0.000103	0.010%
PVC-Dichtungsbahn	0.00000284	0.02%	0.0000592	0.05%	0.0000327	0.003%
PE-Dichtungsbahn	0.00000403	0.03%	0.0000839	0.07%	0.0000463	0.005%
Farben	0.00004	0.28%	0.0012	1.03%	0.00036	0.036%
Holz behandelt	0.000425	2.93%	0.00121	1.04%	0.00807	0.807%
Holz unbehandelt	0.00152	**10.51%**	0.00435	3.74%	0.0289	2.894%
Elektro-Kabel	0.00000365	0.03%	0.0000729	0.06%	0.0000693	0.007%
Summe	0.0145	100%	0.116	100%	1	100%

Tab. 41 *Relative Mengen an Erstellungs-, Renovations- und Abbruchabfällen (relative Einheiten) und deren gewichtsmässige Zusammensetzung (Massenprozent) für 1 Kilogramm Durchschnittshaus.*

Der Erstellungsabfall für das Durchschnittshaus setzt sich vor allem aus den mineralischen Baustoffen Beton und Backstein sowie Holz zusammen. Die Zusammensetzung ist stark abhängig von den geschätzten Verschnittmengen. Der Erstellungsabfall macht aber nur rund 1% der Lebenszyklusmassen aus.

Im Renovationsabfall finden sich vor allem Materialien mit einer kürzeren Lebensdauer als der Standzeit des Gebäudes (< 80 Jahre); v.a. Putze und Gips. Der Renovationsabfall macht quantitativ rund 10% der Lebenszyklusmassen aus.

Im Abbruchabfall befinden sich v.a. die Materialien mit einer langen Lebensdauer (Beton und Backstein). Die Zusammensetzung des Abbruchabfalls entspricht exakt derjenigen der Gebäudezusammensetzung b_i. Da die langlebigen Materialien auch die quantitativ wichtigsten der Lebenszyklusmassen sind, macht der Abbruchabfall auch rund 88 G-% der Lebenszyklusmassen aus.

Im folgenden werden die gewichteten Belastungen durch die Entsorgung aufgeschlüsselt nach Erstellungs-, Renovations- und Abbruchabfällen. Dabei werden zwei Entsorgungsvarianten "mit maximaler Beseitigung" und "mit maximaler Verwertung" unterschieden (vergl. Entsorgungs-varianten 2 und 3).

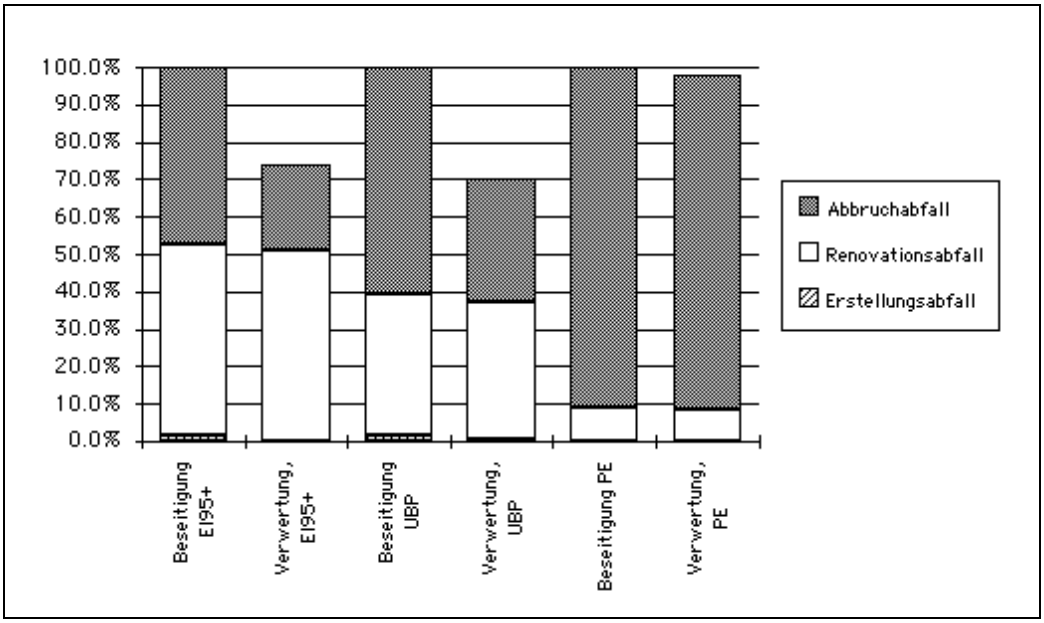


Abb. 22 *Beiträge durch die zeitlich unterschiedlich anfallenden Abfallmengen der Entsorgung des Durchschnitthauses für zwei Entsorgungsvarianten (max. Beseitigung und max. Verwertung). Gewichtet nach Eco-indicator 95+, Umweltbelastungspunkten 97 und Primärenergiebedarf (Summe Entsorgung mit Beseitigung = 100%).*

Der Erstellungsabfall ist bei allen betrachteten Bewertungsmethoden vernachlässigbar. Bei maximaler Verwertung ist der Beitrag sogar verschwindend.

Die hauptsächliche Belastung der Entsorgung stammt aus den Renovations- und Abbruchabfällen. Bei Gewichtung nach Eco-indicator 95+ (EI95+) ist der Renovationsabfall aus dem Durchschnittshaus als gleich wichtig oder wichtiger als der Abbruchabfall anzusehen, obwohl das Massenverhältnis Renovations- zu Abbruchabfällen lediglich 0.12 beträgt.

Doch auch bei Gewichtung nach Umweltbelastungspunkten (UBP) ist der Renovationsabfall nicht vernachlässigbar, und wird bei der Entsorgungsvariante mit maximaler Verwertung gleich wichtig wie der gesamte Abbruchabfall. D.h. ein Kilogramm Renovationsabfall ist belastender als ein Kilogramm Abbruchabfall. Dies ist auf den grossen Inertstoffanteil im Abbruchabfall zurückzuführen resp. die relativ grosse Menge von problematischen Gipsabfällen im Renovationsabfall.

Die Gewichtung nach beanspruchten Primärenergieträgern (PE) widerspiegelt grob die Massenverhältnisse. Die Bedeutung der Renovationsabfälle sind den Abbbruchabfällen untergeordnet. Der Unterschied zwischen maximaler Beseitigung und maximaler Verwertung ist gering, da die wichtigsten Energieaufwendungen aus der Abbruchenergie und nur im geringen Mass aus der Sortierung und Beseitigung stammen.

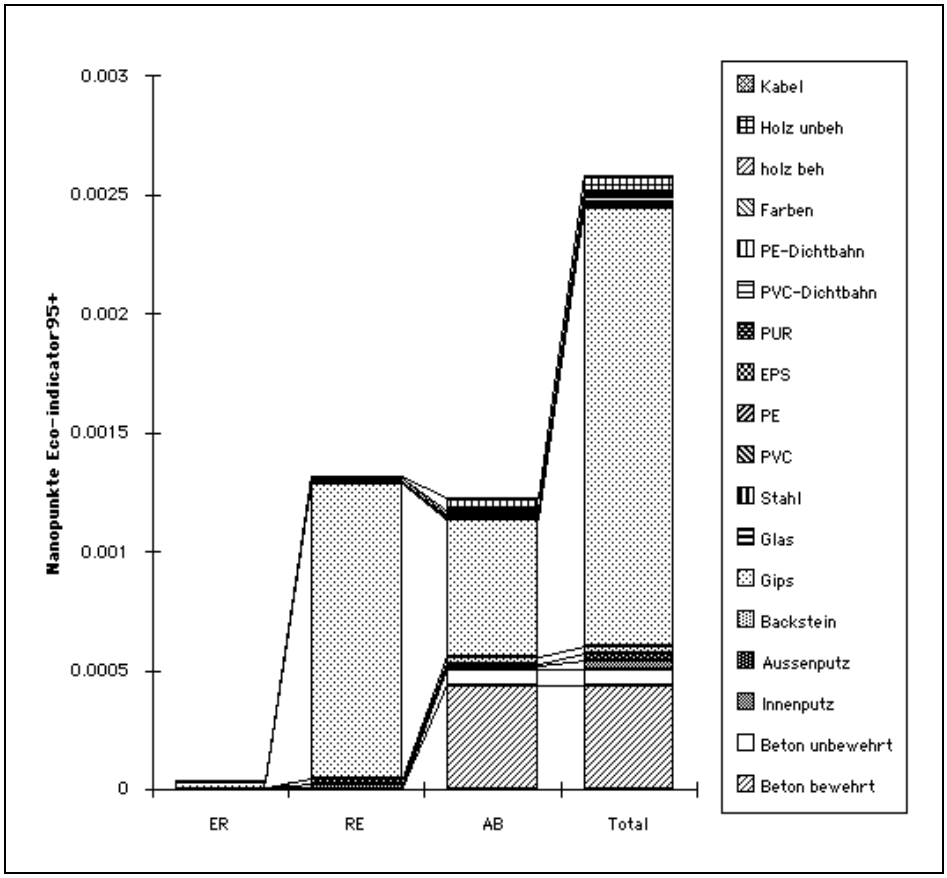


Abb. 23 *Herkunft der Belastungen nach Materialien der zeitlich unterschiedlich anfallenden Abfälle (ER, RE, AB) bei **Entsorgungsvariante mit maximaler Beseitigung**. Gewichtet nach Eco-indicator 95+. ER = Erstellungsabfall, RE = Renovationsabfall, AB = Abbruchabfall.*

Oben ist dargestellt, welche Materialien zu den Belastungen bei den drei zeitlich unterschiedlich anfallenden Abfallfraktion ER, RE, AB beitragen; bei der Entsorgungsvariante 2 mit maximaler Beseitigung (gemäss Eco-indicator 95+).

Auffällig ist der grosse Beitrag von Gipsprodukten; in zweiter Linie von bewehrtem Beton. Die Belastung des Renovationsabfalls stammt praktisch zu 100% aus der Beseitigung von Gips. Gips macht nach Masse rund 42% des Renovationsabfalls aber nur 5.8% der gesamten Lebenszyklusmassen des Gebäudes aus.

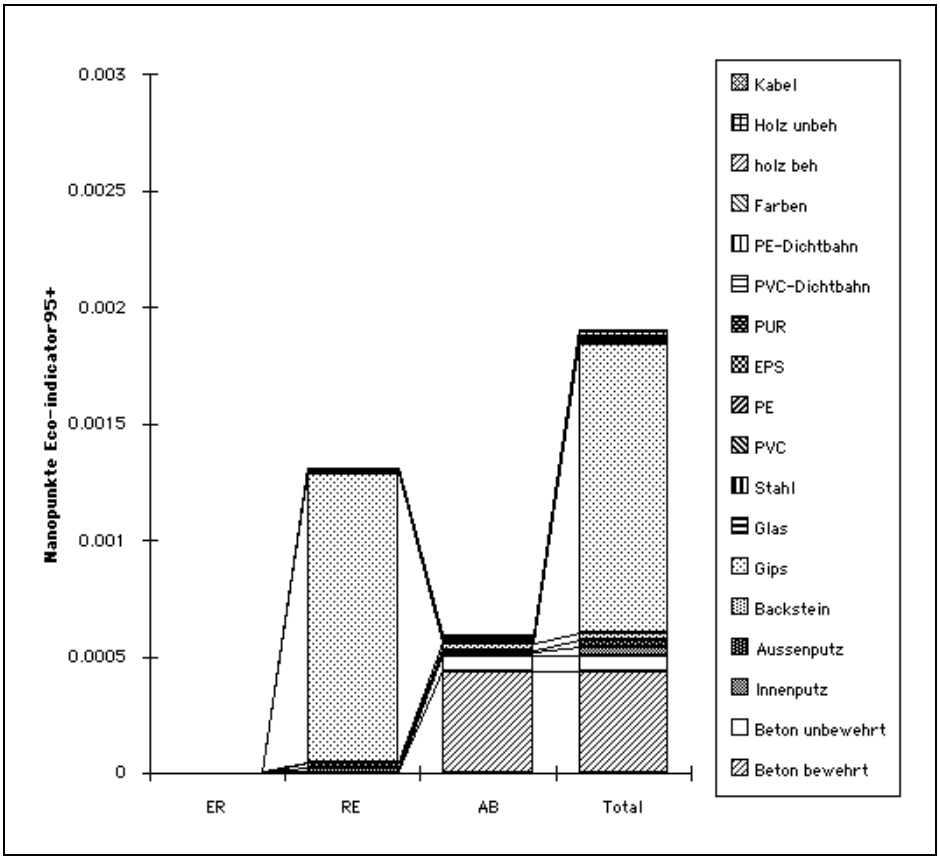


Abb. 24 *Herkunft der Belastungen nach Materialien der zeitlich unterschiedlich anfallenden Abfälle (ER, RE, AB) bei* ***Entsorgungsvariante mit maximaler Verwertung****. Gewichtet nach Eco-indicator 95+.*

Oben ist dargestellt, welche Materialien zu den Belastungen bei den drei zeitlich unterschiedlich anfallenden Abfallfraktionen ER, RE, AB beitragen; bei der Entsorgungsvariante 3 mit maximaler Verwertung (gemäss Eco-indicator 95+).

Im Unterschied zur Entsorgungsvariante 2 mit maximaler Beseitigung, kann bei der Verwertung vor allem die Belastung durch beseitigten Gips reduziert werden. Diese Reduktion erfolgt aber praktisch ausschliesslich bei den Abbruchabfällen.

Die Renovationsabfälle sind bei der Entsorgungsvariante 3 bei maximaler Verwertung praktisch gleich belastend wie bei der Entsorgungsvariante 2 mit maximaler Beseitigung. Bei der Bilanzierung von Renovationsabfällen wurde aufgrund von knappen Platzverhältnissen eine separate Mulde für Gipsabfälle und somit eine sortenreine Einstoffsammlung und *Verwertung als unwahrscheinlich* erachtet. Der Gips in *Renovationsabfällen* gelangt daher bei beiden Varianten (mit und ohne Verwertung) als Bauschutt in eine Sortieranlage und wird als Feinfraktion deponiert.

Da bei Gipsprodukten eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen wurde, gelangt bei einer Gebäude-Lebensdauer von 80 Jahren 75% des gesamten Gipses in den Renovationsabfall, und kann wie oben erläutert nicht verwertet werden. Lediglich 25% des Gipses gelangt in den Abbruchabfall und kann dort – im Falle einer Separatsammlung – einer Verwertung zugeführt werden.

12.6.5. Verwertung, Störstoffe und unerwünschte Beseitigungskanäle

Stoffliche Verwertung

Für eine optimale Ressourcenplanung ist es notwendig zu wissen, welche Materialien wie verwertet werden können. Hier wurden die verschiedenen Entsorgungsoptionen mit sog. Markierungen versehen, die kennzeichnen, ob ein Abfall einer stofflichen Verwertung zugeführt oder beseitigt wurde (Markierung Stoff-"Malus"). Die Effizienz des Verwertungsprozesses selbst oder die Qualität der Rezyklate wurde dabei nicht berücksichtigt, weil es darum geht, anzugeben, welche Entsorgungsoptionen überhaupt eine genügende Trennung erlauben, um eine Verwertung zu ermöglichen.

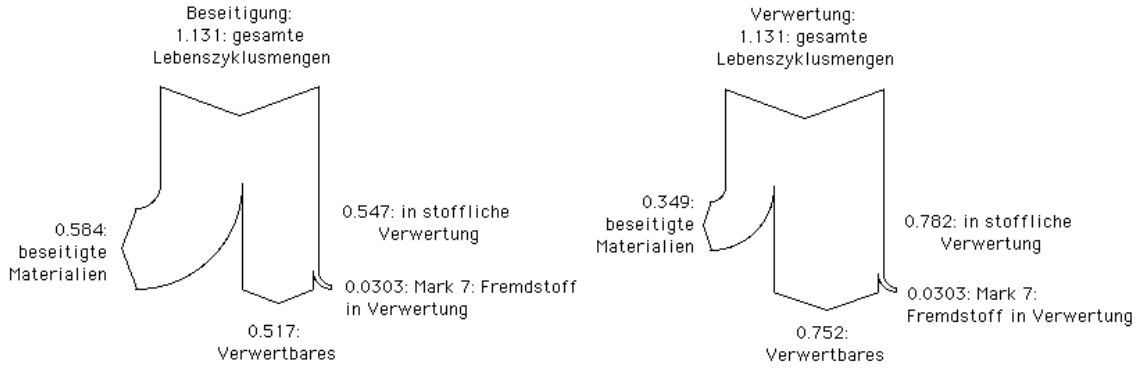


Abb. 25 *Stoffflüsse der Entsorgung für das Durchschnittshaus bei der Variante "Beseitigung" (links) bzw. "max. Verwertung". In Kilogramm pro Kilogramm Durchschnittshaus (1.131 kg = Baumaterialmassen während des ganzen Lebenszyklus').*

Die Verwertungsquote kann durch eine Entsorgung mit maximaler Verwertung von rund 50% auf rund 70% erhöht werden. Die gesamte Verwertungquote ist auch bei der Variante "Beseitigung" hoch, weil die einer Sortieranlage zugeführten Abfälle teilweise verwertet werden können.

Gelangen Störstoffe in einen Verwertungskanal wird dieser Effekt bei den heute üblichen Ökobilanzbewertungsmethoden nicht abgebildet. Trotzdem ist der Effekt unerwünscht, da er zu schlechteren und/oder belasteten Rezyklat-Produkten führen kann. Bei der Inventarisierung wurden Störstoffe in der Verwertung mit einem Index (Markierung 7) versehen, um diese in der Bilanz ausweisen zu können.

Die Störstoffe in der Verwertung betragen ca. 4 – 6% der verwerteten Massen und stammen bei beiden Entsorgungsvarianten vor allem aus Gips aus der Renovation und Wandputzen beim Abbruch.

Ungeeignete Beseitigung

Abfälle, die in einen ungeeigneten Beseitigungskanal gelangen (z.B. Organisches Material in eine Inertstoffdeponie) ergeben ähnlich wie bei Störstoffen auch kein Signal in der Ökobilanz. Auch hier wurden ungeeignete Beseitigungen von Abfällen markiert.

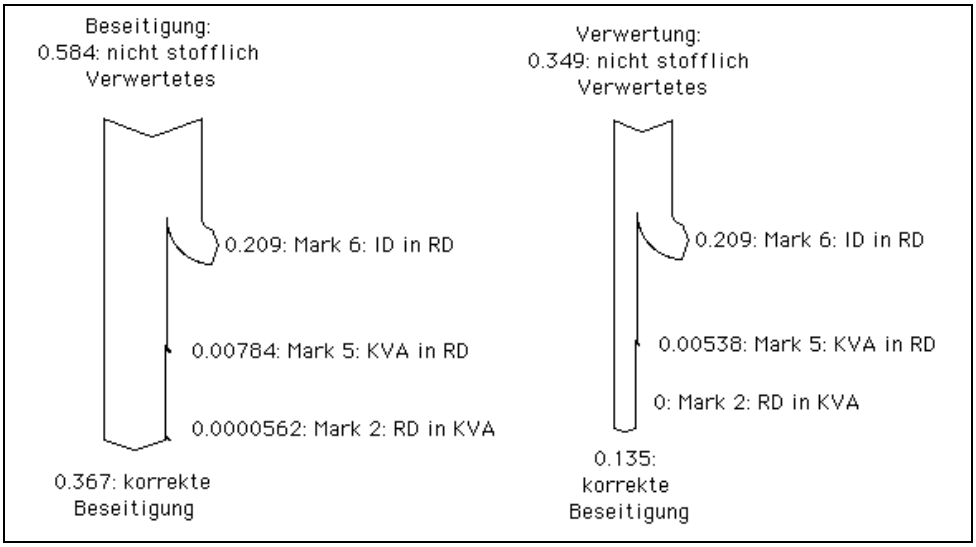


Abb. 26 *Schicksal der beseitigten Abfälle aus dem Durchschnittshaus bei der Variante "Beseitigung" (links) bzw. "max. Verwertung". In Kilogramm pro Kilogramm Durchschnittshaus.*

Von den beseitigten Materialien gelangen je nach Entsorgungsvariante 63% resp. 39% in eine korrekte Beseitigung. Der grösste Teil ungeeignet entsorgter Materialien machen jeweils Inertstoffe in der Reaktordeponie aus (Markierung 6: ID in RD). Dies sind Betonbestandteile, die nach der Sortierung in die Feinfraktion gelangen und deponiert werden. Kleinere Mengen ungeeignet entsorgter Materialien sind die Zellulosefasern in Gipsfaserplatten und Kunststoffharze in Farben, welche nicht verbrannt sondern deponiert werden (Markierung 5: KVA in RD).

Energetische Verwertung

Analog zur stofflichen Verwertung wurden auch Markierungen für nicht verwertete Energie in den Bauabfällen bilanziert (Markierung Energie-"Malus"). Dadurch kann analysiert werden, wie gut die in den Bauabfällen enthaltene Energie einer Nutzung zugeführt wird.

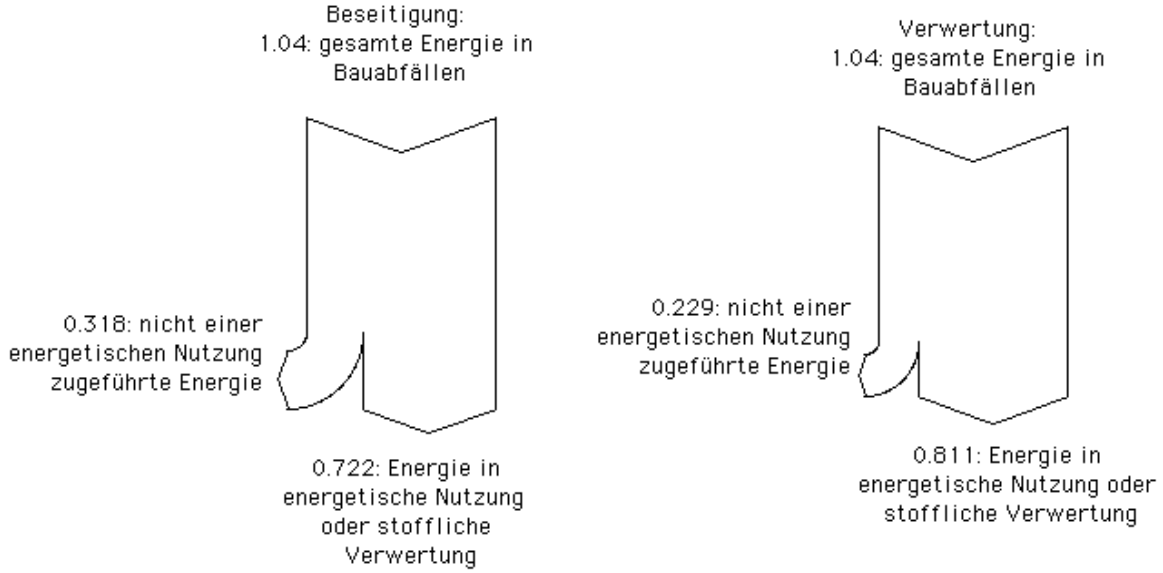


Abb. 27 *Energieflüsse der entsorgten Bauabfälle für das Durchschnittshaus bei der Variante "Beseitigung" bzw. "max. Verwertung". In Megajoule pro Kilogramm Durchschnittshaus (1.04 MJ = Energieinhalt von 1.131 kg Lebenszyklusmassen).*

Die energetische Verwertung (inkl. die in der stofflichen Verwertung weitergegebene Energie) ist bereits bei der Variante "Beseitigung" relativ hoch, da die meisten KVAs mit einer Energienutzung ausgestattet sind. Die nicht verwerteten Energieanteile stammen zum einen aus der in den KVAs verlorenen Kondensationswärme (Differenz oberer zu unterem Heizwert) zum anderen aus brennbaren Stoffen, welche in Reaktordeponien beseitigt werden (Zellulose in Gipsfaserplatten und Kunststoffharz von Farben). Die Verbesserung der Energieausnutzung ist vor allem auf die erhöhte stoffliche Verwertung von Gips und unbehandeltem Holz zurückzuführen. Die Energie in Abfällen, welche einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, kann nicht als verloren gelten, da eine spätere Energienutzung nicht ausgeschlossen ist. Daher wird auch kein Energie-Malus vergeben.

12.6.6. Herstellung vs. Entsorgung

Die Belastungen der Entsorgung werden hier mit den Belastungen der Herstellung der Baumaterialien für das Durchschnittsgebäude verglichen. Für die Entsorgung werden dabei die drei Entsorgungsvarianten unterschieden.

Variante 1 **Entsorgung mit wilder Verbrennung (*"worst case"*):** alle brennbaren Bauabfälle (4.5 G-%) werden direkt ab Baustelle wild, d.h. in einem offenem Feuer verbrannt. Die restlichen Abfälle (95.5 G-%) werden in Kanäle zur regulären Beseitigung gegeben.

Variante 2 **Entsorgung mit maximaler Beseitigung (*"average case"*):** Alle Bauabfälle werden in Kanäle zur (regulären) Beseitigung gegeben. D.h. in der Bilanz der Entsorgung der Materialien werden generell die Entsorgungsoptionen *"...in Beseitigung"* verbucht.

Variante 3 **Entsorgung mit maximaler Verwertung (*"best case"*):** Alle Bauabfälle werden wenn möglich in Kanäle zur stofflichen Verwertung gegeben. D.h. in der Bilanz der Entsorgung der Materialien werden wo möglich die Entsorgungsoptionen *"...in stoffliche Verwertung"* verbucht.

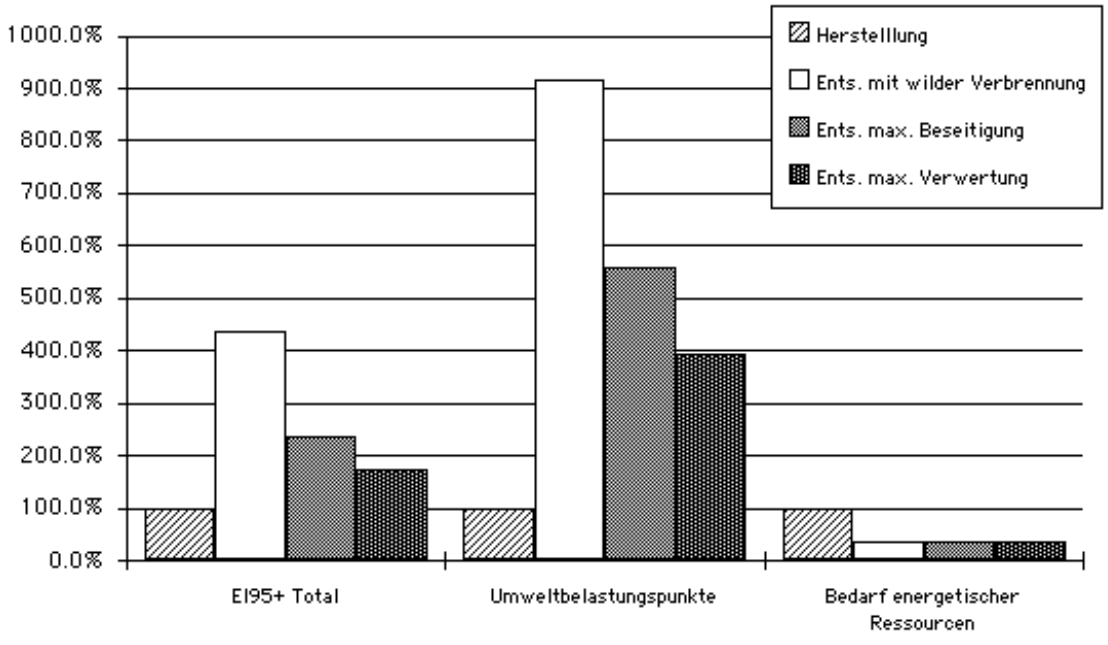


Abb. 28 *Vergleich der Belastung der Herstellung eines Durchschnitsgebäudes (definiert zu 100%) mit drei Varianten der Entsorgung. Bewertet mit Eco-indicator 95+, UBP 97 und Primärenergiebedarf.*

Bei den ökologischen Bewertungsmethoden Eco-indicator 95+ resp. UBP 97 stellen die Entsorgungsprozesse – auch im günstisten Fall – deutlich wichtigere Belastungen dar als diejenigen der Herstellung (180% bis 430% resp. 400% bis 900%). Die Bedeutung der Entsorgung ist bei UBP höher als bei Eco-indicator 95+, was auf die zusätzliche Bewertung von knappem Deponieraum und eine relativ stärkere Bewertung von Deponie-Sickerwasser-Emissionen zurückzuführen ist.

Bei der Primärenergiebilanz stellt die Entsorgung immerhin noch eine spürbare Belastung dar (ca. 30%). Die drei Varianten unterscheiden sich kaum, da im wesentlichen die Abbruchenergie massgebend ist.

