

Schaffhauserstrasse 21
CH-8006 Zürich
+41 43 300 50 40
team@umweltchemie.ch
www.umweltchemie.ch

 büro für
umweltchemie

Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen

Für die Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich

Matthias Klingler, MSc Umweltingenieur EPFL
Daniel Savi, Dipl. Umweltnaturwissenschaftler ETH
Kapitel 3 zusätzlich: Gabor Doka, Doka Ökobilanzen

Auftraggeber:

David Hiltbrunner, Abteilung Abfall und Rohstoffe, Bundesamt für Umwelt,
Bern

Projektbegleitung:

Michael Pöll, Fachstelle nachhaltiges Bauen, Amt für Hochbauten, Zürich

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt
BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zürich, 5. Dezember 2019

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
Tabellenverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	7
Abkürzungen.....	8
1 ZUSAMMENFASSUNG	9
1.1 Prozessketten für die Entsorgung von Baustoffen	9
1.2 Vorabklärung zur Erweiterung des Ecoinvent-Modells für Inertstoffdeponien	10
2 PROZESSKETTEN FÜR DIE ENTSORGUNG VON BAUSTOFFEN	11
2.1 Ausgangslage	11
2.2 Aufgabenstellung und Vorgehen	11
2.3 Entsorgung von Bauabfällen: Stand der Technik.....	12
2.4 Systemgrenze	13
2.5 Aufbau der Prozesskette Entsorgung	13
2.5.1 Prinzip	13
2.5.2 Rückbau	14
2.5.3 Entsorgungsweg ab Baustelle	14
2.5.4 Entsorgungsweg ab Aufbereitungsanlagen	15
2.5.5 Entsorgung von Bauteilen	15
2.5.6 Transporte.....	15
2.6 Zuordnung der Baustoffe zu Baustoffgruppen	16
2.7 Entsorgungswege der Baustoffgruppen.....	22
2.7.1 Graphische Darstellung der Entsorgungswege.....	22
2.7.2 Armierungsstahl	22
2.7.3 Beton.....	22
2.7.4 Bodenbelag organisch.....	23
2.7.5 Dichtungsbahnen, Schutzfolien	24
2.7.6 Faserzement	25
2.7.7 Flachglas.....	25
2.7.8 Gipswerkstoffe.....	29
2.7.9 Gussasphalt	31
2.7.10 Holz und Holzwerkstoffe.....	31
2.7.11 Kies, Sand.....	34
2.7.12 Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche	35
2.7.13 Kunstharz-Fliessbeläge	37
2.7.14 Kunststoffe	38
2.7.15 Kunststoff-Rohre	38
2.7.16 Mineralwolle und Aerogel	39
2.7.17 Organische Dämmstoffe.....	40

2.7.18	Mörtel, Putze	40
2.7.19	Stahl.....	41
2.7.20	Nichteisenmetalle	42
2.7.21	Organisch-mineralische Verbundmaterialien	42
2.7.22	Undifferenzierte mineralische Baustoffe	43
2.7.23	Ziegel	44
2.8	Entsorgung von Bauteilen	45
2.9	Ökobilanzen von Rückbau und Entsorgungsanlagen	48
2.9.1	Hintergrunddaten.....	48
2.9.2	Rückbau	49
2.9.3	Transporte.....	57
2.9.4	Altholzaufbereitungsanlage	60
2.9.5	Bausperrgutaufbereitungsanlage.....	63
2.9.6	Betonbrechanlage	66
2.9.7	Glasaufbereitungsanlage.....	69
2.9.8	Mischabbruchaufbereitungsanlage.....	69
2.9.9	Deponie Typ B.....	73
2.9.10	Deponie Typ E.....	73
2.9.11	KVA.....	77
2.9.12	Kunststoffrohr-Sortierung	81
2.10	Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse.....	82
2.11	Ökobilanzergebnisse der Entsorgung der Baustoffgruppen.....	85
2.12	Anwendungsregeln für die Bilanzierung in der KBOB-Liste	89
2.13	Diskussion.....	91
2.13.1	Stoffliche Verwertung nach Baustoffgruppen.....	91
2.13.2	Etwas mehr als die Hälfte der Bauabfälle gelangen in ein Recycling.....	92
2.13.3	Bedeutung der Entsorgung abhängig vom Baustoff.....	93
2.13.4	Deponierung in Deponie Typ B systematisch unterbewertet.....	95
2.13.5	Vergleich zur Modellierung in Ecoinvent.....	96
2.13.6	Vergleich der Resultate mit der KBOB-Liste 2016	97
2.14	Ausblick.....	100
3	VORABKLÄRUNG ZUR ERWEITERUNG DES ECOINVENT-MODELLS FÜR DEPONIE	
	Typ B.....	101
3.1	Problemstellung	101
3.2	Analyse Ecoinvent-Deponiemodell für Deponien Typ B.....	101
3.3	Analyse Ecoinvent-Deponiemodelle für Reaktor- (Typ E) und Reststoffdeponien (Typ C).....	102
3.4	Konzept für die Erstellung eines verbesserten Modells der Deponie Typ B.	102
3.4.1	Mit bestehenden Modellen kompatibles Arbeitspunktemodell.....	102
3.4.2	Schwefelwasserstoff H ₂ S.....	103
3.4.3	Organischer vs. anorganischer Kohlenstoff	104
3.4.4	Benötigte Daten für die Erarbeitung eines verbesserten Modells.....	104
3.4.5	Vorhandene Daten	106
3.5	Fazit.....	111

4	LITERATUR	112
A	ANHANG	116
A.1	Daten aus den Controllingberichten der Stadt Zürich	116
A.2	Zuordnung der Prozessketten zu den Baustoffen.....	119
A.3	Diagramme der Prozessketten	127
A.4	Ökobilanz-Datensätze	134
A.5	Englische Übersetzung der Baustoffgruppen.....	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung der Baumaterialien zu Baustoffgruppen	18
Tabelle 2: Daten für Betonabbruch gemäss KAR-Modell (Rubli, 2016b)	23
Tabelle 3: Berechnung der aus der Schweiz exportierten Flachglasmenge.....	27
Tabelle 4: Abgelagerte Abfälle 2009 – 2015 in Tonnen	27
Tabelle 5: Bilanzierung der Ausgangsfraktionen aus der Glasverwertung	28
Tabelle 6: Entsorgungswege von Gipsabfällen (Rubli, 2014).....	29
Tabelle 7: Daten für Ausbauasphalt aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b).....	31
Tabelle 8: Daten aus Controllingberichten der Stadt Zürich.....	32
Tabelle 9: Jahresmenge der Aufbereitungsanlagen im Kanton ZH gemäss Jahresbericht 2015 des ARV	32
Tabelle 10: Entsorgungswege des Altholzes gemäss ak-Statistik des BAFU	33
Tabelle 11: Daten für Kies, Sand aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b).....	34
Tabelle 12: Tonnagen der Bauabfälle aus Rückbauten der Stadt Zürich, mit Abschätzung des mittleren Abfallaufkommens aus Rückbauten und Renovationen	36
Tabelle 13: Daten für Mischabbruch gemäss KAR-Modell (Rubli, 2016b) (Hiltbrunner, 2017)	43
Tabelle 14: Zusammensetzung von Bauteilen nach Baustoffgruppen	45
Tabelle 15: Häufigkeit von Abbruchverfahren	49
Tabelle 16: Nutzleistung verschiedener Abbruchverfahren.....	51
Tabelle 17: Zusammensetzung von Bauabfällen in Volumenprozent (Guerra et al., 2015).....	52
Tabelle 18: Abbruchverfahren und Nutzleistungen.....	53
Tabelle 19: Diesel und Energieverbrauch von Baumaschinen	53
Tabelle 20: Dieserverbrauch in kWh pro m ³ Material für verschiedene Abfallfraktionen	54
Tabelle 21: Dieserverbrauch (Endenergie) pro m ³ Bauabfall.....	54
Tabelle 22: Ermittlung mittleres Schüttgewicht von Bauabfall	54
Tabelle 23: Dieserverbrauch Rückbau pro Kilogramm Material aus Literaturrecherchen	55
Tabelle 24: Dieserverbrauch Rückbau pro Kilogramm Material Angaben Implenia Schweiz AG	55
Tabelle 25: Mittlere Nutzleistung gewichtet nach Fraktionen von Rückbaumaterial	56
Tabelle 26: Sachbilanzdaten Diesel, Verbrennung in Hydraulikbagger	56
Tabelle 27: Sachbilanzdaten Rückbau, hydraulischer Bagger, mittlerer Aufwand.....	57
Tabelle 28: Durchschnittliche Distanzen der Luftlinie für Aufbereitung und Beseitigung.....	58
Tabelle 29: Verhältnis zwischen Luftlinie und realen Routen	59
Tabelle 30: Mit der Anlagedichte berechnete Transportdistanzen für Aufbereitung und Beseitigung ...	59
Tabelle 31: Mittlere Transportdistanzen für Bauprojekte der Stadt Zürich	59
Tabelle 32: Mittlere Transportdistanzen für Aufbereitung und Beseitigung von Bauabfällen.....	60
Tabelle 33: Endenergieverbrauch des Holzshredders	61
Tabelle 34: Endenergieverbrauch Radbagger und Radlader	61
Tabelle 35: Umrechnung der Hilfsstoffe aus dem Aushubdatensatz auf die Altholzaufbereitung	62
Tabelle 36: Sachbilanzdaten.....	62
Tabelle 37: Energieverbrauch Aufbereitungsanlage inklusive Sortierbagger elektrisch.....	63
Tabelle 38: Ermittlung mittlere Schüttdichte von Bausperrgut.....	64
Tabelle 39: Endenergieverbrauch Radlader Bausperrgutsortierung	64
Tabelle 40: Umrechnung der Hilfsstoffe aus dem Aushubdatensatz auf die Bausperrgutsortierung....	65
Tabelle 41: Sachbilanzdaten Bausperrgutsortierung	65
Tabelle 42: Endenergieverbrauch Anlage Trockenaufbereitung Betonabbruch KIBAG	66
Tabelle 43: Endenergieverbrauch Anlage Trockenaufbereitung von Betonabbruch der Firma Eberhard (Tschümperlin et al., 2016).....	67

Tabelle 44: Umrechnung von Infrastruktur und Schmieröl aus dem Aushubdatensatz auf die Betonaufbereitung.....	67
Tabelle 45: Kosten Entsorgung Betonabbruch und RC-Granulat	68
Tabelle 46: Sachbilanz Betonabbruch in Betonbrechanlage.....	69
Tabelle 47: Energieverbrauch Anlage Trockenaufbereitung Mischabbruch KIBAG.....	70
Tabelle 48: Endenergieverbrauch Anlage Trockenaufbereitung von Mischabbruch der Firma Eberhard (Tschümperlin et al., 2016).....	70
Tabelle 49: Daten Endenergieverbrauch Aufbereitung Mischabbruch mit Nassverfahren	70
Tabelle 50: Kosten für die Entsorgung von Mischabbruch und Mischgranulat	71
Tabelle 51: Sachbilanz Mischabbruchaufbereitung	72
Tabelle 52: Sachbilanzdaten Deponierung Bauabfälle in einer Deponie vom Typ B	73
Tabelle 53: Bilanzierung der Baustoffe, die in eine Deponie vom Typ E gelangen können.....	76
Tabelle 54: Sachbilanzdaten Deponierung Bauabfälle in einer Deponie vom Typ E	77
Tabelle 55: Bilanzierung der Baustoffe, die in eine Verbrennungsanlage gelangen können.....	80
Tabelle 56: Sachbilanzdaten Verbrennung Bauabfälle in einer KVA	81
Tabelle 57: Sachbilanzdaten Kunststoffrohr-Sortierung.....	82
Tabelle 58: Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse	82
Tabelle 59: Ökobilanzergebnisse der Prozessketten für die Baustoffgruppen	87
Tabelle 60: Erläuterungen zum Flussdiagramm zur Ermittlung der Ökobilanz der Entsorgung.....	89
Tabelle 61: Anteil der Abfallmenge die stofflich verwertet wird.....	91
Tabelle 62: Baustoffgruppen und Anteile am Bauabfall aus dem Hochbau.....	92
Tabelle 63: Recyclinganteile nach Baustoffgruppen.....	93
Tabelle 64: Vergleich der Transportdistanzen dieser Arbeit mit den bestehenden Datensätzen.....	96
Tabelle 65: Vergleich Resultate dieser Studie mit KBOB-Daten (KBOB, 2016)	98
Tabelle 66: Datenverfügbarkeit von Sickerwasseranalysen.....	106
Tabelle 67: Vergleich erforderlichen Daten mit Grenzwerten VVEA für Deponien Typ B.....	108
Tabelle 68: Entsorgte Tonnagen aus Controlling Rückbauten Stadt Zürich	116
Tabelle 69: Transportdistanzen [km] aus Controlling Rückbauten Stadt Zürich	117
Tabelle 70: Anzahl Fahrten aus Controlling Rückbauten Stadt Zürich.....	118
Tabelle 71: Baustoffe der KBOB-Liste mit Zuordnung der anwendbaren Prozesskette.....	119
Tabelle 72: Tabelle der Benennung der Baustoffgruppen auf deutsch und auf englisch	134

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip der Prozesskette Entsorgung.....	11
Abbildung 2: Mögliche Entsorgungswege für Baustoffe ab der Baustelle	14
Abbildung 3: Mögliche Entsorgungswege der Fraktionen aus einer Aufbereitungsanlage.....	15
Abbildung 4: Entsorgungswege Armierungsstahl.....	22
Abbildung 5: Entsorgungswege Beton.....	23
Abbildung 6: Entsorgungsweg für organische Bodenbeläge.....	24
Abbildung 7: Entsorgungsweg Dichtungsbahnen und Schutzfolien.....	25
Abbildung 8: Entsorgungsweg für Faserzement.....	25
Abbildung 9: Entsorgungsweg für Flachglas.....	29
Abbildung 10: Entsorgungsweg von Gipswerkstoffen.....	30
Abbildung 11: Entsorgungsweg Gussasphalt.....	31
Abbildung 12: Entsorgungsweg Holz und Holzwerkstoffe.....	33
Abbildung 13: Entsorgungsweg von Kies und Sand.....	34
Abbildung 14: Entsorgungsweg der Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche.....	37
Abbildung 15: Entsorgungsweg Kunstharz-Fliessbeläge.....	38
Abbildung 16: Entsorgungsweg Kunststoffe.....	38
Abbildung 17: Entsorgungsweg Kunststoff-Rohre.....	39
Abbildung 18: Entsorgungsweg Mineralwolle und Aerogel-Vlies.....	40
Abbildung 19: Entsorgungsweg organische Dämmstoffe.....	40
Abbildung 20: Entsorgungsweg Mörtel, Putze.....	41
Abbildung 21: Entsorgungsweg für Stahl.....	42
Abbildung 22: Entsorgungsweg für Nichteisenmetalle.....	42
Abbildung 23: Entsorgungsweg für organisch-mineralische Verbundmaterialien.....	43
Abbildung 24: Entsorgungswege für undifferenzierte mineralische Baustoffe.....	44
Abbildung 25: Entsorgungsweg von Ziegeln.....	44
Abbildung 26: Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse für Primärenergie pro Kilogramm Abfall.....	83
Abbildung 27: Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse für Treibhausgase pro Kilogramm Abfall.....	83
Abbildung 28: Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse für Umweltbelastungspunkte pro Kilogramm Abfall.....	84
Abbildung 29: Anteile der Teilprozesse Transporte, interne Logistik und Verarbeitung an der aufgewendeten nicht-erneuerbaren Primärenergie der Entsorgungsprozesse.....	84
Abbildung 30: Ökobilanzergebnisse aller Prozessketten für die Treibhausgasemissionen.....	86
Abbildung 31: Auswertung der Quellen für die Treibhausgasemissionen in Prozessketten mit vergleichsweise hohen Treibhausgasemissionen.....	86
Abbildung 32: Ökobilanzergebnisse aller Prozessketten für die Umweltbelastungspunkte.....	87
Abbildung 33: Flussdiagramm zur Ermittlung der Ökobilanz der Entsorgung.....	90
Abbildung 34: Anteile Herstellung und Entsorgung an der Primärenergie nicht erneuerbar eines Baustoffs.....	94
Abbildung 35: Anteile Herstellung und Entsorgung an den Treibhausgasen eines Baustoffs.....	94
Abbildung 36: Anteile Herstellung und Entsorgung an den Umweltbelastungspunkten eines Baustoffs.....	95
Abbildung 37: Vergleich mit KBOB-Daten, Primärenergie nicht erneuerbar.....	97
Abbildung 38: Vergleich mit KBOB-Daten, Treibhausgasemissionen.....	99
Abbildung 39: Vergleich mit KBOB-Daten, Umweltbelastungspunkte.....	99

Abbildung 40: Entsorgungswege Armierungsstahl	127
Abbildung 41: Entsorgungswege Beton	127
Abbildung 42: Entsorgungsweg für organische Bodenbeläge	127
Abbildung 43: Entsorgungsweg Dichtungsbahnen und Schutzfolien	128
Abbildung 44: Entsorgungsweg für Faserzement	128
Abbildung 45: Entsorgungsweg für Flachglas	128
Abbildung 46: Entsorgungsweg von Gipswerkstoffen	129
Abbildung 47: Entsorgungsweg Gussasphalt	129
Abbildung 48: Entsorgungsweg Holz und Holzwerkstoffe	129
Abbildung 49: Entsorgungsweg von Kies und Sand	130
Abbildung 50: Entsorgungsweg der Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche	130
Abbildung 51: Entsorgungsweg Kunstharz-Fliessbeläge	130
Abbildung 52: Entsorgungsweg Kunststoffe	131
Abbildung 53: Entsorgungsweg Kunststoff-Rohre	131
Abbildung 54: Entsorgungsweg Mineralwolle und Aerogel-Vlies	131
Abbildung 55: Entsorgungsweg organische Dämmstoffe	131
Abbildung 56: Entsorgungsweg Mörtel, Putze	132
Abbildung 57: Entsorgungsweg für Stahl	132
Abbildung 58: Entsorgungsweg für Nichteisenmetalle	132
Abbildung 59: Entsorgungsweg für organisch-mineralische Verbundmaterialien	132
Abbildung 60: Entsorgungswege für undifferenzierte mineralische Baustoffe	132
Abbildung 61: Entsorgungsweg von Ziegeln	133

Abkürzungen

KAR	Kies-, Aushub- und Rückbaumaterialflüsse
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
KBOB-Liste	Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich, Herausgeber KBOB
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
UBP	Umweltbelastungspunkte
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VBSA	Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen

1 Zusammenfassung

1.1 Prozessketten für die Entsorgung von Baustoffen

Für alle Baumaterialien in der Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich wird die Entsorgungsphase derzeit aufgrund von Annahmen der Ersteller der jeweiligen Ökobilanzen bilanziert. Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die Entsorgungswege der verschiedenen Baustoffe genauer abzuklären und durchschnittliche Entsorgungsszenarien zu definieren, die möglichst praxisnah sind. Für die Entsorgungsphase von Baustoffgruppen werden die Entsorgungsszenarien anhand von Prozessketten beschrieben. Unter Baustoffgruppen werden Baustoffe zusammengefasst, die zusammen entsorgt werden und deren Behandlung in der Entsorgungswirtschaft gemeinsam erfolgt. Basis dafür bilden Interviews mit Akteuren der Entsorgungswirtschaft und Literaturangaben zur Situation in der Schweiz.

Die Entsorgungsphase umfasst mehrere Prozesse. Sie beginnt beim Rückbau von Bauwerken, setzt sich fort bei der Sortierung der Materialien in geeigneten Anlagen und endet in der Beseitigung in einer Deponie oder Verbrennungsanlage oder in einer aufbereiteten Fraktion, welche wieder für die Herstellung von Produkten eingesetzt werden kann. Welchen Weg ein Baustoff in der Entsorgung nimmt und welche Abfallbehandlungsverfahren in der Entsorgung eingesetzt werden, ist von mehreren Faktoren abhängig. Zum einen bestimmen die stofflichen Eigenschaften des Baustoffs seinen Weg, zum anderen die lokal verfügbare Entsorgungstechnologie und die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen. Es wird versucht, die Anteile der möglichen Entsorgungswege pro Baustoffgruppe in einer durchschnittlichen und für die Schweiz repräsentativen Prozesskette zu modellieren.

In der vorliegenden Arbeit wurden Prozessketten für 22 Baustoffgruppen erstellt. Für alle Baustoffgruppen wurde die Ökobilanz der Entsorgung berechnet. Allerdings gibt es für zahlreiche Baustoffgruppen baustoffspezifische Unterschiede in der Ökobilanz zu beachten. Solche Unterschiede treten immer dann auf, wenn ein nennenswerter Teil einer Baustoffgruppe in der Beseitigung verbrannt wird. Die Emissionen dieser Verbrennung sind stoffspezifisch. Für diese Baustoffgruppen wurde jeweils die Entsorgung für einen Baustoff – manchmal auch zwei – exemplarisch bilanziert. Für 130 der 213 Baustoffe in der KBOB-Liste wurden Ökobilanzen der Entsorgung erstellt, die unverändert verwendet werden können. Für 83 Baustoffe sind stoffspezifische Schritte in der Modellierung nötig. Für diese Arbeiten wird ein Ablaufschema vorgestellt. Dieses kann auch für die Ökobilanz der Entsorgung neuer Baustoffe in der KBOB-Liste verwendet werden. Für die zusätzlich in der KBOB-Liste vorhandenen 43 Bauteile wurde ein Vorschlag für die einheitliche Erstellung ihrer Entsorgungs-Ökobilanz entwickelt.

Zudem wurden Ökobilanzen für zehn Entsorgungsprozesse erstellt. Diese umfassen insbesondere den Rückbau, die Betonbrechanlage, die Mischabbruchaufbereitung, die Altholzaufbereitung und die Bausperrgutsortierung. Letztere allerdings mit einer leider sehr schmalen Datenbasis. Die Transporte von Abfällen in die Aufbereitung oder Beseitigung wurden anhand von mittleren Transportdistanzen in der Schweiz nach einem

konsistenten Ansatz hergeleitet. Die Ökobilanzen bauen auf den bestehenden Datensätzen des UVEK-Datenbestands auf, der wiederum auf Ecoinvent 2.2 basiert.

Die Abklärung der Prozessketten zeigt, dass der Anteil der stofflichen Verwertung von Bauabfällen stark variiert. Beton- und Mischabbruch, welche bezüglich Masse die wichtigsten Fraktionen im Abfallstrom sind, werden zu über 50% stofflich verwertet. Für die meisten Baustoffgruppen liegt dieser Anteil jedoch weit unter der Hälfte. Nur von den Altmetallen werden derzeit mehr als 80 % recycelt. Eine Gesamtrechnung mit Bezug zum gesamten Bauabfallaufkommen in der Schweiz ergibt eine Recyclingquote für Bauabfälle von 62 %.

In der Ökobilanz eines Baustoffs über seinen gesamten Lebenszyklus macht die Entsorgung nur bei einigen einen nennenswerten Anteil aus. Beim Beton ist der Energiebedarf der Entsorgung beträchtlich. Rund 20 % des Primärenergieaufwands im Lebenszyklus des Betons stammen aus der Entsorgung. Bei den Produkten aus Kunststoff sind die CO₂-Emissionen der Verbrennung bedeutend. Beispielsweise trägt die Entsorgung von organischen Dämmstoffen rund 40 % zu den Treibhausgasemissionen des gesamten Lebenszyklus bei. Viele Baustoffe gelangen in Deponien vom Typ B. Die Modellierung dieser Deponie in der Ökobilanz berücksichtigt keine stoffspezifischen Emissionen. Allerdings enthalten Abfälle, welche in Deponien des Typ B entsorgt werden, bis zu 5% organische Verunreinigungen. Dies führt vermutlich für einige Baustoffe zu einer Unterbewertung der Ökobilanz.

1.2 Vorabklärung zur Erweiterung des Ecoinvent-Modells für Inertstoffdeponien

Das Ecoinvent-Modell der Inertstoffdeponie berücksichtigt derzeit nur die Lasten für den Betrieb der Deponie. Es werden keine stoffspezifischen Emissionen modelliert. Solche sind jedoch für eine ganze Reihe von Baustoffen plausibel: Gips löst sich unter Wassereinwirkung über lange Zeiträume teilweise auf, organische Anteile werden ansonsten mineralischen Abfällen ausgewaschen. In Zusammenarbeit mit Gabor Doka wurde abgeklärt, welche Randbedingungen für die Erstellung eines stoffspezifischen Modells für die Deponie vom Typ B erfüllt sein müssten. Für die Erweiterung des Deponiemodells sind Informationen zur chemischen Zusammensetzung des Deponiekörpers sowie des Sickerwassers erforderlich. Die verfügbaren Daten wurden mit Deponiebetreibern und Ämtern abgeklärt und vorhandene Literaturquellen summarisch untersucht. Die Recherchen haben gezeigt, dass die Zusammensetzung des Sickerwassers relativ gut untersucht ist. Die Zusammensetzung des Deponiekörpers kann hingegen nur aus Literaturdaten und Analogieüberlegungen abgeschätzt werden. Dieselbe Situation bestand bereits bei der Erstellung der Ecoinvent-Modelle der Reststoff- und Reaktordeponie. Demzufolge sollte eine Erweiterung des Deponiemodells für Deponien Typ B grundsätzlich möglich sein.

2 Prozessketten für die Entsorgung von Baustoffen

2.1 Ausgangslage

Die Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich (KBOB / eco-bau / IPB, 2016), abgekürzt KBOB-Liste, umfasst Ökobilanzdaten für eine grosse Anzahl von Baustoffen. Die Ökobilanzergebnisse in der Liste werden für die Herstellung und die Entsorgung der aufgeführten Baumaterialien und Gebäudetechnikanlagen ausgewiesen. Für die Entsorgung ist die derzeit verfügbare Bilanzierung noch wenig repräsentativ. Es fehlen praxisnahe Entsorgungsszenarien für Baustoffe nach einem definierten Modell.

2.2 Aufgabenstellung und Vorgehen

Für alle Baumaterialien in der KBOB-Liste soll die Prozesskette in der Entsorgungsphase modelliert werden. Basis dafür bilden Interviews mit Akteuren der Entsorgungswirtschaft und Literaturangaben zur Situation in der Schweiz. Die Entsorgungsphase umfasst mehrere Prozesse. Sie beginnt beim Rückbau von Bauwerken, setzt sich fort bei der Sortierung der Materialien in geeigneten Anlagen und endet in der Beseitigung in einer Deponie oder Verbrennungsanlage oder in einer aufbereiteten Fraktion, welche wieder für die Herstellung von Produkten eingesetzt werden kann. Die neu erstellten Ökobilanzen stützen sich auf vorhandene Arbeiten, soweit diese für die heutige Situation in der Schweiz repräsentativ sind, auf Literaturdaten und Erhebungen bei den Betreibern von Anlagen.

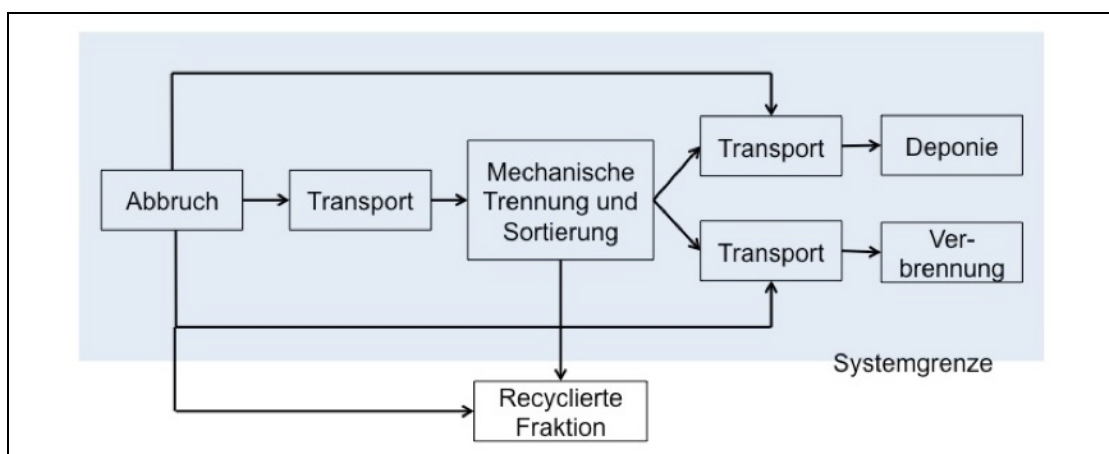


Abbildung 1: Prinzip der Prozesskette Entsorgung

Die Transporte in der Entsorgungskette werden für die Situation in der Schweiz ermittelt und in der Bilanz berücksichtigt. Die Aufbereitung von Materialien zur Wieder-

verwertung wird gemäss Ecoinvent-Methodik bilanziert. Das Prinzip der Prozesskette der Entsorgungsschritte lässt sich gemäss Abbildung 1 darstellen. Die Wiederverwendung von Baustoffen wurde im Rahmen dieser Studie nicht untersucht. Obwohl die Wiederverwendung in gewissen Bauprojekten (Carroz et al., 2019) schon angewandt wurde und es auch Bauteilbörsen für den Handel mit gebrauchten Bauteilen gibt, sind die Anteile von wiederverwendeten Baustoffen in den durchschnittlichen Entsorgungswegen minimal. Sie sind somit für die gegenwärtige Studie nicht relevant.

2.3 Entsorgung von Bauabfällen: Stand der Technik

Die Verordnung über die Verwertung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) (Bundesrat, 2015) gibt vor, dass Abfälle wenn möglich stofflich oder energetisch zu verwerten sind. Um eine hohe Verwertungsquote zu erreichen, ist eine Trennung der Bauabfälle wichtig. Gemäss Art. 17 der VVEA sollten Bauabfälle auf der Baustelle möglichst sortenrein getrennt werden. Sofern dies aus betrieblichen Gründen nicht möglich ist, müssen die Abfälle in Aufbereitungsanlagen getrennt werden. Um eine gute Trennung der Abfälle auf der Baustelle zu erreichen, wird in der Schweiz das Mehr-Mulden-Konzept des Schweizerischen Baumeisterverbands praktiziert. Rückbaumaterial wird auf der Baustelle möglichst gut getrennt und in verschiedenen Mulden gesammelt. Die Art und Menge der Mulden ist je nach Projektgrösse unterschiedlich und ist auch von den Platzverhältnissen vor Ort abhängig. Gemäss dem Mehr-Muldenkonzept werden Rückbaumaterialien in folgenden Mulden gesammelt:

- Einstoff-Mulden sind für nur eine Sorte Material z. B. Betonabbruch, Metalle, Holz vorgesehen.
- Mischabbruch-Mulden für gemischte rein mineralische Abfälle wie Betonabbruch, Backstein, Kalksandstein, Naturstein etc.
- Mulden für brennbares Material welches in der KVA entsorgt wird.
- Mulden für Bausperrgut für die Sammlung von unsortierten Bauabfällen. Bausperrgut muss in einer nachgeschalteten Aufbereitungsanlage in verschiedene Materialfraktionen getrennt werden.

Sonderabfälle und Gebäudeschadstoffe müssen ebenfalls getrennt gesammelt werden. Diese müssen allerdings schon vor dem eigentlichen Rückbau ausgebaut werden. Mineralische und brennbare Fraktionen, welche in Einstoffmulden gesammelt werden, können teilweise direkt in einer Deponie oder in der Verbrennung entsorgt werden. Für die stoffliche Verwertung sind jedoch auch bei sortenrein gesammelten Materialien weitere Aufbereitungsverfahren erforderlich. Diese Aufbereitungsverfahren werden in spezialisierten Aufbereitungsanlagen vorgenommen. Neben den Bausperrgut-Aufbereitungsanlagen gibt es Aufbereitungsanlagen für Bauschutt (Betonabbruch oder Mischabbruch), Altholz, Glas und Metalle.

2.4 Systemgrenze

Die Systemgrenze wird in Übereinstimmung mit den Vorgaben von Ecoinvent und der KBOB-Liste definiert. Die Entsorgung von Baustoffen umfasst den Rückbau, die Transporte (in die Aufbereitung oder Beseitigung), die Abfallaufbereitung sowie die Beseitigung in einer Deponie oder Verbrennungsanlage. Diese Etappen im Entsorgungsprozess entsprechen den Modulen C1 bis C4 gemäss SN EN 15804. Für Entsorgungswege, die in einer Verbrennung oder Deponie enden, wird der gesamte Aufwand inklusive Emissionen aller Prozesse zum Aufwand für die Entsorgung gerechnet. Für Entsorgungswege, welche zu einer Verwertung in einem neuen Produkt führen («Recycling») gilt die Definition der Systemgrenze aus «Regeln für Ökobilanzdaten im Baubereich gemäss der KBOB-Liste» (Frischknecht, 2015) und SN EN 15804 (SIA, 2013):

Der Aufwand für die Aufbereitung des Baumaterials wird zur Entsorgung gerechnet, bis das Material das Ende der Abfalleigenschaft erreicht hat. Das aufbereitete Material wird nicht mehr als Abfall betrachtet, wenn es mit folgenden Kriterien übereinstimmt:

- Das zurückgewonnene Material wird für bestimmte Zwecke verwendet.
- Es besteht ein Markt, charakterisiert durch einen positiven ökonomischen Wert, für das zurückgewonnene Material.
- Das zurückgewonnene Material erfüllt die technischen Anforderungen für die bestimmten Zwecke.
- Die Verwendung des zurückgewonnenen Materials führt insgesamt nicht zu schädlichen Umwelt- oder Gesundheitsfolgen.

Für die Bilanzierung bedeutet dies, dass wir alle Sortier- und Verarbeitungsschritte zur Entsorgung rechnen, bis ein marktfähiges Material gemäss obenstehender Definition vorliegt. Im Falle einer stofflichen Verwertung wird der Transport des Sekundärmaterials zum Empfänger und alle weiteren Verarbeitungsschritte bis zum Vorliegen eines neuen Produkts nicht zur Entsorgung gerechnet.

2.5 Aufbau der Prozesskette Entsorgung

2.5.1 Prinzip

Gemäss dem unter 2.2 gewählten Vorgehen erfolgt die Ökobilanzierung der Entsorgung von Baustoffen nach einem einheitlichen Prinzip. Alle Abfälle aus dem Rückbau durchlaufen die gleiche Prozesskette (Abbildung 1). Unterschiede im Entsorgungsweg von Baustoffen ergeben sich aufgrund der variablen Anteile, die aufbereitet oder verwertet werden, bzw. direkt in eine Deponie oder in eine Verbrennung gelangen. Je nach Material sind unterschiedliche Anlagen zur Aufbereitung von Bauabfällen relevant (z. B. Bausperrgutaufbereitungsanlagen, Bauschutttaufbereitungsanlagen, Altholzaufbereitungsanlagen etc.).

Die Prozesskette Entsorgung beginnt für alle Baustoffe mit dem Rückbau. Aufgrund der im Projekt vorgenommenen Recherchen zur Bauabfallentsorgung wurden die

Baustoffe der KBOB-Liste zu Baustoffgruppen zusammengefasst. Alle Baustoffe in einer Gruppe haben den gleichen Entsorgungsweg (Kapitel 2.6). Als Entsorgungsweg bezeichnen wir die Entsorgungsverfahren, die im schweizerischen Mittel für eine Baustoffgruppe verwendet werden. Der Entsorgungsweg bezeichnet auch, welche Anteile der Gesamtmenge in ein bestimmtes Entsorgungsverfahren gelangen. Zudem ist der Entsorgungsweg mehrstufig aufgebaut. Zunächst erfolgt der Rückbau (Kapitel 2.5.2), dann die Entsorgung ab Baustelle (Kapitel 2.5.3) und darauf die Sortierung in Aufbereitungsanlagen (Kapitel 0). Zum Entsorgungsweg gehören auch sämtliche Transporte zwischen den verschiedenen Entsorgungsverfahren (Kapitel 2.9.9).

2.5.2 Rückbau

Für den Rückbau werden Baumaschinen unterschiedlicher Grösse sowie handgeführte Werkzeuge eingesetzt. Dabei ist der Aufwand nicht nur abhängig vom Baustoff, sondern auch vom Bauteil und der Einbausituation. Deshalb ist es relativ schwierig, baustoffspezifische Ökobilanzdaten für den Rückbau zu erheben. Zudem sind kaum Daten für den Energieverbrauch von Baumaschinen vorhanden, welche nach Material differenziert sind. Aus diesen Gründen wurde bei der Bilanzierung des Rückbaus ein pragmatischer Ansatz verfolgt und ein Durchschnittswert pro Kilogramm Material berechnet d.h. die Ökobilanz des Rückbaus ist für alle Baustoffe und Bauteile nur abhängig von der Masse des Rückbaumaterials.

2.5.3 Entsorgungsweg ab Baustelle

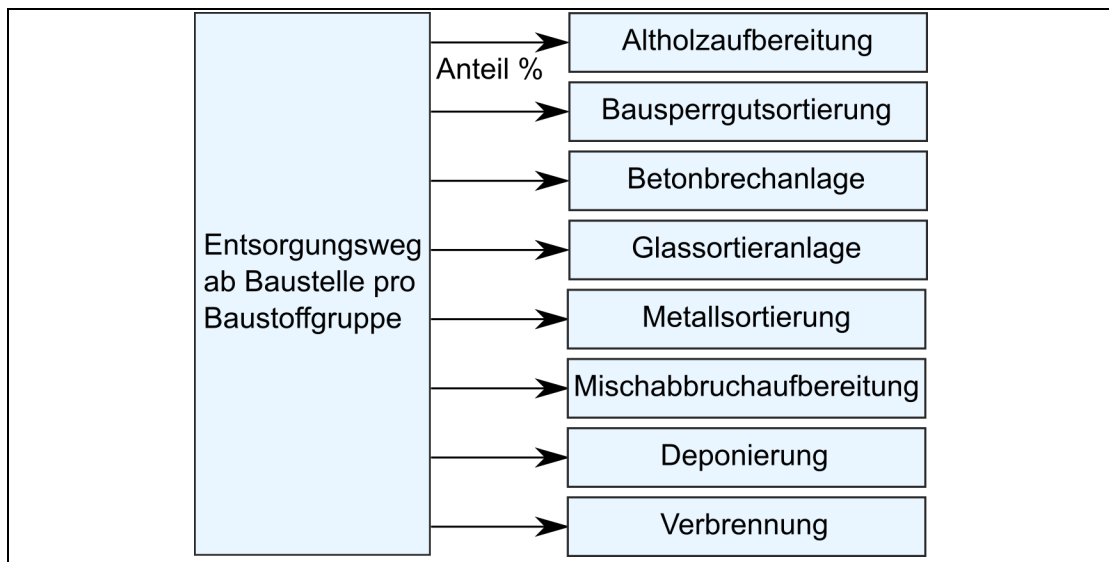


Abbildung 2: Mögliche Entsorgungswege für Baustoffe ab der Baustelle

Die Bauabfälle verlassen die Baustelle auf unterschiedlichen Wegen. Sie können einerseits direkt in die Beseitigung gelangen. Andererseits können die Bauabfälle zu einer Aufbereitungsanlage gefahren werden. Für die Modellierung von Prozessketten verwendeten wir die in Abbildung 2 aufgeführten Aufbereitungsanlagen und die Beseitigungsverfahren «Deponierung» und «Verbrennung». Die Deponierung kann in

Deponien vom Typ A-E erfolgen. Für die bilanzierten Baustoffe sind nur die Typen B und E relevant. Die Verbrennung kann in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA), Zementwerken oder Spezialverbrennungsanlagen, wie z. B. für Altholz, erfolgen. Für die Bilanzierung verwenden wir immer die Ecoinvent-Datensätze für die KVA.

2.5.4 Entsorgungsweg ab Aufbereitungsanlagen

Aufbereitungsanlagen trennen die Abfälle in verwertbare und nicht verwertbare Bestandteile auf. Aufbereitungsanlagen sind spezialisiert auf eine bestimmte Abfallfraktion, allenfalls können unterschiedliche, jedoch physikalisch ähnliche Abfälle auf derselben Anlage sortiert werden. Aufbereitungsanlagen können drei Arten von Fraktionen erzeugen, die vom Ausgang der Aufbereitungsanlage in weitere Verfahren gehen. Von der ersten Art sind fertig sortierte Wertstoffe, die direkt in ein Produktionsverfahren für ein Neuprodukt geliefert werden können. Beispiele dafür sind Glas in eine Glashütte, Holz zu einer Spanplattenproduktion oder Metalle in ein Schmelzwerk. Von der zweiten Art sind Abfälle, die in eine weitere Aufbereitungsanlage geliefert werden. Das können beispielsweise Fensterrahmen aus Holz sein, die in eine Altholzaufbereitungsanlage gehen. Von der dritten Art sind Abfälle zur Beseitigung in einer Verbrennung oder Deponie. Diese Verhältnisse werden in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

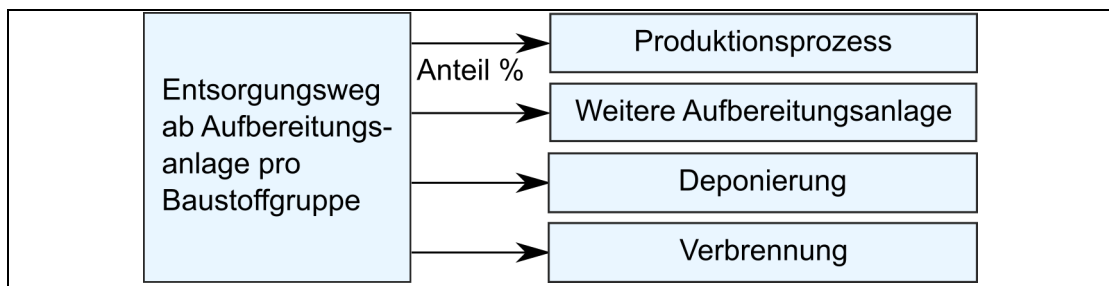


Abbildung 3: Mögliche Entsorgungswege der Fraktionen aus einer Aufbereitungsanlage

2.5.5 Entsorgung von Bauteilen

Neben den Baustoffen enthält die KBOB-Liste auch einige Bauteile wie beispielsweise Fensterprofile. Für Bauteile werden die Materialanteile aus den Ökobilanzdatensätzen ermittelt. Die Materialien im Bauteil werden dann den passenden Baustoffgruppen zugeteilt. Der Entsorgungsweg von Bauteilen setzt sich anteilmässig aus den Entsorgungswegen der enthaltenen Baustoffgruppen zusammen (Kapitel 0).

2.5.6 Transporte

Jeder Entsorgungsprozess bis hin zur Beseitigung ist mit einem Transport verbunden. Diese Transporte werden in der Modellierung berücksichtigt. Wie bereits im Kapitel 2.4 erwähnt, liegen Transporte von Wertstoffen, die aus der Aufbereitung hervorgehen, zur Produktionsstätte eines neuen Produkts nicht mehr innerhalb der Systemgrenze und werden nicht der Entsorgung angerechnet.

2.6 Zuordnung der Baustoffe zu Baustoffgruppen

Alle Baustoffe in der KBOB-Liste mit einem ähnlichen Entsorgungsweg wurden zu Baustoffgruppen zusammengefasst. Tabelle 1 zeigt diese Aggregation der Baustoffe aus der KBOB-Liste. Im Folgenden werden die mit der Einteilung verbundenen Überlegungen kurz erläutert.

Der Hauptanteil des Armierungsstahls gelangt zusammen mit dem Beton in eine Betonbrechanlage und wird dort aussortiert. Der Entsorgungsweg von Armierungsstahl unterscheidet sich deshalb von sonstigen Baustählen. Aus diesem Grund bildet Armierungsstahl eine eigene Baustoffgruppe.

Alle Materialien aus Beton wurden in der Baustoffgruppe Beton gruppiert. Im Unterschied zu anderen rein mineralischen Abfällen, die in der Regel in den Mischabbruch gelangen, kann ein höherer Anteil des Betons aus dem Rückbau recycelt werden. Die Qualität von Recyclingbeton aus reinem Betongranulat (RC-C Beton) ist vergleichbar mit jener von Primärbeton. Aus diesem Grund wird dieses Material bei Rückbauarbeiten oft in Einstoffmulden gesammelt, falls grössere Mengen an Betonabbruch anfallen.

Alle brennbaren Bodenbeläge ausser Parkett und Kunstharz-Fliessbeläge wurden unter der Gruppe «Bodenbeläge organisch» zusammengefasst. Organische Bodenbeläge werden in der Regel vor dem Abbruch des Gebäudes ausgebaut. Gemäss unseren Recherchen (siehe Kapitel 2.7.4) gelangen diese Beläge beim Rückbau in Mulden für brennbares Material oder Bausperrgut. Keiner der organischen Bodenbeläge wird in relevanten Mengen stofflich verwertet. Sie werden in den meisten Fällen in der KVA beseitigt. Parkettbodenbeläge hingegen wurden der Baustoffgruppe Holz und Holzwerkstoffe zugeordnet. Holzabfälle werden auf grösseren Baustellen meist separat in Einstoffmulden gesammelt (Kapitel 2.7.10)

Verschiedene Dichtungsbahnen aus Bitumen, flexiblen Polyolefinen, Synthetikschuk sowie Folien und Vliese aus Kunststoffen und Papier wurden unter der Baustoffgruppe «Dichtungsbahnen, Schutzfolien» zusammengefasst. Diese Baustoffe befinden sich in der Regel innerhalb eines Bauteils. Aus diesem Grund wurde davon ausgegangen, dass ein grösserer Anteil dieser Materialien nicht separat gesammelt wird und ins Bausperrgut gelangt.

Faserzementprodukte die heute rückgebaut werden, wurden in der Regel vor 1990 eingebaut und sind demzufolge asbesthaltig. Sie müssen separat ausgebaut und entsorgt werden. Aus diesem Grund ist auch eine stoffliche Verwertung ausgeschlossen. Sie bilden daher eine eigene Baustoffgruppe in der Entsorgung.

Der Baustoffgruppe Flachglas werden unbeschichtetes und beschichtetes Flachglas zugeordnet. Ein grosser Anteil der Flachglasabfälle gelangt in die Mulde für Bausperrgut, da das meiste Flachglas beim Rückbau mit den Fensterverglasungen entsorgt wird. Flachglas kann nur in gewissen Fällen separat rückgebaut werden (z. B. Fassadenverkleidungen aus Glas). Die KBOB-Daten für Isolierverglasungen werden den Bauteilen zugeordnet, da sie neben Glas aus einem Randverbund bestehen (Kapitel 2.7).

Gipswerkstoffe wurden einer eigenen Baustoffgruppe zugeordnet, da Gips gemäss VVEA möglichst sortenrein auf der Baustelle von anderen Bauabfällen getrennt werden soll. Im Laufe der Studie zeigte sich, dass diese Trennung in der Praxis nur

teilweise vorgenommen wird. Zu den Entsorgungswegen von Gipswerkstoffen sind aus früheren Untersuchungen spezifische Informationen bekannt (Kapitel 2.7.8).

Die Entsorgung von Gussasphalt wurde separat bilanziert. Im Hochbau ist Gussasphalt ein Baustoff mit sehr geringem Einsatzvolumen. Für die Entsorgung von Gussasphalt aus dem Hochbau sind keine eigenen Erhebungen bekannt. Aus Plausibilitätsüberlegungen und Gesprächen mit Branchenkennern resultiert die Annahme, dass er zusammen mit Ausbauasphalt entsorgt wird (Kapitel 2.7.9).

Sämtliche Baustoffe aus Massivholz und Holzwerkstoffen werden in einer Baustoffgruppe zusammengefasst. Die bekannten Daten lassen keine Unterscheidung zwischen Massivholz und Holzwerkstoffen bei der Modellierung der Entsorgungswege zu. Der überwiegende Anteil von Holzabfällen wird auf Baustellen separat in Einstoffmulden gesammelt (Kapitel 2.7.10).

In der Baustoffgruppe «Kies, Sand» werden die Entsorgungswege von Kies und Sand in ungebundener Form zusammengefasst. Zur Entsorgung dieser Baustoffgruppe liegen Informationen aus anderen Untersuchungen vor (Kapitel 2.7.11).

Die Entsorgung von Kleb-, Dichtstoffen und Anstrichen wird in einer Baustoffgruppe zusammengefasst. Alle Baustoffe welche zu dieser Gruppe gehören, werden nicht separat, sondern als Anhaftung an anderen Materialien entsorgt. Klebstoffe werden auf diversen Untergründen angewendet. So können sie zum Beispiel als Anhaftung auf Holz oder auf Gipswerkstoffen mit diesen Materialien entsorgt werden. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Entsorgungswege wurde für diese Baustoffgruppe ein Entsorgungsszenario auf Basis der Prozessketten der Trägermaterialien ermittelt.

Kunstharz-Fliessbeläge werden beim Rückbau nicht getrennt ausgebaut, da dies nur mit einem sehr grossen Aufwand zu bewerkstelligen wäre. Die Fliessbelägen gelangen deshalb als Verunreinigung in mineralische Abfallfraktionen. Sie werden deshalb einer eigenen Baustoffgruppe zugeordnet.

Für die Entsorgung von Kunststoffen aus dem Rückbau von Gebäuden sind keine materialspezifischen Informationen vorhanden. Deshalb wurden alle zu einer Baustoffgruppe aggregiert. Ausgenommen davon sind Kunststoffrohre. Diese werden gemäss Angaben von einem Entsorgungsbetrieb zu einem bedeutenden Anteil stofflich verwertet.

Beim Rückbau von Gebäuden fallen derzeit noch geringe Mengen an Dämmstoffen an. Gewisse Dämmstoffhersteller verwerten Dämmstoffabfälle in der Produktion. Allerdings handelt es sich bei den Abfällen in der Regel um Verschnittabfälle, die während dem Einbau der Dämmstoffe anfallen. Gemäss einer Untersuchung zur Entsorgung von Dämmmaterialien (Rubli, 2016a) gibt es bei den Dämmstoffen noch keine einheitliche Entsorgungspraxis. Mineralische Dämmstoffe sollten in der Regel in Deponien entsorgt werden. Allerdings gelangt ein erheblicher Anteil der Mineralwolle in die KVA. Deshalb wurden Mineralwolle und Aerogel-Vlies einer separaten Baustoffgruppe zugeordnet. Mineralische Dämmstoffe wie Schaumglas oder Blähperlit, welche ausschliesslich in Deponien entsorgt werden, wurden der Baustoffgruppe «undifferenzierte mineralische Baustoffe» zugeordnet. Organische Dämmstoffe hingegen werden fast ausschliesslich thermisch verwertet (KVA). Deshalb werden sie der Baustoffgruppe organische Dämmstoffe zugeordnet.

Alle Putze, Mörtel sowie mineralische Kleber werden in einer Baustoffgruppe aggregiert. Es wird davon ausgegangen, dass diese Baustoffe nicht separat ausgebaut

werden. Ein separater Rückbau ist nur bei asbesthaltigen Putzen oder Fliesenklebern erforderlich. Es wird angenommen, dass Putze, Mörtel und mineralische Kleber zusammen mit den Beton-, Mischabbruch- oder Gipsabfällen entsorgt werden.

Metalle werden den Baustoffgruppen Stahl und Nichteisenmetalle zugeordnet. Gemäss den Daten aus anderen Untersuchungen ist die Verwertungsquote bei Bauabfällen aus Stahl etwas höher als bei den anderen Metallen (Kapitel 2.7.19 und 2.7.20). Bei den Nichteisenmetallen sind keine materialspezifischen Verwertungsquoten aus dem Baubereich bekannt.

Unter der Baustoffgruppe «organisch-mineralische Verbundmaterialien» wurden Baustoffe gruppiert, die hohe Anteile von organischen sowie mineralischen Bestandteilen enthalten. Sie weisen in Bezug auf die Entsorgung ungünstige Eigenschaften auf. Aufgrund des hohen organischen Anteils können sie eigentlich nicht in einer Deponie entsorgt werden, gleichzeitig sind sie kaum brennbar und gelangen in der KVA grösstenteils in die Schlacke.

Sämtliche mineralischen Bauabfälle, welche überwiegend über die Mischabbruchfraktion entsorgt werden, sind in der Baustoffgruppe «undifferenzierte mineralische Bauabfälle» zusammengefasst. Ziegel werden einer eigenen Baustoffgruppe zugeordnet, da sie – anders als andere Bauabfälle, die in den Mischabbruch gelangen – als Substrat für Flachdächer verwertet werden können.

