

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

# DIPLOMARBEIT

## **TECHNISCHE UND ÖKOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN VON RECYCLING-BAUSTOFFEN UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG EINER ÖKOBILANZIERUNG VON RECYCLING-BETON**

ausgeführt am

Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz

an der

Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

o.Univ.Prof. Dipl.Ing. DDr.techn. Ulrich Schneider

Univ.Ass. Dipl.Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner

Robert Rosenberger

Flachsweg 37/34

1220 Wien

Wien, 1997

.....

An dieser Stelle möchte ich folgenden Personen, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, meinen Dank aussprechen:

meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben

Herrn Dr. Bruckner für die motivierende Betreuung

Herrn DI Car für die jahrelange fachlich ergiebige und menschlich erfreuliche Zusammenarbeit

meiner Freundin Dagmar

Frau Herta Hingst für das sorgfältige Lektorat.

*Dsi Gung war im Staate Tschu gewandert und nach dem Staate Dsin zurückgekehrt. Als er durch die Gegend nördlich des Han-Flusses kam, sah er einen alten Mann, der in seinem Gemüsegarten beschäftigt war. Er hatte Gräben gezogen zur Bewässerung. Er stieg selbst in den Brunnen hinunter und brachte in seinen Armen ein Gefäß voll Wasser herauf, das er ausgoß. Er mühte sich aufs äußerste ab und brachte doch wenig zustande.*

*Dsi Gung sprach: "Da gibt es eine Einrichtung, mit der man an einem Tag hundert Gräben bewässern kann. Mit wenig Mühe wird viel erreicht. Möchtet Ihr die nicht anwenden?"*

*Der Gärtner richtete sich auf, sah ihn an und sprach: "Und was wäre das?" Dsi Gung sprach: "Man nimmt einen hölzernen Hebelarm, der hinten beschwert und vorne leicht ist. Auf diese Weise kann man das Wasser schöpfen, daß es nur so sprudelt. Man nennt das einen Ziehbrunnen."*

*Da stieg dem Alten der Ärger ins Gesicht, und er sagte: "Ich habe meinen Lehrer sagen hören: Wenn einer Maschinen benützt, so betreibt er all seine Geschäfte maschinenmäßig; wer seine Geschäfte maschinenmäßig betreibt, der bekommt ein Maschinenherz. Wenn aber einer ein Maschinenherz in der Brust hat, dem geht die Einfalt verloren. Bei wem die reine Einfalt hin ist, der wird ungewiß in den Regungen seines Geistes. Ungewißheit in den Regungen des Geistes ist etwas, das sich mit dem wahren SINNE nicht verträgt. Nicht daß ich solche Dinge nicht konnte: ich schäme mich, sie anzuwenden."*

Dschuang Dsi, Das wahre Buch vom südlichen Blütenland,  
Buch XII, Kap. 11: "Der Ziehbrunnen" [1]

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>7</b>
<b>2 BAUSTOFF-RECYCLING.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Gesetzliche Grundlagen .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Das Abfallwirtschaftsgesetz.....	9
2.1.2 Freiwillige Vereinbarung über die Heranziehung von Recycling-Materialien.....	9
2.1.3 Baurestmassentrennungsverordnung.....	10
2.1.4 Abfallnachweisverordnung .....	11
2.1.5 Das Altlastensanierungsgesetz .....	12
2.1.6 Folgerung aus den gesetzlichen Grundlagen.....	13
2.1.7 Auswirkung der Gesetze auf die Deponiepreise .....	13
<b>2.2 Anfallende Mengen an Baurestmassen .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Arten von Recycling-Baustoffen.....</b>	<b>17</b>
2.3.1 Einleitung.....	17
2.3.2 Gewinnung von Recycling-Material .....	17
2.3.3 Asphalt, Beton, Mischgranulat .....	18
2.3.4 Hochbaurestmassen .....	19
2.3.5 Kontaminierte Böden.....	19
<b>3 TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN VON RECYCLING-BAUSTOFFEN .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Allgemeines .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Technische Eigenschaften .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 Anwendungsmöglichkeiten .....</b>	<b>25</b>
3.3.1 Asphalt, Beton, Mischgranulat .....	26
3.3.2 Hochbaurestmassen .....	28
<b>4 VOM ALTBETON ZUM RECYCLING-BETON .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Allgemeines .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 Aufbereitung von Altbeton .....</b>	<b>32</b>
4.2.1 Anlagen.....	32
4.2.2 Verfahrenstechnik.....	33
<b>4.3 Praktische Anwendungen und Untersuchungen .....</b>	<b>33</b>
4.3.1 Sanierung eines Teilstückes der A1-Westautobahn .....	34
4.3.2 Technologische Kenngrößen von Beton mit Zuschlag aus Recyclingmaterial .....	37
4.3.3 Bau des Sitzes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück.....	39
4.3.4 Neue Autobahnbetondecke der A 27 in Niedersachsen.....	40
4.3.5 Recycling von Mantelbetonbauweisen.....	42
4.3.6 Recycling von Baustoffen im Hochbau .....	43
<b>4.4 Schlußfolgerungen für die Praxis.....</b>	<b>44</b>
4.4.1 Recyclingbeton im Straßenbau .....	44
4.4.2 Wasseraugverhalten und W/Z-Wert .....	44
4.4.3 Feinanteile .....	45
4.4.4 Erforderliche Maßnahmen .....	46
<b>5 METHODIK VON ÖKOBILANZEN .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 Definition.....</b>	<b>47</b>
<b>5.2 Anwendung einer Ökobilanz .....</b>	<b>48</b>

<b>5.3 Vorgangsweise nach ISO-Normierung .....</b>	<b>48</b>
5.3.1 Definition von Ziel und Umfang (Goal and scope definition) .....	50
5.3.2 Sachbilanz (Life cycle inventory analysis) .....	51
5.3.3 Wirkungsbilanz (Life cycle impact assesment).....	52
5.3.4 Interpretation .....	52
<b>5.4 Besonderheiten und Probleme von Ökobilanzen .....</b>	<b>53</b>
<b>6 ÖKOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN VON RECYCLING-BAUSTOFFEN .....</b>	<b>54</b>
<b>6.1 Allgemeines .....</b>	<b>54</b>
<b>6.2 Parameter .....</b>	<b>55</b>
<b>6.3 Regelwerke .....</b>	<b>56</b>
6.3.1 ÖNORM S 2072 .....	56
6.3.2 Richtlinie für Recycling-Baustoffe .....	58
6.3.3 Deutsche Richtlinie .....	60
<b>6.4 Auslaugversuche .....</b>	<b>61</b>
6.4.1 Allgemeines .....	61
6.4.2 DEV-S4 - Verfahren .....	61
6.4.3 Trogverfahren .....	62
6.4.4 Perkulationsverfahren .....	63
6.4.5 Lysimeterversuche .....	63
6.4.6 pH-stat - Verfahren .....	63
6.4.7 VDZ-Durchflußversuch .....	64
6.4.8 ISE-Durchlaufverfahren .....	64
<b>6.5 Vergleichende Untersuchungen.....</b>	<b>64</b>
6.5.1 Vergleich Perkolation / ÖNORM S 2072 .....	64
6.5.2 Prüftechnische Einflüsse bei der Umweltverträglichkeitsermittlung.....	66
6.5.3 Bauschuttklassifizierung zur Wiederverwertung im Straßenbau.....	69
6.5.4 Eluierung von Asphaltgranulat im Praxisversuch .....	72
6.5.5 Umweltverträglichkeit von Ausbaupasphalt .....	74
6.5.6 Mobilisierbarkeit von Schwermetallen .....	74
<b>6.6 Schlußfolgerung aus den Untersuchungen .....</b>	<b>76</b>
6.6.1 Kritik am Einsatz des DEV-S4 Verfahrens gemäß ÖNORM S 2072 .....	76
6.6.2 Mögliche Modifikationen des DEV-S4 Verfahrens .....	77
6.6.3 Alternative Verfahren .....	78
6.6.4 Maßgebliche Parameter .....	79
6.6.5 Zusammenfassung.....	80
<b>7 ÖKOBILANZ VON RECYCLING-BETON .....</b>	<b>81</b>
<b>7.1 Standardberichtsbogen .....</b>	<b>81</b>
<b>7.2 Definition von Ziel und Umfang .....</b>	<b>86</b>
7.2.1 Untersuchungsrahmen.....	86
7.2.2 Szenario „Recycling“ .....	87
7.2.3 Szenario „Deponierung“ .....	90
7.2.4 Funktionale Einheit / Betonrezepturen .....	92
7.2.5 Zieldefinition laut Standardberichtsbogen .....	94
<b>7.3 Sachbilanz .....</b>	<b>96</b>
7.3.1 Module des Szenarios "Recycling".....	96
7.3.2 Module des Szenarios "Deponierung" .....	117
7.3.3 Energiebilanzen .....	130
7.3.4 Stoffbilanzen.....	134
7.3.5 Sachbilanz laut Standardberichtsbogen .....	137
<b>7.4 Wirkungsbilanz.....</b>	<b>138</b>

7.4.1 Inanspruchnahme von Ressourcen.....	138
7.4.2 Treibhauseffekt.....	140
7.4.3 Humantoxizität.....	141
7.4.4 Ökotoxizität.....	142
7.4.5 Versauerung von Gewässern und Böden.....	144
7.4.6 Flächenbedarf/Bodenbeanspruchung.....	145
7.4.7 Abfall.....	146
7.4.8 Wirkungsbilanz laut Standardberichtsbogen.....	148
<b>7.5 Interpretation.....</b>	<b>149</b>
7.5.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	149
7.5.2 Zusammenfassung.....	151
7.5.3 Interpretation laut Standardberichtsbogen.....	154
<b>8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>156</b>
<b>9 MASTER'S THESIS.....</b>	<b>158</b>
<b>10 QUELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>160</b>

## 1 EINLEITUNG

In Zeiten gesteigerten Umweltbewußtseins sind Begriffe wie Kreislaufwirtschaft, Schonung von Ressourcen und Deponievolumen oder Recycling schon längst keine Schlagworte mehr, welche nur eine politische Facette widerspiegeln. Diese Thematik ist in der gesamten westlichen Industriegesellschaft aktueller denn je. Abfallerzeuger, also wir alle, sind auch persönlich spätestens seit Einführung der Verpackungsverordnung in Österreich persönlich mit dem Thema Umweltschutz konfrontiert worden.

Jedoch nicht nur der Private, sondern auch die Wirtschaft im besonderen werden nicht zuletzt durch legislative Maßnahmen gezwungen, dem Umweltschutzgedanken Rechnung zu tragen. Der Umstand, daß dies z.B. durch strenge Umweltauflagen oder immer höher werdende Deponiegebühren erzwungen werden muß, sollte wertfrei gesehen werden, da derartige Maßnahmen für Unternehmen immer Kosten verursachen.

Ideelle Ziele sind keine mit Geld bewerteten Kategorien unserer Wirtschaft, und daher sollte man realistischere anzweifeln, daß der Faktor Umweltbewußtsein ausreicht, um dem Baustoff-Recycling in der Wirtschaft einen festen Platz zu verschaffen. Die Preisbildung erfolgt bekannterweise durch Angebot und Nachfrage, Begriffe wie Kostenwahrheit oder Umweltfolgekosten spielen dabei noch wenig bis gar keine Rolle.

Wenn man meint, die Kreislaufwirtschaft gehöre forciert, und daher auch die Baustoff-Recycling-Wirtschaft, so ist neben der rechtlichen Begründung dafür auch von Interesse, inwieweit dies von echter ökologischer Relevanz ist, anders gesagt, ob Baustoff-Recycling nicht nur unser Gewissen beruhigt, sondern auch für die Natur einen positiveren Effekt hat, als alle Baurestmassen einfach zu deponieren.

Eine Methode, auf diese Frage eine wissenschaftlich begründbare Antwort zu finden, ist die Erstellung einer Ökobilanz, also eine unter dem Gesichtspunkt der Ökologie vorzunehmende Systemabgrenzung und Bilanzierung aller in diesem Rahmen ein- und ausfließenden Stoffe und Energien.

Unter dem Begriff Ökologie [<grch. oikos “Wohnung” + ...logie] wird im allgemeinen die Wissenschaft von den vielfältigen Beziehungen zwischen den Lebewesen und ihrer

Umwelt verstanden - oder umfassender: die Lehre vom Gesamthaushalt der Natur [2]. Die Begriffe "Wohnung", "Haus" oder "Lebensraum" des Menschen sind sinngemäß durchaus verknüpfbar, wobei der ausgebildete Bauingenieur sicher nicht nur mit dem Begriff "Haus" im konstruktiven Sinn etwas anzufangen weiß.

Da es im Bereich des Baustoff-Recyclings viele Stoffkreisläufe (Asphalt, Beton, Hochbau-restmassen, etc.) gibt, erscheint es im Hinblick auf eine ausreichend genaue Betrachtungs-weise sinnvoll, sich auf eine Thematik zu beschränken - im Rahmen dieser Arbeit ist es Recyclingbeton - zumal es auch bei der Verwertung von Altbeton mehrere mögliche Stoffkreisläufe gibt.

In der gegenständlichen Arbeit wird zuerst die Praxis des Baustoff-Recyclings in Österreich anhand rechtlicher und normativer Grundlagen beschrieben (Kapitel 2). Anschließend werden die technischen Eigenschaften von Recyclingbaustoffen (Kapitel 3) im Hinblick auf die Verwendung von Recyclingbetongranulat als Betonzuschlag (Kapitel 4) behandelt. Im Kapitel 6 werden die derzeit bekannten Prüfverfahren zur Ermittlung der Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen dargestellt und teilweise verglichen. Das im Kapitel 5 allgemein beschriebene Bewertungsinstrument "Ökobilanz" wird im Kapitel 7 auf Recyclingbeton angewandt, um die Frage nach der ökologischen Sinnhaftigkeit des Recyclings von Betonabbruch im Vergleich zur Deponierung von Betonabbruch zu ermitteln.

## 2 BAUSTOFF-RECYCLING

### 2.1 Gesetzliche Grundlagen

#### 2.1.1 Das Abfallwirtschaftsgesetz

Das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) von 1990 [3] legt gemäß §1 Absatz (1) folgende Ziele fest:

1. Beeinträchtigende Einwirkungen auf Menschen, Tiere und Umwelt sind so gering wie möglich zu halten
2. Schonung von Rohstoff- und Energiereserven
3. Minimierung des Verbrauchs von Deponievolumen
4. Vorsorgeprinzip für künftige Generationen:  
Nur Abfälle, deren Ablagerung kein Gefährdungspotential für nachfolgende Generationen darstellt, dürfen zurückbleiben.

Durch die Verwertung von Baurestmassen (Baustoff-Recycling) wird den Punkten 2 und 3 Rechnung getragen.

Die Mittel dazu sind im Absatz (2) als Grundsätze definiert. An erster Stelle steht die "Abfallvermeidung", an zweiter die "Abfallverwertung" und bewußt erst an letzter Stelle die "Abfallentsorgung". Von besonderer Bedeutung für das Baustoff-Recycling ist der im Punkt "Abfallverwertung" vom Gesetzgeber zum Ausdruck gebrachte Wunsch nach einer Einbindung des Prozesses "Verwertung" in die Wirtschaft:

*"Abfälle sind zu verwerten, soweit dies **ökologisch vorteilhaft** und **technisch möglich** ist, die dabei entstehenden **Mehrkosten** im Vergleich zu anderen Verfahren der Abfallbehandlung **nicht unverhältnismäßig** sind und ein Markt für die gewonnenen Stoffe vorhanden ist oder geschaffen werden kann."*

#### 2.1.2 Freiwillige Vereinbarung über die Heranziehung von Recycling-Materialien

Die "Freiwillige Vereinbarung über die Heranziehung von Recycling-Materialien" [4] wurde im Herbst 1990 zwischen den Fachorganisationen der Bauwirtschaft und dem

Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten (BMfWA) mit dem Ziel abgeschlossen, die Recyclingquoten jährlich um bestimmte Prozentsätze anzuheben.

Folgende bauspezifische Ziele wurden darin formuliert [5]:

- umweltgerechte Ausschreibung durch das BMfWA
- periodische Anpassung der Vermeidung, Trennung, Verwertung, Verwendung und Deponierung von Altstoffen bzw. Abfällen an den Stand der Technik
- Initiative für geeignete Recycling-Anlagen und deren Durchsetzung
- Schaffung eines Informationssystems über Daten betreffend recycelter bzw. wiederverwerteter Altstoffe bzw. Abfälle aus dem Baubereich
- Vorantreibung der Trennung der auf Baustellen anfallenden Materialien.

Die freiwillige Vereinbarung führte zur Baurestmassentrennungsverordnung (siehe Kapitel 2.1.3), in der die Vereinbarungen des letzten Zieles übernommen wurden.

### ***2.1.3 Baurestmassentrennungsverordnung***

Bei der Verwertung von nicht vermeidbaren Baurestmassen muß die seit 1. Jänner 1993 gültige "Baurestmassentrennungsverordnung" [6] eingehalten werden, die bei Bautätigkeiten eine Trennung der anfallenden Stoffgruppen in Abhängigkeit von bestimmten Mengenschwellen vorschreibt. Die Mengenschwellen werden vom Gesetzgeber in Tonnen angegeben. Eine für die Praxis womöglich leichter anwendbare, weil besser vorstellbare Einheit ist der Rauminhalt in Kubikmeter. Die Umrechnung erfolgt mit Dichte [7] und Auflockerungsfaktoren, beide Größen können jedoch durch die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Stoffgruppen stark variieren. Die von Tonnen in Kubikmeter umgerechneten Werte sind daher als ungefähre Größenordnung zu verstehen (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Mengenschwellen gemäß Baurestmassentrennungsverordnung [6]

Stoffgruppen	t	ca. t/m <sup>3</sup>	Auflockerung	ca. m <sup>3</sup>
Bodenaushub	20	1,8	1,3	9
Betonabbruch	20	2,4	2	4
Asphaltaufruch	5	2,4	2	1
Holzabfälle	5	0,7	2	4
Metallabfälle	2	7,9	2	0,13
Kunststoffabfälle	2	1,2	2	1
Baustellenabfälle	10	1,4	1	7
Mineralischer Bauschutt	40	1,4	1	29

Im Juli 1993 wurde gemäß [5] vom Umweltministerium ein Erlaß zur Baurestmassentrennungsverordnung herausgegeben, in dem die wirtschaftliche Zumutbarkeit der Trennung und Verwertung geregelt wird.

Demnach ist der Verwertung gegenüber einer Deponierung Vorrang einzuräumen, wenn

- eine entsprechende Verwertungsmöglichkeit im Umkreis von 50 km (zu fahrenden Straßenkilometern) existiert
- und selbst wenn **Mehrkosten im Ausmaß von 25 %** bei Verwertung anstatt Deponierung anfallen. Somit wurde der im AWG [3] verwendete Ausdruck "*...nicht unverhältnismäßig höhere Mehrkosten...*" konkretisiert (siehe auch Kapitel 2.1.1).

Die Verantwortung für die Durchführung dieser Verordnung trägt der Auftraggeber (Bauherr), auch wenn die Trennungs- und Verwertungspflichten zivilrechtlich dem Bauunternehmer übertragen wurden [8].

#### **2.1.4 Abfallnachweisverordnung**

Diese im Februar 1991 in Kraft getretene Abfallnachweisverordnung [9], herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie (BMfUJF), verpflichtet Abfallbesitzer, für jedes laufende Kalenderjahr Aufzeichnungen über Art, Menge, Herkunft und Verbleib von Abfall zu führen. Diese Verordnung betrifft die Bereiche "nicht gefährliche Abfälle" sowie "Abfälle und Altöl" und ersetzt die früher gültige Sonderabfallnachweisverordnung [5].