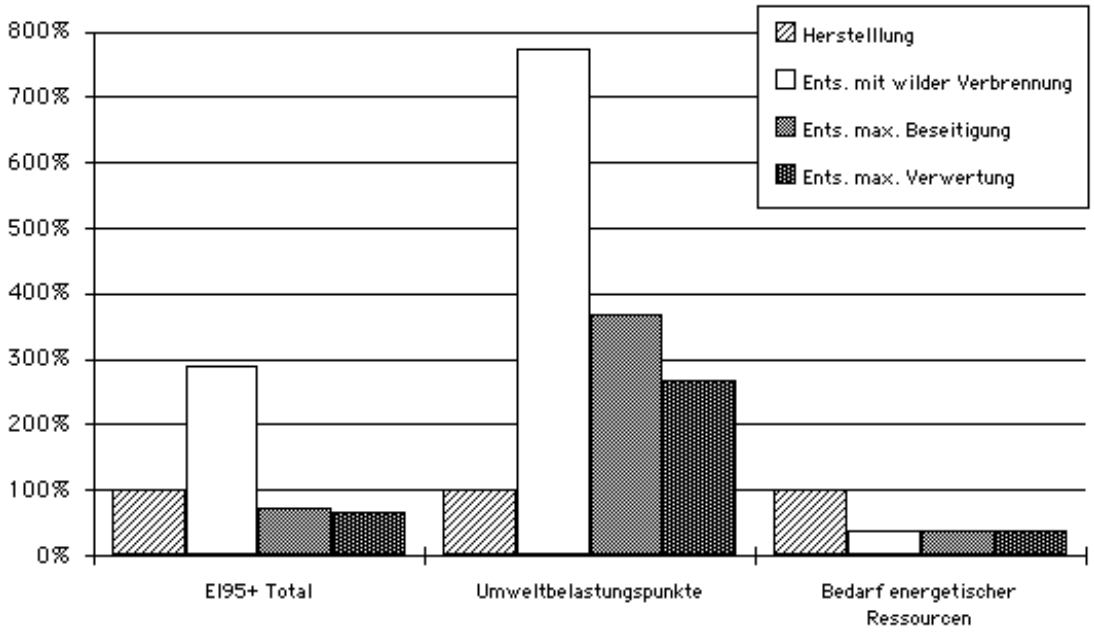


Abb. 29 *Vergleich der Belastung der Herstellung eines Durchschnitsgebäudes **ohne Gips** (definiert zu 100%) mit drei Varianten der Entsorgung. Bewertet mit Eco-indicator 95+, UBP 97 und Primärenergiebedarf.*

Da die Entsorgung von Gips die Resultate wesentlich beeinflusst, wurde noch ein **Gebäude ohne Gips** bilanziert. Die Bedeutung der Entsorgung relativ zur Herstellung sinkt gegenüber dem Gebäude mit Gips, da die sehr belastende Gipsentsorgung entfällt. Doch auch ohne Gips stellt die Entsorgung eine wesentliche, nicht zu vernachlässigende Belastung durch die Gebäudeinfrastruktur dar. Bei Eco-indicator 95+ beträgt die Entsorgung auch im besten Fall zwei Drittel der Belastungen der Herstellung. Bei UBP bleibt die Entsorgung auch ohne Gips ein wichtigerer Aspekt als die Herstellung.

12.6.7. Fazit

Das Beispiel "Durchschnittshaus" zeigt, dass nicht nur auf der Ebene der Einzelmaterialien sondern auch auf Gebäude-Level eine generelle Vernachlässigung der Entsorgungsprozesse nicht zu rechtfertigen ist. Im Gegenteil:

> ***Die Entsorgungsprozesse stellen in der Ökobilanz eine wichtigere Belastung dar als die Herstellung von Baumaterialien!***

Dieses Resultat ist stark geprägt vom Einfluss der Gipsentsorgung (wobei Gips n.b. nur 1.6% der Gebäudemasse ausmacht). Bei Gebäuden ohne Gips kann die Bedeutung der Entsorgung kleiner werden als die Bedeutung der Herstellung, ist aber immer noch relevant und nicht vernachlässigbar. Die bisher übliche Konzentration auf die Herstellungsphase bei der ökologischen Beurteilung von Baumaterialien muss also zurückblickend als lückenhaft bezeichnet werden.

Die bisherige Abstützung auf die Primärenergiebeanspruchung ("graue Energie") zur Beurteilung von Gebäuden mag dazu beigetragen haben, dass die Entsorgung als unwichtig beurteilt wurde. Historisch ist die Diskussion der Heizenergieeinsparung für Gebäude im Sinne einer Aufwand-Nutzen-Analyse geführt worden. Dem Nutzen (Heizenergieeinsparung) wurde der zu leistende Aufwand (graue Energie für Baumaterialien) gegenübergestellt. Da insbesondere *Hersteller* von Baumaterialien die Diskussion prägten, wurde als Aufwand für Baumaterialien oft nur die graue Energie der *Herstellung* betrachtet – und nicht des ganzen Lebenszykluses. Die vorliegende Studie zeigt, dass selbst bei einer rein energetischen Bewertung – d.h. ohne eine Gewichtung der ökologischen Belastung – die Entsorgung aufgrund der Abbruchenergien nicht generell vernachlässigbar ist, sondern rund einen Drittel so gross wie die graue Herstellungsenergie der Baumaterialien ist.

Die **Abbruchenergie** ist eine in der Bilanz spürbare Grösse. Die Abbruchenergie wurde hauptsächlich mit dieselbetriebenen Maschinen bilanziert und nimmt grob Rücksicht auf die Festigkeit der Materialien. Hier wären detailliertere Erhebungen zur Bilanzierung – insbesondere bei Einzelmaterialbetrachtungen – wünschbar.

Die abgeschätzte **Emission von PM_{10}-Partikel** aus mineralischen Materialien während des Abbruchs kann für das Gesamtgebäude als vernachlässigbar eingestuft werden (kann aber bei Einzelmaterialbetrachtungen wichtig werden).

13. Ausblick

13.1. Zukünftige Baumaterialien

In der vorliegenden Arbeit konnten nicht alle heute verwendeten Stoffe bilanziert werden. Neben bekannten Stoffen erscheinen in der Baubranche ständig auch Neuentwicklungen. Glasfaserverstärkte Polyester-Elemente werden heute bereits eingesetzt und werden (als Modell eines neuen Baustoffes) in der vorliegenden Arbeit bilanziert. In [Frauenfelder 1998] werden einige weitere neue Entwicklungen erwähnt.

Kohlenstoffverstärkte Kunststoff-Systeme sind acht mal belastbarer als üblicher Armierungsstahl und wird z.B. für Brückenreparaturen eingesetzt. Utopisch klingen Vorhersagen mit Kohlenstoff/Epoxy-Systemen seien Elektrizität leitende und sogar speichernde Wände zu erzeugen. Solche Systeme sollen auch Beschädigungen in Beton entdecken können.

Neue Isolationsmaterialien sind **Vakuumdämmstoffe** und **Aerogel** (Mica, SiO_2). Bei Vakuumdämmstoffen wird ähnlich wie bei Lebensmittel-Verpackungen ein formgebendes Basismaterial in einer Folie eingepackt und vakuumisiert. Es entstehen hochisolierende Platten mit fixer Geometrie. Als Nachteil dürfen die Platten nicht zertrennt werden und sie bringen somit das Risiko, dass Konstruktionen mit Kältebrücken erstellt werden.

Neue **Biokomposit-Materialien** bestehen z.B. aus Sojamehl und Altpapier und sind so verwendbar und belastbar wie Eichenholz. Andere Materialien bestehen aus Weizenstroh, Resistroh oder Staub aus Steinbrüchen.

Wie stark sich diese und viele andere Materialien durchsetzen können, kann heute noch nicht gesagt werden. Augenfällig ist aber die Tendenz, sich wenig um die Entsorgungsphase dieser Stoffe zu kümmern. Das Augenmerk liegt vor allem bei der Produktion und den Eigenschaften als Baustoff. Für eine wirklich zukunftsgerichtete Entwicklung müssten aber auch die Entsorgungs-Optionen dieser neuen Materialien erforscht werden.

13.2. Entwicklung der Deponierung

Die Deponierung von Gipsprodukten wird in der vorliegenden Studie als besonders belastend im Vergelich zur Herstellung eingestuft. Grund dafür sind die in der Bilanz berechneten hohen Schwefeldioxidfrachten aus dem Deponiegas. Das angewendete Reaktordeponiemodell geht von einer ausgeprägten Methanphase der Deponie und entsprechenden Verteilungen von chemischen Elementen (Transferkoeffizienten) aus. 35% des Schwefels im Abfall wird demnach in das Deponiegas übergeführt. Dieser Transferkoeffizient beruht auf einer Extrapolation von gemessenen Frachten in Deponiegas und Sickerwasser [ESU 1996b]. Nachfragen bei Fachleuten ergaben, dass der Transferkoeffizient von 35% und sogar ein Bereich bis 70% als realistisch eingeschätzt wird [Covelli 1999, Brandl 1999, Lichtensteiger 1999].

Sulfatreduzierende Bakterien werden sehr schnell aktiv, insbesondere unter anaeroben Bedingungen [Brandl 1999, Lichtensteiger 1999]. Die Bakterien scheiden den Schwefel als ionisches, d.h. gelöstes Wasserstoffsulfid (HS^-) aus. Theoretisch kann Sulfid in der Deponie als schwerlösliches Metallsulfid, insbesondere Eisensulfid (FeS, Pyrit), ausgefällt werden. Die Freisetzung der Metalle in der Deponie beginnt aber später als die Freisetzung und Umsetzung von Gips. Heterogenitätseffekte können die Ausfällung verhindern. Daher dürfte über längere

Zeit die Ausfällung ausbleiben und Sulfid als Schwefelwasserstoff ins Deponiegas gelangen. Die Metallfrachten im künftigen Reaktordeponiegut dürften auch nicht genügend gross sein, um eine quantitative Ausfällung zu ermöglichen [35].

Ab 1.1.2000 ist die Ablagerung von brennbaren Abfällen auf Reaktordeponien in der Schweiz verboten. Ab dann werden Reaktordeponien neben KVA-Schlacken mit Strassenwischgut, Rechengut aus Flüssen, Sinkgut aus ARAs, Schlämmen aus Schlammsammlern, Gipsabfällen und Asbestelementen beschickt [Textor 1999]. Aufgrund dieser Zusammensetzung kann auch in Zukunft von einer Methanphase der Deponien ausgegangen werden. Rechtlich wird auch in Zukunft mit einer Gasentwicklung aus Reaktordeponien gerechnet, weshalb die Deponiegasbehandlung vorgeschrieben bleibt [TVA 1996, Anhang 2, Absatz 24].

13.2.1. Erfahrungen mit Gips in Deponien aus der Praxis

Dass Gipsprodukte in Reaktordeponien tatsächlich Schwefelemissionen in die Luft verursachen können, zeigen Vorfälle in Nordamerika.

In Nassau, N.Y., konnten starke Schwefelwasserstoff-Gerüche (H_2S) aus einer 6 Hektar grossen Deponie über 6 km rund um die Deponie herum festgestellt werden [Daily News 1998]. In Dunbury, Connecticut, musste 1996 eine Reaktordeponie geschlossen werden, weil grosse Mengen an Schwefelwasserstoff entwickelt wurden. Die Anlage besass keine Deponiegasverbrennung. Schwefel wird deshalb aus der anaeroben Zone als Schwefelwasserstoff emittiert und nicht zu Schwefeldioxid verbrannt. Anwohner drohten wegen Wertminderung ihrer Grundstücke aufgrund des Geruchs faulender Eier und Gesundheitsbeeinträchtigung die Stadt zu verklagen. Eine von der Stadtverwaltung in Auftrag gegebene Studie machte Gips aus Bauschutt als Hauptschuldigen für die Schwefelwasserstoff-Emissionen verantwortlich. Verschärft werde das Problem durch Löschwasser, welches eingesetzt werde, um unterirdische Feuer auf der Deponie zu bekämpfen [36] [News Times 1997].

Erste Probleme mit Schwefelwasserstoff-Gerüchen traten Anfangs der 90er Jahre in einer Deponie in Südflorida für Mischabfall auf. Der Input an Bauschutt hatte sich erhöht, nachdem der Hurrikan Andrew ein Jahr zuvor grosse Zerstörungen angerichtet hatte. Simulationen in Labor-Reaktoren der North Carolina State University haben ergeben, dass Gipsplatten der Hauptgrund für die Schwefelwasserstoffproduktion sind. Die mikrobielle Sulfat-Reduktion konkurrenziert die Methangasproduktion als alternative Elektronensenke [Fairweather et al. 1998].

Das Umweltschutzamt von Oregon, USA, verlangt eine Überwachung auf Schwefelwasserstoff für gewisse Bauschuttdeponien, nachdem diese Emissionen in gipsenthaltenden Deponien in British Columbia, Kanada, entdeckt wurde [DEQ 1995].

In Florida mehren sich Klagen wegen Geruchimmissionen aus Bauschuttdeponien. Schwefelwasserstoff-Emissionen werden auch dort auf Gipsbauabfälle (*"wallboard"* bzw. *"dryboard"*) zurückgeführt. Die Universität von Florida hat die Reduktion von Schwefelwasserstoff-Emissionen aus Bauschuttdeponien in ihre Forschungsagenda für 98/99 aufgenommen [FCSHWM 1998].

---

35 Calzium aus dem Gips selbst bildet keine schwerlöslichen Sulfide.

36 Die Stadtverwaltung hatte Verträge mit zwei Abfallanlieferern für garantierte Liefermengen an Bauabfall im Gegenzug für reduzierte Deponiegebühren. Die Stadtverwaltung überlegt sich nun, die Abfallanlieferer zu verklagen.

Amerikanischer Bauschutt für den weit verbreiteten Einfamilienhausbau enthält viel mehr Gipsprodukte als in Europa üblich (rund 26 G-%) und einen grossen Anteil an Biomasse [Builder 1999]. Dies mag – zusammen mit der weitverbreiteten einfachen Deponietechnologie – die Häufigkeit der Fälle von Schwefelwasserstoff-Emissionen in den USA erklären.

Der US-amerikanische Verband der Gipshersteller (Gypsum Association) gibt eindeutige Hinweise, wie Gips wünschbarerweise zu entsorgen sei (siehe Anhang G "Residential Job-Site Disposal of New Construction Waste Gypsum Board"). Insbesondere ist der Gips demnach möglichst feinverteilt und oberflächennah auf der Deponie auszubringen. Hohe Feuchtigkeit, stehendes Wasser, mangelnde Belüftung i.e. anaerobe Bedingungen sind zu vermeiden. Insbesondere die gesonderte oberflächennahe Entsorgung dürfte aufgrund der schwierigen Logistik (Separatsammlung, ev. Zwischenlagerung bis die Deponieoberfläche abgeschlossen wird) in den meisten Fällen aber nicht erfolgen.

In der Schweiz ist der Industrie das Problem ebenfalls bewusst. In der Publikation "Produkt- und Ökoprofil von Gips" der Rigips AG und Fixit AG heisst es z.B. "Sulfat kann, falls grössere Mengen von abbaubaren, organischen Stoffen ebenfalls deponiert werden, durch biologische Umsetzungen zum Sulfid oder Schwefelwasserstoff reduziert werden" [Coutalides 1998, p.37].

Die Beispiele machen klar, dass Gips in reaktiven Deponien zu relevanten Schwefelemissionen in die Luft führen können. Auch in der Schweiz nehmen Betreiber einer Reaktordeponie mit Deponiegasnutzung Gipsabfälle nur widerwillig an, weil die Motoren durch die grossen Schwefelfrachten geschädigt werden [Textor 1999]. Schwefelwasserstoff ist explosiv und kann in grösseren Konzentrationen (ab 4.3 V-%) ein Sicherheitsrisiko werden [Covelli 1999]. Diese Konzentrationen sind aber auf Reaktordeponien unwahrscheinlich. Aber auch bei kleineren Konzentrationen von Schwefelwasserstoff wäre eine Gefährdung der Deponiearbeitenden durch austretendes Deponiegas bedenklich. Die Geruchsgrenze beträgt 0.43 $\mu g/m^3$. Der Grenzwert der Air Quality Guidelines der WHO, welcher akzeptable Konzentrationen festlegt, beträgt 150 $\mu g/m^3$ [CML 1992].

Wichtig ist aber die Feststellung, dass die **gemeinsame Deponierung mit organischen Abfällen** zu einer Schwefelwasserstoff-Entwicklung führt.

Vorwiegend mineralischer Bauschutt kann auch unsortiert auf einer Inertstoffdeponie entsorgt werden, sofern er weniger als 5% organische Anteile enthält. Gips kann somit als Bestandteil von (unsortiertem) Bauschutt auch auf einer Inertstoffdeponie entsorgt werden und führt dabei zu keinen nennenswerten Luftemissionen. Da in der vorliegenden Studie aber zwingend eine Sortierung des Bauschutts bilanziert wurde, ist die direkte Deponierung als Bauschutt/Inertstoff keine Option. Die TVA strebt möglichst die Verwertung und Sortierung von Bauabfällen an [TVA 1996, Art.9].

13.2.2. Entwicklung der Deponierung

In Zukunft werden Reaktordeponiebetreiber hauptsächlich Abfälle erhalten, welche schwierig zu einem Deponiekörper zu modellieren sind (Strassenwischgut, Rechengut aus Flüssen, Sinkgut aus ARAs, Schlämmen aus Schlammsammlern) [Textor 1999]. Im Zuge der sich daraus aufdrängenden Verfahrensänderungen wäre auch prüfenswert, ob Gipsabfälle resp. Feinfraktionen aus Sortieranlagen – allenfalls nach Abtrennung der organischen Fraktion oder

einer Schadstoffentfrachtung – nicht eher in einer Inertstoffdeponie eingelagert werden können. Im mikrobiellen Klima einer Inertstoffdeponie wäre eine Umsetzung zu Schwefelwasserstoff weniger wahrscheinlich.

Wahrscheinlich ist, dass vom Gesetzgeber nach Verordnungsänderungen vermehrt eine **Separat- resp. Monodeponierung** von möglichst definierten Abfällen gefordert wird. Dadurch würden anorganische Abfälle nicht mehr mit organischen Abfällen zusammen deponiert. Dies würde die Sulfidbildung aus Gips vermutlich wirksam unterbinden. Bis eine solche Gesetzgebung in Kraft treten kann, können aber noch einige Jahre vergehen.

13.3. Entwicklung des Recyclingmarktes

13.3.1. Kiesersatzstoffe

Die totalen Kiesressourcen in der Schweiz betragen zur Zeit ca. 8.5 Milliarden Kubikmeter oder 16 Milliarden Tonnen [Thalmann 1997]. Davon sind aber nur ein Teil abbaubar. Teilweise sind die Vorkommen heute mit Siedlungsraum oder Waldflächen belegt; zum anderen schliessen Grundwasser- und Landschaftsschutzauflagen die Nutzung aus. Die heute abbaufähigen Reserven betragen etwa 20% der insgesamt vorhandenen Ressourcen [GTK 1997]. Verschiedene Quellen geben Reservedauern von 10 bis 130 Jahren an [Lichtensteiger et al. 1998, Staub 1999, Thalmann 1997]. Kies ist ein "High-volume/Low-value"-Produkt: Es weist im Vergleich zu seinem Handelswert ein grosses Volumen (und grosse Masse) auf. Die Transportkosten sind daher ein wichtiger Kostenfaktor. Abgesehen von der Zerstörung von Kiesabbaugebieten und der Erschöpfung von natürlichen Ressourcen stellt der Transport auch eine wesentliche ökologische Belastung der Kiesproduktion dar. Falls in der – mehr oder weniger fernen – Zukunft einmal die natürlichen Reserven der Schweiz erschöpft sein werden, müsste Kies aus dem Ausland (z.B. Deutschland) importiert werden. Die Wiederaufbereitung von *lokal* verfügbaren Kiesersatz-stoffen könnte unter diesem Bedingungen einen ausschlaggebenden Kostenvorteil aufweisen.

13.3.2. Sortieranlagen

Zur Zeit wird Rezyklat-Beton mehrheitlich nur für einfache Anwendungen mit geringen Anforderungen – grösstenteils im Tiefbau – eingesetzt. Anzustreben ist aber eine Verwertung von Hochbauabbruch im Hochbau. Die höheren Qualitätsanforderungen im Hochbau werden wahrscheinlich auch andere Aufbereitungsverfahren nötig machen. Insbesondere könnten nasse Aufbereitungen wichtig werden, da sie Störstoffe gut abtrennen und in einer Schlamm/Feinfraktion konzentrieren können. Letztere wird vermutlich deponiert werden müssen. Heute werden in der Schweiz nur trockene Sortieranlagen betrieben [Staub 1999]. Recyclingbaustoffe dürfen heute nicht verwendet werden, wenn ein direkter Kontakt mit dem Grundwasser nicht auszuschliessen ist [BUWAL 1997c, p.14].

14. Grenzen der Ökobilanzierung von Gebäuden

14.1. Massenprodukte vs. Einzelanfertigungen

Bei der Bilanzierung ist zu beachten, dass Gebäude weitgehend Einzelanfertigungen sind. Zwar sind die verwendeten Baumaterialien Industrieprodukte mit mehr oder weniger spezifischen und einheitlichen Eigenschaften, aber die Prozesse auf der Baustelle sind im wörtlichen Sinne "einzigartig". Wie im Detail Konstruktionsprobleme gelöst werden, Konstruktionen schlussendlich realisiert werden und später renoviert werden, wird von allen Akteuren (ArchitektIn, Bauleitung, Polier/Poleuse, ausführender HandwerkerIn) mitbestimmt. Die notorisch hohe Zeitnot auf Baustellen tut ein übriges dazu, dass Baustellenprozesse nicht 100% planbar und voraussehbar sind. Daneben ist aber auch auf örtliche Gegebenheiten Rücksicht zu nehmen. Dies alles führt dazu, dass Gebäude nicht vergleichbar sind mit Massenwaren aus der industriellen Fertigung (z.B. Autos, Verpackungen, Computer etc.).

Einige Fragen bei der Ökobilanzierung von Gebäuden sind daher nur fallspezifisch d.h. in Abhängigkeit der Gegebenheiten bei einem konkreten Gebäude zu beantworten. Dies trifft auch auf die Entsorgung von Gebäuden zu:

Altlasten: Wurden in der vorliegenden Studie nicht betrachtet. Ob und wie stark ein Areal und/oder Gebäudemassen belastet sind und wie diese behandelt werden müssen, kann schlecht allgemein oder mit durchschnittlichen Angaben erfasst werden. Diese Aspekte können evt. besser mit Instrumenten wie UVP oder Risikoanaysen abgedeckt werden. Allerdings gibt es bestimmte Branchen, in welchen starke Belastungen des Bodens typisch sind (z.B. Garagen, Schrottlager).

Rückbau vs. Abbruch: Der Entscheid, ob ein Gebäude abgebrochen und beseitigt oder rückgebaut und weitgehend verwertet wird, ist stark von finanziellen Aspekten geprägt. Dabei spielen nicht nur die Beseitigungsgebühren in Deponien und KVA eine Rolle, sondern auch Transportkosten. Dies kann beispielsweise auch dazu führen, dass selbst bei hohen Deponiekosten ein Grossteil des Materials in eine nahegelegene Deponie gebracht wird, statt in eine weiter entfernte Sortieranlage. Hier fliessen also fallspezifische, geographische Aspekte ein, die in Ökobilanzen für durchschnittliche Anwendungen nur schlecht berücksichtigt werden können (Distanzen zu Entsorgungsanlagen, Kantonszugehörigkeit und damit Deponiegebühren). Im Einzelfall können diese Aspekte aber ausschlaggebend sein und stellen daher eine grosse Unsicherheitsquelle bei der hier vorgestellten Bilanzierung der Entsorgung dar.

Erschliessung: Wird nicht nur der bauliche Aspekt eines Gebäudes bilanziert, sondern umfassender auch die Güterflüsse in der Gebrauchsphase für die BenutzerInnen können auch weitere fallspezifische Eigenschaften eine grosse Rolle spielen. Die Anfahrt zum Gebäude kann wesentliche Belastungen ergeben, wenn ein Gebäude schlecht erschlossen bzw. abgelegen ist. Je kleiner die Umweltbelastung durch das Gebäude ist desto wichtiger werden diese Beiträge. Ein Ökohaus "auf der grünen Wiese" kann dadurch gesamthaft ähnliche Belastungen verursachen wie ein konventionelles Haus im Siedlungsgebiet.

14.2. Bilanzierung von Deponieemissionen

Emissionen und Belastungen aus einer *korrekten* Beseitigung können nicht als Mass für die potentielle Schädlichkeit oder die Unerwünschtheit eines Abfalls angesehen werden. Im Gegenteil: Die angemessene Beseitigung eines Abfalls zielt darauf ab, die spezifischen Emissionen aus dem Abfall (Verbrennungs- oder Zersetzungsprodukte) einzudämmen oder zu *minimieren*. Wird davon ausgegangen, dass die Belastungen aus dem investierten technischen Aufwand der Beseitigung kleiner sind als die *dadurch vermiedenen* Belastungen aus dem Abfall werden die gesamten Belastungen aus der Beseitigung keine Korrelation zur "Gefährlichkeit" des Abfalls aufweisen (z.B. die Belastung aus der korrekten Verbrennung von Lösungsmitteln dürfte ungleich geringer sein als die potentielle Belastung einer illegalen Entsorgung via Kanalisation).

Selbstverständlich gibt es eine Grenze, wo sich ein weiterer Behandlungsaufwand nicht lohnt, weil die vermiedene Belastung geringer ist als die aus der Behandlung entstehenden Behandlung (s. Abb 30).

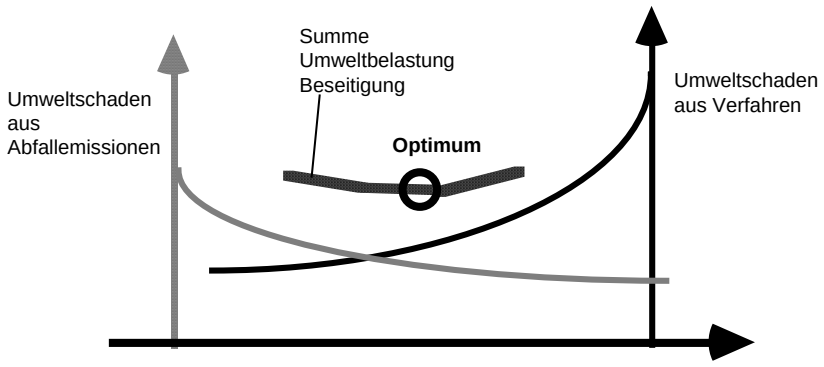


Abb. 30 *Schematische Darstellung zum Trade-off zwischen Eindämmung der Umweltschäden aus den spezifischen Emissionen aus dem Abfall selbst vs. erhöhten Umweltschäden aus aufwendigeren Abfall-Behandlungsverfahren welche diese Eindämmung ermöglichen.*

Anhang A Literaturangaben zu Baumaterialien und Entsorgung

A.1. Beton, Mauersteine und andere Massivbaustoffe

A.1.1. Zementprodukte

Beschreibung

Massivbaustoffe sind die gewichtsmässig wichtigsten Baustoffe. Zementgebundene Asbest-Produkte werden heute nicht mehr verbaut. Entsprechende Altstoffe gelten als Sondermüll. Die heutigen Ersatzprodukte enthalten Kunststoff- und Zellulosefasern.

Rückbauabfälle

Die Zugabe von Porenbetonbruch mit geringen Resten mineralischer Putze und Mörtel sowie für Porenbetonbauteile üblicher Beschichtungen ist derzeit ohne Qualitätsverlust bis zu 10 G% der Trockenrezeptur möglich. Der zerkleinerte Porenbetonbruch findet jedoch überwiegend Anwendung als Wärmedämmschüttung oder Substrat für Gründächer [Müller 1998, p.4].

Recyclingbrechsande erscheinen prinzipiell zur Herstellung von Normalmörtel geeignet. Die Materialien, die eher den Charakter von Leichtzuschlagsstoffen haben, wie Leichtmauerziegelsand und Porenbetonbrechsand werden dabei aber ungünstiger bewertet als dichtere Materialien aus Normalbeton, Kalksandstein oder Mauermörtel [Müller 1997, p.4].

Zusammensetzung

Farbige kleinformatige Faserzementplatten sind mit Dispersionsfarben bestrichen. Grossformatige Faserzementplatten werden mit Eisenoxidpigmenten eingefärbt [ESU 1995, p.3.1].

A.1.2. Leichtbeton/Leichtbausteine

Leichtbeton darf nur in geringen Mengen in die Bauschuttaufbereitung gelangen. Leichtbausteine dürfen nicht in die Bauschuttaufbereitung gegeben werden. Sie können als Inertstoffe deponiert werden.

A.1.3. Tonprodukte

Wiederverwendung

Backsteinhäuser in Dänemark konnten bereits vollständig rückgebaut und die Steine wiederverwendet werden. Dies wird insbesondere durch den früher verwendeten Kalkmörtel erleichtert [Rentz et al. 1997, p.134] Keramikteile wie Waschbecken, WC-Schüsseln lassen sich nach Ersatz von meist abgenutzten Armaturen qualitativ und ökonomisch gut wiederverwenden [Rentz et al. 1997, p.134].

Verwertung

Das stoffliche Recycling von Mauerziegeln bei der Herstellung **neuer Ziegel** ist nur in relativ geringen Mengen möglich. Sortenreines Material (ohne anhaftende Mörtelreste) kann in einer Grössenordnung von 10 bis 20 M.-% in Form von gemahlenem Ziegelsplitt als Magerungsmittel

bzw. Füllstoff dem Rohstoffgemisch zugegeben werden. Zu hohe Anteile können Festigkeitsverluste zur Folge haben. Das Hauptverwertungsgebiet für ziegelreichen Bauschutt liegt derzeit im **Strassen- und Wegebau**. Eine Verwertungsmöglichkeit, ziegelreichen Bauschutt wieder in den Stoffkreislauf Mauerwerk zurückzuführen, stellt die Herstellung von **Mauersteinen in Plansteinqualität** auf Basis von Ziegelsplitt dar. Die Herstellung dieser Steine erfolgte neben einem Anteil von 10 % Ton ausschliesslich unter Einsatz von Ziegelsplitt, Braunkohlenflugasche und Wasser. [Müller 1998, p.4].