Tabelle 1: Zuordnung der Baumaterialien zu Baustoffgruppen

Baustoffgruppe	KBOB-Daten
Armierungsstahl	Armierungsstahl
Beton	Magerbeton (ohne Bewehrung)
	Hochbaubeton (ohne Bewehrung)
	Tiefbaubeton (ohne Bewehrung)
	Bohrpfahlbeton (ohne Bewehrung)
	Betonfertigteil, hochfester Beton, ab Werk
	Betonfertigteil, Normalbeton, ab Werk
	Hartbeton einschichtig, 27.5 mm
	Hartbeton zweischichtig, 35 mm
Bodenbeläge organisch	Gummigranulat versiegelt, 7.5 mm
	Kautschuk, 2 mm
	Kork Fertigparkett, 10.5 mm
	Kork PVC-beschichtet, 3.2 mm
	Korkparkett geölt/versiegelt, 5.3 mm
	Laminat, 8.5 mm
	Linoleum, 2.5 mm
	PVC homogen, 2 mm
	Synthetische thermoplastische Beläge (TPO), 2 mm
	Teppich Kunstfaser getuftet
	Teppich Nadelfilz
	Teppich Naturfaser
Dichtungsbahnen, Schutzfolien	Dampfbremse bituminös
	Dampfbremse Polyethylen (PE)
	Dichtungsbahn bituminös

Baustoffgruppe	KBOB-Daten
	Dichtungsbahn Gummi (EPDM)
	Dichtungsbahn Polyolefin (FPO)
	Kraftpapier
	Polyethylenfolie (PE)
	Polyethylenvlies (PE)
Faserzement	Faserzement-Dachschindel
	Faserzementplatte gross
	Faserzement-Wellplatte
Flachglas	Flachglas beschichtet
	Flachglas unbeschichtet
Gipswerkstoffe	Gipsfaserplatte
	Gipskartonplatte
	Gips-Wandbauplatte / Vollgipsplatte
Gussasphalt	Gussasphalt, 27.5 mm
Holz und Holzwerkstoffe	3-Schicht Massivholzplatte, PVAc-gebunden
	Brettschichtholz, MF-gebunden, Feuchtbereich
	Brettschichtholz, UF-gebunden, Trockenbereich
	Hartfaserplatte
	Massivholz Buche / Eiche, kammergetrocknet, gehobelt
	Massivholz Buche / Eiche, kammergetrocknet, rau
	Massivholz Buche / Eiche, luftgetrocknet, rau
	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, kammergetr., gehobelt
	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetr., gehobelt
	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetrocknet, rau
	Mitteldichte Faserplatte (MDF), UF-gebunden
	OSB Platte, PF-gebunden, Feuchtbereich
	Spanplatte, PF-gebunden, Feuchtbereich
	Spanplatte, UF-gebunden, beschichtet, Trockenbereich
	Spanplatte, UF-gebunden, Trockenbereich
	Sperrholz/Multiplex, PF-gebunden, Feuchtbereich
	Sperrholz/Multiplex, UF-gebunden, Trockenbereich
	Parkett 2-Schicht werkversiegelt, 11 mm
	Parkett 3-Schicht werkversiegelt, 15 mm
	Parkett Mosaik werkversiegelt, 8 mm
Arbeitsplatte kunstharzbeschichtet	
Arbeitsplatte Massivholz	
Kies, Sand	Kies gebrochen
	Rundkies
	Sand
Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	2-Komponenten Klebstoff
	Heissbitumen
	Kautschukdichtungsmasse
	Polysulfiddichtungsmasse
	Silicon-Fugenmasse
	Anstrich, lösemittelverdünnt, 2 Anstriche
	Anstrich, wasserverdünnt, 2 Anstriche
Bitumenemulsion, 1 Anstrich	

Baustoffgruppe	KBOB-Daten
Kunstharz-Fliessbeläge	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz), 2.25 mm
	2K-Fliessbelag Wohnen/Verwaltung (Epoxidharz, PU), 2 mm
Kunststoffe	Fassadenplatte, Hochdrucklaminatplatte (HPL), 8.1 mm
	Fassadenplatte, Kunststoff glasfaserverstärkt (GFK), 1.6 mm
	Plexiglas (PMMA, Acrylglas)
	Polyamid (PA) glasfaserverstärkt
	Polycarbonat (PC)
	Polyester (UP) glasfaserverstärkt
	Polystyrol (PS)
Kunststoff-Rohre	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)
	Polyethylen (PE)
	Polypropylen (PP)
	Polypropylen (PP), rezykliert, Rehau
	Polyvinylchlorid (PVC)
Mineralwolle und Aerogel	Aerogel-Vlies
	Glaswolle
	Steinwolle
Organische Dämmstoffe	Flachsfasern
	Flachsfasern, feuerfest
	Korkplatte
	Phenolharz (PF)
	Polystyrol expandiert (EPS)
	Polystyrol extrudiert (XPS)
	Polyurethan (PUR/PIR)
	Strohballenwand
	Weichfaserplatte
	Zellulosefasern
Mörtel, Putze	Baukleber/Einbettmörtel mineralisch
	Baukleber/Einbettmörtel mineralisch Leichtzuschlag
	Baukleber/Einbettmörtel organisch
	Gips-Kalk-Putz
	Gips-/Weissputz
	Kunststoffputz (Dispersionsputz)
	Kalk-Zement/Zement-Kalk-Putz
	Lehmputz
	Leichtputz mineralisch
	Silikatputz (Dispersionssilikatputz)
	Silikonharzputz
	Sumpfkalkputz
	Wärmedämmputz EPS
	Weisszementputz
	Zementputz
Stahl	Chromnickelstahlblech 18/8 blank
	Chromnickelstahlblech 18/8 verzinkt
	Chromstahlblech blank
	Chromstahlblech verzinkt
	Stahlblech, blank

Baustoffgruppe	KBOB-Daten
	Stahlblech, verzinkt
	Stahlprofil, blank
	Gusseisen
	Arbeitsplatte Chromstahl, high-end
Nichteisenmetalle	Aluminiumprofil, blank
	Blei
	Kupferblech, blank
	Messing-/Baubronzeblech
	Titanzinkblech
Organisch-mineralische Verbundmaterialien	Holzwohle-Leichtbauplatte, zementgebunden
	Arbeitsplatte Kompositwerkstoff (auf Aluminiumhydroxidbasis)
	Spüle Kompositwerkstoff (auf Gesteinsmehlbasis)
	Steinholz versiegelt, 16.5 mm
	Hanfbeton
	Leichtlehmstein
Undifferenzierte mineralische Baustoffe	Hartsandsteinplatte
	Kalksteinplatte
	Keramik-/Steinzeugplatte
	Sanitärkeramik
	Unterlagsboden Anhydrit, 60 mm
	Unterlagsboden Zement, 85 mm
	Fassadenplatte, Kalkstein, 30 mm
	Putzträgerplatte kunstharzgebunden 13 mm
	Putzträgerplatte mineralisch gebunden 12.5 mm
	Keramik-/Steinzeugplatte, 9 mm
	Kunststeinplatte zementgebunden, 10 mm
	Natursteinplatte geschliffen, 15 mm
	Natursteinplatte geschnitten, 15 mm
	Natursteinplatte poliert, 15 mm
	Arbeitsplatte Naturstein
	Backstein
	Kalksandstein
	Leichtzementstein, Blähton
	Leichtzementstein, Naturbims
	Schaumglas
	Blähperlith
	Blähvermiculit
	Schaumglasschotter
	Porenbetonstein
	Zementstein
Betonziegel	
Stampflehm	
Terrazzo versiegelt, 40 mm	
Ziegel	Tonziegel

2.7 Entsorgungswege der Baustoffgruppen

2.7.1 Graphische Darstellung der Entsorgungswege

Die Entsorgungswege der einzelnen Baustoffgruppen werden in den folgenden Kapiteln dargestellt. Die Prozessdiagramme zeigen den Fluss der Baustoffe durch die Entsorgungsprozesse von links nach rechts. Entsorgungsprozesse sind als Rechtecke mit hellblauem Hintergrund dargestellt. Transporte zwischen den Entsorgungsprozessen werden mit schwarzen Pfeilen illustriert. Die Prozentangaben über den Pfeilen beziehen sich jeweils auf den vorausgehenden Entsorgungsprozess links des Pfeils. Sie geben an, wie gross der Anteil einer Baustoffgruppe ist, der den vorgelagerten Prozess in Richtung des folgenden Prozesses verlässt. Die Angaben in Kilometern unter den Pfeilen bezeichnen die Transportdistanz zwischen zwei Entsorgungsprozessen gemäss Kapitel 2.9.3. Die Distanzen in eine stoffliche Verwertung sind generell mit null Kilometern angegeben, da dieser Transport gemäss den Ökobilanzierungsregeln von Ecoinvent zur Herstellung des Folgeprodukts gerechnet wird.

2.7.2 Armierungsstahl

Für das Entsorgungsszenario von Armierungsstahl wurde davon ausgegangen, dass der Stahl zusammen mit dem Beton in eine Betonbrechanlage oder in die Mischabbruchaufbereitung gelangt. Dort wird der Armierungsstahl mittels Überbandmagneten aussortiert und in die Altmetall-Verwertung weitergeleitet, wo der Stahl mit einer Schrottschere zerkleinert wird. Der Aufwand für diesen Aufbereitungsprozess wird in Ecoinvent bei der Herstellung von Sekundärstahl berücksichtigt, somit endet die Bilanzierung beim Ausgang aus der Betonbrechanlage, bzw. der Mischabbruchaufbereitung. Gemäss den Daten aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b) (Hiltbrunner, 2017) werden jährlich rund 4.24 Mio. Tonnen Betonabbruch in Betonbrechanlagen und rund 1.07 Mio. Tonnen in Mischabbruchaufbereitungsanlagen aufbereitet. Es ist eine plausible Annahme, dass die Anteile des Armierungsstahls welche über diese beide Anlagen laufen, proportional dazu sind. Ein Anteil von 80% gelangt in Betonbrechanlagen und ein Anteil von 20% in Mischabbruchaufbereitungsanlagen (Abbildung 4).

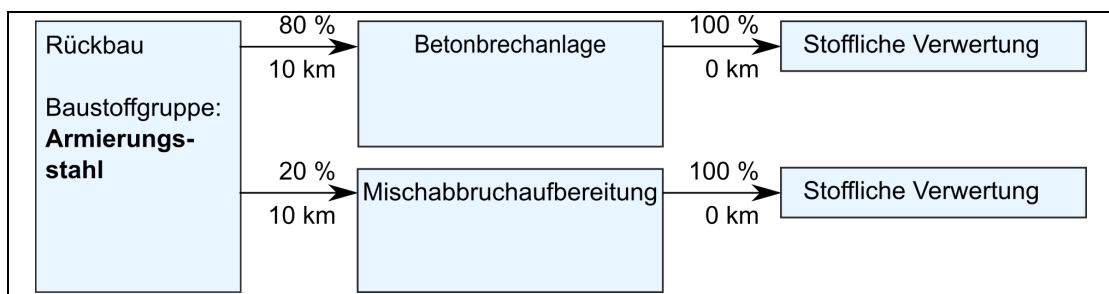


Abbildung 4: Entsorgungswege Armierungsstahl

2.7.3 Beton

Die Stoffflüsse des Betonabbruchs in der Entsorgung wurden aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b) (Hiltbrunner, 2017) übernommen. Vom Betonabbruch aus dem Um-

und Rückbau gelangt ein Anteil von rund 56% als reiner Betonabbruch in Betonbrechanlagen und rund 14 % als Bestandteil des Mischabbruchs in Mischabbruchaufbereitungsanlagen. Es wurde angenommen, dass die restlichen rund 30 % von der Baustelle direkt in eine Deponie vom Typ B gelangen (Tabelle 2). Rund 67% des Betonabbruchs wird zu RC-Granulaten verarbeitet. Beide Aufbereitungsprozesse erzeugen 4 % Feinfraktion, die auf einer Deponie vom Typ B abgelagert werden. Ein relativ geringer Anteil aus der Aufbereitung gelangt als Feinfraktion in eine Deponie (Deponie Typ B). Bezogen auf den Input aus dem Bauwerk werden 30 % des Betons in einer Deponie vom Typ B entsorgt. Die Entsorgungswege von Beton sind in Abbildung 5 dargestellt.

Tabelle 2: Daten für Betonabbruch gemäss KAR-Modell (Rubli, 2016b)

Herkunft	Menge [t/a]	Anteil
Betonabbruch aus dem Bauwerk	7'600'000	100%
Betonabbruch in die Aufbereitung, Betonbrechanlage	4'240'000	56%
Betonabbruch in die Aufbereitung, Mischabbruchaufbereitung	1'072'500	14%
RC-Granulat aus Betonbrechanlage	4'071'727	54%
RC-Granulat aus Mischabbruchaufbereitung	1'029'790	13%

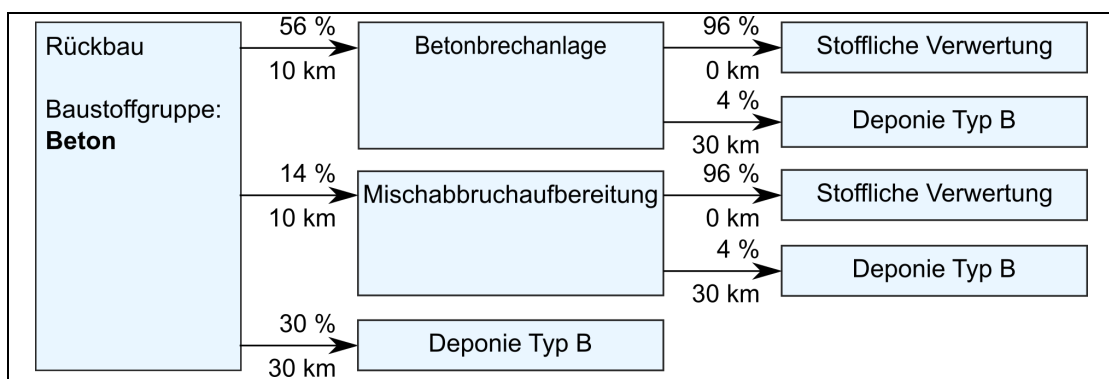


Abbildung 5: Entsorgungswege Beton

2.7.4 Bodenbelag organisch

Der Anteil der organischen Bodenbeläge im Bauabfall ist sehr gering. In den vorhandenen Stofffussanalysen von Rückbauprojekten (S. Rubli, Quellenangaben siehe Anhang A.1) werden sie nicht als separate Abfallfraktion erfasst. Für PVC-Beläge wird in der Schweiz ein Rücknahmesystem für das Recycling angeboten (ARP Schweiz, 2019). Aufgrund unserer Interviews mit Branchenvertretern schätzen wir dessen Bedeutung derzeit jedoch als gering ein. Da organische Bodenbeläge während der Entkernung eines Gebäudes relativ einfach ausgebaut werden können, wird davon ausgegangen, dass diese Bodenbeläge hauptsächlich in Einstoffmulden für brennbares Material gesammelt und von der Baustelle direkt in die KVA transportiert werden. Die Situation ist bezüglich der Sammlung auf der Baustelle mit jener von Altholz vergleichbar. Daher werden die Verhältnisse für Altholz als Annahme verwendet, um abzuschätzen, welcher Anteil direkt in eine KVA geliefert wird und welcher Anteil in eine Bausperrgutsortierung gelangt (siehe dazu Kap. 2.7.10). Somit wird angenommen,

dass 6 % der organischen Bodenbeläge in die Bausperrgutsortierung gelangen und 94 % als brennbare Abfälle direkt der KVA angeliefert werden. In der Bausperrgutsortierung verhalten sich organische Bodenbeläge ähnlich wie Dichtungsbahnen oder Schutzfolien. Daher wurden die Annahmen für diese Produktgruppe auch für die organischen Bodenbeläge verwendet (siehe Kap. 2.7.5). Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Prozesskette gemäss Abbildung 6.

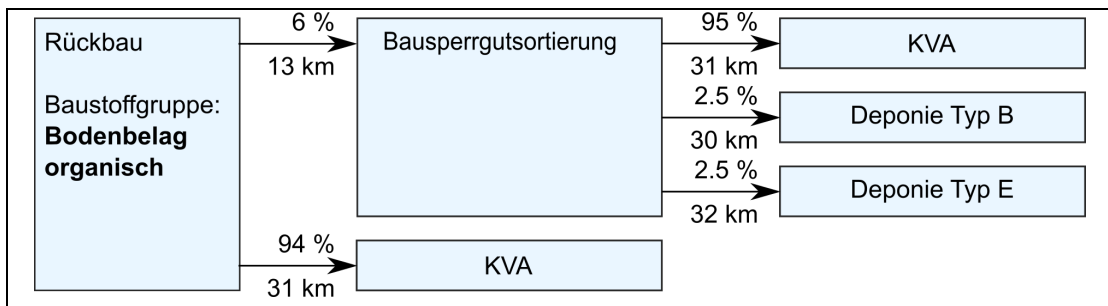


Abbildung 6: Entsorgungsweg für organische Bodenbeläge

2.7.5 Dichtungsbahnen, Schutzfolien

Für Dachbahnen aus PVC (Roofcollect, 2019) und Polyolefinen (Sika, 2012) gibt es Recyclingsysteme. Die Brancheninitiative zur Verbesserung der ökologischen Auswirkungen von PVC beziffert den Rücklauf von PVC-Dichtungsbahnen europaweit auf rund 100'000 Tonnen im Jahr 2017. Welcher Teil davon aus der Schweiz stammt, ist nicht bekannt. Die Beschreibung der Vorbereitung für ein PVC-Recycling des zuständigen Systems zeigt, dass diese mit einem relativ grossen manuellen Aufwand verbunden ist. Dies senkt die Attraktivität dieser Lösung. Wir gehen davon aus, dass nur ein sehr geringer Anteil der Dichtungsbahnen und Schutzfolien stofflich verwertet wird. Für die Ökobilanzierung gehen wir im Sinne einer konservativen Bilanzierung von einer Entsorgung mit den brennbaren Abfällen aus.

Gemäss den Angaben einer Aufbereitungsanlagenbetreibers (Binzegger, 2018) werden brennbare Abfälle einerseits in Einstoffmulden und andererseits in Bausperrgutmulden gesammelt. Der Anteil der brennbaren Abfälle im Bausperrgut beträgt gemäss Jahresbericht der Bauabfallaufbereitungsanlagen 37,5 % (ARV, 2015). Mit den Angaben des Sortierbetriebs zu den Jahrestonnagen brennbarer Abfälle in Einstoffmulden und der Jahrestonnage von Bausperrgut lässt sich der Anteil der brennbaren Abfälle berechnen, die in Einstoffmulden gesammelt werden. Dieser Anteil von 53 % gelangt direkt in die Verbrennung. Die übrigen 47 % werden in einer Bausperrgutaufbereitungsanlage von anderen Baustoffen getrennt. Diese Aufteilung scheint auch für die Entsorgung der Dichtungsbahnen und Schutzfolien plausibel. Ein Teil der Dichtungsbahnen und Schutzfolien wird im Schredderprozess der Bausperrgutsortierung zerkleinert und gelangt in die Feinfraktion. Zudem ist die Trennung der Dichtungsbahnen und Schutzfolien von anderen Materialien teilweise erschwert, da z. B. Dampfbremsen auf Flachdächern auf die Tragkonstruktion aufgeschweisst werden. Es wurde deshalb angenommen, dass ein Anteil von 5% der Bahnen und Folien, welche über eine Bausperrgut-Aufbereitungsanlage entsorgt werden, als Verunreinigung von mineralischen Abfällen und via Feinfraktion in eine Deponie gelangen. Mangels

weiterer Angaben wird angenommen, dass diese Verunreinigungen jeweils zur Hälfte in Deponien vom Typ B und vom Typ E entsorgt werden. Insgesamt ergibt sich der Entsorgungsweg gemäss Abbildung 7.

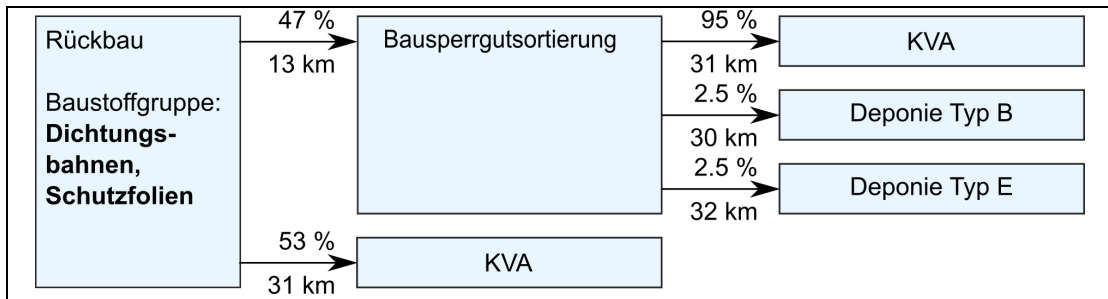


Abbildung 7: Entsorgungsweg Dichtungsbahnen und Schutzfolien

2.7.6 Faserzement

Es ist davon auszugehen, dass Faserzementprodukte, welche vor 1990 verbaut wurden, Asbest enthalten. Es findet deshalb auch keine stoffliche Verwertung von Faserzement statt. Deshalb sollten heute sämtliche Platten und Rohre aus Faserzement separat rückgebaut und gesammelt werden. In der Praxis gelangt auch ein Teil der Eternit-Produkte in eine Bauschuttzubereitungsanlage, wo sie bereits nach der Anlieferung aussortiert werden sollten und dann in eine Deponie weitergeleitet werden. Wie gross der Anteil Eternit ist, der in eine Bausperrgutsortierung gelangt, wissen wir jedoch nicht. Die modellierte Prozesskette besteht daraus 100 % direkter Anlieferung auf eine Deponie. Gemäss gängiger Praxis wird Faserzement in einer Deponie Typ B entsorgt. Produkte aus Faserzement die heute verkauft werden, enthalten rund 4-5 Massen-% organische Fasern.

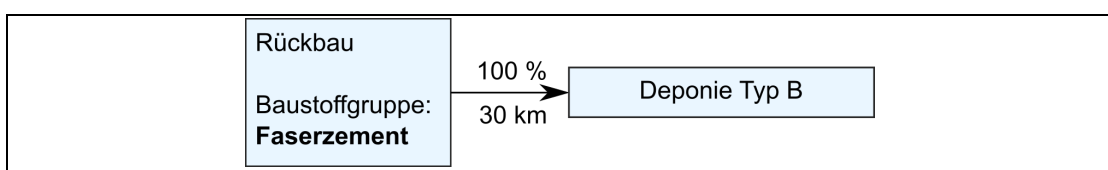


Abbildung 8: Entsorgungsweg für Faserzement

2.7.7 Flachglas

Die Entsorgungsmengen von Flachglas sind wenig dokumentiert. Flachglas ist kein kontrollpflichtiger Abfall. Somit sind keine amtlichen Statistiken über die Abfallströme verfügbar. Für eine Abschätzung des Glasaufkommens aus dem Rückbau müssen darum Schätzungen herangezogen werden. Der Bericht zur Hochbaustudie über Bauabfälle in der Schweiz (Guerra et al., 2015) spricht von 1.1 Mio. t mineralischen Bauabfällen in der Form von Keramik, Gips und Glas. Der Anteil des Glases in dieser Fraktion dürfte hoch sein und wird aufgrund eigener Beobachtungen auf zirka 50 %, also rund 500'000 Tonnen geschätzt.

Flachgläser werden durch Glasverwerter in drei Kategorien eingeteilt. Flachglas aus der Rückbautätigkeit wird in der Regel der qualitativ schlechtesten Kategorie 3 zugeteilt (GVS, 2016). Solches Flachglas gelangt in eine Glasaufbereitungsanlage, bevor es zu einem Hersteller von Glasprodukten geliefert wird. Die Glasaufbereitungsanlagen trennen das Glas von den Anhaftungen wie Fensterkitt, Holzresten, enthaltene Folien oder weitere Verunreinigungen. Das Glas wird optisch und physikalisch getrennt in Glasfraktionen unterschiedlicher Reinheit. Den Autoren sind zwei Aufbereitungsanlagen in Deutschland bekannt, die aus der Schweiz beliefert werden, eine in Immendingen in Süddeutschland und eine in Marienfeld in Norddeutschland. Weitere Gespräche mit Branchenvertretern (Binzegger, 2018; Brogle, 2018; Germann, 2018; Rubli, 2018b; Schneider, 2018; Schöni, 2018) bestätigten, dass das Flachglas teilweise zur Verwertung exportiert wird. Flachglas wird aus unterschiedlichen Gründen nicht stofflich verwertet. Für ein Recycling ist nur Glas ohne Verunreinigungen und mit definierter Qualität geeignet. Verbundsicherheitsgläser können an eine Glasaufbereitungsanlage geliefert werden, allerdings wird dafür von den Verwertern bereits eine Zuzahlung verlangt. Somit ist ein Recycling des anfallenden Glases oft teurer als die Entsorgung in der Deponie.

Für die Abschätzung des Entsorgungswegs vom Rückbau zu den Aufbereitungsanlagen wurden die Angaben aus den erwähnten Interviews verwendet. Ein Gesprächspartner schätzt den Anteil des Glases, das in ein Recycling gelangt auf ca. 25 %, die übrigen 75 % werden deponiert. Glas wird gemäss Auskunft dieses Branchenvertreters nur auf Grossbaustellen getrennt gesammelt. Die getrennt gesammelten Gläser werden entweder einer Verwertung zugeführt oder in eine Deponie gegeben. Eine Ausglasung von Fenstern kann auf der Baustelle erfolgen durch Ausschlagen der Scheiben mit einem Hammer über der Inertstoffmulde. Ein geringer Anteil des Flachglases gelangt als Glasanhaftungen an Holzfenstern in eine Verbrennungsanlage. Dieselbe Auskunftsperson schätzt den Anteil von Gläsern, die direkt auf der Baustelle aussortiert werden zur Verwertung auf rund 10 % und die Gläser, die direkt auf der Baustelle ausgeglast und als Inertstoff entsorgt werden auf weitere 10 %. Der grösste Teil der Fenster verlässt die Baustelle nach übereinstimmender Aussage auch weiterer Gesprächspartner als Bausperrgut und wird in der Bausperrgutaufbereitung aussortiert.

Aufgrund der Experteninterviews schätzen wir den Anteil des Glases, das vom Rückbau in die Bausperrgutsortierung gelangt auf 75 %. Geschätzte 10 % des Glases gelangen von Grossbaustellen ohne weitere Vorsortierung in eine Glasverwertungsanlage. Ungefähr weitere 10 % werden auf der Baustelle aus Fenstern ausgeglast und als Inertstoff direkt ab Baustelle in einer Deponie vom Typ B entsorgt. Die Anhaftungen, welche an Holzrahmen verbleiben und so ab Baustelle in eine Verbrennung gelangen, werden auf 5 % abgeschätzt. Die Anteile der Entsorgungswege vom Abbruch zur ersten Behandlungsanlage werden in der Abbildung 9 ausgewiesen.

Die Behandlung der Fenster in der Bausperrgutsortierung kann stark variieren. Ein Interviewpartner (Schneider, 2018) betonte, dass sie Rahmenprofile und Verglasungen weitgehend trennen und das Glas in eine Verwertung geben. Es gibt jedoch Einschränkungen hinsichtlich der geforderten Glasqualität für ein Recycling. Das führt dazu, dass nicht alles Glas in eine Verwertung gelangen kann. Zwei weitere Interviewpartner beschrieben die Sortiertätigkeit in ihren

Bausperrgutaufbereitungsanlagen als wesentlich weniger weitgehend und die Deponie Typ B als hauptsächlich oder sogar ausschliesslichen Entsorgungsweg.

Um abzuschätzen, welcher Anteil des Glases aus der Bauschutttaufbereitung in eine Glasaufbereitungsanlage gelangt, berücksichtigen wir die Daten der Aussenhandelsstatistik. Diese beinhalten alle Gläser, also neben dem Flachglas auch das exportierte Verpackungsglas. Um den Anteil des Flaschenglases aus der Bilanz abziehen zu können, wurden die Daten zum gesammelten Verpackungsglas aus dem Jahresbericht der vetroswiss (Vetroswiss, 2018) und die Angaben der Vetropack zu Ihrer Glasproduktion im Werk St-Prex verwendet. Die Differenz zur Gesamtmenge wurde als exportiertes Flachglas angenommen, wie in Tabelle 3 ausgewiesen. Die so ermittelte Exportmenge beträgt rund 80'000 Jahrestonnen oder gerundet ca. 20 % des anfallenden Flachglases. Dieser geringe Recyclinganteil passt gut zu den Angaben der interviewten Branchenvertreter. Da bereits für den ersten Schritt ab Baustelle für 10 % des Glases eine Verwertung in der Glassortierung modelliert wird, müssen ab der Bausperrgutsortierung 13 % des Glases in eine Glasaufbereitungsanlage gelangen, damit in der Gesamtbilanz 20 % des Flachglases in eine Glasaufbereitungsanlage exportiert werden.

Tabelle 3: Berechnung der aus der Schweiz exportierten Flachglasmenge

Jahr	2016	2017	Mittelwert
Gesammeltes Verpackungsglas in Neuglasproduktion [t]	320'389	292'953	306'671
Glasproduktion Inland [t]	95'342	103'429	99'386
Exportiertes Verpackungsglas [t]	225'047	189'524	207'286
Exporte Glas gemäss Aussenhandelsstatistik [t]	293'212	276'749	284'981
Exportiertes Flachglas [t]	68'165	87'225	77'695

Das restliche Glas aus der Bausperrgutsortierung gelangt in mineralische Fraktionen, welche in Deponien vom Typ B, sowie auch in Deponien vom Typ E entsorgt werden (Binzegger, 2018; Rickli, 2017). Zur Abschätzung der Anteile in beide Deponietypen wurde die Deponiestatistik der Schweiz herangezogen (BAFU, 2018b). Die Glasflüsse in beide Deponietypen wurden als proportional zu den Gesamtflüssen in beide Deponietypen angenommen (Tabelle 4). Demzufolge gelangen von der Glassortierungsanlage 73% in die Deponie Typ B und 14% in die Deponie Typ E. Die Entsorgungswege ab der Bausperrgutsortierung sind aus Abbildung 9 ersichtlich.

Tabelle 4: Abgelagerte Abfälle 2009 – 2015 in Tonnen

Jahr	Deponie Typ B	Deponie Typ E	Total
2009 – 2015	6858919	1294262	8153180
Anteile	84%	16%	100%

Für die Berechnung der Transportdistanz zur Glasaufbereitungsanlage wurde der Mittelwert der Distanzen zu den zwei uns bekannten Anlagen in Deutschland gebildet. Über die Effizienz der Trenntechnologie im Flachglasrecycling sind uns keine Angaben bekannt. Auf denselben Anlagen werden jedoch auch siliziumbasierte

Photovoltaikzellen getrennt und sortiert. Aus eigener Anschauung wissen die Autoren, dass dabei keine wesentlichen Veränderungen am Sortierprozess im Vergleich zu einer Glassortierung vorgenommen werden. Aus der Bilanzierung der Photovoltaik-Verwertung (Stolz et al., 2016) sind die Massenanteile der Ausgangsfractionen bekannt. Aus Photovoltaik-Zellen wird die Glasscheibe getrennt von der Folie mit der aktiven Schicht und den Aluminiumrahmen. In der Flachglassortierung wird der Randverbund aus Aluminium, Edelstahl oder Kunststoff abgetrennt. Zudem müssen die Folien aus Verbundsicherheitsgläser vom Glas getrennt werden. Der Glasanteil in Flachgläsern ist mit Sicherheit höher als bei Photovoltaikzellen. Aus dem verwertbaren Glasanteil des Photovoltaikrecyclings von 71% wird daher ein verwertbarer Glasanteil im Flachglasrecycling von 95 % abgeleitet. Die Glasfraktion wird aufgeteilt in 80 % Glas, das verwertet werden kann und 15 % minderwertiges Glas, das deponiert werden muss. Diese Zahl basiert auf eigenen Erhebungen bei den Glasaufbereitungsanlagen im Rahmen eines Mandats zur Überwachung des PV-Recyclings, die nicht öffentlich zugänglich sind. Der Anteil der Fraktion in die Verbrennung, die aus den Folien mit nicht weiter trennbaren Glasanhaftungen besteht, wird auf rund die Hälfte des Kunststoffanteils im PV-Recycling gemäss (Stolz et al., 2016) geschätzt, was einen Anteil von 5 % ergibt. Die Zahlen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Bilanzierung der Ausgangsfractionen aus der Glasverwertung

Verwertung Glassortierung	Ökobilanz PV-Recycling (Stolz et al., 2016)	Bilanzierung Glassortierung
Glas stoffliche Verwertung	72 %	80 %
Metalle stoffliche Verwertung	16 %	0 %
Glas Deponie Typ B	0 %	15 %
Kunststoff mit Anhaftungen in Verbrennung	13 %	5 %

Die Aufteilung der nachgelagerten Prozesse der Glassortierungsanlage bleiben immer gleich, unabhängig vom vorgelagerten Prozess, d.h. das Flachglas das aus der Bausperrgutsortierung in eine Glassortierungsanlage gelangt, teilt sich am Ausgang der Anlage wieder in die Anteile 80% stoffliche Verwertung, 15% Deponie Typ B und 5% KVA auf.

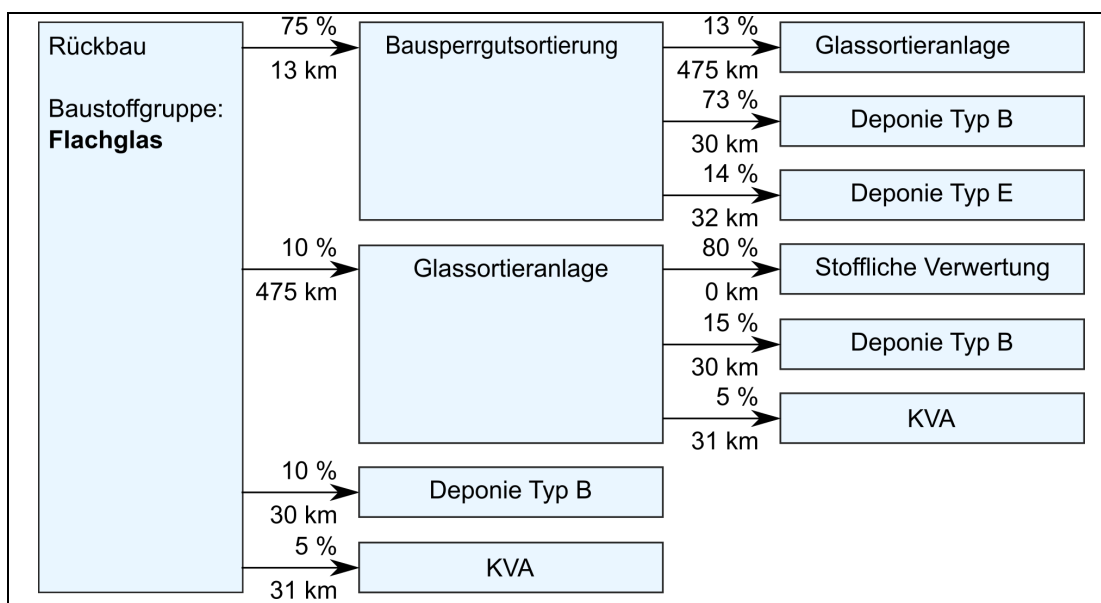


Abbildung 9: Entsorgungsweg für Flachglas

2.7.8 Gipswerkstoffe

Die Entsorgungswege von Gipsabfällen basieren auf der Untersuchung von (Rubli, 2014). Die Menge separat gesammelter Gipswerkstoffe für eine stoffliche Verwertung ist noch sehr gering. Aus wirtschaftlicher Sicht lohnt sich die Aufbereitung von Gipswerkstoffen aus dem Rückbau kaum. Am einfachsten lassen sich Vollgipsplatten verwerten. Auch für Gipskartonplatten ist eine Verwertung technisch möglich. Bei den hydrophobierten Gipsplatten ist eine stoffliche Verwertung meistens unmöglich. (Strabag, 2016)

Nicht separat gesammelte Gipsabfälle gelangen in verschiedene Abfallfraktionen wie Misch- und Betonabbruch (Bauschutt), Bausperrgut und mineralische Fraktionen, welche in Deponien Typ B entsorgt werden. Ein gewisser Gipsanteil gelangt als Verunreinigung von brennbaren Abfällen in die KVA. In (Rubli, 2014) wurden die jährlichen Gipsabfallmengen aus den Bauabfallmengen verschiedener Fraktionen sowie den jeweiligen Gipsanteilen abgeschätzt. Mit diesen Informationen bestimmten auch wir in der vorliegenden Studie die Anteile der Entsorgungswege gemäss Tabelle 6.

Tabelle 6: Entsorgungswege von Gipsabfällen (Rubli, 2014)

Bauabfallfraktion	Gipsmenge [t/a]	Entsorgungsweg	Anteil
Bausperrgut	51'700	Bausperrgutaufbereitungsanlage	16%
Misch- und Betonabbruch	57'600	Bauschuttaufbereitungsanlage	17%
Inertstofffraktion in Deponien	175'500	Deponie Typ B	53%
Brennbare Bauabfälle	45'000	KVA	13%
Gesammelter Gipsabbruch	4'000	Gipsaufbereitungsanlage	1%
TOTAL	333'800		100%

Aus den Daten in Tabelle 6 kann abgeleitet werden, in welche Prozesse die Gipsabfälle nach dem Rückbau gelangen. Für die Ökobilanzierung wird der Anteil der Gipsabfälle, welcher in Gipsaufbereitungsanlagen gelangt, zu dem Anteil gezählt, der in Bausperrgutaufbereitungsanlagen gelangt, da die Mengen so gering sind, dass eine separate Betrachtung keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz hat. Für die Modellierung der Prozesskette werden die Ströme im Beton- und Mischabbruch als ein Strom in eine Mischabbruchaufbereitung zusammengefasst. Auch diese Vereinfachung verändert die Ergebnisse der Ökobilanz nicht wesentlich. Weiterhin werden rund 53% der Gipsabfälle direkt in eine Deponie Typ B entsorgt und rund 13% gelangen als Anhaftungen an brennbaren Materialien in die KVA. Die Modellierung der Prozesskette ist aus (Abbildung 10) ersichtlich.

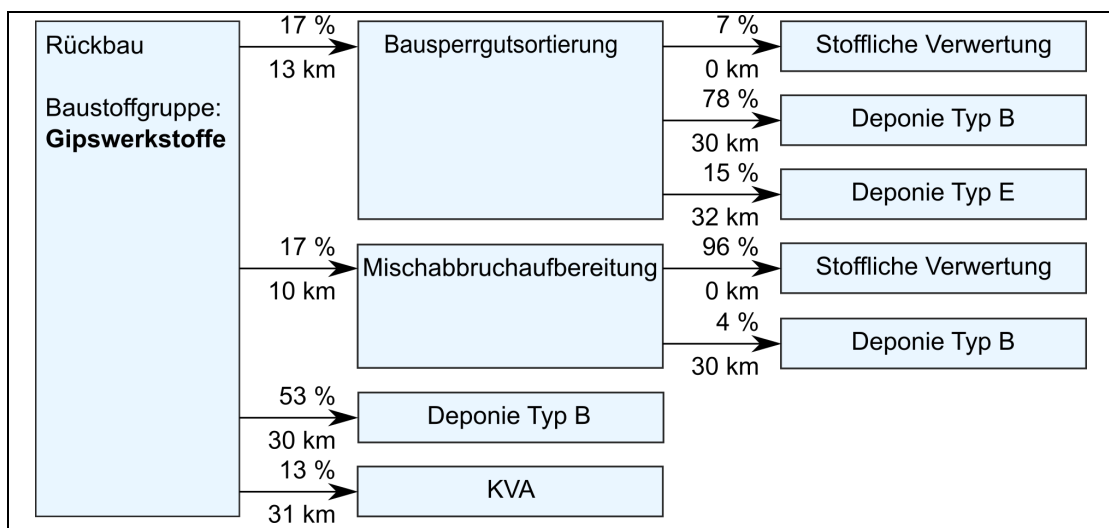


Abbildung 10: Entsorgungsweg von Gipswerkstoffen

Gemäss (Rubli, 2014) werden Gipsabfälle, die in einer Bausperrgutsortierung vom Abfallstrom abgetrennt werden, zu 100% in einer Deponie entsorgt. Berücksichtigt wurde hier noch die kleine Menge von 4'000 Tonnen die jährlich verwertet wird. Demzufolge werden von den 55'700 Tonnen (100%) der Gipsabfälle welche in eine Bausperrgutaufbereitungsanlage gelangen 4'000 Tonnen (7%) verwertet. Der Rest von 51'700 Tonnen (93%) gelangt in eine Deponie. Die Gipsabfälle gelangen in der Bausperrgutsortierung in Fraktionen, welche in einer Deponie vom Typ B und solche, welche in einer Deponie Typ E entsorgt werden (Binzegger, 2018; Rickli, 2017). Zur Abschätzung der Anteile in beide Deponietypen wurde die Deponiestatistik der Schweiz herangezogen (BAFU, 2018b). Die Gipsflüsse in beide Deponietypen wurden als proportional zu den Gesamtflüssen in beide Deponietypen angenommen. Die berücksichtigten Gesamtflüsse sind in Kapitel 2.7.7 aufgeführt (siehe Tabelle 4).

Die Menge der Gipsabfälle, welche jährlich über die Fraktion Misch- und Betonabbruch aufbereitet wird, gelangt gemäss (Rubli, 2014) und (Inderbitzin, 2019) über die Absiebung als Feinfraktion in die Magerbetonherstellung. Zuzufolge den Daten aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b) werden rund 96% des Materials, welches in

Bauschuttzubereitungsanlagen gelangt, stofflich verwertet. Der Rest (4%) gelangt in eine Deponie vom Typ B.

2.7.9 Gussasphalt

Für Gussasphalt aus dem Hochbau sind keine spezifischen Daten verfügbar. Aus Gesprächen mit dem ARV (Inderbitzin, 2019) wissen wir, dass Gussasphalt nicht im Mischabbruch entsorgt werden kann. Asphalt im Mischabbruch würde dazu führen, dass die Qualitätskriterien der hergestellten Sekundärrohstoffe nicht mehr erfüllt werden könnten. Die Menge ist verglichen mit dem anfallenden Ausbauasphalt aus dem Strassenbau im Bauwerk (Plätze, Zufahrten, Tiefgaragen) verschwinden gering. Wir gehen davon aus, dass der ausgebaute Gussasphalt aus dem Hochbau zusammen mit Ausbauasphalt entsorgt wird.

Gemäss Daten aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b) gelangen rund 66% des Ausbauasphalts in eine Bauschuttzubereitungsanlage. Es wurde davon ausgegangen, dass der Rest (34%) direkt in einer Deponie entsorgt wird. Da Gussasphalt in der Regel mehr als 5% Bitumen als Bindemittel enthält, muss dieser in einer Deponie Typ E entsorgt werden.

Tabelle 7: Daten für Ausbauasphalt aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b)

Herkunft	Menge [t/a]	Anteil
Ausbauasphalt aus dem Bauwerk	2'519'000	100%
Ausbauasphalt in die Aufbereitung	1'655'000	66%
RC-Belag aus der Aufbereitung	1'589'000	63%

Basierend auf den Daten aus dem KAR-Modell werden 96% (1'589'000 t) des Ausbauasphalts welcher jährlich in Anlagen aufbereitet wird (1'655'000 t), stofflich verwertet. Es wurde angenommen, dass der Rest ebenfalls in eine Deponie Typ E gelangt. Für den Anlagenaufwand wird die Sachbilanz einer Betonbrechanlage verwendet, da keine Asphaltaufbereitung bilanziert wurde.

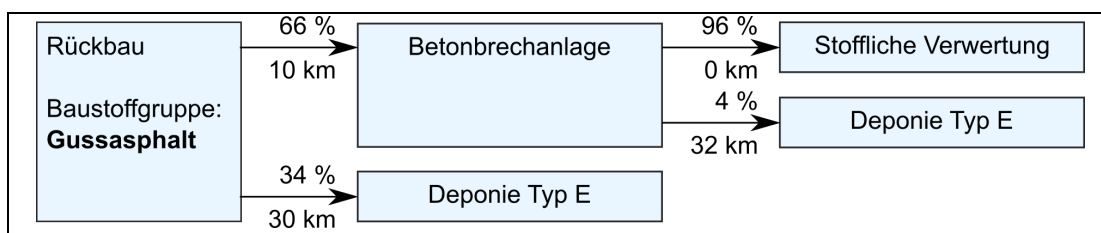


Abbildung 11: Entsorgungsweg Gussasphalt

2.7.10 Holz und Holzwerkstoffe

Wie differenziert Holz auf Baustellen gesammelt wird, hängt von mehreren Faktoren ab. Am bedeutendsten sind die Menge des anfallenden Altholzes und der zur Verfügung stehende Platz auf der Baustelle. Weiterhin wichtig sind die Verwertungswege, welche das Entsorgungsunternehmen nutzt. Auf Grossbaustellen können eine bis

vier Mulden für die verschiedenen Holzqualitäten bereit stehen. Altholz wird in der Branche der Altholzverwerter in vier Klassen eingeteilt: Die Klassen eins bis drei (oder A1-A3) sind unbelastete Qualitäten, die Klasse vier (oder A4) beschreibt mit Schadstoffen belastete Hölzer, die verbrannt werden müssen. Auch die Gesetzgebung sieht gemäss LVA vier Klassen von Holz vor, die sich in der Abgrenzung leicht von der Branchenklassierung unterscheiden können (Cercle déchets ost, 2018). Auch auf kleineren Baustellen wird Holz oft getrennt gesammelt. Bei sehr beschränkten Platzverhältnissen kann Holz in der Mulde für brennbare Materialien gesammelt werden. Nur bei sehr beschränkten Platzverhältnissen oder geringen Holzmengen aus dem Rückbau wird Holz in Bausperrgutmulden gesammelt.

Um zu modellieren, welchen Weg Altholz von der Baustelle im Mittel nimmt, wurden zwei Exponenten von Holzentsorgungsunternehmen interviewt (Germann, 2018; Schneider, 2018). Beide bezifferten den Anteil der Entsorgung in Altholzmulden auf ca. 90 %. Aus den Controllingberichten der Stadt Zürich (Rubli, 2005d) konnte die Gesamttonnage aller Entsorgungswege gemäss Tabelle 8 eruiert werden. Daraus lässt sich das Verhältnis zwischen separat gesammeltem Altholz und Bausperrgut ableiten.

Tabelle 8: Daten aus Controllingberichten der Stadt Zürich

Entsorgungsfraction	Masse gesamt [t]	Anteil [%]
Bausperrgut	1'481	45 %
Altholz	2'124	55 %

Der ARV hat für das Jahr 2014 Kennzahlen zur Zusammensetzung des Bausperrguts im Kanton Zürich publiziert (ARV, 2015), die wir in Tabelle 9 abbilden.

Tabelle 9: Jahresmenge der Aufbereitungsanlagen im Kanton ZH gemäss Jahresbericht 2015 des ARV

Sortierte Bauabfälle Kanton ZH	Output ARV-Anlagen Kt. ZH 2014 [t]	Anteil [%]
Betonabbruch	3717	2%
Mischabbruch	16788	8%
Gips	266	0.1%
Altholz	15058	7%
Problematische Holzabfälle	2157	1%
Gemischte brennbare Abfälle	76672	37%
Metalle	8156	4%
Papier und Karton	1476	0.7%
Diverses	4815	2%
Inertstoffe in Deponie	44841	22%
Feinfraktion	30565	15%
Total	204511	100%

Gemäss den Zahlen des Berichts beträgt der Altholzanteil im Bausperrgut 8 %. Aus beiden Quellen berechnet sich der Anteil des Altholzes, das ab Baustelle direkt in die

Altholzaufbereitung gelangt zu 94 % und der Anteil, der in die Bausperrgutsortierung gelangt zu 6 %. Der Verwertungsweg für Holz und Holzwerkstoffe ist in Abbildung 12 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Ausgangsfraktionen aus der Altholzaufbereitung nach der Bausperrgutsortierung nicht dargestellt werden. Es sind dieselben wie nach dem Prozess der Altholzaufbereitung bei direkter Anlieferung ab der Baustelle.

Aus der Bausperrgutsortierung gelangen alle sortierbaren Hölzer in die Altholzaufbereitung und die nicht sortierbaren in die Verbrennung. Der Anteil der beiden Holzsorten wurde aus den Fraktionen «Altholz» und «problematische Holzabfälle» gemäss Tabelle 9 eruiert. Ein Teil des Inputs gelangt in die Feinfraktion und wird mit dieser in einer Deponie vom Typ E entsorgt. Zu diesem Fluss sind keine genauen Zahlen erhältlich. Er wird auf 5 % abgeschätzt.

Der Weg aus der Altholzaufbereitung in die Verwertung oder Entsorgung kann mit den Zahlen aus der Statistik für andere kontrollpflichtige Abfälle des BAFU (BAFU, 2018a) berechnet werden. Berücksichtigt wurden die letzten fünf statistisch erfassten Jahre 2013-2017, wie in Tabelle 10 ausgewiesen. Die Statistik weist Kennzahlen für alle Holzabfälle aus. Eine Anfrage beim BAFU für eine Aufstellung der Holzabfälle aus dem Baubereich ergab, dass rund 30 % der im Inland verbrannten Abfälle aus dem Baubereich stammen. Leider war keine Auswertung der Verwertungswege für Holz nur aus dem Baubereich im Umfang der publizierten Zahlen erhältlich. Für alle Holzabfälle stellt sich die Situation so dar, dass rund 50 % im Inland verbrannt werden. Rund 20 % werden zur Verbrennung exportiert. Die restlichen 30 % gelangen in eine stoffliche Verwertung zur Produktion von Spanplatten. Diese Daten passen gut zu den Angaben von Ruedi Taverna, der sich seit Jahren mit den Entsorgungswegen von Holzwerkstoffen in der Schweiz beschäftigt und zu diesem Bericht Kennzahlen zu den Entsorgungswegen und Hinweise zu statistischen Quellen beigetragen hat (Taverna, 2018).

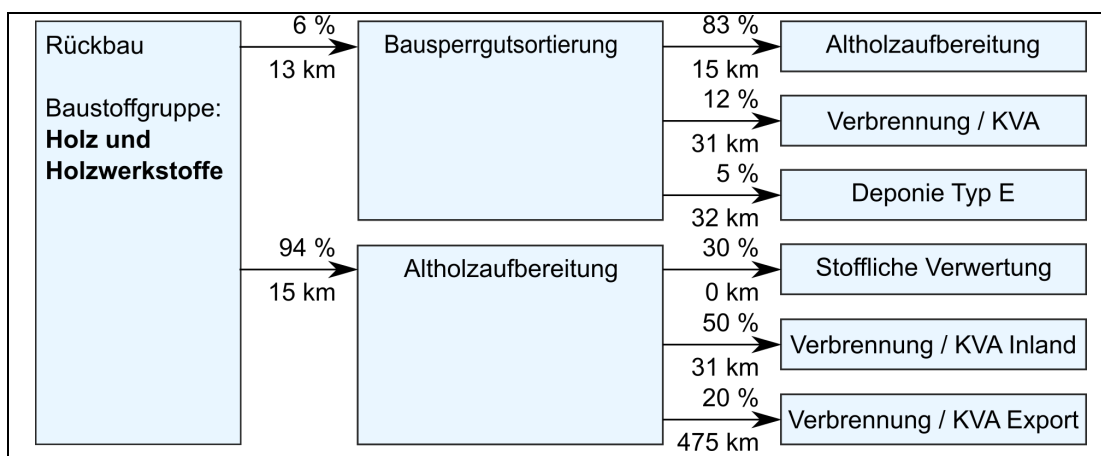


Abbildung 12: Entsorgungsweg Holz und Holzwerkstoffe

Tabelle 10: Entsorgungswege des Altholzes gemäss ak-Statistik des BAFU

Entsorgungsweg Holzabfälle	Mittel 2013-2017 [t]	Anteil [%]
Verbrennung Inland	463'020	53 %
Verbrennung Export	142'900	16 %
Recycling Inland	10'780	1 %
Recycling Export	250'920	29 %

Im Jahr 2017 begann ein Schweizer Spanplattenwerk mit der Verwertung von Holzabfällen, davor wurden alle Späne zur Verarbeitung exportiert. Im Mittel der fünf ausgewerteten Jahre beträgt der Anteil der inländischen Verwertung noch weniger als 1 %. Im Jahr 2017 wurden bereits 7 % der Holzspäne in der Schweiz stofflich verwertet. Das Altholz, welches stofflich verwertet wird, erreicht das Ende der Abfalleigenschaften im Sinne der Ökobilanzierung am Ausgang der Altholzaufbereitungsanlage. Rechtlich ist in der Schweiz kein Ende der Abfalleigenschaft definiert. Demzufolge wird der Transport in ein Spanplattenwerk im Ausland oder in der Schweiz nicht mehr zur Entsorgung gerechnet. Das Altholz, welches am Ausgang der Altholzaufbereitung in eine KVA, bzw. eine Altholzfeuerung gelangt, verbleibt im Entsorgungsprozess. Dementsprechend wurde der Transport sowie die Verbrennung als Teil der Entsorgung bilanziert. Für den Transport in eine KVA in der Schweiz wurde gemäss Tabelle 30 eine durchschnittliche Distanz von 31 km berücksichtigt. Für den Transport in eine KVA, bzw. Altholzfeuerungsanlage in Deutschland, Frankreich, Italien oder Österreich wurde eine durchschnittliche Distanz von 475 km berücksichtigt.

2.7.11 Kies, Sand

Kies und Sand werden als Baustoffe in der KBOB-Liste geführt. Somit bezieht sich der Entsorgungsweg auf diese Baustoffgruppe. In der Entsorgung wird loser Kies und Sand nicht als eigene Fraktion benannt. Es ist in der Entsorgung z. B. ein Teil von Strassenaufbruch oder kiesigem Aushub. Um den Entsorgungsweg von Kies und Sand abzuschätzen, wurden die Daten aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b) für Strassenaufbruch herangezogen (Tabelle 11). Für Kies und Sand aus dem Hochbau sind keine separate Daten vorhanden. Gemäss der Aufstellung in Tabelle 11 gelangen rund 60% Kies und Sand aus dem Rückbau in die Aufbereitung. Es wurde davon ausgegangen, dass der Rest deponiert wird.