Für Baurestmassen sind die Bestimmungen für "nicht gefährliche Abfälle" relevant, die erforderlichen Nachweise haben mit "Baurestmassennachweisformularen" (siehe Beilage) zu erfolgen. Für jede Stoffgruppe im Sinne der Baurestmassentrennungsverordnung (Kapitel 2.1.3) sind getrennte Formulare zu verwenden, welche spätestens bei der Abrechnung einer Baustelle bearbeitet werden sollten.

### ***2.1.5 Das Altlastensanierungsgesetz***

Das Altlastensanierungsgesetz [10] soll mittels Einhebung eines **Altlastenbeitrages** finanzielle Mittel für die Sicherung und Sanierung von aufgelassenen Deponien einbringen. Der Altlastenbeitrag ist laut *Drug/Thomasitz* [11] eine budgetneutrale Finanzierungsquelle und demgemäß eine zweckgebundene Bundesabgabe. Er wird eingehoben für:

- jede Form des langfristigen Ablagerns von Abfällen (Deponieren)
- das Verfüllen von Geländeunebenheiten
- das Zwischenlagern von Abfällen
- und das Befördern von Abfällen zur langfristigen Ablagerung außerhalb Österreichs.

Im Gegensatz zur Deponierung fallen bei einer Abgabe von Baurestmassen bei Aufbereitungsanlagen keine Altlastenbeiträge an, da Baurestmassen dadurch einer Verwertung zugeführt werden. Aus diesem Grund ist der Altlastenbeitrag für das Baustoff-Recycling von großer Bedeutung, da neben dem Ursprungszweck, nämlich finanzielle Mittel für die Altlastensanierung einzuheben, auch ein Anreiz zur Verwertung durch das Verteuern der Deponierung geschaffen wird. Der Preis für die Verwertung, bei der diese Beiträge nicht anfallen, wird somit indirekt begünstigt. Die Einhebung des Altlastenbeitrages kann als Lenkungsmaßnahme mit dem Ziel angesehen werden, die im AWG [3] festgelegten Ziele zu erreichen (siehe auch Kapitel 2.1.1).

In der nachfolgenden Tabelle 2-2 sind die vorgesehenen Altlastenbeiträge in ÖS gemäß der Novelle des Altlastensanierungsgesetzes von 1996 für Baurestmassen je Tonne und abhängig vom Deponietyp in ihrer zeitlichen Entwicklung dargestellt [12].

Tabelle 2-2: Altlastenbeiträge für Baurestmassen gemäß Altlastensanierungsgesetz [10] in ihrer zeitlichen Entwicklung abhängig vom Deponietyp in ÖS/Tonne

Deponietyp	ab 1997	ab 1998	ab 1999	ab 2001
alle Deponien ohne Dichtung	90,-	110,-	110,-	130,-
alle Deponien mit Dichtung	60,-	80,-	80,-	100,-
Verfüllen, Lagern	60,-	80,-	80,-	100,-
Baurestmassendeponie	60,-	60,-	60,-	80,-

### **2.1.6 Folgerung aus den gesetzlichen Grundlagen**

Die legislativen Grundlagen für die Verwertung von Baurestmassen bringen den Wunsch des Gesetzgebers klar zum Ausdruck, von der Deponierung Abstand zu nehmen und statt dessen der Verwertung Vorrang einzuräumen, auch wenn dies mit Mehrkosten verbunden ist.

Ein dringendes Anliegen der Recycling-Wirtschaft in Österreich ist laut Österreichischem Baustoff-Recycling Verband [13] der **Vollzug der Gesetze**, insbesondere ALSAG [10] (siehe Kapitel 2.1.5) und Baurestmassentrennungsverordnung [6] (siehe Kapitel 2.1.3). Dies läßt darauf schließen, daß der vom Gesetzgeber durch eben diese Gesetze gewünschte Anreiz, Baurestmassen nicht zu deponieren, sondern einer Wiederverwertung zuzuführen, durch **mangelnde Kontrolle der Gesetze** nicht in ausreichendem Maße geschaffen wird.

### **2.1.7 Auswirkung der Gesetze auf die Deponiepreise**

Entgegen der Annahme, daß durch die Einführung der Altlastenbeiträge tendenziell alle Deponiepreise steigen würden, zeigt die Auswertung einer Preisliste von Deponien in Österreich [14] eine sehr unterschiedliche Preisentwicklung mit starken Schwankungen. Eindeutig fallend ist dabei der Durchschnittsabgabepreis von Bauschutt, welcher von 1993 bis 1996 um 42 % gesunken ist (durchschnittlich 12 % pro Jahr). Starke Schwankungen sind bei der Annahme von Betonabbruch festzustellen, wo von 1994 auf 1995 ein Preisanstieg von 65 % zu verzeichnen war, von 1995 auf 1996 wieder ein Verfall um 34 % (Tabelle 2-1 und Abbildung 2-1).

In einem dreijährigen Beobachtungszeitraum (1993-1996) zeigt sich insgesamt ein extremer Preisverfall bei reinem Bauschutt um 42 %, sonst ein Anstieg der Deponiepreise

um etwa 10 - 15%. Längerfristig wird angesichts der steigenden Altlastenbeiträge wohl auch ein Anstieg der Deponierungspreise von Bauschutt nicht zu verhindern sein.

Tabelle 2-3: Preise an Österreichischen Deponien 1993-1996 in ÖS/to (ohne Umweltdienst Burgenland und Niederösterreichische Umweltschutzanstalt)

Abfallart	1993	1994	% zu 1993	1995	% zu 1994	1996	% zu 1995	% zu 1993
reiner Bauschutt	380	348	-8,39%	328	-5,61%	220	-33,01%	<b>-42,07%</b>
reiner Betonabbruch	220	232	+5,42%	383	+65,05%	254	<b>-33,52%</b>	+15,66%
Baumischabfall	1931	1906	-1,26%	1915	+0,45%	2060	+7,59%	+6,70%
Sperrmüll	1799	1907	+6,03%	1841	-3,48%	2003	+8,81%	+11,37%

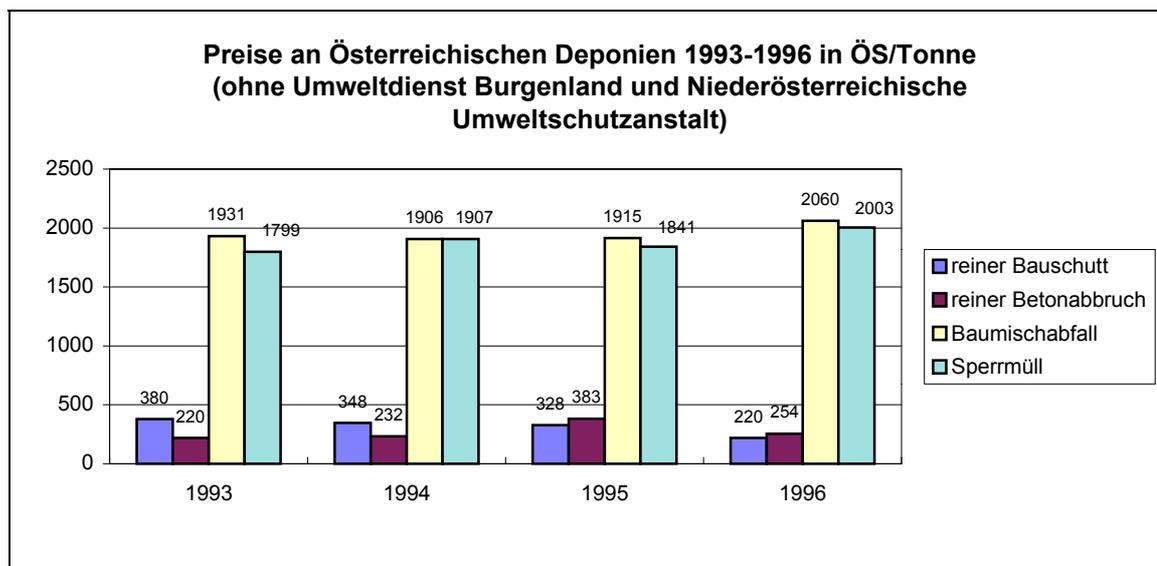


Abbildung 2-1: Preise an Österreichischen Deponien 1993-1996 in ÖS/Tonne (ohne Umweltdienst Burgenland und Niederösterreichische Umweltschutzanstalt)

Die Preise von Umweltdienst Burgenland (UB) und Niederösterreichische Umweltschutzanstalt (NUA) wurden nicht berücksichtigt, da diese Firmen mehrere Deponien betreiben und durch jeweils mehrere gleiche (extrem hohe) Preise zu nicht marktrepräsentativen Durchschnittswerten geführt hätten.

Die Preise verstehen sich weiters inklusive 10 % Mehrwertsteuer und inklusive Altlastenbeitrag sowie inklusive allfälliger Standortabgaben. Nicht berücksichtigt wurden Deponien, :

- die nur Gemeindebürgern zugänglich sind
- deren Preise je Volumseinheit, also in Kubikmeter und nicht in Tonnen angegeben sind
- die Vorbehalte hinsichtlich Annahmemengen haben
- bei denen nicht angegebene Standortabgaben eingehoben werden.

## 2.2 Anfallende Mengen an Baurestmassen

Dem gemäß § 5 (1) AWG [3] längstens alle drei Jahre vom Umweltministerium zu verfassenden Bundesabfallwirtschaftsplan [15] ist zu entnehmen, daß in Österreich jährlich rund 39 Millionen Tonnen Restmassen und Abfälle anfallen, davon rund **56 % Baurestmassen inklusive Baustellenabfälle**. Somit beträgt das jährliche Massenpotential an Restmassen und Abfällen in Österreich knapp **22 Millionen pro Jahr**.

Darin enthalten sind 15 Millionen Tonnen Bodenaushub, womit aber jene Massen gemeint sind, die auf Deponien verbracht werden. Vor Ort für Verfüllungen oder Anschüttungen wiederverwendete Massen sind darin nicht enthalten.

Laut dem Österreichischen Baustoff-Recycling Verband (ÖBRV) [13] gab es in Österreich im Jahr 1996 **92 Anlagen** zur Aufbereitung von Baurestmassen (siehe Anlagenverzeichnis des ÖBRV [16]). Die Standorte dieser Österreichischen Aufbereitungsanlagen sind aus der Abbildung 2-2 ersichtlich. Auffallend sind vor allem deutliches Ost-West-Gefälle sowie eine geringe Anzahl im Süden Österreichs.

Von den 92 Anlagen sind 50 mobil (54 %) und 42 stationär (46 %). Der Trend geht in Richtung mobile Anlagen, welche hohe Transportkosten von Baurestmassen zu den Anlagen verringern, jedoch nicht jene Qualität an aufbereitetem Material wie stationäre Anlagen erreichen.

Im Jahr 1996 wurden in den vom Österreichischen Baustoff-Recycling Verband erfaßten Aufbereitungsanlagen 2,5 Millionen Tonnen Baurestmassen aufbereitet. Ein Auslastungsgrad dieser Anlagen von 50 % bedeutet ein nicht genutztes Verwertungspotential an Baurestmassen von 2,5 Millionen Tonnen pro Jahr [13].

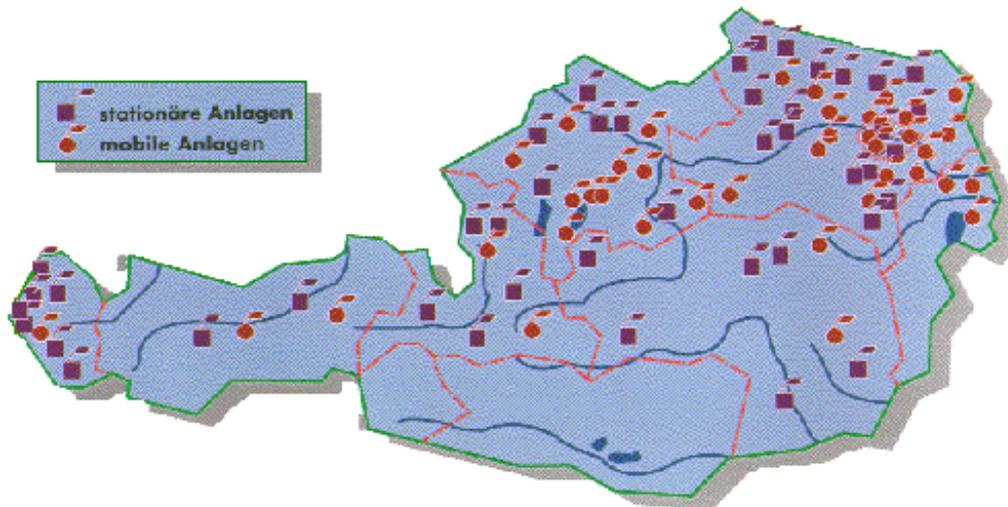


Abbildung 2-2: Baustoff-Recycling-Anlagen in Österreich 1996 laut ÖBRV

Die in diesen Anlagen aufbereiteten Mengen an Baurestmassen setzen sich aus 31 % Asphalt, 22 % Beton, 32 % mineralischem Bauschutt, 4 % Baustellenabfällen und 11 % Sonstiges zusammen (Abbildung 2-3).

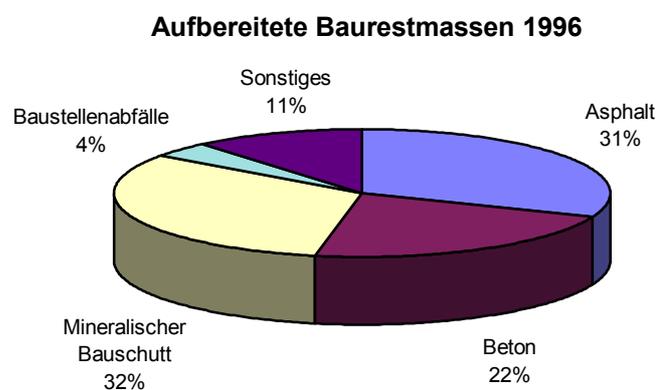


Abbildung 2-3: Zusammensetzung der in Österreich aufbereiteten Baurestmassen 1996

Die Mitgliedsunternehmen des ÖBRV rechnen für 1997 mit einer Produktionszunahme von 7 %, was bei einer Repräsentativität des ÖBRV von 85 % in Österreich eine Gesamtmenge von **3,2 Millionen Tonnen aufbereiteter Baurestmassen für 1997** erwarten läßt.

## 2.3 Arten von Recycling-Baustoffen

### 2.3.1 Einleitung

In Österreich wurden vom Österreichischen Baustoff-Recycling Verband bereits mehrere Richtlinien herausgegeben, die Recycling-Baustoffe und die Anforderungen an sie definieren. Betriebe, die Baustoffe kontinuierlich erzeugen und eine gleichbleibende Qualität durch Fremd- und Eigenüberwachungen nachweisen, können das **Gütezeichen für Recyclingbaustoffe** verliehen bekommen (Abbildung 2-4). Das bedeutet, daß der betreffende mit dem Gütezeichen ausgezeichnete Recycling-Baustoff jenen Anforderungen entspricht, die in den Richtlinien für Recycling-Baustoffe [17] definiert sind.



Abbildung 2-4: Das Gütezeichen für Recycling-Baustoffe

Nicht jeder Recycling-Baustoff, der in Österreich angeboten wird, entspricht einer der genannten Richtlinien. Im Gegenteil, auch Mitgliedsfirmen des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes (ÖBRV) bieten, wie man dem aktuellen Preisverzeichnis des ÖBRV [18] entnehmen kann, etliche Recycling-Baustoffe an, die nicht den Richtlinien des ÖBRV entsprechen, aber dennoch die Anforderungen für den vorgesehenen Anwendungszweck erfüllen müssen. Die Richtlinien für Recycling-Baustoffe definieren derzeit den in Österreich gültigen Standard für Recycling-Baustoffe.

### 2.3.2 Gewinnung von Recycling-Material

Beim Abbruch von Hoch-, Tief- und Ingenieurbauten und beim Abbruch von Verkehrsflächen wie zum Beispiel Straßen, Wege, Parkplätze, Flugplätze oder Schienenwege fallen Baurestmassen an, die entweder wiederverwendet oder durch eine entsprechende **Aufbereitung** einer Wiederverwertung zugeführt werden können. Gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] können diese bestehen aus:

- ungebundenen Baustoffen, (z.B. Dammbaustoffe, Bodenaushub, Schotter aus Verkehrsflächen, Gleisschotter aus dem Eisenbahnwesen, Frostschutzschichten
- hydraulisch gebundenen Baustoffen (z.B. Fahrbahndecken, Platten, Bordsteine, Rohre, Mauerwerk, Beton- und Stahlbeton, Betonschwellen)
- bituminös gebundenen Baustoffen (z.B. Asphaltaufbruch oder Fräsgut).

### **2.3.3 Asphalt, Beton, Mischgranulat**

In der ersten herausgegebenen Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] werden definiert:

- Recyciertes gebrochenes Asphaltgranulat (RA)
- Recyciertes gebrochenes Betongranulat (RB)
- Recyciertes gebrochenes Asphalt/Beton-Mischgranulat (RAB)
- Recyciertes gebrochenes Mischgranulat aus Beton, Asphalt und natürlichem Gestein (RM).

Die vorgeschriebenen Prüfungen mit je nach Güteklassen unterschiedlichen Anforderungen sind:

- Gewinnung, Anlieferung
- Aufbereitung und Lagerung
- Korngrößenverteilung
- Fremdanteil
- Frostsicherheit
- Bitumengehalt
- Reinheit
- Umweltverträglichkeit
- Verdichtbarkeit.

### **2.3.4 Hochbaurestmassen**

In der "Richtlinie für Recyclingbaustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Zementgebundene Massen" des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes [19] werden Güteanforderungen und Prüfbestimmungen für aus dem Hochbau gewonnene Recycling-Baustoffe definiert, die für die Herstellung von zementgebundenen Baustoffen und Bauteilen (z.B. Beton, Hohlblocksteine, Estriche, etc.) verwendet werden. Je nach Anteil an Ziegel und der Körnungen gibt es Bezeichnungen wie RZ (Ziegelsand oder -splitt), RHZ (Hochbauziegelsand oder -splitt) oder RH (Hochbausand oder -splitt).

Die Richtlinie für Recycling Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Ungebundene Massen, des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes [20] definiert Güteanforderungen und Prüfbestimmungen für aus dem Hochbau gewonnene Recycling-Baustoffe, die für verdichtete (z.B. Künetten) oder unverdichtete Schüttungen (z.B. Hinterfüllungen) sowie für hydraulisch gebundene Anwendungen verwendet werden können. Die Kurzbezeichnung lautet RMH (Recycelte mineralische Hochbaurestmassen).

Bei der Gewinnung von aufzubereitenden Hochbaurestmassen ist eine selektive Vorgangsweise wichtig, um möglichst sortenreine Baurestmassen zu erhalten. Anhaltspunkte zu einer derartigen Vorgangsweise bietet der "Leitfaden Verwertungsorientierter Rückbau" [21].

### **2.3.5 Kontaminierte Böden**

Böden oder Bauteile, welche durch anthropogene oder technische Einflüsse mit Schadstoffen verunreinigt sind, werden gemäß der Richtlinie für die Aufbereitung kontaminierter Böden und Bauteile [22] dann als kontaminiert bezeichnet, wenn deren Konzentration den Grenzwert der Eluatklasse Ib überschreitet (siehe Kapitel 6.3.1).

Derartige Böden oder Bauteile fallen beispielsweise an bei:

- Erdarbeiten (z.B. Baugrubenaushub, Kanalaushub)
- Abbrucharbeiten
- Unfällen (z.B. Tankwagen)
- Sanierung von Altablagerungen

- Sanierung von Altstandorten.

Die Güte- und Prüfbestimmungen dieser Richtlinie regeln Art, Umfang und Häufigkeit der Prüfungen, die im Zuge der Aufbereitung von kontaminierten Böden oder Bauteilen erforderlich sind, um eine einheitliche Beurteilung der Aufbereitungsverfahren zu ermöglichen.