A.1.4. Gipsprodukte

Verwertung

Gips gilt in den heutigen Aufbereitungsverfahren für mineralische Baustoffe zu Recycling-Beton, Recycling-Kies etc. als Störstoff und kann daher nicht durch diese Kanäle verwertet werden. Für eine Verwertung ist eine Separatsammlung erforderlich.

Ein echtes Vollrecycling von Gipsplatten ist zur Zeit nur werksintern mit Abfällen aus der Gipsplatten-Herstellung selbst möglich. Gipsabfälle von der Baustelle sind meist zu verschmutzt für eine Rückführung in die Gipsplattenproduktion [Gewiese 1998, p.87].

Für den asiatischen Markt exisitieren 1-Mann-Aufbereitungsanlagen für gebrauchte Gipskartonplatten. Bei einer Kapazität von 10t/h beträgt die benötigte Prozessenergie gemäss Herstellerangaben je nach gewünschter Rezyklatqualität zwischen 26 und 34 kW_{el}/t. Die entstehenden Produkte "Feingips", "Grobgips" und "Papier" werden als "verkaufbar" bezeichnet. Eine genauere Qualitätsangabe der Rezyklate bzw. deren mögliche Verwendung fehlt [Andela 1999].

In Deutschland existieren stoffliche Verwertungen von Gips. Die Firma Rethmann in Lünen erzeugt aus Gipsabfällen thermischen Anhydrit (wasserfreies Calciumsulfat), welcher in der Zementherstellung eingesetzt wird. Die Wolfener Schwefelsäure und Zement GmbH in Wolfen-Bitterfeld betreiben eine Anlage in welcher frische Schwefelsäure und Zement aus gebrauchter Schwefelsäure, Gips, Flugaschen und Filterstäuben sowie Koks hergestellt wird. Die verarbeiteten Gipsabfälle müssen möglichst fremdstofffrei sein [Gewiese 1998, p.87].

Beseitigung

Als Beseitigung von Gipsprodukten kommt aufgrund der hohen Löslichkeit nur eine Deponierung in der Reaktordeponie in Frage. Ein Abbrennen der Kartonhülle von Gipskartonplatten in einer KVA wäre denkbar, wird aber wohl aufgrund des hohen Schlackeanfalls und der hohen Schwefelfracht nicht erlaubt.

Gips als Bodenbehandlungsmittel

In den USA kann Altgips als Bodenbehandlungsmittel ausgebracht werden. Händler von Rezyklatgips für Bodenanwendungen zählen unter anderem folgende Vorteile ihrer Produkte auf [z.B. Gyp-Pack 1999]:

1. Calziumgabe ohne pH-Erhöhung
2. Schwefelquelle in gut verfügbarer Form
3. Erhöht die Abgabe von Bodenreserven an Phosphor und Kalium
4. Verbessert die Bodenstruktur
5. Reduziert das Auftreten von Pilzbefall
6. 150% löslicher als Kalk
7. unbrennbar
8. Fördert das schnelle Sprießen der Vegetation (sic!)

Die Zweckmässigkeit dieser Verwertung scheint dem Autor zweifelhaft, konnte aber nicht weiter überprüft werden.

In Deutschland werden separat gesammelte Gipsabfälle für Rekultivierungsmassnahmen im Bergbau eingesetzt [Gewiese 1998, p. 87].

A.1.5. Kalksand- und Natursteine

Echtes Recycling von völlig sortenreinem Kalksandstein-Bruchmaterial (z.B. Verschnitt) als Zugabe zur Rohmischung bei der Kalksandstein-Produktion ist ohne grössere Beeinträchtigung der Qualität der KS-Steine möglich. Selbst Kalksandstein-Bruchmaterial mit etwa 11 G-% anhaftenden Mörtelresten kann ohne Qualitätseinbussen eingesetzt werden. Anhaftende Fremdstoffe wie z.B. Resten von EPS-, Mineralwolle-Wärmedämmung oder Bitumen-Dichtungsbahnen führen aber zu erheblichen Qualitätseinbussen (z.B. Steindruckfestigkeit). Eine Einstoffmulde "Kalksandstein" könnte in Zukunft bei entsprechend aufmerksamem Ausbau gut verwertbaren Alt-Kalksandsein erbringen [Müller 1998, p.4].

Natursandsteine können bei fachgerechter Demontage für eine Wiederverwendung geeignet sein [Rentz et al. 1997, p.134].

A.2. Mörtel, mineralisch gebundene Putze und Kunststoffputze

A.2.1. Zusammensetzung

Auch mineralische Mörtel enthalten meist organisch-synthetische Zusätze [Rentz et al. 1997, p.42].

A.2.2. Rückbauabfälle

Bei der Aufbereitung von Altbeton zu einem Recyclingzuschlag für Strassenbeton gelangt der Alt-Mörtel (Zement und Sand) bevorzugt in die feine Kornfraktion 0–8mm [DAFST 1996, p.148]. Der Gehalt an Mörtel im Altbeton beträgt 42%; Die Feinfraktion besteht zu 98% aus Mörtel; 68% der Gesamtmenge an Mörtel aus dem Altbeton gelangt in die Feinfraktion.

Kornfraktion aus der Aufbereitung von Altbeton	Anfall aus gebrochenem Beton (Strassenbeton)	Mörtelanteil in der Korngruppe	Anreicherungs-faktor	"Transfer-koeffizient" für Mörtel
0/8 (Feinfraktion)	30%	98%	2.3	68%
8/16	32%	18%	0.4	14%
16/32	38%	16%	0.4	14%
Summe, Durchschnitt	100% Altbeton	42% Mörtel im Altbeton	1	100% Mörtel Gesamtmenge

Tab. A.1 Schicksal von Mörtel bei der Altbetonaufbereitung.
30% des Altbetons gelangt bei der Aufbereitung in die Feinfraktion. Die Feinfraktion besteht zu 98% aus Mörtel. Das sind 2.3mal mehr als der Mörtelgehalt des aufbereiteten Altbetons (42%). 68% der Gesamtmenge an Mörtel gelangt während der Aufbereitung in die Feinfraktion.

Mauermörtel hat in üblichen Mauerwerkkonstruktionen nur einen Anteil von ca. 3 G-%. Bei der Planung der Verwertung von Mauerwerkkonstruktionen wird daher Mörtel als Beistoff verstanden und die Verwertung wird für die gewichtsmässig dominanteren Mauersteine optimiert.

Innenputze gelangen in der Sortieranlage hauptsächlich in die Feinfraktion [Staub 1999].

A.2.3. Gips/Anhydrit-Mörtel

Rückbauabfälle

Gipsputze, -Estriche etc. sind meist nur schwer von der restlichen Konstruktion zu trennen. Gips gilt bei der Herstellung von mineralischen Recyclingbaustoffen als wesentlicher Störstoff. Gipskontamination führt bei Beton zum unerwünschten Sulfattreiben. Für eine sinnvolle Verwertung darf Gips nicht zu mehr als 1% vorhanden sein. Konstruktionen, welche in den mineralischen Bestandteilen einen Gipsanteil von mehr als 1 G-% aufweisen, sollten daher möglichst gut trennbar ausgestaltet werden.

In jüngster Zeit kommen z. B. zunehmend (Fliess-)estriche auf Calciumsulfatbasis zum Einsatz. Diese werden zwar vorwiegend in der Ausführungsvariante "Estrich auf Dämmschicht" (schwimmender Estrich) eingesetzt, ihre Anwendung ist aber grundsätzlich auch als Verbundestrich möglich. Während beim schwimmenden Estrich im Rahmen eines selektiven Rückbaus eine relativ einfache Entfernung des Estrichs möglich ist, sind im Falle des Verbundestrichs der Estrich und die Betondecke bzw. -boden nur mit grossem Aufwand zu trennen und müssten somit bei stofflicher Aufbereitung gemeinsam zerkleinert werden, wobei insbesondere aufgrund der sehr ähnlichen Rohdichten (Estrich 2100kg/m^3, Beton 2300kg/m^3) eine Dichtetrennung problematisch erscheint. [Müller 1998, p.3]

Werden Gipsabfälle nicht separiert, gelangen sie in die Bauschuttfraktion. Aufgrund der geringen Härte gelangen Gipsabfälle bei der Zerkleinerung in Bauschuttaufbereitungsanlagen vornehmlich in die Feinfraktion (0/8mm). Aufgrund des hohen Sulfatgehaltes kann diese nicht mehr verwertet sondern muss deponiert werden [Gewiese 1998, p.86].

Beseitigung

Gipsputze sind nach Möglichkeit vor dem Abbruch abzuschlagen und in die Mulde Reaktordeponie zu entsorgen.

A.2.4. Kunststoffhaltige Putze/Mörtel

Klebemörtel enthalten Epoxid- oder ungesättigte Polyesterharze sowie Quarz als Zuschlagstoff. [Rentz et al. 1997, p.42]

Putze haben in Wandkonstruktionen gewichtsmässig nur einen geringen Anteil. Putze werden daher bei der Planung der Verwertung von Wandkonstruktionen ähnlich wie Mauermörtel als Beistoff bzw. als Begleitstoff verstanden. Die Verwertung wird für die gewichtsmässig dominanteren Wandbaustoffe optimiert. Putze gelangen in einer Sortieranlage aufgrund ihrer Eigenschaften bevorzugt in die Feinfraktion. Ein echtes Recycling oder auch eine Verwertung scheint bei diesen Baustoffen schwierig.

A.3. Glas

Angaben zu Rahmenmaterielien von Fenstern siehe unter den Entsprechenden Materialien wie Holz, Metall oder Kunststoff.

A.3.1. Zusammensetzung

Schallschutzisolierglas enthält im Scheibenzwischenraum Argon. Auf Krypton wird wegen seiner natürlichen Radioaktivität (248Bq/g) oft verzichtet [von Arx 1995, p.39].

Etwa 30% der in der Schweiz verarbeiteten Floatglasmenge wird mit Metallen beschichtet. Wärmeschutzgläser erhalten mehrere Silberschichten, die bis 100nm dick sein können. Bei einer Scheibendicke von 2mm sind das 0.21 g Silber pro kg Glas (Dichte Silber = 10'500 kg/m3; Dichte Glas = 2500 kg/m3) [von Arx 1995, p.39].

Sonnenschutzgläser machen ca. 2-3% der verarbeiteten Floatglasmenge aus. Sie werden durch Metallbeschichtung oder Metallzugabe von Gold, Kupfer sowie Zinn- oder Indiumoxid erzeugt. Sie können auch durch Aufbringen z.B. einer Polyesterträgerfolie mit Aluminium-Überzug erzeugt werden [von Arx 1995, p.39].

Float-Glas hat vom Zinnbad (Float) einen Gehalt von ca. 10.8 ppm Zinn [ESU 1996a, p.A.58].

Verwertung

Einfache unbeschichtete Silikatgläser können bei sortenreiner Erfassung als Zuschlagsstoff in der Produktion von Dämmstoff oder Behälterglas eingesetzt werden. Spezialgläser (Isolierglas, Absorptionsglas) können zur Zeit nicht verwertet werden und müssen als Inertstoffe deponiert werden [Gewiese 1998, p.91].

A.4. Metallbaustoffe

Zusammensetzung

Blei wird im Hochbau meist als Hartblei (Blei-Antimon-Legierung) eingesetzt [Rentz et al. 1997, p.32]. Messing kann neben Zink und Kupfer auch Fe, Al, Ni, und Pb enthalten [Rentz et al. 1997, p.32]. Verzinkungen (z.B. in Dachdeckungen) enthalten neben Nickel auch 0.1-0.2% Titan und 0.2 - 1% Kupfer [Rentz et al. 1997, p.32].

Verwertung

Metallbaustoffe werden heute meist gut verwertet, da Schrott ein wertvolles und günstiges Rohmaterial in der Metallproduktion darstellt.

A.5. Holzwerkstoffe

Holzpanele und Spanplatten für Wand und Decke können mit wässrigen Dispersionsklebstoffen aber auch mit lösemittelhaltigen Kontaktklebstoffen verklebt sein [Rentz et al. 1997, p.42].

Holzklebstoffe können Dispersionen auf Polyvinylacetat- oder Acrylsäureestercopolymer-Basis sowie Leime sein. Resorcinharzleime werden mit Paraformaldehyd verarbeitet. Polyurethanleime sind dagegen formaldehydfrei [Rentz et al. 1997, p.43].

Mit Holzschutzmitteln behandelte Hölzer stammen vor allem aus Aussenanwendungen (Schwellen, Masten, Zäune, Pfähle). Holzverpackungen sind weitgehend Fremdstoff- und Holzschutzmittelfrei [Gewiese 1998, p.102].

Saubere, unbehandelte Holzabfälle, die zur Verwertung geeignet sind, sind z.B. Holzverpackungen, Paletten, Kabeltrommeln, Massivholzreste, Bauhilfshölzer, ungestrichener Innenausbau [Gewiese 1998, p.105].

Verwertung

Unbehandeltes Altholz wird vorwiegend in der Faser- und Spanplattenindustrie verwertet. In der Ziegelindustrie werden Späne beim Brennen der Ziegel als Porosierungsmittel eingesetzt. Gehäckselte Reststücke werden als Füll- und Isolierstoffe verwendet. Die chemische Verwertung zu Zellstoff (Papierherstellung) oder Kompostierung werden nur wenig genutzt [Gewiese 1998, p.105].

Altholz wurde in der jüngeren Vergangenheit vor allem nach Italien zur Spanplattenproduktion exportiert [Staub 1999]. Italienische Spanplattenfabriken kauften jährlich etwa 100'000 Tonnen Altholz auf – rund die Hälfte des gesamten Schweizer Altholzes [Knechtli 1997, Frey 1998]. Teilweise wurden dabei auch ungeeignete, d.h. stark belastete Althölzer zur Verwertung exportiert. Ab 1. Januar 1999 unterliegen deshalb Altholz-Ausfuhren aus der Schweiz einer abfallrechtlichen Kontrolle. Die Exporteure müssen die Altholz-Ausfuhren sowohl beim BUWAL als auch beim Empfängerland anmelden [Frey 1998]. **Unbehandeltes Holz mit grüner Klassierung:** In der Regel handelt es sich um unbehandeltes Restholz oder Frischholz in Form von Chips, die beim Shreddern mit Messern geschnitten und nicht gebrochen werden, oder um ganze Baumstämme. Diese Holzqualität muss für den Export nicht beim BUWAL angemeldet werden. Der grenzüberschreitende Verkehr erfolgt ohne abfallrechtliche Formalitäten, das heisst ohne Abfall-Begleitscheine. Es gelten die üblichen Vorschriften für Exporte von Rohstoffen respektive Handelsgütern.

Altholz mit gelber Klassierung: Diese Kategorie umfasst stückiges oder geshreddertes Altholz. Dazu zählen etwa Holzbauteile und Holzmaterialien aus Gebäudeabbrüchen und Umbauten, Holzmöbel sowie hölzerne Verpackungen. Die Verunreinigungen sind meistens sichtbar. Solches Holz muss beim BUWAL angemeldet werden. Der Export darf nur mit Begleitschein erfolgen.

Problematisches Holz mit roter Klassierung: Hier handelt es sich um speziell behandeltes Holz - beispielsweise mit Druckimprägnierung (etwa Pentachlorphenol oder Teeröl). Dazu zählen Fraktionen wie Eisenbahnschwellen, Telefonmasten, Wasser- und Silobauten, Zäune etc. Rot klassiertes Holz eignet sich in der Regel nicht für die Verwertung zur Spanplattenherstellung. Stark kontaminierte Fraktionen gelten zudem als Sonderabfall und unterliegen deshalb den Exportvorschriften der Verordnung über den Verkehr mit Sonderabfällen (VVS).

Die stichprobenweise vorgesehenen Kontrollen am Grenzübergang lassen sich relativ einfach und ohne analytischen Aufwand durchführen. Für die Unterscheidung zwischen grüner und gelber Klassierung und die entsprechende Zuteilung genügt ein gezielt herausgenommenes Holzstück, das gestrichen, beschichtet oder sonst mit Holzschutzmitteln behandelt ist.

Nicht zur Verwertung geeignete Holzfraktionen wie z.B. Eisenbahnschwellen, Telefonmasten, Wasser- und Silobauten, Zäune müssen in Abhängigkeit ihrer Qualität in Altholz- oder Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt werden.

Der Energieverbrauch zur Erzeugung einer Tonne Späne aus Altholz betrug in einer 1980 in Berlin in Betrieb genommenen Altholz-Verwertungs-Anlage etwa 75 kWh_{el} (270 MJ) [Stahel et al. 1987, p.72]. Die Altholzzerspanung in 10cm grosse Stücke zur Nutzung als Brennstoff beträgt dagegen nur 18.8 kWh_{el} (68MJ) pro Tonne [EBP 1995, p.15].

Wiederverwendung

Alte Fenster und Türen müssen heute vor einer Wiederverwendung oft nachisoliert und gedichtet werden damit sie anstelle von Neuteilen eingesetzt werden können [Rentz et al 1997, p.133].

Historische Bauteile wie Dachbalken, Vertäfelungen oder Holzgeländer können ggf. wiederverwendet werden.

Beseitigung

Mit Holzschutzmitteln oder Anstrichen behandelte Hölzer können schlecht stofflich verwertet werden und werden verbrannt. Unter der Bezeichnung "Holz behandelt in KVA" ist in [ESU 1996a, p.F.11] die Entsorgung von Holzmasten zur Stromverteilung bilanziert. Die Masten werden als zu gleichen Anteilen mit CKB (Chrom-Kupfer-Bor-Salz) bzw. CFK (Chrom-Fluor-Kupfer-Salz) imprägniert angenommen. Wesentliche Anteile der Holzschutzmittel (>60%) werden jedoch während der Standdauer von 30 Jahren ausgewaschen.

Für Deutschland wird geschätzt, dass 90% der gesamten Holzabfälle (alle Branchen) beschichtet, gestrichen, verleimt oder mit Holzschutzmitteln behandelt sind und daher nur für eine energtische Verwertung (Verbrennung) geeignet sind [Gewiese 1998, p.107].

A.5.1. Kunststoffgebundene Holzwerkstoffe

Spanplatten

Spanplatten enthalten ca. 5 – 10% Bindemittel, va. Harnstoff-Formaldehyd-Harze (1 : 1.4 bis 1.6), Melaminharze oder – für Aussenspanplatten – Phenolharze. In der Europäischen Spanplattenproduktion werden die Platten gegen Schimmel und Pilze geschützt [Rentz et al. 1997, p.36]

A.5.2. mineralisch gebundene Holzwerkstoffe

Holzplatten

Holzwolleplatten bestehen aus Holzwolle und mineralischem Bindemittel (Zement, Gips). Sie können aber auch kunststoffgebunden sein [Rentz et al. 1997, p.36].

Holzfaserplatten bestehen aus Holzfasern oder zellulosehaltigem Material mit Binde- und Hydrophobierungsmitteln. Sie werden z.B. für Schall- und Wärmeschutz eingesetzt [Rentz et al. 1997, p.36].

A.6. Klebstoffe

siehe auch unter Anstrichstoffe

Klebemörtel im Rohbau enthalten Epoxid- oder ungesättigte Polyesterharze sowie Quarz als Zuschlagstoff [Rentz et al. 1997, p.42].

Kleber für **Papier und Textil** bestehen aus Quellstärke, Stärkeäthern, Carboxymethyl oder Methylcellulose [Rentz et al. 1997, p.42].

Kunststoff- oder Metallfolien von Isolationen können mit Acrylat- oder PVC-Copolymer-Dispersionen geklebt sein [Rentz et al. 1997, p.42].

EPS- und PUR-Isolationen können mit lösemittelfreien Dispersionsklebstoffen auf der Basis von Polyvinylacetat, Acrylat- oder Styrol-Butadien-Kautschuk geklebt sein [Rentz et al. 1997, p.42].

Holzpanele und **Spanplatten** für Wand und Decke können mit wässrigen Dispersionsklebstoffen aber auch mit lösemittelhaltigen Kontaktklebstoffen verklebt sein [Rentz et al. 1997, p.42].

Linoleum und **PVC-Verbundbeläge** können mit Natur- oder Kunstharzlösungen oder -dispersionen (z.B. Polyvinylacetat) aber auch mit Gipsprodukten verklebt werden [Rentz et al. 1997, p.42].

Parkettklebstoffe bestehen heute überwiegend aus Natur- oder Kunstharzlösungen oder -dispersionen (lösemittelhaltig oder wässrig) [Rentz et al. 1997, p.42].

PVC-Beläge können mit Kontaktklebstoffen (auf Polychloropren-Basis) als auch mit Dispersionsklebstoffen (Polyacrylatsäureester-Basis) verklebt werden [Rentz et al. 1997, p.42].

Teppiche können mit Natur- oder Kunstharzlösungen oder -dispersionen, Reaktionsklebstoffen (Epoxidharz oder Polyurethan) oder dispergierten Kautschukklebstoffen (Naturlatex) verklebt werden [Rentz et al. 1997, p.42].

Holzklebstoffe können Dispersionen auf Polyvinylacetat- oder Acrylsäureestercopolymer-Basis sowie Leime sein. Resorcinharzleime werden mit Paraformaldehyd verarbeitet. Polyurethanleime sind dagegen formaldehydfrei [Rentz et al. 1997, p.43].

Metalle können mit Resorcinharzleimen verklebt sein (benötigt Paraformaldehyd) [Rentz et al. 1997, p.43].

A.7. Fugendichtungen und Kitte

Zusammensetzung

Moderne elastomere Dichtungsmassen können aus Polysulfid-, Polysiloxan-, Polyurethan- oder Butlykautschuk/Polybutylen-Basis bestehen. Die eingesetzten Weichmacher sind Chlorparaffin Benzylbutylphtalat, Dipropenglykoldibenzoat, Silikonöle, Alkylsulfonsäureseter von Phenol und Kresol, Bentylbutylphtalat, Trioctylphosphat, Phtalate und Polyester. Füllstoffe sind Russ, pyrogenene Kieselsäure, Calciumkarbonate, Aluminimsilikate, Titanoxid, Zinksulfid sowie Antioxidantien, Lichtschutzmittel, Lösungsmittel und Fungizide [Rentz et al. 1997, p.45].

Leinölkitt besteht zu 85-88% aus gemahlener Naturkreide und 12-15% trocknenden Ölen (z.B. Leinöl) [Rentz et al. 1997, p.45].

Verwendung

Dichtungsmassen werden bei folgenden Konstruktionen eingesetzt [Rentz et al. 1997, p.43f.]:

- Fenster- und Fassadenabdichtung
- Fugen zwischen Fertigteilen
- Dehnungsfugen zwischen Gebäudeabschnitten und in Fussböden
- Anschlussfugen zwischen Boden und Wand sowie zwischen Treppen und Wand
- Fugen um Türzargen
- Im Sanitärbereich zum Abdichten von Anschlussfugen (Badewannen, Waschbecken)
- Abdichtungen gegen keramische Materialien (Böden, Wände)

Weichelastischer PUR-Kunststoff wird für Giessharze, Streich- und Spachtelmassen verwendet [Rentz et al. 1997, p.38].

Weich-PVC wird als Fugenband verwendet [Rentz et al. 1997, p.38].

Bitumenspachtelmassen werden als Abdichtungen gegen nicht drückendes Wasser verwendet [Rentz et al. 1997, p.45].

A.8. Dichtungsbahnen und Schutzfolien

Beschreibung

Bitumenbahnen bestehen aus einer Trägereinlage (Jutegewebe, Glas- oder Polyesterfaservlies), und Bitumen oder Polymerbitumen. Sie sind üblicherweise auf beiden Seiten mit mineralischen Stoffen besteut. Sie werden zur Abdichtung von Flachdächern und Terrassen eingesetzt [Rentz et al. 1'997, p.44].

Teerpappe wird seit über 10 Jahren nicht mehr eingesetzt. Teer ist im Gegensatz zu Bitumen stark Phenol- und PAH-haltig (mehrere 10'000 mg PAH/kg gegenüber 24 mg/kg bei Bitumen) [Rentz et al. 1997, p.45f.].

Bitumen-Anstrichmittel kann als Sperrschicht gegen Bodenfeuchtigkeit verwendet werden. Bitumen-Lösungen können auf trockenen, Bitumen-Emulsionen auf feuchten Untergrund aufgetragen werden [Rentz et al. 1997, p.45].

Zusammensetzung

PVC-Dichtungsbahnen für Flachdächer enthalten ca. 35% Weichmacher (Phtalate) und ca. 2% Bleistabilisatoren (Bleicarbonat oder basisches Bleisulfat) [von Arx 1995, p.111/113]. Glasfaserarmierte PE-Dichtungsbahnen können in der KVA entsorgt werden (Recycling ist geplant). Der PE-Gehalt beträgt 85%, der Füllstoffgehalt (Kalk) 13.5%, Anteil Glasflies 1.2%. Rund 1% machen Stabilisatoren (Pb-, Zinn/Schwefel-, Kupfer-Halogen, oder Zink/Calcium-Verbindungen) aus [ESU 1995, p.12.3].

Glasfaserarmierte PVC-Dichtungsbahnen enthalten etwa 10% Stabilisatoren (Bleiphosphit oder oder Barium-Zink-Verbindungen), 33.4% Weichmacher, 1.7% Glasvlies, 11% Füllstoff (Kalk) [ESU 1995, p.13.3].

Der Gehalt an Flammschutzmitteln wie Hexabromcyclododecan (74.7% Br-Gehalt) oder Hexabromdiphenylether (73.1 % Br-Gehalt) in entsprechenden PE-Dampfbremsen beträgt 9% bzw. 90g/kg. Der Bromgehalt beträgt somit rund 67g/kg.

Verwertung

In Deutschland existiert für sortenrein ausgebaute PVC-Dach- und -Dichtungsbahnen ein Sammelsystem, welches die Altbahnen einer Aufbereitungsanlage in Troisdorf zuführt. Die Anlage mit einer Kapazität von 4'000 t/a erzeugt PVC-Rezyklat, welches in der Bahnenproduktion eingesetzt werden kann [Gewiese 1998, p.92].

Zur Zeit werden in der Schweiz nur etwa 3% der alten PE- und PVC-Dichtungsbahnen via Deutschland rezykliert [Schneeberger 1999, p.28/33].

A.9. Wärmedämmstoffe

A.9.1. Steinwolle

Kunststoff- oder Metallfolien von Isolationen können mit Acrylat- oder PVC-Copolymer-Dispersionen geklebt sein [Rentz et al. 1997, p.42].

Verpackungsabfälle

Die für den Versand benutzten Einweg-Holzpaletten werden zu 15% mehrmals verwendet [Flumroc 1995, p.10]. Die PE-Folien werden über ein Sammelkonzept der Verwertung zugeführt.

Erstellungsabfälle

Die jährlich verbrauchte Menge Steinwolle in der Schweiz beträgt 40'000 Tonnen [von Arx 1995, p.40]. Der Hersteller nimmt pro Jahr 150 Tonnen Steinwolleabfälle (0.4% der Produktion) zur Recyclierung zurück [Flumroc 1995, p.10]. Diese Abfälle sind v.a. Verschnitte, aber auch Altprodukte.

A.9.2. Schaumglas

Entsorgung

Sauberes Schaumglas (Verschnitt) kann vollrecycliert, d.h. wieder in die Schaumglasproduktion zurückgeführt werden. Verklebtes Alt-Schaumglas (mit Bitumen- oder Kleberresten) kann in der Ziegelfertigung beigefügt werden oder als Schottermaterial dienen [ESU 1995, p.15.5]. Bei einer Deponierung muss Schaumglas wegen Kleberresten unter Umständen in der Reaktordeponie eingelagert werden.

A.9.3. Glaswolle

Verwertung

In Speyer, Deutschland, existiert seit 1996 eine Gross-Recyclinganlage für Glaswolle, welche bis zu 50t Altglaswolle pro Tag einschmilzt und zu Neu-Dämmstoffen verarbeitet [Gewiese 1998, p.86].

A.9.4. Kunststoff-Isolationen

Beschreibung

Hartgeschäumter PUR-Kunststoff wird als Dämmstoff verwendet [Rentz et al. 1997, p.38]. Hartschaum gibt es auch aus PVC [Rentz et al. 1997, p.38]

EPS- und PUR-Isolationen können mit lösemittelfreien Dispersionsklebstoffen aus Basis von Polyvinylacetat, Acrylat- oder Styrol-Butadien-Kautschuk geklebt sein [Rentz et al. 1997, p.42].

EPS enthält etwa 0.9% Flammschutzmittel (Hexabromcyclododecan, 74.7% Br-Gehalt), somit also rund 6.7 Gramm Brom pro Kilogramm [ESU 1995, p.14.2].

EPS enthält 6% Pentan als Treibmittel [Gewiese 1998, p.84].

Verwertung

Sauberes und sortenrein ausgebautes EPS kann zu Sekundär-Granulat rezykliert werden oder für Leichtbeton verwendet werden [Gewiese 1998, p.86].

In der Schweiz exisitert seit 1998 eine zentrale Sammellogistik. Erwartet wird eine Recyclingmenge von etwa 1000t/a [Schneeberger 1999, p.28/32]. Davon stammt aber ein Grossteil aus Verpackungs- und nicht aus Bauanwendungen. Gemäss Marktanteilen kann der Rücklauf aus der Bauindustrie auf 3% geschätzt werden.

A.10. Bodenbeläge

Linoleum und PVC-Verbundbeläge können mit Natur- oder Kunstharzlösungen oder -dispersionen (z.B. Polyvinylacetat) aber auch mit Gipsprodukten verklebt werden [Rentz et al. 1997, p.42].