Tabelle 11: Daten für Kies, Sand aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b)

Herkunft	Menge [t/a]	Anteil
Strassenaufbruch aus dem Bauwerk	5'374'000	100%
Strassenaufbruch in die Aufbereitung	3'238'000	60%
RC-Kies/Sand	3'108'000	58%

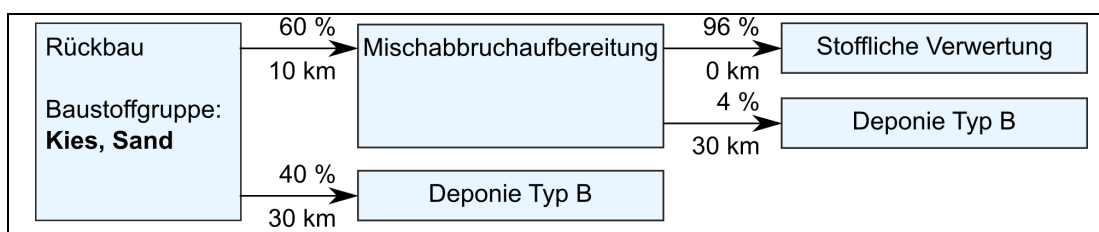


Abbildung 13: Entsorgungsweg von Kies und Sand

Gemäss den Angaben des KAR-Modells (Rubli, 2016b) werden 96 % des Kieses oder Sands, der in eine Aufbereitung gelangt, verwertet. Der Feinanteil wird abgeseibt und deponiert in einer Deponie vom Typ B. Zur Modellierung des Prozessaufwands wird

die Mischabbruchaufbereitung als Proxy verwendet. Die berücksichtigten durchschnittlichen Transportdistanzen zwischen den Prozessen in Abbildung 13 entsprechen den Angaben aus Tabelle 30.

2.7.12 Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche

Den Baustoffen in der Gruppe der Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche ist gemeinsam, dass sie als Anhaftungen an anderen Baumaterialien in die Entsorgung gelangen. Es gibt für sie keine speziellen Entsorgungswege. Sie werden in der Entsorgung als Störstoffe wahrgenommen. Entweder gelangen sie als qualitätsmindernde Verunreinigung in Sekundärstoffe, oder sie werden in einem Prozessschritt des Recyclings abgeschieden. Für die Modellierung der Prozesskette der Entsorgung wählten wir folgenden Ansatz: Wir nehmen an, dass die Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche gleichmässig auf alle Baustoffe verteilt sind, die in die Entsorgung gelangen. Ihr Entsorgungsweg entspricht dann dem gemittelten Entsorgungsweg aller Baustoffe. Wenn ein Baustoff mit Anhaftungen von Kleb-, Dichtstoffen oder Anstrichen in eine stoffliche Verwertung gelangt, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten für den Verbleib der organischen Anhaftungen: Sie können in einem heissen Verfahren verbrannt oder in einem kalten Verfahren in das Sekundärprodukt eingebunden werden. Als heisse Verfahren können die Metall- und Glasschmelze, sowie die Mineralwolle- und Schaumglasherstellung klassiert werden. Für die Modellierung der Prozesskette wird die KVA als Proxy für die Verbrennung im Aufbereitungsverfahren eingesetzt. Die anderen Verwertungsverfahren stellen kalte Verwertungen dar. In diesen Verfahren werden die Anhaftungen im Sekundärprodukt als Störstoffe eingebunden. In der Prozesskette bezeichnen wir diesen Anteil als «Verluste in der stofflichen Verwertung».

Die Auswertung der Stoffflussdaten aus dem Controlling der Stadt Zürich (Tabelle 68 im Anhang A.1) (Rubli, 2005d) ergibt Massen für die Baustofffraktionen. Aus diesen lassen sich die Masseverhältnisse zwischen den Fraktionen berechnen. Da sich die Controllingberichte auf Rückbauten und Grossbaustellen beziehen, werden die Fraktionen, welche in Renovationen anfallen, im Vergleich zum Durchschnitt der landesweit entsorgten Bauabfälle unterschätzt. Im Gegenzug werden die mineralischen Fraktionen Betonabbruch und Mischabbruch überschätzt, die bei Abbrüchen in grösseren Volumen anfallen. Um diesen Effekt auszugleichen, wurden die Mengen auf Basis der Amortisationszeiten von Ausbau und Primärkonstruktion angepasst. Für die Primärkonstruktion rechnet man gemäss SIA 2032 («SIA Merkblatt 2032: Graue Energie von Gebäuden», 2010) mit einer Amortisationszeit von 60 Jahren, für die meisten Ausbauten mit 30 Jahren. Basierend auf diesem Verhältnis haben wir die Abfallmengen für Betonabbruch und Mischabbruch vor der Berechnung der Verhältnisse zwischen den Abfallfraktionen halbiert. Die Fraktionen Aushub und Ausbauphosphat enthalten keine Klebstoffe, Dichtstoffe oder Anstriche und wurden aus der Betrachtung eliminiert. Die Bausperrgutfraktion ermöglichen keine Zuordnung der Anhaftungen zu identifizierbaren Baumaterialien und wurde ebenfalls aus dem Vergleich entfernt. Die Mischfraktionen der brennbaren Materialien und der Inertstoffe können hingegen der direkten Verbrennung in der KVA bzw. der Deponierung in einer Deponie vom Typ B zugeordnet werden. Somit ergeben sich die Mengen und Verhältnisse gemäss Tabelle 12.

Tabelle 12: Tonnagen der Bauabfälle aus Rückbauten der Stadt Zürich, mit Abschätzung des mittleren Abfallaufkommens aus Rückbauten und Renovationen

Fraktion	Masse gesamt [t]	Masse korrigiert [t]	Anteil korrigiert
Aushub	107'196	0	
Betonabbruch	44'834	22'417	49 %
Mischabbruch	29'797	14'899	32 %
Andere Inertstoffe	2'267	2'267	5 %
Altmetalle	2'124	2'124	5 %
Altholz	1'833	1'833	4 %
Bausperrgut	1'481	0	
Gips	919	919	2 %
Ausbauasphalt	863	0	
Brennbare Materialien	367	367	0.8 %
Dachkies	357	357	0.8 %
Wurzelstöcke / Gartenabraum	304	304	0.7 %
Asbesthaltige / PCB-haltige Materialien	227	227	0.5 %
Schlacke	67	67	0.2 %
Holzfenster (inkl. Glas)	60	60	0.1 %
Ziegel	35	35	0.1 %
Sand	22	22	0.05 %
Zementfaserplatten	7	7	0.02 %

Aus der Aufstellung in Tabelle 12 ist zu sehen, dass sechs Fraktionen mehr als 1 % am gesamten Abfallaufkommen ausmachen. Zusammen erzeugen diese Materialien 97 % der Abfallmenge. Die Modellierung der Prozesskette für die Entsorgung der Anhaftungen kann somit vereinfacht werden auf die Kombination der Entsorgungswege dieser sechs Baumaterialien. Die weiteren Materialien sind für die Gesamtbilanz nicht relevant. Der kombinierte Entsorgungsweg berechnet sich aus der gewichteten Summe der Entsorgungswege für «Beton», «undifferenzierte mineralische Baustoffe», «Stahl» und «Gipswerkstoffe». Er ist in Abbildung 14 ausgewiesen. Da der Transport des Trägermaterials in die stoffliche Verwertung bereits zum Herstellungsprozess des Folgeprodukts gerechnet wird, wurde die Distanz für diesen Transport nicht erhoben. Somit wird diese Distanz auch in der Modellierung der Entsorgung der Anhaftungen auf null gesetzt. Der Transportweg in die KVA nach der Metallsortierung beträgt null Kilometer, da die KVA als Proxy für die Verbrennung der Anhaftungen in der Schmelze eingesetzt wird.

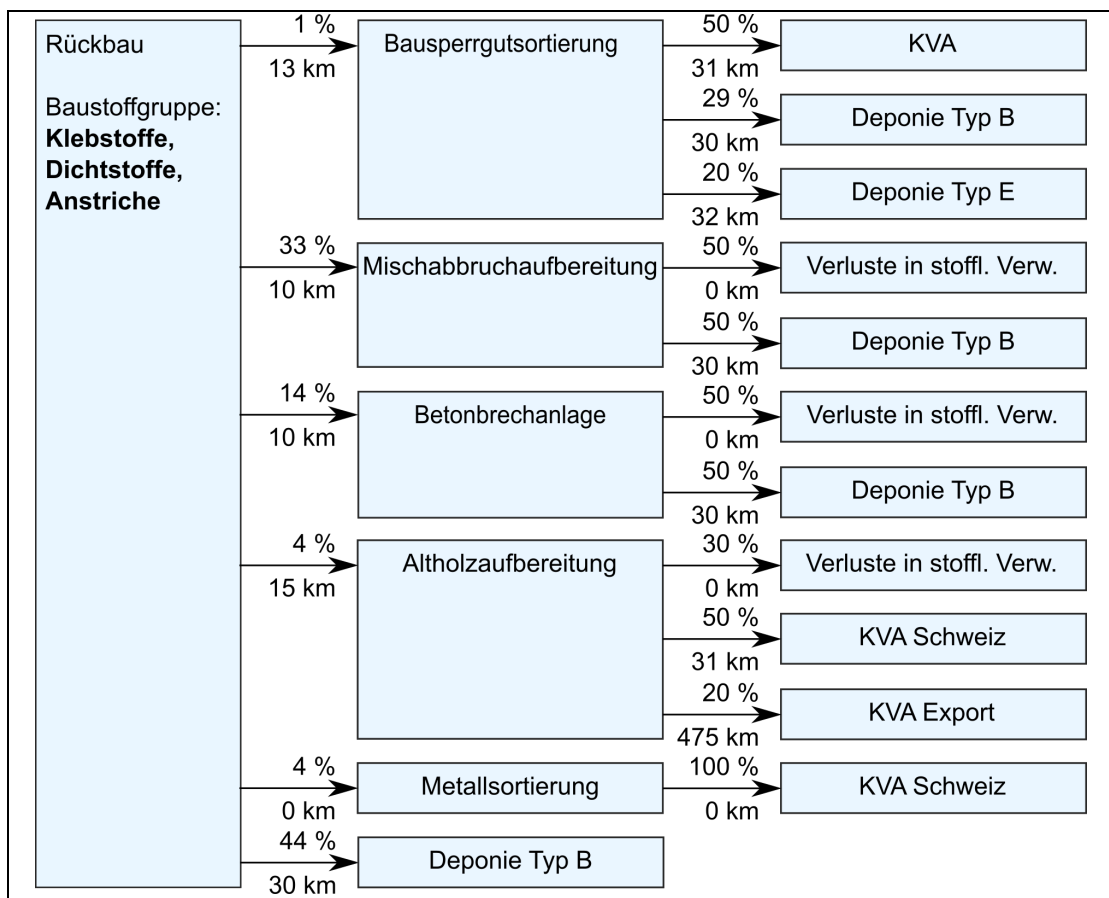


Abbildung 14: Entsorgungsweg der Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche

2.7.13 Kunstharz-Fliessbeläge

Zur Entsorgung von Kunstharz-Fliessbelägen sind keine Informationen bekannt. Die Mengen, welche im Rückbau anfallen, dürften noch sehr gering sein (z. B. Turnhallenbeläge). Kunstharz-Fliessbeläge werden zum einen für grossflächige Anwendungen, wie z. B. als Bodenbeläge eingesetzt. Zum anderen sind sie heute auch für kleinflächige Anwendungen, wie z. B. als Balkonabdichtung, üblich. Es wurde angenommen, dass der Aufwand für den separaten Rückbau der Fliessbeläge zu gross, als dass er in der Praxis umgesetzt wird. Deshalb gelangen die Beläge als Anhaftungen in mineralische Fraktionen. Es wurden angenommen, dass die Beläge zu je 50% in die Mischabbruchaufbereitung und die Deponie Typ B gelangen (Abbildung 15). In der Mischabbruchaufbereitung wurde angenommen, dass die die Fliessbelag-Anhaftungen vollständig in die Feinfraktion gelangen und in der Deponie vom Typ E entsorgt werden.

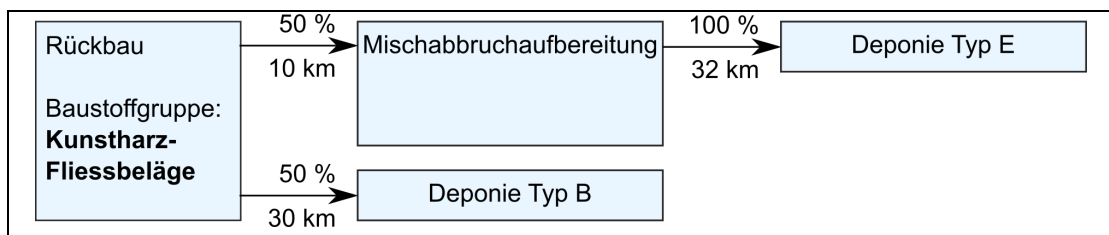


Abbildung 15: Entsorgungsweg Kunstharz-Flieβbeläge

2.7.14 Kunststoffe

Aus den Controlling-Berichten der Rückbauarbeiten im Auftrag der Stadt Zürich ist bekannt, dass der überwiegende Anteil von Baustoffen aus Kunststoff über die Bausperrgutsortierung entsorgt wird. Es wurde angenommen, dass nur 10% der Kunststoffabfälle über Einstoffmulden direkt in die KVA gelangen. Der Rest gelangt in Aufbereitungsanlagen. Gemäss den Angaben eines Bausperrgutsortierers in Zürich werden keine Kunststoffabfälle aus dem Bausperrgut in Kunststofffraktionen abgetrennt, die dann in ein Kunststoffrecycling gelangen. Gemäss Informationen des ARV (Inderbitzin, 2019) gibt es einige Bauschutttaufbereitungsanlagen, welche Kunststofffraktionen zurück gewinnen und in ein Kunststoffrecycling leiten. Da keine Angaben zum Anteil dieser Sortierung gibt, wurde eine konservative Modellierung gewählt, in der alle Kunststoffe in der Verbrennung entsorgt werden. Ein kleiner Anteil dürfte in der Bausperrgut-Aufbereitungsanlage in die Feinfraktion gelangen, welche in einer Deponie vom Typ E entsorgt wird. Es wurde davon ausgegangen, dass 95% der Kunststoffabfälle aus der Aufbereitungsanlage in die KVA und 5% in die Deponie gelangen.

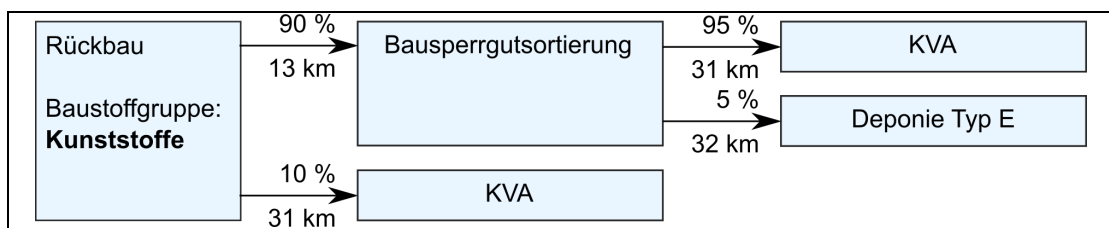


Abbildung 16: Entsorgungsweg Kunststoffe

2.7.15 Kunststoff-Rohre

Der erste Schritt in der Entsorgung der Kunststoffrohre ist identisch mit den Kunststoffen. In der Bausperrgutsortierung wird jedoch ein Teil der Rohre aussortiert und stofflich verwertet. Der Betriebsleiter einer Bausperrgutsortierung gab an, Kunststoffrohre in einer Recycling zu geben, ein Zweiter entsorgt sämtliche Rohre in der KVA. Für eine Gesamtbilanz fehlen statistische Angaben. Der recycelte Anteil musste somit grob abgeschätzt werden. Es wurde angenommen, dass rund die Hälfte der Rohre recycelt werden können und das rund die Hälfte der Aufbereitungsanlagen diese auch aussortiert. Somit ergibt sich der Entsorgungsweg wie in Abbildung 17 dargestellt.

Gemäss Auskunft von Herrn Salvi (Salvi, 2019) gehen die Kunststoffrohre zur Regranulierung zu einem Kunststoff-Recyclingwerk in der Schweiz. Mit der Methode zur

Abschätzung der Transportdistanz wie in Kapitel 2.9.3 vorgestellt, ergibt sich für ein einzelnes Werk in der Schweiz eine Distanz von 171 Kilometer. Diese werden als Transportdistanz für die Modellierung verwendet.

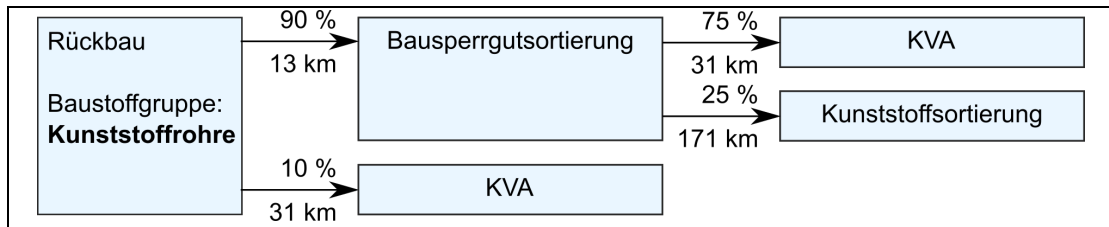


Abbildung 17: Entsorgungsweg Kunststoff-Rohre

2.7.16 Mineralwolle und Aerogel

Gemäss einer Untersuchung im Auftrag des BAFU (Rubli, 2016a) gibt es bei der Entsorgung von Dämmstoffen noch keine einheitliche Praxis. Ein gewisser Anteil wird beim selektiven Rückbau in Einstoffmulden gesammelt. Dieser Anteil gelangt im Falle von mineralischen Dämmstoffen meist in die Deponie. Allerdings werden Dämmstoffe auf der Deponie nicht gern entgegengenommen, da sie im Verhältnis zur Masse viel Volumen beanspruchen. Einige Hersteller setzen Mineralwolleabfälle in der Produktion ein. Für das Recycling werden jedoch praktisch ausschliesslich Verschnittabfälle verwendet. Ein bedeutender Anteil der Fraktionen von Mineralwolle aus Bausperrgut-Aufbereitungsanlagen gelangen gemäss einer Untersuchung vom BAFU sowie eigenen Branchenabklärungen in eine KVA. Glaswolle führt aber in KVAs teilweise zu Problemen bei der Rauchgasreinigung sowie zu einem Verkleben des Rosts. Mineralische Dämmstoffe gehören gemäss ihrer Zusammensetzung zu den mineralischen Bauabfällen und sind gemäss Empfehlungen vom BAFU zu deponieren. (Rubli, 2016a)

Die Anteile von mineralischen Dämmstoffen, welche über Einstoffmulden direkt in einer Deponie entsorgt werden, sind nicht bekannt. Ebenso sind keine Daten vorhanden für die Anteile der mineralischen Dämmstoffe, welche über Bausperrgut-Aufbereitungsanlagen entsorgt werden. Deshalb musste der Entsorgungsweg von Mineralwolle und Aerogel-Vliesen anhand der vorhandenen qualitativen Angaben in der Studie des BAFU (Rubli, 2016a) abgeschätzt werden. Es wurde angenommen, dass rund 70% dieser Baustoffe in einer Bausperrgut-Aufbereitungsanlage von anderen Baustoffen getrennt werden müssen. 30% werden direkt in einer Deponie entsorgt. Die Dämmstoffe, welche in eine Aufbereitungsanlage gelangen, werden zu 50% in der KVA entsorgt. 45% der Dämmstoffe gelangen nach der Sortierung in eine Deponie. Es wurde angenommen, dass ein kleiner Anteil von 5% in die Feinfraktion der Aufbereitungsanlage gelangt und in einer Deponie Typ E entsorgt werden muss.

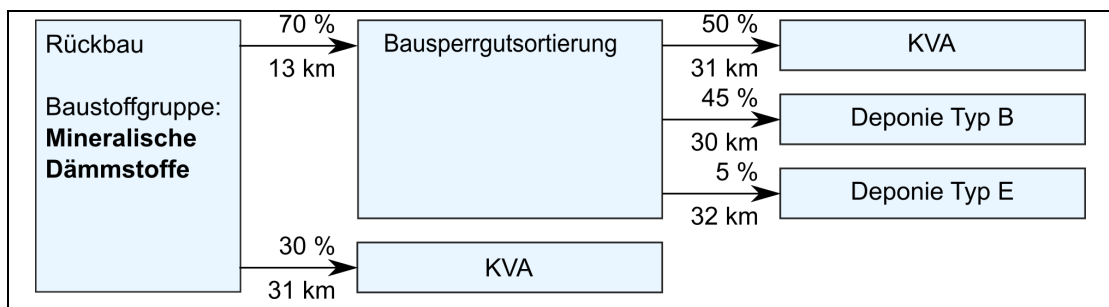


Abbildung 18: Entsorgungsweg Mineralwolle und Aerogel-Vlies

2.7.17 Organische Dämmstoffe

Mindestens ein Hersteller von organischen Dämmstoffen in der Schweiz recyclet Verschnittabfälle (swisspor, 2019). Eine Verwertung von Abfällen aus dem Rückbau findet gegenwärtig nicht statt und dürfte bei einigen Dämmstoffen (EPS, XPS, PUR) aufgrund von Schadstoffen auch in näherer Zukunft nicht möglich sein. Aufgrund der vorgenommenen Recherchen wurde angenommen, dass rund 70% der organischen Dämmstoffe aus dem Rückbau mit dem Bausperrgut in eine Baustoff-Aufbereitungsanlage gelangen (Abbildung 19). Die anderen 30% werden in Einstoffmulden gesammelt und direkt in der KVA entsorgt. Nach der Aufbereitung in der Aufbereitungsanlage gelangen organische Dämmstoffe zusammen mit anderen brennbaren Materialien in die KVA. Nur ein kleiner Anteil von geschätzten 5% gelangt in die Feinfraktion und wird mit dieser zusammen in einer Deponie Typ E entsorgt.

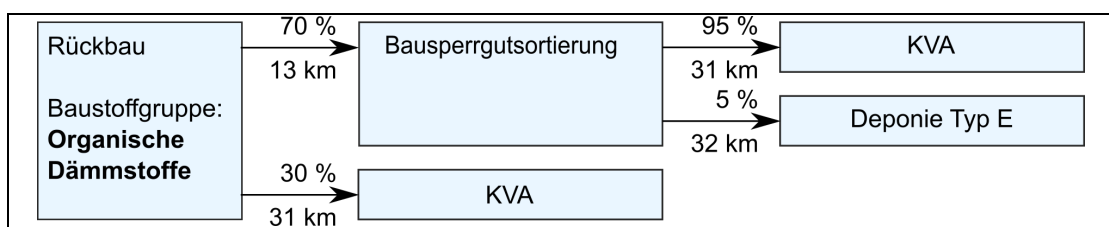


Abbildung 19: Entsorgungsweg organische Dämmstoffe

2.7.18 Mörtel, Putze

Mörtel und Putze gelangen als Anhaftungen von Wänden und Decken in die Entsorgung. Das Vorgehen zur Ermittlung der Entsorgungswege erfolgte nach denselben Prinzipien wie für die Kleb-, Dichtstoffe und Anhaftungen. Für Mörtel und Putze wurden die Fraktionen eingegrenzt auf Betonabbruch, Mischabbruch und Gipswerkstoffe. Mit den Anteilen gemäss Tabelle 12 wurde die Prozesskette für Mörtel und Putze als gewichtete Summe der Prozessketten für die Baustoffgruppen «Beton», «undifferenzierte mineralische Baustoffe» und «Gipswerkstoffe» berechnet. Daraus ergeben sich die Anteile für die Mischabbruchaufbereitung, die Betonbrechanlage und die direkte Deponierung ab Baustelle. Die Prozesskette ist in Abbildung 20 dargestellt.

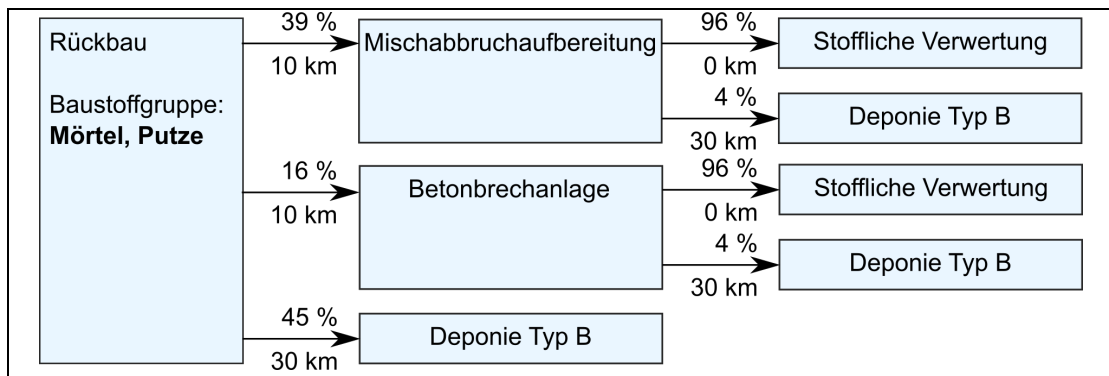


Abbildung 20: Entsorgungsweg Mörtel, Putze

Die Entsorgungswege aus der Mischabbruchaufbereitung und aus der Betonbrechanlage sind dieselben wie für Mischabbruch, bzw. Betonabbruch im Allgemeinen. Mörtel und Putze werden sich gleichmässig auf alle Fraktionen zur Verwertung, bzw. Deponierung verteilen. Mörtel und Putze weisen eine deutlich höhere Festigkeit auf als die Baumaterialien der Gruppe «Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche». Ihnen kann zumindest eine gewisse funktionelle Eigenschaft in den Sekundärprodukten zugeschrieben werden. Im Unterschied zur Gruppe der «Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche» bilanzieren wir deshalb für die Mörtel und Putze eine stoffliche Verwertung.

2.7.19 Stahl

Die überwiegende Menge des Stahls, welche beim Rückbau anfällt, wird in Einstoffmulden gesammelt. Branchenabklärungen ergaben, dass ein nur sehr kleiner Anteil von Metallen aus dem Rückbau in Bausperrgutmulden gelangen. Aus dem Metallanteil in Bausperrgutmulden des ARV-Jahresberichts zur Bauabfallaufbereitung (ARV, 2015) für den Kanton Zürich und den Daten der Controllingberichte der Stadt Zürich (Rubli, 2005d) lässt sich näherungsweise berechnen, wie gross der Anteil der Metalle ist, die in Einstoffmulden gesammelt werden. Gemäss dem Jahresbericht zur Bauschutttaufbereitung (ARV, 2015) beträgt der Metallanteil im Bausperrgut 4 %. Gemäss den Controllingberichten der Stadt Zürich wurden über 2000 t Altmetalle in Einstoffmulden gesammelt und rund 1500 t Abfälle in Bausperrgutmulden. Somit lässt sich berechnen, dass 3% der Metalle in die Bausperrgutsortierung gelangen und 97 % in Metallmulden gesammelt werden. Metallmulden gelangen direkt in Metall-Aufbereitungsanlagen. Der Aufwand für den Transport zu einer Metallsortierung und der Metallsortierung an sich werden in Ecoinvent der Herstellung des Folgeprodukts angerechnet (Classen et al., 2009). In der Bausperrgut-Aufbereitungsanlage wird der Stahl nach der Aussortierung – in den meisten Fällen von Hand oder mittels Überbandmagnet – an eine Metall-Aufbereitungsanlage weitergegeben. Alteisen lässt sich zu relativ hohen Preisen verkaufen und praktisch ohne Qualitätsverlust stofflich verwerten. Aus diesem Grund liegt die Verwertungsquote für Stahl bei nahezu 100%. Dennoch entstehen in jeder Prozesskette zwangsläufig Verluste. Diese werden aufgrund der Erfahrung der Autoren mit Versuchsversuchen auf Recyclinganlagen für Metalle auf 2 % abgeschätzt. Diese Verluste gelangen entweder unkontrolliert in die Umwelt, werden als Wischgut entsorgt oder fallen als Störfractionen in den Recyclingprozessen anderer Materialien an. Für die Ökobilanzierung werden alle diese Wege mangels

besserer Möglichkeiten mit einer Deponie vom Typ B bilanziert. Da die stoffliche Verwertung bereits der Herstellung des Sekundärmaterials zugerechnet wird, nicht jedoch die Verluste, werden diese als Material in die Deponie direkt aus dem Rückbau berücksichtigt.

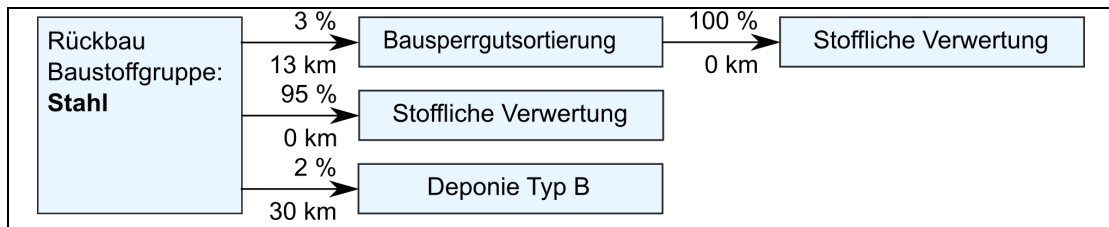


Abbildung 21: Entsorgungsweg für Stahl

2.7.20 Nichteisenmetalle

Der Entsorgungsweg von Nichteisenmetallen ist praktisch derselbe wie für Stahl (siehe Kapitel 2.7.19). Ein Unterschied zeigt sich einzig bei den Verlusten in die Deponie vom Typ B. Nichteisenmetalle werden meist gemischt gesammelt wegen der geringeren Mengen, in welchen sie anfallen. In der Sortierung lassen sich Nichteisenmetalle nicht perfekt in die Einzelmetalle Aluminium, Kupfer, Bronze, etc. trennen. In einem Schmelzwerk wird jedoch nur ein spezifisches Nichteisenmetall zurückgewonnen. Alle anderen Nichteisenmetalle gehen im Schmelzprozess verloren oder vermindern als Störstoffe die Produktqualität. Aus diesen Gründen resultieren in der Verwertung von Nichteisenmetallen grössere Verluste als bei der Eisenverwertung. Der Anteil dieser falsch sortierten Metalle wird auf 17 % abgeschätzt. Für die Bilanzierung werden die Störstoffe als Deponierung qualifiziert, da sie mehrheitlich mit der Schlacke in eine Deponierung gelangen. Schlacken werden in einer Deponie vom Typ D deponiert, für die in Eco-Invent kein Datensatz existiert. Darum verwenden wir Ersatzweise den Datensatz für die Deponie vom Typ B. Da die stoffliche Verwertung bereits der Herstellung des Sekundärmaterials zugerechnet wird, nicht jedoch die Verluste, werden diese als Material in die Deponie direkt aus dem Rückbau berücksichtigt.

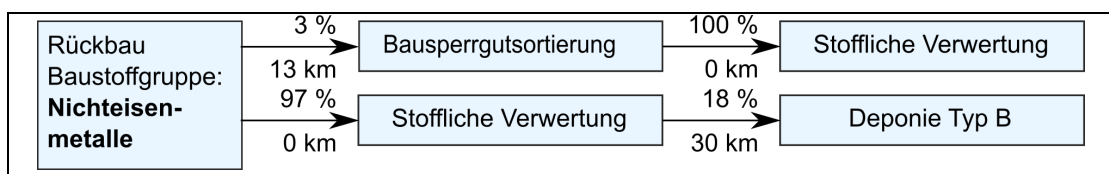


Abbildung 22: Entsorgungsweg für Nichteisenmetalle

2.7.21 Organisch-mineralische Verbundmaterialien

Als organisch-mineralische Verbundmaterialien werden im Rahmen dieser Studie Baustoffe bezeichnet, deren organischen und mineralischen Bestandteile stark vermischt und verbunden sind. Diese Baustoffe lassen sich in der Entsorgung nicht mit ökonomisch vertretbarem Aufwand in organische und mineralische Bestandteile

auffrennen. Diesen Baustoffen ist gemein, dass sie die Entsorgungsinfrastruktur vor eine grosse Herausforderung stellen. Es gibt für sie keinen optimalen Entsorgungsweg: Wegen des hohen organischen Anteils dürfen sie nicht deponiert werden. Wegen des hohen mineralischen Anteils sind sie auch nicht brennbar. In der Praxis gelangen diese Verbundstoffe in eine Verbrennung oder seltener eine Deponie. Entscheidend für den Entsorgungsweg ist die äussere Erscheinung. Holzwolleleichtbauplatten werden gemäss Auskunft aus der Branche verbrannt. Vermutlich liegt das an ihrer geringen Dichte und des «hölzernen» Aussehens. Steinholzbeläge werden eher deponiert, da sie eher wie mineralische Bodenbeläge aussehen. Auch Arbeitsplatten aus Kompositwerkstoffen werden vermutlich eher deponiert als verbrannt. Da Holzwolleplatten weitaus die grösste Menge der Baustoffe in dieser Gruppe ausmachen und zudem die KVA zu höheren Belastungen in der Ökobilanz führt, wird ausschliesslich der Entsorgungsweg über die Verbrennung modelliert (Abbildung 23). Es wird somit für Holzwolleleichtbauplatten der reale Entsorgungsweg modelliert und für die anderen Baumaterialien der Gruppe ein Worst-Case-Szenario.

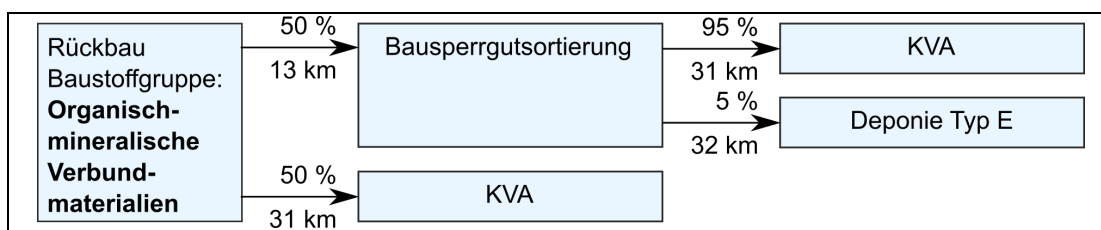


Abbildung 23: Entsorgungsweg für organisch-mineralische Verbundmaterialien

2.7.22 Undifferenzierte mineralische Baustoffe

Für alle Baustoffe in dieser Baustoffgruppe wird davon ausgegangen, dass sie über die Mischabbruchfraktion entsorgt werden. Die Daten zur Entsorgung von Mischabbruch wurden aus dem KAR-Modell (Rubli, 2016b) (Hiltbrunner, 2017) übernommen. Von der jährlich anfallenden Menge an Mischabbruch von 3 Mio. Tonnen gelangen rund 1.65 Mio. Tonnen respektive ein Anteil von 55% in Bauschutt aufbereitungsanlagen (Tabelle 13). Es wird angenommen, dass die restlichen 45% ab Baustelle direkt in einer Deponie vom Typ B entsorgt wird. Zudem gelangt ein geringer Anteil aus der Aufbereitung als Feinfraktion in die Deponie.

Tabelle 13: Daten für Mischabbruch gemäss KAR-Modell (Rubli, 2016b) (Hiltbrunner, 2017)

Herkunft	Menge [t/a]	Anteil
Mischabbruch aus dem Bauwerk	3'000'000	100%
Mischabbruch in die Aufbereitung	1'650'000	55%
RC-Mischgranulat	1'584'292	53%

Das Entsorgungsszenario für undifferenzierte mineralische Baustoffe ist in Abbildung 24 dargestellt. Der Anteil der stofflich verwertet wird, erreicht das Ende der Abfalleigenschaften nach der Aufbereitung. Demzufolge wurden keine weiteren Transporte in ein Zwischenlager oder auf die Baustelle berücksichtigt.

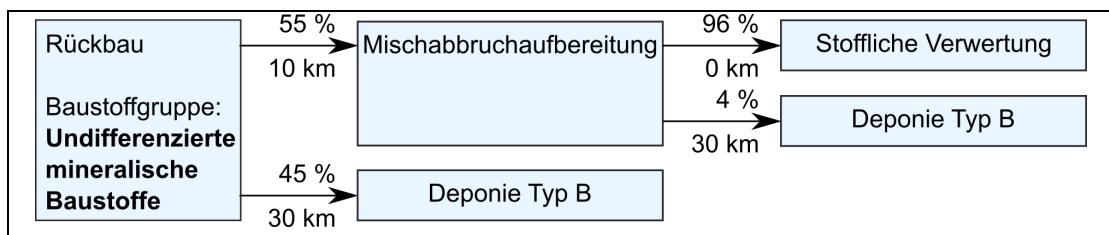


Abbildung 24: Entsorgungswege für undifferenzierte mineralische Baustoffe

2.7.23 Ziegel

Ziegel können recycelt werden zu Dachsubstrat, falls sie separat gesammelt werden. Aus Interviews mit Betreibern von Aufbereitungsanlagen ist bekannt, dass diese Sortierung teilweise vorgenommen wird (Binzegger, 2018; Schneider, 2018). Da Ziegel im Abbruch oft in grösserer Menge anfallen, wurde davon ausgegangen, dass sie oft in einer eigenen Fraktion entsorgt werden. Die Situation ist mit jener von Beton vergleichbar, der ebenfalls separat verarbeitet werden kann, wenn er in grösseren Mengen anfällt. Aus Mangel an konkreten Daten wurden die Anteile für die Entsorgungswege nach dem Rückbau aus der Prozesskette des Betons übernommen. Die Betonbrechanlage steht dabei als Proxy für die Ziegelaufbereitung. Die Aufbereitung besteht im Wesentlichen aus einem Brechprozess wie auch beim Beton.

Für die Aufbereitungsverfahren wurden dieselben Ausbeuten angenommen wie für Mischabbruch. Demnach gelangen 96 % der verarbeiteten Ziegel in eine stoffliche Verwertung und 4 % werden als Feinfraktion deponiert in einer Deponie vom Typ B.

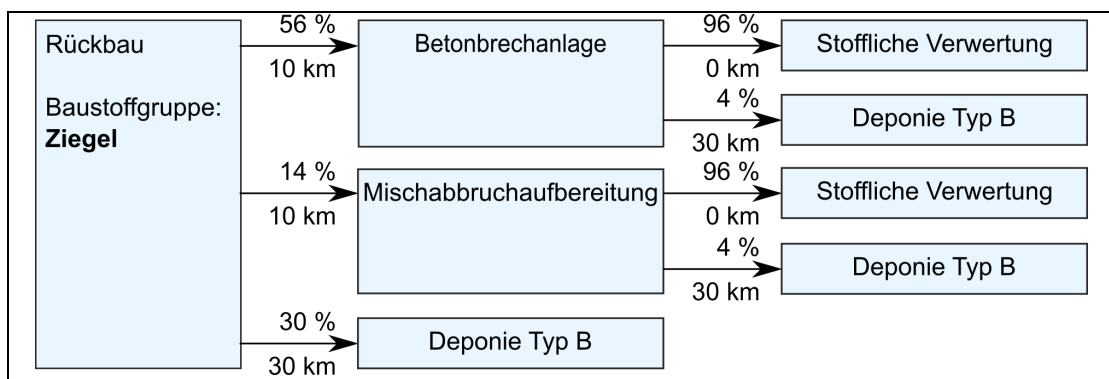


Abbildung 25: Entsorgungsweg von Ziegeln

2.8 Entsorgung von Bauteilen

Für die Bauteile in der KBOB-Liste wurde jeweils die Material-Zusammensetzung recherchiert. Die Materialien wurden dann den zugehörigen Baustoffgruppen zugeteilt. Das Ergebnis dieser Arbeiten ist in Tabelle 14 festgehalten.

Die Entsorgung der Bauteile wird so modelliert, dass die Entsorgungswege der festgestellten Baustoffgruppen anteilmässig verwendet werden. Dies ist eine Vereinfachung. Sie kann jedoch die Umweltlasten der realen Entsorgungsverfahren gut abbilden, was anhand einiger Beispiele nachfolgend kurz erläutert wird:

- Für viele Bauteile entspricht die gewählte Modellierung weitgehend den realen Verhältnissen. Dies sind alle Bauteile, welche auf der Baustelle bereits in ihre Bestandteile zerlegt werden. In diese Gruppe fallen die Baugrubensicherungen, Pfosten-Riegel-Fassade, teilweise Fenster und Türen.
- Verbundsicherheitsgläser werden grundsätzlich ähnlich verarbeitet wie Flachglas, durch Auftrennung in Glasaufbereitungsanlagen. Im Vergleich zu Flachglas fällt zusätzlicher Kunststoff an, der entsorgt werden muss. Die Kombination der Prozessketten für Flachglas und für Kunststoff hat in der Bilanzierung genau diesen erwünschten Effekt. Da in der Prozesskette für die Kunststoffentsorgung eine Bausperrgutsortierung eingerechnet ist bleibt auch der Sortieraufwand plus minus derselbe im Vergleich zur Prozesskette für die Flachglasentsorgung.
- Der Sonnenschutz liegt bereits als Mechanik aus Metallen und Kunststoff und davon räumlich getrennter Elektroinstallation vor. Der Trennungsaufwand der Metalle und des Kunststoffes der mechanischen Installation wird über die Bausperrgutsortierung berücksichtigt, die in der Prozesskette für Kunststoffe enthalten ist. Der Entsorgungsweg für elektrische Installationen und Elektronik aus Bauwerken konnte im Rahmen dieser Studie nicht repräsentativ ermittelt werden. Wir schlagen deshalb vor, den bestehenden Ecoinvent-Datensatz «disposal, industrial devices, to WEEE treatment» (Entsorgung, Industriegeräte, ins Elektrogeräterecycling) als Proxy für die Entsorgung der Elektroinstallation zu verwenden.
- Fenster und Türen, die in mechanischen Prozessen in ihre Bestandteile getrennt werden, werden dabei vermutlich ähnliche Umweltlasten erzeugen wie in den modellierten Prozessketten für die aufgetrennten Baustoffe. Diese Prozessketten enthalten jeweils ebenfalls Trennungsprozesse. Die Gesamtbilanz des hier gewählten Ansatzes sollte darum nicht zu stark von einer korrekten Ökobilanz der effektiven Entsorgungswege abweichen.

Tabelle 14: Zusammensetzung von Bauteilen nach Baustoffgruppen

Bauteil	Bezugsgrösse (Masse)	Baustoffgruppe	Massenanteil
Baugrubensicherung, Bohrpfahlwand, gespriesst	m ² (5'037 kg/m ²)	Beton	98%
		Stahl	2%
Baugrubensicherung, Bohrpfahlwand, unverankert	m ² (4'984 kg/m ²)	Beton	99%
		Stahl	1%
Baugrubensicherung, Bohrpfahlwand, verankert	m ² (3'350 kg/m ²)	Beton	96%
		Stahl	4%

Bauteil	Bezugsgrösse (Masse)	Baustoffgruppe	Massenanteil
Baugrubensicherung, Nagelwand	m ² (741 kg/m ²)	Armierungsstahl	3%
		Beton	96%
		Stahl	0.2% ¹
Baugrubensicherung, Rühlwand, auskragend	m ² (1'286 kg/m ²)	Beton	87%
		Holz	1%
		Stahl	12%
Baugrubensicherung, Rühlwand, gespriesst	m ² (790 kg/m ²)	Beton	84%
		Stahl	16%
Baugrubensicherung, Rühlwand, verankert	m ² (775 kg/m ²)	Beton	86%
		Stahl	14%
Baugrubensicherung, Schlitzwand, 400 mm	m ² (2'500 kg/m ²)	Armierungsstahl	4%
		Beton	96%
Baugrubensicherung, Schlitzwand, 800 mm	m ² (5'000 kg/m ²)	Armierungsstahl	4%
		Beton	96%
Baugrubensicherung, Spundwand, auskragend	m ² (84 kg/m ²)	Stahl	100%
Baugrubensicherung, Spundwand, gespriesst	m ² (84 kg/m ²)	Stahl	100%
Baugrubensicherung, Spundwand, verankert	m ² (84 kg/m ²)	Stahl	100%
Fassade, Pfosten-Riegel, Alu/Glas	m ² (54 kg/m ²)	Flachglas	37%
		Kunststoffe	5%
		Mineralische Dämmstoffe	2%
		Nichteisenmetalle	7%
		Organische Dämmstoffe	0%
		Stahl	49%
Fassadenplatte, Aluverbund, 4 mm	m ² (7 kg/m ²)	Kunststoffe	65%
		Nichteisenmetalle	35%
Fensterrahmen Aluminium	m ² (48 kg/m ²)	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	1%
		Kunststoffe	27%
		Nichteisenmetalle	73%
Fensterrahmen Holz	m ² (81 kg/m ²)	Holz	81%
		Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	7%
		Kunststoffe	2%
		Nichteisenmetalle	4%
		Stahl	6%
Fensterrahmen Holz-Aluminium	m ² (81 kg/m ²)	Holz	68%
		Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	6%
		Kunststoffe	5%
		Nichteisenmetalle	15%
		Stahl	6%

¹ Bentonit wird nicht rückgebaut

Bauteil	Bezugsgrösse (Masse)	Baustoffgruppe	Massenanteil
Fensterrahmen Kunststoff/PVC	m ² (78 kg/m ²)	Kunststoffe	71%
		Organische Dämmstoffe	0%
		Stahl	29%
Isolierverglasung 2-fach, Ug-Wert 1.1 W/m ² K, Dicke 24 mm	m ² (21 kg/m ²)	Flachglas	95%
		Kunststoffe	5%
Isolierverglasung 2-fach, Ug-Wert 1.1 W/m ² K, Dicke 18 mm	m ² (21 kg/m ²)	Flachglas	96%
		Kunststoffe	4%
Isolierverglasung 2-fach, ESG, Ug-Wert 1.1 W/m ² K	m ² (21 kg/m ²)	Flachglas	95%
		Kunststoffe	5%
Isolierverglasung 2-fach, VSG, Ug-Wert 1.1 W/m ² K	m ² (32 kg/m ²)	Flachglas	93%
		Kunststoffe	7%
Isolierverglasung 2-fach, ESG/VSG, Ug-Wert 1.1 W/m ² K	m ² (32 kg/m ²)	Flachglas	93%
		Kunststoffe	7%
Isolierverglasung 3-fach, Ug-Wert 0.5 W/m ² K, Dicke 36 mm	m ² (32 kg/m ²)	Flachglas	95%
		Kunststoffe	5%
Isolierverglasung 3-fach, Ug-Wert 0.6 W/m ² K, Dicke 40 mm	m ² (32 kg/m ²)	Flachglas	94%
		Kunststoffe	6%
Isolierverglasung 3-fach, ESG/ESG, Ug-Wert 0.6 W/m ² K	m ² (32 kg/m ²)	Flachglas	94%
		Kunststoffe	6%
Isolierverglasung 3-fach, ESG/ESG/ESG, Ug-Wert 0.6 W/m ² K	m ² (32 kg/m ²)	Flachglas	94%
		Kunststoffe	6%
Isolierverglasung 3-fach, VSG, Ug-Wert 0.6 W/m ² K	m ² (42 kg/m ²)	Flachglas	96%
		Kunststoffe	4%
Isolierverglasung 3-fach, ESG/VSG, Ug-Wert 0.6 W/m ² K	m ² (42 kg/m ²)	Flachglas	96%
		Kunststoffe	4%
Sonnenschutz, Ausstellstoren motorisiert	m ² (10 kg/m ²)	Elektroinstallation	8%
		Kunststoffe	6%
		Nichteisenmetalle	65%
		Stahl	21%
Sonnenschutz, Lamellenstoren motorisiert	m ² (7 kg/m ²)	Elektroinstallation	11%
		Kunststoffe	6%
		Nichteisenmetalle	49%
		Stahl	33%
Sonnenschutz, Rollläden motorisiert	m ² (9 kg/m ²)	Elektroinstallation	9%
		Kunststoffe	2%
		Nichteisenmetalle	58%
		Stahl	32%
Aussentüre, Holz, aluminiumbeplankt	m ² (88 kg/m ²)	Holz	26%
		Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	0%
		Kunststoffe	1%
		Mörtel, Putze	57%
		Nichteisenmetalle	3%
		Stahl	12%

Bauteil	Bezugsgrösse (Masse)	Baustoffgruppe	Massenanteil
Aussentüre, Holz, Glaseinsatz	m ² (86 kg/m ²)	Flachglas	9%
		Holz	17%
		Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	0%
		Kunststoffe	1%
		Mörtel, Putze	58%
		Nichteisenmetalle	2%
		Stahl	13%
Innentüre, Holz	m ² (36 kg/m ²)	Holz und Holzwerkstoffe	90%
		Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	5%
		Kunststoffe	2%
		Nichteisenmetalle	0%
		Stahl	2%
Innentüre, Holz, Glaseinsatz	m ² (35 kg/m ²)	Flachglas	22%
		Holz und Holzwerkstoffe	69%
		Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	4%
		Kunststoffe	2%
		Nichteisenmetalle	0%
		Stahl	2%
Abfalltrennsystem	Stk. (3 kg/Stk.)	Kunststoffe	100%
Spüle Chromstahl	Stk. (8.7 kg / Stk.)	Stahl	80 %
		Kunststoffe	18 %
		Dichtungsbahnen-, Schutzfolien (Bitumenfolie gemäss Datensatz)	2 %

Für die Bauteile der Küche ist der Aufwand zur Eruiierung der Materialanteile zu hoch, als dass er in dieser Arbeit geleistet werden könnte. Es werden deshalb hier nur die beiden Küchenbilanzen für die Bauteile «Abfalltrennsystem» und «Spüle Chromstahl» exemplarisch dargestellt.

2.9 Ökobilanzen von Rückbau und Entsorgungsanlagen

2.9.1 Hintergrunddaten

Für alle Ökobilanzen wurden die Hintergrunddaten aus dem UVEK Datenbestand 2018 («UVEK Datenbestand», 2018) verwendet. Dieser basiert seinerseits auf den Daten der Ecoinvent-Version 2.2 (Ecoinvent Centre, 2010).

2.9.2 Rückbau

2.9.2.1 Vorgehen

Der Rückbau ist ein Oberbegriff für den Abbruch oder die Demontage von Bauwerken, inklusive der entsorgungsgerechten Trennung der Bauteile und der Materialien auf der Baustelle. Der Rückbau beginnt mit der Entrümpelung und Entkernung eines Gebäudes. Nicht befestigte Materialien und Gegenstände wie Mobiliar und Küchengeräte werden beseitigt. Sofern im Gebäude Schadstoffe vorhanden sind (Asbest, PCB, PAK etc.), werden diese fachgerecht ausgebaut und separat entsorgt. Danach werden sämtliche eingebauten Anlagen und Gegenstände entfernt, welche keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Gebäudes haben (z. B. Fenster, Türen, Heizkörper, Lüftungskanäle, Aufzüge, Rohrleitungen etc.). Die Entrümpelung und Entkernung werden teilweise noch manuell realisiert. Zunehmend werden aber kleine Abbruchmaschinen eingesetzt wie Kompaktlader, Minibagger, diverse handgeführte Abbruch, Bohr- und Schneidegeräte (Schröder et al., 2015). Beim konventionellen Abbruch können – nach der Entfernung von Gebäudeschadstoffen – Rohrleitungen, Heizkörper etc. im Gebäude verbleiben. Diese Bauteile werden nach dem Abbruch aus dem Haufwerk aussortiert. Es ist dies ein Verfahren welches bei eher kleineren Gebäuden zur Anwendung kommt. Bei grösseren Gebäuden erfolgt der Rückbau selektiv d.h. die einzelnen Materialien werden separat zurückgebaut. Gemäss dem Mehr-Mulden-Konzept des Schweizerischen Baumeisterverbandes werden Bauabfälle in Einstoff-Mulden (nur eine Sorte Material) und in verschiedenen Mehrstoff-Mulden für Mischabbruch, brennbares Material und Bausperrgut gesammelt. Mehrstoff-Mulden für Bausperrgut enthalten nicht sortierte Bauabfälle jeglicher Art (ausser Sonderabfälle), die einer Aufbereitungsanlage zugeführt werden. Welche Anteile der Rückbaumaterialien über Einstoff-Mulden respektive Mehrstoff-Mulden entsorgt werden, ist von der Grösse des Rückbauobjekts abhängig. Bei kleinen Baustellen, wo die anfallenden Mengen an Rückbaumaterialien geringer sind und teilweise nur beschränkt Platz für das Aufstellen von Mulden verfügbar ist, gelangt ein grösser Anteil der Materialien ins Bausperrgut.

2.9.2.2 Maschinelle Verfahren und Geräte

Gemäss (Schröder et al., 2015) ist der Rückbau mit Abbruchbaggern und Anbaugeräten das weitaus häufigste Abbruchverfahren (siehe Tabelle 15). Als Anbaugeräte werden alle Werkzeuge bezeichnet, die am Baggerarm angesetzt werden können.