## 3 TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN VON RECYCLING-BAUSTOFFEN

### 3.1 Allgemeines

Die einzelnen Richtlinien des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes definieren innerhalb der unterschiedlichen Arten von Recycling-Baustoffen (Asphalt, Beton, Hochbaurestmassen) noch verschiedene Güteklassen und Körnungen. So bedeutet zum Beispiel RA I 0/22: Recycliertes gebrochenes Asphaltgranulat, Güteklasse I, Körnung 0/22.

Je nach dem späteren Verwendungszweck des Recycling-Baustoffs sind die Anforderungen an ihn vorzudefinieren, um die Aufbereitung der Baurestmassen entsprechend anzupassen. Das Endprodukt der Aufbereitung, der Recycling-Baustoff, soll dann alle Eigenschaften und Qualitätsmerkmale erfüllen, die für das künftige Einsatzgebiet erforderlich sind.

### 3.2 Technische Eigenschaften

Entsprechend der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] und Kapitel 2.3.3 sind die nachfolgend beschriebenen technischen Eigenschaften von Recycling-Baustoffen im Hinblick auf den praktischen Einsatz von Relevanz.

– ***Korngrößenverteilung:***

Die Korngrößenverteilung wird bei Korndurchmessern  $< 0,063$  mm mittels Schlemmanalyse und bei größeren Korndurchmessern mittels Siebanalyse festgestellt. Durch Auftragen der einzelnen Siebdurchgänge in Masseprozenten über den Maschen- bzw. Quadratlochbreiten wird eine Sieblinie erhalten, die je nach Anforderungsprofil innerhalb bestimmter Sieblinienbereiche liegen muß. Diese sind gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] je nach Güteklasse mehr oder weniger eng gehalten.

– ***Fremdanteil:***

Aufgrund der Gewinnung von Ausgangsmaterial für Recycling-Baustoffe durch Rückbau, Auf- oder Abbruch sind auch bei einer selektiven Vorgangsweise Fremdanteile nicht auszuschließen. Der Gehalt an Fremdanteilen ist gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] je nach Güteklasse durch einen maximalen

Masseprozentsatz beschränkt. Auch sind für unterschiedliche Recycling-Materialien jeweils andere Bestandteile als Fremdanteile definiert. So ist beispielsweise Asphalt bei Recyclingbeton Fremdanteil und umgekehrt Beton bei Recyclingasphalt.

– **Frostsicherheit:**

Beim Einsatz von Recyclingmaterialien im Tief- bzw. Straßenbau ist die Frostsicherheit ein wichtiges Kriterium, sofern ein Recyclingbaustoff innerhalb der Frosteindringtiefe eingebaut wird. Die Frostsicherheit wird durch den Gehalt an Material  $< 0,02$  mm ermittelt (Kriterium nach Casagrande). Bei Überschreitung des Maximalwertes von 3 M% wird ein kostenintensives Mineralkriterium zum Nachweis der Frostsicherheit erforderlich. Gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] sind Baustoffe der Güteklasse I und IIa frostsicher, jene mit niedrigeren Güteklassen (IIb und III) nicht.

– **Abschlümmbares:**

Der Masseanteil an Material  $< 0,063$  mm wird mittels Schlemmanalyse ermittelt und daher als Abschlümmbares bezeichnet. Der maximale Anteil Abschlümmbares ist in der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] je nach Güteklassen und Korngruppen festgelegt (6 - 10 M%). Für Recyclingbeton sind diese Grenzwerte grundsätzlich tiefer (5 bzw. 6 M%) angesetzt. Gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Zementgebundene Massen [19] ist der Grenzwert für Sande (0/4 mm bzw. 0/8 mm) höher mit 15 M% beschränkt.

– **Bitumengehalt:**

Für Recyclingasphalt ist gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] je nach Güteklasse ein Mindestgehalt an Bitumen festgelegt. Recyclingasphalt der Güteklasse I muß mehr als 3,5 M% Bitumen beinhalten, Recyclingasphalt der Güteklasse IIa mehr als 2,0 M%. Bei den Recyclingbaustoffen RAB und RM ist der Bitumengehalt lediglich anzugeben. Recyclingbeton darf nur soviel Bitumen enthalten, als es für das jeweilige Einsatzgebiet nicht beeinträchtigend wirkt.

– **Festigkeit:**

Die Festigkeit (Kornzertrümmerung) ist gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] nach RVS 8.511 Pkt. 3.23 bei Beton-, Asphalt/Beton- und Mischgranulat, nicht jedoch bei Recyclingasphalt nachzuweisen.

– **Mischverhältnis:**

Die Mischverhältnisse bezeichnen gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] die mengenmäßige Zusammensetzung der Ausgangsgranulate von Asphalt/Betongranulat (RAB) sowie von Mischgranulat (RM) anhand der Verhältnisse von RA : RB bzw. von RA : RB : natürlichem Gestein. Mischverhältnisse sind lediglich anzugeben und unterliegen keinen Grenzwerten. Sie dienen der Information des Anwenders im Hinblick auf den jeweiligen Anwendungszweck.

– **Proctordichte:**

Im Proctorversuch wird jener Wassergehalt ermittelt, bei dem die höchste Dichte bei festgelegter Verdichtungsarbeit erreicht werden kann. Beim Einsatz von Recyclingmaterialien im Straßenbau ist diese Eigenschaft von Bedeutung. Bei Recyclingmaterialien, die gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] Eigenschaften der Güteklasse I haben, ist die modifizierte Proctordichte nachzuweisen und hat mehr als  $1,9 \text{ g/cm}^3$  zu betragen.

– **Anteil Ziegel:**

Der Masseanteil an Ziegel dient bei Recyclingmaterial aus Hochbaurestmassen gemäß der Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Zementgebundene Massen [19] der Einteilung in Ziegelsand/-splitt (RZ), Hochbauziegelsand/-splitt (RHZ) bzw. Hochbausand/-splitt (RH).

– **Betonfestigkeitsklasse:**

Die erreichbare Betonfestigkeitsklasse ist bei einer Verwendung von Recycling-Material als Zuschlag für die Betonherstellung bedeutsam und in diesem Fall einer Eignungsprüfung nach der ÖNORM 4200 10. und 11. Teil zu unterziehen.

Tabelle 3-1 zeigt eine Gegenüberstellung der zu prüfenden technischen Eigenschaften nach folgenden Richtlinien des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes:

- Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17]
- Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Zementgebundene Massen [19]

- Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Ungebundene Massen [20].

Die Prüfungen sind, sofern ein Baustoff mit dem Gütezeichen für Recycling-Baustoffe (Abbildung 2-4, Seite 17) ausgezeichnet ist, im Rahmen von Eigen- und Fremdüberwachungen vorzunehmen und teilweise nur bei höheren Güteklassen erforderlich.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Prüfparameter von Recyclingbaustoffen gemäß Richtlinien des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes

	<b>Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17]</b>	<b>Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Zementgebundene Massen [19]</b>	<b>Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Ungebundene Massen [20]</b>
<b>Baustoffe</b>	<b>RA, RB, RAB, RM</b>	<b>RZ, RHZ, RH</b>	<b>RMH</b>
<b>Güteklassen</b>	<b>I, IIa, IIb, III</b>	<b>keine</b>	<b>IIb, III</b>
<b>Prüfparameter:</b>	<b>zu prüfen ja/nein</b>	<b>zu prüfen ja/nein</b>	<b>zu prüfen ja/nein</b>
Korngrößenverteilung	ja	ja	ja
Fremdanteil	ja	nein	ja
Frostsicherheit	ja	nein	ja
Frostbeständigkeit	ja	nein	ja
Abschlammbares	ja	ja	nein
Bitumengehalt	ja	nein	nein
Festigkeit	ja	nein	nein
Mischverhältnis	ja	nein	nein
Proctordichte	ja	nein	nein
Anteil Ziegel	nein	ja	nein
Kornrohddichte	nein	ja	nein
Wasseraufnahme	nein	ja	nein
Sulfatgehalt	nein	ja	nein
Chloridgehalt	nein	ja	nein
organische Verunreinigungen	nein	ja	nein
Betonfestigkeitsklasse	nein	ja	nein
Über-/Unterkorn	nein	ja	ja
Schüttdichte	nein	nein	ja

### 3.3 Anwendungsmöglichkeiten

Grundsätzlich können laut *Maydl* [23] gebrauchte Baustoffe, Bauteile oder Ausbau-  
materialien auf verschiedene Arten recycelt werden:

- ***direkte Wiederverwendung auf der Baustelle:***  
z.B. Verfüllungen, Wiederverwendung einzelner gut erhaltener Bauteile
- ***Rückführung in die Rohstoffindustrie:***  
z.B. Metall über Schrotthandel zu Hersteller
- ***Aufbereitung zu neuen Baumaterialien und Produkten:***  
z.B. Erzeugung von Recycling-Baustoffen.

Die Wiederverwendung von anfallenden Bauteilen direkt an der Baustelle wäre die günstigste Form des Recyclings, weil dadurch sowohl Transport- als auch Verarbeitungsvorgänge erspart werden. Bei allen anderen Wegen der Aufbereitung erhöhen Transport- und Verarbeitungsvorgänge den Energieaufwand und somit auch die Kosten des aufbereiteten Materials.

Grundsätzlich kann man zwei Arten des Einsatzes von aufbereiteten Baurestmassen unterscheiden:

- ***Zementgebundene Anwendung:***  
z.B. Zuschlag zur Herstellung von Beton;  
siehe "Richtlinie für Recycling-Baustoffe" [17] sowie  
"Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsbereich:  
Zementgebundene Massen" [19]
- ***Ungebundene Anwendung:***  
z.B. als Füll- oder Schüttmaterial und lediglich mit mechanischer Verdichtung;  
siehe "Richtlinie für Recycling-Baustoffe" [17] sowie  
"Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsbereich:  
Ungebundene Massen" [20].

Die Anforderungen an Recycling-Baustoffe für die verschiedenen Anwendungsbereiche sind unterschiedlich. Während bei einer ungebundenen Anwendung die mögliche Auswaschung durch Sickerwässer eine wichtige Rolle spielt (siehe Kapitel 1), ist dies bei

einer Zementbindung nicht von solcher Bedeutung. Die Sieblinie muß bei beiden Anwendungen den jeweiligen Anforderungen Genüge tun.

### ***3.3.1 Asphalt, Beton, Mischgranulat***

In Tabelle 3-2 sind mögliche Anwendungsbereiche von Recycling-Baustoffen aus dem Tiefbau (Asphalt-, Beton- und Mischgranulat) je nach Güteklassen ersichtlich [17]. Entsprechend der Höhe der Güteklassen erhöhen sich auch die Einsatzmöglichkeiten der Materialien. Während fast alle Güteklassen für Künettenverfüllungen bzw. Schüttungen geeignet sind, werden als Zuschlag für Beton B 160 nur mehr Materialien der Güteklasse I als geeignet bezeichnet. Bei derartigen Anwendungsbereichen können Recycling-Baustoffe mit niedrigeren Güteklassen aufgrund der höheren Anforderungen nicht zur Anwendung kommen. Umgekehrt könnte man es als Verschwendung ansehen, Materialien der Güteklasse I bei Schüttungen einzusetzen ("Downcycling"), wenn dafür gemäß Tabelle 3-2 auch die Güteklassen IIa, IIb, oder III genügen. Verglichen mit einer Verwendung von Primärmaterial als Verfüllung erscheint jedoch der Einsatz von Material der Güteklasse I zwar nicht als optimale, aber doch als sinnvollere Maßnahme.

Tabelle 3-2: Mögliche Anwendungsgebiete für Recycling-Baustoffe aus Asphalt-, Beton- und Mischgranulat laut [17]

Baustoff	RA				RB				RAB				RM			
	I	IIa	IIb	III	I	IIa	IIb	III	I	IIa	IIb	III	I	IIa	IIb	III
bis B 160	+	+			++	+			++				++			
ab B 225 *)					+	+										
Zementgebundene Tragschicht	+	+	+		++	+	+		++	+	+		++	+	+	
Obere Tragschicht	++				++				++				++			
Untere Tragschicht	++	++			++	++			++	++			++	++		
Schüttmaterial / Künettenfüllmaterial	++	++	++	+	++	++	++	+	++	++	++	+	++	++	++	+

++ .....geeignet

+ .....Eignung und/oder Frostsicherheit nachzuweisen

\*) .....Für höherwertige Verwendung sind spezielle Maßnahmen wie getrennte Korngruppen, Waschen oder Abtrennen des Feinanteils in Abhängigkeit von einer Eignungsprüfung (ÖNORM B 4200, 10. Teil) erforderlich.

Ergänzend zur Tabelle 3-2 findet sich im Anhang der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] eine Gegenüberstellung von Bauweisen im Straßenbau mit Primärbaustoffen einerseits und Recycling-Baustoffen andererseits (Bituminöse Befestigungen, Betondecken nach RVS 3.63). Die dabei vorgeschlagenen alternativen Schichtaufbauten aus Recycling-Material beruhen jedoch hinsichtlich ihrer Schichtdicken auf Erfahrungen, die bei einzelnen Bauausführungen gemacht wurden und sollen daher vorerst nur auf Erprobungsstrecken zur Anwendung kommen.

Die Ausgangsmaterialien, Herkünfte, Bezeichnungen und Anwendungsgebiete von Recycling-Materialien aus dem Tiefbau sind in Tabelle 3-3 gegenübergestellt [24].

Tabelle 3-3: Ausgangsmaterialien, Herkünfte, Bezeichnungen und Anwendungsgebiete von Recycling-Materialien aus dem Tiefbau [24]

Ausgangsmaterial	Herkunft	Recycling-Material	Kbz.	Anwendungsgebiet
Asphalt-aufbruch	Straßenbau	Recycliertes gebrochenes Asphaltgranulat	RA	ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten, landwirtschaftlicher Wegebau, Zuschlag für Asphaltproduktion
Beton-aufbruch	Straßenbau, Brückenbau, Industriebau	Recycliertes gebrochenes Betongranulat (vorwiegend Beton)	RB	ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, zementgebundene Tragschichten, landwirtschaftlicher Wegebau, Zuschlag für Betonproduktion, hochwertiges Künettenfüllmaterial, Drainageschichten
Asphalt-Beton-aufbruch	Straßenbau, Parkplätze, Brückenbau	Recycliertes gebrochenes Asphalt- Beton-Mischgranulat (Asphalt und Beton)	RAB	ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten, landwirtschaftlicher Wegebau
Mineralische Restmassen	Straßenbau	Recycliertes gebrochenes Mischgranulat aus Beton, Asphalt und natürlichem Gestein	RM	ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten

Kbz.....Kurzbezeichnung

### 3.3.2 Hochbaurestmassen

Im Gegensatz zu Aufbruchmaterialien aus dem Tiefbau weisen Hochbaurestmassen meist eine größere Heterogenität auf. Die Aufbereitung ist durch organische oder anorganische Verunreinigungen oft erschwert, weshalb unter Umständen eine zusätzliche Aufbereitung oder Behandlung erforderlich wird, um eine Abtrennung der verunreinigten Teile zu erreichen [17]. Um möglichst sortenreine Hochbaurestmassen zu erhalten, ist eine selektive Vorgangsweise wichtig, bei der ein Bauwerk nicht abgebrochen, sondern so weit wie möglich demontiert werden soll (=Rückbau). Anhaltspunkte dazu bietet der Leitfaden Verwertungsorientierter Rückbau [23].

Mögliche zementgebundene Anwendungen von recycelten Hochbaurestmassen sind in der nachfolgenden Tabelle 3-4 ersichtlich.

Tabelle 3-4: Zementgebundene Anwendungsmöglichkeiten für Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen gemäß [19]

Recycling-Baustoff	Beton und Leichtbeton		Leichtbeton Raumgewicht < 1,2 kg/dm <sup>3</sup>	Stabilisierte Schüttungen	Stabilisierte Künettenverfüllungen
	< B 120	> B 160			
RZ	++	++	++	n	n
RHZ	++	+	+	++	++
RH	n	+	+	++	++

++ .....bevorzugte Anwendung

+ .....geeignet

n.....normativer Nachweis erforderlich

Die in Tabelle 3-4 genannten Materialien unterscheiden sich gemäß [19] durch deren Ziegelanteil (Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Anteil Ziegel von Recycling-Baustoffen aus Hochbaurestmassen gemäß [19]

Recycling-Baustoff	Ziegelanteil in M%
Recyclierter Ziegelsand 0/4 (RZ)	>80
Recyclierter Hochbauziegelsand 0/4 (RHZ)	33-80
Recyclierter Hochbausand 0/4 (RH)	<33

Material, vorwiegend bestehend aus Ziegel (RZ), wird gemäß Tabelle 3-4 als geeigneter für die Betonherstellung gehalten als jenes mit geringerem Ziegelanteil, das seine bevorzugte Anwendung in stabilisierten Künettenverfüllungen und stabilisierten Schüttungen hat.

Auffallend in diesem Zusammenhang ist, daß nur zementgebundene und keine ungebundenen Anwendungsmöglichkeiten genannt werden. Gemäß [23] ist die Wasseraufnahme von derartigen Recycling-Baustoffen aufgrund der Porosität des vorhandenen Sand- und Ziegelanteils relativ hoch. Da der Grad der Verdichtung stark vom Wassergehalt abhängt, ist die Verwendung in ungebundenen mechanisch verdichteten Verfüllungen problematisch.

Die Ausgangsmaterialien, Herkunft, Bezeichnungen und Anwendungsgebiete von Recycling-Materialien aus Hochbaurestmassen sind in Tabelle 3-6 gegenübergestellt [24].

Tabelle 3-6: Ausgangsmaterialien, Herkunft, Bezeichnungen und Anwendungsgebiete von Recycling-Materialien aus Hochbaurestmassen [24]

<b>Ausgangsmaterial</b>	<b>Herkunft</b>	<b>Recycling-Material</b>	<b>Kbz.</b>	<b>Anwendungsgebiet</b>
Ziegel-aufbruch	Ziegelproduktion, Abbruch	Recycelter Ziegelsand, Recycelter Ziegelsplitt, (vorwiegend Ziegel)	RZ	Zuschlag für die Produktion von Mauerwerksteinen, Beton und Leichtbeton, Stabilisierungen, Drainageschichten, Füllungen, Schüttungen
Hochbau-/Ziegelbruch	Wohnbau- und Hochbau-abbruch	Recycelter Hochbauziegelsand, Recycelter Hochbauziegelsplitt (Ziegel über 33% mit z.B. Betonanteil)	RHZ	Zuschlag für die Produktion von Mauerwerksteinen, Beton und Leichtbeton; Stabilisierungen, Füllungen, Schüttungen, Estriche
Hochbau-abbruch	Industriebau-abbruch und allg. Hochbau-abbruch	Recycelter Hochbausand, Recycelter Hochbausplitt (Ziegel unter 33% mit z.B. Betonanteil)	RH	stabilisierte Schüttungen, stabilisierte Künettenverfüllungen, Bauwerkshinterfüllungen, Sportplatzbau
Mineralische Hochbaurestmassen	Industriebau-abbruch und allg. Hochbau-abbruch	Mineralische Hochbaurestmassen (Beton, Ziegel, natürliches Gestein)	RMH	Künettenverfüllungen, Hinterfüllungen, Schüttungen, Sportplatzbau-Drainage

Kbz.....Kurzbezeichnung

Während Recycling-Materialien aus Asphalt-, Beton- und Mischgranulat schon seit Jahren im Einsatz sind, werden Recycling-Baustoffe aus Hochbaurestmassen noch nicht so selbstverständlich verwendet. Derzeit sind beim Österreichischen Güteschutzverband Recycling-Baustoffe (ÖGSV) 30 Recycling-Baustoffe aus Asphalt-, Beton- und Mischgranulat und nur 4 aus Hochbaurestmassen angemeldet [25].

## 4 VOM ALTBETON ZUM RECYCLING-BETON

Während in Kapitel 3 allgemeine technische Eigenschaften und Anforderungen an Recycling-Baustoffe beschrieben wurden, wird in diesem Kapitel der spezielle Anwendungsfall der Verwendung von Recyclingbetongranulat als Betonzuschlag untersucht. Anhand durchgeführter Untersuchungen soll aufgezeigt werden, unter welchen Bedingungen ein derartiger Einsatz von recyceltem Betongranulat technisch sinnvoll ist.