Parkettklebstoffe bestehen heute überwiegend aus Natur- oder Kunstharzlösungen oder -dispersionen (Lösemittelhaltig oder wässrig) [Rentz et al. 1997, p.42].

PVC-Beläge können mit Kontaktklebstoffen (auf Polychloropren-Basis) als auch mit Dispersionsklebstoffen (Polyacrylatsäureester-Basis) verklebt werden [Rentz et al. 1997, p.42].

Teppiche können mit Natur- oder Kunstharzlösungen oder -dispersionen, Reaktionsklebstoffen (Epoxidharz oder Polyurethan) oder dispergierten Kautschukklebstoffen (Naturlatex) verklebt werden [Rentz et al. 1997, p.42].

Verwertung

In Deutschland existiert für alte PVC-Bodenbeläge ein Sammelsystem, welches die Altbahnen einer Aufbereitungsanlage in Troisdorf zuführt. Die Anlage mit einer Kapazität von 5000t/a zerkleinert und reinigt die Beläge. Das erzeugte PVC-Rezyklat wird in der Bahnenproduktion eingesetzt, wobei der Anteil der Rezyklats beim Neuprodukt 20-70% betragen kann [Gewiese 1998, p.92]. In der Schweiz ist gemäss SBV eine Verwertung z.Z. nicht vorgesehen.

A.11. Türen

Alte Fenster und Türen müssen heute vor einer Wiederverwendung oft nachisoliert und gedichtet werden damit sie anstelle von Neuteilen eingesetzt werden können [Rentz et al 1997, p.133].

A.12. Anstrichstoffe

Erstellungsabfälle

Etwa 90% der Malereibetriebe im Kanton Zürich erfüllen die Umweltauflagen der Vollzugsorganisation Umweltschutz Malergewerbe Kanton Zürich (VUM). Ein Blick auf die

Aufnahmebedingungen in diese Liste zeigt, dass es sich weitgehend um die Erfüllung bereits bestehender gesetzlicher Auflagen handelt.

- Die Abwasservorbehandlungs-Anlage entspricht den **einschlägigen Gewässerschutz-Vorschriften**, die Qualität des Abwassers entspricht den **gesetzlichen** Anforderungen.
- Wassergefährdende Flüssigkeiten (inkl. Abfälle) werden **vorschriftsgemäss** gelagert.
- Anfallende Sonderabfälle werden getrennt nach den Entsorgungskategorien gesammelt und **gesetzeskonform** entsorgt.
- Bei regelmässigen Farbspritzarbeiten in der Werkstatt sind 3-fach-Filter für den Farbstaub vorhanden, bei gelegentlichen Farbspritzarbeiten 2-fach-Filter. Somit werden die **Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung** für Farbnebel-Emissionen **eingehalten**.
- Lösemittel-haltige Behälter (Reinigungswannen, Lösemittelgebinde, Pinsel-/ Rolleraufbewahrung) werden **bei Nichtgebrauch verschlossen gelagert**.
- Spezielle Baustellenvereinbarung: Der Betrieb hat sich durch Unterschrift verpflichtet, auch an externen Orten sämtliche anfallenden Abwässer und Abfälle **umweltgerecht gemäss den kantonalen Richtlinien** zu behandeln, resp. zu entsorgen und die Belastung der Luft zu minimieren.

A.13. Massive Kunststoffbauteile

Sanitärarmaturen können aus PP bestehen [Rentz et al. 1997, p.37]. Druckwasser-, Trinkwasser-, Abwasserrohre, Gasleitungen aus PE (Lebensdauer 30 bis 50 Jahre) [Rentz et al. 1997, p.37].

Verwendung

In der Schweizer Bauindustrie im Jahre 1995 verwendete **Rohre** bestehen zum überwiegenden Teil aus PVC (70% resp. 25'000 t/a). Der Rest besteht aus Polyolefinen (Va. HD-PE, LD-PE und PP). **Fensterrahmen** bestehen zu 100% aus PVC (11'280 t/a). **Dämmstoffe** bestehen zum überwiegenden Teil aus Polystyrol (EPS und XPS, 56% resp. 10'900 t/a). Der Rest sind PUR-Anwendungen. **Wandbezüge** (Tapeten) bestehen zu 100% aus PVC (1372 t/a). Faserarmierte Bodenbeläge bestehen zu etwa gleichen Anteilen aus PP (51% resp. 3910 t/a) oder PA (42% rsp. 3'271 t/a). Weitere Produkte und deren Zusammensetzung folgen unten.

Einsatz, t/a	Rohre	Fenster	Dämm-stoffe	Tapeten	Boden-beläge fiber	Boden-beläge non-fiber	Dich-tungs-bahnen	Profile	Kabel	Baufolie n	Möbel	Summe
PVC	24'985	11'280		1'372		5'283	2'068	5'452	6'937			57'377
HDPE	6'411						2'933		4'230	6'000		19'574
LDPE	1'654											1'654
PP	2'275				3'910							6'185
ABS	244											244
EPS			8'272									8'272
XPS			2'632								2'933	5'565
PUR			8'723			902						9'625
PA					3'271						282	3'553
Acryl					132							132
PET					395							395
PMMA											1'316	1'316
PC											1'410	1'410
POM											75	75
UPES											1'598	1'598
Amino											376	376
Summe	35'569	11'280	19'627	1'372	7'708	6'185	5'001	5'452	11'167	6'000	7'990	117'351

Tab. A.2 Einsatz und Verwendungzweck von Kunststoff-Produkten in der Schweizerischen Bauindustrie 1995 [Schneeberger 1999, p.17 u. 33]

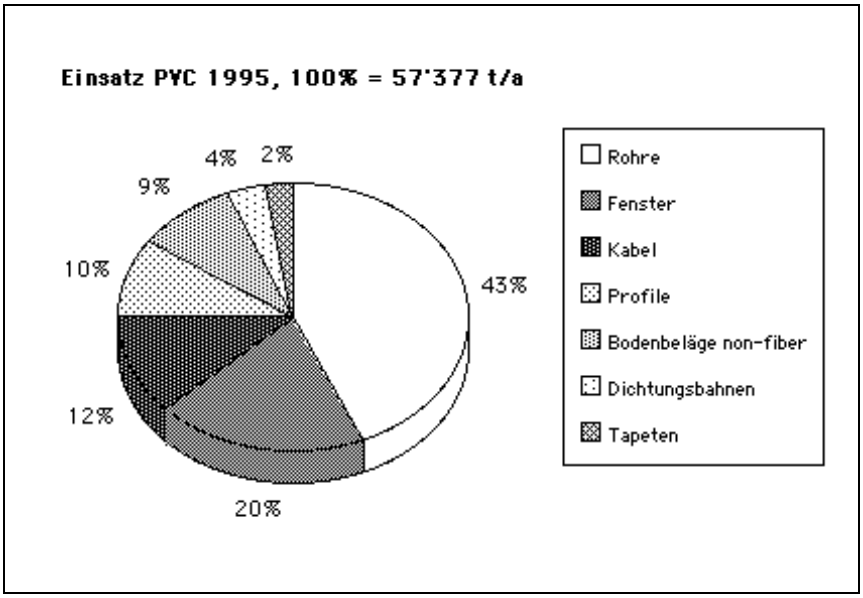


Abb. A.1 *Einsatz und Verwendungzweck von PVC-Produkten in der Schweizerischen Bauindustrie 1995 [Schneeberger 1999, p.17]*

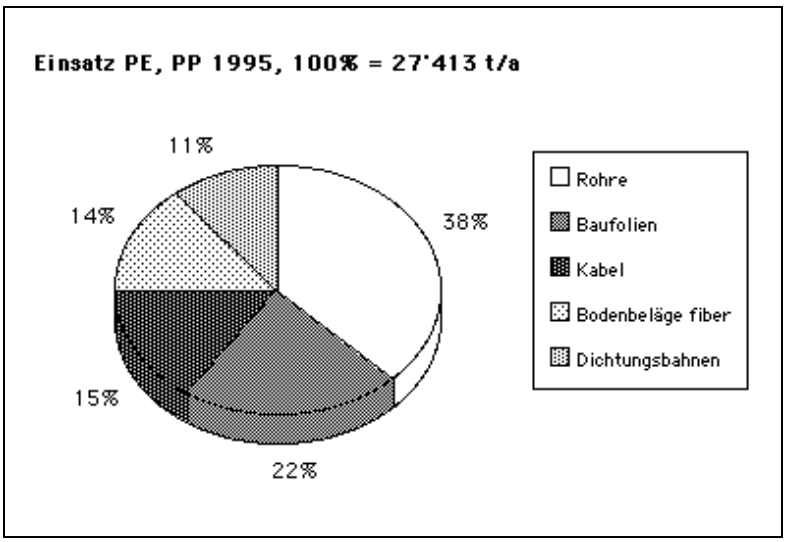


Abb. A.2 *Einsatz und Verwendungzweck von Polyolefin-Produkten in der Schweizerischen Bauindustrie 1995 [Schneeberger 1999, p.17 u. 33]*

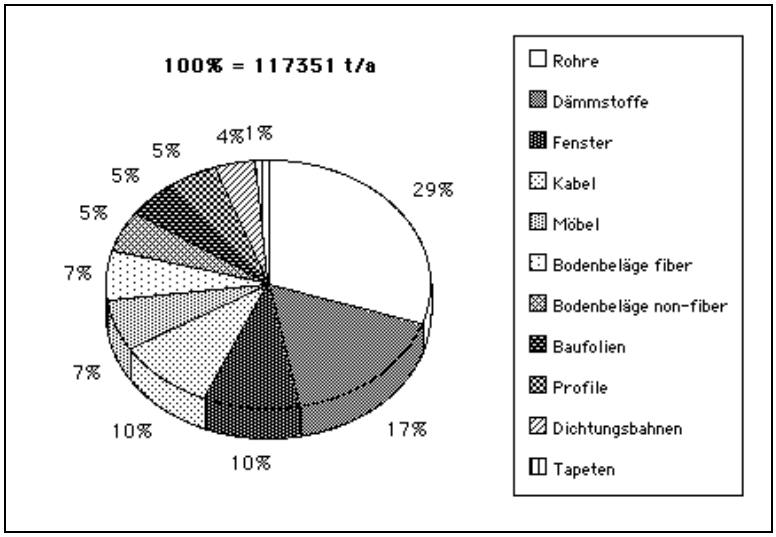


Abb. A.3 *Einsatz und Verwendungzweck von Kunststoff-Produkten in der Schweizerischen Bauindustrie 1995 [Schneeberger 1999, p.17 u. 33]*

Abfall, t/a	Rohre	Fenster	Dämm-stoffe	Tapeten	Boden-beläge fiber	Boden-beläge non-fiber	Dich-tungs-bahnen	Profile	Kabel	Möbel	Summe
PVC	1'728	113		1'530		6'062	538	2'096	2'068		14'135
PA					2'861						2'861
PE	425						1'133		963		2'521
PP	57				1'728						1'785
PUR			567			708					1'275
EPS			822							142	964
PET					482						482
PMMA										283	283
XPS			227								227
Acryl					170						170
Summe	2'210	113	1'616	1'530	5'241	6'770	1'671	2'096	3'031	425	24'703

Tab. A.3 *Kunststoff-Abfälle aus der Schweizerischen Bauindustrie 1995 [Schneeberger 1999, p.28]. Nicht enthalten sind 6000t/a PE-Baufolien.*

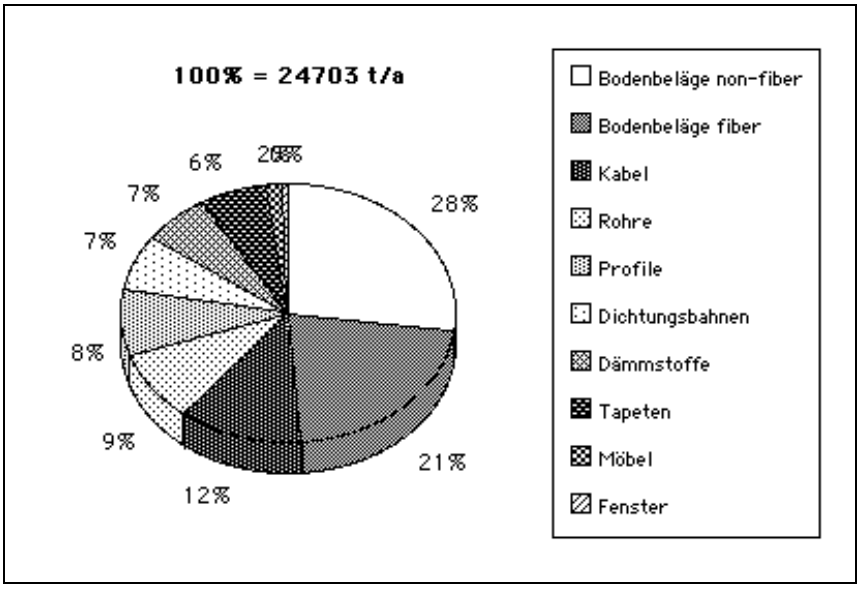


Abb. A.4 *Kunststoff-Abfälle aus der Schweizerischen Bauindustrie 1995 [Schneeberger 1999, p.28]. Nicht enthalten sind 6000t/a PE-Baufolien.*

Auffällig ist der hohe Anteil von ausgebauten Bodenbelägen, die offenbar nicht ersetzt werden.

Entsorgung

Entsorgung von Glasfaser-Kunststoff-Elementen

GFK-Baustoffe enthalten 50-75 G-% Glasfasern in einem Polyesterharz. Die Dichte beträgt 1500 – 2000 kg/m^3. GFK-Elemente werden als Tragelemente eingesetzt und können Stahl, Holz und Aluminium-Konstruktionen ersetzen. Die anfallende Abfallmenge GFK-Baustoffe ist in der Schweiz z.Z. sehr gering. GFK wird in KVAs entsorgt, wo der Polyester-Kunststoff verbrennt und die Glasfaser als Schlacke anfällt. Im Ausland wird GFK auch in Deponien entsorgt. In Deutschland ist der GFK-Anfall aufgrund der Verwendung in der Automobilindustrie grösser. Dort wird GFK-Abfall von der Firma ERCOM gesammelt, gemahlen und zu einem Glas/Harzgranulat verarbeitet. Das Granulat wird einem Pressverfahren zugemischt und zu qualitativ zweitrangigen GFK-Teilen downzykliert [Helfer 1999].

Verwertung

Rohre

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung der Rücklaufmengen gebrauchter PVC-Rohre hat die PVC-Industrie in mehreren Staaten ein Sammelnetz eingerichtet: Freiwillige Recyclinginitiativen arbeiten in Österreich, in Deutschland und in Schweden. Einzig in Holland ist das Recycling bereits gesetzlich geregelt. Aufgrund moderner Extrusionsverfahren können PVC-Rohre bis zu 60 Prozent aus Rezyklat bestehen. PVC-Recyclat wird in dreischichtigen Rohren als Kernschicht verwendet. Die Rohre werden in Grössen von 125 bis 500 Millimeter Durchmesser angeboten und vor allem für Abwasser- und Kabelkanäle eingesetzt [PVC 1998].

Verwertet werden v.a. Verschnittabfälle, weniger Altrohre [Schneeberger 1999, p.32].

Fensterrahmen

Kunststofffensterrahmen bestehen in Deutschland zu 90% aus PVC; daneben auch aus Polyurethan. PVC-Fensterrahmen können in der Fabrik Dekura in Rahden zu PVC-Granulat für die Fensterrahmen-Produktion aufbereitet werden. 1995 verwertete die Dekura aber vor allem PVC-Produktionsabfälle und – trotz flächendeckenden Sammelstationen – nur 7% alte Rahmen. Nicht sortenreines PVC kann zu minderwertigen Produkten verwertet werden. In einer anderen Fabrik (VEKA Behringen) konnten 1996 von 120'000 Stück Fensterrahmen nur 17% verwertet werden [Gewiese 1998, p.91]. Das erzeugte Regranulat kann zu 70% Neugranulat in der Fensterproduktion ersetzen [Schneeberger 1999, p.32].

A.14. Siedlungsabfallähnliche Abfälle

Verwertung

In der Schweiz wurden 1995 8 – 10% der eingesetzten PE-Baufolien rezykliert (500 – 600t/a) [Schneeberger 1999].

A.15. Tiefbauabfälle

Verwertung

Betriebe, welche alten Asphalt rezyklieren, können gemäss einer dänischen Studie Dioxin emittieren. Als (noch unbestätigter) Verdacht wird geäussert, dass Alt-Asphalt mehr Chlorid aus Streusalz enthalten könnte und dadurch zur Dioxinbildung beiträgt. Der geschätzte Emissionsfaktor beträgt 47 ng I-TEQ/kg Asphalt [Jensen 1997].

Entsorgung

Pro Jahr werden in der Schweiz rund 2'300 Tonnen verunreinigten Aushubs in Untertage-deponien exportiert [BUWAL 1997a].

A.16. weitere Abfälle

Elektronikgeräteschrott, der bei Abbrucharbeiten anfällt, sollte eigentlich bei der Bilanzierung der Elektronikgeräte berücksichtigt werden. Es ist diskutabel, den Elektronikschrott der Gebäudesubstanz anzurechnen. Es ist darauf zu achten, dass keine Doppelzählungen entstehen.

Die Verkabelung des Gebäudes – und damit die anfallende Kabelentsorgung – kann aber zur Gebäudebilanz gezählt werden.

Wiederverwendung

Sanitärobjekte wie Badewannen können nach Ersatz der Armaturen gut wiederverwendet werden. Heizungs- und Elektrogeräte lassen sich wegen Verschleisserscheinungen und veralteter Technik nur in Ausnahmefällen wiederverwenden [Rentz et al 1997, p.133].

A.16.1. Elektronikgeräte

Im Gebäudebereich gibt es eine Vielzahl von Elektronikgeräten mit unterschiedlicher und sehr komplexer Zusammensetzung. Es kann angenommen werden, dass grosse Metallteile wie

Gehäuse, Lüftungsrohre etc. aussortiert und ins Metallrecycling gelangen. Kunststoffe, Platinen und geshredderte Elektronik werden z.Z. noch verbrannt oder Untertage deponiert.

Zusammensetzung

In [Ibold 1993] wird die grobe Zusammensetzung von elektrotechnischen Anlagen angegeben:

Metalle	Glas	Kunststoffe	Sonstiges	Elektronik
70%	2%	23%	1%	4%

Tab. A.4 Zusammensetzung elektrotechnischer Anlagen [Ibold 1993, p.292]

Verwertung

Der Energieeinsatz für Elektronikschrottrecycling beträgt 20 bis 110 $kWh_{el.}/t$ [Behrendt et al. 1998, p.133]. Es wird ein Mittelwert von 65kWh/t ($2.34*10^{-7}$ $TJ_{el.}/kg$) bilanziert. Folgende Annahmen für die Entsorgung sind realistisch. "Metalle" (70%) gelangen ins Recycling. "Glas" (2%) ist meist beschichtet und wird deponiert (Reaktordeponie). "Kunststoffe" (23%) bestehen je zur Hälfte aus Polyolefinen und aus PVC und werden in einer KVA verbrannt. "Sonstiges" (1%) sind kleine Metallteile, Keramikteile etc. und werden wie Glas deponiert. "Elektronik" (4%) sind elektronische Bauteile, Leiterplatten, Batterien, Kabel etc. und werden möglichst verwertet. Es wird angenommen, dass die Elektronikteile zu 50% aus Kunststoff bestehen, zu 2% aus Glas (Glasfasern in Leiterplatten) und die restlichen 48% Metalle verwertet werden können. Diese Fraktionen können gleich entsorgt werden, wie die Komponenten oben.

A.16.2. Kabel

Zusammensetzung

Die heutigen Elektrokabel bestehen im Durchschnitt zu ca. 40G-% aus Kupfer, zu ca. 41G-% aus PVC und zu ca. 19G-% aus PE [Gewiese 1998, p.95, Schneeberger 1999, p.28].

Verwertung

Bei den heutigen Verwertungsverfahren von Kupferkabeln kann das Kupfer relativ rein wiedergewonnen werden. Der anfallende Kunststoff enthält jedoch zwischen 0.5% und 5% Kupfer. Dieser lässt sich nicht extrudieren, da bei der Extrusion durch die katalytische Wirkung des Kupfers ein hochgiftiges Dioxin-Phosgen[37]-Gemisch entsteht. Eine Pilotanlage, welche sowohl Kupfer als auch PVC aus geeigneten Kabeln mittels Aufquellen des Kunststoffes gewinnt, ist in Ludwigshafen geplant [Gewiese 1998, p.95].

Beseitigung

Kleinere Mengen ganzer Kabelreste gelangen vermutlich in die KVA. Grössere Mengen werden wegen des Kupfergehalts verwertet (s.o.).

Der bei der Kabelverwertung anfallende Kunststoffabfall wurde in der Vergangenheit vorwiegend deponiert. In der Schweiz fielen 1993 insgesamt 6000t/a davon an. [Monteil 1995, p.7]. Ab 2000 dürfen brennbare Abfälle nicht mehr deponiert werden. Geshredderte Kabelreste werden dann sehr wahrscheinlich in KVAs verbrannt werden.

37 Phosgen = Dichlorcarbonyl, Dichlorkohlenstoffmonoxid (Cl_2CO)

Als direkter Energieaufwand der Kabelverwertung wird der Wert von 65kWh/t ($2.34*10^{-7}$ $TJ_{el.}$/kg) aus der Elektronikschrottverwertung übernommen.

A.16.3. Waschgrubensedimente

Waschgrubensedimente fallen in Waschplätzen für LKWs an. Darin werden die Reifen der LKWs gewaschen, um Staubbildung auf Strassen ausserhalb der Baustelle zu vermeiden. In Waschgruben dürfen ausschliesslich Kaltwasserwäschen ohne Motorenreinigungsmittel ausgeführt werden. Ölfreie Waschgrubensedimente müssen in einer Reaktordeponie entsorgt werden. Öl- und fetthaltige Waschgrubensedimente gelten als Sonderabfälle und sind separat zu entsorgen.

Abschätzung des spezifischen Sedimentanfalls pro Tonnenkilometer:

- LKW 28t mit 12 Reifen, 100cm Durchmesser,
- Annahme: 25 Gramm Sediment pro Reifen und Wäsche. d.h. 300g Sediment pro Reifenwäsche.
- Annahme: 15 km Fahrt pro Reifenwäsche bei 7t Nettozuladung (Wert für LKW 28t).
- Auf 105 tkm kommt somit eine Reifenwäsche, in welcher 300g Sediment anfallen.

D.h pro Tonnenkilometer LKW-Fahrt entstehen 0.003kg Waschgrubensediment in Reaktordeponie. Es werden nur ölfreie Sedimente betrachtet.

Zusammensetzung

Die Zusammensetzung von ölfreien Waschgrubensedimenten wird aus Angaben über Niederschlagsstaub aus [Rentz et al. 1997, p.56] übernommen. Die nicht bekannten Sedimentanteile werden als inerte Materialien angenommen.

Schadstoff	mg/kg
As	0.01
Cd	0.016
Cr	0.05
Pb	0.42
Cu	0.47
Zn	2.9
inerter Rest	Differenz zu 100%

Tab. A.5 Bilanzierte Zusammensetzung von Waschgrubensedimenten.

Anhang B Ressourcenbewertung in Ökobilanzen

Bei der Ökobilanzierung entsteht oft der Wunsch, beanpruchte Ressourcen zu bewerten. Im Vordergrund stehen dabei oft nicht-erneuerbare, energetische Ressourcen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Uran); daneben auch nicht-energetische Ressourcen (Metall-Erze, Mineralien).

Das Konzept eines intrinsistischen Wertes der Welt-Ressourcen ist problematisch. Der Wert der Ressourcen bemisst sich daran, was die Menschheit mit ihnen anfangen kann, bzw. wieviel Aufwand sie gewillt ist zu treiben, um sie zu erhalten: Die Welt-Ressourcen müssen also innerhalb eines ökonomisch-technischen Rahmens bewertet werden, soll ihnen ein Wert zugesprochen werden. Siehe dazu auch [Frischknecht et al. 1998] über die Bewertung von energetischen Ressourcen..

B.1. Bedeutung von Ressourcen und Reserven

Es ist nötig zwischen Reserven und Ressourcen zu unterscheiden. **Reserven** werden üblicherweise definiert als bekannte Materiallager, aus welchen Wertstoffe profitabel extrahiert werden können. Dies unter den Randbedingungen der existierenden Technologie, der aktuellen ökonomischen und politischen Situation. Welt*reserven* gewisser Materialien können sich also wesentlich verändern, ohne dass sich dabei die effektiv bekannte Menge im Boden verändert.

Ressourcen dagegen sind bekannte, aber potentielle Quellen eines Wertstoffes, welche in Zukunft unter veränderten technischen, ökonomischen oder politischen Bedingungen gewonnen werden können. Ressourcen können z.B. bei steigenden Preisen zu Reserven werden. Umgekehrt können Reserven bei fallenden Preisen zu Ressourcen werden [Pitt 1999].

B.2. Probleme der Bewertung

Die Ressourcen der Welt nehmen nicht ab, da Material nicht zerstört wird [38]. Unter genügend hohem Aufwand wäre es theoretisch möglich, aus sehr schlechten Qualitäten oder sehr verdünnten Quellen verwertbare Materialien zu gewinnen. Der Begriff Ressourcen nimmt also keine Rücksicht auf die vorhandenen Lagerqualitäten. Eine Bewertung von Materialverbrauch aufgrund der Ressourcen führt also zu keiner sinnvollen Aussage.

Eine Bewertung von Materialverbrauch aufgrund der (heute nutzbaren) Reserven enthält eher eine sinnvolle Aussage. Sie berücksichtigt die aktuelle Knappheit der Materialien unter den *aktuellen* technisch-ökonomischen Bedingungen. Mögliche Kriterien, nach welchen die Bewertung von Reserven erfolgen können sind:

1.) ob das Material erneuerbar oder nicht-erneuerbar ist,

2.) die vorhandenen globalen Reserven und die Qualität

3.) Möglichkeit der Substitution durch andere Materialien

---

38 Bei gewissen Materialien gibt es jedoch natürliche Stoffeigenschaften, die nicht imitierbar sind, und sehr wohl zerstört werden können. z.B. natürlicher Marmor ist nicht dasselbe wie Calciumkarbonat, natürliches Kieselgur (Diatomeenerde) ist nicht dasselbe wie Siliziumdioxid – obwohl dies die chemischen Charakterisierungen dieser Stoffe sind. Die natürlichen Ressourcen dieser Materialien können daher durchaus zerstört werden.

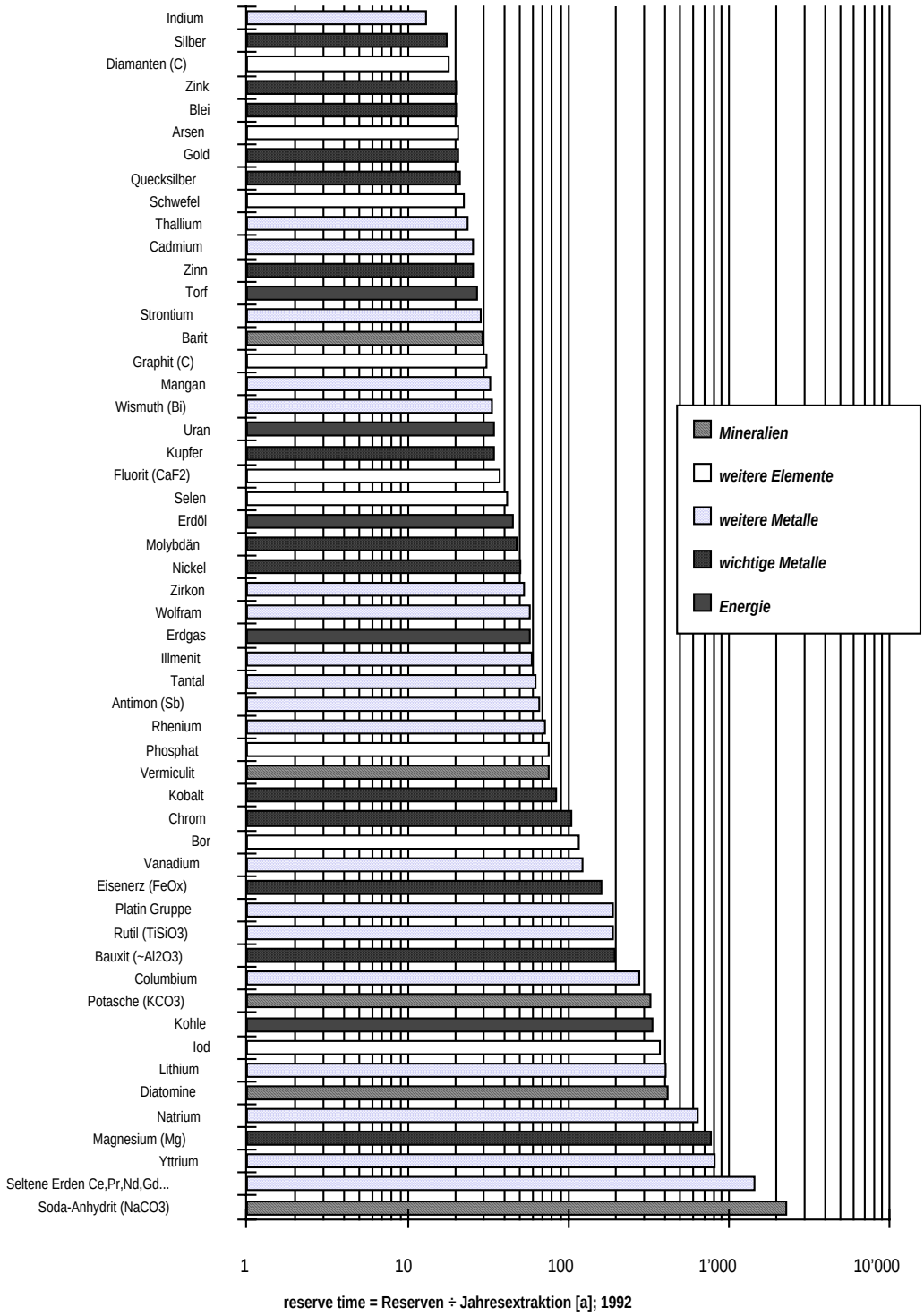


Abb. B.1 *bekannte Reserven pro jährliche Extraktion Illustration für die Knappheit von gewissen Ressourcen, 1992 nach [Kesler 1997].*

B.3. Sekundär-Reserven

Analog zur ökonomisch-technischen Unterscheidung Reserven vs. Ressourcen gibt es eine ganz analog gelagerte Unterscheidung zwischen (Sekundär-)Wertstoff und Abfall. In dem Masse wie sich technologische und ökonomische Randbedingungen ändern, verändern sich auch die Grenzen zwischen diesen Kategorien.

	heute ökonomisch-technisch nutzbare Materialien	alle nutzbaren Materialien inkl. den theoretisch, aber nicht praktisch nutzbaren Materialien
heissen inputseitig:	(Primär-)**Reserven**	(Primär-)**Ressourcen**
heissen outputseitig:	(Aufzubereitende und heute ökonomisch-technisch aufbereitbare) Sekundär-Wertstoffe (Recyclate, Downcyclate) = **Sekundär-Reserven**	(heute nicht verwertete) Abfälle = **Sekundär-Ressourcen**

Tab. A.6 Begriffe für Materiallager

Wenn die **Beanspruchung von Reserven** zu einem **Belastungssignal** in Ökobilanzen führen soll, so kann in einem erweiterten Verständnis auch die **Produktion von** (heute nicht verwertbarem) **Abfall** zu einer **Belastung** im Sinne der Ressourcenbeanspruchung führen, während die **Produktion von** (verwertbaren) **Sekundär-Wertstoffen** dann nicht zu einer solchen Belastung führen würde. Mit dieser Methode würde dafür gesorgt, dass sowohl auf der Input-Seite als auch auf der Output-Seite einer Produkteökobilanz Anreize geschaffen werden Stoffkreisläufe zu schliessen: Sowohl durch die Verwendung von Sekundärreserven als auch durch die Erzeugung von (nutzbaren) Sekundärreserven.