Tabelle 15: Häufigkeit von Abbruchverfahren

Abbruchverfahren	Anwendung Stand 2012
Abbruch mit Abbruchbaggern und Anbaugeräten	83%
Abbruch mittels Sprengungen	2%
Abbruch mit Seilbaggern	1.5%
Abbruch mit sonstigen Baumaschinen (Hebezeuge, Kompaktlader u.a.)	4%
Abbruch mit Diamantwerkzeugen, Hockdruckwasserstrahl	3%
Abbruch mit fernbedienten Abbruchmaschinen	1.5%
Handabbruch und Kleingeräte	4%
sonstige Verfahren (Hub- und Litzentechnik u.a.)	1%

Der Hydraulikbagger ist heute das am häufigsten eingesetzte Abbruchgerät. Aufgrund der Vielzahl der hydraulischen Anbauwerkzeuge, die zusammen mit diesem Bagger eingesetzt werden können, kann der Hydraulikbagger für diverse Arbeiten eingesetzt werden. Mögliche Anbauwerkzeuge für Hydraulikbagger sind:

- Abbruchhammer für das Aufbrechen von Beton und die Zerkleinerung von Abbruchmaterial.
- Abbruchzangen für den Abbruch von Beton. Es gibt auch Kombi-Abbruchzangen welche für den Abbruch von Beton, Stahl und Holz geeignet sind. Nebst den Abbruchhämmern sind die Abbruchzangen die am meisten eingesetzten Werkzeuge.
- Pulverisierer dienen der Aufbereitung von bereits abgebrochenen Betonmaterial. Pulverisierer können auch mit elektrischen Magneten ausgerüstet werden, um Bewehrungsstahl aus dem Betonbruch auszusortieren und zu verladen.
- Beton-/Abbruchfräsen werden zum Abbruch von Holz, Mauerwerk und Beton eingesetzt. Für die vielfältigen Aufgaben sind diverse Fräsköpfe entwickelt worden. Durch den starken Meisselverschleiss sind Fräsen teurer als andere hydraulische Abbruchwerkzeuge. Sie werden deshalb nur für Spezialaufgaben eingesetzt wie konturgenauer Abtrag bei Teilabbruch, Herstellen von Schlitzen und Öffnungen, Rückbau von Betondecken, schichtweiser Abtrag von kontaminierten Bauteilen.
- Abbruchstiele werden bei Abbruchobjekten in Mauer-, Fachwerk- oder Holzbauweisen und bei Stahl-/Stahlbetonskelettbauten eingesetzt.
- Abbruch- und Sortiergreifer werden beim Abbruch von Gebäuden in Misch- oder Holzbauweise, für den Abbruch von Mauerwerk sowie zur Sortierung und Verladung von Abbruchmaterial eingesetzt.
- Stahl- und Schrottscheren werden zum Aufarbeiten von Stahlbauteilen, Trennen, Sortieren und Verladen von Stahlprofilen und Rohrleitungen verwendet. Schrottscheren sind insbesondere auf das Verarbeiten von verborgenen Stahlprofilen, Rohren und anderen Stahlkonstruktionen spezialisiert. Diese Scheren werden in der Regel auf Recyclingplätzen eingesetzt.
- Holzzerkleinerungsgeräte werden für die Zerkleinerung von Altholz eingesetzt. Wegen dem geringen Holzanteil im Abbruchmaterial werden Holzscheren selten auf Baustellen eingesetzt, sondern eher in Aufbereitungsanlagen.

Für das Sortieren und Verladen von Abbruchmaterial werden nebst dem Hydraulikbagger weitere Baumaschinen wie Raupen-, Rad-, Ketten-, Kompakt- und Baggerlader eingesetzt.

2.9.2.3 Energieverbrauch von Maschinen

Aus (Schröder et al., 2015) sind die Nutzleistungen von verschiedenen maschinellen Abbruchverfahren bekannt (Tabelle 16). Die Nutzleistung ist die Leistung, die das Einsatzgerät unter dem technologischen Schema und unter Berücksichtigung aller planbaren mindernden Faktoren erbringen kann. Die Leistungsdaten sind Mittelwerte bei Dauerbetrieb. Unberücksichtigt sind das Laden, Transportieren, Stapeln und Aufbereiten des Abbruchmaterials.

Tabelle 16: Nutzleistung verschiedener Abbruchverfahren

Abbruchverfahren	Mauerwerk	Beton unbewehrt	Stahlbeton schwach bewehrt	Stahlbeton stark bewehrt	Stahlkonstruktion, Stützen, Träger, Rohre, Bleche	Holz- und Fachwerkkonstruktionen
Abbruch mit handgeführten Abbruchhämmern [m ³ feste Masse/h]	0.19 – 0.63	0.19 – 0.44	0.15 – 0.35	0.06 – 0.25		
Abgreifen mit Seilbagger [m ³ feste Masse/h und Gerät]	9 – 20	8 – 16				
Eindrücken mit Kettenlader / Planirraupe [m ³ feste Masse/h und Gerät]	22 – 35	5 – 12				
Radlader [m ³ feste Masse/h und Gerät]	22 – 40	5 – 18				
Hydraulikbagger mit Abbruchhammer [m ³ /h]		40 – 80		30 – 60		
Hydraulikbagger mit Abbruchzange [m ³ /h und Gerät]		30 – 40	20 – 25			
Hydraulikbagger mit Pulverisierer [m ³ /h und Gerät]	30 – 40	25 – 30	15 – 20	12 – 16		
Hydraulikbagger mit Beton-/Abbruchfräse [m ³ /h und Gerät]	8 – 14	8 – 12	3 – 6			
Hydraulikbagger mit Abbruchstiel [m ³ feste Masse/h]	18 – 40	9 – 16	8 – 15			
Hydraulikbagger mit Sortiergreifer [m ³ feste Masse/h und Gerät]	35 – 40					25 – 35
Hydraulikbagger mit Stahlschere [t/h und Gerät]					2 – 9	
Hydraulikbagger mit Schrottschere [t/h und Gerät]					2 – 10	
Hydraulikbagger mit Holzschere [m ³ feste Masse/h und Gerät]						10 – 14

Gemäss dem in Kapitel 2.5.2 dargestellten Prinzip wird ein durchschnittlicher Treibstoffverbrauch pro Kilogramm Abbruchmaterial bestimmt. Dazu müssen eine durchschnittliche Zusammensetzung des Materials sowie die eingesetzten Abbruchverfahren festgelegt werden. Gemäss der Untersuchung von (Guerra et al., 2015) variiert die materielle Zusammensetzung von Gebäuden je nach Bauperiode. So ist zum Beispiel der Betonanteil in Gebäuden die ab 1960 erstellt wurden, deutlich höher als in älteren Gebäuden. Mit den Daten aus der Studie (Guerra et al., 2015) wurde eine durchschnittliche Zusammensetzung des Abbruchmaterials bestimmt (Tabelle 17). Es wurde der Gebäudebestand von allen Bauperioden berücksichtigt und in der

Bestimmung des Mittelwerts gleich gewichtet. Die Gebäude, die heute rückgebaut werden, wurden grösstenteils vor 1970 erstellt. Es wäre also auch denkbar die durchschnittliche Zusammensetzung des Abbruchs mit den Rückbauquoten der Gebäude aus unterschiedlichen Bauperioden zu gewichten. Mit dem gewählten Ansatz zur Bestimmung des Energieverbrauchs für die Rückbauarbeiten liegt der Einfluss dieser Unterschiede allerdings im Bereich der Unsicherheiten.

Tabelle 17: Zusammensetzung von Bauabfällen in Volumenprozent (Guerra et al., 2015)

Fraktionen / Baujahr	< 1900	1900 - 1945	1946 - 1960	1961 - 1975	1976 - 2000	> 2000	Mittelwert
Keramik, Gips, Glas	8%	8%	10%	8%	7%	6%	8%
Metalle	0%	1%	1%	1%	1%	0%	1%
Holz	17%	14%	7%	4%	4%	5%	9%
Brennbares KVA	5%	5%	7%	12%	14%	22%	11%
Mauerwerk	64%	60%	37%	16%	11%	13%	34%
Beton	6%	12%	38%	59%	63%	54%	39%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Für die verschiedenen Fraktionen in Tabelle 17 wurden die Abbruchverfahren sowie mittlere Nutzleistungen gemäss Tabelle 16 festgelegt. Aufgrund der Häufigkeit der bei Rückbauarbeiten eingesetzten Maschinen (Tabelle 15) wurde angenommen, dass für alle Arbeiten Hydraulikbagger mit unterschiedlichen Anbaugeräten eingesetzt werden. Nebst dem Bagger, welcher den Rückbau erledigt, wurde davon ausgegangen, dass ein weiterer Bagger für das Verladen und den Transport von Abbruchmaterial auf der Baustelle erforderlich ist. Die gewählten Abbruchverfahren und Nutzleistungen sind Tabelle 18 aufgeführt. Die Fraktionen Keramik, Gips, Glas und Mauerwerk werden mit einem Sortiergreifer als Anbaugerät rückgebaut. Die berücksichtigte Nutzleistung entspricht dem niedrigsten Wert für Mauerwerk (Tabelle 16). Die gleiche Nutzleistung wurde auch für das Verladen mittels Sortiergreifer für die mineralischen Fraktionen sowie für Metalle berücksichtigt. Für den Rückbau von Metallen wurde der Mittelwert der Nutzleistung für Hydraulikbagger mit Stahlschere berücksichtigt. Für Holz und brennbare Abfälle wurde ein Rückbau mittels Sortiergreifer als Anbaugerät angenommen. Als Nutzleistung wurde der entsprechende Mittelwert aus Tabelle 16 für Holz angenommen. Die gleiche Nutzleistung wurde auch für das Verladen dieser beiden Abfallfraktionen berücksichtigt. Für Beton wird von einem Rückbau mit Abbruchzange als Anbaugerät ausgegangen. Die gewählte Nutzleistung entspricht dem unteren Ende der Skala für schwach bewehrten Beton.

Tabelle 18: Abbruchverfahren und Nutzleistungen

Fraktion	Abbruchverfahren	Nutzleistung Abbruch	Nutzleistung Verladen
Keramik, Gips, Glas	Abbruch durch Raupenbagger mit Sortiergreifer, Verladen Radbagger mit Sortiergreifer	35 m ³ /h	35 m ³ /h
Metalle	Abbruch durch Raupenbagger mit Stahlschere, Verladen Radbagger mit Sortiergreifer	5.5 t/h	35 m ³ /h
Holz	Abbruch durch Raupenbagger mit Sortiergreifer, Verladen Radbagger mit Sortiergreifer	30 m ³ /h	30 m ³ /h
Brennbares KVA	Abbruch durch Raupenbagger mit Sortiergreifer, Verladen Radbagger mit Sortiergreifer	30 m ³ /h	30 m ³ /h
Mauerwerk	Abbruch durch Raupenbagger mit Sortiergreifer, Verladen Radbagger mit Sortiergreifer	35 m ³ /h	35 m ³ /h
Beton	Abbruch durch Raupenbagger mit Abbruchzange, Verladen Radbagger mit Sortiergreifer	20 m ³ /h	35 m ³ /h

Die verwendeten Daten für den Treibstoffverbrauch in Tabelle 19 stammen aus einer Studie des BAFU zu Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des «Non-road-Sektors» (Notter et al., 2015). In der Regel werden die Maschinen im Teillastbereich betrieben. Entsprechend muss für die Berechnung des Treibstoffverbrauchs die Nennleistung um einen Lastfaktor auf die effektive Leistung reduziert werden. Mit der effektiven Leistung und dem Treibstoffverbrauch in g/kWh lässt sich ein Treibstoffverbrauch in kg/h ermitteln. Gemäss den gewählten Abbruchverfahren werden in der vorliegenden Studie die Daten für Raupen- und Radbagger verwendet.

Tabelle 19: Diesel und Energieverbrauch von Baumaschinen

Kategorie	Nennleistung [kW]	Lastfaktor Effektiv	Effektive Leistung [kW]	Treibstoffverbrauch [g/kWh]	Treibstoffverbrauch [kg/h]
Raupenbagger	98	0.42	41	223	9.18
Radbagger	68	0.33	22	248	5.57
Minibagger	19	0.32	6	248	1.51
Dumper/Kipper	74	0.35	26	248	6.42
Lader (Pneu & Raupen)	107	0.35	37	223	8.35

Mit den Daten aus Tabelle 18 und Tabelle 19 wurde für die verschiedenen Bauabfallfraktionen der Dieselverbrauch pro Kubikmeter Rückbaumaterial berechnet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Nutzleistung gemäss Tabelle 18 im Dauerbetrieb deutlich höher ist als beim durchschnittlichen Betrieb auf der Baustelle. Deshalb wurde abgeschätzt, dass die Betriebszeit des Abbruchbaggers nur etwa ein Drittel der Einsatzzeit beträgt. Die effektive Nutzleistungen in Tabelle 20 entsprechen deshalb jeweils einem Drittel der Nutzleistungen für Abbruch und Verladen aus Tabelle 18. Der Verbrauch von Maschine I entspricht der Aufwendung für den Abbruch und jener von Maschine II dem Verbrauch für das Verladen.

Tabelle 20: Dieserverbrauch in kWh pro m³ Material für verschiedene Abfallfraktionen

Fraktionen	Nutzleistung effektiv Abbruch [m ³ /h]	Dieserverbrauch Maschine I [kg/m ³]	Nutzleistung effektiv Verladen [m ³ /h]	Dieserverbrauch Maschine II [kg/m ³]	Summe Dieserverbrauch [kg/m ³]
Keramik, Gips, Glas	11.6	0.79	11.6	0.48	1.28
Metalle	7 ²	1.30	11.6	0.48	1.78
Holz	9.9	0.93	9.9	0.56	1.49
Brennbares KVA	9.9	0.93	9.9	0.56	1.49
Mauerwerk	11.6	0.79	11.6	0.48	1.28
Beton	6.6	1.39	11.6	0.48	1.87

Um einen durchschnittlichen Dieserverbrauch pro m³ Bauabfall zu ermitteln, wurden die Daten aus Tabelle 20 mit der durchschnittlichen Zusammensetzung von Rückbaumaterial gemäss Tabelle 17 gewichtet. Die Berechnung des Verbrauchs ist in Tabelle 21 dargestellt. Um einen Dieserverbrauch pro Kilogramm Bauabfall zu ermitteln, wurden die durchschnittlichen Schüttdichten der Abfallfraktionen ermittelt (Tabelle 22). Die Schüttdichten der Fraktionen wurden aus Daten aus dem Controlling von Rückbauprojekten des Hochbauamts der Stadt Zürich berechnet (Rubli, 2017a). Die Volumen-Anteile stammen aus der Studie von Wüest und Partner über die Bauabfälle in der Schweiz (Guerra et al., 2015).

Tabelle 21: Dieserverbrauch (Endenergie) pro m³ Bauabfall

Fraktionen	Anteil [Volumen-%]	Dieserverbrauch gewichtet [kg/m ³]
Keramik, Gips, Glas	8%	0.10
Metalle	1%	0.01
Holz	9%	0.13
Brennbares KVA	11%	0.16
Mauerwerk	34%	0.43
Beton	39%	0.72
TOTAL	100%	1.55

Tabelle 22: Ermittlung mittleres Schüttgewicht von Bauabfall

Fraktionen	Mittelwerte Controlling AHB [kg/m ³]	Anteil [Vol.-%]	Anteile [kg/m ³]
Keramik, Gips, Glas	818	8%	64
Metalle	256	1%	2
Holz	198	9%	17
Brennbares KVA	134	11%	15
Mauerwerk	1060	34%	355
Beton	1359	39%	526
Gewichteter Mittelwert			978

² Die Nutzleistung von 5.5 t/h aus Tabelle 16 wurde mit der mittleren Schüttdichte von 256 kg/m³ gemäss Tabelle 22 auf m³/h umgerechnet.

Mit den Daten aus Tabelle 22 ergibt sich für Bauabfälle ein durchschnittliches Schüttgewicht von 978 kg/m³. Der Dieserverbrauch aus Tabelle 21 für den Rückbau und das Verladen auf der Baustelle entspricht somit 1.59 g Diesel pro Kilogramm Bauabfall (Tabelle 23).

Tabelle 23: Dieserverbrauch Rückbau pro Kilogramm Material aus Literaturrecherchen

Ø Dieserverbrauch pro Kubikmeter [kg/m ³]	Ø Schüttgewicht Bauabfall [kg/m ³]	Endenergie Diesel pro Kilogramm Rückbaumaterial [kg/kg]
1.55	978	1.59E-03

Nebst den Literaturrecherchen lieferte Implenia Schweiz AG Angaben zum Dieserverbrauch für Maschinen beim Rückbau. Dieser beträgt 1.6 bis 2 Liter Diesel pro m³ Abbruchvolumen³. Bei einer durchschnittlichen Rohdichte von Diesel 0.83 kg/m³ entspricht dies 1.3 bis 1.7 kg Diesel pro m³ Abbruchvolumen. Daraus resultiert ein durchschnittlicher Dieserverbrauch von 1.53 g pro Kilogramm Abbruchmaterial. Dieser Wert ist fast identisch wie jener, der basierend auf Literaturrecherchen ermittelt wurde.

Tabelle 24: Dieserverbrauch Rückbau pro Kilogramm Material Angaben Implenia Schweiz AG

Diesel pro Kubikmeter [kg/m ³]	Ø Schüttgewicht Bauabfall [kg/m ³]	Ø Dieserverbrauch pro Kilogramm Rückbaumaterial [kg/kg]
1.33 – 1.66	978	1.53E-03

2.9.2.4 Sachbilanz

Für die Ökobilanz der Rückbauarbeiten wurde der durchschnittliche Dieserverbrauch gemäss Angaben von Implenia Schweiz AG (Tabelle 24) berücksichtigt.

Für die Erstellung der Sachbilanz wurde der Aushub-Datensatz «excavation, hydraulic digger» des UVEK-Datenbestands 2018 für den Rückbau angepasst. Erstellt wurde daraus der neue Rückbau-Datensatz «deconstruction, hydraulic digger, average» mit der Bezugsgrösse 1 kg rückgebautes Material. Die Infrastrukturdaten (Bagger und Schmieröl) aus dem UVEK-Datensatz wurden entsprechend angepasst. Dem Datensatz «excavation, hydraulic digger» liegt eine Nutzleistung von 100 m³/h und eine Einsatzzeit von 10'000 Stunden während seiner Lebensdauer zugrunde. Gemäss Tabelle 25 ergibt sich aus der durchschnittlichen Nutzleistung der beim Abbruch rückgebauten Fraktionen ein Volumen gewichteter Mittelwert von 10.26 m³/h. Umgerechnet mit dem durchschnittlichen Schüttgewicht aus Tabelle 24 ergibt dies eine durchschnittliche Nutzleistung von rund 10 Tonnen/h. Daraus ergibt sich ein Zeitaufwand von rund 1.0E-4 Stunden pro kg Rückbaumaterial. Proportional zur Lebensdauer des Baggers von 10'000 Stunden (Einsatzzeit) erfordert der Rückbau einen Anteil von ca. 1.0E-8 eines Baggers (Tabelle 27). Zudem verbraucht der Bagger während seiner gesamten Einsatzzeit von 10'000 Stunden 1.81 Tonnen Schmiermittel

³ Kommunikation per E-Mail Y. Deluz vom 20.11.2018

respektive 0.181 kg pro Stunde. Für einen Zeitaufwand von 1.0E-4 Stunden pro kg Rückbau ergibt sich somit ein Verbrauch von 1.8E-5 kg Schmiermittel pro kg Rückbau (Tabelle 27).

Tabelle 25: Mittlere Nutzleistung gewichtet nach Fraktionen von Rückbaumaterial

Fraktionen	Anteil [Volumen-%]	Ø Nutzleistung effektiv Maschine I und II [m ³ /h]	Ø Nutzleistung effektiv Maschine I und II gewichtet [m ³ /h]
Keramik, Gips, Glas	8%	11.6	0.90
Metalle	1%	9.3	0.06
Holz	9%	9.9	0.84
Brennbares KVA	11%	9.9	1.07
Mauerwerk	34%	11.6	3.87
Beton	39%	9.1	3.51
TOTAL	100%		10.26

Die Emissionen wurden im Verhältnis des Dieserverbrauchs des Aushubdatensatzes zum Rückbaudatensatz neu berechnet. Für die Bilanzierung der Emissionen aus der Dieserverbrennung wurde der Hilfsdatensatz «diesel, burned in hydraulic digger» erstellt. Bezugsgrösse ist ein Kilogramm verbrannten Diesels. Die Sachbilanz des neuen Datensatzes für die Dieserverbrennung wird in Tabelle 26 ausgewiesen, diejenige für den Rückbaudatensatz in Tabelle 27.

Tabelle 26: Sachbilanzdaten Diesel, Verbrennung in Hydraulikbagger

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	diesel, low-sulphur, at regional storage/kg/CH	kg	1
Emissionen (to air / unspecified)	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	Acetaldehyde	kg	6.886E-05
	Acrolein	kg	2.667E-05
	Ammonia	kg	8.000E-06
	Arsenic	kg	1.000E-10
	Benzaldehyde	kg	2.064E-05
	Benzene	kg	1.055E-06
	Benzo(a)pyrene	kg	3.000E-08
	Butane	kg	2.260E-06
	Cadmium	kg	1.000E-08
	Carbon dioxide, fossil	kg	3.150E+00
	Carbon monoxide, fossil	kg	7.419E-03
	Chromium	kg	5.000E-08
	Chromium VI	kg	1.000E-10
	Copper	kg	1.700E-06
	Dinitrogen monoxide	kg	1.528E-04
	Ethane	kg	4.520E-07
	Formaldehyde	kg	1.266E-04

Emissionen (to air / unspecified)	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	Heptane	kg	4.520E-06
	Lead	kg	5.200E-08
	m-Xylene	kg	1.477E-05
	Mercury	kg	5.300E-09
	Methane, fossil	kg	3.900E-05
	Nickel	kg	7.000E-08
	Nitrogen oxides	kg	1.812E-02
	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	1.224E-03
	Noise, road, lorry, average	km	4.087E+00
	o-Xylene	kg	6.027E-06
	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	kg	3.290E-06
	Particulates, < 2.5 um	kg	1.601E-04
	Pentane	kg	9.041E-07
	Propane	kg	1.507E-06
	Selenium	kg	1.000E-08
	Styrene	kg	8.438E-06
	Sulfur dioxide	kg	2.000E-05
	Toluene	kg	1.507E-07
	Zinc	kg	1.000E-06
	Heat, waste	kWh	1.19
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	diesel, burned in hydraulic digger	kg	1

Tabelle 27: Sachbilanzdaten Rückbau, hydraulischer Bagger, mittlerer Aufwand

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	diesel, burned in hydraulic digger	kg	1.528E-03
	Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U	kg	1.804E-05
	Hydraulic digger/RER/I U	Stk.	9.969E-09
	Lubricating oil, at plant/RER U	kg	1.804E-05
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	deconstruction, hydraulic digger, average	kg	1

2.9.3 Transporte

2.9.3.1 Ermittlung der Transportdistanzen

Die Transporte in Aufbereitungsanlagen und in die Beseitigung sind nicht materialsondern anlagespezifisch. Die durchschnittlichen Transportdistanzen von der Baustelle in die Aufbereitung oder in die Beseitigung können anhand der Anlagendichte in der Schweiz ermittelt werden.

Gemäss dem Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen VBSA gibt es in der Schweiz derzeit 30 Kehrrichtverbrennungsanlagen (KVA). Die Fläche der Schweiz beträgt rund 41'000 km². Daraus ergibt sich pro KVA ein

durchschnittliches Einzugsgebiet von 1'367 km² respektive ein Radius von 21 km (siehe Tabelle 28).

Die Anzahl Deponien (Typ A bis E) sind aus der Deponieliste des BAFU (BAFU, 2017) bekannt. Daraus ergeben sich die durchschnittlichen Transportdistanzen in Tabelle 28).

Die Aufbereitung von Bauabfällen geschieht je nach Zusammensetzung in Bausperrgut-Aufbereitungsanlagen, Altholz-Aufbereitungsanlagen, Bauschutt-aufbereitungsanlagen oder in Anlagen für Altmittel-Recycling. Die Anzahl der Anlagen in der Schweiz wurde mit dem Verzeichnis für Abfallanlagen auf www.abfall.ch bestimmt.

Tabelle 28: Durchschnittliche Distanzen der Luftlinie für Aufbereitung und Beseitigung

Anlage	Anzahl in CH	Ø Distanz Luftlinie [km]
Altholz-Aufbereitungsanlage	126	10
Altmittel-Recyclinganlage	129	10
Bauschutt-Aufbereitungsanlage	313	6
Bausperrgut-Aufbereitungsanlage	164	9
Deponie Typ A	149	9
Deponie Typ B	130	10
Deponie Typ C	11	34
Deponie Typ D	28	22
Deponie Typ E	28	22
Kehrrichtverbrennung	30	21
Kunststoff-Sortierung	1	114

Reale Transporte finden auf Strassen statt, die nicht der Luftlinie folgen. Somit sind die realen Transportdistanzen länger als die Luftlinie aus der Abschätzung in Tabelle 28. Die Luftlinie muss mit einem Faktor multipliziert werden, der das Verhältnis zwischen Luftlinie und realer Transportdistanz beschreibt. Zur Ermittlung dieses Faktors wurde für einige Strecken im Mittelland sowohl die Distanz der Luftlinie wie auch der realen Route mit einem Routenplaner ermittelt. Die Ergebnisse dieser Erhebung sind in Tabelle 29 ausgewiesen. Im Mittelland beträgt das Verhältnis ungefähr 1.3. Im Alpenraum kann es sehr viel grösser werden, mit dem Extremfall von benachbarten Gemeinden in langen Seitentälern ohne Passübergang. Für die gesamte Schweiz wird das Verhältnis aufgrund der Erhebung auf 1.5 abgeschätzt. Die Daten in werden daher mit dem Faktor 1.5 multipliziert, um Abschätzungen für die Transportdistanzen zu erhalten. Diese werden in Tabelle 30 ausgewiesen.

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse in Tabelle 30 wurden alle Angaben zu den Transporten in den Controlling-Berichten zur Entsorgung von Bauprojekten der Stadt Zürich ausgewertet und mittlere Transportdistanzen berechnet (Daten im Anhang A.1). Die Ergebnisse der Auswertung der Controlling-Berichte sind in Tabelle 31 abgebildet. Berücksichtigt wurden nur Fraktionen mit mehr als 100 Transporten in der Statistik. Aushubasphalt wird abgebildet, da der Begriff Bauschutt für Kombination die Fraktionen Betonabbruch, Mischabbruch, Ausbauasphalt und Kiesmaterial verwendet wird. Für Kies gibt es in den Berichten keine gesonderte Kategorie.

Tabelle 29: Verhältnis zwischen Luftlinie und realen Routen

Region	Start	Ziel	Luftlinie [km]	Schnellste Route Google Maps [km]	Verhältnis Route / Luftlinie
Mittelland	Bern	Steffisburg	25	28	1.12
Mittelland	Bern	Schwarzenburg	16	21	1.31
Mittelland	Altdorf	Luzern	33	41	1.24
Mittelland	Zürich	Glarus	53	69	1.30
Mittelland	La Praz	Fey	20	26.5	1.33
Alpen	Leukerbad	Grimenz	22.7	41	1.81
Alpen	Maggia	Osogna	23	51	2.22
Mittelwert					1.48

Tabelle 30: Mit der Anlagedichte berechnete Transportdistanzen für Aufbereitung und Beseitigung

Anlage	Ø Transportdistanz [km]
Altholz-Aufbereitungsanlage	15
Altmetall-Recyclinganlage	15
Bauschutt-Aufbereitungsanlage	10
Bausperrgut-Aufbereitungsanlage	13
Deponie Typ A	14
Deponie Typ B	15
Deponie Typ C	52
Deponie Typ D	32
Deponie Typ E	32
Kehrrichtverbrennung	31
Kunststoff-Sortierung	171

Tabelle 31: Mittlere Transportdistanzen für Bauprojekte der Stadt Zürich

Fraktion	mittlere Distanz Hinfahrt [km/Fahrt]	Anzahl Transporte in Auswertung
Betonabbruch	9	2304
Mischabbruch	12	2126
Ausbauasphalt	21	53
<i>Bauschutt</i>	11	4483
Inertstoffe / Deponie Typ B	46	313
Altmetalle	15	474
Bausperrgut	13	275
Brennbare Materialien	5	214
Aushub	29	5819
Altholz	12	280

Aus dem Vergleich der Tabelle 31 mit der Tabelle 30 ergeben sich gute Übereinstimmungen für die Transportdistanzen von Bausperrgut, Altholz, Bauschuttfraktionen und Altmetallen. Deutliche Unterschiede ergeben sich für brennbare Materialien in die Kehrrichtverbrennung und die Deponie Typ B. Für Brennbare Materialien ist anzunehmen, dass die Transportdistanzen in der Stadt Zürich deutlich geringer sind als

im Schweizer Durchschnitt, da alle brennbaren Abfälle in der Stadt selbst entsorgt werden können. Die mittlere Distanz aus der Berechnung der KVA-Verteilung erscheint plausibler. Für Deponien des Typ B ergibt sich aus den Controllingberichten, dass nicht immer die nächstgelegene Deponie berücksichtigt wird. Dies führt dann zu deutlich längeren Transportwegen als durch die Anzahl der Deponien zu erwarten. Zudem zeigt ein Blick auf die Karte der Deponien auf abfall.ch, dass die Deponien Typ B eher ausserhalb der Agglomerationen der grösseren Städte liegen. Somit ist für die Transporte aus der Stadt von einer Überschätzung der mittleren Transportdistanz auszugehen. Da die Bautätigkeit in den Städten grösser ist als den ländlichen Gebieten, muss dieser Effekt in der Abschätzung der Transportdistanz berücksichtigt werden. Mangels weiterer Daten schätzen wir die Transportdistanz auf den Mittelwert beider Herleitungen auf 30 km ab. Somit ergeben sich die Transportdistanzen für die Entsorgung gemäss Tabelle 32.

Tabelle 32: Mittlere Transportdistanzen für Aufbereitung und Beseitigung von Bauabfällen

Anlage	Ø Transportdistanz [km]
Altholz-Aufbereitungsanlage	15
Altmittel-Recyclinganlage	15
Bauschutt-Aufbereitungsanlage	10
Bausperrgut-Aufbereitungsanlage	13
Deponie Typ A	14
Deponie Typ B	30
Deponie Typ C	52
Deponie Typ D	32
Deponie Typ E	32
Kehrrichtverbrennung	31
Kunststoff-Sortierung	171

2.9.3.2 Sachbilanz

Die Transporte werden im Normalfall als Strassentransporte mit Lastwagen von 16-32 Tonnen Gesamtgewicht modelliert. Gewählt wird der Datensatz für die durchschnittliche Flotte in der Schweiz. Die Transporte werden jeweils in die Modellierung der Entsorgungsprozesse integriert.

2.9.4 Altholzaufbereitungsanlage

2.9.4.1 Datengrundlagen

Gemäss Auskünften von Betreibern von Altholzaufbereitungsanlagen und Aufbereitungsanlagen werden Holzabfälle immer in Holzshreddern zerkleinert bevor sie thermisch oder stofflich verwertet werden. Die zur Aufbereitung eingesetzten Maschinen umfassen einen Bagger mit Sortiergreifer zur Beschickung des Shredders, ein Shredder für Holzabfälle, bestehend aus Vorbrecher und Hammermühle und eine Abführung per Förderer in den Bunker. Der Verlad aus dem Bunker in den Lastwagen zum Abtransport erfolgt dann per Radlader.

Für den Energieverbrauch eines strombetriebenen Holzshredders inklusive Förderer in den Bunker standen Daten zur installierten Leistung, der jährlichen Betriebsdauer

einer Anlage und der verarbeiteten Altholzmenge zur Verfügung (Germann, 2018). Der Bagger zur Beschickung wird fast ausschliesslich für die Holzverarbeitung eingesetzt. Für den Bagger war der jährliche Dieserverbrauch bekannt. Für die Verladung aus dem Bunker auf einen Lastwagen zum Abtransport wurde die Verladedauer durch (Germann, 2018) abgeschätzt. Zudem erhielten wir von derselben Quelle den Jahresverbrauch an Diesel und die Betriebsdauer des Radladers.

Mit den Angaben der Endenergieverbrauch des Shredders pro Kilogramm Holzabfall ermittelt (Tabelle 33). Es wird davon ausgegangen, dass der Shredder im Teillastbereich betrieben wird. Entsprechend wurde die Nennleistung von 200 kW mittels eines Lastfaktors von 0.7 auf eine effektive Leistung reduziert. Der Lastfaktor wurde aus den Angaben zum mittleren Lastfaktor in der Studie zum Energieverbrauch des non-road-Sektors hergeleitet (Notter et al., 2015). Es resultieren 0.007 kWh Stromverbrauch pro Kilogramm geshreddertem Holzabfall.

Tabelle 33: Endenergieverbrauch des Holzshredders

Anlage	Leistung [kW]	Lastfaktor	Endenergie [kWh/kg]
Holzshredder	200	0.7	0.007

Der Dieserverbrauch für die Beschickung der Anlage wurde hergeleitet aus dem Dieserverbrauch des Sortierbaggers pro Jahr, der zu 90 % der Tätigkeit des Altholzsortierens und des Beschickens der Anlage zugerechnet wurde (Tabelle 34). Die Umrechnung des Jahresverbrauchs an Diesel erfolgte mit einer Dichte des Diesels von 0.83 kg/l und der Jahresmenge in der Altholzaufbereitung.

Der Dieserverbrauch für das Verladen der Späne aus dem Bunker auf den Lastwagen zum Abtransport wurde berechnet aus dem bekannten Jahresdieserverbrauch, der Betriebsdauer und Annahmen zur Verladezeit. Diese wurde durch (Germann, 2018) auf 15 min pro 15 Tonnen Material geschätzt. Somit muss er für das Verladen der Jahresmenge während 250 Stunden eingesetzt werden. Mit diesen Angaben berechnet sich der interne Logistikaufwand gemäss den Angaben in Tabelle 34.

Tabelle 34: Endenergieverbrauch Radbagger und Radlader

Anlage	Dieserverbrauch [kg Diesel/ kg Holz]
Sortierbagger	$7 \cdot 10^{-4}$
Radlader	$1.6 \cdot 10^{-4}$

Infrastrukturdaten für Altholzaufbereitungsanlagen standen nicht zur Verfügung. Die notwendigen Hallen wurden deshalb annäherungsweise wie in UVEK-Datensätzen für die Behandlung von Abfällen in einer Aufbereitungsanlage bilanziert. Pro kg Abfall wird ein Anteil von $1.0 \cdot 10^{-10}$ einer Aufbereitungsanlage (sorting plant for construction waste, CH) berücksichtigt.

2.9.4.2 Systemgrenze

In der Ökobilanz der Altholzaufbereitung werden die Strom- und Treibstoffverbräuche der eingesetzten Maschinen und die damit verbundenen Emissionen sowie die Infrastruktur berücksichtigt. Betrachtet werden die Prozesse auf dem Gelände der Altholzaufbereitungsanlage plus die Transporte von der Baustelle, bzw. dem vorgelagerten Entsorgungsprozess zur Altholzaufbereitung (siehe Kapitel 2.9.3). Die Transporte der Outputfraktionen von der Anlage in die thermische oder stoffliche Verwertung sind nicht Teil des Systems.

2.9.4.3 Sachbilanz

Die Anlageinfrastruktur wurde mit dem Datensatz «sorting plant for construction waste, CH» aus dem UVEK-Datenbestand berücksichtigt. Der Stromverbrauch der Anlage wird mit dem durchschnittlichen Strommix «electricity, medium voltage, at grid» für die Schweiz berechnet. Für die eingesetzten Radbagger und Radlader wird die Dieselerbrennung mit dem Datensatz «diesel, burned in hydraulic digger», die Infrastruktur mit dem Datensatz «hydraulic digger» und der Schmiermittelverbrauch mit den Datensätzen «lubricating oil, at plant» und «disposal, used mineral oil 10% water, to hazardous waste incineration» berücksichtigt. Der Dieserverbrauch wird gemäss den Angaben im Kapitel 2.9.4.1 eingesetzt. Infrastruktur und Schmiermittelverbrauch werden aus dem Datensatz «excavation, hydraulic digger» übernommen, wobei die Werte über die Stundenleistung gemäss Tabelle 34 auf die Altholzaufbereitung umgerechnet und für beide Maschinen berücksichtigt wurden. Der Umrechnung liegt die Annahme zugrunde, dass der Verbrauch pro Stunde konstant ist. Das Ergebnis dieser Umrechnung wird in Tabelle 35 ausgewiesen.

Tabelle 36 zeigt die Sachbilanzdaten für die Ökobilanzierung der Altholzaufbereitung.

Tabelle 35: Umrechnung der Hilfsstoffe aus dem Aushubdatensatz auf die Altholzaufbereitung

Datensatz/Maschine [Bezugsgrösse]	Stundenleistung	Umrechnungsfaktor
excavation, hydraulic digger [m ³]	100 m ³ /h	1
Sortierbagger Altholzaufbereitung [kg]	14'663 kg/h	6.82 * 10 ⁻³
Radlader Altholzaufbereitung [kg]	60'000 kg/h	1.67 * 10 ⁻³

Tabelle 36: Sachbilanzdaten

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
Sortierbagger	diesel, burned in hydraulic digger	kg	7 * 10 ⁻⁴
Radlader	diesel, burned in hydraulic digger	kg	1.6 * 10 ⁻⁴
Sortierbagger und Radlader	Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U	kg	1.5 * 10 ⁻⁵
Holzshredder	electricity, medium voltage, at grid	kWh	7 * 10 ⁻³
Sortierbagger und Radlader	Hydraulic digger/RER/I U	Stk.	8.5 * 10 ⁻⁹
Sortierbagger und Radlader	Lubricating oil, at plant/RER U	kg	1.5 * 10 ⁻⁵
Gebäude Altholzaufbereitung	Sorting plant for construction waste/CH/I U	Stk.	1 * 10 ⁻¹⁰

Transporte	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
LKW Transport zur Aufbereitung	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH U	t*km	0.015
Emissionen (to air / unspecified)		Einheit	Menge
Abwärme Bagger, Radlader, Holzshredder	Heat, waste	kWh	0.017
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
Altholz sortiert und geshreddert	Altholzaufbereitung	kg	1

2.9.5 Bausperrgutaufbereitungsanlage

2.9.5.1 Datengrundlagen

Daten für den Energieverbrauch wurden bei einer Anlage im Grossraum Zürich erhoben. Für die Sortierung des Bausperrguts werden Bagger mit Sortiergreifer, Radlader, und Förderbänder eingesetzt. Die gesamte Anlage wird mit Strom betrieben (Tabelle 37). Der durchschnittliche Stromverbrauch pro Tonne Bausperrgut beträgt 19.5 kWh. Als Besonderheit der bilanzierten Anlage ist hervorzuheben, dass sie den gesamten Abfall schreddert, was nach Einschätzung des Betreibers einen im Branchenvergleich erhöhten Energieaufwand zur Folge haben dürfte. Die Autoren kennen eine weitere Anlage mit Flotationsstufe für die sie im Gegensatz dazu von einem ähnlichen Energieverbrauch wie für das Shreddern ausgehen. Der allergrösste Teil der Bauschutttaufbereitungsanlagen verfügt nur über eine Grobsortierung von Hand und mit Baggern (Inderbitzin, 2019). Leider waren für die angefragten Anlagen dieses Typs in Bern und St. Gallen keine Energieverbrauchsdaten erhältlich.

Tabelle 37: Energieverbrauch Aufbereitungsanlage inklusive Sortierbagger elektrisch

Stromverbrauch [kWh/t]	19.5
------------------------	------

Das sortierte Bausperrgut wird in einen Bunker transportiert und dort bis zum Abtransport gelagert. Dafür werden Radlader und Dieslbagger eingesetzt. Detaillierte Verbrauchsdaten waren dafür leider nicht verfügbar. Nach Einschätzung des Anlagebetreibers bewegt ein Radlader rund 80 Tonnen Material pro Stunde für das Rangieren und Verladen der Fraktionen. Den Dieserverbrauch pro Stunde schätzt der Anlagebetreiber auf etwa 20 Liter. Bei einer durchschnittlichen Rohdichte von Diesel von 0.83 kg/Liter ergibt dies 16.6 kg Diesel pro Stunde. Bei einer Nutzleistung von 80 Tonnen pro Stunde, respektive 229 m³/h (bei einer Schüttdichte von 349 kg/m³) und einem Dieserverbrauch von 16.6 kg pro Stunde ergibt sich ein Dieserverbrauch von $2.1 \cdot 10^{-4}$ kg Diesel/kg Sperrgut.

Angesichts der sehr pauschalen Angaben wurde zur Prüfung eine Berechnung über Literaturangaben vorgenommen. Gemäss Tabelle 18 beträgt die Nutzleistung für das Verladen von brennbaren Abfällen 30 m³/h. Wie aus Tabelle 22 ersichtlich ist, bewegen sich die Schüttdichten der Baumaterialien zwischen 134 und 1400 kg/m³. Um eine mittlere Schüttdichte für die Fraktionen in der Bausperrgutsortierung zu erhalten,

werden die Schüttdichten der Baustoffe im Bauabfall gemäss dem Controlling von Rückbauprojekten des Hochbauamts der Stadt Zürich (Rubli, 2017a) und die Anteile der Sektorauswertung Bauabfälle (Guerra et al., 2015) verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass Mauerwerk und Beton in nur sehr geringem Masse im Bausperrgut vorkommen. Somit werden diese Fraktionen in der Auswertung in Tabelle 38 nicht berücksichtigt.

Tabelle 38: Ermittlung mittlere Schüttdichte von Bausperrgut

Fraktionen	Mittelwerte Controlling AHB [kg/m ³]	Anteil [Vol.-%]	Anteile [kg/m ³]
Keramik, Gips, Glas	818	28 %	230
Metalle	256	2 %	6
Holz	198	31 %	61
Brennbares KVA	134	39 %	52
Gewichteter Mittelwert			349

Zur Abschätzung des Dieserverbrauchs wurde die Angabe aus der Tabelle 19 verwendet. Ein Radlader verbraucht demnach 8.35 kg Diesel pro Stunde. Der Dieserverbrauch für die Einlagerung der Ausgangsfraktionen berechnet sich dann gemäss den Angaben in Tabelle 39. Es ergibt sich ein Verbrauch, der um einen Faktor 4 grösser ist als der aus den Angaben des Anlagebetreibers hergeleitete.

Tabelle 39: Endenergieverbrauch Radlader Bausperrgutsortierung

	Nutzleistung [m ³ /h]	Dieserverbrauch [kg/h]	Schüttdichte [kg/m ³]	Dieserverbrauch [kg Diesel/kg Sperrgut]
Radlader Berechnung Literatur	30	8.35	349	$8 \cdot 10^{-4}$
Radlader Schätzwerte Anlagebetreiber	229	16.6	349	$2.1 \cdot 10^{-4}$

Die Nutzleistung von 30 m³ aus der Literatur erscheint sehr tief. Jedoch ist der Dieserverbrauch pro Stunde deutlich tiefer in den Literaturdaten. Zur Klärung der Situation wurden die Angaben mit denjenigen der Altholzaufbereitungsanlage verglichen, von der reale Verbrauchsdaten für den Radlader vorliegen. Der Wert für den Radlader der Altholzaufbereitung liegt bei $1.4 \cdot 10^{-4}$ kg Diesel/kg Altholz. Die Praxisdaten der Betonbrechanlage und der Mischabbruchaufbereitung liegen bei $1.3 \cdot 10^{-4}$ kg Diesel / kg Material. Die Angaben des Anlagebetreibers von $2.1 \cdot 10^{-4}$ kg Diesel pro Kilogramm Bausperrgut erscheinen somit für die Bilanzierung realistischer.

Mit der Schüttdichte aus Tabelle 38 und der Stundenleistung aus Tabelle 39 ergeben sich die Umrechnungsfaktoren für die Bilanzierung der Infrastruktur und der Hilfsstoffe des Radladers im Verhältnis zum Aushubdatensatz im UVEK-Datenbestand gemäss Tabelle 40. Die Umrechnung basiert auf der Annahme, dass der Verbrauch von Hilfsstoffen pro Stunde konstant ist.

Tabelle 40: Umrechnung der Hilfsstoffe aus dem Aushubdatensatz auf die Bausperrgutsortierung

Datensatz/Maschine [Bezugsgrösse]	Stundenleistung	Umrechnungsfaktor
excavation, hydraulic digger [m ³]	100 m ³ /h	1
Radlader Bausperrgutsortierung [kg]	229 m ³ /h * 349 kg/m ³ = 80 t/h	0.0013 ≈ 0.001

2.9.5.2 Systemgrenze

Die Bilanzierung umfasst die Sortiertätigkeit der Aufbereitungsanlage, die Zwischenlagerung der Fraktionen auf dem Gelände der Anlage, die internen Transporte, sowie die Transporte von der Baustelle zur Anlage.

2.9.5.3 Sachbilanz

Der Stromverbrauch wurde mit dem Datensatz «electricity, medium voltage, at grid, CH» bilanziert. Infrastrukturdaten für die Aufbereitungsanlage wurden nicht erhoben. Die notwendigen Hallen wurden wie in den UVEK-Datensätzen für die Behandlung von Abfällen in einer Aufbereitungsanlage bilanziert. Pro kg Bausperrgut werden $1 \cdot 10^{-10}$ Einheiten einer Aufbereitungsanlage (sorting plant for construction waste, CH) berücksichtigt. Die Dieselverbrennung im Radlader und im Radbagger wurden jeweils mit dem Datensatz «diesel, burned in hydraulic digger» berücksichtigt. Die Abnutzung der Maschinen wird durch den Datensatz «Hydraulic digger/RER/I» abgebildet und die Hilfsstoffe mit «lubricating oil, at plant/RER», sowie «disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH» für die Entsorgung.

Die Transportdistanz in die Bausperrgutsortierung beträgt 13 km. Diese wird berücksichtigt mit dem Datensatz «transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH».

Tabelle 41: Sachbilanzdaten Bausperrgutsortierung

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	electricity, medium voltage, at grid	kWh	0.0195
	diesel, burned in hydraulic digger	kg	8.0E-4
	Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH	kg	$1.8 \cdot 10^{-5}$
	Hydraulic digger/RER/I	Stk.	$1 \cdot 10^{-8}$
	Lubricating oil, at plant/RER	kg	$1.8 \cdot 10^{-5}$
	Sorting plant for construction waste/CH/I	Stk.	$1 \cdot 10^{-10}$
Transporte	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH	t*km	0.013
Emissionen (to air / unspecified)	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	Heat, waste	kWh	0.029
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	Bausperrgutsortierung	kg	1

2.9.6 Betonbrechanlage

2.9.6.1 Datengrundlagen

Zur Aufbereitung von Betonabbruch werden Betonbrecher, Überbandmagneten, Windsichter und Siebmaschinen eingesetzt. Der Betonabbruch gelangt zuerst in die Brechanlage. Mittels Überbandmagnet wird nach dem Brechen das Bewehrungsseisen abgeschieden. Danach werden allfällige Störstoffe (Holz, Kunststoff) mit einem Windsichter entfernt. Durch Siebmaschinen wird das gebrochene Material nach verschiedenen Korngrößen sortiert. Zu grosse Körnungen (Überkorn) werden nochmals gebrochen und gesiebt. Für die Beschickung des Brechers sowie für das Verladen des RC-Granulats werden Bagger und Radlader eingesetzt.

Für die Aufbereitung von Beton konnten gemessene Verbrauchsdaten der KIBAG (Fischer, 2019) sowie Daten einer bereits bestehenden Ökobilanz (Tschümperlin et al., 2016) herangezogen werden. Die Daten beziehen sich einerseits auf eine vollständig mit Diesel betriebene Anlage und andererseits auf eine teilweise mit Diesel und teilweise mit Strom betriebene Anlage zur Trockenaufbereitung.

Die Betonaufbereitung bei der KIBAG läuft über eine Anlage in der auch Mischabbruch sowie Primärkies gebrochen wird. Uns standen die monatlichen Daten zum Dieserverbrauch und den erzeugten Fraktionen von Betongranulat, Mischabbruchgranulat und Primärkies für das Jahr 2018 zur Verfügung. Durch Regressionsrechnung mithilfe der Gauss'schen Methode der kleinsten Quadrate konnte der Energieverbrauch der Brechprozesse auf die Inputfraktionen Betonabbruch, Mischabbruch und Primärkies bezogen werden. Für den Siebprozess ergab die Kurvenanpassung unplausible Werte. Die Ursache dafür könnten Probleme mit der zeitlichen Auflösung der Energieverbrauchsdaten sein. Für den Siebprozess wurden der Energieverbrauch darum gleichmässig auf die drei Input-Fraktionen verteilt. Der Energieverbrauch für die Beschickung des Brechers und das Verladen der hergestellten Gesteinskörnung dürfte sich kaum unterscheiden, da diese sehr ähnlich Schüttdichten aufweisen. Auch für diese Prozesse wurde der Energieverbrauch gleichmässig auf die Inputs verteilt. Die Trockenaufbereitung des Betonabbruchs in der untersuchten Anlage weist die Energiekennwerte gemäss) Tabelle 42 auf.

Tabelle 42: Endenergieverbrauch Anlage Trockenaufbereitung Betonabbruch KIBAG

Energieverbrauch nach Prozessen	[l Diesel/t]	[kg Diesel/t]	[MJ/t]
Brechen	0.99	0.82	35
Sieben	0.15	0.13	5.5
Beschickung mit Bagger	0.13	0.11	4.7
Abführen zu Bunker mit Radlader	0.16	0.13	5.7
Endenergieverbrauch gesamt	1.4	1.2	51

Die Ökobilanz von treeze (Tschümperlin et al., 2016) weist den Gesamtenergieverbrauch für die Aufbereitung von Betonabbruch aus. Die stationäre Anlage der Eberhard AG wird teilweise mit Strom und teilweise mit Diesel betrieben, wobei im Bericht zur Ökobilanz keine genaueren Angaben gemacht werden, welche Anlageteile mit Strom und welche mit Diesel betrieben werden. Die Daten der Ökobilanz sind auf 1 Kilogramm Betongranulat bezogen und wurden für die Anwendung in dieser Studie

auf 1 Tonne Betonabbruch bezogen. Gemäss den Angaben aus dem Bericht von treeze sind für die Herstellung von 1 kg Betongranulat 1.03 kg Betonabbruch erforderlich. Die Energieverbrauchsdaten dieser zweiten Anlage sind in Tabelle 43 aufgeführt. Es ist nicht bekannt, ob in den Daten der Firma Eberhard auch Aufwendungen für das Beschicken der Brecher und das Verladen des Granulats berücksichtigt wurden.

Tabelle 43: Endenergieverbrauch Anlage Trockenaufbereitung von Betonabbruch der Firma Eberhard (Tschümperlin et al., 2016)

Energieverbrauch nach Energieträger	Pro Tonne
Strom [kWh]	3.93
Diesel [MJ]	13.8

Der Energieverbrauch von Bagger und Radlader für die Beschickung des Brechers und das Verladen des Granulats ist aus den Daten von (Fischer, 2019) bekannt. Um für diese Maschinen auch die Hilfsstoffe (Schmieröl) und Infrastruktur (Bagger respektive Radlader) einzubeziehen, wurde erneut die Stundenleistung mit derjenigen aus dem Aushubdatensatz verglichen (siehe auch Kapitel 2.9.2.4). Die Stundenleistung wurde mit einer hypothetischen Stundenleistung von 30 m³/h und dem Schüttgewicht von Beton aus Tabelle 22 von 1'359 kg/m³ hergeleitet. Mithilfe eines Umrechnungsfaktors wurde der Verbrauch an Schmiermittel und der Fahrzeugverschleiss aus dem Aushubdatensatz, pro kg Betonabbruch berechnet (Tabelle 44). Diese Umrechnung basiert auf der Annahme, dass diese Verbräuche pro Stunde Einsatzzeit des Baggers konstant sind.

Tabelle 44: Umrechnung von Infrastruktur und Schmieröl aus dem Aushubdatensatz auf die Betonaufbereitung

Datensatz/Maschine [Bezugsgrösse]	Stundenleistung	Umrechnungsfaktor
excavation, hydraulic digger [m ³]	100 m ³ /h	1
Radbagger Beschickung [kg]	30 m ³ /h * 1359 kg/m ³ = 40.8t/h	0.0025
Radlader Abführen [kg]	30 m ³ /h * 1359 kg/m ³ = 40.8 t/h	0.0025

Die Betonaufbereitung erfolgt auf grossen Baustellen direkt vor Ort. Bei kleineren Vorhaben oder wenn die Platzverhältnisse beschränkt sind, wird der Betonabbruch zu einer Anlage transportiert. Mit Hilfe der Anlagedichte wurde eine mittlere Transportdistanz zur Bauschutttaufbereitung von 10 km ermittelt (Kapitel 2.9.3). Diese Distanz ist sehr kurz, da sehr viele Bauschutttaufbereitungsanlagen im Branchenverzeichnis geführt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass nicht alle davon selbst Bauschutt sortieren. Die Distanz dürfte also bezüglich der realen Anlagedichte zu kurz sein. Da jedoch wie erwähnt auch vor Ort verarbeitet werden kann, ist die Transportdistanz für diese Fälle wiederum zu gross. Ohne gross angelegte Erhebung kann die effektive Transportdistanz nicht genauer eruiert werden. Somit wird der Wert von 10 km für die Transportdistanz verwendet.

2.9.6.2 Systemgrenze

Die Bilanzierung der Betonabbruchaufbereitung umfasst die verwendeten Brecher (Prallbrecher, Kegelbrecher), Überbandmagnet, Windsichter und Siebmaschinen. Dazu kommen Bagger und Radlader für die Beschickung die Abführung in ein Zwischendepot. Weiterhin enthalten ist der Transport von der Baustelle zur Anlage. Vernachlässigt wurden Staubemissionen während der Aufbereitung, da sich für diese Grösse keine zuverlässigen Literaturdaten finden liessen.