### 4.1 Allgemeines

#### *Historisches*

Die mehrfache Verwendung von Baustoffen und Bauteilen wird schon seit jeher praktiziert. So dienten laut *Wesche/Schulz* [26] antike Bauwerke als bequeme Baumaterialquellen, beispielsweise als Fundamente, Wandbausteine, Kalköfen, etc.. Urkunden belegen, daß *Karl der Große* die Erlaubnis zur Ausbeutung der römischen Wasserleitung von der Eifel bis Köln gab, die teilweise aus Beton bestand. Daraus wurden Hausteine gefertigt, die in Wohnhäusern, Klöstern, Kirchen und Burgen zum Einsatz kamen. Auch der nach dem zweiten Weltkrieg in großen Mengen vorhandene Trümmerschutt wurde nach der damals noch relativ einfachen Trennung in Holz und Mauerwerk zur Ziegelsplittbetonherstellung verwendet. Aus diesem Ziegelsplittbeton fertigte man Mauersteine und Schüttnbetonwände.

#### *Gewinnung*

Da Bauwerke aus Beton heutzutage im allgemeinen noch nicht unter dem Gesichtspunkt einer späteren leichten Demontage errichtet werden, gestaltet sich der nach der Nutzungsdauer erforderliche Abbruch mitunter schwierig, kostspielig und gefährlich, insbesondere bei vorgespannten Bauteilen. Um als Eingangsmaterial für die Aufbereitung möglichst sortenreine Baurestmassen zu erhalten, ist ein geordneter Rückbau von Bauwerken anzustreben (siehe "Leitfaden Verwertungsorientierter Rückbau" [21]). Eine Trennung von vermischten Baurestmassen in Stoffgruppen im nachhinein ist schwierig bis unmöglich.

### *Anfallende Mengen*

Derzeit werden in Österreich etwa 2,5 Millionen Tonnen Baurestmassen von Mitgliedern des Baustoff-Recycling Verbandes aufbereitet. Der Betonanteil davon beträgt 22 %, also 550 000 Tonnen pro Jahr [13]. Bei einer Marktrepräsentativität des Baustoff-Recycling Verbandes von 85 % bedeutet das einen Anfall von etwa 650 000 Tonnen<sup>1</sup> Betonrecyclinggranulat in Österreich pro Jahr.

## **4.2 Aufbereitung von Altbeton**

### **4.2.1 Anlagen**

Je nach Art des aufzubereitenden Materials und den Anforderungen an das Endprodukt werden verschiedene Recyclinganlagen eingesetzt, die sich in Art, Größe und Aufbau unterscheiden [27]. Eine wesentliche Eigenschaft ist die Mobilität einer Aufbereitungsanlage, man differenziert zwischen mobilen, semimobilen und stationären Anlagen.

Bei **mobilen Anlagen** sind einzelne Teile auf einem Sattelschlepper montiert, sodaß ein Einsatz im günstigsten Fall direkt am Anfallort der aufzubereitenden Baurestmassen möglich ist. Beim Betrieb werden die tragenden Teile zur Entlastung des Fahrgestells und zur Erhöhung der Standsicherheit auf integrierte Stützen gestellt.

**Semimobile Anlagen** verfügen meist über Kufen und sind dafür vorgesehen, innerhalb eines Betriebsgeländes über kurze Distanzen transportiert zu werden. Während des Betriebes sollte eine semimobile Anlage auf Fundamenten montiert werden, um die Standsicherheit zu erhöhen.

**Stationäre Anlagen** sind meist größer dimensioniert als mobile und semimobile und verfügen über höhere Durchsatzleistungen und Produktqualitäten. Vor- und Nachbrechanlagen vermindern den Verschleiß der Zerkleinerungsaggregate und tragen zu exakteren Kornspektren und reineren Produkten bei.

---

<sup>1</sup> Das entspricht ca. 260 000 m<sup>3</sup> Beton; für ein viergeschoßiges Wohnhaus mit 400 m<sup>2</sup> Wohnnutzfläche/Geschoß werden ca. 900 m<sup>3</sup> Beton benötigt; für 1 km Autobahn mit einer Breite von 12 m je Richtungsfahrbahn und einer Betondecke mit d=22cm etwa 5300 m<sup>3</sup> Beton; die 260 000 m<sup>3</sup> Beton entsprechen somit etwa 290 Wohnhäusern des beschriebenen Typs oder 120 km Autobahn.

### 4.2.2 Verfahrenstechnik

Verfahrenstechnisch werden bei der Aufbereitung von Baurestmassen ein- oder mehrstufige Bearbeitungen unterschieden.

In einstufigen Anlagen kommen meist **Prallmühlen** zur Zerkleinerung zum Einsatz. Der erforderliche Energieeinsatz ist relativ hoch, ebenso wie der Verschleiß. Die Verschleißfestigkeit der Schlagleisten sowie deren einfacher Austausch sind entscheidend für einen produktiven Betrieb derartiger Anlagen.

**Backenbrecher** werden meist in zweistufigen Anlagen verwendet. Sie haben einen geringeren Zerkleinerungsfaktor als Prallmühlen und sind daher meist im Anschluß an Prallmühlen angeordnet. Der Verschleiß von Backenbrechern ist geringer als der von Prallmühlen, auch brauchen sie weniger Energie.

In einer Anlage mit Prallmühlen werden im allgemeinen mehr Feinfraktionen produziert als in einer mit Backenbrechern.

## 4.3 Praktische Anwendungen und Untersuchungen

### *Anwendung von Recyclingbetongranulat als Betonzuschlag*

Entsprechend Kapitel 3.3.1 eignet sich Recyclingbetongranulat (RB-Material) für verschiedenste Anwendungsbereiche. Neben den Einsätzen in ungebundenen und zementgebundenen Tragschichten, im Wegebau, als Künettenfüllmaterial oder in Drainageschichten ist Recyclingbetongranulat auch als Zuschlag für die Betonproduktion verwendbar. Die Anforderungen an Betonzuschlag sind naturgemäß höher als jene an Verfüllmaterial. Dementsprechend bezeichnet die Richtlinie für Recyclingbaustoffe [17] nur RB-Material der Güteklasse I als uneingeschränkt geeignet für die Herstellung von Beton bis Klasse B 160.

In den nachfolgenden Kapiteln werden bereits durchgeführte Untersuchungen und Anwendungsfälle in der Praxis dargestellt, bei denen Recyclingbetongranulat als Betonzuschlag verwendet wurde.

### 4.3.1 Sanierung eines Teilstückes der A1-Westautobahn

#### 4.3.1.1 Eigenschaften des Betons alter Fahrbahndecken

Die **Auslaugbarkeit** von Beton gemäß ÖNORM S 2072 [41] (siehe Kapitel 6.3.1) ist aufgrund seiner hohen Dichte und der daraus resultierenden Festigkeit relativ gering [28].

Der **pH-Wert** von Frischbeton kann bis auf 12,5 ansteigen. Auch bei erhärtetem Beton, der frisch gebrochen wurde, ist das Porenwasser hochalkalisch (pH bis 12,5).

Die jahrzehntelange **Chloridbelastung** von Autobahnen durch Tausalz hat selbst auf die Herstellung von Stahlbeton aus dem Altbeton keine negativen Auswirkungen. Die elektrische Leitfähigkeit des Eluats gemäß ÖNORM S 2072 beträgt nur einen Bruchteil des Grenzwertes für die Eluatklasse I. Chloride dringen nur in die obersten Zentimeter des Betons ein und werden dort zum Teil chemisch gebunden.

#### 4.3.1.2 Beton aus Altbeton

Geringere Festigkeiten und höheres Verformungsverhalten sind laut *Sommer* [28] Eigenschaften, die Beton aus Altbeton gegenüber solchem mit natürlichem Zuschlag aufweisen kann. Ursache dafür ist der alte Zementstein des Altbetons und der daraus resultierende höhere Zementsteingehalt von Recyclingbeton. In den USA wird aufgrund der zahlreichen Sandgebiete ohne Kiesvorkommen Betonrecycling schon seit langem praktiziert. Gemäß den amerikanischen Richtlinien benötigt der Recyclingbeton etwas mehr Zement als jener mit Naturmaterial als Zuschlag.

Als Zuschlag für die Recyclingbetonherstellung ist laut [28] nur Betonbruch > 4 mm geeignet. Für den Sandanteil sollte Naturmaterial verwendet werden, da durch das Wasser-saugverhalten der Sandfraktion (< 4 mm) von gebrochenem Altbeton die Verarbeitung sehr erschwert wird. Selbst Brechsand aus natürlichem Material ist aufgrund der Kantform der Körner nur bedingt für die Betonherstellung geeignet. Betonbruch < 4 mm kann beispielsweise für Schüttungen oder hydraulisch gebundene Tragschichten verwendet werden.

#### 4.3.1.3 Untersuchungen

Bei der Sanierung eines Teilstückes der Westautobahn (Knoten Salzburg) wurde Brechgut aus einer 50 Jahre alten Betondecke auf seine Eignung als Zuschlag für die Herstellung von neuem Beton untersucht [29]. Eine besondere Fragestellung dabei war, inwieweit Asphaltanteile dies beeinflussen.

##### *Erneuerungskonzept*

Die obere und untere Tragschicht der alten Fahrbahn bestand aus Beton.

Die unteren ungebundenen Tragschichten hatten durch im Laufe der Zeit aus dem Untergrund aufgestiegene Feinanteile teilweise ihre Wirksamkeit verloren, was durch eine Zementstabilisierung behebbar war. Da jedoch ungebundene Tragschichten in der Regel sehr niedrige Sandgehalte aufweisen, war es naheliegend, den erhaltenen Betonbrechsand (0/4) in die Zementstabilisierung mit einzubeziehen.

Der erhaltene Betonsplitt der Korngruppe 4/32 wurde zur Gänze im Unterbeton als Zuschlag verwendet. Der Oberbeton wurde mit natürlichem Zuschlag hergestellt.

##### *Rezeptur*

Aus Betonbrechgut > 4 mm mit verschiedenen Asphaltanteilen (4 %, 15 % und 30 %) wurde mit Natursand Straßenunterbeton hergestellt. Um die zu prüfenden Eigenschaften mit Beton aus Naturmaterial vergleichen zu können, wurde gleich zusammengesetzter Beton mit quarzitischem Donaukies erzeugt.

Der wirksame W/Z-Wert des verwendeten Altbetonsplitts der Körnung 4/32 war 0,40. Die verwendete Zementmenge betrug  $350 \text{ kg/m}^3$ , vergleichsweise der des Donausplitt-Betons  $320 \text{ kg/m}^3$ . Die Verwendung von Recyclingsplitt erhöhte somit den Zementbedarf gegenüber Rundkorn um  $30 \text{ kg/m}^3$ , etwas mehr, als dies bei gebrochenem Felssplitt der Fall wäre.

Die Konsistenz wurde durch die verschieden hohen Asphaltanteile nicht beeinflusst.

Die **Biegezugfestigkeiten** aller Recyclingbetone waren nach 28 Tagen bis zu 30 % (bei 4 % Asphaltanteil) größer als die des Betons mit Donaukies-Zuschlag. Während sich der Donaukies beim Versuch teilweise noch ausschälte, riß der Betonsplitt fast stets durch.

Die **Druckfestigkeit** von Recyclingbeton mit 4 % Asphaltanteil war deutlich höher als beim Donaukies-Beton. Bei höheren Asphaltanteilen lagen diese bis 10 % darunter, jedoch noch immer über dem Mindestwert gemäß der maßgeblichen Richtlinie (RVS 8.06.32).

Die statischen **E-Moduli** waren ähnlich wie bei der Druckfestigkeit bei Recyclingbeton mit 4 % Asphaltanteil über dem von Donaukies-Beton, bei 19 % etwa gleich und bei 33 % Asphalt um 20 % geringer.

Prüfungen der **Frost-Tausalz-Beständigkeit** sowie **Schwindmessungen** ergaben für Recyclingbeton mit bis zu 20 % Asphaltanteilen keine wesentlichen Beeinträchtigungen.

Betonsplitt aus alten Betondecken eignet sich gemäß [29] aus folgenden Gründen besonders gut als Betonzuschlag:

- hohe Festigkeit des alten Deckenbetons
- gutes Verbinden des alten Zementsteines mit dem neuen
- gute Einbindung der rauen Bruchflächen des Betonsplitts
- rauhe, und nicht mehr glatte Oberfläche des durch Brechung vom Zementstein getrennten Zuschlages.

Festigkeitsvorteile von Betonsplittzuschlag dürften auf eine frühere Entwicklung der Verbindung zwischen Zuschlag und Zementstein zurückzuführen sein. Mit einer Angleichung der Festigkeiten im Laufe der Jahre ist daher zu rechnen.

Das Verhalten der Asphaltanteile im Beton ähnelt dem von frostbeständigem Mürbkorn. Eine Vielzahl an Kiesen in Österreich enthält relativ viel Mürbkorn und ist dennoch für die Betonherstellung geeignet. Diesbezügliche Untersuchungen zeigten deutliche Festigkeits-einbußen erst bei Mürbkorngehalten ab 20 %. Laut *Sommer* [28] gilt dies in ähnlicher Weise für Asphaltanteile.

Gemäß *Umweltbundesamt* [30] ergaben sich durch die Verwertung des Altbetons Kosteneinsparungen in der Höhe von 7 % gegenüber der Verwendung von Primärmaterialien als Zuschläge. Weiters konnte durch die Verwertung sämtlicher Baurestmassen ein Abfallaufkommen von mehr als 200 000 Tonnen (ca. 20 000 t/km Autobahn) vermieden werden.

### 4.3.2 Technologische Kenngrößen von Beton mit Zuschlag aus Recyclingmaterial

Im Rahmen eines Versuchsprogramms unter der Leitung von *Univ.-Prof. Lukas* (Innsbruck) wurden technische Eigenschaften von Beton mit Recyclingmaterialzuschlag untersucht [31]. Sowohl reines Recyclingmaterial der Körnung 0/22 kam dabei zur Anwendung (Serie II) als auch ein Gemisch mit Natursand der Körnung 0/4 und Recyclingmaterial der Körnung 4/22 (Serie III). Auch eine Vergleichsserie mit rundkörnigem Zuschlag aus Naturmaterial wurde hergestellt, um einen Bewertungsmaßstab für die Eigenschaften der Recyclingbetone heranziehen zu können (Serie I). Bei Serie IV wurde zum normalen Recyclingzuschlag noch Ziegelsplitt beigemischt, ebenso bei Serie V, die jedoch zur Hälfte aus Naturmaterial bestand. Vor der Herstellung der Frischbetonmischungen wurden alle Zuschläge luftgetrocknet. In allen Serien wurde eine Sieblinie zwischen (A+B)/2 verwendet.

Aus Tabelle 4-1 ist die Zusammensetzung der verschiedenen Versuchsserien ersichtlich.

Tabelle 4-1: Rezeptur der untersuchten Versuchsserien [31]

Serie	I	IIa	IIb	IIc	IIIa	IIIb	IIIc	IVc <sup>2</sup>	V <sup>2</sup>
Naturzuschlag	0/22	0	0	0	0/4	0/4	0/4	0/0	0/50
Recyclingmaterial	0	0/22	0/22	0/22	4/22	4/22	4/22	0/22	0/22
Zementgehalt kg/m <sup>3</sup>	320	320	320	320	320	320	320	320	320
W/Z-Wert <sup>3</sup>	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520
Feinluft [%]	5,4	2,7	3,4	4,7	5,0	7,0	5,5	4,0	4,8
Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,39	2,25	2,21	2,23	2,33	2,20	2,28	2,28	2,26
Fließmittel [% Zement]	-	-	-	-	-	-	-	1,5	1,5

Die angestrebte Betonqualität war bei allen Serien B 300, mit einem Ausbreitmaß von 40 cm nach 20 Minuten (Pumpqualität).

Der W/Z-Wert der Serie I von 0,520, deren Zuschlag ausschließlich aus Naturmaterial ohne Wasseraugverhalten bestand, war für das Erreichen der vorgeschriebenen Konsistenz erforderlich. Innerhalb der Serien II und III wurden Betone mit unterschiedlichen W/Z-

Werten hergestellt. Dadurch sollte die vorgeschriebene Konsistenz erzielt werden, die aufgrund des **erhöhten Wassersaugverhaltens** der Recyclingzuschläge mit dem W/Z-Wert von 0,520 des Naturmaterialzuschlags (Serie I) nicht erreichbar war.

Mit dem Wissen um die erforderliche Wasserzugabe zum Erreichen der vorgeschriebenen Konsistenz war auch eine Rückrechnung des für die Vornässung der Zuschläge erforderlichen Wassergehaltes möglich. Der für die Konsistenz maßgebliche Wert des Ausbreitmaßes war bei den Versuchsserien IIc, IIIc, IVc und V im vorgegebenen Bereich von 40 cm. Von gleichen Konsistenzen wurde auf gleiche "wirksame W/Z-Werte" geschlossen. Die Differenzen von "W/Z mit Vornässung" und "wirksamen W/Z-Werten" ergaben den "W/Z-Anteil der Vornässung", woraus der relative Wasseranteil, der für die Vornässung erforderlich war, ermittelt werden konnte (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Rückrechnung der erforderlichen Vornässung durch das Ausbreitmaß [31]

Serie	I	IIa	IIb	IIc	IIIa	IIIb	IIIc	IVc	V
Wasser für Vornässung [%]	0	3,0	5,0	<b>4,0</b>	0	3,0	<b>1,2</b>	<b>1,8</b>	<b>1,4</b>
W/Z mit Vornässung	0,520	0,692	0,807	<b>0,750</b>	0,520	0,692	<b>0,589</b>	<b>0,623</b>	<b>0,580</b>
W/Z-Anteil der Vornässung	0	+0,172	+0,287	<b>+0,230</b>	0	+0,172	<b>+0,069</b>	<b>+0,103</b>	<b>+0,080</b>
Wasserbilanz an W/Z-Wert	0	-0,058	+0,057	<b>0</b>	-0,069	+0,113	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
W/Z-Wert angestrebt	0,520	0,520	0,520	<b>0,520</b>	0,520	0,520	<b>0,520</b>	<b>0,520</b>	<b>0,520</b>
<b>Wirksamer W/Z-Wert</b>	0,520	0,460	0,578	<b>0,520</b>	0,451	0,623	<b>0,520</b>	<b>0,520</b>	<b>0,520</b>
Ausbreitmaß [cm]	40,0	31,2	49,0	<b>41,0</b>	31,4	49,5	<b>41,0</b>	<b>42,0</b>	<b>40,0</b>

Zur Erreichung des Feinluftgehaltes wurde allen Mischungen ein LP-Mittel zugegeben, bei den Serien IV und V noch zusätzlich ein Fließmittel.

Untersucht wurden die Parameter Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, E-Modul, Frostbeständigkeit und Frost-Tausalz-Beständigkeit.

### **Ergebnisse**

<sup>2</sup> Serie IVc und Vc = Recyclingmaterial mit 8-10% Ziegelsplitt, Serie IVc = 100% Recyclingmaterial, Serie Vc = 50% Natur- 50% Recyclingmaterial ohne Sandaustausch

<sup>3</sup> Ohne Berücksichtigung der Wassermenge, die durch die Saugfähigkeit der Zuschläge bedingt ist

Bei Verwendung von Betonbruch der Körnung 0/4 als Zuschlag ist ein deutlicher Abfall der **Festigkeiten** erkennbar, ebenso sind die anderen Eigenschaften negativ dadurch beeinflusst.