In der neuen Ökobilanzbewertungsmethode Eco-indicator'99 wurde eine Bewertung des Verbrauchs von energetischen und nicht-energetischen Materialien eingeschlossen. Die Bewertung orientiert sich dabei am höheren Energieverbrauch, der künftig geleistet werden muss, um qualitativ minderwertige Reserven abzubauen [Goedkoop et al. 1999]. Diese Methode der Ressourcenbewertung wird hergeleitet in [Müller-Wenk 1998].

B.4. Tertiär-Reserven

Die heute deponierten Abfälle können in der Zukunft evt. Rohstoffe darstellen, wenn Technologien gefunden werden, welche diese Deponiekörper profitabel – d.h. marktfähig im Vergleich zu den konkurrierenden Quellen – in Wertstoffe umwandeln können.

In Erweiterung der Begriffsbildung oben könnte daher von heutigem Deponiegut als zukünftige *Tertiär-Reserve* gesprochen werden. Der Begriff ist aber theoretisch, da die Technologien und Marktsituationen, in welchen diese Abfälle zu Wertstoffen werden heute weder existieren noch zuverlässig abgeschätzt werden können [39].

[39] Etwas unglüklich ist der Begriff auch wegen möglichen Missverständnissen bezüglich des geologischen Zeitalters Tertiär (vor 70 Mio. Jahren bis heute).

B.5. Ressourcenschonung durch Recycling

Zwar könnten *theoretisch* alle Abfälle stofflich verwertet werden, aber weil in einer Wachstumsgesellschaft der Abfall-Output kleiner ist als der benötigte Input, können gar nicht alle Materialien 100% Vollrezyklate enthalten. Solange das Wachstum sich nicht stabilisiert, müssen auch Primärressourcen beansprucht werden (oder bestehende Abfall-Deponien wieder geöffnet und abgebaut werden).

Anhang C Simulation "Recycling/dump mining"

Durch den Verbrauch von nicht-erneuerbaren PrimärRessourcen wie z.B. Metallerzen aber auch Kiesreserven sinken die noch verfügbaren Mengen an natürlichen PrimärRessourcen. Da aus ökonomischen Gründen im Allgemeinen die hochqualitativen Ressourcen bzw. Reserven zuerst abbgebaut werden, **sinken die Qualitäten** der verbleibenden PrimärRessourcen.

Diese Qualität kann solange abnehmen, bis der ökonomische Aufwand, diese Ressourcen zu gewinnen und zu verarbeiten, vergleichbar wird zum Aufwand **Rohstoffe aus Altstoffen zu gewinnen** (Recycling). Dann werden Primärmaterialien und Rezyklate zu konkurrierenden Rohstoffen.

In einer weiteren Stufe kann es dazu kommen, dass sogar die **Extraktion von bereits deponiertem Material** ("dump mining") lohnender wird als die Produktion von Primärmaterialien [40]. Deponien wurden in der Vergangenheit bereits wiedereröffnet, doch meistens geht es dabei um die Trennung und nachträgliche Verbrennung von verbliebenem Müll zur Gewinnung von wertvollem Deponieraum bzw. mit dem Ziel der Deponiesanierung und weniger um die Gewinnung von Rohstoffen.

In einem Plausibilitätsmodell wird hier simuliert, wie die Prozesse Primärmaterialproduktion, Rezyklatproduktion und Produktion aus dump-mining in einer bedarfsstabilisierten Gesellschaft nebeneinander existieren. Es geht dabei nicht um eine genaue Prognose, sondern um die Simulation der generellen Dynamik der Märkte von nichterneuerbaren Materialien.

C.1. Modellannahmen

1. Es wird die **Konsumdynamik eines nicht weiter spezifizierten Materials** abgebildet. Von dem Material existieren beschränkte natürliche Lager einer gewissen Qualitätsverteilung. Vor allem im Sinn waren dabei Metalle, aber das Modell kann auch für andere Ressorcen (z.B. Kies, ev. Kunststoffe) gelten.
2. Es wird von einer **Bedarfsstabilisierung** der Materialnachfrage auf 2000 Massen-Einheiten ausgegangen. Im Modell wird eine Stabilisierung bis im Jahr 2100 vorgegeben. Die Simulation umfasst den Zeitabschnitt von 2000 bis 2350. Zu welchem Zeitpunkt diese Stabilisierung genau eintritt, ist zur Erkennung der Dynamik unwesentlich.
3. Die Materialnachfrage kann aus **Primärmaterial, Rezyklaten oder Material aus dump-mining** gedeckt werden. Zu welchen Anteilen dies geschieht, wird von den Preisen bestimmt.
4. Die **Qualität des abgebauten Primärmaterials** (1° Material) ist abhängig von den noch verbleibenden Primärreserven. D.h. je mehr Reserven abgebaut werden, desto tiefer ist die Qualität. Es wird dabei von einer Chapman-Verteilung der Qualitäten ausgegangen [Müller-

---

40 In Analogie zu Primär-Resourcen (Neumaterial) und Sekundär-Resourcen (Rezyklaten) könnte bei altem Deponie-Material von *Tertiär-Resourcen* gesprochen werden. Der Begriff "Tertiär" könnte aber mit dem geologischen Erdzeitalter verwechselt werden.

Wenk 1998, p.23ff.]. Umgekehrt führt eine Entdeckung von neuen Reserven zu einem Qualitätsanstieg.

5. Der ökonomische Aufwand um ein **Primärmaterial zu einem marktfähigen Produkt** zu machen ist umgekehrt proportional zur Qualität des abgebauten Primärmaterials. Der ökonomische Aufwand bestimmt den Preis des Primär-materialproduktes (Preis = 1/ Qualität). Alle Preisangaben beziehen sich auf den Preis von Primärmaterial im Jahr 2000 (= Preisindex 100%).
6. Äquivalente marktfähige **Produkte aus Rezyklatmaterial** sind zu Beginn (Jahr 2000) dreimal so teuer wie Produkte aus Primärmaterial (Annahme). Der Preis für Rezyklat-material sinkt aber, je grösser das Abfallaufkommen ist. Grund: Mit grossen Abfallmengen steigt das Sekundärreservenangebot und steigt die Attraktivität von recyclingfreundlichen Konstruktionen (DfR, *design for recyclability*). Dadurch steigt auch die Qualität der verfügbaren Sekundärreserven und sinkt der Preis leicht (von Preisindex 300% im Jahr 2000 zu Preisindex 287% im Jahr 2350)
7. Vereinfachend wird von einem **Vollrecycling** ausgegangen. D.h. beim Recycling wird 100% des Materials verwertet.
8. Der **Marktanteil für Rezyklatprodukte** wird über ihren Preis im Verhältnis zu demjenigen von Primärmaterialprodukten bestimmt. Je günstiger Rezyklatprodukte relativ zu Primärmaterialprodukten sind desto grösser wird der Marktanteil von Rezyklatprodukten. Es wird dabei eine asymmetrische, S-förmige Verteilung des Marktanteils in Abhängigkeit der relativen Preise angenommen. D.h bei gleichen Preisen für Rezyklat- und Primärmaterialprodukte beträgt der Marktanteil für Rezyklatprodukte erst etwa 20%. Dies bildet die Schwierigkeiten der Markteinführung neuer Produkte/Akzeptanzprobleme ab.
9. Äquivalente marktfähige **Produkte aus dump-mining-Material** sind zu Beginn (Jahr 2000) 3.1-mal so teuer wie Produkte aus Primär-material (Annahme). Der Preis für dump-mining-Material bleibt konstant, da die Qualität des Deponiematerials als etwa konstant angesehen werden kann.
10. Der **Marktanteil für dump-mining-Produkte** wird über die Qualität im Verhältnis zur Qualität des noch vorhandenen Primärmaterials bestimmt. Die Qualität von Deponiematerial wird als konstant tief angesehen. Je schlechter die Primärmaterialqualität wird, desto grösser wird der Marktanteil von dump-mining-Produkten. Es wird dabei eine asymmetrische, S-förmige Verteilung des Marktanteils in Abhängigkeit der relativen Qualität angenommen. D.h bei gleicher Qualität von Deponie- und Primärmaterial beträgt der Marktanteil für dump-mining-Produkten erst etwa 10%. Dies bildet die Schwierigkeiten der Markteinführung neuer Produkte durch Akzeptanzprobleme und Investitionshemmnisse ab.
11. Der **Abfallanfall** wird der 20 Jahre früher bestehenden, gesamten Materialnachfrage gleichgesetzt. D.h. es wird von einer pauschalen Lebensdauer der konsumierten Produkte von 20 Jahren ausgegangen. Der aufkommende Abfall wird entweder deponiert oder rezykliert.
12. Die Menge des **Abfalls in Recycling** wird von der Rezyklatnachfrage bestimmt, der Rest (Differenz Abfallaufkommen minus Rezyklatnachfrage) wird deponiert.

13. Es wird idealisierend von unbegrenzten Deponiemöglichkeiten ausgegangen. D.h. es gibt im Modell keinen Druck *aufgrund mangelnder Senken* Recycling oder dump-mining zu verstärken. Der **Input in Deponien** erfolgt durch Abfälle, die nicht rezykliert werden. **Entnahmen aus Deponien** erfolgen in dem Ausmass, wie dump-mining-Produkte marktfähig und nachgefragt werden.
14. Der **Marktanteil für Primärmaterialprodukte** wird bestimmt aus der Differenz der Nachfrage und den Marktanteilen für Rezyklatprodukte und für dump-mining-Produkte. Die Marktanteile der Konkurrenzprodukte hängen von der Qualität und Preis des Primärmaterials ab.
15. Es werden **Entdeckungen von neuen Primärmaterialressourcen** gleicher Höhe im Jahre 2100 und 2200 angenommen. Dadurch steigt – für eine kurze Zeit – die Qualität der verfügbaren Primärmaterialressourcen (s. Punkt 4) und der Marktanteil der Primärmaterialprodukte.

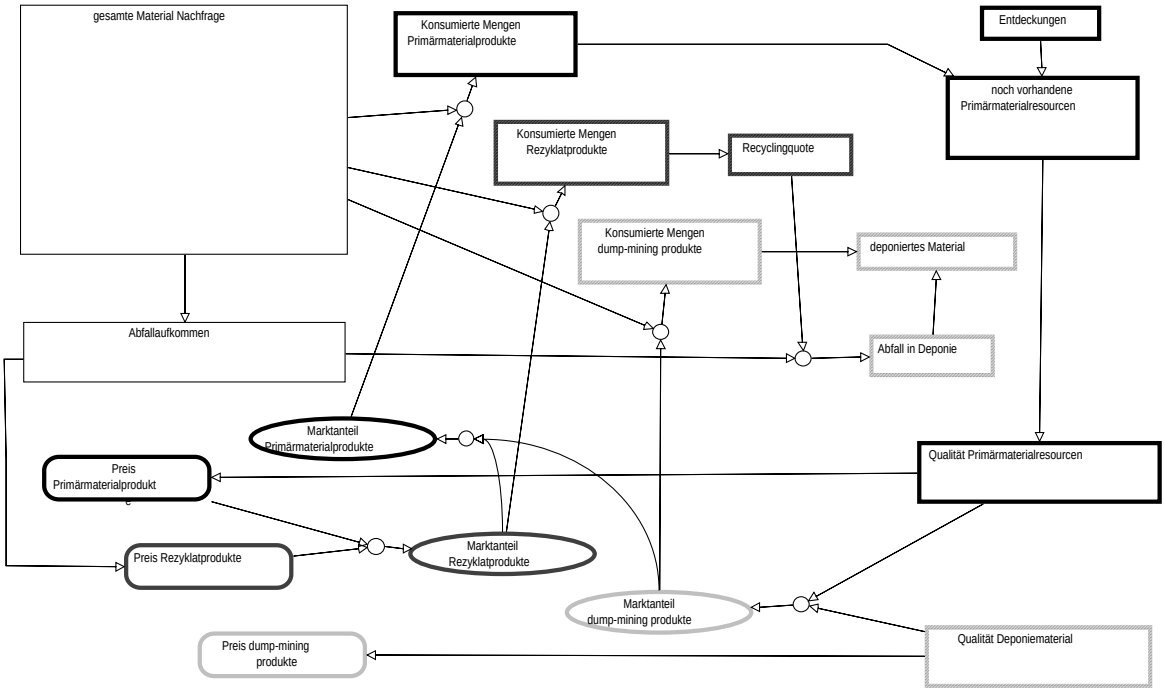


Abb. C.1 *Schematische Darstellung des Modells zur Konsumdynamik einer knappen Resource. Fett gerahmte Elemente betreffen Primärmaterial; dunkel schraffiert gerahmte Elemente betreffen Recycling; hell schraffiert gerahmte Elemente betreffen Deponiematerial.*

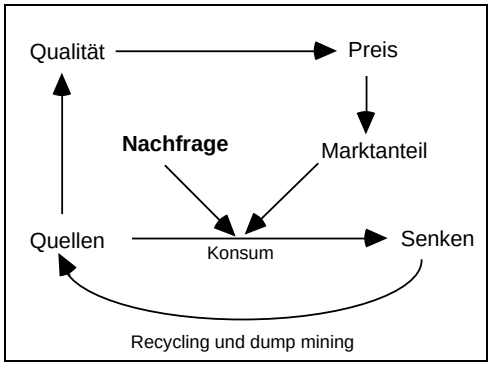


Abb. C.2 *Vereinfachte Darstellung der wesentlichen Abhängigkeiten der Variablen im Modell zur Konsumdynamik einer knappen Resource.*

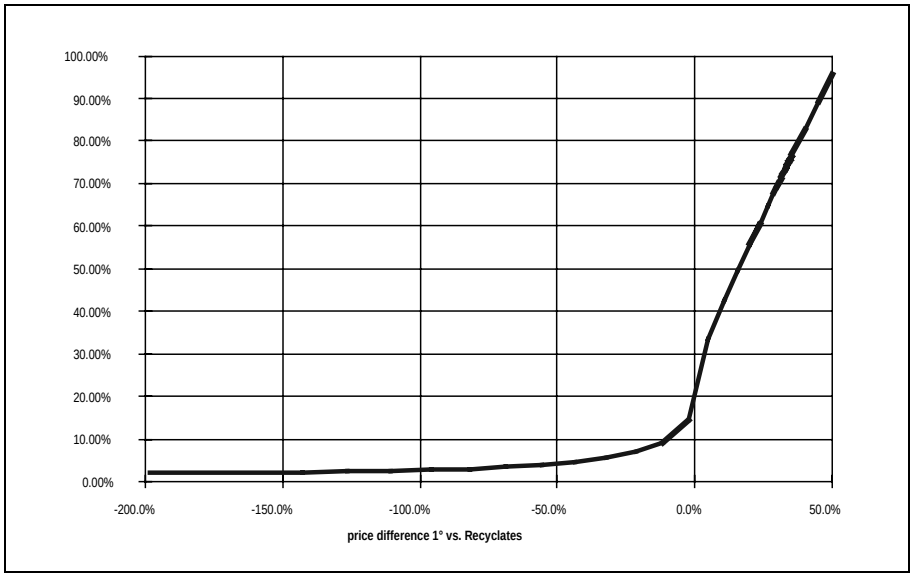


Abb. C.3 *Bestimmung des Marktanteils von Rezyklatprodukten in Abhängigkeit der Preisdifferenz zu Primärmaterialprodukten (angenommene Verteilung).*

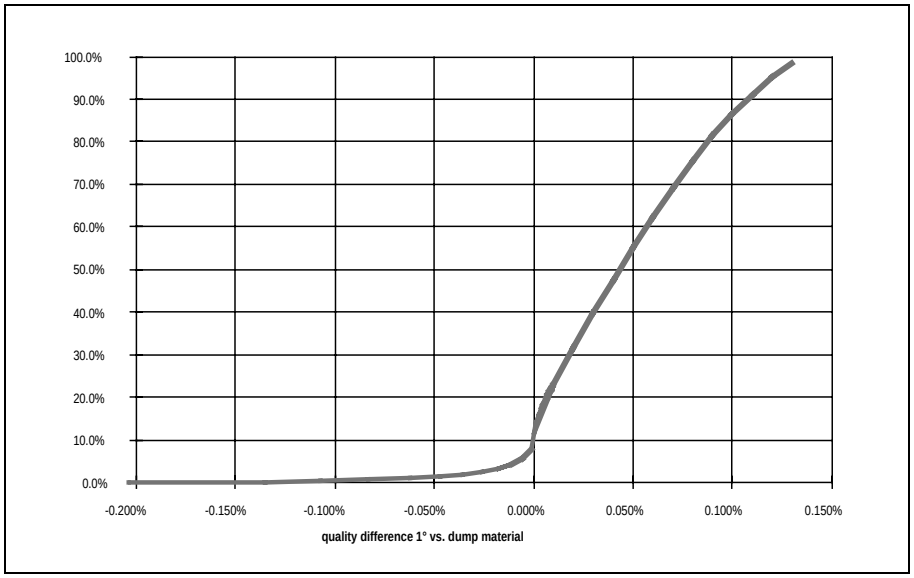


Abb. C.4 *Bestimmung des Marktanteils von Produkten aus dump-mining-Material in Abhängigkeit der Qualitätsdifferenz zu Primärmaterial (angenommene Verteilung).*

C.2. Modell-Implementierung

Die Vorgaben und Abhängigkeiten der verschiedenen Parameter wurden in einer Tabellenkalkulationssoftware (MS Excel) eingegeben und verknüpft. Der Zeitverlauf von 2000 bis 2350 wurde in Schritten von 5 Jahren rekursiv berechnet, bis sich eine stabile Lösung über alle Zeitreihen ergab. Dies ist je nach Parametereinstellung nach 5 bis ca. 100 Rekursionen der Fall.

C.3. Resultate der Simulation

Primärmaterial wird im Folgenden mit "1°" abgekürzt.

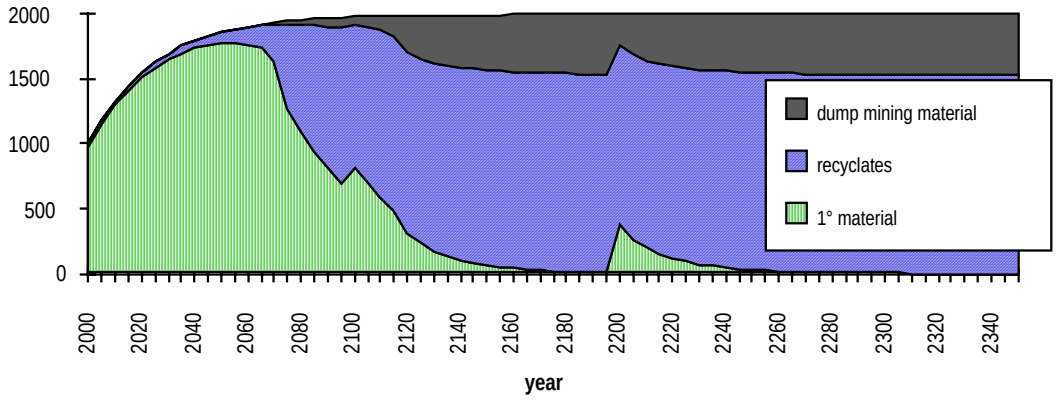


Abb. C.5 *Zeitliche Entwicklung der Deckung der Materialnachfrage durch drei Produktsorten in beliebigen Massen-Einheiten.*

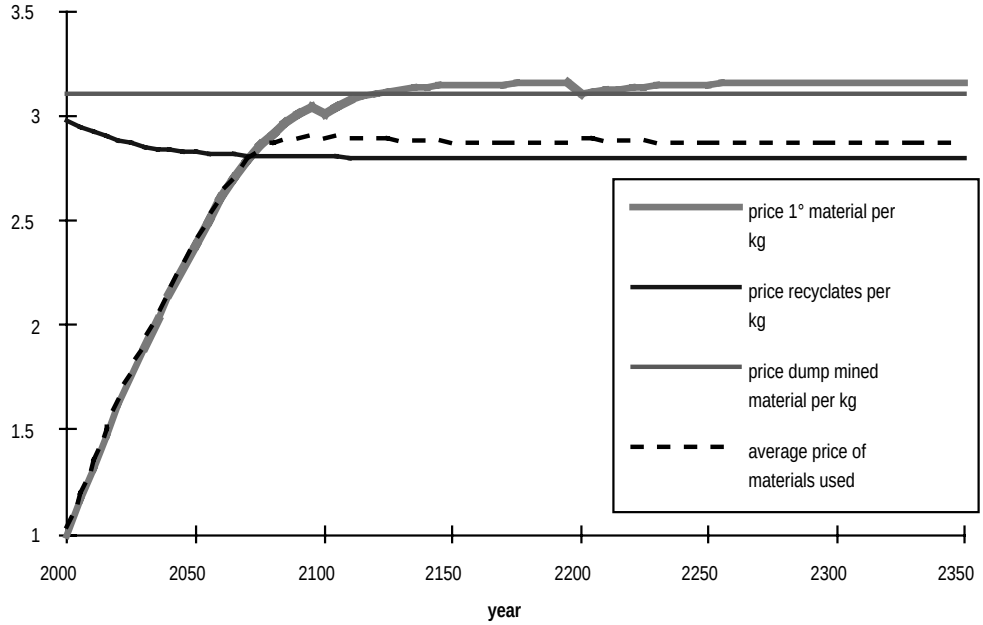


Abb. C.6 *Zeitliche Entwicklung der Preise der drei konkurrierenden Produkte und Durchschnittspreis aller konsumierten Produkte. In relativen Preisen: 100% = Preis für Primärmaterial im Jahr 2000.*

Der Preis für Produkte aus Primärmaterial steigt zu Beginn aufgrund der Ausschöpfung hochqualitativer Ressourcen steil an und überschreitet ca. 2070 den Preis für Rezyklatprodukte.

Danach nimmt der Marktanteil der Rezyklatprodukte stark zu. Die Preiszunahme bei den Primärmaterialprodukten verflacht sich, weil die Primärressourcen langsamer ausgeschöpft werden.

Ungefähr 2120 sinkt die Qualität der Primärressourcen unter die Qualität von Deponiematerial (Tertiärressourcen). Dann überschreitet der Preis für Produkte aus Primärmaterial den Preis für Produkte aus dump mining. Die dump-mining-Produkte können sich einen gewissen Marktanteil sichern. Den grössten Marktanteil haben aber die günstigeren Rezyklatprodukte.

Die Entdeckung weniger neuer Primärressourcen mit besserer Qualität im Jahr 2100 und 2200 senkt den Preis für Primärmaterialprodukten und lässt ihren Marktanteil kurzfristig ansteigen. Das grundsätzliche Problem, dass nicht-erneuerbare Materialquellen aufgrund sinkender Qualitäten im Laufe der Zeit zu teuer werden, wird aber dadurch nicht gelöst. Der Markt pendelt sich folgerichtig auch nach 2200 gleich ein, wie er schon vor 2200 war. Die Förderung von Primärmaterial kommt fast völlig zum erliegen – aber nicht ganz – und ist nur noch für "Luxusprodukte" möglich ("100% Virgin Copper®").

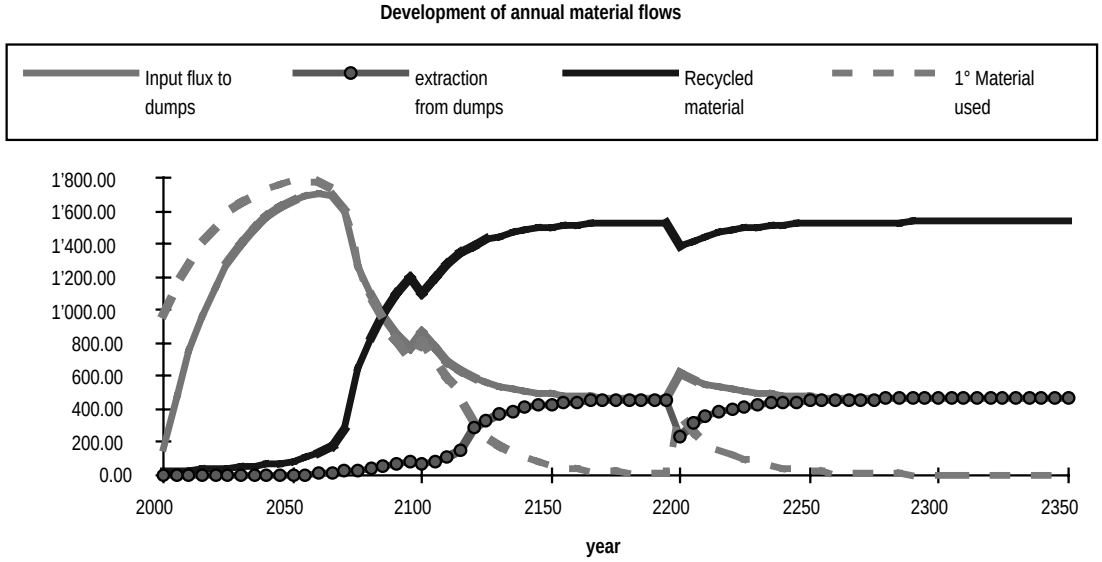


Abb. C.7 *Zeitliche Entwicklung der jährlichen Massenflüsse aus den Primärmaterialreserven, ins Recycling, in die Deponien und aus den Deponien heraus (dump mining).*

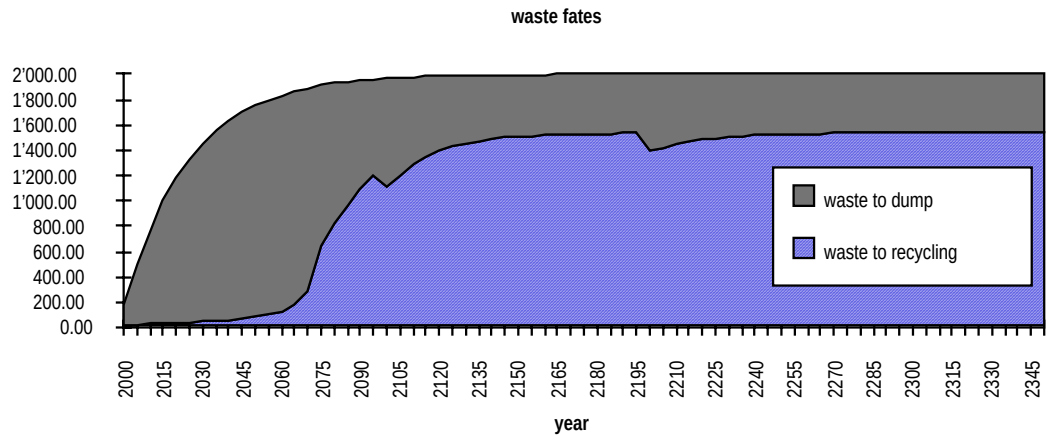


Abb. C.8 Zeitliche Entwicklung des Schicksals der jährlich entstehenden Abfälle: Deponierung oder Recycling

Die Abfälle werden zu Beginn fast ausschliesslich deponiert. Die Kurve des Abfallanfalls folgt der Kurve der Materialnachfrage mit einer Verzögerung von 20 Jahren (angenommene durchschnittliche Produktelebensdauer). Mit dem Aufkommen des Recyclings sinken die deponierten Abfälle. Leichte Einbrüche in dieser vorteilhaften Entwicklung ergeben sich durch die Entdeckung neuer Primärmaterialressourcen 2100 und 2200 und der nachfolgenden Verdrängung von Recyclingprodukten. Die Einbrüche werden aber relativ kurzfristig wieder kompensiert.