2.9.6.3 Sachbilanz

Für die Sachbilanz wurden die Mittelwerte aus den Daten der KIBAG und der treeze-Bilanz gebildet. Zugunsten einer transparenten Dokumentation des berechneten Entsorgungsaufwands werden die Ergebnisse ohne Allokation zwischen Entsorgung und Herstellung eines neuen Betons gerechnet.

Die Aufbereitung von Betonabbruch zu RC-Granulat umfasst einerseits die Behandlung des Abbruchmaterials bis zum Ende der Abfalleigenschaften und andererseits die Herstellung eines Recyclats. Demzufolge müssten die Aufwendungen für die Aufbereitung zu einem Teil der Entsorgung und zu einem anderen Teil der Herstellung des RC-Granulats zugeordnet werden. In (Tschümperlin et al., 2016) wurde eine ökonomische Allokation vorgenommen, basierend auf den Kosten der Entsorgung in der Recyclinganlage und den Preisen für RC-Granulat. Wie Tabelle 45 zeigt, variieren die Kosten der Entsorgung sowie die Kosten des RC-Granulats je nach Quelle sehr stark. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Studie keine ökonomische Allokation vorgenommen.

Tabelle 45: Kosten Entsorgung Betonabbruch und RC-Granulat

	Betonabbruch	Quelle
Kosten Entsorgung [Fr./t]	8.86	<70 cm Kantenlänge (Tschümperlin et al., 2016)
	10 – 18 (bewehrt/unbewehrt)	Preisliste kibag 2019
	2.7	Preisliste Agir 2018
Kosten RC-Granulat [Fr./t]	18.7	(Tschümperlin et al., 2016)
	18.7	Eberhard Preisliste 2019
	25.7	Preisliste kibag 2019
	51.1 (RC-Betongranulatgemisch, Sieblinie 0-22.4)	Preisliste Agir 2018

Der Energieverbrauch der Brechanlagen wurde mit den Datensätzen «diesel, burned in building machine, average/CH» und «electricity, medium voltage, at grid/CH» bilanziert. Der Treibstoff der Fahrzeuge wurde mit dem Datensatz «diesel, burned in hydraulic digger/CH» berücksichtigt. Die Infrastruktur der Brechanlage ist im Datensatz «Sorting plant for construction waste/CH» enthalten. Für die Fahrzeuge zur Beschickung und Abführung wurde die Infrastruktur mit «hydraulic digger/RER» integriert und als Hilfsstoff das Schmieröl mit den Datensätzen «lubricating oil, at plant/RER» und «disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste

incineration/CH». Für den Transport von der Baustelle zur Betonbrechanlage wurde der Datensatz «transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH» eingesetzt.

Tabelle 46: Sachbilanz Betonabbruch in Betonbrechanlage

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	diesel, burned in building machine, average	MJ	0.027
	diesel, burned in hydraulic digger	kg	0.00012
	electricity, medium voltage, at grid	kWh	0.002
	Hydraulic digger/RER/I	Stk.	$4.9 \cdot 10^{-9}$
	Lubricating oil, at plant/RER	kg	$8.8 \cdot 10^{-6}$
	Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH	kg	$8.8 \cdot 10^{-6}$
	Sorting plant for construction waste/CH/I	Stk.	$1 \cdot 10^{-10}$
Transporte	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH U	t*km	0.01
Emissionen (to air / unspecified)		Einheit	Menge
	Heat, waste	MJ	0.039
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	Beton in Betonbrechanlage	kg	1

2.9.7 Glasaufbereitungsanlage

2.9.7.1 Datengrundlagen

Es konnten keine Daten für Glasaufbereitungsanlagen erhoben werden. In der Aufbereitung wird das Glas zerkleinert und nach unterschiedlichen Qualitäten sortiert. Der Aufwand für die Aufbereitung dürfte ähnlich sein wie bei der Sortierung von Bausperrgut. Der Datensatz für die Bausperrgutaufbereitungsanlage wird deshalb als Proxy für die Glasaufbereitungsanlage verwendet.

2.9.8 Mischabbruchaufbereitungsanlage

2.9.8.1 Datengrundlagen

Für die Aufbereitung von Mischabbruch werden meistens Trockenverfahren und weniger häufig nasse Aufbereitungsverfahren eingesetzt. Allerdings liefert die Nassaufbereitung in der Regel RC-Granulate von deutlich besserer Qualität im Hinblick auf die Anwendung in einem Recyclingbeton.

Bei der Trockenaufbereitung werden dieselben Maschinen eingesetzt wie bei der Aufbereitung von Betonabbruch (siehe Kapitel 2.9.6). Das Unternehmen KIBAG lieferte monatliche Verbrauchsdaten aus der Verarbeitung für das Jahr 2018 (Fischer, 2019). Da dieselbe Anlage Mischabbruch und Betonabbruch verarbeitet, wurde der Energieverbrauch des Brechens mithilfe der Inputdaten und der Gauss'schen Methode der kleinsten Quadrate pro verarbeiteter Fraktion angepasst. Es ergab sich ein 16 %

geringerer Energieverbrauch für das Brechen von Mischabbruch als für das Brechen von Betonabbruch (vergleiche Tabelle 42 und Tabelle 47). Da die Mischabbruchfraktion im Mittel weniger hart ist als der Betonabbruch, erscheint dieses Resultat plausibel. Der Energieverbrauch für die weiteren Prozessschritte des Siebens, der Materialzuführung und der Abführung der erzeugten Produkte wurde nach Inputmassen gewichtet auf die Verarbeitung von Mischabbruch, Betonabbruch und Primärkies aufgeteilt (Tabelle 47).

Tabelle 47: Energieverbrauch Anlage Trockenaufbereitung Mischabbruch KIBAG

Energieverbrauch nach Prozessen	[l Diesel/t]	[kg Diesel/t]	[MJ/t]
Brechen	0.80	0.66	28
Sieben	0.15	0.13	5.5
Beschickung Bagger	0.13	0.11	4.7
Abführung Radlader	0.16	0.13	5.7
Energieverbrauch gesamt	1.2	1.0	44

Die Ökobilanz von treeze (Tschümperlin et al., 2016) weist auch den Gesamtenergieverbrauch für die Aufbereitung von Mischabbruch aus. Es handelt sich um die gleiche Anlage welche schon in Kapitel 2.9.6 beschrieben ist. Die Daten der Ökobilanz sind auf 1 Kilogramm Mischgranulat bezogen und wurden für die Anwendung in dieser Studie auf 1 Tonne Mischabbruch bezogen. Gemäss den Angaben aus dem Bericht von treeze sind für die Herstellung von 1 kg Mischgranulat 1.03 kg Mischabbruch erforderlich. Die Energieverbrauchsdaten der Anlage sind in Tabelle 48 aufgeführt.

Tabelle 48: Endenergieverbrauch Anlage Trockenaufbereitung von Mischabbruch der Firma Eberhard (Tschümperlin et al., 2016)

Energieverbrauch nach Energieträger	Pro Tonne
Strom [kWh]	3.92
Diesel [MJ]	13.7

Für das Nassaufbereitungsverfahren lieferte das Unternehmen Max Möckli Transporte AG Daten (Möckli, 2018). Nebst den üblichen Anlageteilen der Trockenaufbereitung (Brecher, Überbandmagnet, Siebanlage, Windsichter) umfasst die Nassaufbereitung zusätzlich eine Waschanlage für die gebrochene Gesteinskörnung. In der im Rahmen dieser Studie untersuchten Anlage, wird der Mischabbruch zudem mittels optischer Sensoren in Backstein- und Betongranulat aufgetrennt. Die Angaben zum Endenergieverbrauch dieses Verfahrens sind in Tabelle 49 festgehalten. Der Dieselverbrauch kann mit einer Rohdichte von Diesel von 0.83 kg/l und einem Heizwert von 42.8 MJ/kg in 16.7 MJ Endenergie pro Tonne Mischabbruch umgerechnet werden.

Tabelle 49: Daten Endenergieverbrauch Aufbereitung Mischabbruch mit Nassverfahren

Stromverbrauch der Anlage [kWh/t]	6.25
Dieselvebrauch Radlader und Bagger [l/t]	0.46
Dieselvebrauch Radlader und Bagger [MJ/t]	16.7

Die Trockenaufbereitung ist in der Schweiz viel stärker verbreitet als das Nassverfahren. Für die Berechnung der Ökobilanz für eine repräsentative Verarbeitung in der Schweiz muss ein gewichteter Mittelwert berechnet werden. Idealerweise würde die Gewichtung dem Marktanteil von Trocken-, bzw. Nassverfahren entsprechen. Da die exakten Marktanteile nicht bekannt sind, wurde in grober Näherung der Mittelwert aus den bekannten Bilanzen gebildet. Das entspricht einem Marktanteil der Trockenaufbereitung von 66 % und einem Marktanteil der Nassaufbereitung von 33 %.

2.9.8.2 Systemgrenze

Die Bilanzierung umfasst einerseits die verschiedenen Anlageteile (Brecher, Überbandmagnet, Windsichter, Siebe, Waschanlage) der Aufbereitungsanlage für Mischabbruch. Andererseits wurden auch werksinterne Transporte mittels Radbagger und Radlader sowie der Transport von Mischabbruch von der Baustelle zur Anlage per LKW berücksichtigt. Vernachlässigt wurden Staubemissionen, da sich für diese Grösse keine zuverlässigen Literaturdaten finden liessen.

2.9.8.3 Allokation zwischen Entsorgung und Herstellung

Die Mischabbruchverarbeitung erzeugt Fraktionen, die in der Betonherstellung als Ausgangsmaterial verwendet werden können. Es kann argumentiert werden, dass diese Behandlung über eine reine Abfallverwertung hinaus geht und ein Teil des Aufwands zum Herstellungsaufwand für die nachfolgenden Produkte gerechnet werden soll. Es könnte eine physikalische Allokation vorgenommen, indem die Brechprozesse der Entsorgung zugerechnet werden. Die Siebprozesse zur Herstellung von Material gemäss einer definierten Sieblinie würden jedoch der Herstellung der Folgeprodukte zugerechnet werden. Für eine solche Trennung fehlt jedoch die Datenbasis. Somit fehlen auch die Grundlagen für eine Trennung der Prozessschritte in Einzelprozesse, um eine Allokation zu vermeiden.

Tabelle 50: Kosten für die Entsorgung von Mischabbruch und Mischgranulat

	Mischabbruch	Quelle
Kosten Entsorgung [Fr./t]	84.15	<70 cm Kantenlänge (Tschümperlin et al., 2016)
	40	Preisliste Möckli 2018 für unverschmutztes Material
	50	Preisliste kibag 2019
	60	Preisliste Agir 2018
Kosten RC-Granulat [Fr./t]	2.5	(Tschümperlin et al., 2016)
	5.5	Eberhard Preisliste 2019
	22.65 (Wandkies, Koffermaterial, Mittelwert Sieblinie 0.80 und 0-20/30)	Preisliste Agir 2018

In (Tschümperlin et al., 2016) wurde deshalb eine ökonomische Allokation vorgenommen, basierend auf den Kosten der Entsorgung in der Recyclinganlage und den Preisen für RC-Granulat. Wie Tabelle 50 zeigt, variieren die Kosten der Entsorgung sowie die Kosten des RC-Granulats je nach Quelle sehr stark.

Aus den erläuterten Gründen wurde darum bei der Erstellung der Sachbilanz keine Allokation vorgenommen.

2.9.8.4 Sachbilanz

Die Sachbilanz wird als Mittelwert der drei zur Verfügung stehenden Anlagebilanzen gebildet. Es wurden keine Allokationen vorgenommen. Der Dieserverbrauch der dieselbetriebenen Anlagen wird mit dem Datensatz «diesel, burned in building machine, average CH» abgebildet. Der Dieserverbrauch der Fahrzeuge zur Beschickung der Anlage und der Abführung des produzierten Materials wird über den Datensatz «diesel, burned in hydraulic digger CH» berücksichtigt. Für die elektrisch betriebene Aufbereitungsanlage wird der Datensatz «electricity, medium voltage, at grid CH» verwendet. Die Infrastruktur der Aufbereitungsanlage wird mit dem Datensatz «Sorting plant for construction waste CH» einbezogen, diejenige der Fahrzeuge für die Zu- und Abführung des Materials mit dem Datensatz «Hydraulic digger RER». Diese Maschinen benötigen Schmieröl als Betriebsmittel, das mit den Datensätzen «Lubricating oil, at plant RER» und «Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration CH» berücksichtigt wird. Wie schon bei der Betonbrechanlage wurde der Verbrauch aus dem Datensatz «excavation, hydraulic digger» hergeleitet. Der Umrechnungsfaktor beträgt für die Mischabbruchaufbereitung 0.00282 für den Radlader und auch für den Radbagger. Für den Transport von der Baustelle zur Anlage wird der Datensatz «transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm CH» eingesetzt.

Tabelle 51: Sachbilanz Mischabbruchaufbereitung

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	diesel, burned in building machine, average CH	MJ	0.016
	diesel, burned in hydraulic digger CH	kg	0.00021
	electricity, medium voltage, at grid CH	kWh	0.0034
	Hydraulic digger RER	Stk.	$5.6 \cdot 10^{-9}$
	Lubricating oil, at plant RER	kg	$1 \cdot 10^{-5}$
	Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration CH	kg	$1 \cdot 10^{-5}$
	Sorting plant for construction waste CH	Stk.	$1 \cdot 10^{-10}$
Transporte	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm CH	t*km	0.01
Emissionen (to air / unspecified)	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	Heat, waste	MJ	0.031
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	Mischabbruchaufbereitung	kg	1

2.9.9 Deponie Typ B

2.9.9.1 Datengrundlagen

Für die Deponierung wurden keinen neuen Abfallzusammensetzungen bilanziert. Wir verwenden die Datensätze gemäss UVEK Datenbestand 2018 für durchschnittliche Abfallzusammensetzungen.

2.9.9.2 Systemgrenze

Die Systemgrenze umfasst die Deponierung und die Transporte vom vorgelagerten Prozess zur Deponie.

2.9.9.3 Sachbilanz

Für die Deponie Typ B werden derzeit in den UVEK-Datensätzen keine Materialspezifischen Emissionen modelliert. Dementsprechend genügt ein Datensatz für alle Abfälle welche in Deponien Typ B entsorgt werden. Die Sachbilanz dieses Datensatzes ist in Tabelle 52 ausgewiesen. Die Datensätze im UVEK Datenbestand 2018 für Deponien enthalten keine Transporte des Abfalls vom Ort der Entstehung zur Deponie (Doka, 2009b).

Tabelle 52: Sachbilanzdaten Deponierung Bauabfälle in einer Deponie vom Typ B

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH	kg	1
	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH	tkm	0.03
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	disposal, construction waste, to final disposal type B	kg	1

2.9.10 Deponie Typ E

2.9.10.1 Datengrundlagen

Für die Deponierung wurden keinen neuen Abfallzusammensetzungen bilanziert. Es werden die Datensätze gemäss UVEK Datenbestand 2018 für durchschnittliche Abfallzusammensetzungen verwendet.

Die Ökobilanzergebnisse der Deponierung in einer Deponie Typ E unterschieden sich je nach Zusammensetzung des Baustoffs. Im Rahmen dieses Projekts war keine Baustoff-spezifische Bilanzierung für alle Baustoffe der KBOB-Liste möglich. Diese erfolgt über die elementare Zusammensetzung eines Baustoffs. Im Folgenden werden Datensätze pro Baustoffgruppe mit gleichem Entsorgungsweg erstellt. Für gewisse Baustoffgruppen, innerhalb derer es von der Zusammensetzung der Produkte her grosse Unterschiede gibt, konnten nur Mittelwerte oder exemplarisch Werte für spezifische Baustoffe einer Gruppe berechnet werden

2.9.10.2 Systemgrenze

Die Systemgrenze umfasst die Deponierung und die Transporte vom vorgelagerten Prozess zur Deponie.

2.9.10.3 Sachbilanz

Die Ökobilanzierung der Deponie Typ E erfolgt in Ecoinvent materialspezifisch. Ausgehend von der Zusammensetzung des Inputs werden die Emissionen aus der Deponie stoffspezifisch modelliert. Für die Bilanzierung muss deshalb ein Datensatz pro Baustoffgruppe erstellt werden. Die Baustoffgruppen gemäss Tabelle 53 können in eine Deponie vom Typ E gelangen. Für einige Baustoffgruppen musste die Bilanz der Deponierung aus mehreren Datensätzen zusammengestellt werden. Zum Beispiel gibt es bei den Abdichtungen Bahnen aus Bitumen oder Polyolefinen. Die Dichtungsbahnen enthalten nebst Bitumen oder Polyolefinen eine Trägereinlage sowie Füllstoffe. Deshalb wurde die Deponierung mit den Datensätzen «disposal, bitumen», «disposal, inert material» und «disposal, plastics, mixture» angenähert. Da jeweils Produktgruppen bilanziert werden, ist nur eine grobe Abschätzung möglich. Zumeist handelt es sich um die Feinfraktion aus der Bausperrgutsortierung, welche in die Deponie vom Typ E gelangt. Dieser Anteil ist in den Prozessketten immer kleiner als 5 % mit Ausnahme der Prozesskette für Gussasphalt aus dem Hochbau. Vom Gussasphalt gehen 37 % in die Deponie E. Somit hat auch die genaue Zusammensetzung der Fraktion in die Deponie E in allen Prozessketten ausser für Gussasphalt einen geringen Einfluss auf die Ökobilanz des gesamten Entsorgungswegs. Dies rechtfertigt für eine Mehrheit der Baustoffgruppen eine summarische Betrachtung und eine Modellierung mit ungefähren Werten.

Im Folgenden führen wir pro Baustoffgruppe auf, wie die Entsorgung der Baustoffe modelliert werden sollte und welche Modellierung wir in der vorliegenden Studie vorgenommen haben. In Tabelle 53 wird die Modellierung tabellarisch ausgewiesen:

- Für Gruppe der organischen Bodenbeläge wird einerseits ein Belag aus Gummigranulat, welcher aus erdölbasierten Polymeren besteht, modelliert. Andererseits wird ein Korkbelag der zu 100% aus nachwachsenden Rohstoffen besteht, bilanziert. Die Anteile, welche gemäss Prozessschema in eine Deponie Typ E gelangen können werden für Gummigranulat mit dem Datensatz «disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH» und für Kork mit dem Datensatz «disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill CH» bilanziert. Eine Analyse der Ergebnisse zeigte, dass die Wahl des Datensatzes für die Deponie Typ E keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Damit bestätigt sich die Aussage in der Einleitung zu diesem Kapitel. Jeder der beiden Datensätze kann für die Prozesskette der Produktgruppe der organischen Bodenbeläge verwendet werden.
- Dichtungsbahnen, Schutzfolien: Es wurde ein Mittelwert für Dichtungsbahnen aus Bitumen und Polyolefinen (TPO/FPO) bilanziert. Der Anteil der Bitumendichtungsbahnen an dieser Produktgruppe ist mengenmässig bedeutend. In Bitumendichtungsbahnen machen die mineralischen Anteile (Füllstoffe) rund die Hälfte des Gewichts aus (European Waterproofing Association (EWA), 2019). Der Massenanteil der Trägereinlage beträgt bei den Bitumendichtungsbahnen ca. 2%. In Kunststoffdichtungsbahnen sind Glasvliese eingelegt, die rund 5 % des Gewichts ausmachen (Köster Bauchemie AG, 2016). Für die Gesamtgruppe wird jeweils je ein Drittel Bitumen, mineralische Stoffe und Kunststoffe bilanziert.

- Flachglas welches in die Deponie Typ E gelangt wurde mit dem Datensatz «disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill CH» bilanziert.
- Die Baustoffgruppe Gipswerkstoffe umfasst Gipskartonplatten, Gipsfaserplatten und Vollgipsplatten. Die Gipskartonplatten haben den grössten Marktanteil, der jedoch nicht genau bekannt ist. Für die Herleitung wird er auf 75 % geschätzt. Der Marktanteil der Gipsfaserplatten wird auf 20 % und derjenige der Vollgipsplatten auf 5 % abgeschätzt. Aus einer früheren Studie unseres Büros (Klingler et al., 2018) kennen wir näherungsweise den organischen Anteil in den Gipswerkstoffen. Dieser beträgt etwa 3.5 % Karton in Gipskartonplatten und 9 % Papierfasern in Faserplatten. Multipliziert mit den Marktanteilen ergibt sich ein Kartonanteil von 2.6 % Karton und 1.8 % Papierfasern. Die Entsorgung des Gipses wurde mit dem Datensatz «disposal, gypsum, 19.4% water, to sanitary landfill CH» modelliert. Der Anteil von Papierfasern wurde mit dem Datensatz «disposal, paper, 11.2% water, to sanitary landfill CH» und der Kartonanteil mit dem Datensatz «disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to sanitary landfill CH» berücksichtigt.
- Die Entsorgung von Gussasphalt wurde mit dem Datensatz «disposal, asphalt, 0.1% water, to sanitary landfill CH». Dieser Datensatz wurde mit einem Bitumenanteil von 5.3 % im Asphalt erstellt. Gussasphalt in der KBOB-Liste enthält demgegenüber einen Bitumenanteil von 8 %. Für eine exakte Bilanzierung müsste ein neuer Datensatz mit dem korrekten Bitumenanteil erstellt werden.
- Für die Baustoffgruppe «Holz und Holzwerkstoffe» ist die Zusammensetzung vom Leimanteil im Holzwerkstoff abhängig. Hier wurde einerseits die Deponierung von Massivholz mit dem Datensatz «disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill CH» bilanziert. Andererseits wurde eine Spanplatte mit 10% Leimanteil bilanziert. Der Leimanteil wurde mit dem Datensatz «disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH» modelliert. Auch in dieser Produktgruppe hatte die Wahl des Datensatzes keinen relevanten Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse. Somit kann der Datensatz für die gesamte Produktgruppe verwendet werden.
- Die Baustoffgruppe Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche wurde näherungsweise mit dem Datensatz «disposal, paint, 0% water, to sanitary landfill CH» bilanziert.
- Kunstharz-Fliessbeläge wurden mit dem Datensatz «disposal, plastic plaster, 0% water, to sanitary landfill CH» modelliert. Es handelt sich hierbei um eine grobe Näherung, da der organische Anteil welcher in die Deponie gelangt dadurch unterschätzt wird.
- Kunststoff-Rohre sowie Kunststoffe wurden beide mit dem Datensatz «disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH» als Proxy bilanziert.
- Mineralwolle und Aerogel: Für diese Baustoffgruppe wurde ein Mittelwert für Mineralwolle bilanziert. Mineralwolle-Dämmstoffe enthalten nebst der mineralischen Basis aus Stein oder Glas ein Bindemittel. Der Bindemittelanteil beträgt um die 3.5 Massen-% (DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG, 2018). Da es sich dabei um ein Kondensationsharz handelt, verhält es sich in der Deponie ähnlich wie ein Polymer und wird mit dem Datensatz für Kunststoffe modelliert. Der Datensatz kann auch für die weiteren Dämmstoffe dieser Produktgruppe verwendet werden, da der Fluss in die Deponie E von untergeordneter Bedeutung ist.
- Organische Dämmstoffe: Als Beispiel für diese Baustoffgruppe wurde die Entsorgung von Polystyrol berechnet. Die Entsorgung vom Polystyrol wurde mit dem

Datensatz «disposal, polystyrene, 0.2% water, to sanitary landfill CH» modelliert. Solange der Anteil der Deponie vom Typ E in der Prozesskette der Entsorgung kleiner als 5 % ist, kann der Datensatz anstelle einer exakten Bilanzierung verwendet werden.

- Für organisch-mineralische Verbundmaterialien ist es schwierig eine mittlere Mischung festzulegen. Zu sehr unterscheiden sich die möglichen Produkte. Wie bereits im Kapitel 2.7.21 begründet, wurde stellvertretend die Entsorgung einer Holzwoleleichtbauplatte berücksichtigt. Es wurde von einer Zusammensetzung von 33% Holz und 67% Zement ausgegangen. Die Entsorgung in der Deponie E wurde entsprechend mit den Datensätzen «disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill CH» und «disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill CH» modelliert. Falls Entsorgungswege für neue organisch-mineralische Verbundmaterialien erstellt werden, kann der Datensatz anstelle einer exakten Bilanzierung verwendet werden, solange der Anteil der Deponie vom Typ E in der Prozesskette der Entsorgung kleiner als 5 % ist.

Tabelle 53: Bilanzierung der Baustoffe, die in eine Deponie vom Typ E gelangen können

Baustoffgruppe / Baustoff	Ecoinvent-Datensätze für Bilanzierung	Anteil
Bodenbelag organisch, Gummigranulat	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH	100 %
Bodenbelag organisch, Kork	disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill CH	100 %
Dichtungsbahnen, Mittelwert Bitumen, TPO/FPO	disposal, bitumen, 1.4% water, to sanitary landfill CH	33.3 %
	disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill CH	33.3 %
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH	33.4 %
Flachglas	disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill CH	100 %
Gipswerkstoffe	disposal, gypsum, 19.4% water, to sanitary landfill CH	95.6 %
	disposal, paper, 11.2% water, to sanitary landfill CH	1.8 %
	disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to sanitary landfill CH	2.6 %
Gussasphalt	disposal, asphalt, 0.1% water, to sanitary landfill CH	100 %
Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz	disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill CH	100 %
Holz und Holzwerkstoffe, Spanplatte mit 10% Leimanteil	disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill CH	90 %
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH	10 %
Klebstoffe, Dichtstoffe, Anstriche	disposal, paint, 0% water, to sanitary landfill CH	100 %
Kunstharz-Fliessbeläge	disposal, plastic plaster, 0% water, to sanitary landfill CH	100 %
Kunststoff-Rohre, Mittelwert	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH	100 %
Kunststoffe, Mittelwert	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH	100 %
Mineralwolle und Aeroegel, Mineralwolle	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH	3.5 %
	disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill CH	96.5 %
Organische Dämmstoffe, Polystyrol	disposal, polystyrene, 0.2% water, to sanitary landfill CH	100 %

Baustoffgruppe / Baustoff	Ecoinvent-Datensätze für Bilanzierung	Anteil
Organisch-mineralische Verbundmaterialien , Holzwoolleichtbauplatte	disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill CH	33 %
	disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill CH	67 %

Für jeden der Baustoffe in der Tabelle 53 wird ein Datensatz nach dem Schema in Tabelle 54 erstellt. Die Tabelle 54 ist so zu lesen, dass die Datensätze für «Abfalltyp 1» und «Abfalltyp 2» zu ersetzen sind mit den Datensätzen, die in Tabelle 53 angegeben sind und den in derselben Tabelle angegebenen Anteilen. Je nach Baustoff können das ein bis drei Datensätze sein. Ein Beispiel für die Bilanzierung der Entsorgung von Mineralwolle soll das Vorgehen illustrieren: Aus der Tabelle 53 kann ersehen werden, dass der Datensatz «disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH» als Abfalltyp 1 in die Sachbilanz eingesetzt werden muss, die Menge beträgt 0.035. Ebenfalls aus Tabelle 53 wird ersichtlich, dass als Abfalltyp 2 der «Datensatz disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill CH» verwendet werden muss, mit einer Menge von 0.965. Die Transportdistanz ist immer dieselbe und beträgt 32 km. Die Datensätze im UVEK Datenbestand 2018 für Deponien vom Typ E enthalten keine Transporte des Abfalls vom Ort der Entstehung zur Deponie (Doka, 2009b).

Tabelle 54: Sachbilanzdaten Deponierung Bauabfälle in einer Deponie vom Typ E

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	disposal, <i>Abfalltyp 1</i> , to sanitary landfill /CH	kg	<i>Anteil aus Tabelle 53</i>
	disposal, <i>Abfalltyp 2</i> , to sanitary landfill /CH	kg	<i>Anteil aus Tabelle 53</i>
	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH	tkm	0.032
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	disposal, <i>Baustoff</i> as construction waste, to final disposal type E	kg	1

2.9.11 KVA

2.9.11.1 Datengrundlage

Die Emissionen aus der KVA, welche im Ecoinvent-Modell bilanziert werden, hängen von der elementaren Zusammensetzung des Inputs ab. Die methodisch besten Resultate würde eine Bilanzierung jedes Baustoffs gemäss seiner chemischen Zusammensetzung liefern. Im Rahmen dieses Projekts kann keine Bilanzierung pro Baustoff geleistet werden. Eine solche ist jedoch möglich, wenn die elementare Zusammensetzung eines Baustoffs bekannt ist. Im Folgenden werden Datensätze pro Baustoffgruppe mit gleichem Entsorgungsweg erstellt. Diese sollen als Näherung für die untersuchten Baustoffgruppen dienen. In gewissen Fällen, wo es innerhalb einer Gruppe grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien gibt, wurden ein oder zwei spezifische Baustoffe als Beispiel bilanziert. In diesem Fall ist die

Bildung von Mittelwerten nicht sinnvoll. Dies betrifft insbesondere Baustoffgruppen welche sowohl Materialien aus nachwachsenden als auch fossilen Rohstoffen umfassen. Da in Ecoinvent kein biogenes CO₂ bilanziert wird, führt die unterschiedliche Rohstoffbasis zu grossen Differenzen bei den CO₂-Emissionen in der Verbrennung.

2.9.11.2 Systemgrenze

Die Verbrennungsprozesse werden inklusive des Transports vom vorgelagerten Prozess zur Verbrennungsanlage bilanziert.

2.9.11.3 Sachbilanzen

Tabelle 55 zeigt die verwendeten Datensätze für die Verbrennung und den Anteil, mit welchem sie in der Bilanzierung der berücksichtigten Materialien in einer Baustoffgruppe verwendet wurden. Im Folgenden werden die Annahmen kurz erläutert:

- Für Gruppe der organischen Bodenbeläge wird einerseits ein Belag aus Gummigranulat bilanziert, welcher aus erdölbasierten Polymeren besteht. Andererseits wird ein Korkbelag der zu 100% aus nachwachsenden Rohstoffen besteht, betrachtet. Die Modellierung erfolgt deshalb mit dem Datensatz «disposal, rubber, unspecified, 0% water, to municipal incineration CH» für den Belag aus Gummigranulat und mit dem Datensatz «disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration CH» für den Korkbelag.
- Die Baustoffgruppe «Dichtungsbahnen, Schutzfolien» umfasst Dichtungsbahnen, Dampfsperren und Schutzfolien. Als Näherung für die Baustoffgruppe die Entsorgung einer Mischung bestehend aus je 50% Bitumen- und Polyolefinbahnen bilanziert. Die Entsorgung der Bitumenbahnen wird mit dem Datensatz «disposal, bitumen sheet, 1.5% water, to municipal incineration» bilanziert. Die Entsorgung von Dachbahnen aus Polyolefinen wird mit einem Anteil von je 25% mit den Datensätzen «disposal, PE sealing sheet, 4% water, to municipal incineration» und «disposal, vapour barrier, flame-retarded, 4.5% water, to municipal incineration» modelliert.
- Die Entsorgung der Baustoffgruppe Flachglas wird mit dem Datensatz «disposal, glass, 0% water, to municipal incineration» modelliert.
- Die Baustoffgruppe Gipswerkstoffe umfasst Gipskartonplatten, Gipsfaserplatten und Vollgipsplatten. Die Gipskartonplatten haben den grössten Marktanteil, der jedoch nicht genau bekannt ist. Für die Herleitung wird er auf 75 % geschätzt. Der Marktanteil der Gipsfaserplatten wird auf 20 % und derjenige der Vollgipsplatten auf 5 % abgeschätzt. Aus einer früheren Studie unseres Büros (Klingler et al., 2018) kennen wir näherungsweise den organischen Anteil in den Gipswerkstoffen. Dieser beträgt etwa 3.5 % Karton in Gipskartonplatten und 9 % Papierfasern in Faserplatten. Multipliziert mit den Marktanteilen ergibt sich ein Kartonanteil von 2.6 % Karton und 1.8 % Papierfasern. Diese Bestandteile wurden mit den Datensätzen «disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to municipal incineration» und «disposal, newspaper, 14.7% water, to municipal incineration» modelliert. Da es keinen Datensatz für die Entsorgung von Gips in der KVA im UVEK Datenbestand 2018 gibt, wird als Proxy der Datensatz für Glas verwendet.
- Bei der Baustoffgruppe Holz und Holzwerkstoffe ist in der Verbrennung zu unterscheiden zwischen Massivholz und Holzwerkstoffen. Die Emissionen in der KVA hängen vom Leimanteil im Holzwerkstoff ab. Die Verbrennung von Massivholz in

der KVA wurde mit den Datensätzen «disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration CH» und «disposal, building wood, chrome preserved, 20% water, to municipal incineration» bilanziert. Als Näherung wurde zur Bilanzierung der Holzwerkstoffe eine Spanplatte mit 10% Leimanteil betrachtet. Die Verbrennung des Leims wurde mit dem Datensatz «Disposal, polyurethane, 0.2% water, to municipal incineration CH» modelliert. Als Leim in Spanplatten werden in erster Linie Kondensationsharze mit Formaldehyd und vereinzelt auch PMDI Harze eingesetzt.

- Die Baustoffgruppe «Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche» wurde in der Entsorgung näherungsweise mit dem Datensatz «disposal, paint, 0% water, to municipal incineration» berücksichtigt.
- Kunstharzfließbeläge wurden durch das Büro für Umweltchemie für die KBOB-Liste bilanziert. Aufgrund der damals verwendeten Zusammensetzung für 2K-Fließbeläge konnte berechnet werden, dass der organische Anteil in Fließbelägen 61 % und der mineralische Anteil 39 % betragen. Diese Anteile wurden für die Modellierung der Entsorgung in der Deponie Typ E verwendet.
- Die Baustoffgruppen «Kunststoffe» und «Kunststoffrohre» wurden mit dem Datensatz «disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration» modelliert. Es handelt sich hierbei auch um eine Näherung. Die Emissionen in der Verbrennung variieren zwischen den verschiedenen Kunststoffen relativ stark.
- Für die Baustoffgruppe «Mineralwolle und Aerogel» wurde ein Mittelwert für Mineralwolle bilanziert. Bei den Hochleistungsdämmstoffen mit Aerogel handelt es sich um Nischenprodukte, so dass sie in Bezug auf die verbauten Mengen in dieser Baustoffgruppe kaum relevant sind. Aerogel-Vliese und ähnliche Materialien sind sie von der Zusammensetzung her nicht mit Mineralwolle vergleichbar. Mineralwolle enthält einen Anteil organische Bindemittel, der bereits für die Bilanzierung der Deponie Typ E ermittelt wurde. In der Verbrennung werden diese als gemischter Plastik berücksichtigt, da kein Datensatz für Formaldehydharze existiert. Der mineralische Anteil wird als Glas modelliert.
- Den Markt der organischen Dämmstoffe dominieren die Materialien expandiertes Polystyrol EPS, extrudiertes Polystyrol XPS und Polyurethan PUR. Das Verhältnis im Markt zwischen EPS und XPS einerseits und PUR andererseits beträgt rund 7:1 (eigene Datenerhebung der Autoren). Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (Kork, Flachs, Holz- und Zellulosefasern) welche auch zu dieser Baustoffgruppe gehören, haben einen Marktanteil von weniger als 5%. Sie sind von der Zusammensetzung her grundsätzlich nicht mit Kunststoffschäumen vergleichbar. Die Entsorgung in der KVA wurde für EPS und XPS mit dem Datensatz «disposal, expanded polystyrene, 5% water, to municipal incineration» berücksichtigt. Für die weiteren Dämmstoffe steht eine Bilanzierung noch aus.
- Für organisch-mineralische Verbundmaterialien ist es schwierig eine mittlere Mischung festzulegen. Zu sehr unterscheiden sich die möglichen Produkte. Wie bereits im Kapitel 2.7.21 begründet, wurde stellvertretend die Entsorgung einer Holzwoleleichtbauplatte berücksichtigt. Es wurde von einer Zusammensetzung von 33% Holz und 67% Zement ausgegangen. Diese Anteile wurden mit den Datensätzen «disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration CH» und «disposal, glass, 0% water, to municipal incineration CH» bilanziert.

Eine Schwierigkeit ergibt sich bezüglich des bilanzierten Wassergehaltes in den Entsorgungsdatensätzen von Ecoinvent, wenn sie in der vorgestellten Weise auf Produktgruppen angewendet werden. Der Wassergehalt der realen Produkte kann sich vom Wassergehalt der Ecoinvent-Datensätze unterscheiden. Das muss jedoch nicht immer der Fall sein. Die Ecoinvent-Datensätze bilanzieren einen Wassergehalt für Materialien am Lebensende (Doka, 2009a). Jedoch bleibt die Literaturquelle vage bei der Beschreibung, welcher Wasseranteil aus dem neuen Produkt stammt und welcher während der Nutzung durch die Materialien aufgenommen wird. Ohne genauere Analyse des Wassergehalts von Neuprodukten ist eine Korrektur somit schwierig. Für die in der vorliegenden Arbeit erstellten Datensätze verzichten wir deshalb auf eine Korrektur des Wasseranteils.

Tabelle 55: Bilanzierung der Baustoffe, die in eine Verbrennungsanlage gelangen können

Baustoffgruppe, Baustoff	Bilanzierung mit Ecoinvent-Datensätzen	Anteil
Bodenbelag organisch, Gummigranulat	disposal, rubber, unspecified, 0% water, to municipal incineration CH	100 %
Bodenbelag organisch, Kork	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration CH	100%
Dichtungsbahnen, Schutzfolien, Mittelwert Bitumen, TPO/FPO	disposal, bitumen sheet, 1.5% water, to municipal incineration CH	50%
	disposal, PE sealing sheet, 4% water, to municipal incineration CH	25%
	disposal, vapour barrier, flame-retarded, 4.5% water, to municipal incineration CH	25%
Flachglas	disposal, glass, 0% water, to municipal incineration CH	100 %
Gipswerkstoffe	disposal, glass, 0% water, to municipal incineration CH	95.6 %
	disposal, newspaper, 14.7% water, to municipal incineration CH	1.8 %
	disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to municipal incineration CH	2.6 %
Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration CH	50 %
	disposal, building wood, chrome preserved, 20% water, to municipal incineration	50 %
Holz und Holzwerkstoffe, Spanplatte mit 10% Leimanteil	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration CH	40 %
	disposal, building wood, chrome preserved, 20% water, to municipal incineration CH	50 %
	disposal, polyurethane, 0.2% water, to municipal incineration CH	10 %
Klebstoffe, Dichtstoffe, Anstriche	disposal, paint, 0% water, to municipal incineration CH	100 %
Kunstharzfließbeläge	disposal, polyurethane, 0.2% water, to municipal incineration CH	61 %
	disposal, glass, 0% water, to municipal incineration CH	39 %
Kunststoffe	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration CH	100 %
Kunststoffrohre	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration CH	100 %

Baustoffgruppe, Baustoff	Bilanzierung mit Ecoinvent-Datensätzen	Anteil
Mineralwolle und Aerogel, Mineralwolle	disposal, glass, 0% water, to municipal incineration CH	96.5 %
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	3.5 %
Organische Dämmstoffe, Polystyrol	disposal, expanded polystyrene, 5% water, to municipal incineration CH	100 %
Organisch-mineralische Verbundmaterialien, Holzwolleleichtbauplatte	disposal, glass, 0% water, to municipal incineration CH	67%
	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration CH	33%

Die Datensätze im UVEK Datenbestand 2018 enthalten keinen Transport des Abfalls vom Ort der Abfallentstehung zur Verbrennungsanlage (Doka, 2009c). Für die Bauabfälle wird die mittlere Transportdistanz in der Sachbilanz berücksichtigt, wie sie in den Prozessketten ermittelt wurde. Wenn die Bauabfälle in eine KVA in der Schweiz gelangen, beträgt die mittlere Transportdistanz 31 km. Altholz wird teilweise zur Verbrennung exportiert. Diese Transportdistanz beträgt 475 km. Für Altholz werden darum zwei KVA-Datensätze «to municipal waste incineration domestic» und «to municipal waste incineration export» erstellt mit den Transportdistanzen 31 km, bzw. 475 km.

Alle Sachbilanzen werden gemäss dem Schema in Tabelle 56 erstellt.

Tabelle 56: Sachbilanzdaten Verbrennung Bauabfälle in einer KVA

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	Disposal, <i>Abfalltyp 1</i> , to municipal incineration /CH	kg	<i>Anteil aus Tabelle 55</i>
	Disposal, <i>Abfalltyp 2</i> , to municipal incineration /CH	kg	<i>Anteil aus Tabelle 55</i>
	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH	tkm	0.031
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	disposal, <i>Baustoff</i> as construction waste, to municipal waste incineration	kg	1

2.9.12 Kunststoffrohr-Sortierung

2.9.12.1 Datengrundlage

In der Schweiz existiert eine Verwertung für Kunststoffrohre. Gesammelt werden Rohre aus Polyethylen und Polypropylen. Diese werden in der Schweiz zu Kunststoffgranulat verarbeitet gemäss Auskunft des Recyclingbetriebs, der diese Sammlung durchführt (Tonner, 2019). Die Sammlung erfolgt am Betriebsstandort in der Ostschweiz. Dort werden die angelieferten Rohre am Stück händisch aussortiert. Danach werden sie zerkleinert, gewaschen und zu Granulat verarbeitet. Zur Entsorgung wird lediglich der Sortierprozess gerechnet, die weiteren Prozesse gehören bereits zur Ökobilanz der Kunststoff-Herstellung.

2.9.12.2 Systemgrenze

Bilanziert wird die händische Sortierung und der Transport zur Annahmestelle.

2.9.12.3 Sachbilanz

Die händische Sortierung erfolgt ohne technische Hilfsmittel. In die Sachbilanz fliesst somit nur der Transport zum Betriebsstandort ein. Zur Berechnung der Transportdistanz wurde dieselbe Methode verwendet wie für alle Verarbeitungsanlagen, wobei eine einzige Anlage in der Schweiz eingesetzt wurde (siehe Kapitel 2.9.3.1). Es ergibt sich eine mittlere Transportdistanz von 171 km. Die Sachbilanz ist aus Tabelle 57 ersichtlich.

Tabelle 57: Sachbilanzdaten Kunststoffrohr-Sortierung

Roh-, Ausgangs- und Hilfsstoffe	Datensatz UVEK-Datenbestand 2018	Einheit	Menge
	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH	tkm	0.171
Produkt	Datensatz	Einheit	Menge
	Kunststoffrohr-Sortierung	kg	1

2.10 Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse

Für die Ökobilanzen der Entsorgungsprozesse wurden dieselben Ökobilanzfaktoren ausgewertet, die auch in der KBOB-Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich ausgewiesen werden. Es ergeben sich die Werte gemäss Tabelle 58.

Tabelle 58: Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse

Ergebnisse pro kg	Primärenergie nicht-erneuerbar [kWh]	Primärenergie erneuerbar [kWh]	Ökologische Knappheit [UBP]	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -eq.]
Abbruch	0.026	0.00015	6	0.0064
Altholzaufbereitung	0.027	0.00030	7	0.0063
Bausperrgutsortierung	0.014	0.00018	4	0.0031
Betonabbruchaufbereitung	0.022	0.00025	6	0.0052
Kunststoffrohr-Sortierung	0.134	0.00208	42	0.0294
Mischabbruchaufbereitung	0.024	0.00026	7	0.0056

Die Entsorgungsprozesse weisen im Quervergleich pro Kilogramm Abfall sehr ähnliche Ökobilanzergebnisse aus, wie in Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28 zu sehen ist. In der Abbildung hebt sich die Kunststoffrohr-Sortierung zwar von den anderen Prozessen ab, aber in absoluten Zahlen sind die Unterschiede sehr gering. Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen Bausperrgutsortierung und Altholzaufbereitung muss berücksichtigt werden, dass Bausperrgut eine höhere Dichte aufweist als Altholz. Wenn die Ökobilanzergebnisse pro Volumen ausgewiesen würden, wäre die

Kennzahl für die Altholzaufbereitung besser als diejenige für die Bausperrgutsortierung.

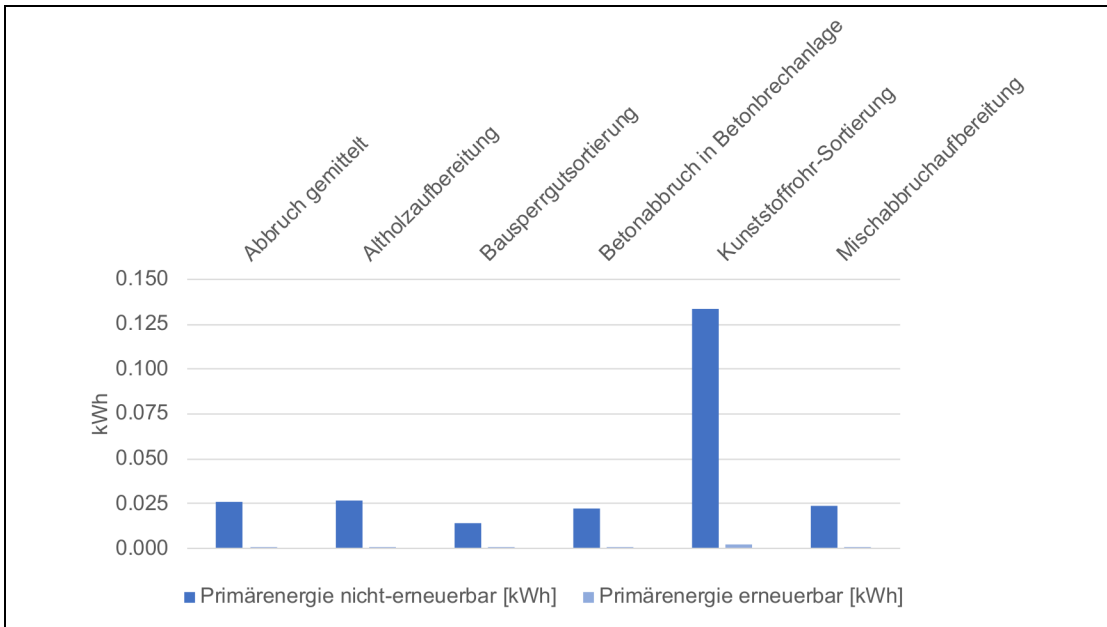


Abbildung 26: Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse für Primärenergie pro Kilogramm Abfall

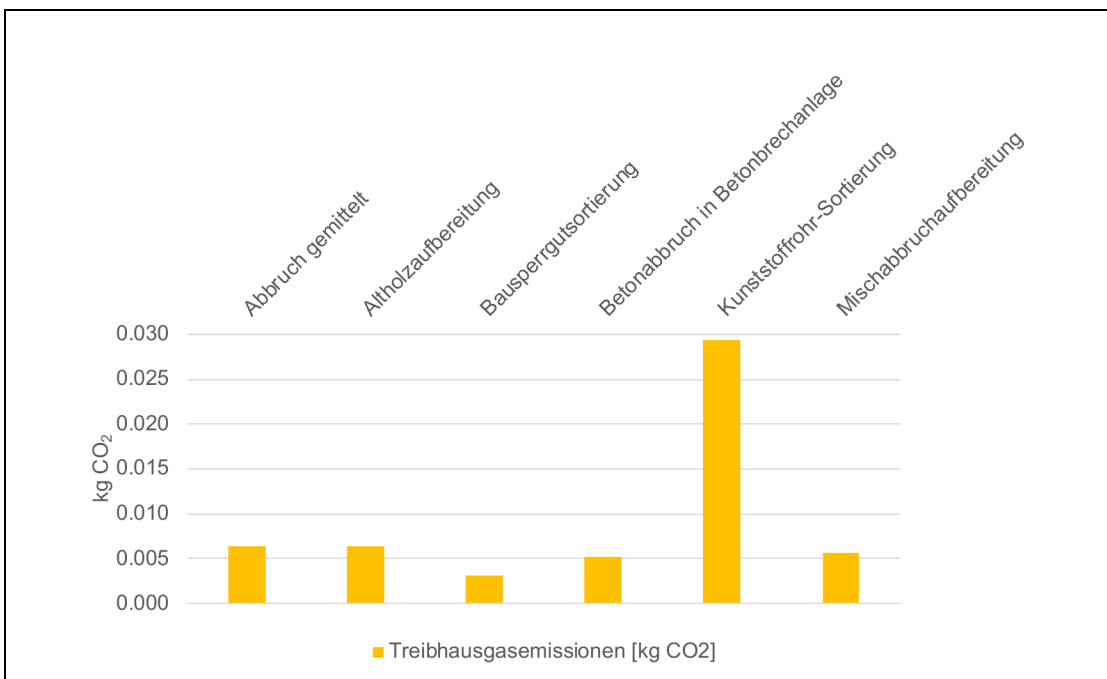


Abbildung 27: Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse für Treibhausgase pro Kilogramm Abfall

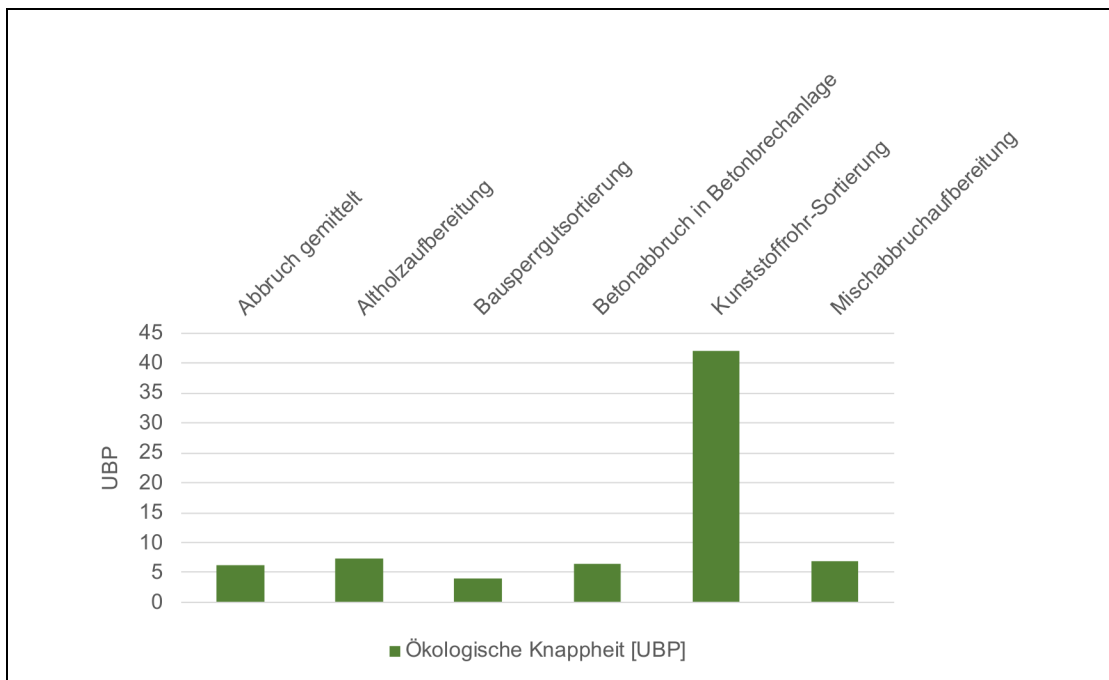


Abbildung 28: Ökobilanzergebnisse der Entsorgungsprozesse für Umweltbelastungspunkte pro Kilogramm Abfall

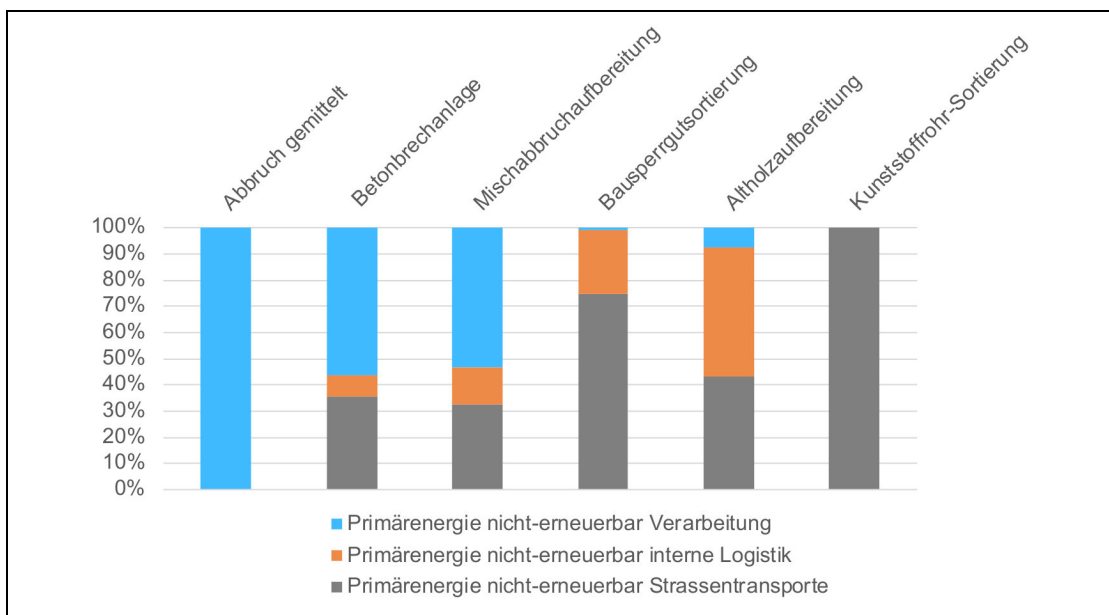


Abbildung 29: Anteile der Teilprozesse Transporte, interne Logistik und Verarbeitung an der aufgewendeten nicht-erneuerbaren Primärenergie der Entsorgungsprozesse

Auffällig ist der grössere Energiebedarf und damit verbunden die grösseren Treibhausgasemissionen und die grössere Menge UBP für die Kunststoffrohr-Sortierung im Vergleich mit allen anderen Entsorgungsprozessen. Die Auswertung der Quellen für den Energiebedarf in Abbildung 29 zeigt, dass die Ursache in der deutlich längeren Transportdistanz liegt. Die Auswertung teilt den Energiebedarf auf drei Kategorien auf. Die erste Kategorie «Verarbeitung» bildet der Energiebedarf der

Aufbereitungsanlagen. Die zweite Kategorie «interne Logistik» umfasst die Transporte und der Verlad auf dem Gelände der Aufbereitungsanlage. Die dritte Kategorie «Strassentransporte» weist den Transportaufwand von der Baustelle zur Aufbereitungsanlage aus.