Bei Ersatz der Körnung 0/4 durch Naturmaterial ist keine wesentliche negative Beeinflussung der technischen Eigenschaften erkennbar. Bei allen Serien ließ sich bei geeigneter Rezeptur ein **B 300** erreichen. Während die **Frostbeständigkeit** unabhängig von der Zusammensetzung des Recyclingbetons bei allen Serien gegeben war, wurde die **Frost-Tausalz-Beständigkeit** nur bei Ersetzen der Feinanteile (0/4 mm) durch Natursand erreicht. Während der Einsatz von reinem Recyclingbeton als Zuschlag für die Betonherstellung daher nur eingeschränkt möglich ist, zeigte der Einsatz in der Grobfraktion (4/22) bei entsprechender Rezeptur vergleichbare Ergebnisse wie der Beton mit Zuschlag aus Naturmaterial.

#### **4.3.3 Bau des Sitzes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück**

Im Jahr 1994 wurde erstmalig in Deutschland Recyclingmaterial als Betonzuschlag beim Bau des Sitzes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück verwendet. Dabei sollten energie- und umweltfreundliche Bauweisen und Baustoffe zum Einsatz kommen, neben Dämmaterial aus Altpapier und Terrazzo aus Altglas auch Recyclingbeton. Da bis dato dafür keine Regelwerke existierten, mußte beim hiesigen Bauordnungsamt um eine Einzelgenehmigung angesucht werden. Im Zuge dessen wurde ein Versuchsprogramm aufgestellt, nach dessen Realisierung und positiven Ergebnissen die "Zustimmung im Einzelfall" erteilt wurde [32].

Da aus terminlichen Gründen die Ergebnisse länger dauernder Untersuchungen (z.B. Schwindverhalten) nicht abgewartet werden konnten, wurden folgende Vereinbarungen getroffen, um mögliche störende Einflüsse durch starkes Wasseraugverhalten bzw. erhöhte Chloridgehalte auszuschließen:

- keine Verwendung von Recyclingmaterial bis 4 mm Größtkorn
- keine Ausgangsmaterialien aus Verkehrsflächen.

#### **Rezeptur**

Der Zuschlag setzte sich zusammen aus 40 % Grubensand der Fraktion 0/2 mm, 40 % Betonsplitt 4/16 mm und 18 % Betonsplitt 16/32 mm. Somit betrug der Anteil an Recyclingmaterial am Gesamtzuschlag 58 %.

Die Herstellung erfolgte im Osnabrücker Transportbetonwerk und stellte an dessen Logistik besondere Anforderungen. In der Turmanlage mußten für die Zeit der Herstellung zwei Kammern für die zwei Betonsplittklassierungen 4/16 und 16/32 freigehalten werden, was bei den geringen Mengen von zwei- bis dreimal pro Woche ca. 10 m<sup>3</sup> entsprechend vorbereitet sein mußte.

### ***Ergebnisse der Eignungsprüfungen***

Beim Frischbeton konnte ein relativ geringes Ansteifverhalten und ein sehr guter Zusammenhalt beobachtet werden.

In Vergleichsuntersuchungen mit Karbonquarzit als Splittzuschlag wurden nur geringe Unterschiede der Druckfestigkeiten festgestellt. Die Rohdichte des Recyclingbetons war mit 2270 kg/m<sup>3</sup> um 80 kg/m<sup>3</sup> geringer als jene des Vergleichsbetons.

Bohrkerne im Alter von 100 bis 130 Tagen wurden entnommen und Druckfestigkeitsuntersuchungen unterzogen. Sie wiesen eine dichte Struktur auf, die Bewehrung war dicht von Zementstein umhüllt, der Eindruck von feinkörnigem Beton war vorherrschend. An den Schalungsflächen war nicht erkennbar, daß es sich um Recyclingbeton handelte.

Sowohl die Aufbereitung des Betonsplitts als auch die Herstellung und der Einbau des Betons gingen problemlos vonstatten, alle geforderten Eigenschaften wurden sicher erreicht.

#### ***4.3.4 Neue Autobahnbetondecke der A 27 in Niedersachsen***

Die technischen Eigenschaften eines Recyclingbaustoffs können laut *Krass* [33] nicht von vornherein als ausreichend angesehen werden. Auch wenn das Ausgangsmaterial vor der Aufbereitung reiner Betonauf- oder -abbruch ist, können folgende Eigenschaften nicht ausreichend sein:

- nicht ausreichende Homogenität
- mangelnde Kornfestigkeit

– nicht ausreichender Frostwiderstand.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde die Frage der gleichbleibenden Qualität bei der Aufbereitung untersucht [33]. Insgesamt wurden dabei 30 Proben in zehn Tagen bei einem Recyclingwerk gezogen. Zum Vergleich wurde die gleiche Probenahme bei einer Aufbereitungsanlage für Kalkstein vorgenommen. Durch Auftragen aller Sieblinien in einem Diagramm zeigte sich bei den Recyclingmaterialproben eine größere Siebfläche als beim Kalkstein. Die geringere Homogenität der aufbereiteten Materialien ist im wesentlichen auf die veränderliche stoffliche Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien beim Baustoffrecycling zurückzuführen.

Weiters untersucht wurden CBR-Werte (California Bearing Ratio) von Recyclingbaustoffen aus Betonabbruch, die eine Bewertung der Tragfähigkeit von korngestuften Gemischen ermöglichen. Die entsprechenden Werte lagen unmittelbar nach der Herstellung der Recyclingmaterialien alle unter dem Wert von Kalkstein. Nach einer einjährigen Auslagerung stiegen die Werte jedoch auf mehr als das Doppelte im Vergleich zu jenen des Kalksteins an. Die Ursache dafür dürfte eine hydraulische Verfestigung durch die Beton- und Mörtelanteile des Beton-Recyclinggranulats sein.

### ***Praktischer Einsatz***

Bei der Herstellung der neuen Autobahnbetondecke der A 27 in Niedersachsen (D) wurde für 28 % des Zuschlages Recyclingmaterial der Körnung 8/16 verwendet, welches aus der alten Betondecke hergestellt wurde. Demgemäß waren 72 % des Zuschlages Primärmaterial. Die Kennwerte des Betons (Rohdichte, Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit) zeigten keine Beeinträchtigung der Betonqualität.

Während gröbere Körnungen bzw. Splitte (8/16) problemlos als Zuschlag für die Betonherstellung eingesetzt werden können, ist dies bei kleineren Körnungen bzw. Sanden laut *Krass* [33] nicht uneingeschränkt möglich, da Probleme wegen des höheren Wasseranspruchs und der daraus resultierenden Schwind- und Kriecheigenschaften zu erwarten sind.

#### ***4.3.5 Recycling von Mantelbetonbauweisen***

Im Rahmen einer Untersuchung sollte festgestellt werden, inwieweit Bauobjekte in Holzbeton-Mantelstein- bzw. Mantelbeton-Plattenbauweise ohne aufwendige Aufbereitungsverfahren und Zusatzmaßnahmen recycelbar sind [34].

Dabei wurden fünf Typen von Mantelbetonwänden untersucht, deren Mäntel aus zementgebundener Holzwolle bzw. Holzspänen bestanden und zusätzlich mit unterschiedlichen Wärmedämmschichten sowie verschiedenen Putzaufbauten versehen waren. Der Kern stellt bei derartigen Bauweisen das tragende Element dar und bestand in allen Fällen aus einem Beton B 225.

Nach einem Grobbruch der durchschnittlich fünf Jahre alten Mauerteile, die ursprünglich für andere Untersuchungen errichtet worden waren, wurde ein Teil für Probenahmen verwendet, der Rest kam in eine Brecheranlage. Nach der Ermittlung verschiedener technischer Eigenschaften des Recyclingmaterials wurden Betone mit unterschiedlichen Recyclatanteilen im Zuschlag ermittelt und auf betontechnologische Frisch- und Festbetonparameter untersucht.

#### ***Besonderheiten***

Die im Zuschlag enthaltenen Holzreste wurden als Mürbkorn betrachtet, da gemäß der maßgeblichen ÖNORM eigentlich keine Holzbestandteile im Zuschlag enthalten sein dürften. Dieser Mürbkornanteil ist im Zuschlag der Verwendungsklasse III mit maximal 20 M% beschränkt.

Die Sieblinien waren im Feinkornbereich erhöht, was sich auf die Betonherstellung nicht negativ auswirkte.

Erhöhter Sulfatgehalt zeigte sich bei Kornfraktionen bis 4 mm bei Zuschlägen aus Abbruchmaterial mit Gipsputzen. Um Sulfatreiben auszuschließen, wurde der Gipsanteil mit maximalen 2 M% begrenzt.

#### ***Ergebnisse***

Mit Erhöhung des Recyclinganteils der Betonrezepturen zeigte sich eine Erhöhung des Luftgehaltes und eine Reduktion der Festigkeiten. Bei einem Recyclatanteil bis 10 % im Betonzuschlag waren keine nachteiligen Beeinflussungen der Frisch- und Festbeton-

eigenschaften festzustellen, womit bei Einhaltung dieser Grenze auch von einer Brauchbarkeit für konstruktive Zwecke bei B 225 bis B 300 ausgegangen werden kann. Das Ersetzen einzelner Korngruppen durch Naturmaterial brachte keine wesentlichen Vorteile.

Aufgrund der geringen Rohdichte von etwa  $1700 \text{ kg/m}^3$  und des hohen Luftgehaltes von 7 - 13 % bei Betonen mit 100 % Recyclingzuschlag eignen sich diese für die Herstellung von Leichtbetonmauersteinen und wärmedämmenden Ausgleichsschichten (Druckfestigkeit bis  $8 \text{ N/mm}^2$ ).

Baurestmassen aus Mantelbetonbauweisen können laut [34] ohne aufwendige Aufbereitungsverfahren und Zusatzmaßnahmen zur Gänze recycelt werden. Vorzüge der Kombination von Holz und Stein in Form der Mantelbetonbauweise sind:

- Wärme- und Schalldämmung
- Tragfähigkeit
- Brandsicherheit
- gutes Wohnklima.

#### **4.3.6 Recycling von Baustoffen im Hochbau**

Laut *Drees* [35] ist Recyclingzuschlag für die Betonherstellung nicht grundsätzlich gleich gut wie Zuschlag aus Naturmaterial geeignet. *Drees* bezieht sich dabei auf eine Untersuchung, bei der Beton mit Zuschlag aus Recyclingmaterial gegenüber jenem aus Naturmaterial in Kriterien wie Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit, E-Modul und Wassereindringtiefe schlechter abgeschnitten hat. Die möglichen Unregelmäßigkeiten in Bezug auf nicht gleichbleibende Qualität oder nicht ausreichende Abbruchmengen für die Aufbereitung schließen für *Drees* eine wirtschaftliche Verwendung von Recyclingbeton als Zuschlag aus. Sofern folgende Maßnahmen getroffen würden, wäre ein derartiger Einsatz von Betongranulat denkbar:

- Ersatz der Fraktion 0/4 durch Natursand
- Vornässung der Zuschläge
- möglichst hohe Festigkeit des Altbetons.

Die von *Drees* [35] als Kriterien angegebenen Randbedingungen führten bei den Versuchen von *Sommer* [29] zu besten Ergebnissen.

## 4.4 Schlußfolgerungen für die Praxis

### 4.4.1 Recyclingbeton im Straßenbau

Laut *Sommer* [36] kann Betonsplitt, der aus alten Betonfahrbahndecken hergestellt wurde, nicht - wie bisher üblich - nur für Schüttungen und Tragschichten verwendet werden, sondern auch zur Betonherstellung.

Bei bis zu 20 % Asphaltanteilen im Zuschlag zeigten sich keine wesentlichen Beeinträchtigungen der maßgeblichen technischen Eigenschaften (Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, E-Moduli, Frost-Tausalz-Beständigkeit und Schwindmessungen). Die Biegezugfestigkeit sollte nach 28 Tagen mindestens  $6 \text{ N/mm}^2$  (statt sonst  $5,5 \text{ N/mm}^2$ ) betragen, um Inhomogenitäten auszugleichen. Der Mindestwert für die Druckfestigkeit des Unterbetons sollte mit  $35 \text{ N/mm}^2$  gleich belassen werden [36].

Bei der Verwertung von Baurestmassen aus dem Straßenbau "in place" ist außerdem eine Beeinträchtigung der Gewässergüte oder der Güte des Oberbodens laut *Umweltbundesamt* [30] sehr unwahrscheinlich, wenn tatsächlich nur das aus dem jeweiligen Straßenbaulos entstammende Material verwertet wird (mit Ausnahme gelegentlich noch vorfindbarer Teerdecken).

### 4.4.2 Wasseraugverhalten und W/Z-Wert

In den entsprechenden praktischen Anwendungsfällen (Kapitel 4.3.1, 4.3.3 und 4.3.4) wurde von vornherein auf die Verwendung der bei der Brechung erhaltenen **Betonsande** (0/4 bzw. 0/2 mm) aufgrund des zu erwartenden Wasseraugverhaltens **verzichtet**. Sehr wohl wurde gebrochener **Betonsplitt** (ab 4 mm) im Zuschlag der neuen Betone verwendet, der die Eigenschaft des Wasseraugverhaltens offenbar nicht im gleichen Maße besitzt wie Betonbrechsand. Laut *Sommer* [29] ist daher eine vom Betonanmachwasser unabhängige **Anfeuchtung des Betonsplitts** erforderlich. Auch stellte sich ein gegenüber dem Naturmaterialzuschlag **höherer Zementbedarf** um etwa 10 % heraus. Die Eigenschaften der so

erzeugten Betone erfüllten alle Anforderungen, die auch an Betone mit Naturmaterialzuschlag gestellt werden.

Die Verwendung von gebrochenen Betonsanden (0/4) im Rahmen einer Laboruntersuchung (Kapitel 4.3.2) erwies sich aufgrund des Abfalls von maßgeblichen Eigenschaften als **nicht zufriedenstellend**. Ersetzt man jedoch - wie bei den oben angeführten praktischen Anwendungsfällen - die Sandfraktion des Zuschlages (0/4) durch Naturmaterial, sind keine wesentlichen Beeinträchtigungen erkennbar [31].

Als schwierig in der Laboruntersuchung von *Lukas* [31] erwies sich die Bestimmung des für die Vornässung des Recyclingmaterials erforderlichen Wassergehaltes (Tabelle 4-2). Aus dem herkömmlichen W/Z-Wert mußte mit Hilfe der Konsistenz des Frischbetons jener Anteil herausgerechnet werden, der zur Anfeuchtung des Recyclingmaterials erforderlich ist. Eine zu geringe Anfeuchtung führte zwar zu höheren Druckfestigkeiten, aber nicht zur gewünschten Konsistenz, was beispielsweise bei der Verwendung einer Betonpumpe ein wichtiges Kriterium ist.

Die Eigenschaft des Wasseraugverhaltens von Betonsplitt im Zuschlag und dessen Einfluß auf W/Z-Wert bzw. die Konsistenz ist im Vergleich zur Herstellung von Beton mit Zuschlag aus Naturmaterial erschwerend.

Bei entsprechender Rezeptur und Verzicht auf Betonsande im Zuschlag kann mit zufriedenstellenden Betoneigenschaften gerechnet werden.

#### **4.4.3 Feinanteile**

Wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben, sind die beim Brechen von Beton entstehenden Feinanteile (auch Siebrückstände genannt) als **Zuschlag** für die Produktion von neuem Beton **nicht geeignet**. Der Anteil dieser Fraktion nach einem Brechvorgang in einem Backenbrecher wird laut *Umweltbundesamt* [30] beispielhaft mit 19 % beziffert. Prinzipiell sind Siebrückstände im Straßenbau zur mechanischen Stabilisierung von Böden geeignet. Bei *Sommer* [29] (Kapitel 4.3.1) wurde der erhaltene Betonbrechsand in die Zementstabilisierung der unteren Tragschichten miteinbezogen.

Weitere Anwendungsbereiche sind laut *Umweltbundesamt* [30]:

- Filter für die Abwasserreinigung

- Neutralisation von Böden oder Abwasser
- Ersatz von Kalkstein bei der Entschwefelung von Abgasen
- Konditionierung von Klärschlamm
- Silikatdünger für ausgelaugte Böden.

Die ersten drei Punkte sind jedoch laut *Umweltbundesamt* [30] nur eingeschränkt möglich, da Kalkgehalt und Neutralisierungspotential bei Siebrückständen meist gering sind. Auch die Verwendung als Silikatdünger ist aufgrund der Alkalität und der Metallgehalte von Siebrückständen nur bedingt möglich. Die Herstellung von Dichtmaterialien mit sehr geringer Durchlässigkeit unter Zusatz von Bentonit aus Feinfraktionen von Baurestmassenaufbereitungsanlagen ist gemäß *Umweltbundesamt* [30] möglich.

#### **4.4.4 Erforderliche Maßnahmen**

Der Einsatz von Betongranulat bei ungebundenen oder stabilisierten Anwendungen sollte gemäß *Umweltbundesamt* [30] bei öffentlichen Ausschreibungen entweder **unbedingt vorgeschrieben** oder als **wahlweise Option forciert** werden. Dabei sollte auf die Verfügbarkeit erforderlicher Mengen im Umkreis des Bauprojektes Bedacht genommen werden. Um die Ausschreibungsfähigkeit von Beton mit Recyclingzuschlag zu erreichen, wären einschlägige technische Regelwerke erforderlich.

Laut [32] sind **Regelwerke** zur Verwendung von Betonsplitt als Zuschlag für die Betonherstellung **dringend erforderlich**. Dabei sollte besonderes Augenmerk auf die Prüfregelungen zur Überwachung der jeweiligen Anforderungen gelegt werden, um einerseits mögliche schädliche Einflüsse aus dem Altbeton auf das Bauwerk und die sich darin befindlichen Personen auszuschließen, und andererseits neben dem politischen Willen zum Recycling im allgemeinen auch wirtschaftliche Alternativen zur Verwendung von recyceltem Beton im speziellen zu schaffen.

## 5 METHODIK VON ÖKOBILANZEN

Heutzutage ist es nicht mehr ausreichend, einen Baustoff oder ein Produktionsverfahren rein nach technischen Gesichtspunkten zu bewerten. Das steigende Umweltbewusstsein von Bevölkerung und Industrie erfordert auch ökologische Betrachtungsweisen, mit denen die Auswirkungen von Baustoffen, Produktionsverfahren oder Anlagen auf die Umwelt beurteilt werden können. Ein dafür geeignetes Evaluierungsverfahren ist die Ökobilanz, deren Methodik nachfolgend beschrieben wird.

### 5.1 Definition

Unter einer Ökobilanz versteht man den Versuch, alle wesentlichen *Umweltauswirkungen* eines Produktes, eines Verfahrens oder einer Anlage quantifizierend zu erfassen und zu bewerten [37]. Der Betrachtungszeitraum sollte sich dabei über den gesamten Lebensweg des Untersuchungsgegenstandes erstrecken. Dazu gehören sämtliche Phasen im Lebensweg eines Produktes, wie:

- Rohstoffgewinnung und -bearbeitung
- Herstellung der Vorprodukte
- Herstellung des Produktes
- Berücksichtigung der Zwischen- und Nebenprodukte
- Produktgebrauch bzw. -verbrauch
- Wiederverwendung und -verwertung (Recycling)
- Entsorgung.

Um die Komplexität derart umfangreicher Betrachtungen im Hinblick auf die Datenerfassung einzugrenzen, sind *Systemabgrenzungen* erforderlich.

Die Grundlage einer Ökobilanz ist die Erfassung möglichst aller umweltrelevanten Stoff- und Energieflüsse eines Produktes über seinen Lebensweg mittels Input- und Outputanalysen. Dabei werden von der Umwelt einerseits Rohstoffe und Energieträger

entnommen (Input des Produktionsprozesses), andererseits Produkte, Emissionen und Abfälle in die Umwelt abgegeben (Output).

Je nach Rahmenbedingungen (Ziele, Systemabgrenzungen, Datenverfügbarkeit, etc.) ist die Ökobilanz entsprechend angepaßt auszuführen. Die grundsätzliche Vorgangsweise ist jedoch normativ definiert und wird in Kapitel 5.3 beschrieben.