Bemerkenswerterweise verschwindet die Deponierung nicht völlig: Sie nivelliert sich auf einem Input-Flux der genau dem Output-Flux durch dump mining entspricht. Die jährlich in die Deponien fliessenden Mengen werden direkt von dem Anteil der Abfälle bestimmt, der nicht ins Recycling geht. Somit ist die Deponierung also direkt vom Marktanteil des Recyclings abhängig.

Da im Modell unrealistischerweise von unbegrenzten Deponiemöglichkeiten ohne Preisdruck auf Deponieabfälle ausgegangen wurde, gibt es keine entsprechende Belastung auf die Deponierung von Abfällen. Wie unten erkennbar, führt die Entdeckung neuer Primärmaterialressourcen langfristig nur zur **Erhöhung des gesamthaft beanspruchten Deponievolumens**. Die Marktanteile der Produkte ändern sich nur kurzfristig. Die Primärmaterialressourcen werden bis zu einem konstanten Rest ausgeschöpft. Mehr entdecktes Primärmaterial führt letztendlich nur zu mehr deponiertem Abfall. **Das gesamte Volumen der Deponien wächst stets** bzw. bleibt im besten Fall konstant. Dump mining führt nicht zu einem *Rückbau* der Deponien.

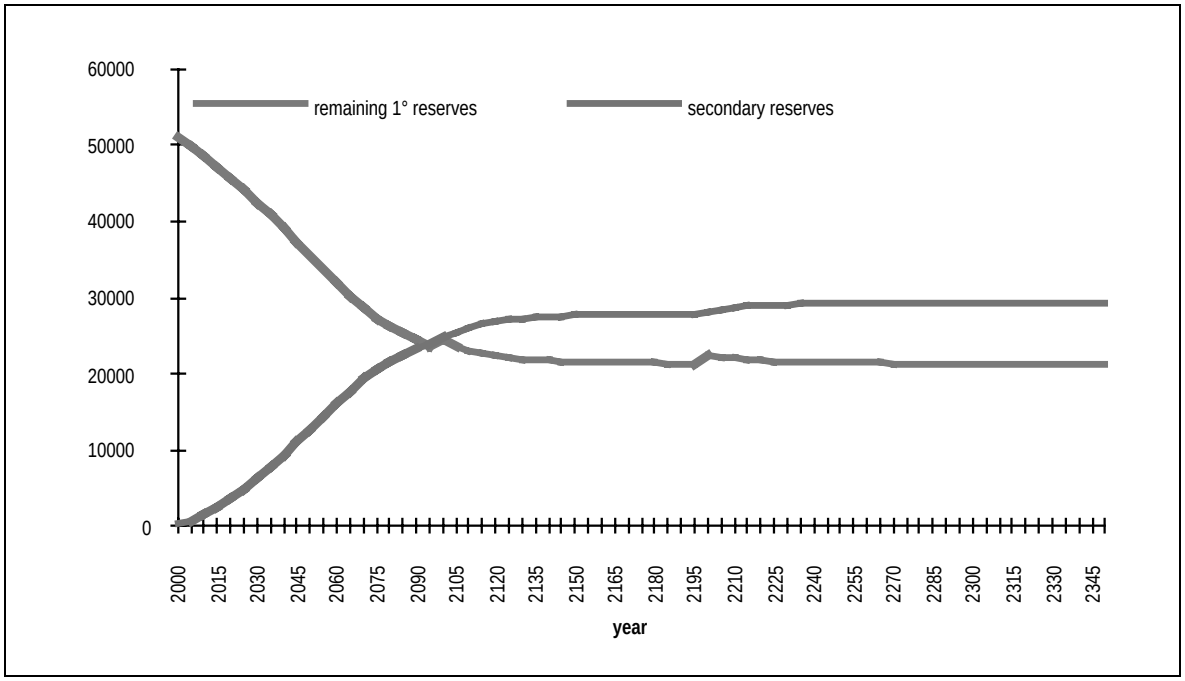


Abb. C.9 *Zeitlicher Verlauf der bekannten Primärmaterialressourcen und der gesamthaft deponierten Abfallmenge*

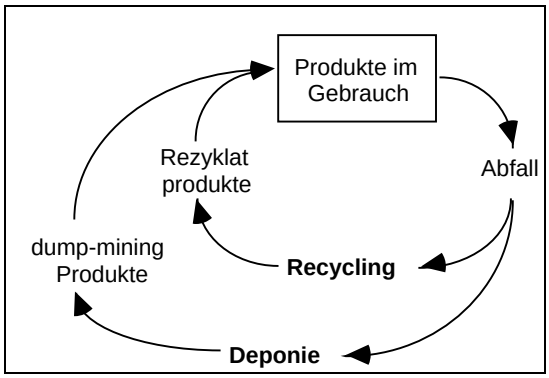


Abb. C.10 *langfristig etablierter doppelter Material-Kreislauf*

Der langfristig (nach 2250) etablierte Kreislauf ist ein doppelter: Einerseits werden die verbauten Güter am Lebensende zu Rezyklaten verarbeitet und **gleich wieder eingesetzt** (ca. 75%). Daneben gibt es einen weiteren Kreislauf: die verbauten Güter werden am Lebensende **deponiert** (ca. 550 Masse-Einheiten Input pro Jahr) und dieselbe Menge wird anderswo aus den Deponien geholt und zu Dump-mining-Produkten verarbeitet (ca. 25%).

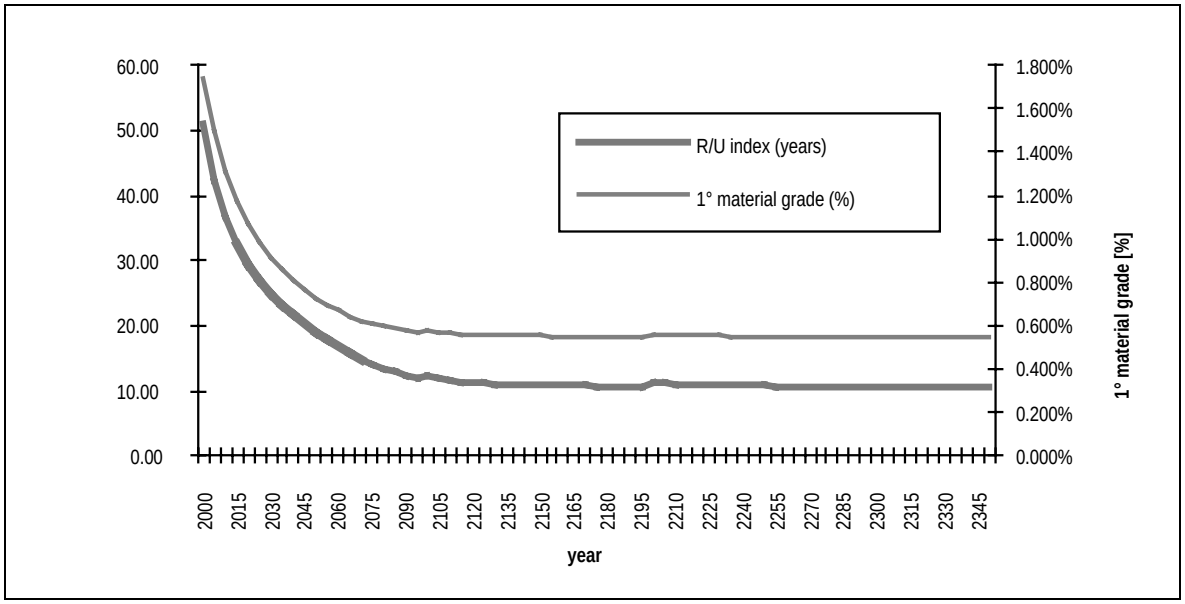


Abb. C.11 Zeitliche Entwicklung der Index-Grössen der PrimärmaterialRessourcen. Qualität (grade) und vorhandene Reserven ÷ jährlichen Verbrauch (reserve/use index, R/U).

Die Primärmaterialressourcen werden nicht völlig ausgeschöpft. Die bekannten Ressourcen fallen – auch nach neuen Entdeckungen – auf ein sehr tiefes Niveau. Primärmaterialprodukte verschwinden nicht völlig, aber werden zu teuren, raren Luxusprodukten. Der Verbrauch an Primärmaterial sinkt aber laufend und hält dabei ein Ausmass ein, bei dem die bekannten Ressourcen noch konstant 11 Jahre reichen (reserve/use-Index, R/U). Da der quantitative Verbrauch an Primärmaterial auf ein marginales Mass sinkt, stabilisiert sich auch die Qualität des verbleibenden Primärmaterials und erlangt einen Drittel der zu Beginn vorhandenen Qualität.

Anhang D Belastung der Feinfraktion aus Sortieranlagen

Die Feinfraktion aus Sortieranlagen (z.B. 0–8 mm Siebfraktion) ist tendenziell eher schadstoffbelastet (z.B. DOC, Schwermetalle) als grobe Fraktionen (z.B. > 8 mm Siebfraktion). Dazu sind verschiedene Interpretationen denkbar:

D.1 Wirkungskette: Oberfläche - Abrasion - Feinfraktion

1. Hypothese

*Die **Oberfläche der Baumaterialien ist stark belastet** – stärker als im Inneren. Während des Abbruchs und der Aufbereitung des Bauschutts wird ein Teil der Oberfläche abgetragen und gelangt in die Feinfraktion.*

Wie gelangen Schadstoffe auf die Oberfläche?

Hypothese 1A relativ schadstoffhaltige Bauprodukte werden vor allem auf der Oberfläche aufgetragen (Anstriche, Klebstoffe)

Hypothese 1B Schadstoffe wandern während der Standzeit aus der Materialmatrix der Baustoffe an die Oberfläche (endogene Belastung, d.h aus dem Material selbst).

Hypothese 1C Schadstoffe aus der Umwelt werden während der Standzeit auf Oberflächen deponiert (exogene Belastung, d.h aus baumaterialfremden Quellen). Vergleiche dazu auch Hypothese 4.

2. Hypothese

*Die **Bruchflächen von Materialien** während des Abbruch- und Sortierprozesses folgen bereits vorhandenen feinen Rissen und Kapillaren. An diesen Orten befinden sich **bevorzugt Schadstoffe**. Also ist denkbar, dass nicht (nur) die ursprüngliche Oberfläche der Bauteile überdurchschnittlich belastet ist, wie in Hypothese 1 vermutet, sondern (auch) die Bruchflächen, die erst beim Abbruch und der Sortierung im Material gebildet werden.*

Wie gelangen Schadstoffe zur Bruchfläche?

Hypothese 2A Die überdurchschnittliche Schadstoff-Belastung der Kapillaren und Risse kann während der Standzeit durch Verwitterungsprozesse erfolgen.

Hypothese 2B Die überdurchschnittliche Schadstoff-Belastung der Kapillaren und Korngrenzen könnte bereits während des Zementbrennens durch Diffusion von Schwermetallen an die Oberfläche/Korngrenzen der Zementkörner entstehen. Die Oberfläche der Zementkörner könnte so mehr belastet sein als das Innere der Körner. Bruchflächen bei Abbruch und Sortierung verlaufen sehr wahrscheinlich nicht durch Zementkörner hindurch sondern an ihnen vorbei, wodurch überdurchschnittlich belastete Bruchflächen entstehen.

D.2 Wirkungskette: Festigkeit - Feinfraktion

3. Hypothese

*Gewisse **stark schadstoffbelastete Baumaterialien zerfallen** bei der Sortierung **in feinere Bestandteile** als weniger belastete (z.B. Putze oder Mörtel mit viel Zusatzstoffen sind mürber als z.B. Mauersteine).*

Eher zufälligerweise können gewisse mechanisch weniger stabile Baumaterialien, welche leichter in die Feinfraktion gelangen, mehr schadstoffbelastet sein als stabilere Baumaterialien. Es würde sich dabei um eine Korrelation aber nicht zwingend um eine Kausalität handeln (d.h. die mechanische Festigkeit ist nicht beeinflusst vom Schadstoffgehalt).

4. Hypothese

*hochbelasteter **Hausstaub** aus der Nutzungsphase gelangt während der Sortierung in die Feinfraktion.*

Woher stammt die Belastung im Hausstaub?

Hypothese 4A Die Schadstoffe im Hausstaub könnten von ausserhalb des Hauses ins Haus gelangen (trockene Deposition)

Hypothese 4B Die Schadstoffe im Hausstaub könnten von den Bewohnern selbst durch Entschlackungsprozesse im Körper stammen. Ein wesentlicher Teil des Hausstaubes sind Hautschuppen der Bewohner.

Hypothese 4C Die Schadstoffe im Hausstaub könnten von den Bewohnern selbst durch Abrasions/Depositionsvorgänge von Haushaltsgegenständen (Abrasion von Oberflächen z.B. Metallen oder Textilien, aber z.B. auch zerbrochenen Quecksilberthermometer und ähnlichem) stammen.

D.3 Hinweise aus der Literatur zu Feinstoffbelastung

Bei der Austrocknung von Beton und durch Wasserkontakt in der Nutzungsphase rechnet man mit Transportprozessen von wasserlöslichen Stoffen in oberflächennahe Zonen, sog. Ausblühungen [von Arx 1995, p.108]. Auch in Kunststoffprodukten wird die Verlagerung von Weichmachern, Stabilisatoren, Pigmenten etc. an die Oberfläche beobachtet (Migration). Weichmacher können dabei als Lösungsmittel für nicht wasserlösliche Stoffe dienen [von Arx 1995, p.111]. Diese Befunde sind konsistent mit Hypothese 1.

Bei der Aufbereitung von Altbeton gelangt der Alt-Mörtel (Zement und Sand) bevorzugt in die feine Kornfraktion 0–8mm [DAFST 1996, p.148]. Zement kann als eher schadstoffbelastet angesehen werden als Betonkies. Der Befund ist konsistent mit Hypothese 3.

Gemäss [Rentz et al. 1997, p.56] stellt Hausstaubniederschlag eine wichtige Quelle der Schadstoffbelastung von Baumaterialien dar und enthält insbesondere Schwermetalle und PAHs.

Im Schnitt beträgt die Niederschlagsmenge 4.4 mg/m^2·d. Folgende Faktoren können diesen Wert erhöhen: ländliche Gegend, Alter des Hauses, viele Bewohner, Kinder, Öl-, Holzkohle- oder Gasöfen. Der Befund ist konsistent mit Hypothese 4.

Anhang E Bewertungsfaktoren der Bewertungsmethoden

E.1 Eco-indicator 95+

Die Bewertungsmethode Eco-indiactor 95+ stammt aus der Dissertation von Niels Jungbluth [Jungbluth 1999]. Sie ist eine Ergänzung und Weiterentwicklung der in Europa stark verbreiteten Bewertungsmethode Eco-indicator 95 von Pré Consultants, Holland [Goedkoop 1995]. Die intensiv überarbeitete und verbesserte Methode Eco-indicator 99 war zur Zeit der Berechungen für diese Studie noch nicht verfügbar [Goedkoop et al. 1999].

Umwelteffekt	Leitsubstanz Einheit	verwendeter Normalisierungs-wert	Reduktionsfaktor
Treibhauseffekt 100a	kg CO_2-equiv.	6.11e+12	2.5
Ozonabbau	kg R11-equiv.	2.21E+8	100
Versauerung	kg SO_x-equiv.	5.23E+10	10
Überdüngug	kg PO_4-equiv.	1.55E+10	5
Schwermetalle	kg Blei-equiv.	5.29E+11	5
Krebserregende Substanzen	kg PAH-equiv.	1.24E+7	10
Wintersmog	kg SO_2-equiv.	3.94E+10	5
Sommersmog inkl. NOx	kg Ethylen-equiv.	1.87E+10	2.5
Radioaktivität	kBq ^{129}I-equiv.	1.46E+10 *	2.2 *
Energieressourcen	Megajoule	6.50E+13	1.3

Tab. E.1 *Verwendete Normalisierungswerte (aktuelle Gesamtbelastung in Europa) und Reduktionsfaktoren (nötige Reduktionen für akzeptable Belastung) für Eco-indicator 95+.*

** Angabe aus [Frischknecht 1998, p. 244]*

		Versauerung
H2S Schwefelwasserstoff	kg	0.359
HCl Salzsaeure	kg	0.168
HF Fluorwasserstoff	kg	0.306
NH3 Ammoniak	kg	0.359
NOx Stickoxide als NO2	kg	0.134
SOx als SO2	kg	0.191
		Krebserregende Substanzen
Aromaten	kg	0.0354
As Arsen	kg	35.4
BaP Benzo(a)pyren	kg	805
Benzol	kg	0.0354
Cr Chrom	kg	35.4
Ethylbenzol	kg	0.0354
Ni Nickel	kg	3.54
PAH Polyzyklische aromatische HC	kg	805
Styrol	kg	0.0354
TCDD-Aequivalente	ng	8.05E-10
Toluol	kg	0.0354
Vinyl Chlorid	kg	0.00885
Xylole	kg	0.0354
		Ueberduengung
Acenaphthene f	kg	0.0213
Acenaphthylene f	kg	0.0213
Acrilonitrile f	kg	0.016
Alkane in Wasser f	kg	0.0243
Alkene in Wasser f	kg	0.0218
Ammoniak als N f	kg	0.137
Arom. KWe gesamt f	kg	0.0227
Benzol in Wasser f	kg	0.0218
bis(2-ethylhexyl) Phtalat f	kg	0.0178
BSB5 f	kg	0.00709
Butyl Benzyl Phtalat f	kg	0.016
Chlor. 1,1,1-Trichlorethan f	kg	0.00467
Chlor. Chlorbenzol f	kg	0.0146
Chlor. Dichlormonofluormethan f	kg	0.00276
Chlor. Ethylen Dichlorid f	kg	0.0058
Chlor. Hexachlorethan f	kg	0.00191
Chlor. Loesungsmittel gesamt f	kg	0.0132
Chlor. Methylenchlorid f	kg	0.00396
Chlor. Tetrachlorethylen f	kg	0.00273
Chlor. Tetrachlormethan f	kg	0.00147
Chlor. Trichlorethylen f	kg	0.0039
Chlor. Trichlormethan (Chloroform) f	kg	0.00237
Chlor. Trichlormethan f	kg	0.00237
COD f	kg	0.00709
Dibutyl-phthalat f	kg	0.0159
Dimethyl-phthalat f	kg	0.0123
DOC f	kg	0.0189
Ethylbenzol in Wasser f	kg	0.0225
Fette und Oele gesamt f	kg	0.0207
Fettsaeuren als C gesamt f	kg	0.0189
Fluechtige organ. Verbindungen als C f	kg	0.0189
Formaldehyd in Wasser f	kg	0.00757
Glutaraldehyd in Wasser f	kg	0.0136
Kohlenwasserstoffe gesamt f	kg	0.0207
MTBE in Wasser f	kg	0.0194
NH3 Ammoniak	kg	0.113
Nitrate f	kg	0.0311
Nitrate	kg	0.135
Nitrite f	kg	0.0311
NOx Stickoxide als NO2	kg	0.0419
P Phosphor	kg	0.986
PAH Polycyklische arom. KWe in Wasser f	kg	0.0208
Phenole f	kg	0.0178
Phosphate f	kg	0.322
Phosphor Verb. f	kg	0.986
Stickstoff Gesamt f	kg	0.135
Stickstoff organ. gebund. f	kg	0.135

		Radioaktivitaet
LT Radio. Rn222	kBq	0.00000156
Rad. Ag110m f	kBq	0.0000333
Rad. Co58 f	kBq	0.0000027
Rad. Co60 f	kBq	0.00292
Rad. Cs134 f	kBq	0.0095
Rad. Cs137 f	kBq	0.011
Rad. H3 f	kBq	2.53E-08
Rad. I131 f	kBq	0.0000332
Rad. Mn54 f	kBq	0.0000204
Rad. Ra 226 f	kBq	0.00000842
Rad. Sb124 f	kBq	0.0000537
Rad. Substanzen Luft	kBq	0.00000106
Rad. Substanzen Wasser	kBq	2.65E-07
Rad. U 238 f	kBq	0.00000173
Rad. U234 f	kBq	0.00000177
Rad. U235 f	kBq	0.00000196
Radio. C14	kBq	0.0141
Radio. Co58	kBq	0.0000284
Radio. Co60	kBq	0.00109
Radio. Cs134	kBq	0.000784
Radio. Cs137	kBq	0.000889
Radio. H3	kBq	0.00000171
Radio. I129	kBq	0.15
Radio. I131	kBq	0.0000102
Radio. I133	kBq	6.17E-07
Radio. Kr85	kBq	9.29E-09
Radio. Kr85m	kBq	9.29E-09
Radio. Pu alpha	kBq	0.00544
Radio. Pu238	kBq	0.00443
Radio. Rn222	kBq	0.00000156
Radio. U234	kBq	0.00638
Radio. U235	kBq	0.00135
Radio. U238	kBq	0.000537
Radio. Xe133	kBq	9.36E-09
Radio. Xe133m	kBq	9.36E-09
		Schwermetalle
Aldehyde	kg	0.0000647
As Arsen	kg	66.9
As in Boden	kg	0.00521
Cd Cadmium	kg	141
Cd in Boden	kg	0.0109
Co Cobalt	kg	96
Co in Boden	kg	0.00744
CO Kohlenmonoxid	kg	0.00000104
Cr Chrom	kg	27.5
Cr in Boden	kg	0.00216
Cu in Boden	kg	0.0000669
Cu Kupfer	kg	1.08
Fluoride f	kg	0.000335
Formaldehyd	kg	0.0000736
Hg in Boden	kg	0.0268
Hg Quecksilber	kg	342
Ion Arsen f	kg	0.0112
Ion Blei f	kg	0.0064
Ion Cadmium f	kg	0.0238
Ion Chrom-III f	kg	0.00461
Ion Chrom-VI f	kg	0.00461
Ion Kobalt f	kg	0.0164
Ion Kupfer f	kg	0.000164
Ion Nickel f	kg	0.000461
Ion Quecksilber f	kg	0.058
Ion Selen f	kg	0.0811
Ion Zink f	kg	0.0000238
Ion Zinn f	kg	0.0000112
Ni in Boden	kg	0.000216
Ni Nickel	kg	2.75
Nitrate f	kg	0.00000632
NOx Stickoxide als NO2	kg	0.0000149

Styrol in Wasser f	kg	0.0218
TOC f	kg	0.0189
Toluol in Wasser f	kg	0.0222
Triethylen-Glykol f	kg	0.0113
Vinyl Chlorid in Wasser f	kg	0.00999
Xylol in Wasser f	kg	0.0225
		Ozonabbau
1,1,1-Trichlorethan	kg	45.5
CH3Br	kg	319
H 1211 Halon	kg	1370
H 1301 Halon	kg	4550
R11 FCKW	kg	455
R113 FCKW	kg	364
R114 FCKW	kg	455
R115 FCKW	kg	273
R12 FCKW	kg	455
R13 FCKW	kg	455
R141b H-FKW	kg	45.5
R142b H-FKW	kg	27.3
R22 FCKW	kg	22.8
Tetrachlormethan	kg	492
		Photosmog
1,1,1-Trichlorethan	kg	0.00357
Aldehyde	kg	0.0753
Alkene	kg	0.154
Aromaten	kg	0.129
Benzol	kg	0.0321
Buten	kg	0.166
C2F6	kg	0.00357
CF4	kg	0.00357
CH3Br	kg	0.00357
CH4 Methan	kg	0.00119
Dichlormethan	kg	0.00357
Dichlormonofluormethan	kg	0.00357
Ethen	kg	0.154
Ethylbenzol	kg	0.101
Ethylenoxid	kg	0.0641
Formaldehyd	kg	0.0716
Heptan	kg	0.09
Hexan	kg	0.0716
NMVOC	kg	0.0707
NOx Stickoxide als NO2	kg	0.0707
PAH Polyzyklische aromatische HC	kg	0.129
Propan	kg	0.0714
Propen	kg	0.175
R11 FCKW	kg	0.00357
R113 FCKW	kg	0.00357
R114 FCKW	kg	0.00357
R115 FCKW	kg	0.00357
R12 FCKW	kg	0.00357
R13 FCKW	kg	0.00357
R134a FKW	kg	0.00357
R141b H-FKW	kg	0.00357
R142b H-FKW	kg	0.00357
R22 FCKW	kg	0.00357
Styrol	kg	0.129
Tetrachlormethan	kg	0.00357
Toluol	kg	0.0957
Trichlormethan (Chloroform)	kg	0.00357
Vinyl Chlorid in Wasser f	kg	0.00357
Vinyl Chlorid	kg	0.00357
Xylole	kg	0.144

Partikel	kg	0.0000818
Pb Blei	kg	17.1
Pb in Boden	kg	0.00446
Phenole f	kg	0.000164
Phosphate f	kg	0.000387
Se in Boden	kg	0.0372
Se Selen	kg	476
Sn in Boden	kg	0.00000521
Sn Zinn	kg	0.0669
SOx als SO2	kg	0.0000558
Sulfide f	kg	0.0156
Zn in Boden	kg	0.00000521
Zn Zink	kg	0.201
		Treibhauseffekt
1,1,1-Trichlorethan	kg	-0.09225
C2F6	kg	3.77
CF4	kg	2.66
CH4 Methan	kg	0.00861
CO Kohlenmonoxid	kg	0.000261
CO2 Kohlendioxid	kg	0.00041
Dichlormethan	kg	0.00369
H 1211 Halon	kg	2.01
H 1301 Halon	kg	-9.184
N2O Lachgas	kg	0.127
R11 FCKW	kg	0.541
R113 FCKW	kg	1.27
R114 FCKW	kg	3.81
R115 FCKW	kg	2.87
R12 FCKW	kg	2.73
R13 FCKW	kg	4.8
R134a FKW	kg	0.533
R141b H-FKW	kg	0.111
R142b H-FKW	kg	0.676
R22 FCKW	kg	0.553
SF6	kg	9.8
Tetrachlormethan	kg	-0.6273
Trichlormethan (Chloroform)	kg	0.00164
		Wintersmog
Partikel	kg	0.124
SOx als SO2	kg	0.124
		Energieressourcen
Erdoelgas	Nm3	0.0009
Grubengas (Methan)	kg	0.000796
Potentielle Energie Wasser	TJ	20
Rohbraunkohle vor Foerderung	kg	0.00019
Rohfoerdersteinkohle vor Aufbereitung	kg	0.00038
Rohgas (Erdgas)	Nm3	0.00078
Rohoel ab Bohrloch	t	0.912
Uran ab Erz	kg	9.2

Tab. E.2 Verwendete Belastungsfaktoren zur Gewichtung von Umweltbeeinträchtigungen gemäss Eco-indicator 95+, in Nanopunkten (10^{-9} Punkte) pro Einheit.

E.2 Umweltbelastungspunkte (UBP)

E.2.1. Bestimmende Effekte bei UBP

Die UBP-Methode bestimmt den Ökofaktor für eine Umweltbeeinträchtigung aufgrund des *wichtigsten* Effektes allein, den diese Umweltbeeinträchtigung hat. Kombinationswirkungen werden im Allgemeinen nicht berücksichtigt. In der folgenden Liste werden die in [BUWAL 1998] berücksichtigten Stoffe und der Grund ihrer Berücksichtigung gezeigt.