Weiterhin zeigt die Auswertung, dass die Verarbeitung für den Abbruch, die Betonbrechanlage und die Mischabbruchaufbereitung am wichtigsten ist. Allerdings wurden für die Prozesse Beton- und Mischabbruchaufbereitung, die teilweise auch die Herstellung von Recycling-Granulaten umfassen, keine Allokationen zwischen Herstellung und Entsorgung vorgenommen. Für die beiden Prozesse der Bausperrgutsortierung und der Altholzaufbereitung ist der Transportaufwand auf der Strasse und für die interne Logistik dominant. Der Verarbeitungsprozess selbst trägt nur marginal zum Gesamtenergieaufwand bei.

2.11 Ökobilanzergebnisse der Entsorgung der Baustoffgruppen

Bei den Prozessketten stechen einige mit deutlich höheren CO₂-Emissionen hervor. Das zeigt die Abbildung 30 noch deutlicher als die Tabelle 59. Es handelt sich dabei um die Prozesse für Bodenbelag aus Gummigranulat, Dichtungsbahnen, Kunststoffrohre, Kunststoffe und organische Dämmstoffe aus Polystyrol. Gemeinsam ist diesen Prozessen, dass ein hoher Anteil der entsorgten Materialien in die KVA gelangt. Für die Prozesse mit hohen Treibhausgasemissionen haben wir eine Auswertung nach Quellen für die Treibhausgase erstellt. Wie diese Auswertung in Abbildung 31 zeigt, sind die Emissionen aus der KVA absolut dominant. Die Transporte und Prozessemissionen spielen im Vergleich dazu kaum eine Rolle.

Die Treibhausgasemissionen der Prozessketten werden in Abbildung 32 grafisch dargestellt. Beim Vergleich zwischen den Treibhausgasemissionen in Abbildung 32 und der ökologischen Knappheit in Abbildung 30 ist zu erkennen, dass die Umweltbelastungspunkte hauptsächlich durch die Treibhausgasemissionen bestimmt werden.

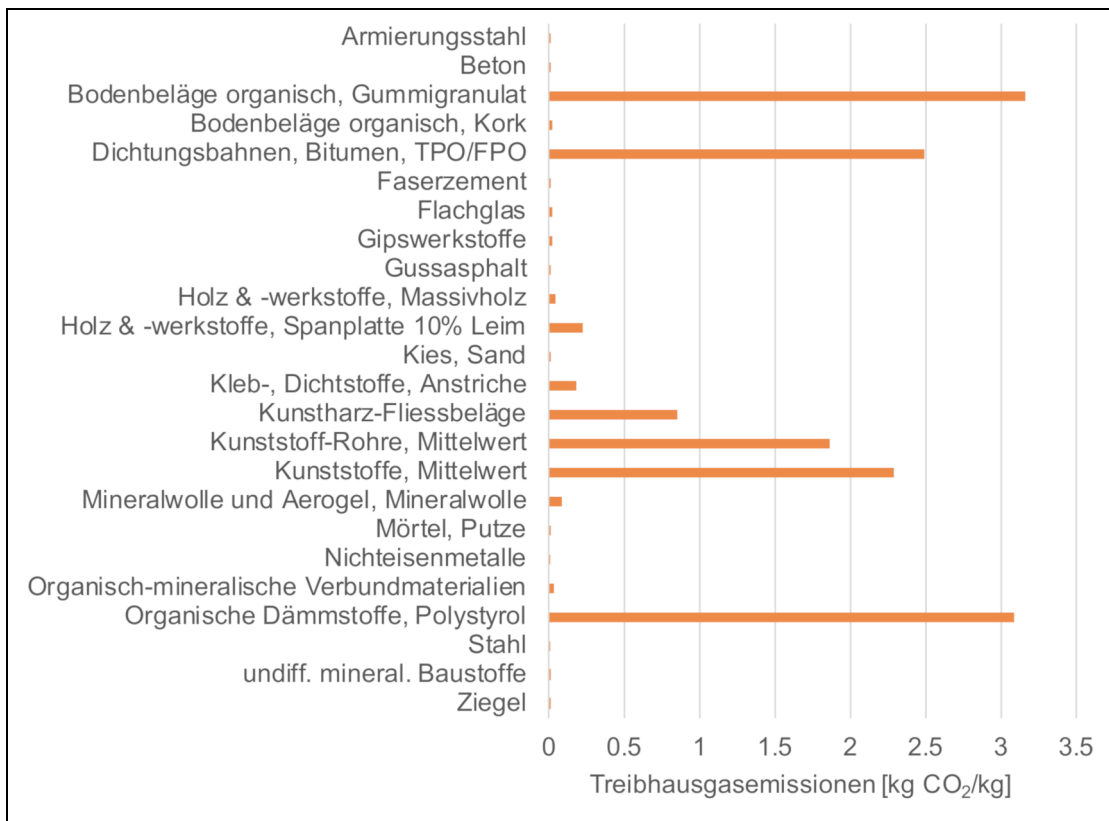


Abbildung 30: Ökobilanzergebnisse aller Prozessketten für die Treibhausgasemissionen

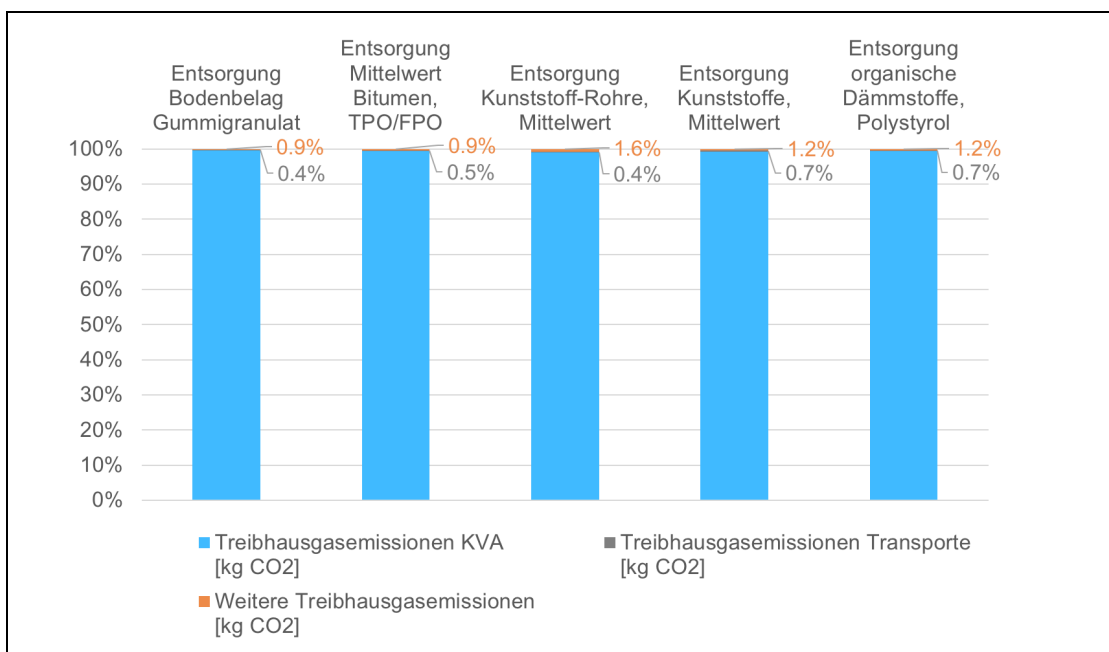


Abbildung 31: Auswertung der Quellen für die Treibhausgasemissionen in Prozessketten mit vergleichsweise hohen Treibhausgasemissionen

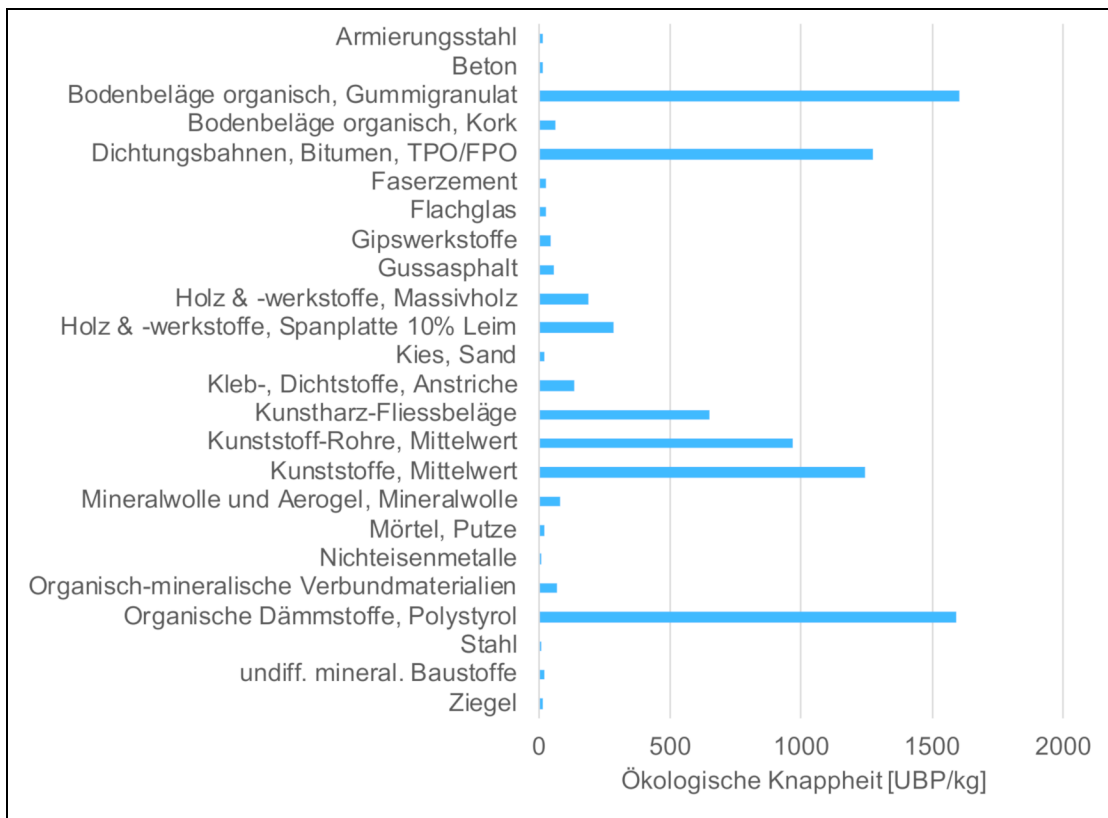


Abbildung 32: Ökobilanzergebnisse aller Prozessketten für die Umweltbelastungspunkte

Tabelle 59: Ökobilanzergebnisse der Prozessketten für die Baustoffgruppen

Ergebnisse pro kg	Primärenergie nicht-erneuerbar [kWh]	Primärenergie erneuerbar [kWh]	Ökologische Knappheit [UBP]	Treibhausgasemissionen [kg CO2]
Entsorgung Armierungsstahl	4.72E-02	3.98E-04	1.24E+01	1.14E-02
Entsorgung Beton	6.61E-02	6.12E-04	1.73E+01	1.39E-02
Entsorgung Bodenbelag organisch, Gummigranulat	2.10E-01	6.81E-03	1.60E+03	3.16E+00
Entsorgung Bodenbelag organisch, Kork	1.04E-01	1.45E-03	6.23E+01	2.85E-02
Entsorgung Dichtungsbahnen und Schutzfolien, Mittelwert Bitumen, TPO/FPO	2.28E-01	6.31E-03	1.28E+03	2.50E+00
Entsorgung Faserzement	1.03E-01	1.03E-03	2.68E+01	1.86E-02
Entsorgung Flachglas	1.07E-01	1.20E-03	2.89E+01	2.02E-02
Entsorgung Gipswerkstoffe	1.05E-01	1.18E-03	4.38E+01	2.14E-02
Entsorgung Gussasphalt	8.14E-02	1.08E-03	5.72E+01	1.86E-02
Entsorgung Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz	1.71E-01	2.34E-03	1.86E+02	4.20E-02

Ergebnisse pro kg	Primärenergie nicht-erneuerbar [kWh]	Primärenergie erneuerbar [kWh]	Ökologische Knappheit [UBP]	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂]
Entsorgung Holz und Holzwerkstoffe, Spanplatte mit 10% Leimanteil	2.09E-01	2.91E-03	2.84E+02	2.22E-01
Entsorgung Kies und Sand	6.93E-02	6.54E-04	1.81E+01	1.41E-02
Entsorgung Kleb-, Dichtstoffe Anstriche	6.50E-02	6.88E-04	1.33E+02	1.88E-01
Entsorgung Kunstharz-Fliessbeläge	3.19E-01	4.75E-03	6.50E+02	8.56E-01
Entsorgung Kunststoff-Rohre, Mittelwert	2.23E-01	5.13E-03	9.68E+02	1.86E+00
Entsorgung Kunststoffe, Mittelwert	2.33E-01	5.78E-03	1.24E+03	2.29E+00
Entsorgung Mörtel & Putze	7.32E-02	6.95E-04	1.91E+01	1.47E-02
Entsorgung Mineralwolle und Aerogel, Mineralwolle	1.60E-01	2.17E-03	7.82E+01	8.39E-02
Entsorgung Nichteisenmetalle	3.93E-02	3.04E-04	9.81E+00	8.55E-03
Entsorgung organisch-mineralische Verbundmaterialien	1.56E-01	2.18E-03	6.70E+01	3.30E-02
Entsorgung organische Dämmstoffe, Polystyrol	1.81E-01	2.90E-03	1.60E+03	3.09E+00
Entsorgung Stahl	2.77E-02	1.72E-04	6.72E+00	6.71E-03
Entsorgung undifferenzierte mineralische Baustoffe	7.27E-02	6.92E-04	1.89E+01	1.46E-02
Entsorgung Ziegel	6.48E-02	5.98E-04	1.70E+01	1.36E-02

2.12 Anwendungsregeln für die Bilanzierung in der KBOB-Liste

Bei der Bilanzierung von Baustoffen für die KBOB-Liste empfehlen wir die Bilanzierung der Entsorgung gemäss der nachfolgenden Checkliste und dem Flussdiagramm in Abbildung 33.

Checkliste zur Bilanzierung der Entsorgung in der KBOB-Liste

Die Checkliste erläutert die Fragen und möglichen Entscheidungen im Flussdiagramm

Tabelle 60: Erläuterungen zum Flussdiagramm zur Ermittlung der Ökobilanz der Entsorgung

Bauteil oder Baustoff?	Wird ein neuer Baustoff oder ein neues Bauteil bilanziert? Es handelt sich um ein Bauteil, falls die bilanzierte Einheit ein Verbund mehrerer Baustoffe ist.
Anteil Baustoffe im Bauteil feststellen	Die Entsorgung von Bauteilen wird aus den Prozessketten zur Entsorgung der enthaltenen Baustoffe gebildet. Zuerst werden die Anteile der Baustoffe im Bauteil festgestellt, dann wird für jeden enthaltenen Baustoff festgestellt, welche Baustoffgruppe dazu passt.
Passende Baustoffgruppe vorhanden?	Entscheidend für die Feststellung einer passenden Baustoffgruppe ist der gemeinsame Entsorgungsweg mit der gewählten Baustoffgruppe. Wenn die Liste der Baustoffe eines Bauteils bekannt ist, bzw. es sich um einen neuen Baustoff handelt, soll mit Hilfe der Liste der Baustoffgruppen und der Diagramme der Prozessketten festgestellt werden, in welche der bestehenden Baustoffgruppen der neue Baustoff integriert werden kann.
- Prozesskette der Entsorgung erheben - Ökobilanz erstellen unter Verwendung der bereits bilanzierten Prozesse	Falls die Antwort auf die Frage «Passende Baustoffgruppe vorhanden?» «Nein» lautet: Der Entsorgungsweg muss neu bilanziert werden. Dafür ist in einem ersten Schritt der mittlere Entsorgungsweg des Baustoffs in der Schweiz zu ermitteln. Mithilfe der so erstellten Prozesskette der Entsorgung kann dann die Ökobilanz der Entsorgung erstellt werden. Dabei kann auf die bilanzierten Prozesse der vorliegenden Arbeit aufgebaut werden. Die Datensätze der bilanzierten Prozesse können unter dem Link gemäss Anhang 0 bezogen werden.
Bilanz der Entsorgung in KVA oder Deponie Typ E baustoffspezifisch anpassen?	Falls eine passende Baustoffgruppe gefunden wurde, muss eruiert werden ob im Prozessschema Verbrennungsanlagen (KVA) oder Deponien vom Typ E vorkommen. – Falls nein: Die Ökobilanzergebnisse für die Entsorgung der Baustoffgruppe können unverändert übernommen werden. – Falls ja: Die Entsorgung in der Deponie Typ E oder der KVA muss neu bilanziert werden, falls sich die Zusammensetzung des neuen Baustoffs erheblich von den modellierten Baustoffen in Tabelle 53 für die Deponierung, bzw. Tabelle 55 für die KVA unterscheidet.
- Chemische Zusammensetzung des Baustoffs ermitteln - Neuen Entsorgungsdatensatz KVA oder Deponie Typ E gemäss Vorgaben ecoinvent erstellen - Neuen Entsorgungsdatensatz in Prozesskette integrieren und Ökobilanz neu rechnen	Falls die Antwort auf die Frage «Bilanz der Entsorgung in KVA oder Deponie Typ E baustoffspezifisch anpassen?» «Ja» lautet: Es gibt zwei Möglichkeiten: Entweder kann die Zusammensetzung des Baustoffs abgebildet werden über bestehende Datensätze in ecoinvent. Oder es muss ein neuer Datensatz für die Verbrennung oder die Deponierung gemäss den Vorgaben von Ecoinvent (Doka, 2009c, 2009b) erstellt werden. Dafür existieren Hilfstoos auf der Ecoinvent-Webseite im Bereich für Abonnenten der Version 2 der Datenbank unter dem Reiter «Files». In beiden Fällen wird die neu erstellte Sachbilanz für die Deponierung oder Verbrennung in die Prozesskette des Baustoffs integriert und die Ökobilanz der Entsorgung neu gerechnet.

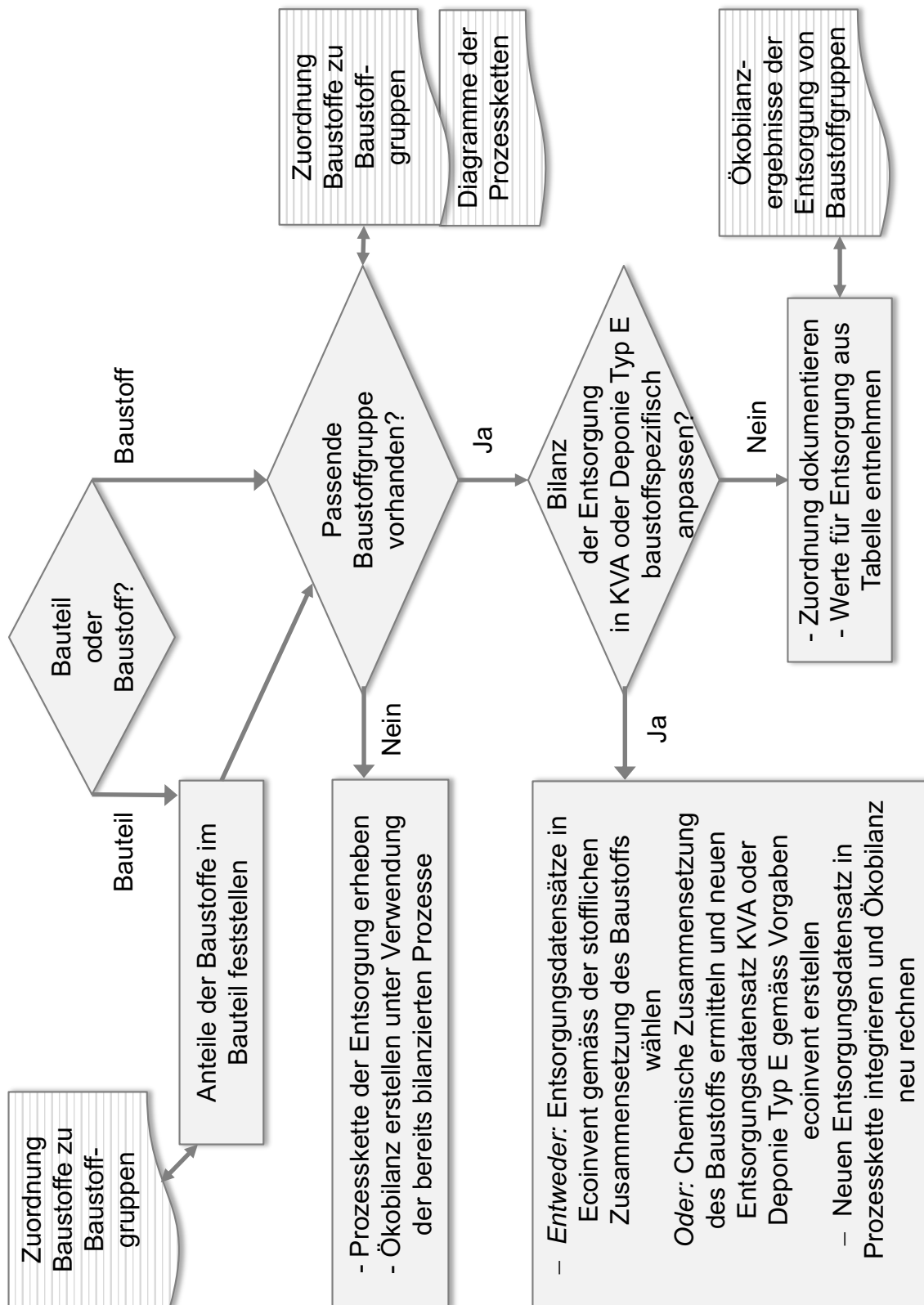


Abbildung 33: Flussdiagramm zur Ermittlung der Ökobilanz der Entsorgung

2.13 Diskussion

2.13.1 Stoffliche Verwertung nach Baustoffgruppen

Tabelle 61 zeigt den Anteil der stoffliche Verwertung in einer Baustoffgruppe bezogen auf die Abfallmenge. Erwartungsgemäss ist die Recyclingquote bei den Metallen (Armierungsstahl, Stahl, Nichteisenmetalle) am höchsten. Das Recycling von Metallen lohnt sich aus wirtschaftlicher Sicht. Deshalb sind nur Verluste in der Aufbereitung dafür verantwortlich, dass nicht bei allen Metallen eine Verwertungsquote von 100% erreicht wird. Bei den meisten mineralischen Baustoffen (Beton, Gussasphalt, undifferenzierte mineralische Baustoffe, Ziegel) liegt die Verwertungsquote bei fast 50% oder mehr. Auch Mörtel und Putze haben eine Verwertungsquote von über 50%. Dies ist aber nur der Fall, weil angenommen wurde, dass diese Baustoffgruppe zusammen mit dem Beton oder Mischabbruch entsorgt wird. Für Mörtel und Putze ist uns kein spezifisches Aufbereitungsverfahren bekannt. Ähnlich kommt die relativ hohe Verwertungsquote bei den Gipswerkstoffen von 17% zustande. Diese gelangen teilweise in den Mischabbruch und werden mit diesem stoffliche verwertet. Sie bringen für die hergestellten RC-Granulate jedoch keinen Zusatznutzen. Eine spezifische stoffliche Verwertung von Gipswerkstoffen aus dem Rückbau findet bis heute kaum statt. Beim Flachglas liegt die Verwertungsquote unter 20%. Eine höhere Verwertungsquote scheint momentan kaum realistisch. Einerseits erzeugen die Hersteller von Verglasungen sehr viel Verschnitt und speisen diese Abfälle direkt zurück in die Flachglasherstellung. Zudem kann in der Herstellung von Flachglas aus Qualitätsgründen nur ein relativ geringer Anteil von Recyclaten eingesetzt werden. Andererseits wird in der Herstellung von Glaswolle und Schaumglas ein grosser Anteil Flaschenaltglas eingesetzt. Somit sind die Absatzmöglichkeiten von aufbereitetem Flachglas beschränkt. Vom Holz werden rund 30% stofflich verwertet. Die stoffliche Verwertung geschieht in der Regel in benachbarten Ländern, da es in der Schweiz nur ein Spanplattenwerk gibt. Holz wird gegenwärtig vor allem thermisch verwertet. Durchaus anstrebenswert wäre eine Verbesserung der Verwertungsquote bei den kunststoffbasierten Baustoffen (Kunststoffe, Kunststoff-Rohre, Dämmstoffe und Bodenbeläge aus Kunststoff). Die stoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen aus dem Rückbau ist derzeit praktisch inexistent. Ausser bei grösseren Kunststoff-Rohren, die relativ gut sortenrein gesammelt werden können, ist die Vermischung verschiedener Kunststoffe bei den kunststoffbasierten Baustoffen aber ein wichtiger Hinderungsgrund warum diese Baustoffe kaum oder gar nicht stofflich verwertet werden. Zudem sind die Primärrohstoffe so günstig, dass sich eine aufwendige Aufbereitung nicht lohnt. Dies ist ein bekanntes Problem in der Recycling-Branche.

Tabelle 61: Anteil der Abfallmenge die stofflich verwertet wird

Baustoffgruppe	Anteil stoffliche Verwertung
Armierungsstahl	100%
Beton	67%
Bodenbelag organisch	0%
Dichtungsbahnen, Schutzfolien	0%
Faserzement	0%
Flachglas	16%

Baustoffgruppe	Anteil stoffliche Verwertung
Gipswerkstoffe	17%*)
Gussasphalt	63%
Holz, Holzwerkstoffe	30%
Kies, Sand	58%
Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche	0%
Kunstharz-Fliessbeläge	0%
Kunststoffe	0%
Kunststoff-Rohre	23%
Mineralwolle, Aerogel	0%
Organische Dämmstoffe	0%
Mörtel, Putze	53%*)
Stahl	98%
Nichteisenmetalle	83%
Organisch-mineralische Verbundmaterialien	0%
Undifferenzierte mineralische Baustoffe	53%
Ziegel	57%

*) Die Verwertung erfolgt über den Mischabbruch

2.13.2 Etwas mehr als die Hälfte der Bauabfälle gelangen in ein Recycling

Nach der Betrachtung des Anteils der stofflichen Verwertung pro Baustoffgruppe im vorhergehenden Kapitel, interessiert uns auch der Anteil der stofflichen Verwertung bezogen auf das gesamte Bauabfallaufkommen. Zur Ermittlung einer Recyclingquote für Bauabfälle benötigen wir zunächst die Anteile der Baustoffgruppen am gesamten Abfallaufkommen aus dem Baubereich. Aus den Controllingberichten für die Stadt Zürich (Anhang A.1) lassen sich die Gewichtsanteile der Bauabfälle herleiten. Diese Herleitung wurde in Tabelle 12 in der letzten Spalte ausgewiesen. Ein Vergleich mit den Daten der statistischen Sektoraleswertung für den Hochbau (Guerra et al., 2015) zeigt sehr ähnliche Ergebnisse. Es zeigt sich, dass die Anteile der drei Baustoffgruppen mit den grössten Flüssen gemäss Tabelle 12 bereits den überwiegenden Anteil am Gesamtaufkommen ausmachen. Die Nomenklatur der Quelle unterscheidet sich von der Nomenklatur der vorliegenden Studie, wie Tabelle 62 zeigt.

Tabelle 62: Baustoffgruppen und Anteile am Bauabfall aus dem Hochbau

Baustoffgruppe gemäss (Rubli, 2005d)	Anteil korrigiert gem. Tabelle 12	Baustoffgruppe diese Studie	Anteil für Berechnung Recyclingquote Bauabfälle
Betonabbruch	49 %	Beton	49 %
Mischabbruch	32 %	Undifferenzierte mineralische Baustoffe	37 %
Andere Inertstoffe	5 %		
Gesamt für berücksichtigte Baustoffgruppen	86 %		86 %

Die Baustoffgruppe Betonabbruch aus den Controllingberichten entspricht der Baustoffgruppe Beton unserer Studie. Die beiden Baustoffgruppen Mischabbruch und «andere Inertstoffe» entsprechen der Baustoffgruppe «undifferenzierte mineralische

Baustoffe» unserer Studie. Für die Berechnung der globalen Recyclingquote für Bauabfälle summieren wir deshalb die Anteile dieser beiden Stoffgruppen aus den Controllingberichten. Mit den Anteilen aus der letzten Spalte der Tabelle 62 und dem Anteil der stofflichen Verwertung, bzw. der Entsorgung der Baustoffgruppen Beton und «undifferenzierte mineralische Baustoffe» lässt sich der gewichtete Mittelwert für den Anteil der stofflichen Verwertung und der Entsorgung berechnen. Dazu multiplizieren wir den Anteil der stofflichen Verwertung einer Baustoffgruppe mit dem Anteil der Baustoffgruppe am Gesamtaufkommen der Bauabfälle und summieren das Ergebnis beider Baustoffgruppen. Die so erhaltene Summe teilen wir dann durch den Gesamtanteil von 86 %. Für die Entsorgung verfahren wir analog. Das Ergebnis dieser Berechnung weisen wir in Tabelle 63 aus. Es zeigt sich, dass rund 60% der Masse stoffliche verwertet wird und 40% in die Deponierung gelangt.

Tabelle 63: Recyclinganteile nach Baustoffgruppen

Baustoffgruppe	Anteil stoffliche Verwertung	Anteil Ablagerung
Beton	67%	33%
Undifferenzierte mineralische Baustoffe	53%	47%
Gewichteter Mittelwert	62%	38%

2.13.3 Bedeutung der Entsorgung abhängig vom Baustoff

Die Auswirkungen der Entsorgung machen einen unterschiedlich grossen Anteil der Lasten im Lebenszyklus eines Baustoffes aus. Die exemplarische Auswertung von Herstellung und Entsorgung für Beton, undifferenzierte mineralische Baustoffe, Backstein, Baukleber und EPS-Dämmung zeigt sehr unterschiedliche Anteile der Entsorgung an der Gesamtökobilanz. Der Anteil der Entsorgung an der Gesamtökobilanz hängt auch vom betrachteten Indikator ab. Für den Beton macht die Entsorgung bei der nicht erneuerbaren Primärenergie ca. ein Drittel der Gesamtbilanz aus (Abbildung 34). Für die Betonaufbereitung wurde keine Allokation des Aufwands zwischen Entsorgung und Herstellung vorgenommen. In der Betonaufbereitung wird Recyclinggranulat hergestellt. Ein Teil des Entsorgungsaufwands könnte darum auch der Herstellung angerechnet werden. Bei den anderen exemplarisch untersuchten Baustoffen macht der Anteil der Entsorgung an der nicht erneuerbaren Primärenergie weniger als 10% aus. Bei den Treibhausgasemissionen (Abbildung 35) und den Umweltbelastungspunkten (Abbildung 36) macht der Anteil der Entsorgung beim Beton weniger aus als bei der Primärenergie nicht erneuerbar. Die Treibhausgasemissionen der Zementherstellung beeinflussen die Herstellungsphase beim Beton in Bezug auf die Indikatoren CO₂ und Umweltbelastungspunkte. Deshalb verschiebt sich hier das Verhältnis zugunsten der Herstellungsphase. Für Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche, sowie organischen Dämmstoffe sind die Emissionen der Verbrennung in der KVA bedeutend für die Gesamtökobilanz. Als Folge davon macht der Anteil der Entsorgung an der Gesamtökobilanz zwischen 10% und 40% aus, wenn die Treibhausgasemissionen, bzw. Umweltbelastungspunkte betrachtet werden. Für den Verbrauch an Primärenergie ist hingegen die Entsorgung unbedeutend. Bei den undifferenzierten mineralischen Baustoffen und Backstein beträgt der Anteil der Entsorgung, unabhängig vom Indikator, weniger als 10% der Gesamtökobilanz.

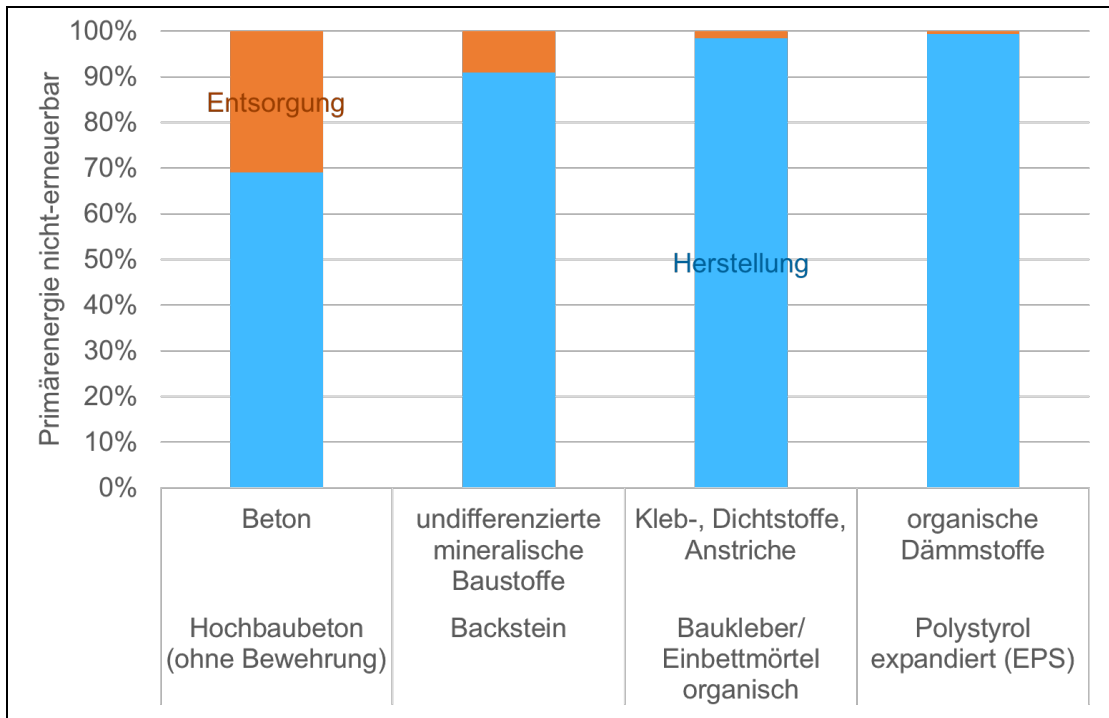


Abbildung 34: Anteile Herstellung und Entsorgung an der Primärenergie nicht erneuerbar eines Baustoffs

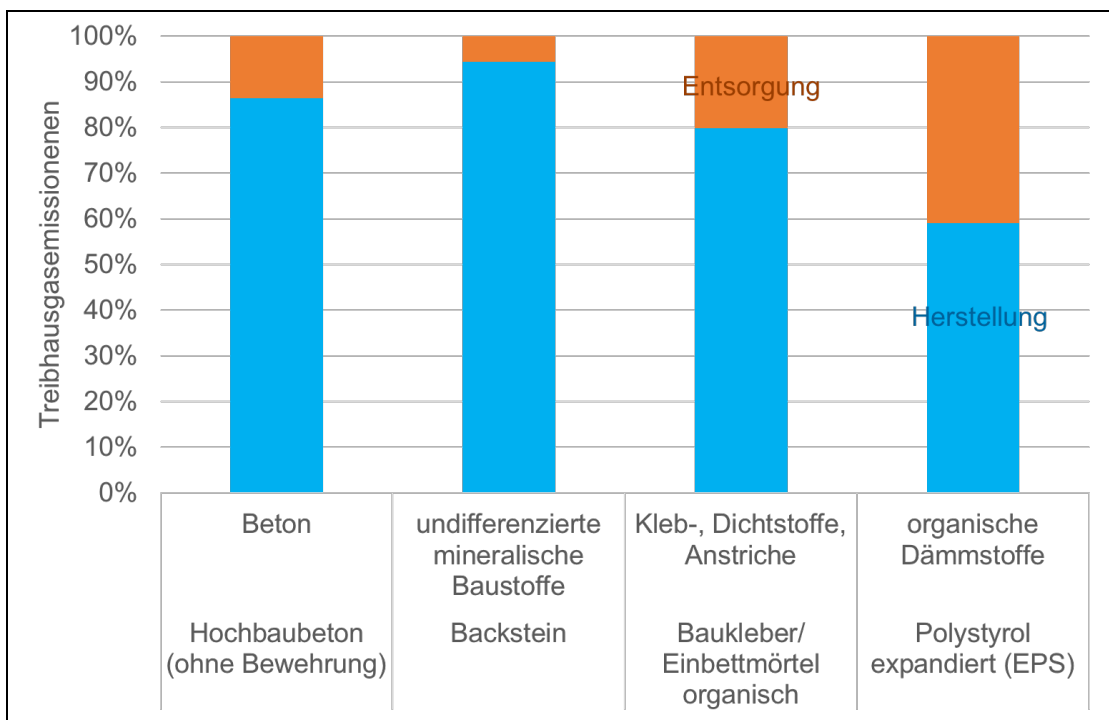


Abbildung 35: Anteile Herstellung und Entsorgung an den Treibhausgasen eines Baustoffs

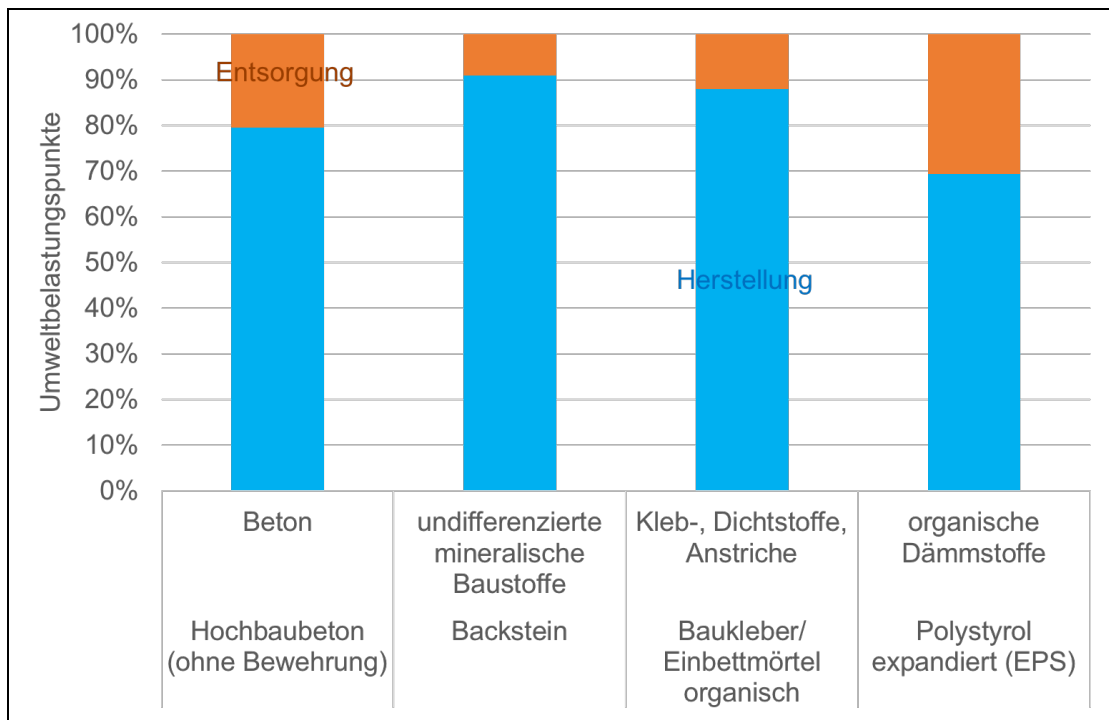


Abbildung 36: Anteile Herstellung und Entsorgung an den Umweltbelastungspunkten eines Baustoffs

2.13.4 Deponierung in Deponie Typ B systematisch unterbewertet

In der Studie über die Entsorgung von Bauabfällen in Deponien (Klingler et al., 2018) haben die Autoren untersucht, wie sich die Ökobilanz der Deponierung von Baustoffen ändert, wenn sie mit dem Datensatz für die Reaktordeponie vorgenommen wird statt mit dem Datensatz für die Deponie Typ B. Eine solche Bilanzierung fordert die Methode der ökologischen Knappheit für Abfälle, welche organischen Kohlenstoff enthalten (Kapitel 14, Abschnitt 14.2.6 (Frischknecht et al., 2013)). Für einige vorwiegend mineralische Baustoffe mit organischem Anteil berechneten die Autoren die Umweltbelastungspunkte sowohl mit dem Datensatz für die Deponie Typ B, als auch mit dem Datensatz für die Reaktordeponie. Die Resultate zeigten auf, dass die Umweltbelastung gemessen in UBP deutlich höher ist, wenn sie mit dem Datensatz für die Reaktordeponie bilanziert wird. Die Umweltbelastung wurde fast ausschliesslich durch TOC-Emissionen aus dem Reaktordeponie-Modell verursacht.

In der vorliegenden Studie haben wir den Datensatz für die Deponie Typ B aus Ecoinvent verwendet. Für alle Baustoffgruppen die zu einem nennenswerten Anteil in die Deponie Typ B gehen und deren Baustoffe zusätzlich einen Anteil organischen Kohlenstoffs aufweisen, kann erneut davon ausgegangen werden, dass das Ecoinvent-Modell für die Deponie Typ B die Emissionen unterbewertet. Eine Bilanzierung der stoffspezifischen Emissionen würde vermutlich zu einer höheren Umweltbelastung führen. Eine Analyse der Prozessketten zeigt, dass die Umweltbelastung der folgenden Stoffgruppen derzeit vermutlich zu optimistisch bewertet wird:

- Faserzement
- Gipswerkstoffe
- Klebstoffe, Dichtstoffe, Anstriche

– Kunstharzfließbeläge

Um die Situation zu verbessern, wurde im Rahmen dieser Studie abgeklärt, ob die Datenbasis vorhanden wäre, um das Modell für die Deponie Typ B zu verbessern. Diese Untersuchungen sind in Kapitel 3 dokumentiert.

2.13.5 Vergleich zur Modellierung in Ecoinvent

Die Entsorgung von Bauabfällen in Ecoinvent basiert auf den Arbeiten von Doka und Hischer (Doka, 2009d). Im Vergleich zwischen der hier vorgenommenen Modellierung und der bisherigen in Ecoinvent ergeben sich einige Differenzen. Die wichtigsten werden im Folgenden diskutiert.

Der Fokus der neu vorgelegten Studie liegt auf der Modellierung der Prozessketten in der Entsorgung. Ausgehend von den etablierten Entsorgungswegen in der Baustoffentsorgung wurde eruiert, welche Prozessschritte spezifische Baustoffgruppen in der Entsorgung durchlaufen und welche Transporte zwischen diesen Schritten erfolgen. Wichtiger Teil dieser Arbeiten war die Ermittlung der für die Schweiz repräsentativen Anteile der möglichen Entsorgungswege, welche ein Baustoff effektiv durchläuft. Die bestehende Modellierung in Ecoinvent bildet Module für «direktes Recycling», die Behandlung «in Aufbereitungsanlagen» und die direkte «Beseitigung» (Doka, 2009d). Module für die Entsorgungswege werden für eine Auswahl möglicher Entsorgungswege erstellt. Es wurden jedoch keine Aussagen dazu gemacht, welche der Entsorgungswege zu welchem Anteil effektiv beschritten werden.

Die Prozesse zur Verarbeitung von Abfällen wurden neu detaillierter modelliert. Besonders die energieintensive Brechung von Betonabbruch und die Sortierung von Mischabbruch wurden mit Anlagedaten genauer modelliert als bisher in Ecoinvent vorhanden. Die Bausperrgutsortierung wurde bereits im bestehenden Ecoinvent-Bericht detailliert modelliert. Unsere Arbeit konnte darauf aufbauend die Infrastrukturdaten aus der Ecoinvent-Modellierung verwenden.

Die Transportdistanzen wurden aufgrund der Anlagedichte in der Schweiz hergeleitet und sind generell länger in der neuen Bilanzierung als in den bestehenden Ecoinvent-Datensätzen, wie Tabelle 64 zeigt.

Tabelle 64: Vergleich der Transportdistanzen dieser Arbeit mit den bestehenden Datensätzen

Entsorgungsanlage	Transportdistanz diese Arbeit [km]	Transportdistanz (Doka 2009) [km]
Deponie Typ B	30	15
Deponie Typ E	32	10
KVA	31	10

Staubemissionen sind in Ecoinvent für den Abbruch modelliert. Allerdings mit einer sehr unsicheren Datenbasis. Diese Modellierung wird in dieser Arbeit nicht übernommen.

2.13.6 Vergleich der Resultate mit der KBOB-Liste 2016

Tabelle 65 und Abbildung 37 bis Abbildung 39 vergleichen die Ökobilanzergebnisse aus der vorliegenden Studie mit den KBOB-Daten. Die grössten Differenzen ergeben sich für die Baustoffgruppen Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche, Kunstharz-Fliessbeläge sowie Kunststoffrohre. Die berechneten Umweltlasten der bestehenden KBOB-Daten sind für diese grösser als jene aus dieser Studie. Bei den Kleb-, Dichtstoffen und Anstrichen liegt es daran, dass gemäss unseren Untersuchungen ein grösserer Anteil als Verunreinigung von mineralischen Fraktionen in eine Deponie Typ B gelangt. Eventuelle Emissionen aus dem Deponiekörper durch den Abbau von organischen Verunreinigungen werden im aktuellen Deponiemodell von Ecoinvent für Deponien vom Typ B nicht berücksichtigt. Bei den Kunststoffrohren liegt es daran, dass gemäss Prozesskette ca. 25% stofflich verwertet werden. Für diesen Anteil fallen in der Entsorgung nur Aufwendungen für die Sammlung und Sortierung an. Hingegen sind die Resultate aus dieser Studie für die Entsorgung von Bodenbelägen aus Gummigranulat und für die Entsorgung von Massivholz und Holzwerkstoffen deutlich höher. Der Bodenbelag aus Gummigranulat wird in der KVA entsorgt. Wie Abbildung 31 zeigt, werden die Umweltlasten in der Entsorgung vor allem von der Verbrennung verursacht. Beim Massivholz und den Holzwerkstoffen werden gemäss Prozesskette ca. 19% im Ausland stofflich oder thermisch verwertet. Aufgrund der langen Transportwege beeinflussen Transportprozesse die Bilanz deutlich. Für die übrigen Baustoffgruppen sind die Resultate aus unserer Studie in den meisten Fällen etwas höher. Allerdings sind die Abweichung verhältnismässig klein.