## **5.2 Anwendung einer Ökobilanz**

Sowohl Betriebe als auch andere Institutionen können Interesse an der Erstellung einer Ökobilanz haben. Die möglichen Anwendungsgebiete lassen sich in betriebsinterne, betriebsexterne und außerbetriebliche Anwendungen unterscheiden [37]:

– ***betriebsinterne Anwendungen:***

Dabei kann die Verbesserung oder Umgestaltung eines Produktes oder eines Produktionsverfahren im Vordergrund stehen. Die Erstellung einer Ökobilanz bei Produktionsverfahren kann sowohl Aussagen über Verfahrensoptimierungen als auch Vorschläge zur Beschreitung neuer Wege im Produktionsablauf ermöglichen [38].

– ***betriebsexterne Anwendungen:***

Ökobilanzen von Betrieben können beispielsweise als Dokumentationsmittel gegenüber Behörden oder als Instrument der Öffentlichkeitsarbeit zwecks Kundeninformation verwendet werden.

– ***außerbetriebliche Anwendungen:***

Nicht von Betrieben gemachte oder in Auftrag gegebene Ökobilanzen können beispielsweise Lenkungsinstrumente in der Umweltpolitik darstellen oder nicht staatlichen Vereinen als konzeptive Arbeiten (Umweltschutzverbände, Konsumentenvereine, etc.) dienen [37].

## **5.3 Vorgangsweise nach ISO-Normierung**

Das technische Komitee TC 207 "Umweltmanagement" im Rahmen der ISO-Normung (International Organization for Standardization) erarbeitet derzeit die Normenserie ISO 14 000, welche die Regelungsbereiche des Umweltmanagements umfassen soll [37].

Das Komitee TC 207 untergliedert sich in 6 Unterkomitees (Subcommittees = SC), deren Aufgabenbereiche Tabelle 5-1 zu entnehmen sind.

Tabelle 5-1: Unterkomitees des ISO TC 207 "Umweltmanagement"

Subcomitee (SC)	Aufgabenbereich
SC 1	Environmental Management Systems
SC 2	Environmental Auditing
SC 3	Environmental labelling
SC 4	Environmental performance evaluation
<b>SC 5</b>	<b>Life Cycle Assesment (LCA)</b>
SC 6	Definitions

In sämtlichen Unterkomitees ist Österreich durch Delegierte vertreten, welche vom Fachnormenausschuß 226 "Instrumente für das Umweltmanagement" des Österreichischen Normungsinstitutes entsandt werden <sup>4</sup>.

Der Aufgabenbereich des Unterkomitees 5 "Life Cycle Assesment" ist gleichzusetzen mit dem, was im Deutschsprachigen unter "Ökobilanz" verstanden wird. Das entsprechende Normenwerk soll sich in die ISO-Normen 14.040-14.043 gliedern (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: ISO-Normen für die Erstellung von Ökobilanzen (Life cycle assesment)

ISO-Norm	Titel	Deutsche Bezeichnung
ISO 14.040	<i>Environmental Management Life Cycle Assesment Principles and framework</i>	<i>Umweltmanagement Ökobilanz Prinzipien und Grundgerüst</i>
ISO 14.041	Environmental Management Life Cycle Assesment Life cycle inventory analysis	Umweltmanagement Ökobilanz Sachbilanz
ISO 14.042	Environmental Management Life Cycle Assesment Life cycle impact assesment	Umweltmanagement Ökobilanz Wirkungsbilanz
ISO 14.043	Environmental Management Life Cycle Assesment Life cycle interpretation	Umweltmanagement Ökobilanz Interpretation

Die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebene Vorgangsweise für die Erstellung einer Ökobilanz entspricht dem Inhalt des letzten überarbeiteten Entwurfs (revised draft) der ISO 14 040 vom November 1995 [39]. Obwohl mit einer Veröffentlichung der ISO 14 040 schon 1996 gerechnet wurde, gibt es derzeit noch keine aktuellere Version dieser ISO-Norm. Die weiteren Normen ISO 14 041 - 14 043 sollen Ergänzungen für spezifische Bereiche von Produkt-Ökobilanzen enthalten, wobei ISO 14 041 (Sachbilanz) schon relativ weit fortgeschritten ist, die Meinungen über ISO 14 043 (Interpretation) noch am weitesten auseinandergehen [37].

### **5.3.1 Definition von Ziel und Umfang (Goal and scope definition)**

Zu Beginn einer Ökobilanz-Erstellung ist sowohl das zu erreichende Ziel als auch der Untersuchungsrahmen klar zu definieren. Diese Festlegungen sollten im Hinblick auf die spätere Anwendung der Ökobilanz erfolgen.

Bei der Beschreibung des **Zieles** ist neben der vorgesehenen Anwendung der Ökobilanz auch wichtig, welche Gründe für deren Erstellung ausschlaggebend waren und welcher Personengruppe die Ergebnisse vorgelegt werden sollen.

Der **Umfang** der Untersuchungen muß auf das Ziel abgestimmt sein. Folgende Punkte sind bei der Beschreibung des Untersuchungsumfanges bedeutsam:

– ***Funktionen und funktionale Einheit des Systems (Function and functional unit)***

In erster Linie sind die Funktionen eines Systems zu beschreiben (welche Vorgänge finden in einem System statt?). Unter einer funktionalen Einheit versteht man eine Meßgröße für einen Output in einem System (z.B. Außenwand laut Bauordnung). Die Festlegung auf eine funktionale Einheit ist wichtig, um die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen zu gewährleisten. Auch wenn ein System über eine Vielzahl von meßbaren funktionalen Einheiten verfügt, so sollten jene Größen gewählt werden, die am besten geeignet sind, ökologische Aussagen über ein System zu treffen.

– ***Systemgrenzen (System boundaries)***

Mit der Festlegung der Systemgrenzen wird bestimmt, welche Prozesse, Inputs und

---

<sup>4</sup> laut telefonischer Auskunft des ÖNORM-Institutes von Herrn Dr. Fiala sind dies meist Herr Dr. Fiala selbst und Herr Dr. Almer von der Wirtschaftsuniversität Wien

Outputs in die Ökobilanz aufgenommen werden. Faktoren, wie der vorgesehene Anwendungszweck, die getroffenen Annahmen, Einschränkungen hinsichtlich Daten oder Kosten oder das vorgesehene Zielpublikum, sind für die Wahl der Systemgrenzen entscheidend. Ein Systemmodell sollte derart angelegt werden, daß die Definitionen von Inputs und Outputs mit den wesentlichen Flüssen übereinstimmen.

– ***Erforderliche Daten (Data quality requirements)***

Anforderungen an Daten, die für die durchzuführende Ökobilanz erforderlich sind, sollten beschrieben werden. Bei diesen Anforderungen ist auf mögliche kritische Punkte, wie Genauigkeit, Vollständigkeit, Varianz, Datenquelle, Methodik der Erhebung, Repräsentativität und Reproduzierbarkeit von Daten einzugehen. Bei Ökobilanzen, die eine vergleichende Aussage zum Ziel haben, sollten die Daten hinsichtlich der genannten Kriterien beurteilt werden.

– ***Systemvergleiche (Comparison between systems)***

In vergleichenden Studien sollten nur Systeme mit gleicher funktionaler Einheit verglichen werden. Vor einem Vergleich von Ergebnissen sollte die Gleichwertigkeit der Systeme bestimmt werden.

– ***Kritische Betrachtung (Critical review)***

Die kritische Betrachtung ist optional und als Selbstkontrolle für den Ausführenden vorgesehen, um sicherzustellen, daß alle Erfordernisse hinsichtlich Methodik, Datensammlung und Dokumentation eingehalten werden.

Die Ökobilanz ist als **iterative** Vorgangsweise anzusehen, bei welcher der Bilanzrahmen während der Erstellung der Ökobilanz an eventuelle neue Erkenntnisse angepaßt werden soll, sofern dies notwendig wird.

### ***5.3.2 Sachbilanz (Life cycle inventory analysis)***

Die Sachbilanz ist jener Abschnitt einer Ökobilanz, bei dem relevante Inputs und Outputs quantitativ erfaßt werden, wie zum Beispiel Ressourcenverbrauch oder Emissionen. Diese Daten stellen die Grundlage für die nach der Sachbilanz zu erstellende Wirkungsbilanz dar.

Auch die Durchführung der Sachbilanz ist **iterativ**. Aufgrund gesammelter Daten und gewonnener Erkenntnisse über das System können neue Daten oder Einschränkungen

hinsichtlich der Datenerfassung erforderlich werden. Unter Umständen kann sich herausstellen, daß sogar das Untersuchungsziel oder der Untersuchungsrahmen einer Abänderung bedürfen.

Die qualitative und quantitative Datenerfassung hat für jede Prozeßeinheit in den Systemgrenzen zu erfolgen. Dabei auftretende Schwierigkeiten sollten im Untersuchungsrahmen Berücksichtigung finden und jedenfalls dokumentiert werden.

Sofern in der Sachbilanz Energie berechnet wird, sollte man die Quellen der verschiedenen Energieträger (Treibstoffe, Elektrizität) berücksichtigen. Auch deren verschiedene Wirkungsgrade sind in diese Überlegungen mit einzubeziehen.

### ***5.3.3 Wirkungsbilanz (Life cycle impact assesment)***

Die Wirkungsbilanz hat zum Ziel, mit Grundlage der Daten aus der Sachbilanz die Auswirkungen der Prozesse innerhalb der Systemgrenzen auf die Umwelt zu beurteilen. Dabei geht es darum, Daten aus der Sachbilanz mit Umweltauswirkungen unmittelbar zu verknüpfen. Es gibt dafür derzeit noch **keine** allgemein anerkannte Methodik; die Rahmenbedingungen von derartigen Bewertungen werden noch immer entwickelt.

**Subjektivität** ist bei einer derartigen Bewertung, die oft auf nicht quantifizierbaren Größen basiert, unvermeidlich. Daher ist eine der wichtigsten Erfordernisse an eine Wirkungsbilanz die **Transparenz**, welche durch eine klare Beschreibung von getroffenen Annahmen gewährleistet werden soll.

### ***5.3.4 Interpretation***

Die Interpretation soll als letzter Schritt eine **Synthese** der Erkenntnisse aus Sach- und Wirkungsbilanz beinhalten. Das Ergebnis der Interpretation können **Schlußfolgerungen** oder **Empfehlungen** sein, die sich aus dem Vergleich von gewonnenen Erkenntnissen und dem zu Anfang formulierten Ziel der Ökobilanz ergeben. Je nach dem bei der Zieldefinition angegebenen Zielpublikum sollten etwaige Entscheidungsträger daraus eindeutige Schlüsse oder erforderliche Maßnahmen ableiten können.

Auch die Einleitung eines iterativen Schrittes ist denkbar, sofern sich beispielsweise ein Nichterreichen des angestrebten Zieles herausstellt und eine Änderung von Untersuchungsrahmen oder Datenerfassung erforderlich wird. Gegebenenfalls sollten auch etwaige

Probleme oder unsichere Annahmen hinsichtlich Ziel, Untersuchungsrahmen oder Datenerfassung, welche bei der Erstellung der Ökobilanz aufgetreten sind, bei der Interpretation aufgezeigt werden.

#### **5.4 Besonderheiten und Probleme von Ökobilanzen**

Bei der Erfassung (Sachbilanz) und Bewertung (Wirkungsbilanz) umweltrelevanter Größen von der Herstellung eines Produktes bis zur Verwertung bzw. Entsorgung stellen sich zumeist folgende Fragen [38]:

- Für welchen Lebensweg eines Produktes entscheidet man sich bei mehreren Möglichkeiten hinsichtlich Herstellung, Verwertung oder Entsorgung?
- Welche Parameter sind umweltrelevant, bzw. in welchen Größen oder Konzentrationen werden sie umweltrelevant?
- Sind Auskünfte von Betrieben (z.B. hinsichtlich Emissionen) verfügbar; wenn ja, sind sie vollständig?

Besonders die qualitative Bilanzbewertung ist problematisch, da es dafür noch keine einheitlichen Bewertungsmaßstäbe gibt [39] (Kapitel 5.3.3). Von einer zahlenmäßigen Erfassung derartiger Bewertungen durch "Ökopunkte" distanziert man sich aufgrund der Komplexität dieser Materie, da dies eine unzulässige Simplifizierung der zu beschreibenden Sachverhalte wäre und für einen Laien jegliche Transparenz verloren ginge [38].

Eine "gute" Ökobilanz sollte folgende Eigenschaften haben:

- Vollständigkeit
- Transparenz
- Nachvollziehbarkeit
- einheitliche Kriterien.

Trotz der problematischen Interpretation und des Mißbrauchsrisikos von Ökobilanzen wird diese Form der ökologischen Untersuchung schon aufgrund der Bewußtseinsbildung von Prozessen in Technik und Wirtschaft von *Huber* [38] als positiv angesehen.

## 6 ÖKOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN VON RECYCLING-BAUSTOFFEN

In Kapitel 5 wurde die grundsätzliche Struktur einer Ökobilanz beschrieben. Für die Durchführung einer Ökobilanz sind entsprechende Eingangswerte und somit auch die Ermittlung bestimmter umweltrelevanter Parameter erforderlich. Im nachfolgenden Kapitel wird auf dafür in Frage kommende Prüfverfahren und auf die zu untersuchenden umweltrelevanten Parameter eingegangen.

### 6.1 Allgemeines

Die ökologische Verträglichkeit oder auch Umweltverträglichkeit eines Recycling-Baustoffes ist ein Wertprädikat, das Auskunft darüber geben soll, ob die Einwirkungen von Prozessen oder Gütern auf die Umwelt derart sind, daß der Schutz und die Erhaltung der Umwelt auch in Zukunft gewährleistet sind. Um darüber eine Aussage treffen zu können, ist ein Bewertungsmaßstab erforderlich, mit dem die Prüfung der Umweltverträglichkeit durchgeführt wird. Die Verwendung von Recycling-Baustoffen im Tiefbau erfordert die Untersuchung von jenen physikalisch-chemischen Parametern, die am ehesten über die mögliche Ausschwemmung von Schadstoffen durch Sickerwasser in den Boden Auskunft geben.

Eine vollständige Ermittlung aller Schadstoffgesamtgehalte wäre am aussagekräftigsten, jedoch technisch nicht sinnvoll und ökonomisch nicht vertretbar. Die Beschränkung auf erfahrungsgemäß maßgebliche Parameter muß einerseits gewährleisten, daß möglichst alle Problemfälle aufgezeigt werden, andererseits, daß nicht notwendige kostenintensive Prüfungen vermieden werden.

Für die Ermittlung der Umweltverträglichkeit eines Recycling-Baustoffes sollten **nicht so viele Parameter wie möglich**, sondern so viele Parameter wie **notwendig** untersucht werden.

## 6.2 Parameter

Die nachfolgend beschriebenen Parameter werden von *Hiersche/Wörner* [40] als relevante Größen für die Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen genannt.

– ***Aussehen und Geruch:***

Schon Aussehen und Geruch von Materialien können Anhaltspunkte über deren mögliche Inhaltsstoffe bringen. Eigenschaften, wie z.B. ein blau schimmerndes Material können ein Indiz für Cyanidgehalt sein; Phenol- (Lösungsmittel) oder Teergehalt kann am Geruch erkennbar sein. Für einen Fachmann mit entsprechender Erfahrung können Aussehen und Geruch erste Aufschlüsse über mögliche Schadstoffgehalte bringen. Der tatsächliche Nachweis wird mit einer entsprechenden Laboruntersuchung erbracht.

– ***Leitfähigkeit:***

Die elektrische Leitfähigkeit gibt Aufschluß über den Gesamtgehalt an gelösten Salzen. Bei Baustoffen sind dies meist Chloride, Sulfate, Ammoniumsalze, Carbonate, Nitrate. Diese Salze greifen einerseits den Beton an, andererseits haben sie Einfluß auf die Trinkwasserqualität.

– ***pH-Wert:***

Der pH-Wert ist eine Kenngröße für die Aggressivität von Böden oder Wässern. Bei einem pH-Wert von  $< 6,5$  kann man von Aggressivität gegenüber Beton ausgehen.

– ***Schwermetalle:***

Schwermetalle, wie Blei, Chrom, Kupfer, Zink, Cadmium, Quecksilber oder Nickel dürfen nur in bestimmten Konzentrationen im Trinkwasser enthalten sein. Auch die Gehalte an Eisen, Mangan und Aluminium sind für die Trinkwasserqualität von Relevanz. Die Mobilisierbarkeit von Schwermetallen ist stark vom pH-Wert abhängig. Bei niedrigen pH-Werten steigt die Auslaugung von Schwermetallen an.

– ***Spurenelemente:***

Darunter versteht man hauptsächlich Arsen und Cyanide. Die Konzentration von Spurenelementen im Trinkwasser ist begrenzt.

– ***Oxidierbarkeit (CSB):***

Die Oxidierbarkeit ist am chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) abzulesen, welcher jene erforderliche Sauerstoffmenge angibt, die zur Oxidation der gesamten organischen

Inhaltsstoffe erforderlich ist. Sie ist eine Kenngröße für den Anteil an organischen Substanzen und Mikroorganismen.

– ***Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK):***

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind karzinogene Inhaltsstoffe und haben toxische Wirkung bei Inhalation oder Aufnahme über die Haut.

– ***Gesamtkohlenwasserstoffe:***

Eine Erhöhung der Gesamtkohlenwasserstoffe deutet auf eine Kontamination mit Mineralölen, z.B. durch den Straßenverkehr, hin.

– ***Phenole:***

Phenole und andere saure Öle beeinträchtigen Geruch und Geschmack von Wasser und sind in höheren Konzentrationen toxisch. Die Auslaugung ist stark abhängig vom pH-Wert.

## 6.3 Regelwerke

### 6.3.1 ÖNORM S 2072

#### 6.3.1.1 Anwendungsbereich

Die ÖNORM S 2072 [41] dient zur Feststellung des Gefährdungspotentials von festen und pastösen Abfällen. Das Gefährdungspotential ist über das Eluat zu bestimmen und eines der Beurteilungskriterien für die Deponiefähigkeit von **Abfällen**.

#### 6.3.1.2 Versuchsdurchführung

Die mechanische Probenaufbereitung soll homogen erfolgen, sodaß die zu beurteilenden Inhaltsstoffe einer Eluation zugänglich werden.

Die Korngröße des zu untersuchenden Abfalls darf **höchstens 10 mm** betragen. Bei stückigem Gut ist dies durch geeignete **Zerkleinerungsmethoden**, z.B. mittels Backenbrecher oder Mörser zu erreichen. Die Mindestmenge hat **100 g**, bezogen auf die Trockensubstanz (TS), zu betragen.

Die Eluation selbst ist gemäß dem **DEV-S4 - Verfahren** [43] durchzuführen. Als Eluationsmittel ist entionisiertes Wasser zu verwenden. Das Masseverhältnis Probe

(Trockensubstanz) zu Wasser soll 1:10 betragen. Die Eluation hat durch 24 Stunden langes Über-Kopf-Drehen mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 6 U/min zu erfolgen.