Umweltbeeinträchtigung	Berücksichtigter Effekt
Emissionen in die Luft	
Ammoniak NH_3	Gesamtdeposition Stickstoff (Versauerung und Überdüngung)
Blei Pb	Bodenfruchtbarkeit, Humantoxizität
Cadmium Cd	Bodenfruchtbarkeit, Toxizität
Chlorwasserstoff HCl	Versauerung
Fluorwasserstoff HF	Versauerung
Halogenkohlenwasserstoffe Gruppe I*	Treibhauseffekt
Halogenkohlenwasserstoffe Gruppe II**	Ozonzerstörung
Kohlendioxid CO_2	Treibhauseffekt
Lachgas N_2O	Treibhauseffekt
Methan CH_4	Treibhauseffekt
NMVOC (Organika)	Sommersmog
Partikel PM10 (d<10µm)	Atemwegsbeschwerden (wie Wintersmog)
Quecksilber Hg	Bodenfruchtbarkeit, Toxizität
Schwefeldioxid SO_x	Versauerung
Schwefelhexafluorid SF_6	Treibhauseffekt
Stickoxide NO_x	Sommersmog
Zink Zn	Pflanzenwachstum
Emissionen in Wasser	
Blei Pb	Toxizität
Cadmium Cd	Toxizität
Chrom Cr	Toxizität
Gesamtstickstoff N	Überdüngung Nordsee
Halogenierte Organika AOX	Toxizität
Kupfer Cu	Toxizität
Nickel Ni	Toxizität
Nitrat NO_3^-	Humantoxizität
Organische Stoffe (DOC, COD, TOC)	Überdüngung (Sauerstoffzehrung)
Phosphor P	Überdüngung (Algenwachstum)
Quecksilber Hg	Toxizität
Zink Zn	Toxizität
Emissionen in Boden	
Blei Pb	(analog Luftemissionen)
Cadmium Cd	(analog Luftemissionen)
Chrom Cr	Bodenakkumulation
Kobalt Co	Bodenakkumulation
Kupfer Cu	Bodenakkumulation
Nickel Ni	Bodenakkumulation
Quecksilber Hg	(analog Luftemissionen)
Thorium Th [41]	Bodenakkumulation
Zink Zn	(analog Luftemissionen)
Knappe Güter	
Deponieraum	Knappheit der Deponiestandorte
Endlagerraum	Knappheit der Endlagerstandorte
Primärenergieträger	Ressourcenbeanspruchung nach Energieinhalt

* Halogenkohlenwasserstoffe Gruppe I (bewertet gemäss Treibhausgaspotential)

FKW:	R23, R32, R41, R43-10mee, R125, R134, R134a, R143, R143a, R152a, R227ea, R236fa, R245ca
FCKW:	R22, R124, R142b
Perfluorierte:	CF_4, C_2F_6, C_3F_8, C_4F_{10}, C-C_4F_8, C_5F_{14}, C_6F_{14}

** Halogenkohlenwasserstoffe Gruppe II (bewertet gemäss Ozonzerstörungspotential)

FKW:	R11, R12, R13, R111, R112, R113, R114, R115, R211, R212, R213, R214, R215, R216, R217
FCKW:	R123, R141b
Halone:	H1211, H1301, H2402
Weitere:	CCl_4, $CHBr_3$, Methylchloroform $C_2H_3Cl_3$

Tab. E.3 Die in der UBP-Methode berücksichtigten Stoffe und der Grund ihrer Berücksichtigung; gemäss [BUWAL 1998]

41 Vermutlich ist hier eigentlich Thallium (Tl) gemeint.

E.2.2. Ökofaktoren UBP

Energetische Ressourcen		
Erdoelgas	m3	40.9
Grubengas (Methan)	m3	35.9
Potentielle Energie Wasser	TJ	1'000'000
Rohbraunkohle vor Foerderung	kg	8
Rohfoerdersteinkohle vor Aufbereitung	kg	18
Rohgas (Erdgas)	kg	35
Rohoel ab Bohrloch	t	42'600
Uran ab Erz	kg	460'000
Emissionen in Luft		
Acetaldehyd	kg	40'500
Aceton	kg	13'700
Aldehyde	kg	34'100
Alkane	kg	30'600
Alkene	kg	69'700
Aromaten	kg	58'500
Benzaldehyd	kg	-25'700
Benzol	kg	14'500
Benzol	kg	14'500
Butan	kg	31'500
Buten	kg	73'800
C2F6	kg	1'800'000
Cd Cadmium	kg	120'000'000
CH3Br	kg	1'400'000
CH4 Methan	kg	4'200
CO Kohlenmonoxid	kg	310
CO2 Kohlendioxid	kg	200
Cycloalkane	kg	30'600
Dichlormethan	kg	769
Ethan	kg	6'310
Ethanol	kg	20'600
Ethen	kg	76'900
Ethin	kg	12'900
Ethylbenzol	kg	45'600
Ethylenoxid	kg	29'000
H 1211 Halon	kg	6'000'000
H 1301 Halon	kg	20'000'000
HCl Salzsaeure	kg	47'000
Heptan	kg	40'700
Hexan	kg	32'400
HF Fluorwasserstoff	kg	85'000
Hg Quecksilber	kg	120'000'000
Methanol	kg	9'460
N2O Lachgas	kg	62'000
NH3 Ammoniak	kg	63'000
NMVOC	kg	32'000
NOx Stickoxide als NO2	kg	67'000
Partikel	kg	110'000
Pb Blei	kg	2'900'000
Pentane	kg	31'400
Phenol	kg	58'500
Propan	kg	32'300
Propen	kg	79'200
Propionaldehyd	kg	46'400
R11 FCKW	kg	2'000'000
R113 FCKW	kg	1'600'000
R114 FCKW	kg	2'000'000
R115 FCKW	kg	1'200'000
R12 FCKW	kg	2'000'000
R13 FCKW	kg	2'000'000
R134a FKW	kg	260'000
R141b H-FKW	kg	220'000
R142b H-FKW	kg	360'000
R22 FCKW	kg	300'000
SF6	kg	4'800'000
SOx als SO2	kg	53'000
Styrol	kg	58'500
Tetrachlormethan	kg	111'000

Emissionen in Wasser		
Acenaphthene	kg	18'000
Acenaphthylene	kg	18'000
Acrilonitrile	kg	18'000
Alkane in Wasser	kg	18'000
Alkene in Wasser	kg	18'000
Ammoniak als N	kg	69'000
AOX	kg	330'000
Arom. KWe gesamt	kg	18'000
Benzol in Wasser	kg	18'000
bis(2-ethylhexyl) Phtalat	kg	18'000
BSB5	kg	5'900
Butyl Benzyl Phtalat	kg	18'000
Chlor. 1,1,1-Trichlorethan	kg	330'000
Chlor. Chlorbenzol	kg	330'000
Chlor. Dichlormonofluormethan	kg	330'000
Chlor. Ethylen Dichlorid	kg	330'000
Chlor. Hexachlorethan	kg	330'000
Chlor. HOCl	kg	330'000
Chlor. Loesungsmittel gesamt	kg	330'000
Chlor. Methylenchlorid	kg	330'000
Chlor. OCl	kg	330'000
Chlor. OCl	kg	330'000
Chlor. Tetrachlorethylen	kg	330'000
Chlor. Trichlorethylen	kg	330'000
Chlor. Trichlormethan (Chloroform)	kg	330'000
COD	kg	5'900
Diamine gesamt	kg	18'000
Dibutyl-phthalat	kg	18'000
Dimethyl-phthalat	kg	18'000
DOC	kg	18'000
Ethylbenzol in Wasser	kg	18'000
Fette und Oele gesamt	kg	18'000
Fettsaeuren als C gesamt	kg	18'000
Fluechtige organ. Verbindungen als C	kg	18'000
Formaldehyd in Wasser	kg	18'000
Glutaraldehyd in Wasser	kg	18'000
Ion Blei	kg	150'000
Ion Cadmium	kg	11'000'000
Ion Chrom-III	kg	660'000
Ion Chrom-VI	kg	660'000
Ion Kupfer	kg	1'200'000
Ion Nickel	kg	190'000
Ion Quecksilber	kg	240'000'000
Ion Zink	kg	210'000
Kohlenwasserstoffe gesamt	kg	18'000
Nitrate	kg	16'000
Nitrite	kg	21'000
PAH Polycyklische arom. KWe	kg	18'000
Phenole	kg	18'000
Phosphate	kg	650'000
Phosphor Verb.	kg	2'000'000
Stickstoff Gesamt	kg	69'000
Stickstoff organ. gebund.	kg	69'000
Styrol in Wasser	kg	18'000
TOC	kg	18'000
Toluol in Wasser	kg	18'000
Xylol in Wasser	kg	18'000
Emissionen in Boden		
Cd in Boden	kg	120'000'000
Co in Boden	kg	3'800'000
Cr in Boden	kg	1'300'000
Cu in Boden	kg	1'900'000
Hg in Boden	kg	120'000'000
N in Boden	kg	20'000
Ni in Boden	kg	1'900'000
Pb in Boden	kg	2'900'000
Zn in Boden	kg	520'000

Toluol	kg	43'300
Vinyl Chlorid	kg	1'620
Xylole	kg	65'300
Zn Zink	kg	520'000

Deponieraum		
Abfälle in Reststoffdeponie	kg	500
Abfälle in Reaktordeponie	kg	500
Abfälle in Inertstoffdeponie	kg	500
Schwach- und Mittelaktive Abfälle	m3	3'300'000'000
Hochaktive Abfälle	m3	46'000'000'000

Tab. E.4 Verwendete Ökofaktoren aus [BUWAL 1998], in UBP pro Einheit.

E.3 Bewertung Primärenergieressourcen

Folgende Faktoren werden zur Bewertung des Konsums von Primärenergieressourcen verwendet.

Primärenergieträger	Einheit	Energieinhalt in MJ pro Einheit
Bedarf nichterneuerbarer energetischer Ressourcen		
Erdölgas	Nm3	45
Grubengas (Methan)	Nm3	39.8
Rohbraunkohle vor Förderung 1)	kg	9.5
Rohfördersteinkohle vor Aufbereitung 1)	kg	19
Rohgas (Erdgas)	Nm3	39
Rohöl ab Bohrloch	kg	45.6
Uran ab Erz (0.7% ^{235}U)	kg	460'000 2)
Bedarf erneuerbarer energetischer Ressourcen		
Buche	kg	14.3
Fichte	kg	16.3
Holz im Wald (trocken)	kg	20.3
Kiefer	kg	14.8
Potentielle Energie Wasser	TJ	1'000'000

1) Durchschnitt für europäische Versorgungsituation (UCPTE)

2) abzgl. Energieinhalt von spaltbaren ^{235}U das in der ganzen nuklearen Brennstoffkette nicht gespalten wird (rund 49%) Der gesamte Energieinhalt von Uranerz mit 0.7% ^{235}U beträgt 900'000 MJ.

Tab. E.5 Verwendeter Energieinhalt von Primärenergieträgern (energetische Ressourcen) in Megajoule pro Einheit.

Anhang F Resultate

In der folgenden Tabelle werden die Umweltbelastungen gemäss Eco-indicator 95+ und Umweltbelastungspunkten 97 (UBP) für die Entsorgungsoptionen für verschiedene Baumaterialien gezeigt. Angegeben ist auch, wie wichtig die verschiedenen Prozesse während der Entsorgung sind (Abbruchenergie, Abbruchpartikelemissionen, Sortierung und Beseitigung). Die Entsorgungsoptionen sind sortiert **in absteigender Reihenfolge** der Umweltbelastung gemäss Eco-indicator 95+.

Legende:

EI+ Umweltbelastung gemäss **Eco-indicator 95+** in Picopunkten (10^{-12} Punkten) pro Bilanzeinheit (meist pro kg).
UBP Umweltbelastung gemäss **Umweltbelastungspunkten 97** pro Bilanzeinheit (meist pro kg).
A) Relativer Beitrag durch **Abbruchenergie**
P) Relativer Beitrag durch **PM_{10}-Emissionen beim Abbruch**
S) Relativer Beitrag durch Transport & **Sortierung**
B) Relativer Beitrag durch Transport & **Beseitigung**
ER Entsorgt als Erstellungsabfall
RE Entsorgt als Renovationsabfall
AB Entsorgt als Abbruchabfall

Modulname in Ecoinvent	EI+ 10^{-12} Punkte pro Einheit	A) % des Totals	P) % des Totals	S) % des Totals	B) % des Totals	UBP UBP pro Einheit	A) % des Totals	P) % des Totals	S) % des Totals	B) % des Totals
> Vollgipsplatte/Gipsputz: __ __ AB in Beseitigung	43	0.19%	0.02%	0.00%	99.79%	7710	0.24%	0.11%	0.00%	99.65%
> Vollgipsplatte/Gipsputz: ER __ __ in Beseitigung	42.9	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	7680	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Gipsfaserplatte: ER __ AB in Beseitigung	37	0.22%	0.03%	0.00%	99.75%	6810	0.27%	0.13%	0.00%	99.60%
> Gipskartonplatte: __ __ AB in Beseitigung	36.1	0.23%	0.03%	0.00%	99.75%	6520	0.28%	0.14%	0.00%	99.58%
> Gipskartonplatte: ER __ __ in Beseitigung	36	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	6490	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Vollgipsplatte/Gipsputz: __ RE __ in Beseitigung	29.3	0.28%	0.03%	0.16%	99.53%	5260	0.35%	0.17%	0.20%	99.28%
> Gipsfaserplatte: __ RE __ in Beseitigung	25.2	0.32%	0.04%	0.18%	99.45%	4650	0.39%	0.19%	0.23%	99.19%
> Gipskartonplatte: __ RE __ in Beseitigung	24.8	0.33%	0.04%	0.19%	99.44%	4590	0.40%	0.19%	0.23%	99.18%
> Dichtungskitt (PUR): __ RE __ in Beseitigung	20	0.00%	0.00%	0.23%	99.77%	17000	0.00%	0.00%	0.06%	99.94%
> EPS (in Leichtputz u. -beton): __ RE __ in Beseitigung	16.1	0.81%	0.06%	1.71%	97.42%	15800	0.19%	0.06%	0.39%	99.37%
> Dichtungskitt (PUR): ER __ __ in Beseitigung	13.7	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	3890	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Dichtungskitt (PUR): __ __ AB in Beseitigung	13.6	0.00%	0.00%	0.33%	99.67%	11600	0.00%	0.00%	0.09%	99.91%
> Dispersionsfarbresten bzw. -Ablauge: ER RE __ in Beseitigung	12.6	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	2740	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Anstrich auf Mauer: __ __ AB in Beseitigung	12.3	0.00%	0.08%	0.28%	99.63%	12600	0.00%	0.07%	0.06%	99.87%
> EPS (in Leichtputz u. -beton): __ __ AB in Beseitigung	11.1	1.18%	0.09%	2.37%	96.36%	10800	0.27%	0.08%	0.55%	99.10%
> Anstrichresten bzw. -Ablauge: ER RE __ in Beseitigung	9.66	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	2970	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Alkydharzfarbresten bzw. -Ablauge: ER RE __ in Beseitigung	9.14	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	2680	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> PVC-Produkte: __ RE __ in Beseitigung	5.94	0.00%	0.00%	1.02%	98.98%	2010	0.00%	0.00%	0.70%	99.30%
> PVC-Produkte: ER __ AB in Beseitigung	5.88	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	2000	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Dispersionsfarbe auf Mauer: __ __ AB in Beseitigung	5.21	0.00%	0.19%	0.68%	99.13%	5340	0.00%	0.16%	0.15%	99.69%
> PVC-Dichtungsbahn: __ RE __ in Beseitigung	5.04	0.00%	0.00%	1.22%	98.78%	2120	0.00%	0.00%	0.67%	99.33%
> PVC-Dichtungsbahn: ER __ AB in Beseitigung	4.98	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	2110	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Elektrokabel: ER RE AB in Beseitigung	4.77	0.00%	0.00%	2.79%	97.21%	110'000	0.00%	0.00%	0.02%	99.98%
> PUR-Schaum: __ RE __ in Beseitigung	3.78	0.00%	0.00%	9.06%	90.94%	1840	0.00%	0.00%	4.20%	95.80%
> PUR-Schaum: ER __ AB in Beseitigung	3.44	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1760	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Elektrokabel: ER RE AB in stoffl. Verwertung	2.99	0.00%	0.00%	6.66%	93.34%	5220	0.00%	0.00%	0.71%	99.29%
> Bitumenbahn: __ RE __ in Beseitigung	2.84	0.00%	0.00%	2.16%	97.84%	1010	0.00%	0.00%	1.40%	98.60%
> Anstrich auf Holz: __ __ AB in Beseitigung	2.82	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1400	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%

> Bitumenbahn: ER __ AB in Beseitigung	2.78	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	997	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> EPS-Isolation flammgeschuetzt: __ RE __ in Beseitigung	2.26	0.00%	0.00%	20.36%	79.64%	1180	0.00%	0.00%	8.74%	91.26%
> Spanplatte (7.5%PU): __ RE __ in Beseitigung	2.01	0.00%	0.00%	3.32%	96.68%	748	0.00%	0.00%	2.06%	97.94%
> Spanplatte (7.5%PU): ER __ AB in Beseitigung	1.95	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	736	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Altholz behandelt: __ RE __ in Beseitigung	1.94	0.00%	0.00%	3.49%	96.51%	872	0.00%	0.00%	1.79%	98.21%
> Altholz unbehandelt: __ RE __ in Beseitigung	1.9	0.00%	0.00%	3.56%	96.44%	668	0.00%	0.00%	2.34%	97.66%
> Altholz behandelt: ER __ AB in Beseitigung	1.87	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	857	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Dispersionsfarbe auf Holz: __ __ AB in Beseitigung	1.84	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1040	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Altholz unbehandelt: ER __ AB in Beseitigung	1.83	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	653	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> EPS-Isolation flammgeschuetzt: ER __ AB in Beseitigung	1.8	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1080	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> PE-Dampfbremse flammgeschuetzt: __ RE __ in Beseitigung	1.77	0.00%	0.00%	3.54%	96.46%	1020	0.00%	0.00%	1.42%	98.58%
> PE/PP-Produkte: __ RE __ in Beseitigung	1.74	0.00%	0.00%	3.62%	96.38%	967	0.00%	0.00%	1.51%	98.49%
> PE-Dampfbremse flammgeschuetzt: ER __ AB in Beseitigung	1.71	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1010	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> PE/PP-Produkte: ER __ AB in Beseitigung	1.68	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	952	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> PE-Dichtungsbahn: __ RE __ in Beseitigung	1.58	0.00%	0.00%	3.97%	96.03%	1290	0.00%	0.00%	1.12%	98.88%
> PE-Dichtungsbahn: ER __ AB in Beseitigung	1.52	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1280	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Glasfaserkunststoff-Element: __ RE __ in Beseitigung	1.33	0.00%	0.00%	4.50%	95.50%	1210	0.00%	0.00%	1.14%	98.86%
> Verpackungskarton: __ RE __ in Beseitigung	1.33	0.00%	0.00%	5.97%	94.03%	528	0.00%	0.00%	3.45%	96.55%
> Glasfaserkunststoff-Element: ER __ AB in Beseitigung	1.27	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1200	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Elektrotechnische Anlagen: __ RE AB in Beseitigung	1.25	0.00%	0.00%	16.10%	83.90%	569	0.00%	0.00%	6.66%	93.34%
> Verpackungskarton: ER __ __ in Beseitigung	1.25	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	510	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Holzzementplatte: __ RE __ in Beseitigung	0.996	0.00%	1.00%	6.19%	92.81%	583	0.00%	1.51%	2.45%	96.04%
> bewehrter Beton: __ RE __ in Beseitigung	0.944	89.35%	1.05%	3.17%	6.42%	460	41.07%	1.91%	1.47%	55.55%
> bewehrter Beton: __ RE __ in stoffl. Verwertung	0.944	89.35%	1.05%	3.17%	6.42%	460	41.07%	1.91%	1.47%	55.55%
> Holzzementplatte: ER __ AB in Beseitigung	0.934	0.00%	1.06%	0.00%	98.94%	568	0.00%	1.55%	0.00%	98.45%
> bewehrter Beton: __ __ AB in Beseitigung	0.919	91.71%	1.08%	3.26%	3.96%	358	52.80%	2.46%	1.88%	42.86%
> bewehrter Beton: __ __ AB in stoffl. Verwertung	0.919	91.71%	1.08%	3.26%	3.96%	358	52.80%	2.46%	1.88%	42.86%
> Massiveisen: __ RE AB in Beseitigung	0.886	95.13%	0.00%	4.87%	0.00%	199	94.91%	0.00%	5.09%	0.00%
> Massiveisen: __ RE AB in stoffl. Verwertung	0.843	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	189	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
> Flachglas (in brennbarem Rahmen): __ RE AB in Beseitigung	0.783	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	658	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Kleinmetall (in brennbaren Verbunden): ER RE AB in Beseitigung	0.783	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	658	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Kunstputz: __ RE __ in Beseitigung	0.778	16.83%	1.27%	3.91%	77.99%	1150	2.54%	0.76%	0.59%	96.10%
> Kunstputz: ER __ __ in Beseitigung	0.607	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1110	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Kunstputz: __ __ AB in Beseitigung	0.586	22.35%	1.69%	5.51%	70.44%	800	3.67%	1.10%	0.91%	94.32%
> Zement (in Beton) und Mauermoertel: __ RE __ in Beseitigung	0.368	55.13%	2.70%	8.18%	33.99%	588	7.73%	1.50%	1.15%	89.63%
> Zement (in Beton) und Mauermoertel: __ RE __ in stoffl. Verwertung	0.368	55.13%	2.70%	8.18%	33.99%	588	7.73%	1.50%	1.15%	89.63%

> Zement (in Beton) und Mauermoertel: __ __ AB in Beseitigung	0.328	61.86%	3.03%	9.18%	25.94%	419	10.83%	2.10%	1.62%	85.45%
> Zement (in Beton) und Mauermoertel: __ __ AB in stoffl. Verwertung	0.328	61.86%	3.03%	9.18%	25.94%	419	10.83%	2.10%	1.62%	85.45%
> Mineralischer Putz: __ RE __ in Beseitigung	0.309	42.41%	3.21%	13.90%	40.48%	575	5.10%	1.53%	1.69%	91.67%
> unbewehrter Beton: __ RE __ in Beseitigung	0.305	66.42%	3.25%	9.86%	20.48%	324	14.00%	2.71%	2.09%	81.20%
> unbewehrter Beton: __ RE __ in stoffl. Verwertung	0.305	66.42%	3.25%	9.86%	20.48%	324	14.00%	2.71%	2.09%	81.20%
> Gipskartonplatte: __ __ AB in stoffl. Verwertung	0.299	27.37%	3.31%	0.00%	69.32%	112	16.42%	7.87%	0.00%	75.71%
> unbewehrter Beton: __ __ AB in Beseitigung	0.28	72.34%	3.54%	10.73%	13.38%	219	20.73%	4.02%	3.09%	72.16%
> unbewehrter Beton: __ __ AB in stoffl. Verwertung	0.28	72.34%	3.54%	10.73%	13.38%	219	20.73%	4.02%	3.09%	72.16%
> Mineralwolle: __ RE __ in Beseitigung	0.262	0.00%	3.79%	94.86%	1.35%	566	0.00%	1.56%	9.91%	88.54%
> Mineralischer Putz: __ __ AB in Beseitigung	0.256	51.10%	3.87%	11.86%	33.17%	403	7.28%	2.18%	1.70%	88.85%
> Betonkies: __ RE __ in Beseitigung	0.248	81.83%	4.00%	12.14%	2.02%	82.1	55.34%	10.72%	8.25%	25.68%
> Betonkies: __ RE __ in stoffl. Verwertung	0.248	81.83%	4.00%	12.14%	2.02%	82.1	55.34%	10.72%	8.25%	25.68%
> Betonkies: __ __ AB in Beseitigung	0.246	82.50%	4.04%	12.24%	1.22%	73.6	61.68%	11.95%	9.20%	17.17%
> Betonkies: __ __ AB in stoffl. Verwertung	0.246	82.50%	4.04%	12.24%	1.22%	73.6	61.68%	11.95%	9.20%	17.17%
> Gipskartonplatte: ER __ __ in stoffl. Verwertung	0.208	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	84.7	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Backstein: __ RE __ in Beseitigung	0.177	73.92%	5.60%	17.66%	2.82%	66.3	44.28%	13.28%	10.63%	31.81%
> Backstein: __ RE __ in stoffl. Verwertung	0.177	73.92%	5.60%	17.66%	2.82%	66.3	44.28%	13.28%	10.63%	31.81%
> Backstein: __ __ AB in Beseitigung	0.144	90.69%	6.87%	0.00%	2.44%	539	5.44%	1.63%	0.00%	92.92%
> Backstein: ER __ __ in stoffl. Verwertung	0.141	92.96%	7.04%	0.00%	0.00%	38.1	76.93%	23.07%	0.00%	0.00%
> Backstein: __ __ AB in stoffl. Verwertung	0.141	92.96%	7.04%	0.00%	0.00%	38.1	76.93%	23.07%	0.00%	0.00%
> Mineralischer Putz: ER __ __ in Beseitigung	0.125	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	527	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Zement (in Beton) und Mauermoertel: ER __ __ in Beseitigung	0.125	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	527	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Gipsfaserplatte: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0.0918	89.20%	10.80%	0.00%	0.00%	27.2	67.60%	32.40%	0.00%	0.00%
> Vollgipsplatte: __ __ AB in stoffl. Verwertung	0.0918	89.20%	10.80%	0.00%	0.00%	27.2	67.60%	32.40%	0.00%	0.00%
> Flachglas: __ RE __ in Beseitigung	0.0525	0.00%	0.00%	90.47%	9.53%	32.2	0.00%	0.00%	34.51%	65.49%
> Massiveisen: ER __ __ in Beseitigung	0.0432	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	10.1	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
> Mineralwolle: ER __ AB in Beseitigung	0.0135	0.00%	73.75%	0.00%	26.25%	510	0.00%	1.73%	0.00%	98.27%
> Holzzementplatte: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0.00992	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	8.8	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
> Mineralwolle: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0.00992	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	8.8	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
> Backstein: ER __ __ in Beseitigung	0.00353	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	501	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> EPS (in Leichtputz u. -beton): ER __ __ in Beseitigung	0.00353	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	501	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Flachglas: ER __ AB in Beseitigung	0.00353	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	501	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> unbewehrter Beton: ER __ __ in Beseitigung	0.00353	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	501	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Pneu-Waschgrubensediment pro tkm: ER RE AB in Beseitigung	0.00037	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	1.58	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
> Altholz unbehandelt: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> Anstrich auf Metall: __ __ AB in Beseitigung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> Betonkies: ER __ __ in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-

> EPS-Isolation flammgeschuetzt: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> Flachglas unbeschichtet: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> Glasfaserkunststoff-Element: ER __ __ in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> Massiveisen: ER __ __ in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> PE-Anstrichgebinde und Baufolien: ER RE __ in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> PE-Dampfbremse flammgeschuetzt: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> PE-Dichtungsbahn: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> PE-Rohre: ER __ __ in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> PVC-Dichtungsbahn: ER __ AB in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> PVC-Fensterrahmen: ER RE AB in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> PVC-Rohre und Profile: ER __ __ in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
> Vollgipsplatte: ER __ __ in stoffl. Verwertung	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-

Anhang G Anleitung Gipsentsorgung USA

Auszug aus Hinweisen des US-amerikanischen Verbandes der Gipshersteller (Gypsum Association) unter http://www.gypsum.org/topical.html#residential

Residential Job-Site Disposal of New Construction Waste Gypsum Board

The Gypsum Association recommends the following procedures for disposal of job-site new construction waste gypsum board on residential building lots based on information derived from scientific studies.

1. Waste gypsum board to be disposed of on site should be pulverized so that all pieces on the soil surface, including paper, will disintegrate in a reasonable period of time under local precipitation levels and other climatic conditions. This suggestion generally means that all pieces of waste gypsum board, including paper, placed on a residential building lot will be equal to or smaller than one-half inch square or in diameter.
2. Pulverized waste gypsum board may be placed *on the soil surface* or mixed with the *top layer of the soil*.
3. Waste gypsum board should be spread evenly over the entire lot where conditions of terrain and landscaping considerations permit.
4. Application may be at rates up to the equivalent of *22 tons per acre* [5.4 kg pro m^3].
5. Pulverized waste gypsum board should be disposed of only on lots or in areas that have *adequate drainage and aeration*, i.e., no standing water or anaerobic conditions should exist until the waste gypsum board has completely disintegrated.
6. State, local, and federal regulations and statutes should be considered so as to ensure compliance with all environmental and other governing ordinances and rules that allow these types of utilization for waste gypsum board or if special permission is necessary to dispose of construction waste gypsum in this manner.

Anhang H Kritik Entsorgung Gips

Abschrift Fax vom 02/02/2000 von Fixit AG Holderbank (Fixit erhielt den Fax gleichentags vom Bundesverband Gips):

Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V.
Birkenweg 13
D-64295 Darmstadt

Telefon: +49 (0) 6151 36 68 20
+49 (0) 6151 36 68 218
Telefax: +49 (=) 6151 36 68 222
eMail: bv.gips@t-online.de

An/To	Fixit AG
z.Hd./Attn.	Herrn Zentner
Von/From	Dr. Hans-Jörg Kersten
Datum/Date	31.01.00
Seiten/Pages	3

Ökobilanz Entsorgung

Sehr geehrter Herr Zehntner,

für die Zusendung des Entwurfes der Ökobilanz der Entsorgung möchten wir uns recht herzlich bedanken.

Positiv ist die auf Seite 31 gefundene Empfehlung zu werten:
"In Zukunft werden Reaktordeponiebetreiber hauptsächlich nur schwierig zu modellierende Abfälle erhalten. Im Zuge der sich daraus aufdrängenden Verfahrensänderung wäre auch überprüfenswert, ob Gipsabfälle – ... – nicht eher in eine Inertstoffdeponie eingelagert werden können. Im mikrobiellen Klima einer Inertstoffdeponie wäre eine Umsetzung zu Schwefelwasserstoff weniger wahrscheinlich."
Diese Empfehlung wird bereits seit Jahren von der Gipsindustrie vertreten, weil in Einzelfällen – jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen – ein Abbau von Gips zu Schwefelwasserstoff stattfinden kann.
Aufgrund eines vermeintlichen, aber nicht existenten Gefährdungspotentials der "Löslichkeit" bzw. des Parameters "Sulfat" wird die aufwendigere, aber eindeutig nicht sachgerechtere Deponierung in Reaktordeponien gefordert, teilweise mit nicht nachzuvollziehenden höheren Kosten für den Abfallerzeuger. Kann die Ökobilanz die Forderung nach der Ablagerung auf Inertstoffdeponien unterstreichen, sollte sie hierfür auch Verwendung finden.

Zuvor müsste aber das Berechnungsmodell grundlegend geändert werden, damit es glaubwürdig bleibt:
Derzeit geht man davon aus, dass, wie auf Seite 9 angeführt, pro Kilogramm Gips 134g SO2 in die Luft und 361g SO4 2- in den Wasserpfad gelangen. Ein Kilogramm Gips enthält 186,2g Schwefel, d.h. das Modell geht davon aus, dass Gips vollständig (!) über beide Pfade mit Anteilen von 67g Schwefel bzw. 120g Schwefel abgebaut wird.
Ähnliche Annahmen zur Abbaubarkeit trifft man in einem Betrachtungszeitraum von 150 Jahren auch für andere Stoffe wie Papier, Karton oder Holz (Seite 33).
Eine solche angenommene Abbaubarkeit kann man allerdings angesichts der Dauerhaftigkeit der Naturgipslagerstätten und der Beständigkeit von Gipsablagerungen anzweifeln. Es ist keinesfalls davon auszugehen, dass der gesamte Gipsanteil (nach 150 Jahren) abgebaut wird und die Deponie nach entsprechend langer Auflassungsdauer "gipsfrei" ist.