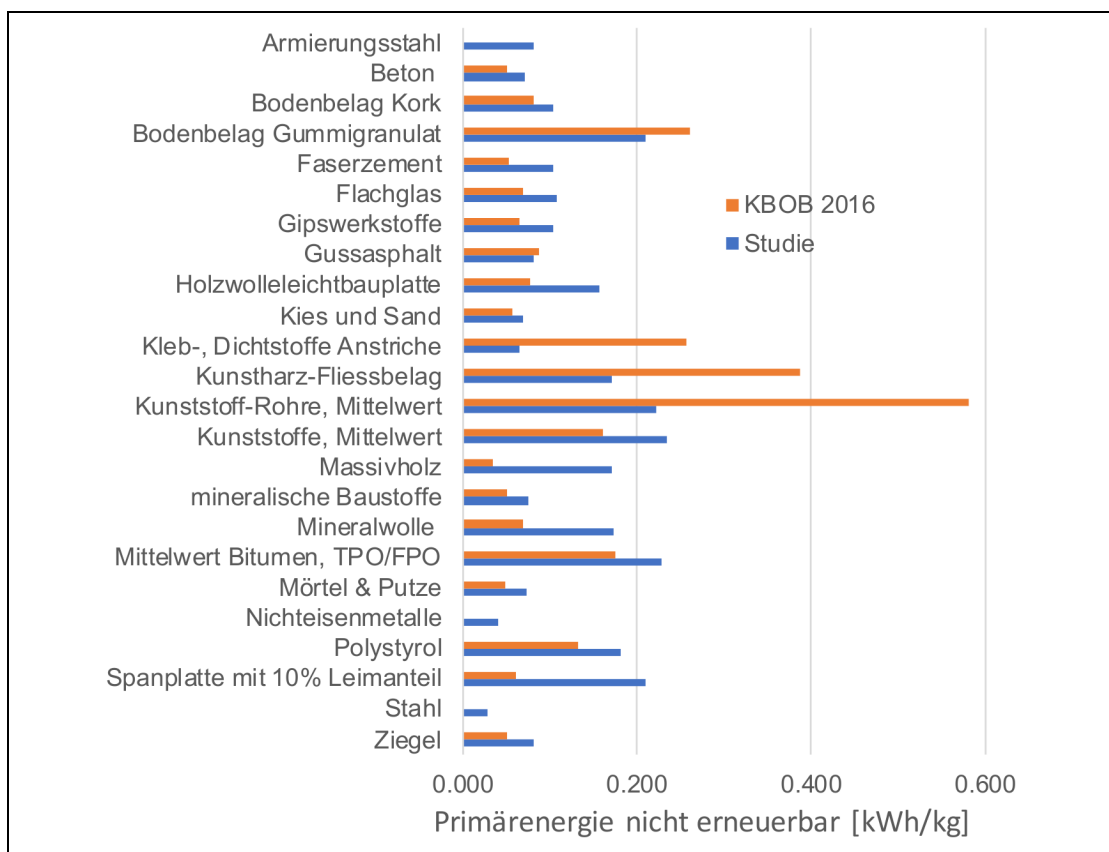


Abbildung 37: Vergleich mit KBOB-Daten, Primärenergie nicht erneuerbar

Tabelle 65: Vergleich Resultate dieser Studie mit KBOB-Daten (KBOB, 2016)

Sachbilanz pro kg	Primärenergie nicht-erneuerbar [kWh]		Ökologische Knappheit [UBP]		Treibhausgasemissionen [kg CO ₂]	
		KBOB 2016		KBOB 2016		KBOB 2016
Entsorgung Armierungsstahl	0.047	0	12.4	0	0.011	0
Entsorgung Beton	0.066	0.047 - 0.054	17.3	24.9 – 27	0.014	0.009 - 0.010
Entsorgung Bodenbelag organisch, Gummigranulat	0.210	0.261	1602.3	821.818	3.161	1.527
Entsorgung Bodenbelag organisch, Kork	0.104	0.080	62.3	155.128	0.028	0.213
Entsorgung Dichtungsbahnen und Schutzfolien, Mittelwert Bitumen, TPO/FPO	0.228	0.132 – 0.217	1275.2	1180 – 1480	2.496	2.37 – 3.03
Entsorgung Faserzement	0.103	0.053	26.8	26.6	0.019	0.01
Entsorgung Flachglas	0.107	0.068	28.9	18.6	0.020	0.01
Entsorgung Gipswerkstoffe	0.105	0.064 – 0.065	43.8	17.2 – 17.5	0.021	0.009
Entsorgung Gussasphalt	0.081	0.088	57.2	121.3	0.019	0.018
Entsorgung Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz	0.171	0.034	186.2	27	0.042	0.01
Entsorgung Holz und Holzwerkstoffe, Spanplatte mit 10% Leimanteil	0.209	0.061	283.6	91.4	0.222	0.127
Entsorgung Kies und Sand	0.069	0.048 – 0.064	18.1	25.1 – 29.7	0.014	0.009 – 0.011
Entsorgung Kleb-, Dichtstoffe Anstriche	0.065	0.163 – 0.348	132.9	754 - 1590	0.188	1.34 – 3.16
Entsorgung Kunstharz-Fließbelag	0.319	0.347 – 0.428	649.8	754 - 828	0.856	1.34 – 1.44
Entsorgung Kunststoff-Rohre, Mittelwert	0.223	0.132 – 1.03	967.5	1180 - 1480	1.865	2.04 – 3.03
Entsorgung Kunststoffe, Mittelwert	0.233	0.129 – 0.193	1243.3	377 - 1480	2.292	0.714 – 3.03
Entsorgung Mörtel & Putze	0.073	0.031 – 0.064	19.1	17.2 – 19.3	0.015	0.005 – 0.009
Entsorgung Mineralwolle und Aerogel, Mineralwolle	0.160	0.068	78.2	29.8	0.084	0.01
Entsorgung Nichteisenmetalle	0.039	0	9.8	0	0.009	0
Entsorgung organisch-mineralische Verbundmaterialien	0.156	0.077	67.0	52.8	0.033	0.017
Entsorgung organische Dämmstoffe, Polystyrol	0.181	0.133	1595.0	1570	3.091	3.19
Entsorgung Stahl	0.028	0	6.7	0	0.007	0
Entsorgung undifferenzierte mineralische Baustoffe	0.073	0.048 – 0.054	18.9	14.2 – 25.8	0.015	0.007 – 0.009
Entsorgung Ziegel	0.065	0.051	17.0	25.8	0.014	0.009

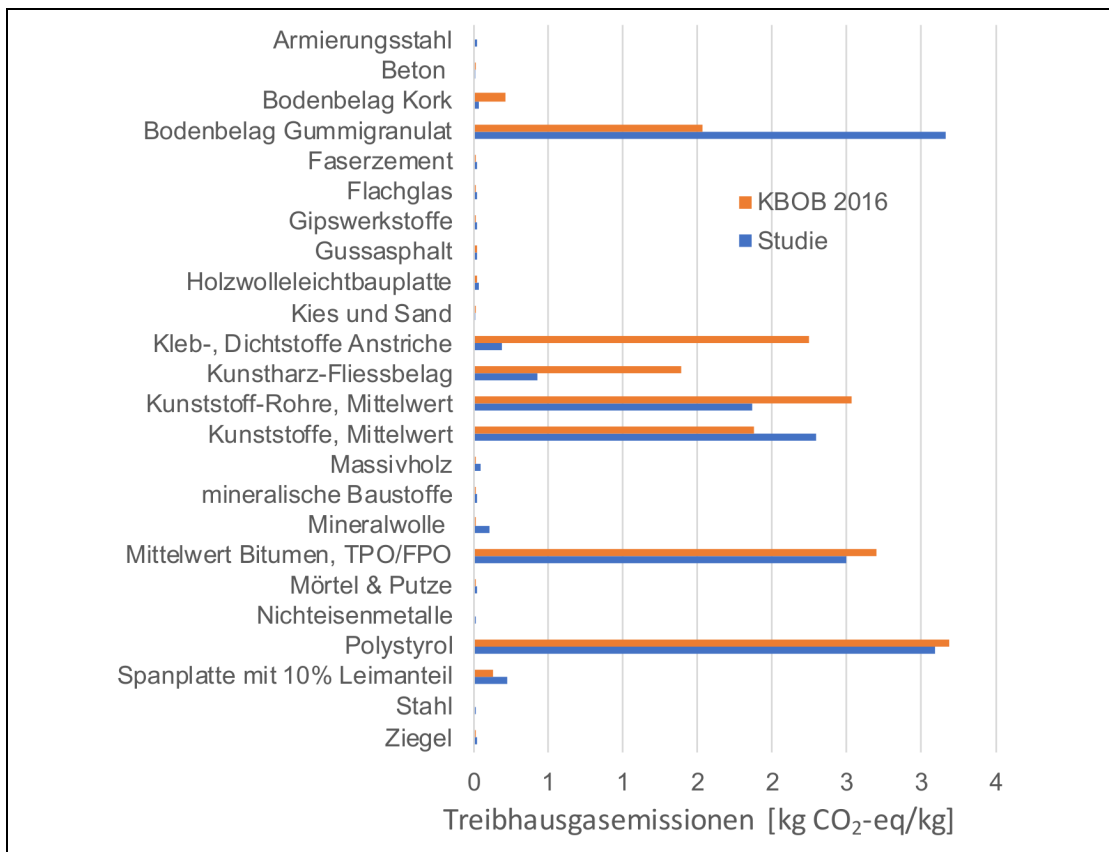


Abbildung 38: Vergleich mit KBOB-Daten, Treibhausgasemissionen

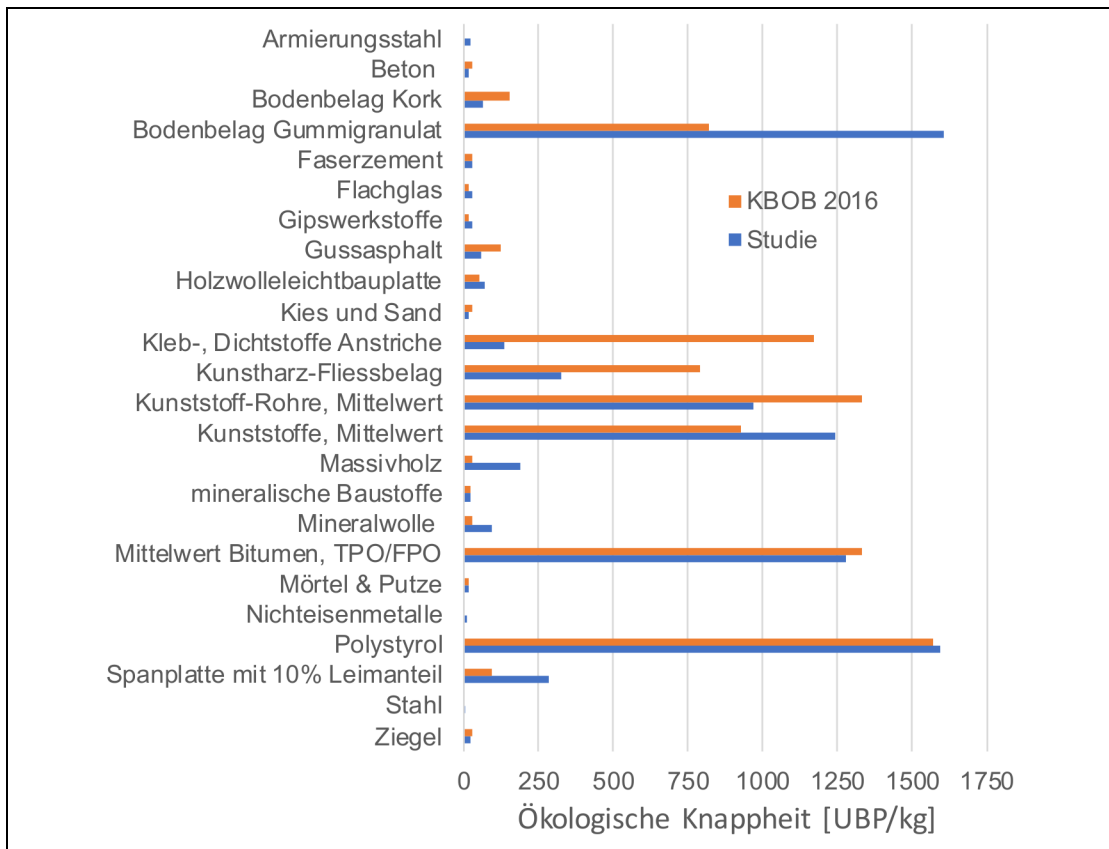


Abbildung 39: Vergleich mit KBOB-Daten, Umweltbelastungspunkte

2.14 Ausblick

Im Rahmen dieser Studie konnten nicht alle Entsorgungswege von Baustoffen bis ins letzte Detail abgeklärt werden. Bei den Recherchen wurden die Stoffgruppen mit den grössten Masseanteilen prioritär behandelt. Für Stoffgruppen mit kleineren Masseanteilen am gesamten Bauabfall konnten nicht immer für alle Entsorgungsmöglichkeiten die repräsentativen Anteile in der Schweiz eruiert werden. Für einige Stoffgruppen könnten darum vertiefte Abklärungen das bereits erarbeitete Bild verfeinern. Diese werden im Folgenden kurz erläutert:

- Dichtungsbahnen und Schutzfolien: Die Bedeutung der Recyclingsysteme von Herstellern im Rückbau konnte nicht detailliert erhoben werden. Auch ist nicht bekannt, wie gross die Gesamtflüsse der verschiedenen Dichtungsbahnen und Folien aus dem Rückbau heute sind.
- Die Entsorgung von Bauteilen konnte nur mit einem summarischen Ansatz modelliert werden. Es sollte geprüft werden, für welche Bauteile eine genauere Betrachtung der Entsorgungswege zu erheblichen Unterschieden in der Ökobilanz im Vergleich zum gewählten Vorgehen dieser Studie führen würde.
- Bei der Entsorgung von Hanfbeton stellen sich spezielle Fragen: Werden die Hanffasern in der Deponie biologisch abgebaut und erhöhen sie die Emissionen von gelöstem Kohlenstoff? Es stellt sich auch die Frage, ob Hanfbeton als Recyclingkörnung in RC-Beton verwendet werden kann.
- Für organische-mineralische Verbundmaterialien mit überwiegend mineralischem Anteil wurde keine eigene Prozesskette erstellt. Da die Entsorgung in der KVA höhere Umweltlasten erzeugt, haben wir einen Entsorgungsweg modelliert, der überwiegend über die KVA erfolgt. Für Steinholzbeläge und Kunststeinplatten ist ein solcher Entsorgungsweg vermutlich nicht zutreffend.
- Flachglas: Für die Aufbereitung von Flachglas in Glasverwertungsanlagen konnte im Rahmen des Studienbudgets keine Ökobilanz erstellt werden.
- Bausperrgutsortierung. Die Ökobilanz bezieht sich auf lediglich eine Anlage. Wie die Diskussion zeigte, ist der Einfluss der Transporte auf die Bilanz deutlich grösser als der reine Anlageaufwand. Damit lässt sich die Ökobilanz trotz der schmalen Datenbasis verwenden. Die Erstellung der Ökobilanz für weitere Anlagen wäre jedoch wünschenswert.

3 Vorabklärung zur Erweiterung des Ecoinvent-Modells für Deponien Typ B

3.1 Problemstellung

Für die Erstellung der Lebenszyklusanalyse von Abfällen in Deponien ist es nötig, die Abbauprozesse der Abfälle in den Deponien und die daraus entstehenden Emissionen zu verstehen. Diese Prozesse finden vom Zeitpunkt der Deponierung an bis in die ferne Zukunft statt. Die exakten Prozesse sind meist nicht bekannt. Aus Versuchsdaten und Erfahrungen aus bestehenden Deponien muss ein Deponiemodell geschaffen werden, welches das zukünftige Verhalten der Abfälle in der Deponie modelliert. Für Deponien vom Typ B besteht derzeit in Ecoinvent ein Deponiemodell, dass keine Emissionen aus dem Deponiekörper berücksichtigt (siehe dazu 3.2). Mit der vorliegenden Vorabklärung prüfen wir, wie das Deponiemodell um stoffspezifische Emissionen erweitert werden könnte und ob die Datenbasis für eine solche Erweiterung vorhanden wäre.

3.2 Analyse Ecoinvent-Deponiemodell für Deponien Typ B

Das bestehende Deponiemodell in Ecoinvent für Deponien Typ B verzichtet auf die Modellierung von Emissionen aus den eingelagerten Stoffen. Diese Vereinfachung beruhte auf der a priori Einschätzung, dass sich die eingelagerten inerten Abfälle über die Zeit relativ wenig verändern und allfällige Emissionen gering und relativ harmlos sind, insbesondere im Vergleich mit Schadstoffbelastungen aus anderen Teilen des Lebenszyklus der eingelagerten Materialien. Allerdings ist aus der Praxis bekannt, dass diese Vorstellung idealisiert ist und sehr wohl Abbauprozesse in Deponien Typ B stattfinden, welche zu Emissionen führen. Bereits die Autoren des gültigen Modells für Deponien des Typ B wiesen im dazugehörigen Bericht darauf hin, dass diese Annahme mit Messdaten der chemischen Zusammensetzung von Sickerwässern aus Deponien Typ B überprüft werden sollte (Doka, 2009b). Messdaten der Kantone zeigen effektiv Emissionen aus Sickerwässern, wobei nicht immer klar ist, ob diese aus dem Deponiekörper oder dem Muttergestein stammen (Klingler et al., 2018).

3.3 Analyse Ecoinvent-Deponiemodelle für Reaktor- (Typ E) und Reststoffdeponien (Typ C)

Das Ecoinvent-Deponiemodell benötigt als Eingangsgrösse die Abfallzusammensetzung. Aus dieser werden mittels Transferfaktoren für die chemischen Elemente die Emissionen von chemischen Elementen (Atomsorten) aus der Deponie modelliert. Emissionen aus Deponien treten für viele Elemente nicht in elementarer Form auf. Die Emissionen treten stattdessen als meistens einfache organische Verbindungen auf. Für Schwefel im Wasser sind das vor allem gelöste Sulfate, für Stickstoff Nitrat und Nitrit, für Phosphor Phosphate. Diese Verbindungen werden aus den modellierten elementaren Emissionen aus empirischen Daten der gemessenen Substanzen im Abfluss oder den Gasen aus Deponien berechnet.

Das Ecoinvent-Modell teilt die Emissionen auf in zwei Zeiträume: Die kurzfristigen Emissionen beginnen mit der Ablagerung der Abfälle bis 100 Jahr danach, die Langzeitemissionen beginnen 100 Jahre nach Ablagerung der Abfälle bis 60'000 Jahre danach.

Das Reaktordeponiemodell führt einen Freisetzungsfaktor ein, der pro chemischem Element berechnet wird und die Adsorption von freigesetzten Elementen in der Deponie berücksichtigen soll.

Emissionen aus Deponien können in die Luft oder in das abfliessende Wasser stattfinden. Der Regen ist dabei die wichtigste Wasserquelle. Zudem entstehen Emissionen beim Betrieb der Deponie, hauptsächlich durch die Verbrennung von Treibstoffen in den eingesetzten Maschinen.

3.4 Konzept für die Erstellung eines verbesserten Modells der Deponie Typ B

3.4.1 Mit bestehenden Modellen kompatibles Arbeitspunktmodell

Für ein Modell der Deponie vom Typ B müssen Daten bekannt sein, die eine mit den bestehenden Modellen für Reaktor- und Reststoffdeponien konzeptionell kompatible Ergänzung ermöglichen. Um die Emissionen einer typischen Deponie vom Typ B zu modellieren, ist es nötig, ein sogenanntes Arbeitspunkt-Modell zu erstellen. Dieses bildet das typische, durchschnittliche Verhalten des Deponiekörpers ab. Aus diesem Modell werden Transferkoeffizienten für die einzelnen chemischen Elemente erhalten. Die Transferkoeffizienten bilden das typische, durchschnittliche Verhalten von einzelnen chemischen Elementen in der Deponie Typ B ab. Mithilfe der chemischen Zusammensetzung einzelner Abfallmaterialien können daraus abfallspezifische Emissionen für Ökoinventare erhalten werden. Die Abfallzusammensetzungen werden in den Ecoinvent-Abfallmodellen aus Konsistenzgründen in einer zentralen Exceldatei festgehalten.

Die Ecoinvent-Deponiemodelle wurden 2017 erweitert (Doka, 2017). Da die Verwitterungsgeschwindigkeit des Deponiekörpers und der Sickerwasseranfall von lokalen

Klimafaktoren abhängen, wurden diese ins Modell integriert, was neu regionalisierte Inventare ermöglicht. Bei einer Erweiterung/Harmonisierung des Deponiemodells wären diese Anpassungen ebenfalls zu übernehmen, um nicht eine neue Heterogenität in die verschiedenen Deponiemodellen einzuführen.

Veränderungen des pH-Werts werden im Arbeitspunktemodell berücksichtigt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei Deponien Typ B eine sehr grosse Pufferkapazität vorhanden ist, so dass dieser Modellierungsteil vermutlich nicht zum Tragen kommen wird. Sollten in den Deponiekörpern anaerobe Bedingungen herrschen, werden sich diese in den Sickerwasserkonzentrationen abzeichnen und könnten in der Modellierung berücksichtigt werden.

Neben direkten Emissionen aus dem Deponiekörper sind auch indirekte Belastungen aus Infrastruktur und Betrieb der Deponie zu erfassen.

3.4.2 Schwefelwasserstoff H₂S

Obwohl Deponien Typ B weitestgehend unreaktive Abfälle enthalten, gibt es episodische Evidenzen der Bildung von Schwefelwasserstoff H₂S, insbesondere aus Gipsbaustoffen (Grauwiler, 1992). Schwefelwasserstoff wird unter anaeroben Bedingungen, d.h. unter Sauerstoffabschluss gebildet. Stauwasser oder grosse Mengen an biologisch abbaubaren Abfällen können zu solchen Bedingungen führen, unter denen Sulfat aus Gips in Schwefelwasserstoff umgewandelt wird und ausgasen kann. In diesem Sinne wären grössere Schwefelwasserstoff-Emission ein Zeichen, dass in einer Deponie konstruktive Mängel (Stauwasser) oder betriebliche Mängel (Ablagerung grosser Mengen nicht inerter Abfälle) vorliegen.

In Ökoinventaren sollen tatsächlich auftretende Effekte bilanziert werden, egal ob diese so beabsichtigt sind oder nicht. Sie sollten die üblichen Zustände der realen Welt repräsentieren. In diesem Sinne wäre ein gewissen Ausmass an H₂S-Emissionen aus Deponien Typ B im Arbeitspunkt-Modell zu berücksichtigen, falls sie mit einer gewissen Regelmässigkeit anzutreffen sind. Dabei könnten auch Mischrechnungen verwendet werden, z. B. 90 % der Deponien sind ohne Gasemission, aber 10 % haben diese.

Um abzuklären, wie häufig H₂S-Emissionen in Deponien Typ B anzutreffen sind, wären diverse Vorgehen denkbar. Am besten wären natürlich Messungen von Gasemissionen an Deponien Typ B. Da Deponien Typ B aber nominal keine Gasemissionen aufweisen, werden diese üblicherweise nicht erfasst. Da anaerobe Verhältnisse eine Voraussetzung für H₂S-Emissionen sind, wären alternativ Messwerte zum Redoxpotential im Sickerwasser aufschlussreich. Auch Messwerte für Ammoniak im Sickerwasser können Hinweise geben, ob in einer Deponie überhaupt anaerobe Zustände vorhanden sind.

Da Schwefelwasserstoff ein stark riechendes Gas mit hohem Dampfdruck und mit einer niedrigen Geruchsschwelle von 0.566 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft (0.37 ppb) ist, wären tatsächliche H₂S-Emissionen ab einem gewissen Ausmass leicht vor Ort auszumachen. Die Vermutung, dass solche Geruchsbelästigung in der dichtbesiedelten Schweiz ein Politikum wären, insbesondere wenn sie weit verbreitet wären, stützt die Einschätzung, dass H₂S-Emissionen aus Deponien Typ B – wenn überhaupt – wahrscheinlich nur sehr eingeschränkt stattfinden. Eine grobe

Abschätzung ergibt, dass bereits ab einer Schwefelkonversion von nur 0.2% des gesamten Schwefels einer Deponie Typ B in Schwefelwasserstoff dieses geruchlich ausserhalb des Deponieareals wahrzunehmen wäre. Die tatsächliche Konversion ist demnach vermutlich kleiner als dieser Wert. Zum Vergleich: für Gips in der Reaktordeponie errechnet (Doka, 2009d), dass 6.5 % des Schwefels in die Gasphase überführt werden.

3.4.3 Organischer vs. anorganischer Kohlenstoff

In den bisherigen Ecoinvent-Deponiemodellen wird lediglich organischer Kohlenstoff (TOC) betrachtet. In Bauabfällen kann es beträchtliche Mengen anorganischen Kohlenstoffs (TIC) haben. Diese beiden Kohlenstoff-Klassen sollten im Modell nicht vermischt werden. D.h. TIC im Abfall sollte nicht zu einem TOC-Signal im Inventar führen. TIC, üblicherweise Karbonate CO_3^{2-} , gelten im Rahmen einer Ökobilanz als harmlos.

Korrekte Lösung: Kohlenstoff in der spezifischen Abfall-Input-Definition sollte in TOC und TIC aufgetrennt werden. Nur der TOC-Teil führt zu gewissen TOC-Emissionen. Dazu müsste aber die Erfassungsmatrix der Abfalldefinitionen (die für alle Ecoinvent Abfallmodelle zentral geführt wird) sowie alle Abfallmodellierungen angepasst werden.

Vereinfachte, pragmatische Lösung: Da TIC zu keinen fürs LCA relevanten Emissionen führt, kann TIC in der Abfallzusammensetzung vereinfachend mit etwas für die Umwelt harmlosem wie Sauerstoff oder SiO_2 ersetzt werden. Dies wurde in Ecoinvent z. B. bei festen Abfällen aus der Wasser-Decarbonisierung bereits mit dieser pragmatischen Lösung gehandhabt (Doka, 2009a). Die abfallspezifische Modellierung der Ecoinvent-Modelle führt dann dazu, dass aus diesen Teilen auch keine Emissionen generiert werden.

3.4.4 Benötigte Daten für die Erarbeitung eines verbesserten Modells

3.4.4.1 Im Feld gemessene Konzentrationen im Sickerwasser von Deponien Typ B

Für die Messdaten des Sickerwassers aus realen Deponien sind folgende Qualitätsmerkmale anzustreben:

- Die Konzentrationen im Sickerwasser sollten möglichst in Milligramm pro Liter oder mol pro Liter vorliegen.
- Benötigt werden Werte für Sickerwasser/Porenwasser, welches im Deponiekörper verweilt. Möglichst unverdünnt mit anderem Grundwasser oder Vorfluter.
- Feldmessungen, prioritär als Einzelmesswerte aus diversen Messkampagnen oder Zeitreihen
- Bei zusammengefassten Mittelwerten aus mehreren Einzelwerten sollte das typische Konfidenzintervall bekannt sein.
- Die Messwerte sollten zusätzlich zu den gelösten Konzentrationen auch die partikulären Frachten umfassen.

Bezüglich Umfang der analysierten Elemente sind alle verfügbaren Werte von Interesse:

- Insbesondere alle Elemente, die im Elementarvektor der Ecoinvent-Deponiemodelle vorkommen: TOC, S, N, P, B, Cl, Br, F, I, Ag, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, V, Zn, Be, Sc, Sr, Ti, Tl, W, Si, Fe, Ca, Al, K, Mg, Na.
- Zusätzliche Summenparameter oder Verbindungen wie Kohlenstoff-Gesamtgehalt, anorganischer Kohlenstoff (TIC), Ammonium-Stickstoff (NH₄-N), Nitrat-Stickstoff (NO₃-N), Sulfat-Schwefel (SO₄-S), Sulfid-Schwefel (S²⁻-S), Cr^{III}, Cr^{VI} etc.
- Ebenfalls interessante Parameter, die nicht zwingend notwendig sind: Redoxpotential (Eh) im Sickerwasser in Millivolt, typische Sickerwassermenge am Boden des Deponiekörpers, bzw. aus dem Deponiekörper austretende Sickerwassermenge in Liter pro Jahr

Schwierig ist die Interpretation für die Emissionen von Elementen, wenn diese in den meisten Messungen unter der Nachweisgrenze liegen. Aus den Angaben, dass ein Stoff nicht gemessen wurde und der Angabe der Messgrenze lässt sich keine Annahme über die Konzentration im Wasser ableiten. Daher sollten für alle Elemente des Vektors genügend Messungen mit genügend tiefer Nachweisgrenze vorliegen, um die Konzentration des Elements bestimmen zu können. D.h. die verwendete Messmethode soll den real auftretenden Konzentrationen angepasst sein.

Werte aus Laborextraktionen von Deponiegut oder Lysimeterwerte sollen nicht verwendet werden, da diese die Situation im Feld nur ungenügend abbilden können.

3.4.4.2 Empirische Bestimmung der Gesamtgehalte im Deponiekörper

Für die Modellierung des Deponiekörpers sind idealerweise die Konzentrationen der Feststoffe im Deponiekörper bekannt, möglichst in Milligramm pro Kilogramm Trockensubstanz. Falls sich die Werte auf die feuchte Masse beziehen, muss dies in der Auswertung berücksichtigt werden können. Alle Arten von Informationen aus Feldmessungen können für die Modellierung ausgewertet werden. Dabei kann es sich um Einzelwerte, Zeitreihen, Werte mit oder ohne Konfidenzintervalle und auch Min-Max-Bereiche handeln. In die Auswertung eingehen sollten alle verfügbaren Werte, insbesondere alle Stoffe, die im Elementarvektor der Ecoinvent-Deponiemodelle vorhanden sind:

TOC, S, N, P, B, Cl, Br, F, I, Ag, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, V, Zn, Be, Sc, Sr, Ti, Tl, W, Si, Fe, Ca, Al, K, Mg, Na.

Zusätzlich von Interesse sind Messwerte für Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), anorganischer Kohlenstoff (TIC) und den Wassergehalt im Deponiegut.

Feststoffkonzentrationen in einzelnen gemessenen Anlieferungen von Deponiematerial (z. B. Betonabbruch, Mauerwerk, Feinfraktion Bauschutt-Aufbereitungsanlage, Aushub) können auch von Interesse sein. Wichtig ist dann jeweils eine möglichst genaue Bezeichnung des angelieferten Materials, wobei die Anlieferer und Herkunft anonymisiert werden können.

Daten zu den Ausmassen der Deponien sind für die Modellierung wertvoll und sollten wo möglich in der Datenerhebung gesammelt werden: Interessant sind die mittlere Endhöhe und die horizontale Ausdehnung des Deponiekörpers.

3.4.4.3 Daten zum Betrieb der Deponie

Für die Ökobilanzierung soll die typische Bauweise für eine Deponie Typ B festgestellt werden, um die Lasten für die Erstellung der Deponie zu berücksichtigen. Der Aufwand für den Betrieb, insbesondere der Dieserverbrauch für den Maschineneinsatz und Materialeinsatz für die Einlagerung, Umschichtung und Abdeckung der Abfälle, sowie die Erstellung von Deponiewegen und Lagerplätzen muss abgeklärt werden. Für beide Grössen kann davon ausgegangen werden, dass Daten verfügbar sind.

3.4.5 Vorhandene Daten

3.4.5.1 Sickerwasseranalysen von Deponien Typ B

Gemäss VVEA sind die Deponiebetreibenden verpflichtet, mindestens zweimal jährlich chemische Analysen von Sickerwasserproben durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden den Behörden zugestellt sowie schweizweit im «Deponie-Monitoring und Informationssystem DEMIS» aufgezeichnet. Die Anforderungen der Kantone betreffend der zu überprüfenden Parameter sind unterschiedlich. Die kantonalen Behörden definieren jeweils die Minimalanforderung für die Parameter, die untersucht werden müssen. Weitere Analysen sind den Deponiebetreibenden freigestellt. Im Rahmen der Studie von (Dagan, 2017) wurden insgesamt 455 Sickerwasseranalysen aus 17 Deponien Typ B in der Ostschweiz zusammengetragen. Diese liefert einen ersten Eindruck der Datenverfügbarkeit im Hinblick auf eine mögliche Verbesserung des Modells für Deponien Typ B. Tabelle 66 zeigt, welche der benötigten Parameter gemäss Kapitel 3.4.4.1 im Rahmen von Sickerwasseranalysen untersucht werden, sowie die Anzahl Deponien Typ B die einen bestimmten Parameter untersucht haben. Gewisse Parameter wie Sulfat (SO₄-S), Ammonium-Stockstoff (NH₄-N), Nitrat-Stickstoff (NO₃-N) und Chlor (Cl) in Sickerwasserproben werden von der Mehrheit der Deponien analysiert. Andere der gewünschten Parameter wie Phosphor (P) und organischer Kohlenstoff (TOC) werden nie bis sehr selten untersucht. Die Zusammenstellung zeigt, dass insgesamt im Informationssystem DEMIS ausreichend Daten vorhanden sind, die zur Verbesserung des Modells für Deponien Typ B genutzt werden könnten. Die Daten in DEMIS sind Eigentum der Deponiebetreibenden. Gemäss Abklärungen mit dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich kann der Zugang zum Informationssystem vom BAFU bewilligt werden (Schwarzenbach, 2019). Aufgrund der vorgenommenen Abklärungen gehen wir davon aus, dass diese Daten in anonymisierter Form für eine Forschungsarbeit zur Verfügung gestellt werden könnten.

Tabelle 66: Datenverfügbarkeit von Sickerwasseranalysen

Erforderliche Parameter / Elementvektor Ecoinvent	Datenverfügbarkeit	Anzahl Deponien mit Messungen (von 17 untersuchten Deponien)
TOC	wenige Messungen vorhanden	1
TIC	keine verfügbar	0
S	keine verfügbar	0
SO ₄ -S	viele Messungen vorhanden	12
S ²⁻ -S	wenige Messungen vorhanden	1

Erforderliche Parameter / Elementvektor Ecoinvent	Datenverfügbarkeit	Anzahl Deponien mit Messungen (von 17 untersuchten Deponien)
N	keine verfügbar	0
NH4-N	viele Messungen vorhanden	17
NO3-N	viele Messungen vorhanden	17
P	keine verfügbar	0
B	einige Messungen vorhanden	6
Cl	viele Messungen vorhanden	15
Br	einige Messungen vorhanden	4
F	einige Messungen vorhanden	6
I	keine verfügbar	0
Ag	wenige Messungen vorhanden	3
As	einige Messungen vorhanden	9
Ba	wenige Messungen vorhanden	1
Cd	viele Messungen vorhanden	10
Co	einige Messungen vorhanden	6
Cr	viele Messungen vorhanden	11
Cr VI	einige Messungen vorhanden	9
Cu	viele Messungen vorhanden	11
Hg	einige Messungen vorhanden	6
Mn	wenige Messungen vorhanden	1
Mo	wenige Messungen vorhanden	2
Ni	einige Messungen vorhanden	9
Pb	einige Messungen vorhanden	9
Sb	wenige Messungen vorhanden	5
Se	wenige Messungen vorhanden	1
Sn	wenige Messungen vorhanden	5
V	wenige Messungen vorhanden	1
Zn	einige Messungen vorhanden	9
Be	wenige Messungen vorhanden	1
Sc	keine verfügbar	0
Sr	wenige Messungen vorhanden	1
Ti	keine verfügbar	0
Tl	wenige Messungen vorhanden	1
W	keine verfügbar	0
Si	keine verfügbar	0
Fe	wenige Messungen vorhanden	1
Ca	viele Messungen vorhanden	10
Al	wenige Messungen vorhanden	4
K	viele Messungen vorhanden	10
Mg	viele Messungen vorhanden	10
Na	viele Messungen vorhanden	10

3.4.5.2 Daten zum Gesamtgehalt im Deponiekörper

Die Verfügbarkeit von Daten zur Zusammensetzung des Deponiekörpers wurden mit den Verantwortlichen der Deponien Chrüzlen in Egg, Oetwil (Hess, 2019),

Schwanental in Eglisau (Steiner, 2019) und Bruni in Pfungen (Fischlin, 2019) im Kanton Zürich abgeklärt. Es zeigte sich in allen Gesprächen, dass die elementare Zusammensetzung des Deponiekörpers nicht bekannt ist. Die Deponiebetreibenden können grobe Angaben zur Zusammensetzung der Deponie nach Abfalltyp respektive LVA-Codes machen. Für die meisten entgegengenommenen Abfälle werden Analysen verlangt. Die Analysen beschränken sich allerdings auf gewisse Leitparameter wie z. B. PAK bei Mischabbruch oder Schwermetalle bei Aushub. Grundsätzlich werden nur jene Parameter untersucht, für die es gemäss VVEA Grenzwerte gibt (Tabelle 67). In Bezug auf die erforderlichen Parameter, gemäss Kapitel 3.4.4.2, sind dies 11 Parameter von 43. Einige chemische Verbindungen (z. B. Kohlenwasserstoffe, PAK, PCB etc.) mit VVEA Grenzwert sind für das Deponiemodell nicht zwingend erforderlich. Diese können eventuell genutzt werden, falls entsprechende Ergebnisse aus Sickerwasseranalysen vorliegen. Obwohl nur für rund ein Viertel der erforderlichen Parameter Daten vorhanden sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Parameter mit VVEA Grenzwert jene mit der grössten Umweltrelevanz sind.

Eine Ermittlung der Zusammensetzung des Deponiekörpers durch Feldmessungen dürfte aufgrund dessen Heterogenität kaum realistisch sein. Für ein repräsentatives Resultat wären eine sehr hohe Anzahl von Proben respektive Bohrungen erforderlich. Die Umfrage unter den Deponiebetreibern hat gezeigt, dass keine Feldmessungen zur Zusammensetzung des Deponiekörpers vorhanden sind.

Tabelle 67: Vergleich erforderlichen Daten mit Grenzwerten VVEA für Deponien Typ B

Erforderliche Daten [mg/kg]	Vorhandene Grenzwerte VVEA, Deponie Typ B
Wassergehalt	
TOC	X
TIC	
S	
N	
P	
B	
Cl	
Br	
F	X
I	
Ag	X
As	X
Ba	
Cd	X
Co	
Cr	X
Cu	X
Hg	X
Mn	
Mo	
Ni	X
Pb	X
Sb	X

Erforderliche Daten [mg/kg]	Vorhandene Grenzwerte VVEA, Deponie Typ B
Se	
Sn	
V	
Zn	X
Be	
Sc	
Sr	
Ti	
Tl	
W	
Si	
Fe	
Ca	
Al	
K	
Mg	
Na	
O	
H	
Optionale Daten	Chrom VI
	Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe (LCKW)
	Polychlorierte Biphenyle PCB
	Aliphatische Kohlenwasserstoffe C ₅ -C ₁₀
	Aliphatische Kohlenwasserstoffe C ₁₀ -C ₄₀
	Monocyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
	Benzol
	Summe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und die Xylole (BTEX)
	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK
	Benzo(a)pyren
	Wasserlösliche Salze
	Ammoniak/Ammonium (Grenzwert Eluat)
	Nitrite (Grenzwert Eluat)
	DOC (Grenzwert Eluat)
	Cyanid (Grenzwert Eluat)

3.4.5.3 Modellierung des Deponiekörpers aus Deponiedaten

Zur Ermittlung des Gesamtgehalts im Deponiekörper müsste der Gehalt in jeder einzelnen Anlieferung seit der Eröffnung der Deponie mit dem jeweiligen Chargengewicht multipliziert und aufaddiert werden. Der Arbeitsaufwand für diese Auswertung würde überschlagsweise gerechnet bereits im Bereich eines Arbeitsjahres pro Deponie liegen. Eine Auswertung mit überschaubarem Aufwand wäre nur möglich, wenn die Daten bereits in elektronischer Form aufbereitet vorliegen würden. Gemäss der Umfrage bei den Deponien ist dies jedoch nicht der Fall. Zudem wäre eine solche Abschätzung des Gesamtgehalts mit einem Fehler behaftet, da für die angelieferten Abfälle jeweils nur gewisse Leitparameter, jedoch nicht alle Parameter mit Grenzwert

gemäss VVEA geprüft werden. Für die nicht geprüften Parameter sind die Konzentrationen nicht bekannt. Diese sind mit hoher Sicherheit sehr gering, jedoch nicht null. Für eine Modellierung des Deponiekörpers müssten allerdings realistische Werte angenommen werden können. Falls die Konzentrationen der nicht geprüften Parameter auf null gesetzt würden, wäre die Folge davon, dass der tatsächliche Gehalt in der Deponie unterschätzt würde. Für die aus den Daten abgeleiteten Transferkoeffizienten hingegen würde dies eine Überschätzung zur Folge haben (konservativer Ansatz).

Eine Abschätzung der elementaren Zusammensetzung des Deponiekörpers wäre auch über die durchschnittliche Zusammensetzung der verschiedenen eingelagerten Abfälle hinsichtlich der untersuchten Leitparameter möglich d.h. einerseits eine Reduktion des Elementvektors gemäss Ecoinvent-Modell auf die in der VVEA geregelten Parameter (TOC, Ag, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Zn). Andererseits würde durchschnittliche Zusammensetzung der Abfallarten aufgrund von einer grösseren Anzahl Laboranalysen ermittelt. Die so ermittelten Transferkoeffizienten wären allerdings mit Unsicherheiten behaftet, weil keine vollständige Auswertung der bei einer Deponie vorhandenen Laboranalysen vorgenommen werden kann. Es ist anzunehmen, dass die Resultate der Laboruntersuchungen stark variieren und demzufolge fraglich, ob ein Mittelwert, der auf einem Teil der Untersuchungen beruht, aussagekräftig ist.

3.4.5.4 Modellierung des Deponiekörpers aus Literaturdaten

Die Modellierung des Deponiekörpers kann aufgrund von vorhandenen Literaturdaten versucht werden. Der Zweck dieser Modellierung besteht darin, ein typisches chemisches Milieu einer Deponie Typ B abzubilden. Hierzu können auch Angaben aus ähnlichen Milieus herangezogen werden, z.B. Bauschuttdeponien, "clean fills" oder Deponien mit weitgehend mineralischen Abfällen. Die Suche nach Literaturdaten muss sich dabei nicht auf Schweizer Deponien beschränken.

Eine Suche nach vorhandenen Literaturdaten konnte nur sehr summarisch vollzogen werden. Bereits bei der summarischen Sichtung der vorhandenen Arbeiten zeigte sich, dass Deponien vom Typ B weniger akademische Beachtung geniessen als die problematischeren Deponietypen des Typs E, des Typs C oder Hausmülldeponien. Mehrere Arbeiten sind zu Deponien für Bau- und Rückbauabfälle z. B. in den USA oder in China erschienen (Melendez, 1996)(Flynn, 1998)(Xu et al., 2014). Wie vergleichbar die Verhältnisse in diesen Deponien mit den Deponien vom Typ B in der Schweiz sind, müsste noch geprüft werden. Für die Erstellung eines Deponiemodells für die Deponie vom Typ B müsste eine umfangreiche Suche nach geeigneten Literaturdaten eingeplant werden.

Bereits bei der Erarbeitung der Ecoinvent-Modelle für die Reststoff- und die Reaktordeponie wurden Daten aus der Literatur verwendet und keine eigenen Inventare aus Deponiebuchhaltungen erstellt. Dieses Vorgehen wird denn auch für die Erstellung eines Arbeitspunktemodells für Deponien Typ B bevorzugt.

3.5 Fazit

Daten zur Zusammensetzung des Sickerwassers sind relativ umfangreich und gut verfügbar. Die Emissionen könnten über die durchschnittlichen Niederschlagsmengen in ausreichender Qualität ermittelt werden.

Problematischer ist die Feststellung der Zusammensetzung des Deponiekörpers. Eine umfassende Analyse aller Laboranalysen zu angelieferten Abfällen pro Deponie ist kaum realistisch. Ebenso ist es nicht realistisch die Zusammensetzung einer Deponie mittels Feldmessungen zu ermitteln. Der Arbeitsaufwand respektive Kosten dafür wären viel zu hoch. Eine Erhebung müsste sich auf Literaturdaten abstützen. Aufgrund der erst summarisch erfolgten Sichtung der vorhandenen Literatur gehen wir davon aus, dass die Datenbasis für Deponien Typ B schmaler wäre als für Deponien Typ C und E. Entsprechend müssten Daten aus chemisch ähnliche Milieus für Approximationen genutzt werden.

Die Deponien variieren von der Zusammensetzung des Deponiekörpers und des Sickerwassers her stark. Diese Problematik stellt sich bei der Modellierung aller Deponietypen. Eine sinnvolle Strategie ist hier, möglichst viele Daten zusammenzutragen, um für jedes chemische Element gut abgesicherte, typische Mittelwerte zu eruieren, die zur Erstellung eines Deponiemodells genutzt werden können. Für einzelne chemische Elemente kann es schwierig sein, genügend Daten zu finden. Die Antwort auf solche Datenlücken in der Modellierung der bestehenden Deponiemodelle in Ecoinvent war, Daten aus ähnlichen Anlagen oder ähnlichen chemischen Milieus zur Datenbasis hinzuzunehmen. Das Ziel eines solchen Deponiemodells wäre das typisch zu erwartende Verhalten einer Deponie Typ B abzubilden. Dieses mittlere Verhalten kann für eine einzelne, bestimmte Deponie aber von der Realität abweichen. Für eine Anwendung in generischen Hintergrunddaten wie Ecoinvent und KBOB wäre es jedoch ausreichend.

Wie die Abklärungen ergeben haben, wäre die Erstellung eines Deponiemodells für Deponien Typ B möglich. Um zu den bestehenden Deponiemodellen in Ecoinvent vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wäre eine Modellierung mit dem Arbeitspunktmodell von Ecoinvent sinnvoll. Am effizientesten wäre eine Bearbeitung eines solchen Projekts durch Gabor Doka, der bereits über viel Erfahrung mit der Modellierung von Deponien für die Ökobilanz verfügt und die bestehenden Modelle erstellt hat.

4 Literatur

- ARP Schweiz (2019) *Bodenbeläge aus PVC*. Arbeitsgemeinschaft für das Recycling von PVC-Bodenbelägen, Aubrigstrasse 5, 8810 Horgen.
- ARV (Hrsg.) (2015) *Bauabfallaufbereitungsanlagen, Jahresbericht zu den Inspektionen 2014, Kanton Zürich*. Aushub-, Rückbau- und Recycling-Verband Schweiz.
- BAFU (Hrsg.) (Oktober 2017) *Deponieliste*. BAFU. Abgerufen von <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/.../deponieliste.../Deponieliste.pdf>
- BAFU (September 2018a) *Statistik der anderen kontrollpflichtigen Abfälle 2008-2017*. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (Hrsg.) (13. September 2018b) *Auf Deponien abgelagerte Abfälle 2001-2015, Indikator ID AB045*. Bundesamt für Statistik, Bern.
- S. Binzegger (12. November 2018) *Persönliche Mitteilung, DEBAG, Zürich*.
- R. Brogle (20. Oktober 2018) *Persönliche Mitteilung, Glasverbund Schweiz GVS*. Bundesrat *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA)* (2015).
- R. Carroz & K. Müller (2019) *Wieder-Weiter-Verwenden*. Schweizer Energiefachbuch.
- Cercle déchets ost (Hrsg.) (12. Juni 2018) *Faktenblatt BAU 7: Umgang mit Holzabfällen, Anhang 1*. KVVU-Ost – Konferenz der Vorsteher der Umweltämter der Ostschweiz/FL.
- M. Classen, H.-J. Althaus, S. Blaser, M. Tuchschnid, N. Jungbluth, G. Doka, ... W. Scharnhorst (2009) *Life Cycle Inventories of Metals*. In Final report ecoinvent data v2.1 (Bd. No 10). Dübendorf, CH: EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- J. Dagan (2017) *Ermittlung relevanter Messparameter für die Sickerwasserbeprobung von Typ B Deponien*. zhaw IUNR.
- DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG (Hrsg.) (27. August 2018) *UMWELT-PRODUKTDEKLARATION ROCKWOOL Steinwolle-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich*. IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V., Panoramastr. 1, 10178 Berlin.
- G. Doka (2009a) *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services Part I «General introduction, Waste material compositions, Municipal waste collection»*. St. Gallen: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- G. Doka (2009b) *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services Part II «Landfills – Underground deposits – Landfarming»*. In Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- G. Doka (2009c) *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services Part II «Waste incineration»*. In ecoinvent report No. 13. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- G. Doka (2009d) *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services, Part V «Building material disposal»*. In ecoinvent report No. 13. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- G. Doka (2017) *A model for waste-specific and climate-specific life cycle inventories*

- of open dumps and unsanitary landfilling of waste.* Doka Life Cycle Assessments, Zurich, Switzerland. Abgerufen von <http://www.doka.ch/publications.htm>
- Ecoinvent Centre (Hrsg.) (2010) *ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-25.* Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Abgerufen von www.ecoinvent.org
- European Waterproofing Association (EWA) (Hrsg.) (6. Februar 2019) *Environmental Product Declaration Flexible Bitumen Sheets For Roof Waterproofing.* IBU-, Institut Bauen und Umwelt e.V., Panoramastr.1, 10178 Berlin.
- U. Fischer (3. April 2019) *Daten KIBAG Ökobilanz 2018.* KIBAG RE AG, Moosackerstrasse 65, 8105 Regensdorf.
- Fischlin (3. April 2019) *Persönliche Mitteilung.*
- B. E. Flynn (1998) *Invisible threat: Odors and landfill gas from construction and demolition waste.* Waste Age, 29(1).
- R. Frischknecht (15. Juni 2015) *Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz.* Plattform «Ökobilanzdaten im Baubereich», KBOB, eco-bau, IPB, Bern.
- R. Frischknecht & S. Büsser Knöpfel (2013) *Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (Umwelt-Wissen 1330) (S. 256). Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Ökonomie und Umweltbeobachtung, Fachbereich Ökobilanzen.
- C. Germann (10. September 2018) *Persönliche Mitteilung, Schnider AG, Engelburg SG.*
- M. Grauwiler (1992) *Redoxpotential – einfacher Indikator für Zustand von Inertdeponien.* Abfall, Nr. 1/92, p.23.
- F. Guerra & B. Kast (28. September 2015) *Bauabfälle in der Schweiz - Hochbau Studie 2015.* BAFU.
- GVS (November 2016) *Produktspezifikation Flachglas.* GVS - Glas Verbund Schweiz AG, Industriestrasse 35, 6252 Dagmersellen.
- Hess (2. April 2019) *Persönliche Mitteilung.*
- D. Hiltbrunner (2017) *Korrektur KAR-Modell 2016.*
- C. Inderbitzin (2019) *Persönliche Mitteilung, Aushub- und Rückbauverband ARV.*
- KBOB (15. Dezember 2016) *KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016, Ökobilanzdaten im Baubereich.*
- KBOB / eco-bau / IPB (15. Dezember 2016) *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016* (KBOB-Empfehlung Nachhaltiges Bauen). Bern: Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, Fellerstrasse 21, 3003 Bern der öffentlichen Bauherren.
- M. Klingler & D. Savi (2018) *Entsorgung von Bauabfällen in Deponien.* Amt für Hochbauten, Fachstelle nachhaltiges Bauen, Lindenhofstrasse 21, 8021 Zürich.
- Köster Bauchemie AG (Hrsg.) (1. März 2016) *UMWELT-PRODUKTDEKLARATION Dach- und Dichtungsbahnen KÖSTER TPO 1.6 / 1.8 / 2.0 / 2.0 F.* IBU-, Institut Bauen und Umwelt e.V., Panoramastr.1, 10178 Berlin.
- B. A. Melendez (1996) *A study of leachate generated from construction and*

- demolition landfills. Thesis, Master of Engineering*,. University of Florida, Dept. of Environmental Engineering Sciences. Abgerufen von <http://archive.org/details/studyofleachateg00mele>
- C. Möckli (23. November 2018) *Anlagedaten Max Möckli Transporte / Kies- und Betonwerk*. Max Möckli Transporte/Kies- und Betonwerk, Freudenfelderweg, 8264 Eschenz.
- B. Notter & M. Schmied (2015) *Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-road-Sektors*. BAFU.
- B. Rickli (23. Oktober 2017) *Persönliche Mitteilung SORTAG*.
- Roofcollect (2019) *Website RoofCollect*. ROOFCOLLECT, Avenue de Cortenberg, 71 B-1000 Brussels. Abgerufen von <https://www.roofcollect.com>
- S. Rubli (2005a) *Controlling der Bauabfallentsorgung während des Rückbaus der Wohnsiedlung Brunnenhof*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (2005b) *Controlling und Güterflussanalyse der Bauabfallentsorgung während des Rückbaus der Wohnsiedlung Bernerstrasse*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (2005c) *Controlling und Güterflussanalyse der Bauabfallentsorgung während des Teilrückbaus des Schulhauses Falletschen*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (2017 2005d) *Controlling während der Rückbauarbeiten – Bauprojekte der Stadt Zürich*.
- S. Rubli (2006a) *Controlling der Bauabfallentsorgung während des Umbaus des Amtshauses Parkring*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (2006b) *Güterflussanalyse der Bauabfallentsorgung des VZ Werd*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (2013) *Ersatzneubau Wohnsiedlung Rautistrasse, Controlling während den Rückbauarbeiten und der Entsorgung*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (31. August 2014) *Modell zur Beschreibung der Entwicklung der Gipsflüsse in der Schweiz*. AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft.
- S. Rubli (2015) *Um- und Neubau Sportanlage Heuried, Controlling während den Rückbauarbeiten*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (2016a) *Entsorgungssituation von Dämmmaterialien in der Schweiz*. BAFU.
- S. Rubli (2016b) *KAR-Modell – Modellierung der Kies-, Rückbau- und Aushubmaterialflüsse: Modellerweiterung und Nachführung 2014*.
- S. Rubli (2017a) *Alterszentrum Trotte Ersatzneubau, Controlling während den Rückbauarbeiten und der Entsorgung, Schlussbericht*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (2017b) *Gesamtinstandsetzung Wohnsiedlung Paradies, Controlling während den Rückbauarbeiten und der Entsorgung*.
- S. Rubli (März 2017c) *Instandsetzung Amtshaus Helvetiaplatz, Controlling während den Rückbauarbeiten und der Entsorgung*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.
- S. Rubli (2018a) *VBZ Busgarage Hardau, Instandsetzung und Erweiterung, Controlling während den Rückbauarbeiten und der Entsorgung*. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.

- S. Rubli (28. September 2018b) *Persönliche Mitteilung*.
- V. Salvi (5. März 2019) *Persönliche Mitteilung*, V. Salvi AG, Zollikofen.
- R. Schneider (4. Oktober 2018) *Persönliche Mitteilung*, RESAG, Bern.
- R. Schöni (15. November 2018) *Persönliche Mitteilung*, Flückiger AG, Rothrist.
- M. Schröder & A. Pocha (2015) *Abbrucharbeiten, Grundlagen, Planung, Durchführung* (3., aktualisierte und erweiterte Auflag.). Köln: Rudolf Müller GmbH.
- S. Schwarzenbach (28. Januar 2019) *Persönliche Mitteilung*.
- SIA (Hrsg.) (2013) *EN 15804+A1: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA Merkblatt 2032: Graue Energie von Gebäuden* (1. Januar 2010)
- Sika (2012) *Samafil® TG 63-25 - Recycling Schutzbahn TPO*. Sika Schweiz AG Roofing Industriestrasse 26 6060 Sarnen.
- Steiner (2. April 2019) *Persönliche Mitteilung*.
- P. Stolz & R. Frischknecht (3. Oktober 2016) *Life Cycle Assessment of Photovoltaic Module Recycling*. Uster: Swiss Federal Office of Energy SFOE.
- Strabag (Hrsg.) (13. Dezember 2016) *Annahmekriterien Gipsrecyclinganlage Deisslingen*. Strabag Umwelttechnik GmbH, Bereich Südwest, Vogelsanger Weg 111, 40470 Düsseldorf.
- swisspor (Hrsg.) (2019) *Produkteblatt EPS Recycling Säcke*. swisspor AG, Bahnhofstrasse 50, CH-6312 Steinhausen.
- R. Taverna (4. Oktober 2018) *Entsorgungswege von Altholz in der Schweiz*.
- M. Tonner (7. April 2019) *Persönliche Mitteilung*, InnoRecycling AG.
- L. Tschümperlin & R. Frischknecht (November 2016) *Ökobilanz ausgewählter Betonsorten*. Zürich: Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Nachhaltiges Bauen Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21 8021 Zürich.
- UVEK Datenbestand* (2018)
- Vetroswiss (24. September 2018) *Jahresbericht 2017 betreffend Erhebung, Verwaltung und Verwendung der vorgezogenen Entsorgungsgebühr (VEG) für Getränkeverpackungen aus Glas*. ATAG Wirtschaftsorganisationen AG, Bern.
- Q. Xu & T. Townsend (2014) *Factors affecting temporal H₂S emission at construction and demolition (C&D) debris landfills*. Chemosphere, (96), 105–111.

A ANHANG

A.1 Daten aus den Controllingberichten der Stadt Zürich

Die Stadt Zürich beauftragt für Ihre Grossbaustellen jeweils ein Controlling der Entsorgung. Die Berichte dazu sind die folgenden:

- Helvetiaplatz (Rubli, 2017c)
- Parkring (Rubli, 2006a)
- Trotte (Rubli, 2017a)
- Hardau (Rubli, 2018a)
- Falletschen (Rubli, 2005c)
- Heuried (Rubli, 2015)
- Werd (Rubli, 2006b)
- Brunnenhof (Rubli, 2005a)
- Paradies (Rubli, 2017b)
- Rautistrasse (Rubli, 2013)
- Bernerstrasse (Rubli, 2005b)

Diese Berichte enthalten detaillierte Daten zu den entsorgten Abfällen nach Baustoffgruppen. Zusätzlich zu den entsorgten Mengen wurden die Transportdistanzen und Anzahl Fahrten erfasst. In den folgenden Tabellen sind die Daten aus den Berichten für die drei genannten Kenngrössen zusammengefasst.