#### 6.3.1.3 Eluatkonzentration

Die Einheit der Eluatkonzentration (K) ist mg/l. Sie muß sich auf die Trockensubstanz (TS) beziehen, weshalb die Eluation von feuchten Proben auch umzurechnen ist :

$$K = K_f * 100 * (\% \text{ TS})^{-1}$$

K..... Eluatkonzentration in mg/l auf die Trockensubstanz bezogen

K<sub>f</sub>..... Eluatkonzentration der feuchten Probe

% TS.... Prozent Trockensubstanz der feuchten Probe

#### 6.3.1.4 Frachten

Da die Grenzwerte der ÖNORM S 2072 [41] in Konzentrationen (mg/l) angegeben sind, ist ein Vergleich mit anderen Versuchsergebnissen oder Grenzwerten nur über die Umrechnung in Frachten (mg/kg) möglich.

$$M_e = K * V * (m_{tr})^{-1}$$

M<sub>e</sub>..... Masse des ausgetragenen Stoffes auf die Trockenmasse bezogen in mg/kg

K..... Massekonzentration (Eluatkonzentration) des ausgetragenen Stoffes in mg/l

V..... Volumen des Eluationsmittels in l

m<sub>tr</sub>..... Trockengewicht der Probe in kg

#### 6.3.1.5 Verfestigung

Bei verfestigten Abfällen ist vor der Verfestigung ein Eluat herzustellen. Anschließend werden von den Abfällen bestimmte Probekörper hergestellt, die nach 3-stündiger Wasserlagerung auf einaxiale Druckfestigkeit geprüft werden, um das Kriterium zu erfüllen, als verfestigt zu gelten (Druckfestigkeit > 1,0 N/mm<sup>2</sup>). Anschließend erfolgt die Auslaugung der Probekörper 24 Stunden in einem Auslaugbehälter mit Umwälzung des Auslaugmittels.

Dadurch können Abfälle von einer höheren in eine niedrigere Eluatklasse gebracht werden. Derartig behandelte Abfälle dürfen jedoch nicht in Deponien eingebracht werden, für die die Eluatklasse I erforderlich ist.

#### 6.3.1.6 Eluatklassen

Die ÖNORM S 2072 [41] unterscheidet 4 Eluatklassen: I, II, III und IV, für die Klassen I bis III sind die Grenzwerte der Inhaltsstoffe festgelegt.

– **Eluatklasse I (Ia, Ib, Ic)**

gewährleistet, das Grundwasser hinsichtlich seiner Nutzbarkeit als **Trinkwasser** nicht nachteilig zu beeinflussen

– **Eluatklasse II (IIa, IIb)**

läßt Sickerwasser erwarten, das nach einfacher Aufbereitung einem Vorfluter zugeführt werden kann

– **Eluatklasse III (IIIa, IIIb)**

läßt Sickerwasser erwarten, das direkt in eine Kanalisation mit angeschlossener biologischer Abwasserreinigung eingeleitet werden kann, oder derart aufbereitet werden kann, damit es dieser Anforderung entspricht (Kanalgrenzwerte)

– **Eluatklasse IV**

klassifiziert Abfälle, deren Eluat die Grenzwerte der Klasse IIIb überschreiten; sie sind einer Behandlung zu unterziehen, d.h. zu Konditionieren (z.B. zu Verfestigen); das Eluat des verfestigten Abfalls darf anschließend die Grenzwerte der Eluatklasse IIIb nicht überschreiten; Abfälle der Eluatklasse IV sind generell von einer Deponierung auszuschließen.

#### 6.3.2 Richtlinie für Recycling-Baustoffe

Neben den Kriterien Korngrößenverteilung, Fremdanteil, Frostsicherheit, Festigkeit, gegebenenfalls Bitumengehalt und modifizierter Proctordichte ist sowohl bei Eigen- (alle 2500 t) als auch bei Fremdüberwachung (2x pro Jahr) die Umweltverträglichkeit gemäß ÖNORM S 2072 (siehe Kapitel 6.3.1) nachzuweisen.

Alle Recycling-Baustoffe nach der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] müssen unabhängig von der Güteklasse bei bestimmten Parametern des Eluats die Grenzwerte der **Eluatklasse Ib** erfüllen.

Recycling-Baustoffe mit höherer Eluatklasse können mit Beschränkungen zum Einsatz kommen. Bei einer Verwendung von Recycling-Baustoffen **außerhalb des Grundwasserschwankungsbereiches** können sich einige Parameter auch maximal innerhalb der Grenzen der **Eluatklasse IIa** bewegen. Nachfolgend eine Auflistung der maßgeblichen Parameter des Eluats und der Regelgrenzwerte für die Eluatklasse Ib sowie der Ausnahmegrenzwerte der Klasse IIa. Bei Parametern, wo der Grenzwert für die Eluatklasse IIa nicht eingetragen ist, muß in jedem Fall jener der Eluatklasse Ib eingehalten werden (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Vergleich von Grenzwerten Eluatklassen Ib und IIa gemäß ÖNORM S 2072 [41] für Parameter nach der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17]

Parameter	Grenzwert für die Eluatklasse Ib gemäß ÖNORM S 2072	Grenzwert für die Eluatklasse IIa gemäß ÖNORM S 2072
pH-Wert	5,5 - 11	5,5 - 12
elektrische Leitfähigkeit	150 mS/m	300 mS/m
Gesamtkohlenwasserstoffe	0,2 mg/l	5,0 mg/l
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) (außer bei RB)	0,002 mg/l	-
Chlorid (außer bei RA)	1)	1)
Sulfat (außer bei RA)	1)	1)
Blei gesamt (außer bei RB)	0,1 mg/l	-
Chrom gesamt (außer bei RB)	0,1 mg/l	-
Kupfer gesamt (außer bei RB) <sup>2)</sup>	1,0 mg/l	-

<sup>1)</sup> ...begrenzt durch die elektrische Leitfähigkeit

<sup>2)</sup> ...Der Kupfergehalt wurde laut Baustoff-Recycling Verband in die Liste der zu prüfenden Parameter aufgenommen, da speziell in Österreich die gelbe Farbe der Straßenmarkierung kupferhaltig war. Mittlerweile ist dies aufgrund der Umstellung auf die weiße Straßenmarkierung nicht mehr der Fall.

Bei einer Einbauhöhe von Recycling-Baustoffen > 1,0 m sind geeignete Überwachungsmaßnahmen anzuordnen, wie zum Beispiel Meßsonden, Meßbrunnen oder anderes. Wenn

aufgrund dieser Meßergebnisse eine Beeinträchtigung des Grundwassers zu erwarten ist, sind geeignete Maßnahmen zur Verhinderung zu treffen.

Durch Verfestigungstechnologien kann die Eluatklasse von Materialien herabgesetzt werden. Die verfestigten Baustoffe sind nach genormten Prüfverfahren zu untersuchen. Die ÖNORM S 2072 wird hier aber nur beispielhaft angeführt. Eine Dokumentation der Anwendungsbereiche dieser Materialien ist vorzunehmen.

Auch ist die Verwendung von Materialien mit höheren Eluatklassen gemäß dieser Richtlinie zulässig, sofern die Durchsickerung durch Schichten mit ebendiesen Materialien durch Oberflächenverschluß verhindert wird.

Ein Recycling-Baustoff gemäß dieser Richtlinie gilt als umweltverträglich, wenn er die Anforderungen der Eluatklasse Ib bei bestimmten Parametern erfüllt. Ein Eluat der Klasse Ib kann das Grundwasser gemäß ÖNORM S 2072 <sup>5</sup> "nicht nachteilig beeinflussen". Bei einer höheren Eluatklasse (maximal IIa) müssen die Materialien unter bestimmten Bedingungen außerhalb des Grundwasserschwankungsbereiches eingebaut, verfestigt oder durch Oberflächenverdichtung abgetrennt werden, um eine Auswaschung durch das Grundwasser zu verhindern.

### **6.3.3 Deutsche Richtlinie**

Der deutsche Bundesüberwachungsverband Recycling-Baustoffe nimmt in den "Richtlinien für Recycling-Baustoffe und deren Überwachung" [42] im Unterpunkt 4.2.4 Bezug auf die "Umweltunbedenklichkeit". Aussehen und Geruch der Probe wären stets zu bestimmen. Das DEV-S4 - Verfahren nach der DIN 38 414 Teil 4 müsse nur **im Zweifelsfall** zur Anwendung kommen. Grenzwerte werden nur für den pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit genannt (Tabelle 6-2).

---

<sup>5</sup> ÖNORM S 2072: "Das Eluat der Eluatklasse I besitzt eine Qualität, durch die das Grundwasser hinsichtlich seiner Nutzbarkeit als Trinkwasser nicht nachteilig beeinflusst werden kann."

Tabelle 6-2: Vergleich der zwei in der deutschen Richtlinie [42] enthaltenen Grenzwerte mit den entsprechenden Parametern der ÖNORM S 2072 [41]

Parameter	Angegebener Grenzwert laut [42]	Vergleich mit ÖNORM S 2072 - Ib, [41]
pH-Wert	≥ 6,5	5,5-11
elektrische Leitfähigkeit	300 mS/m	150 mS/m

Bei Verdacht auf weitere umweltbelastende Stoffe sind weitergehende Untersuchungen in entsprechend qualifizierten Prüfstellen erforderlich.

Im Vergleich mit der Österreichischen Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] sind die verpflichtenden Untersuchungen in Deutschland wesentlich weniger streng. Ein Recycling-Baustoff gemäß "Richtlinien für Recycling-Baustoffe und deren Überwachung" [42] soll umweltverträglich sein, genaue Untersuchungen sind jedoch erst bei Verdacht erforderlich. Welche dies sein sollen, wird nicht genannt.

## 6.4 Auslaugversuche

### 6.4.1 Allgemeines

Es gibt mehrere Verfahren, die **Mobilisierbarkeit** von enthaltenen Schadstoffen labor-technisch zu ermitteln. Die Anwendung einer Prüfmethode wird dann sinnvoll sein, wenn die Gegebenheiten in der Praxis wirklichkeitsnah simuliert werden können. Entscheidend für die Wahl eines geeigneten Prüfverfahrens ist, ob sich die Randbedingungen in der Praxis auch im Prüfverfahren wiederfinden.

### 6.4.2 DEV-S4 - Verfahren

Das DEV-S4 - Verfahren [43] wurde ursprünglich für die Bestimmung der **Eluierbarkeit** (Auslaugbarkeit) von Schlamm und Sedimenten mit Wasser in der DIN 38414 Teil 4 "Deutsches Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4)" normiert. Es ist das zur Zeit am meisten verwendete Prüfverfahren zur Bestimmung der Auslaugbarkeit.

Eine Probemenge von etwa 100 g und einer maximalen Korngröße von 10 mm wird mit entionisiertem Wasser vermengt. Das Masseverhältnis von Probe (Trockensubstanz) zu Wasser soll 1:10 betragen. Das Wasser-/Probegemisch wird 24 Stunden lang einer Überkopf-Drehung mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 6 U/min unterzogen. Die Eluationsflüssigkeit wird anschließend filtriert und auf ihre Inhaltsstoffe untersucht.

Bei einer Überschreitung der maximalen Korngröße von 10 mm muß das Material durch geeignete Zerkleinerungsmethoden gebrochen werden.

### **6.4.3 Trogverfahren**

Nach dem Trogverfahren können gemäß der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [44] untersucht werden:

- ungebundene, unverdichtete Mineralstoffe
- gebundene oder verfestigte Probekörper.

Diese Prüfmethode lehnt sich in manchen Punkten an das DEV-S4 - Verfahren an. Das Eluent-/Feststoffverhältnis von 10:1 sowie die Eluationszeit von 24 h entsprechen den Randbedingungen des DEV-S4 - Verfahrens.

Das Untersuchungsmaterial befindet sich in einem Siebeinsatz und wird in einem Trog ausgelaugt. Dies erfolgt durch Einbringung eines Magnetührstabes, welcher durch ein Magnetührwerk mit einer Drehzahl von rund 500 U/min bewegt wird. Ungebundenes, unverdichtetes Material wird gleichmäßig auf dem Siebeinsatz verteilt, gebundene oder verfestigte Probekörper werden mittig auf den Siebeinsatz gestellt. Eine Wasserüberdeckung von 2 cm muß in beiden Fällen gewährleistet sein.

Für die Untersuchung ungebundener, unverdichteter Materialien im Trogversuch benötigt man eine Probemenge von ca. 2000 g. Bei gebundenen, bzw. verfestigten Materialien ist der Probekörper je nach Erfordernis ein Marshallprobekörper, ein Proctorkörper oder ein 10 cm-Würfel, wobei das Verhältnis Oberfläche/Volumen der Prüfkörper möglichst ähnlich sein soll.

Das geforderte Wasser/Feststoffverhältnis von 10:1 und die definierten Probekörperformen ergeben laut *Weigel* [45] höhere notwendige Mengen an demineralisiertem Wasser als beim herkömmlichen DEV-S4 - Verfahren.

#### **6.4.4 Perkolationsverfahren**

Mit dem Perkolationsverfahren kann die Auslaugdynamik eines auslaugbaren Schadstoffes als Funktion der Auslaugzeit untersucht werden. Es ermöglicht die Untersuchung von unverdichteten mineralischen Materialien, die nicht zur Verschlammung neigen.

Das zu untersuchende Material befindet sich in einer Glassäule und wird gleichmäßig mit demineralisiertem Wasser beregnet. Der Versuch wird in drei Schritten mit Wasser-/Feststoffverhältnissen von 0,5:1, 1:1 und 1,5:1 durchgeführt, was ein Gesamtverhältnis von 3:1 ergibt. (Zum Vergleich DEV-S4 - Verfahren: 10:1) Der Versuch wird an drei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt, Trocknungsphasen werden mit Unterdruck simuliert. Das durchgesickerte Perkolat wird aufgefangen und auf Inhaltsstoffe untersucht.

Die wechselnden Durchfeuchtungs- und Trocknungsphasen entsprechen weitgehend den praktischen Zuständen im Straßenkörper [46].

#### **6.4.5 Lysimeterversuche**

Man unterscheidet Laborlysimeter und Feldlysimeter [44].

Bei *Laborlysimetern* wird das zu untersuchende Material in möglichst naturgetreuer Art in eine Säule eingesetzt. Anschließend erfolgt eine Beregnung mit einer Flüssigkeit, die dem Niederschlagswasser der jeweiligen Region entspricht. Das am unteren Ende austretende Eluat wird gesammelt und in regelmäßigen Abständen untersucht.

Bei *Feldlysimetern* wird ein naturgetreues abgegrenztes Versuchsfeld zur Ermittlung der Auswaschung von Schadstoffen untersucht. Das durchgesickerte Niederschlagswasser wird gesammelt und untersucht. Lysimeterverfahren sind sehr zeit- und kostenintensiv, die Ergebnisse sehr genau und praxisgerecht. Verfestigte oder verdichtete Proben können damit nicht untersucht werden. Eine Normung derartiger Verfahren ist nicht bekannt.

#### **6.4.6 pH-stat - Verfahren**

Das pH-stat-Verfahren simuliert den Schadstoffaustrag bei dauernder Auslaugung durch ein saures Medium (z.B. saurer Regen). Dadurch können extreme Randbedingungen, wie z.B. saurer Regen und die damit verbundene stärkere Auslaugung von Schwermetallen

simuliert werden. Mit diesem Versuch können Auslaugungen von mehreren hundert Jahren simuliert werden [45].

#### **6.4.7 VDZ-Durchflußversuch**

Die Prüfflüssigkeit wird mit Druck durch den eingebauten Probekörper gepreßt. Daraus hervorgehende Ergebnisse können nur schwer mit anderen Auslaugungsergebnissen verglichen werden.

#### **6.4.8 ISE-Durchlaufverfahren**

Bei diesem Verfahren wird die Eluationsflüssigkeit über die Versuchsdauer im kontinuierlichen Kreislauf gehalten.

### **6.5 Vergleichende Untersuchungen**

#### **6.5.1 Vergleich Perkolation / ÖNORM S 2072**

Bei diesem Versuch [47] wurden sieben Materialien einem Perkolationsverfahren unterzogen, davon unter anderem drei Recycling-Materialien (Betonabbruch, Betonabbruch und Ziegelbruch) und zwei Naturmaterialien (Basalt und Dolomit). Parallel dazu erfolgte eine Eluation mit den gleichen Materialien gemäß ÖNORM S 2072, um anschließend die Ergebnisse aus beiden Versuchen zu vergleichen.

##### **6.5.1.1 Perkolationsverfahren**

Das Probengut wurde mit dem gesamten Kornspektrum in einer repräsentativen Menge (bis 40 kg) proctorverdichtet in Polyethylenrohre (Durchmesser 28 cm, Höhe 50 cm) eingebaut. Der aus Polyethylen bestehende Boden war zwecks Durchlässigkeit perforiert und wurde mit einem Geotextil versehen, um eine Ausschwemmung von Feinanteilen zu verhindern. In Chargen zu 20 l wurde entionisiertes Wasser aufgebracht, bis ein Feststoff- zu Flüssigkeitsverhältnis von 1:10 erreicht war, gleich, wie es die ÖNORM S 2072 vorschreibt. Um zu gewährleisten, daß Wasser nicht am Rand abfließen konnte, kam eine perforierte Keramikplatte als Abdeckung zur Anwendung.

### 6.5.1.2 Parameter

Das durchgesickerte Wasser (Perkolat) wurde in Chargen zu 20 l auf folgende Parameter untersucht:

- pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit
- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Kohlenwasserstoffe gesamt, Total organic Carbon (TOC)
- Sulfat, Chlorid
- Ca, Mg, K, Na, Al, Ba, Be, Pb, B, Cd, Cr, Fe, Co, Cu, Li, Mn, Ni, P, Ag, Sr, Zn.

### 6.5.1.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die ausgelaugten Frachten aus beiden Versuchen wurden gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, daß die eluatklassenbestimmenden Meßgrößen bei der Eluation nach ÖNORM S 2072 viel höhere Werte ergaben als das Perkolationsverfahren (Tabelle 6-3).

Tabelle 6-3: Gegenüberstellung von Eluationen verschiedener Parameter mit Perkolations- und Eluationsversuch [47]

	Betonaufruch			Betonabbruch			Ziegelbruch		
	P	E	%	P	E	%	P	E	%
Chlorid	47,2	74,0	+57%						
Sulfat	28,1	52,0	+85%				684,2	2270,0	+232%
Calcium	269,7	2309,0	+756%	169,1	3659,0	+2064%	1233,7	2049,0	+66%
Magnesium							61,0	12,5	-79%
Natrium	83,5	66,4	-20%	64,6	85,0	+32%	67,1	42,0	-37%
Kalium	165,1	94,5	-43%	281,5	239,4	-15%	90,4	101,5	+12%
Aluminium	8,2	10,4	+27%	8,3	3,5	-58%	0,2	2,9	+1582%
Bor							0,6	0,6	-14%
Barium	0,3	2,3	+594%						
Zink	0,2	<0,05		0,4	<0,05				
Chrom	0,1	0,4	+186%						

P .....Perkolationsversuch  
 E .....Eluation nach ÖNORM S 2072

Ausgehend von einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 1500 mm simuliert eine Perkolation bis zum Feststoff-/Flüssigkeitsverhältnis von 1:10 einen Zeitraum von 13 - 14 Jahren. Setzt man im Fall einer Straße die tatsächliche Durchlässigkeit sehr hoch mit einem Zehntel an, würde der Perkolationsversuch einen Auslaugungszeitraum von 130 - 140 Jahren simulieren. Dies ist wahrscheinlich für eine Straße ein ausreichend langer Zeitraum.

Unter der Annahme von schlechten Verhältnissen beim Einbau von Recycling-Materialien in eine Straße würden die leicht löslichen Substanzen, wie z.B. Sulfat, Calcium, Natrium, Kalium, Magnesium, Aluminium oder Bor sehr schnell ausgetragen werden. Die dabei ausgetragenen Mengen sind aber durch das genormte Eluationsverfahren viel zu hoch angesetzt und viel eher mit jenen Mengen aus dem Perkolationsverfahren vergleichbar.

Das untersuchte Naturmaterial Basalt war aufgrund von pH-Wert und Aluminiumkonzentration in die erhöhte Eluatklasse Ib einzustufen. Würde man dieses Naturmaterial in einem Gebiet einbauen wollen, wo die Grundwasserkonzentration nicht ebenso erhöht ist, würde dies bedeuten, daß der natürliche Basalt gemäß Beurteilung nach der ÖNORM S 2072 auf einer Deponie der Bauklasse 1 (oder höher) zu entsorgen wäre.