Bei der Zugrundelegung der genannten SO2-Fracht werden weitere systematische Fehler gemacht. Wie die Ökobilanz anführt, ergibt sich die angenommene Belastung durch den biochemischen Umsatz von Sulfat über die Sulfatreduktion. Diese Reaktion läuft vereinbacht schematisch wie folgt ab:

$$2C + CaSO_4 + H_2O \xrightarrow{\text{Bakterien}} CaCO_3 + CO_2 + H_2S$$

Im Rahmen der Ökobilanzierung ist es üblich, Verteilungen (Allokationen) durchzuführen.

Wie aus der Gleichung ersichtlich, müssen für eine Sulfatreduktion auch oxidierbare organische Stoffe (andere Abfälle) eingelagert sein. Diese reagieren im Verhältnis 2:1 (Kohlenstoff:Schwefel) und müssen deshalb ca. 2/3 der erzeugten Umweltbelastungen zugeschrieben bekommen. Eine einseitige Zuordnung – nur auf Gips bezogen – kann nicht Ergebnis der Ökobilanz sein, die eine statische Zusammensetzung des Deponiegutes (Transferkoeffizienten, S. 33) annimmt. Selbst unter Einbeziehung des (meist schwer abbaubaren) organischen Anteils der Gipsprodukte, ausgedrückt als TOC (ca. 0.1M.-% bei Gips-Wandbauplatten, ca. 0.1 – 0.3 M.-% in Gipsputzen, ca. 1.4 – 2.0 M.-% in Gips-kartonplatten), ergibt sich keine "Alleinwirkung" der Deponierung von Gipsabfällen.

Die angegebenen Faktoren sind deshalb hinsichtlich der Quantifizierung einseitig und von der Grössenordnung falsch definiert und stehen eindeutig nicht in Einklang mit der für die Ökobilanz heranzuziehenden Norm EN ISO 1404 (Sachbilanz), die zu Allokationen aussagt: "Im Rahmen einer Studie müssen Prozesse gekennzeichnet werden, die mit anderen Produktsystemen gemeinsam benutzt werden".

Zur oben genannten Gleichung müssen noch folgende Hinweise beachtet werden:

H2S kann aus Gips grundsätzlich nur im anaeroben, wässrigen Milieu gebildet werden. Thermodynamisch ist Sulfat die stabilste Oxidationsstufe des Schwefels.

H2S entsteht inder vorliegenden wässrigen Phase nicht in pH-Bereichen unter pH 5 bzw. oberhalb pH 9. Letzterer pH-Wert ist für mineralische Bauabfälle, die meist zusammen mit Gips in die Entsorgung kommen, jedoch üblich, ebenso wie für Aschen aus Kehrichtverbrennungsanlagen, die ebenfalls alkalisch reagieren und in jedem Fall weiter abgelagert werden. Bei Reaktordeponien kann über deponietechnische Massnahmen wie die ph-Kontrolle (Kalkung) selbst in kritischen Fällen eine Schwefelwasserstoffbildung noch künstlich unterbunden werden, wenn diese z.B. *entgegen dem Stand der Technik* (Basis- und Oberflächenabdichtung) einem massiven Wasserzutritt oder Staunässe unterliegen und keine Monobereiche für Bauabfälle vorgesehen sind.

Die Aussage, dass H2S frei wird, hängt auch massgeblich von gegenläufigen Reaktionen ab. So kann z.B. Schwefel bei parallel ablaufenden chemischen Oxidationen entstehen.
Auch erfolgt, wie in einer Sonderabfalldeponie (Hogeneggelsen, Deutschland) nachgewiesen, bei Gegenwert von löslichen Metallen durchaus die Sulfidfällung mit Immobilisierung der Schwermetallfrachten, was auf Seite 29 jedoch ohne näheren Beweis angezweifelt wird.

Damit ist das zugrundegelegte Modell der Abbaubarkeit äusserst kritisch zu sehen.

Die Beurteilung von Gipskartonplatten in der KVA, nach der (Seite 35) mit einem hohen Schlackeanfall und einer hohen Schwefelfracht zu rechnen ist, ist nicht sachgerecht. Wir weisen darauf hin, dass sogenannte Sprühabsorptionsrückstände aus der Entschwefelung, die auch in KVA entstehen und eine Senke für Calciumsulfat darstellen, in Kohlekraftwerken als Zusatz zu Entschwefelungsmitteln (Kalkstein, Kalkhydrat o.ä.) eingesetzt werden und damit in verwertbaren, naturgipsidentischen REA-Gips umgewandelt werden. Insofern können im Kraftwerksbetrieb diese, ggf. auch mit erhöhtem Gipsanteil entstehenden Entschwefelungsrückstände, zur Wiederverwertung (Gipsrecycling) genutzt werden.

Wir regen daher an, mit der ETH Zürich folgende Dinge zu diskutieren:

1. Wie lässt sich die Frage des Zusammenwirkens einzelner Abfälle diskutieren und welche Allokationsregeln müssen für die Aufstellung der Sachbilanz beachtet werden?

2. Welche Transferkoeffizienten sind bei einem ordnungsgemässen Deponiebetrieb unter Berücksichtigung der real zu erwartenden Abbauraten für Gips zugrundezulegen? Wie können lang bekannte deponietechnische Massnahmen berücksichtigt werden?

3. Kann die vorsorgliche Empfehlung der Deponierung auf Inertstoffdeponien durch Ökobilanzergebnisse gestützt werden?

Mit freundlichen Grüssen

BUNDESVERBAND DER GIPS-UND
GIPSBAUPLATTENINDUSTRIE e.V.

gezeichnet i.A. Dr. Hans-Jörg Kersten

Anhang I Literatur

Andela 1999 [42]	Andela Tool & Machine Inc., Herstellerbroschüre, "The Andela Gypsum Board Recycling System", Richfield Springs, USA, 1999
Bare et al. 1995	F. Bare, C. Bosshard, P.Contich, G. Jegher, G. Karlaganis, P.Leumann et al., "Empfehlungen und Grundlagen für Malerarbeiten", Mitteilung zum Gewässerschutz Nr. 16, BUWAL, Bern, 1995
Behrendt et al. 1998	S. Behrendt, R.Kriebich, S.Lundie, R.Pfister, M.Scharp, "Ökobilanzierung komplexer Elektronikprodukte", Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Springer Verlag, BErlin, 1998
BfS 1999 [43]	Angaben des Bundesamtes für Statistik (BfS), gemäss Zahlenspiegel der Schweiz 1999
Bildingmaier 1990	W.Bildingmaier, "Schwermetalle im Hausmüll - Herkunft, Schadwirkung, Analyse", Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 42, Dissertation Universität Stuttgart, Erich Schmid Verlag, 1990
Bilietewski et al. 1991	übernommen aus BUWAL SRU. Nr. 248 (dort keine Quelle angegeben)
Bilitewski 1993	B.Bilitewski (Hrsg.), "Recycling von Baureststoffen", EF Verlag, Berlin, 1993
Bilitewski et al. 1993	B. Bilitewski, A. Gewiese, S.Wagner, "Recycling von Baustoffen" in [Bilitewski 1993], p.3-68
Brahms et al. 1989	E. Brahms, G.Eder, B.Greiner, "Papier – Kunststoff – Verpackungen – Eine Mengen- und Schadstoffbetrachtung", UBA-Berichte 1/89, Verlag E.Schmidt, Berlin, 1989
Brandl 1999	Persönliche Mitteilung von H. Brandl, mikrobiologisches Institut der Universität Zürich, vom 23.9.99
Builder 1999	[44]M. Power, "Time Bomb" in Bulder Monthly, Juni 1999
BUWAL 1996	R. Kettler et al., “Abfallstatistik 1994" Umwelt-Materialien Nr. 52, BUWAL, Bern, 1996
BUWAL 1997a [45]	"Verwertung und Untertagedeponierung sind die bedeutendsten Behandlungsarten", Buwal Bulletin Nr.3, 1997
BUWAL 1997b	BUWAL, "Umwelt in der Schweiz", Bern, 1997
BUWAL 1997c	BUWAL, "Richtline für die Verwertung mineralischer Bauabfälle", Bern, Juli 1997
BUWAL 1998	G. Brand, A. Scheidegger, O. Schwank, A. Braunschweig, "Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 1997", Vorabdruck der gleichnamigen BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297, ÖBU, Februar 1998

---

42 im Internet unter http://www.recycle.net/recycle/Equipment/andela/drywall.html, siehe auch http://www.tiqsons.com/tiqsons/images/glass.pdf (Broschüre "Glass & Gypsum Board Recycling Systems")

43 im Internet unter http://www.zahlenspiegel.ch/98_99d/bw/gs_bw01a.gif (Bauwirtschaft) und http://www.zahlenspiegel.ch/98_99d/bw/zs_bw02.xls (Wohnungsbau)

44 im Internet unter: http://builder.hw.net/monthly/1999/jun/debris/ bzw. http://builder.hw.net/monthly/1999/jun/debris/chart2.gif

45 im Internet unter http://www.admin.ch/buwal/bulletin/1997/d3a12s04.htm

BUWAL 1999 [46]	BUWAL, "Abfälle und Altlasten", 1999
CML 1992	"Environmental life cycle assessment of products - Backgrounds", CML, NOVEM, RVIM, Netherlands, October 1992
Coutalides 1998	R. Coutalides, "Produkt- und Ökoprofil von Gips", im Auftrag der Rigips AG und Fixit AG, Rigips Mägenwil, Herbst 1998
Covelli 1999	Persönliche Mitteilung von B. Covelli, Tecova AG, Wohlen, vom 20.9.99
DAFSTB 1996	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, "Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe", Heft, Nr. 462, Berlin, 1996
Daily News 1998 [47]	B. Batten, "Raising a stink", Daily News (Naples, Florida), August 16, 1998
DEQ 1995 [48]	Oregon Department of Environmental Quality, Solid Waste Department, "1993/1994 Gypsum Market Profile August 1994", Dezember 1995
DOE 1999 [49]	"UK Emission factors database", Department of the Environment, Transport and the Regions, England, 1999
EBP 1995	Ernst Basler und Partner, "Grundlagen zum Einsatz alternativer Brennstoffe in Zementwerken", Zollikon, Januar 1995
ESU 1996a	R.Frischknecht, P.Suter, U.Bollens, S.Bosshart, M.Ciot, L.Ciseri, G.Doka, R.Hirschier, A.Martin, R.Dones, U.Gantner, "Ökoinventare von Energiesystemen", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich und PSI, Villigen, 3.Auflage, Juli 1996
ESU 1996b	P.Zimmermann, G.Doka, F.Huber, A.Labhardt, M. Ménard, "Ökoinventare von Entsorgungsprozessen", ETH Zürich, August 1996
ESU 1995	T. Weibel, A.Stritz, "Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich, September 1995
ExternE 1995	European Commission DGXII, Science, Research and Developpment JOULE, "ExternE, Externalities of Energy, Vol.5. Nuclear", Luxembourg, 1995
Fairweather et al. 1998 [50]	R. J. Fairweather and M. A. Barlaz, "Hydrogen Sulfide Production During Decomposition of Landfill Inputs," Journal of Environmental Engineering, ASCE, 124, 4, p. 353-361, 1998
FCSHWM 1998 [51]	Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, State University System of Florida, "1998-1999 Research Agenda", 1998
Fleischer 1993	G. Fleischer, "EDV, Elektronikschrott, Abfallwirtschaft", EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin 1993

46 im Internet unter http://www.admin.ch/buwal/d/themen/umwelt/abfaelle resp. ..../dk17o02.jpg

47 im Internet unter: http://www.naplesnews.com/today/local/d333064a.htm

48 im Internet unter: http://es.epa.gov/techinfo/facts/oregon/orgypsum.html

49 im Internet unter http://www.london-research.gov.uk/emission/webhtm.htm

50 Kurzfassung im Internet unter: http://www4.ncsu.edu/~barlaz/xabstrt.html#hydro

51 im Internet unter: http://www.eng.ufl.edu/home/fcshwm/rfp98.htm

Frankenhaeuser et al. 1994	M.Frankenhaeuser, F.E.Mark, "Heavy Metal Content of Polymers and their Volatility during Combustion. A Short Summary of the Effect of Emission", personal communication paper dated 28. March 1995
Frauenfelder 1998 [52]	M. Frauenfelder, "Smart Parts", WIRED Vol 6, Nr.8, August 1998
Frey 1998 [53]	B. Frey, "Geordnete Bahnen für die Altholz-Entsorgung", Buwal-Bulletin Nr. 4, 1998
Frischknecht et al. 1998	R.Frischknaecht, R. Heijungs, P. Hofstetter, "Einstein's Lessons for Energy Accounting in LCA", International Journal of Life Cycle Assessment (Int. J. LCA), Vol.3, No.5, p.266-272, 1998
FSHBZ 1995	Fachverband Schweizerischer Hersteller von Betonzusatzmitteln (FSHBZ), "Umweltverträglichkeit von Betonzusatzmitteln", 1.Version, November 1995
Gewiese 1998	A. Gewiese, "Kreislauftwirtschaft im Bauwesen", Ernst & Sohn, Berlin, 1998
Goedkoop et al. 1999 [54]	M. Goedkoop, R. Spriensma, R. Müller-Wenk, P. Hofststter, T. Koellner, T. Mettier, A. Braunschweig, R. Frischknecht, R. Heijungs, E. Lindeijer et al., "The Eco-indicator 99 - A damge oriented method for Life Cycle Assessment – Methodology Report", Pré Consultants, Ammersfoort, Holland, October 1999
Goedkoop 1995 [55]	M. Goedkoop, "The Eco-indicator 95 – Final Report", Universität Leiden (CML); Pré Consultants, Ammersfoort; Netherlands agengy for energy and the environment (NOVEM), Utrecht; et al., 1995
Graf 1994	Dr. Graf AG im Auftrag des BUWAL, "Regelungen über die Abfallentsorgung in Zementwerken – Thesenpapier der Arbeitsgruppe der Kantone Teilbericht1: Brennstoffe", Gerlafingen, März 1994
Griesshammer et al. 1996	R. Griesshammer, M. Buchert, "Nachhaltige Entwicklung und Stoffstrommanagement am Beispiel Bau", Werkstattreihe Nr. 96, Öko-Institut e.V., Freiburg, April 1996
GTK 1997 [56]	Schweizerische Geotechnische Kommission "Mineralische Rohstoffe der Schweiz" ISBN 3-907997-00-X, 1997
Gyp-Pack 1999 [57]	Gyp-Pack, Produktbeschrieb, 1999
Haber et al. 1990	W.Haber, H.Zimmermann, F.J. Dreyhaupt et al., "Abfallwirtschaft", Rat der Sachverständigen für Umweltfragen, Sondergutachten, Metzler-poeschel, Stuttgart, Sept. 1990
Heijungs et al. 1992	R. Heijungs, J.B. Guinée, G.Huppes, R.M. Lankreier, H.A. Udo de Haes, A. wegener Sleeswijk, A.M.M. Anems, P.HG. Eggels, R. van Duin, H.P. de Goede, "Environmental Life Cycle Assessment of Products, Backgrounds", report Nr. 9267, CML, Leiden, 1992
Helfer 1999	persönliche Mitteilung von F. Helfer, Maag Technik AG, Dübendorf, 23. Februar 1999

52 im Internet unter: http://www.wired.com/wired/6.08/materials.html

53 im Internet unter http://www.admin.ch/buwal/bulletin/1998/d4a22s01.htm

54 Bericht im PDF-Format im Internet erhältlich unter: http://www.pre.nl/eco-indicator99/ei99-reports.html

55 Eine sehr lesbare, kurze Beschreibung des methodischen Vorgehens beim Eco-indicator95 findet sich im Internet unter: http://www.pre.nl/eco-ind.html

56 Abstract im Internet unter: http://eurasia.ethz.ch/~gtk/mr_buch/inhalt.html , Kontakt: gtk@erdw.ethz.ch

57 im Internet unter http://www.gyp-pack.com/features.htm

Hellweg et al. 1998	S. Hellweg, M. Binder, K. Hungerbühler, "Model for an environmental evaluation of waste treatment processes with the help of life cycle assessment", p. 241-251, in Proceedings from the international workshop on Systems Engineerging Models for Waste Management in Gothenburg, Sweden 25-26 February 1998, part 2, Swedish Environmental Protection Agency, AFR-report 229, November 1998
Hochbauamt 1998	Hochbauamt Kanton Zürich, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich (Hrsg.), "Ökologisch Bauen, Merkblätter nach Baukostenplan (BKP) für Ausschreibungen", Zürich, Mai 1998
Ibold 1993	H. Ibold, "Möglichkeiten und Grenzen des Elektronikschrott-Recyclings", in [Fleischer 1993, p.291-305]
IFEU 1991	B.Franke, J.Gierich, F.Heeinstein, A.Franke, F.Knappe, "Bewertung verschiedener Verfahren der Restmüllbehandlung in Wilhelmshaven", Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg, Jan. 1991
IFEU 1992	B.Franke, A.Franke, F.Knappe, "Vergleich der Auswirkngen verschiedner Restmüllbehandlung auf die Umwelt und die menschliche gsundheit - Endbericht", Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Hedelberg, Nov 1992
IP Bau 1991	U. Mauch, P. Spoerli, N. Egli, T. Schilter, A. Aebersold, "Recycling – Verwertung und Behandlung von Bauabfällen", INFRAS, Bundesamt für Konjunkturfragen, IP Bau, EDMZ-Nr. 724.476.d, Bern, 1991
Jensen 1997 [58]	Allan Astrup Jensen, "Dioxins - Sources, Levels and Exposures in Denmark", Danish Environmental Protection Agency, dk-Teknik, 20 Oct. 1997
Jungbluth 1997	N. Jungbluth, "Life-Cycle-Assessment for Stoves and Ovens", UNS Working Paper No. 16, Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften (UNS), ETH Zürich, August 1997
Jungbluth 1999	N. Jungbluth, Doktorarbeit an der ETH Zürich, Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften UNS, erscheint demnächst
Kasser et al. 1995	U. Kasser, M .Pöll, "Graue Energie von Baustoffen", Büro für Umweltchemie, Zürich, 1. Auflage, Mai 1995
Kesler 1997 [59]	S.E. Kesler, Vorlesungsunterlagen "Mineral Resources, Economics and the Environment", 1997
Knechtli 1997 [60]	P.Knechtli, "Der Preis-Schredder rumort an der Altholz-Front", SonntagsZeitung, 14. Februar 1997
Kreidler 1993	Erwin Kreidler (AGW), "Baustoffe im optimierten Güterkreislauf", Unterlagen zum Kurs Nr. 33 der Technischen Forschungs- und Beratungstelle der Schweizerischen Zementindustrie (FTB), Wildegg, 31. März 1993
Kurkowski et al. 1997 [61]	H. Kurkowski, U.Pentzel (beide DEUTAG remex, Duisburg), "Einfluss der Aufbereitungstechnologie auf die Eigenschaften des rezyklierten Zuschlags", Darmstädter Massivbau-Seminar 18, 1997

58 im Internet unter http://irptc.unep.ch/pops/DENDIOX.html

59 im Internet unter: http://elvis.neep.wisc.edu/~neep602/FALL97/lecture4.html

60 Im Internet unter http://www.peterknechtli.ch/altholzpreise.htm

61 im Internet unter http://www.b-i-m.de/Public/deutag_remex/damasemkurkowski.htm

Lichtensteiger et al. 1998	T.Lichtensteiger (Hrsg.), P. Baccini, et al., "Ressourcen im Bau", Unterlagen zum Weiterbildungskurs und Workshop in Leuenberg, 2. -4. 9. 1997, EAWAG, ETH, ”HCB, vdf Verlag, 1998
Lichtensteiger 1999	Persönliche Mitteilung von Th. Lichtensteiger, EAWAG, vom November 1999
Lorenz et al. 1998	W. Lorenz, W. Gwosdz, "Bewertungskriterien für Industrieminerale, Steine und Erden – Teil 2: Karbonat- und Sulfatgesteine", Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in der BRD, Hannover 1998
Mark et al. 1994	F.E.Mark, R.Martin, "The Role of Plastics in municipal solid waste combustion", technical paper No. 8004 of APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe), Brussels, 1994
Mark et al. 1995	F.E.Mark, R.Martin, "Energy recovery - Analysis of plastics in municipal solid waste", technical paper No. 8010 of APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe), Brussels, Feb. 1995
Maystre et al. 1994	L - Y, Maystre, V. Duflon, Th. Diserens, D. Leroy, J. Simos, F. Viret, "Déchets urbains - Nature et caractérisation", Presses Politechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 1994
Meadows et al. 1992	Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers, "Beyond the Limits", Earthscan Publications, London, 1992
Mesters et al. 1997 [62]	K. Mesters, H. Kurkowski, "Dichtesortierung von Recycling-Baustoffen mit Hilfe der Setzmaschinentechnik", Aufbereitungs-Technik 38 (1997) Nr.10
Monteil 1995	M. Monteil, "Sonderabfälle in der Schweiz 1993", Umwelt-Materialien Nr. 43, BUWAL, 1995
Müller 1998 [63]	Ch. Müller, "Anforderungen an Werkstoffe für kreislaufgerechtes Bauen", Vortrag, gehalten auf dem 20. Aachener Baustofftag, 3. März 1998
Müller-Wenk 1998	R. Müller-Wenk, "Depletion of abiotc resources weighted on base of 'virtual' impacts of lower grade deposits used in future", IWÖ, Diskussionsbeitrag Nr. 57, Universität St. Gallen, März 1998
News Times 1997 [64]	Dave Dunleavy, "City may sue haulers over dump odor", The News Times, Local News, 26. Februar 1997
Nussbaumer 1990	T. Nussbaumer (Hrsg.), "Energetische Nutzung von Holz, Holzreststoffen und Altholz", Erstes Holzenergiesymposium vom 25. Oktober 1990, ETH Zürich, ENET, 1990
Offermann 1988	H. Offermann, "Recycling von Bauschutt - Technische und ökonomische Kriterien beid er Verfahrensauswahl", in Mitteilungen aus dem Fachgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft, Heft 7, Kuhne (Hrsg.), Universität-gesamthochschule Essen, 1988
Paterna et al. 1995	J.-C.Paterna, R.Hunziker, "Betrachtung allgemeiner und produktspezifischer Umsetzungsprozesse im Reaktordeponiekörper & Prozesskettenanalyse einer Deponie

62 im Internet unter http://www.b-i-m.de/Public/Deutag_remex/deutag_remex1097.htm

63 im Internet unter http://www.b-i-m.de/Public/ibac/BTAachenanforder.htm

64 im Internet unter: http://www.newstimes.com/archive97/feb2697/lcg.htm , s. auch http://www.newstimes.com/archive96/dec1996/lcd.htm

mit Gasverwertung am Beispiel Elbisgraben (BL)", unveröffentlichte Semesterarbeit in der Gruppe Energie–Stoffe–Umwelt, Laboratorium für Energietechnik, Institut für Energiesysteme, ETH Zürich, 1995

Pitt 1999 [65] "Planet Earth and the new Geosciences - Unit 11: Gifts from the Earth: Mineral Resources", 1999

PVC 1998 [66] Mitteilungen der Östereicher PVC-Industrie, "PVC-Rohre mit bis zu 60 Prozent Recyclatanteil", Ausgabe Nr.17, November 1998

Rentz et al. 1997 O.Rentz, F. Schultmann, M. Ruch, V. Sindt (Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung DFIU, Universität Karlsruhe), "Demontage und Recycling von Gebäuden – Entwicklung von Demontage- und Verwertungskonzepten unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit", Ecomed Verlag, 1997

Ruch et al. 1993 M.Ruch, J.Hamidovic, M.Nicolai, Th.Spengelr, S.Valdivia, F.Schultmann, O.Rentz, "Vermeidung, Verwertung und Entsorgung von Baurestmassen bei Abbruchmassnahmen", in [Bilitewski 1993], p.189-200

Schachermayer et al. 1998 E. Schachermyer, T. Lahner, P.H. Brunner, "Stoffflussanalyse und Vergleich zweier Aufbereitungsanlagen für Baurestmassen", Umweltbundesamt Österreich, TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Mongraphie Band 99, Wien, 1998

Schenk 1999 persönliche Mitteilung von Karina Schenk, BUWAL, Abt. Gewerbeabfälle, vom 28. Juni 1999

Schneeberger 1999 K. Schneeberger, "Kunststoffe in der Schweizer Bauindustrie", Praktikumsarbeit ETH Zürich bei DOW Europe S.A., Horgen, Februar 1999

Schultmann 1997 F. Schultmann, "Vermeidung, Verwertung und Entsorgung von Baurestmassen", in "Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) - Ausgewählte Themen", p .7-9, Sept. 1997

Schwarz 1998 J. Schwarz, "Ökologie im Bau, Entscheidungshilfen zur Beurteilung und Auswahl von Baumaterialien", 4. Auflage, Haupt Verlag, 1998

SIA D 0123 1995 SIA Dokumentation D 0123, "Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten, SIA Zürich, September 1995

SIA D 093a U.Kasser, D. Ammann, "SIA Dokumentation D 093: Deklarationsraster für ökologische Merkmale von Baustoffen - Interpretationshilfen für Anwender", Oktober 1992

SIA D 093b U.Kasser, M.Pöll, K.Graffe "SIA Dokumentation D 093: Deklaration ökologischer Merkmale von Bauprodukten – Erläuterung und Interpretation", Neubearbeitung November 1997

Spreng et al. 1995 D. Spreng, G. Doka, I. Knoepfel, "Graue Energie: Energiebilanzen von Energiesystemen", vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, 1995

Stahel et al. 1987 R. Stahel, B. Schuler, E. Ledergerber, "Altholz - eine vernachlässigte Ressource", NFP 12 'Holz, erneuerbare Rohstoff- und Energiequelle' des Schweizerischen Nationalfonds, Projekt-Nr. 4.633-0.83.12, Verlag Rüegger, 1987

65 im Internet unter: http://blackbird.eps.pitt.edu/pe_book/c_xi/chap11.html

66 im Internet unter http://www.pvc.at/d/news/o_news17.htm

Staub 1999	Persönliche Mitteilungen von Peter Staub, Geschäftsführer Abbruch-, Aushub- und Recycling-Verband Schweiz (ARV) am 25. Januar 1999
Stumpf 1994	K.Stumpf, "Kunststoffrecycling in der Schweiz - eine naturwissenschaftliche, technologische und ökonomische Betrachtung", Bericht Nr. 231, EMPA Dübendorf 1994
Tellenbach 1995	M. Tellenbach, "Abfallverbrennung in Zementwerken: Sinnvolle Verwertung oder gefährliche Konkurrenz für die Entsorgungsanlagen", BUWAL-Bulletin 4/45, p.30-32, Bern 1995
Textor 1999	Persönliche Mitteilung von Hrn. Textor, Rytec AG, Münsingen, vom 20.9.99
Thalmann 1997 [67]	C. Thalmann, "Nicht-traditionelle Zuschläge werden aktuell", HCB Beton-Tagung 1997
Tillman 1991	D.A.Tillman, "Combustion of Solid Fuels and Wastes", Academic Press, 1991
TVA 1990	Technische Verordnung über Abfälle vom 10. Dezember 1990
TVA 1996	Technische Verordnung über Abfälle vom 10. Dezember 1990, Stand 1. April 1996
UBA 1998 [68]	S. Weihs, "Gesicherte Altlast ST 4: Rigips-Deponie Eselsbach", Umweltbundesamt Österreich, April 1998
van Beukering 1999 [69]	P.J.H. van Beukering, "Frontiers in Recycling: International trade of secondary materials: trade-offs in global recycling", VU, IVM, Holland, 1999
Von Arx 1995	Urs von Arx, "Bauprodukte und Zusatzstoffe in der Schweiz", Schriftenreihe Umwelt Nr. 245, BUWAL, 1995
Wagner et al. 1993	S.Wagner, M.Klupak, "Kostenvergleich zwischen dem kontrollierten Rückbau und dem klassischen Abbruch anhand eines Beispieles" in [Bilitewski 1993], p.321-329
Watzlawick 1983	P. Watzlawick, "Anleitung zum Unglücklichsein", Piper Verlag, München, 6. Auflage, 1983
Wrage 1993	B.Wrage, "Aufkommen und Sortierung von Baustellenabfällen" in [Bilitewski 1993], p.257-273
Worni 1993	Felix Worni, "Erfahrungen eines Recyclingbetonanbieters", Unterlagen zum Kurs Nr. 33 der Technischen Forschungs- und Beratungstelle der Schweizerischen Zementindustrie (FTB), Wildegg, 31. März 1993
Zeltner 1998	C.Zeltner, "Petrologische Evaluation der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen über Schmelzprozesse", Dissertation ETH Zürich (Nr. 12688), EAWAG Dübendorf, 1998

67 im Internet unter http://www.hcb.ch/html/know/betont97/5.htm

68 im Internet unter: http://www.ubavie.gv.at/umweltsituation/altlasten/alaverzeich/stm/st4.htm

69 Projektbeschrieb im Internet unter http://www.vu.nl/english/o_o/instituten/IVM/projects/phd-projects/fb_pieter.htm