Tabelle 68: Entsorgte Tonnagen aus Controlling Rückbauten Stadt Zürich

Fraktion	Helvetiaplatz	Parkring	Trotte	Hardau	Falletschen	Heuried	Werd	Brunnenhof	Paradies	Rautistrasse	Bernerstrasse	Gesamt
Betonabbruch	668	488	3269	4346	6301	9891	983	3733	171	1061	13923	44834
Mischabbruch	585	399	1776	1634	1187	1507	1110	3402	992	2712	14493	29797
Gips	211						497	206	5			919
Ausbauasphalt	34		119	100	416	21.1				5	168	863.1
Inertstoffe	358	33		346	19				137		1374	2267
Altmetalle	113	18	60	333	200	353	689	67	77	51	163	2124
Bausperrgut	247	49	4	386	15	112		65	281	121	201	1481
Brennbare Materialien	2.8	46	21			8.8	197		91			366.6
Altöl	0.01											0.01
Aushub	21		142		5577				143		51115	107196

Fraktion	Helvetia- platz	Parking	Trotte	Hardau	Fallet- schen	Heuried	Werd	Brunnen- hof	Paradies	Rauti- strasse	Berner- strasse	Gesamt
Asbesthaltige / PCB-haltige Materialien		2.3		99	1		86	3	5		31	227
Altholz		36	107	64	89	41	106	348	82	666	294	1833
Wurzelstöcke / Gartenabraum					121				1		182	304
Sand						21.6						21.6
Holzfenster (inkl. Glas)									60			60
Zementfaserplatten									7			7
Ziegel										35		35
Schlacke										67		67
Dachkies											357	357

Tabelle 69: Transportdistanzen [km] aus Controlling Rückbauten Stadt Zürich

Fraktion	Helvetia- platz	Parking	Trotte	Hardau	Fallet- schen	Heuried	Werd	Brunnen- hof	Paradies	Rauti- strasse	Berner- strasse	Gesamt
Anteil Hinfahrt	60%	100%	60%	60%	100%	50%	50%	100%	60%	60%	100%	
Betonabbruch	472	531	2722	2808	5938	5620	1421	1367	505	334	4900	26618
Mischabbruch	825	902	2031	1014	1648	333	7413	6416	2118	1785	9027	33512
Gips	935						6075	588	5			7603
Ausbauasphalt	26		138	135	825	21				9	91	1245
Inertstoffe	104	336		459	31				310		13482	14722
Altmetalle	483	21	26	252	1043	526	9062	53	384	129	370	12349
Bausperrgut	1971	218	23	918	125	122		41	1004	204	781	5407
Brennbare Materialien	36	151	297			191	843		385			1903
Altöl	14											14
Aushub	3.6		308		107069				214		59043	166638
Asbesthaltige / PCB-haltige Materialien		84		180	22		1398	177	52		189	2102
Altholz		96	170	216	735	134	1318	449	605	629	294	4646
Wurzelstöcke / Gartenabraum					527				32		119	678
Sand						3						3
Holzfenster (inkl. Glas)									447			447
Zementfaserplatten									36			36
Ziegel										26		26
Schlacke										185		185
Dachkies											245	245

Tabelle 70: Anzahl Fahrten aus Controlling Rückbauten Stadt Zürich

Bauprojekt	Helvetia- platz	Parkring	Trotte	Hardau	Fallet- schen	Heuried	Werd	Brunnen- hof	Paradies	Rauti- strasse	Berner- strasse	Gesamt
Betonabbruch	76	19	174	216	322	487	86	159	21	44	700	2304
Mischabbruch	76	25	96	78	68	83	77	212	97	210	1104	2126
Gips	20						45	14	1			80
Ausbauasphalt	4		6	5	23	1				1	13	53
Inertstoffe	58	5		17	1				14		218	313
Altmetalle	40	4	12	14	22	42	250	7	45	15	23	474
Bausperrgut	48	9	1	34	3	9		9	105	24	33	275
Brennbare Materialien	13	9	16			12	124		40			214
Altöl	1											1
Aushub	2		9		3098				9		2701	5819
Asbesthaltige / PCB-haltige Ma- terialien		1		5	1		38	3	2		3	53
Altholz		7	15	8	17	8	36	34	39	74	42	280
Wurzelstöcke / Gartenabraum					12				2		17	31
Sand						1						1
Holzfenster (inkl. Glas)									13			13
Zementfaserplatten									5			5
Ziegel										3		3
Schlacke										10		10
Dachkies											35	35

A.2 Zuordnung der Prozessketten zu den Baustoffen

Die Tabelle 71 führt alle Baustoffe der KBOB-Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich (KBOB, 2016) auf. Zudem wird in der letzten Spalte angegeben, welche Prozesskette für die Ökobilanz der Entsorgung dieses Baustoffs verwendet werden kann. Die Bezeichnung «Bauteile» verwenden wir, falls es sich um ein Bauteil handelt, das gemäss dem Vorgehen bilanziert werden muss, das in Tabelle 14 beschrieben ist. Wenn ein Baustoff oder Bauteil üblicherweise nicht in zivilisatorisch relevanter Zukunft entsorgt wird, verwenden wir die Bezeichnung «keine Entsorgung». Wenn sich die Ökobilanz der Entsorgung für einen Baustoff voraussichtlich stark unterscheidet vom Mittelwert oder dem Beispiel, das wir in dieser Arbeit bilanziert haben, geben wir «Spezifische Bilanz nötig für KVA», «Spezifische Bilanz nötig für Deponie Typ E» an. Wenn sich die ganze Prozesskette der Entsorgung von den bilanzierten unterscheidet, verwenden wir «Spezifische Bilanz nötig» als Bemerkung.

Tabelle 71: Baustoffe der KBOB-Liste mit Zuordnung der anwendbaren Prozesskette

00	Vorbereitungsarbeiten	Anwendbare Prozesskette
00.001	Baugrubensicherung, Bohrpfahlwand, gespriesst	Bauteile
00.002	Baugrubensicherung, Bohrpfahlwand, unverankert	Bauteile
00.003	Baugrubensicherung, Bohrpfahlwand, verankert	Bauteile
00.004	Baugrubensicherung, Nagelwand	Bauteile
00.005	Baugrubensicherung, Rühlwand, auskragend	Bauteile
00.006	Baugrubensicherung, Rühlwand, gespriesst	Bauteile
00.007	Baugrubensicherung, Rühlwand, verankert	Bauteile
00.008	Baugrubensicherung, Schlitzwand, 400 mm	Bauteile
00.009	Baugrubensicherung, Schlitzwand, 800 mm	Bauteile
00.010	Baugrubensicherung, Spundwand, auskragend	Bauteile
00.011	Baugrubensicherung, Spundwand, gespriesst	Bauteile
00.012	Baugrubensicherung, Spundwand, verankert	Bauteile
00.013	Tiefgründung, Mikrobohrpfahl	keine Entsorgung
00.014	Tiefgründung, Ortbetonbohrpfahl, 700 mm	keine Entsorgung
00.015	Tiefgründung, Ortbetonbohrpfahl, 900 mm	keine Entsorgung
00.016	Tiefgründung, Ortbetonbohrpfahl, 1200 mm	keine Entsorgung
00.017	Tiefgründung, Ortbetonverdrängungspfahl 560/480 mm	keine Entsorgung
00.018	Tiefgründung, Ortbetonverdrängungspfahl 660/580 mm	keine Entsorgung
00.019	Tiefgründung, Rüttelstopfsäule	keine Entsorgung
00.020	Tiefgründung, Vorgefertigter Betonpfahl	keine Entsorgung
00.021	Wasserhaltung, Pumphöhe 2.5 m	keine Entsorgung
00.022	Wasserhaltung, Pumphöhe 5 m	keine Entsorgung
00.023	Wasserhaltung, Pumphöhe 7.5 m	keine Entsorgung
00.024	Wasserhaltung, Pumphöhe 10 m	keine Entsorgung
01	Beton	Anwendbare Prozesskette
01.001	Magerbeton (ohne Bewehrung)	Beton
01.002	Hochbaubeton (ohne Bewehrung)	Beton
01.003	Tiefbaubeton (ohne Bewehrung)	Beton

01.004	Bohrpfahlbeton (ohne Bewehrung)	Beton
01.041	Betonfertigteile, hochfester Beton, ab Werk	Beton
01.042	Betonfertigteile, Normalbeton, ab Werk	Beton
01.043	Hanfbeton	Spezifische Bilanz nötig
01.043.01	Hanfbeton, ARBIO	Spezifische Bilanz nötig
02	Mauersteine	Anwendbare Prozesskette
02.001	Backstein	undifferenzierte mineralische Baustoffe
02.002	Kalksandstein	undifferenzierte mineralische Baustoffe
02.002.01	Kalksandstein, FBB	undifferenzierte mineralische Baustoffe
02.003	Leichtlehmstein	Organisch-mineralische Verbundmaterialien
02.004	Leichtzementstein, Blähton	undifferenzierte mineralische Baustoffe
02.005	Leichtzementstein, Naturbims	undifferenzierte mineralische Baustoffe
02.006	Porenbetonstein	undifferenzierte mineralische Baustoffe
02.007	Zementstein	undifferenzierte mineralische Baustoffe
03	Andere Massivbaustoffe	Anwendbare Prozesskette
03.001	Betonziegel	undifferenzierte mineralische Baustoffe
03.002	Faserzement-Dachschindel	Faserzement
03.003	Faserzementplatte gross	Faserzement
03.004	Faserzement-Wellplatte	Faserzement
03.005	Flachglas beschichtet	Flachglas
03.006	Flachglas unbeschichtet	Flachglas
03.007	Gipsfaserplatte	Spezifische Bilanz nötig für KVA
03.008	Gipskartonplatte	Spezifische Bilanz nötig für KVA
03.016	Gips-Wandbauplatte / Vollgipsplatte	Spezifische Bilanz nötig für KVA
03.009	Hartsandsteinplatte	undifferenzierte mineralische Baustoffe
03.017	Kalksteinplatte	undifferenzierte mineralische Baustoffe
03.010	Keramik-/Steinzeugplatte	undifferenzierte mineralische Baustoffe
03.011	Kies gebrochen	Kies, Sand
03.012	Rundkies	Kies, Sand
03.013	Sand	Kies, Sand
03.014	Sanitärkeramik	undifferenzierte mineralische Baustoffe
03.020	Stampflehm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
03.015	Tonziegel	Ziegel
04	Mörtel und Putze	Anwendbare Prozesskette
04.008	Baukleber/Einbettmörtel mineralisch	Mörtel, Putze
04.010	Baukleber/Einbettmörtel mineralisch Leichtzuschlag	Mörtel, Putze
04.002	Baukleber/Einbettmörtel organisch	Mörtel, Putze

04.017	Gips-Kalk-Putz	Mörtel, Putze
04.001	Gips-/Weissputz	Mörtel, Putze
04.003	Kunststoffputz (Dispensionsputz)	Mörtel, Putze
04.013	Kalk-Zement/Zement-Kalk-Putz	Mörtel, Putze
04.004	Lehmputz	Mörtel, Putze
04.015	Leichtputz mineralisch	Mörtel, Putze
04.011	Silikatputz (Dispersionssilikatputz)	Mörtel, Putze
04.012	Silikonharzputz	Mörtel, Putze
04.016	Sumpfkalkputz	Mörtel, Putze
04.005	Unterlagsboden Anhydrit, 60 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
04.006	Unterlagsboden Zement, 85 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
04.007	Wärmedämmputz EPS	Mörtel, Putze
04.014	Weisszementputz	Mörtel, Putze
04.009	Zementputz	Mörtel, Putze
05	Fenster, Sonnenschutz, Fassadenverkleidungen	Anwendbare Prozesskette
05.008	Fassade, Pfosten-Riegel, Alu/Glas	Bauteile
05.022	Fassadenplatte, Aluverbund, 4 mm	Bauteile
05.023	Fassadenplatte, Hochdrucklaminatplatte (HPL), 8.1 mm	Spezifische Bilanz nötig
05.025	Fassadenplatte, Kalkstein, 30 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
05.024	Fassadenplatte, Kunststoff glasfaserverstärkt (GFK), 1.6 mm	Spezifische Bilanz nötig
05.004	Fensterrahmen Aluminium	Bauteile
05.004.01	Fensterrahmen Aluminium, WICLINE 75evo	Bauteile
05.005	Fensterrahmen Holz	Bauteile
05.006	Fensterrahmen Holz-Aluminium	Bauteile
05.007	Fensterrahmen Kunststoff/PVC	Bauteile
05.001	Isolierverglasung 2-fach, Ug-Wert 1.1 W/m ² K, Dicke 24 mm	Bauteile
05.009	Isolierverglasung 2-fach, Ug-Wert 1.1 W/m ² K, Dicke 18 mm	Bauteile
05.010	Isolierverglasung 2-fach, ESG, Ug-Wert 1.1 W/m ² K	Bauteile
05.002	Isolierverglasung 2-fach, VSG, Ug-Wert 1.1 W/m ² K	Bauteile
05.011	Isolierverglasung 2-fach, ESG/VSG, Ug-Wert 1.1 W/m ² K	Bauteile
05.003	Isolierverglasung 3-fach, Ug-Wert 0.5 W/m ² K, Dicke 36 mm	Bauteile
05.012	Isolierverglasung 3-fach, Ug-Wert 0.6 W/m ² K, Dicke 40 mm	Bauteile
05.013	Isolierverglasung 3-fach, ESG/ESG, Ug-Wert 0.6 W/m ² K	Bauteile
05.014	Isolierverglasung 3-fach, ESG/ESG/ESG, Ug-Wert 0.6 W/m ² K	Bauteile
05.015	Isolierverglasung 3-fach, VSG, Ug-Wert 0.6 W/m ² K	Bauteile

05.016	Isolierverglasung 3-fach, ESG/VSG, Ug-Wert 0.6 W/m ² K	Bauteile
05.020	Putzträgerplatte kunstharzgebunden 13 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
05.021	Putzträgerplatte mineralisch gebunden 12.5 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
05.018	Sonnenschutz, Ausstellstoren motorisiert	Bauteile
05.017	Sonnenschutz, Lamellenstoren motorisiert	Bauteile
05.019	Sonnenschutz, Rollladen motorisiert	Bauteile
06	Metallbaustoffe	Anwendbare Prozesskette
06.001	Aluminiumblech, blank	Nichteisenmetalle
06.002	Aluminiumprofil, blank	Nichteisenmetalle
06.002.01	Aluminiumprofil, blank, 80% Recyclinganteil, WICONA	Nichteisenmetalle
06.003	Armierungsstahl	Armierungsstahl
06.014	Blei	Nichteisenmetalle
06.004	Chromnickelstahlblech 18/8 blank	Stahl
06.005	Chromnickelstahlblech 18/8 verzinkt	Stahl
06.006	Chromstahlblech blank	Stahl
06.007	Chromstahlblech verzinkt	Stahl
06.008	Kupferblech, blank	Nichteisenmetalle
06.009	Messing-/Baubronzeblech	Nichteisenmetalle
06.010	Stahlblech, blank	Stahl
06.011	Stahlblech, verzinkt	Stahl
06.012	Stahlprofil, blank	Stahl
06.013	Titanzinkblech	Nichteisenmetalle
07	Holz und Holzwerkstoffe	Anwendbare Prozesskette
07.001	3-Schicht Massivholzplatte, PVAc-gebunden	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.003	Brettschichtholz, MF-gebunden, Feuchtbereich	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.003.01	Brettschichtholz, MF-gebunden, Feuchtbereich, Produktion Schweiz	Holz und Holzwerkstoffe
07.002	Brettschichtholz, UF-gebunden, Trockenbereich	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.002.01	Brettschichtholz, UF-gebunden, Trockenbereich, Produktion Schweiz	Holz und Holzwerkstoffe
07.004	Hartfaserplatte	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.005	Holzwohle-Leichtbauplatte, zementgebunden	organisch-mineralische Verbundmaterialien
07.008	Massivholz Buche / Eiche, kammergetrocknet, gehobelt	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.008.01	Massivholz Buche / Eiche, kammergetrocknet, gehobelt, Produktion Schweiz	Holz und Holzwerkstoffe
07.007	Massivholz Buche / Eiche, kammergetrocknet, rau	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.007.01	Massivholz Buche / Eiche, kammergetrocknet, rau, Produktion Schweiz	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.006	Massivholz Buche / Eiche, luftgetrocknet, rau	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.006.01	Massivholz Buche / Eiche, luftgetrocknet, rau, Produktion Schweiz	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.011	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, kammergetr., gehobelt	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz

07.011.01	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, kammergetr., gehobelt, Produktion Schweiz	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.011.02	Massivholz Fichte / Tanne, kammergetr., Vollholzhause holzpur	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.010	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetr., gehobelt	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.010.01	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetr., gehobelt, Produktion Schweiz	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.009	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetrocknet, rau	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.009.01	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetrocknet, rau, Produktion Schweiz	Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
07.012	Mitteldichte Faserplatte (MDF), UF-gebunden	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.013	OSB Platte, PF-gebunden, Feuchtbereich	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.015	Spanplatte, PF-gebunden, Feuchtbereich	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.016	Spanplatte, UF-gebunden, beschichtet, Trockenbereich	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.014	Spanplatte, UF-gebunden, Trockenbereich	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.018	Sperrholz/Multiplex, PF-gebunden, Feuchtbereich	Spezifische Bilanz nötig für KVA
07.017	Sperrholz/Multiplex, UF-gebunden, Trockenbereich	Spezifische Bilanz nötig für KVA
08	Klebstoffe und Fugendichtungsmassen	Anwendbare Prozesskette
08.001	2-Komponenten Klebstoff	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche
08.002	Heissbitumen	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche
08.003	Kautschukdichtungsmasse	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche
08.004	Polysulfiddichtungsmasse	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche
08.005	Silicon-Fugenmasse	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche
09	Dichtungsbahnen und Schutzfolien	Anwendbare Prozesskette
09.001	Dampfbremse bituminös	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.002	Dampfbremse Polyethylen (PE)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003	Dichtungsbahn bituminös	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.01	Bituminöse Dichtungsbahn, swissporBIKUTOP EP4	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.02	Bituminöse Dichtungsbahn, 50% Recyclinganteil, swissporBIKUTOP ECO EP4	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.03	Bituminöse Dichtungsbahn, swissporBIKUTOP EGV3	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.04	Bituminöse Dichtungsbahn, 50% Recyclinganteil, swissporBIKUTOP ECO EGV3	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.05	Bituminöse Dichtungsbahn, swissporBIKUTOP EGV3.5	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.06	Bituminöse Dichtungsbahn, 50% Recyclinganteil, swissporBIKUTOP ECO EGV3.5	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.07	Bituminöse Dichtungsbahn, swissporBIKUTOP EP5	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.08	Bituminöse Dichtungsbahn, 50% Recyclinganteil, swissporBIKUTOP ECO EP5	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.09	Bituminöse Dichtungsbahn, swissporBIKUTOP LL Vario	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.003.10	Bituminöse Dichtungsbahn, 50% Recyclinganteil, swissporBIKUTOP ECO LL Vario	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.004	Dichtungsbahn Gummi (EPDM)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.005	Dichtungsbahn Polyolefin (FPO)	Spezifische Bilanz nötig für KVA

09.006	Kraftpapier	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.007	Polyethylenfolie (PE)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
09.008	Polyethylenvlies (PE)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10	Wärmedämmstoffe	Anwendbare Prozesskette
10.014	Aerogel-Vlies	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.012	Blähperlite	undifferenzierte mineralische Baustoffe
10.011	Blähvermiculit	undifferenzierte mineralische Baustoffe
10.016	Flachfasern	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.016.01	Flachfasern, MAGRIPOL, Premium	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.017	Flachfasern, feuerfest	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.017.01	Flachfasern, feuerfest, MAGRIPOL, Premium+	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.001	Glaswolle	Mineralwolle und Aerogel-Vlies
10.001.01	Glaswolle, Isover	Mineralwolle und Aerogel-Vlies
10.002	Korkplatte	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.003	Phenolharz (PF)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.004	Polystyrol expandiert (EPS)	organische Dämmstoffe
10.005	Polystyrol extrudiert (XPS)	organische Dämmstoffe
10.006	Polyurethan (PUR/PIR)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.007	Schaumglas	undifferenzierte mineralische Baustoffe
10.013	Schaumglasschotter	undifferenzierte mineralische Baustoffe
10.013.01	Schaumglasschotter, Misapor	undifferenzierte mineralische Baustoffe
10.008	Steinwolle	Mineralwolle und Aerogel-Vlies
10.008.01	Steinwolle, Flumroc	Mineralwolle und Aerogel-Vlies
10.015	Strohballenwand	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.009	Weichfaserplatte	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.009.01	Weichfaserplatte, Pavatex	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.010	Zellulosefasern	Spezifische Bilanz nötig für KVA
10.010.01	Zellulosefasern, Isofloc	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11	Bodenbeläge	Anwendbare Prozesskette
11.001	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz), 2.25 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.002	2K-Fliessbelag Wohnen/Verwaltung (Epoxidharz, PU), 2 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.003	Gummigranulat versiegelt, 7.5 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.004	Gussasphalt, 27.5 mm	Spezifische Bilanz nötig für Deponie Typ E
11.005	Hartbeton einschichtig, 27.5 mm	Beton
11.006	Hartbeton zweischichtig, 35 mm	Beton
11.007	Kautschuk, 2 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.008	Keramik-/Steinzeugplatte, 9 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
11.009	Kork Fertigparkett, 10.5 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.010	Kork PVC-beschichtet, 3.2 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.011	Korkparkett geölt/versiegelt, 5.3 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.012	Kunststeinplatte zementgebunden, 10 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe

11.013	Laminat, 8.5 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.014	Linoleum, 2.5 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.015	Natursteinplatte geschliffen, 15 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
11.015.01	Natursteinplatte geschliffen, Europa, 15 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
11.015.02	Natursteinplatte geschliffen, Schweiz, 15 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
11.015.03	Natursteinplatte geschliffen, Übersee, 15 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
11.016	Natursteinplatte geschnitten, 15 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
11.017	Natursteinplatte poliert, 15 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
11.018	Parkett 2-Schicht werkversiegelt, 11 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.019	Parkett 3-Schicht werkversiegelt, 15 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.020	Parkett Mosaik werkversiegelt, 8 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.021	PVC homogen, 2 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.022	Steinholz versiegelt, 16.5 mm	Spezifische Bilanz nötig
11.023	Synthetische thermoplastische Beläge (TPO), 2 mm	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.024	Teppich Kunstfaser getuftet	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.025	Teppich Nadelfilz	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.026	Teppich Naturfaser	Spezifische Bilanz nötig für KVA
11.027	Terrazzo versiegelt, 40 mm	undifferenzierte mineralische Baustoffe
12	Türen	Anwendbare Prozesskette
12.001	Aussentüre, Holz, aluminiumbeplankt	Bauteile
12.002	Aussentüre, Holz, Glaseinsatz	Bauteile
12.003	Innentüre, Holz	Bauteile
12.004	Innentüre, Holz, Glaseinsatz	Bauteile
13	Rohre	Anwendbare Prozesskette
13.001	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
13.005	Gusseisen	Stahl
13.002	Polyethylen (PE)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
13.003	Polypropylen (PP)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
13.003.01	Polypropylen (PP), rezykliert, Rehau	Spezifische Bilanz nötig für KVA
13.004	Polyvinylchlorid (PVC)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
14	Anstrichstoffe, Beschichtungen	Anwendbare Prozesskette
14.002	Anstrich, lösemittelverdünnt, 2 Anstriche	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche
14.001	Anstrich, wasserverdünnt, 2 Anstriche	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche
14.003	Bitumenemulsion, 1 Anstrich	Kleb-, Dichtstoffe, Anstriche
14.004	Emaillieren, Metall	keine Entsorgung
14.005	Pulverbeschichten, Aluminium	keine Entsorgung
14.006	Pulverbeschichten, Stahl	keine Entsorgung
14.007	Verchromen, Stahl	keine Entsorgung
14.008	Verzinken, Stahl	keine Entsorgung
15	Kunststoffe	Anwendbare Prozesskette
15.001	Plexiglas (PMMA, Acrylglas)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
15.002	Polyamid (PA) glasfaserverstärkt	Spezifische Bilanz nötig für KVA

15.003	Polycarbonat (PC)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
15.004	Polyester (UP) glasfaserverstärkt	Spezifische Bilanz nötig für KVA
15.005	Polystyrol (PS)	Spezifische Bilanz nötig für KVA
21	Kücheneinbauten und -möbel	Anwendbare Prozesskette
21.001	Abfalltrennsystem	Bauteile
21.002	Arbeitsplatte Chromstahl, high-end	Stahl
21.003	Arbeitsplatte Chromstahl, Standard	Bauteile
21.004	Arbeitsplatte Kompositwerkstoff (auf Aluminiumhydroxidbasis)	Spezifische Bilanz nötig
21.005	Arbeitsplatte kunstharzbeschichtet	Spezifische Bilanz nötig für KVA
21.006	Arbeitsplatte Massivholz	Spezifische Bilanz nötig für KVA
21.007	Arbeitsplatte Naturstein	undifferenzierte mineralische Baustoffe
21.008	Dampfabzug	Spezifische Bilanz nötig
21.009	Küche, Massivholz, 16-teilig	Bauteile
21.010	Küche, Metall, 16-teilig	Bauteile
21.011	Küche, Spanplatte, 16-teilig	Bauteile
21.012	Spüle Chromstahl	Bauteile
21.013	Spüle Kompositwerkstoff (auf Gesteinsmehlbasis)	Spezifische Bilanz nötig

A.3 Diagramme der Prozessketten

Im Folgenden werden alle Prozessketten graphisch abgebildet. Es handelt sich dabei um dieselben Abbildungen wie im Kapitel 2.7. Sie werden hier als Übersicht für die praktische Verwendung erneut wiedergegeben.

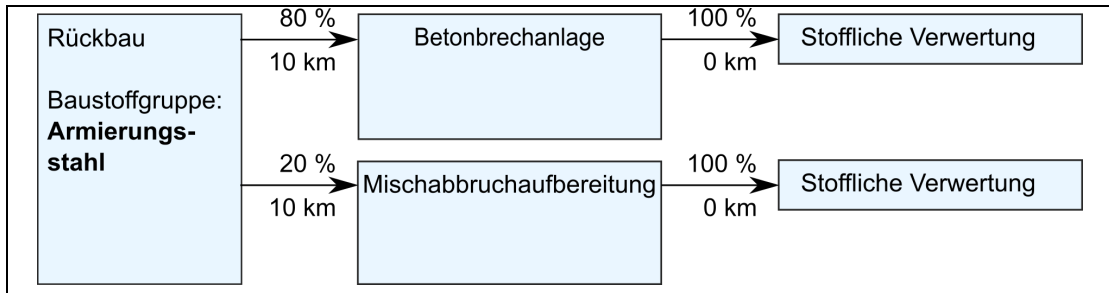


Abbildung 40: Entsorgungswege Armierungsstahl

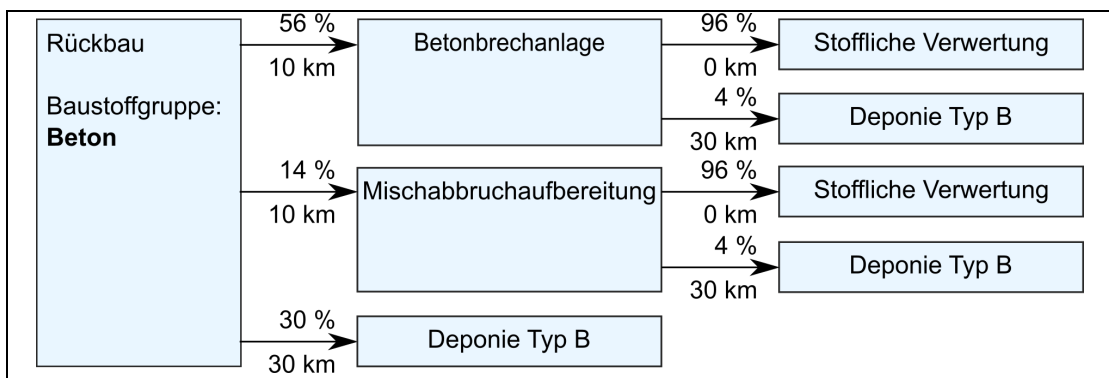


Abbildung 41: Entsorgungswege Beton

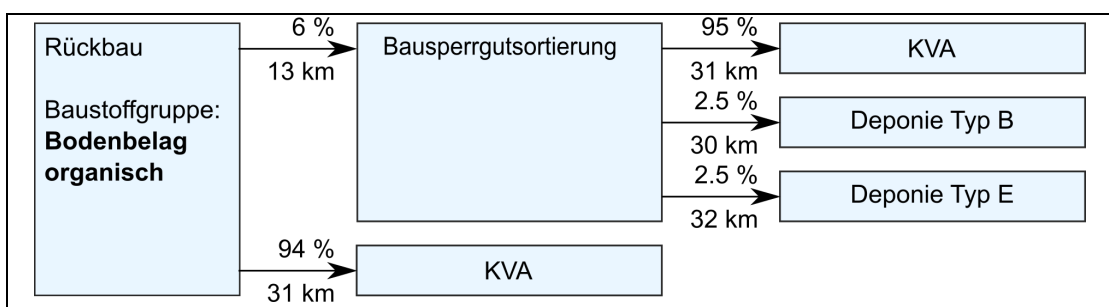


Abbildung 42: Entsorgungsweg für organische Bodenbeläge

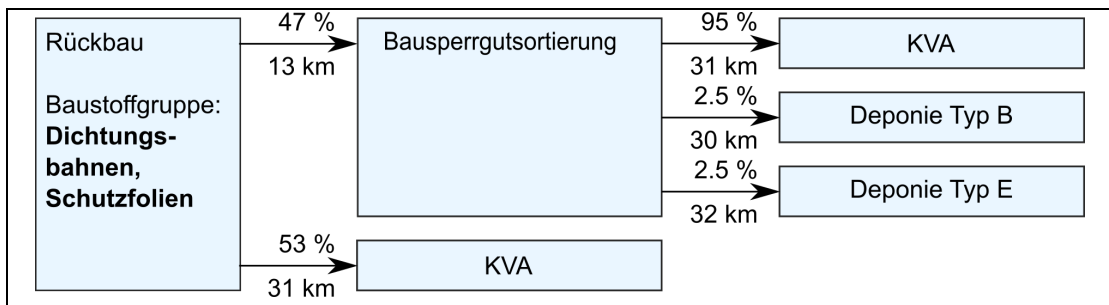


Abbildung 43: Entsorgungsweg Dichtungsbahnen und Schutzfolien

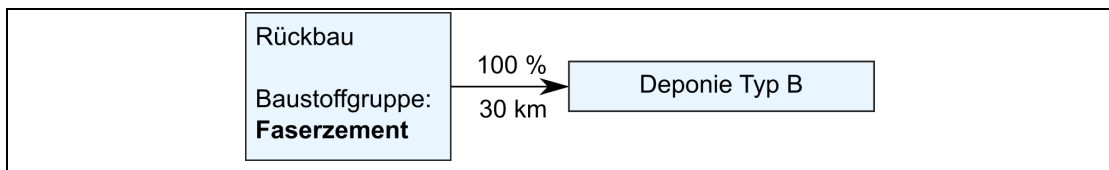


Abbildung 44: Entsorgungsweg für Faserzement

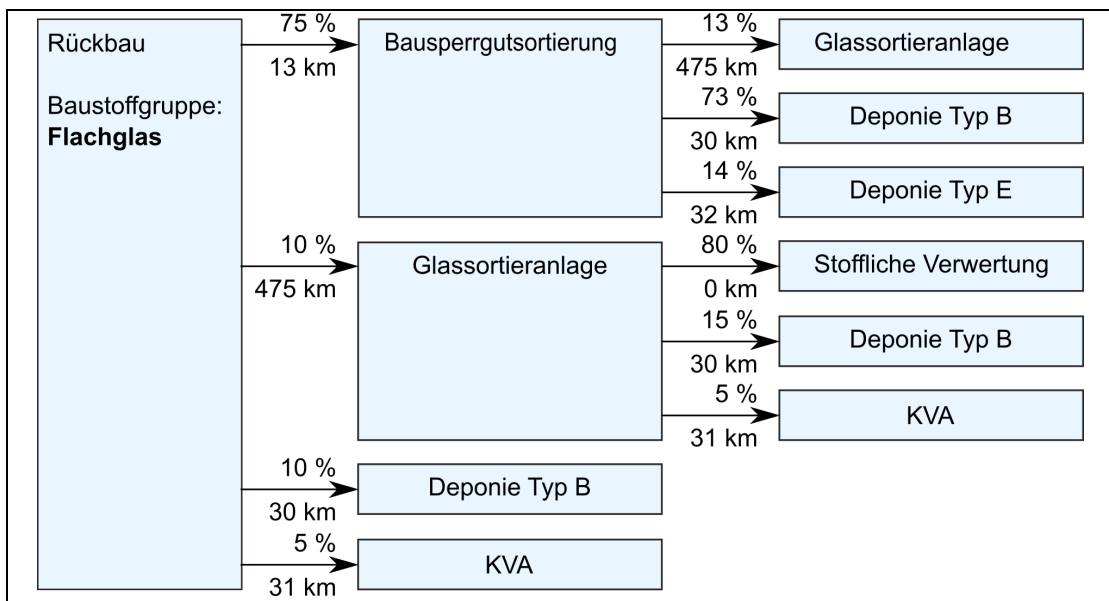


Abbildung 45: Entsorgungsweg für Flachglas

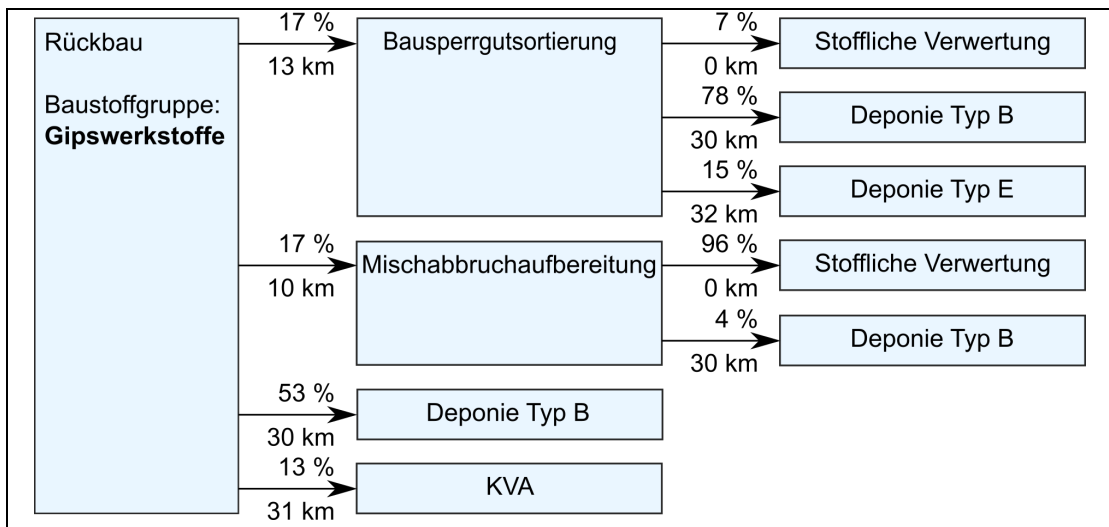


Abbildung 46: Entsorgungsweg von Gipswerkstoffen

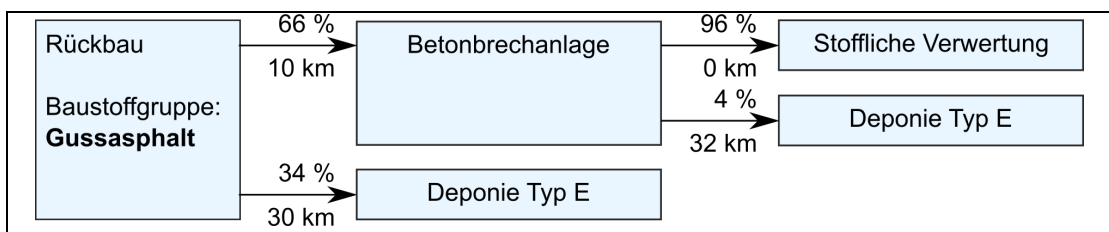


Abbildung 47: Entsorgungsweg Gussasphalt

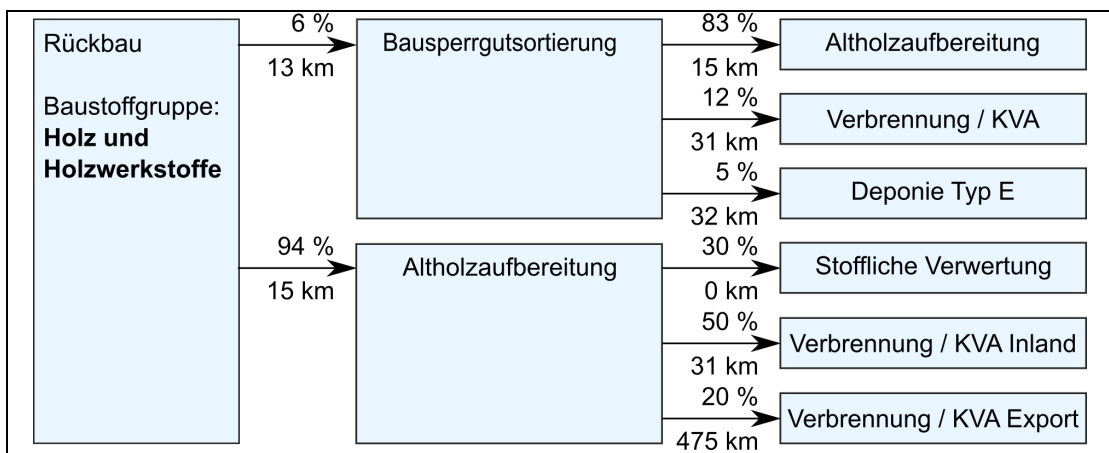


Abbildung 48: Entsorgungsweg Holz und Holzwerkstoffe

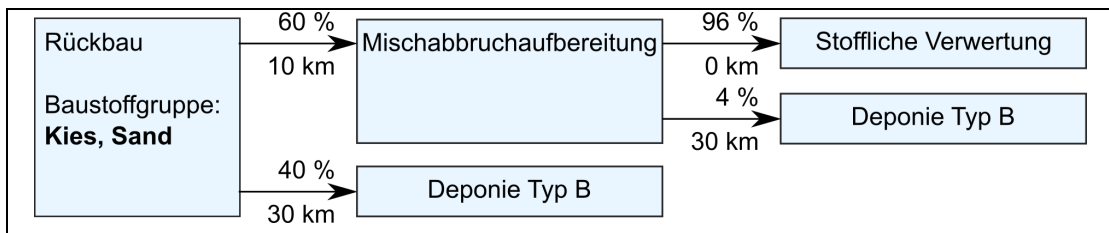


Abbildung 49: Entsorgungsweg von Kies und Sand

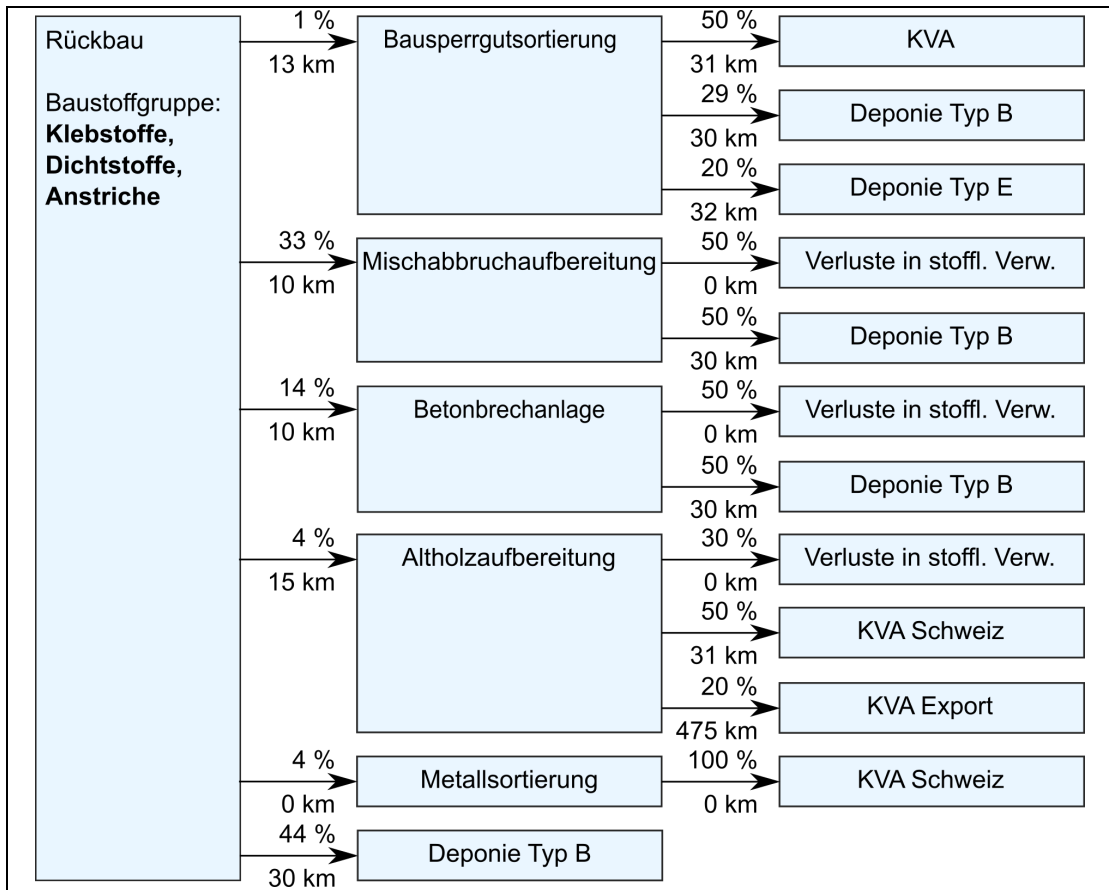


Abbildung 50: Entsorgungsweg der Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche

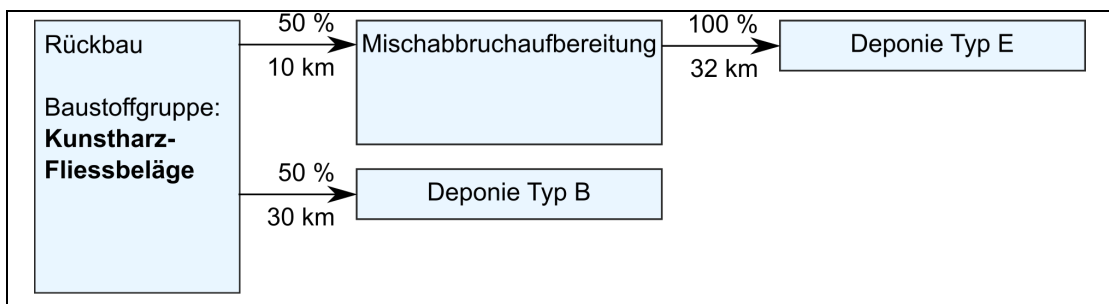


Abbildung 51: Entsorgungsweg Kunstharz-Fliessbeläge

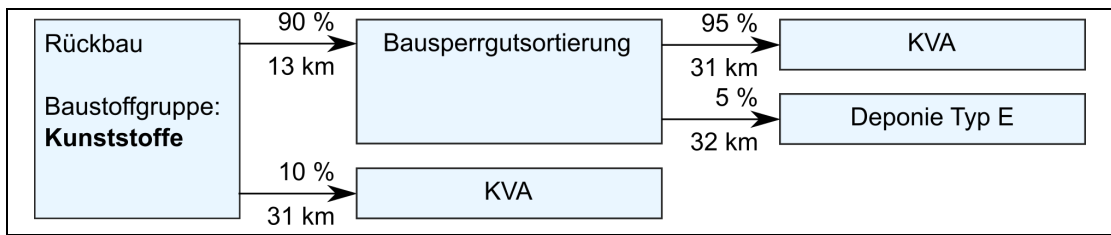


Abbildung 52: Entsorgungsweg Kunststoffe

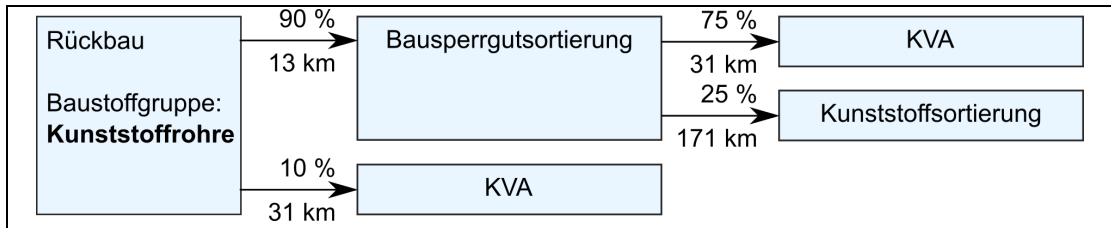


Abbildung 53: Entsorgungsweg Kunststoff-Rohre

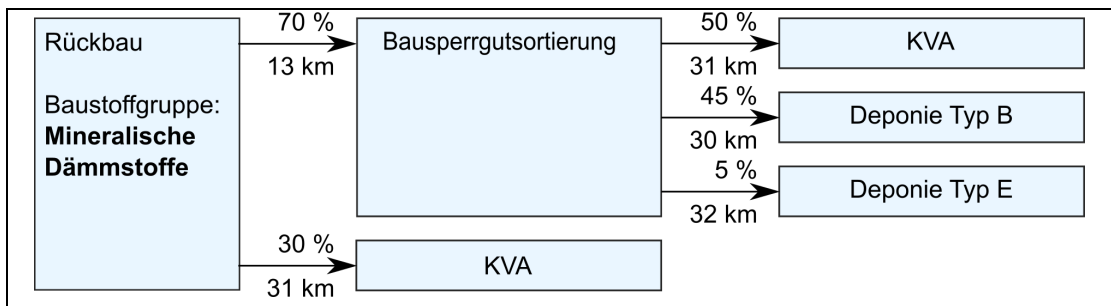


Abbildung 54: Entsorgungsweg Mineralwolle und Aerogel-Vlies

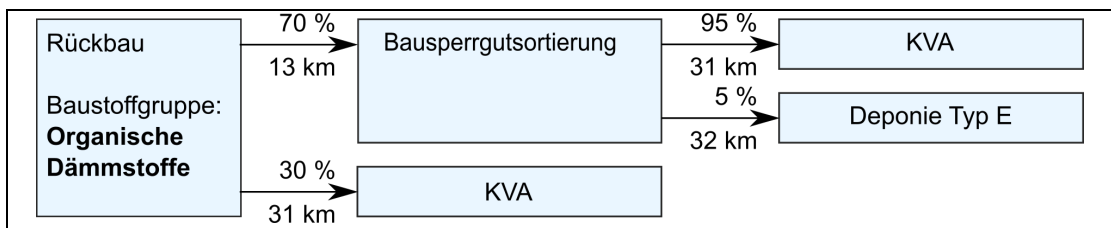


Abbildung 55: Entsorgungsweg organische Dämmstoffe

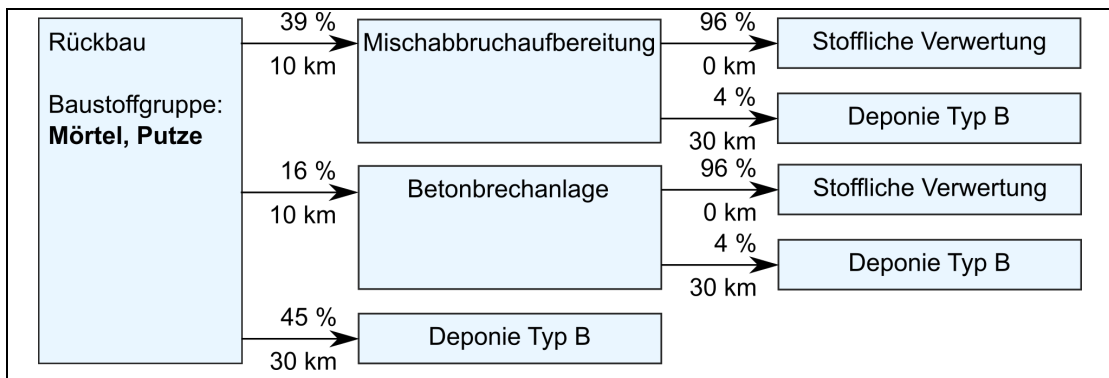


Abbildung 56: Entsorgungsweg Mörtel, Putze

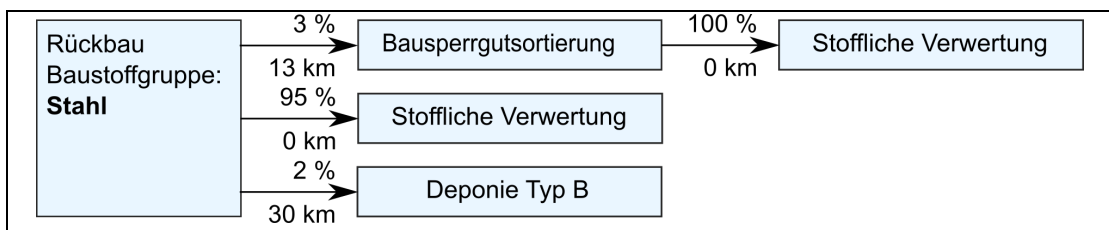


Abbildung 57: Entsorgungsweg für Stahl

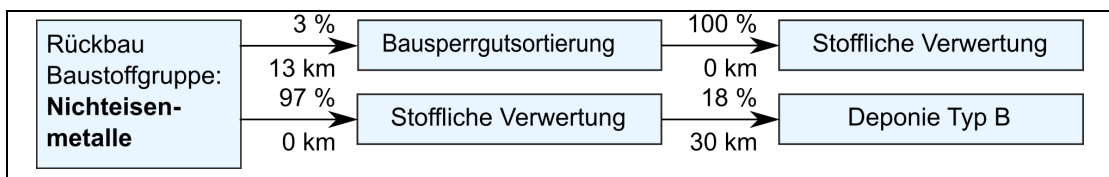


Abbildung 58: Entsorgungsweg für Nichteisenmetalle

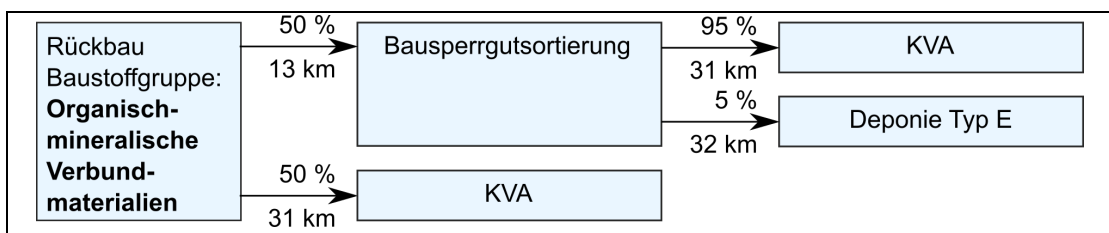


Abbildung 59: Entsorgungsweg für organisch-mineralische Verbundmaterialien

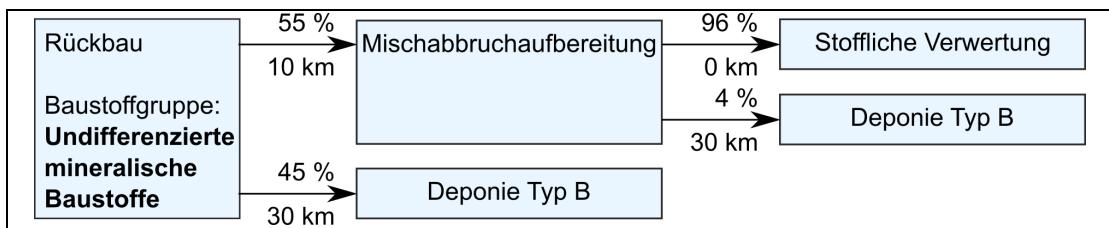


Abbildung 60: Entsorgungswege für undifferenzierte mineralische Baustoffe

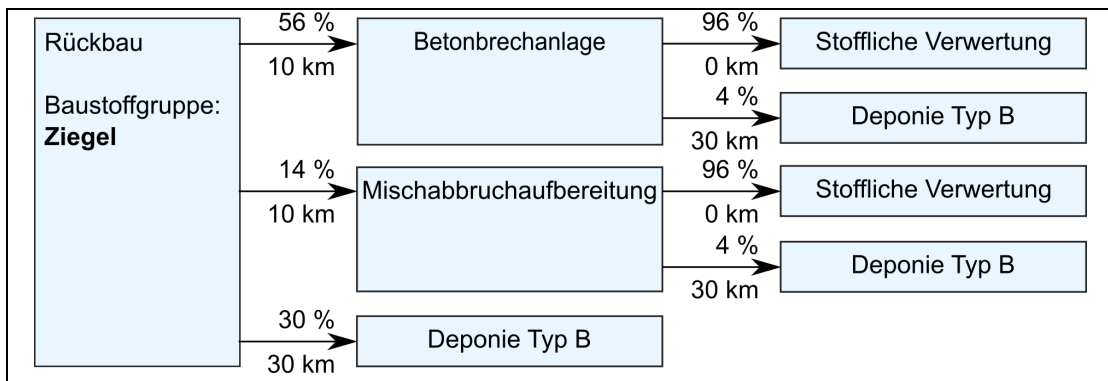


Abbildung 61: Entsorgungsweg von Ziegeln

A.4 Ökobilanz-Datensätze

Die Ökobilanz-Datensätze aller Prozessketten und die Sachbilanzen der Entsorgungsprozesse sind unter folgendem Link erhältlich:

www.umweltchemie.ch/oekobilanzen/referenzen/sachbilanzdatensaeetze-umweltchemie/

A.5 Englische Übersetzung der Baustoffgruppen

Die folgende Tabelle 72 führt die englische Übersetzung der Baustoffgruppen auf, wie sie für die Benennung der Ökobilanzdatensätze verwendet wurde.

Tabelle 72: Tabelle der Benennung der Baustoffgruppen auf deutsch und auf englisch

Baustoffgruppe deutsch	Baustoffgruppe englisch
Armierungsstahl	reinforcement steel
Beton	concrete
Bodenbelag organisch	organic floor covering
Dichtungsbahnen, Schutzfolien	seal sheeting
Faserzement	fibre cement
Flachglas	plate glass
Gipswerkstoffe	gypsum materials
Gussasphalt	cast asphalt
Holz und Holzwerkstoffe	wood and wood materials
Kies, Sand	gravel, sand
Kleb-, Dichtstoffe und Anstriche	adhesives, sealers and coatings
Kunstharz-Fliessbeläge	synthetic resin flooring
Kunststoffe	plastics
Kunststoff-Rohre	plastic conduits
Mineralische Dämmstoffe	mineral thermal insulation
Organische Dämmstoffe	organic thermal insulation
Mörtel, Putze	mortar, plaster
Stahl	steel
Nichteisenmetalle	non-iron metals
Dampfabzug	extractor hood
Organisch-mineralische Verbundmaterialien	organic-anorganic compound materials
Undifferenzierte mineralische Baustoffe	unspecified mineral building materials
Ziegel	roofing tiles