## **6.5.2 Prüftechnische Einflüsse bei der Umweltverträglichkeitsermittlung**

### *6.5.2.1 Probengröße*

Um den Einfluß der Probengröße von Recycling-Baustoffen auf die Ergebnisse einer Auslaugung zu ermitteln, wurde die elektrische Leitfähigkeit ein und desselben RB-Baustoffes mit verschiedenen Körnungen ermittelt [48]. Dabei zeigten sich Unterschiede im Ergebnis von bis zu 200 % (Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: Abhängigkeit der Elektrischen Leitfähigkeit von der Kornklasse [48]

Kornklasse in mm	Elektr. Leitfähigkeit in mS/m	Relation in % ggü. Kornklasse 12,0 - 32,0 mm
12,0 - 32,0	253	
4,0 - 12,0	372	+ 47%
2,0 - 4,0	480	+ 90%
0,063 - 2,0	695	+ 175%
< 0,063	758	+200%

### 6.5.2.2 Probeentnahme

Durch "richtige" Probeentnahme, z.B. gemäß ÖNORM B 3120, können Einflüsse aus unterschiedlichen Kornaufbauten, wie etwa hoher Feinanteil, auf die Auslaugung vermieden werden. Nachfolgende Mindestmengen an Proben sind je nach Korngrößen empfehlenswert. Die eigentliche Prüfmenge für das Labor wird dann erst durch einen entsprechenden Probenteiler hergestellt (Tabelle 6-5).

Tabelle 6-5: Empfohlene Probemengen für Eluierungsversuche in Abhängigkeit vom Größtkorn des zu untersuchenden Materials [48]

Größtkorn in mm	Probemenge in kg
< 16	15 - 25
< 22	25 - 35
< 32	35 - 50
> 32	35 - 50

### 6.5.2.3 Prüfverfahren

Da bei der Erstellung der Richtlinien des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes [17] noch keine praxisrelevanteren Methoden zur Verfügung gestanden sind, wurde bei der Prüfung der Umweltverträglichkeit auf die ÖNORM S 2072, respektive auf das DEV-S4 - Verfahren [43] zurückgegriffen. Der Bezug zur baupraktischen Anwendung ist jedoch nur teilweise gegeben. Alternative Methoden zum DEV-S4 - Verfahren sind erforderlich, um die umwelt- bzw. wasserwirtschaftliche Verträglichkeit von Recycling-Baustoffen realistisch beurteilen zu können.

Die ÖNORM S 2072, die sich auf das DEV-S4 - Verfahren bezieht, schreibt ein Größtkorn von 10 mm vor. Größere Körnungen müssen gebrochen werden. Dies entspricht nicht dem baupraktischen Einsatz eines Recycling-Baustoffs. Die 24 Stunden dauernde Auslaugung durch Über-Kopf-Drehen hat zwar den Vorteil einer geringen Prüfdauer, dieser Prüfablauf simuliert jedoch nicht die Gegebenheiten in der Praxis. Weiters werden dadurch neue Oberflächen geschaffen, die wiederum die Auslaugrate erhöhen.

Das **Perkolationsverfahren** hat folgende Vorteile:

- keine künstliche Erhöhung der Oberfläche
- praxisgerechter Einbau der Korngemische in die Prüfvorrichtung ist möglich
- Kombinationen von Recycling-Baustoffen und Baustoffen aus natürlichen Vorkommen können in entsprechenden Schichtaufbauten nachvollzogen werden.

Hinsichtlich der Methodik sind Eluations - und Perkolationsversuch jedoch nur bedingt vergleichbar.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Ermittlung von Sulfat- und Aluminiumgehalt zweier Materialien (Hochfenschlacke und RB-Material) sowohl mit DEV-S4 - Verfahren als auch mit Perkolationsverfahren gegenübergestellt (Tabelle 6-6). Eine deutlich höhere Freisetzung beim DEV-S4 - Verfahren ist evident. Die beim DEV-S4 - Verfahren erhaltenen Konzentrationen (mg/l) wurden zwecks Vergleichbarkeit der Ergebnisse gemäß Kapitel 6.3.1.4 in Frachten (mg/kg) umgerechnet.

Tabelle 6-6: Vergleich von Frachten aus dem DEV-S4 - Verfahren und dem Perkolationsverfahren [48]

	Sulfat in mg/kg			Aluminium in mg/kg		
	PV	Eluation	%	PV	Eluation	%
Hochfenschlacke	1640	4880	+198%	0,15	13	+8567%
RB-Baustoff	28	52	+86%	8	10	+25%
Ziegelabbruch	684	2270	+232%	0,17	3	+1665%

PV .....Perkolationsversuch  
 Eluation .....DEV-S4 - Verfahren (ÖNORM S 2072)

### 6.5.3 Bauschuttklassifizierung zur Wiederverwertung im Straßenbau

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes [49] wurden von drei Aufbereitungsanlagen in Österreich insgesamt 61 Bauschuttproben genommen. Das Material war vorwiegend mineralischer Hochbauabbruch, bestehend aus Naturstein, Ziegel, Beton und Mörtel. Ziel war es, das Potential an Umweltgefährdung über die Einstufung in Eluatklassen nach ÖNORM S 2072 zu ermitteln.

Zum Vergleich wurden auch 41 typische im Hochbau vorkommende Vergleichsmaterialien (Dämmstoffe, Beläge, etc.) in die Untersuchung miteinbezogen.

#### 6.5.3.1 Modifikation der Eluationsmethode

Bei Eluationen hat die Gewinnung einer **repräsentativen Probe** besondere Bedeutung, eine Veränderung des Zustandes des Probengutes sollte nicht vorgenommen werden. Da die Versuchsanordnung nach ÖNORM S 2072 "Reagenzglasmaßstab" (maximaler Probendurchmesser 10 mm) hat, wurde eine **Modifikation der Eluationsmethode** nach ÖNORM S 2072 vorgenommen, um auch die Untersuchung von ganzen Bauschuttbrocken zu ermöglichen (Tabelle 6-7).

Tabelle 6-7: Modifikation der Eluationsmethode nach ÖNORM S 2072 gemäß [49]

<b>Merkmale</b>	<b>Versuch nach ÖNORM S 2072</b>	<b>modifizierter Versuch nach ÖNORM S 2072</b>
Eluationsdauer	24 h	24 h
Verhältnis Probe/Wasser	1:10	1:10
Schüttelgefäß	1 l Glasflasche	<i>Rohr aus PE</i>
Probenmasse	100 g	<i>3000 g</i>
Wassermenge	1 l	<i>30 l</i>
Korngröße der Proben	max. 10 mm	<i>&gt; 10 mm möglich</i>
Bewegung	Überkopfbewegung der Probengefäße	<i>wechselweise Bewegung des Rohres um die horizontale Achse <math>\pm 22,5^\circ</math></i>
Frequenz	6 U/min	<i>20 U/min</i>

Die Proben wurden teilweise in Grob- und Feinanteile (größer bzw. kleiner 4 mm) fraktioniert, um die Einflüsse der Korngrößenverteilung auf den Schadstofftransport zu untersuchen. Nach der Fraktionierung standen 71 Proben zur Verfügung. Bei den Feinfraktionen kam das herkömmliche Eluationsverfahren nach ÖNORM S 2072 zur Anwendung, bei den Grobfraktionen das oben beschriebene modifizierte Verfahren.

#### 6.5.3.2 Parameter

Von den in der ÖNORM S 2072 aufgelisteten Verfahren wurden "Leitparameter" ausgesucht, die gewährleisten sollten, daß möglichst keine unerwünschten oder giftigen Substanzen unentdeckt bleiben:

- pH
- elektrische Leitfähigkeit
- Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)
- Kohlenwasserstoffe gesamt (KW)
- gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (TOC = Total organic Carbon)  
(nicht in ÖNORM S 2072)
- Schwermetalle: Aluminium, Antimon, Arsen, Barium, Blei, Cadmium, Chrom, Eisen, Nickel, Quecksilber, Selen, Zinn
- Ammonium (NH<sub>4</sub>)
- Nitrat (NO<sub>3</sub>)
- Nitrit (NO<sub>2</sub>).

#### 6.5.3.3 Auswertung

Die Ergebnisauswertung zeigt erwartungsgemäß deutlich **höhere Werte der Feinfraktionen** bei pH, elektrischer Leitfähigkeit, Kohlenwasserstoffe gesamt und TOC.

Bei sämtlichen Schwermetallen, außer bei Aluminium, blieben alle Proben innerhalb der Klasse I. Bei 6 Proben wurde beim Parameter Aluminium der Grenzwert der Klasse Ib überschritten.

Keine Probe überschritt beim Parameter Ammonium die Eluatklasse Ib, bei 79 % der Proben blieb Nitrat innerhalb der Grenzen von Klasse I, bei Nitrit waren dies 97 % (eine Überschreitung von Klasse I, eine von Klasse II).

Es zeigt sich bei gebrochenem Material ein höherer Prozentsatz an Ila-Material, der wahrscheinlich mit der Erhöhung der Feinanteile durch die Brechung zu erklären ist (Tabelle 6-8). Die Feststellung von Eluatklassen nach ÖNORM S 2072 sollte daher grundsätzlich an bereits sortierten und gebrochenen Materialien durchgeführt werden, wobei die Probemenge bei größeren Körnungen mindestens 3 kg betragen sollte.

Tabelle 6-8: Aufteilung der Proben auf Eluatklassen gemäß [49]

Anteil der Proben in %	ELUATKLASSE				
	Ib	Ila	Iib	IIla	IIib
Gesamt	40,8	39,4	12,7	5,6	1,4
Gebrochenes Material	37,8	48,9	11,1	2,2	-

Die Auswertung der Vergleichsproben ergab die folgenden Zusammenhänge zwischen bestimmten Materialien und erhöhten Parametern (Tabelle 6-9).

Tabelle 6-9: Mögliche Ursachen erhöhter Parameter im Eluationsversuch gemäß [49]

erhöhte Parameter	mögliche Ursachen
pH	Mörtel, Beton
elektrische Leitfähigkeit	Mörtel, Beton, Gips, Mauersalze
CSB	Holzwerkstoffe
Kohlenwasserstoff gesamt	Kunststoffe (Rohre, Bodenbeläge, Abdichtungen), bituminöse Abdichtungen, Holzwerkstoffe)
Aluminium	Ziegel, Sand, Beton
Nitrat	Mauersalze

Die maßgeblichen Parameter für die Einstufung der Bauschuttproben sind aus Tabelle 6-10 ersichtlich. Man kann sich laut *Hinterhofer/Loidl/Wildschek* [49] außer bei speziellen Verdachtsfällen auf diese Parameter beschränken.

Tabelle 6-10: Maßgebliche Parameter für die Einstufung von Bauschuttproben laut *Hinterhofer/Loidl/Wildschek* [49]

maßgebliche Parameter laut <i>Hinterhofer / Loidl / Wildschek</i> [49]	Vergleich mit Parametern der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17]
pH-Wert	pH-Wert
elektrische Leitfähigkeit	elektrische Leitfähigkeit
Kohlenwasserstoffe	Gesamtkohlenwasserstoffe
---	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) (außer bei RB)
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	---
Aluminium	---
Nitrat	---
Nitrit	---
---	Chlorid (außer bei RA)
---	Sulfat (außer bei RA)
---	Blei gesamt (außer bei RB)
---	Chrom gesamt (außer bei RB)
---	Kupfer gesamt (außer bei RB)

Auffallend war, daß bei einigen Proben einzig die **Nitrat - oder Nitritwerte** zu einer **Verschlechterung** der Eluatklassifizierung geführt haben (z.B. von Klasse I auf II oder von II auf III), obwohl alle anderen Parameter eine bessere Einstufung ermöglicht hätten. Nach den Richtlinien für Recycling-Baustoffe sind die Prüfparameter Nitrat und Nitrit **nicht verpflichtend**.

Laut [49] wäre eine Modifikation der Anforderungen an Recycling-Baustoffe dringend zu überlegen, da auch **neue Baumaterialien** die Grenzwerte der Eluatklasse Ib überschreiten.

#### 6.5.4 Eluierung von Asphaltgranulat im Praxisversuch

Zwecks Feststellung, inwieweit Ölgehalte, welche im Eluat von Asphalt festgestellt wurden, mit den in der Wirklichkeit auftretenden Ölgehalten übereinstimmen, wurde ein Praxisversuch [50] durchgeführt.

Auf einer 10 x 10 m großen, gegen einen Eckpunkt geneigten abgedichteten Fläche wurden 66 Tonnen Asphaltgranulat lose aufgeschüttet. Die sich über ein Jahr ansammelnden

Sickerwässer wurden aufgefangen und untersucht. Die Ergebnisse wurden mit jenen aus dem DEV-S4 - Versuch erhaltenen Ergebnissen verglichen und gegenübergestellt (Tabelle 6-11).

Tabelle 6-11: Eluierung von Asphaltgranulat im Praxisversuch [50]

<b>Ergebnisgegenüberstellung: Eluation nach DEV-S4 / Praxisversuch Altasphalt, 1 Jahr abgelagert</b>					
<b>Parameter</b>	<b>Dimension</b>	<b>TW-GW</b>	<b>DEV-S4</b>	<b>Praxis- versuch</b>	<b>Viel- faches</b>
Chloride (Cl)	mg/kg	1000	15	0,3	50
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	mg/kg	2500	55	2,53	22
Blei (Pb)	mg/kg	0,5	0,1	0,0005	200
Natrium (Na)	mg/kg	500	52	0,23	226
Calcium (Ca)	mg/kg	2000	161	0,6	268
<b>aliphatische Kohlenwasserstoffe</b>	<b>mg/kg</b>	<b>1</b>	<b>4,5</b>	<b>0,0112</b>	<b>402</b>
polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	mg/kg	0,002	n.nwb.	n.nwb.	-
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	mg/kg	-	120	4,75	25

TW-GW .....Trinkwassergrenzwert für DEV-S4

DEV-S4 .....Eluierte Menge nach DEV-S4

Praxisversuch .....Im Praxisversuch ausgewaschene Menge

Vielfaches.....Verhältnis der Ergebnisse nach DEV-S4 und Praxisversuch

n.nwb.....nicht nachweisbar

Der Versuch zeigt, daß der Gehalt an aliphatischen Kohlenwasserstoffen (ermittelt mit DEV-S4) als einziger gegenüber dem Trinkwassergrenzwert überschritten war.

Die durch das Regenwasser innerhalb eines Jahres ausgelaugten Konzentrationen lagen jedoch um ein Vielfaches niedriger, als es das DEV-S4 - Verfahren ausweist.

Bei der Ablagerung von Altasphalt treten nur sehr geringe Beeinträchtigungen gegenüber der Umwelt auf, die allenfalls durch aliphatische Kohlenwasserstoffe hervorgerufen werden [50].

### **6.5.5 Umweltverträglichkeit von Ausbauasphalt**

Die großen anfallenden Mengen an Ausbauasphalt stellen wertvolle Recycling-Baustoffe dar. Die vor der Wiederverwendung erforderliche Zwischenlagerung macht das Wissen um die Umweltverträglichkeit erforderlich, da die Straßenoberfläche durch die Benützung durch Kraftfahrzeuge und damit verbundene Einflüsse wie Mineralölprodukte, Chemikalien, Gummiabrieb oder Schwermetalle kontaminiert worden sein kann. Im Rahmen eines vom Umweltministerium beauftragten Versuchs sollten die tatsächlichen Belastungen des Altasphalts anhand eines repräsentativen Querschnitts an Proben aus ganz Österreich ermittelt werden, teerhaltige Proben sollten mit einbezogen werden [51].

Die Untersuchung von 35 Proben gemäß ÖNORM S 2072 ergab bei 48 % der Proben Eluatklasse I, bei 40 % Eluatklasse II, bei einer Probe Eluatklasse III, und bei drei Proben eine Überschreitung der Eluatklasse IIIa. Die eine Probe mit Klasse III und die drei Proben mit Überschreitung von Klasse III waren **teerhältig**. Der Inhaltsstoff Teer ist oft schon am Geruch zu erkennen, die Größen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Gesamtkohlenwasserstoffe (KW) sind in dieser Hinsicht kritische Größen.

Die Untersuchung einer zweiten Versuchsreihe ergab, daß fast 70 % der bitumen gebundenen Asphalte ohne Vorkehrungen gelagert werden können (Eluatklasse I). Der Rest muß auf abgedichteten Deponien der Bauklasse III gelagert werden, wobei das Sickerwasser nach einfacher Behandlung durch einen Sandfang einem Vorfluter zugeführt werden kann (Eluatklasse II).

Eine Kontaminierung mit Mineralölen durch den Straßenverkehr ist anhand der kritischen Größe Gesamtkohlenwasserstoffe (KW) erkennbar.

Ausbauasphalt stellt einen wertvollen Recycling-Baustoff dar, der laut *Gregori* [51] hinsichtlich Umweltverträglichkeit als unbedenklich einzustufen ist.

### **6.5.6 Mobilisierbarkeit von Schwermetallen**

Bei diesem Forschungsprojekt [52] wurde das Auslaugverhalten mineralischer Recyclingmaterialien und daraus hergestellter Mörtel und Betone untersucht. Das Eluationsverhalten von Recycling-Brechsand mit der Körnung 0/5 mm wurde mit dem der Körnung 5/45

verglichen, um herauszufinden, ob sich umweltrelevante Stoffe verstärkt in der feineren Fraktion anreichern, und ob sich diese in ihrer Mobilisierbarkeit unterscheiden.

Zu diesem Zweck wurde Betonsplitt mit Schwermetallgehalten in der Größenordnung praxisüblicher Betone durch Zudotierung von leicht löslichen Schwermetallsalzen künstlich hergestellt. Eluierbares unter extremen Bedingungen (Korngröße  $< 125 \mu\text{m} = 1/8 \text{ mm}$ ,  $\text{pH}=4$ ) wurde mit den Gesamtgehalten der Proben verglichen, und es zeigte sich, daß trotz der großen Oberfläche lediglich ein kleiner Teil von den in den Proben enthaltenen Schwermetallgehalten mobilisiert werden kann.

Weiters wurde bei der Verwendung von Recyclingsand als Betonzuschlag festgestellt, daß die Auslaugung von Schwermetallen weitgehend unabhängig von der tatsächlich vorhandenen Menge dieser Bestandteile ist, sondern dafür vielmehr die physikalische und chemische Einbindung der Schwermetalle in die Mörtelmatrix verantwortlich ist.

Die Ergebnisse der Eluation wurden mit jenen aus Standtests (Sickerversuch mit 58 Tagen Dauer, und achtmaligem Eluententausch) verglichen. Die Mobilisierbarkeit von Schwermetallen durch Eluation unterschied sich von der durch Standtests in etwa durch den Größenordnungsfaktor von **zwei Zehnerpotenzen**.

Bei der Aufbereitung von Altbeton zu Betonsplitt erhöhen sich mit der Anreicherung von Zementstein in den feineren Fraktionen auch die Schwermetalle (Gesamtgehalte), wobei die Mobilisierbarkeit dieser aber nicht in gleichem Maße wächst.

Nachfolgend ein Auszug aus den Ergebnissen der Untersuchungen mit Beton-/Mörtelproben. Ermittelt wurden Gesamtgehalt, Eluierbares unter extremen Bedingungen ( $< 125 \mu\text{m}$  und  $\text{pH}=4$ ) und aus Standtests mit einer Dauer von 58 Tagen und achtmaligem Eluententausch. Die Einheit beträgt  $\text{mg/kg}$  (Tabelle 6-12).

Tabelle 6-12: Vergleich von Gesamtgehalten und tatsächlicher Mobilisierbarkeit von Schwermetallen bei Beton-/Mörtelproben [52]

Prüfgröße	Gesamtgehalt	Eluierbares (E)	Standtest (S)	Vielfaches E/S
Chrom Cr	21	3,3	0,02	165
Zink Zn	117	52	0,13	400
Kupfer Cu	6	3	0,02	150

## 6.6 Schlußfolgerung aus den Untersuchungen

### 6.6.1 Kritik am Einsatz des DEV-S4 Verfahrens gemäß ÖNORM S 2072

In den beschriebenen Versuchen zeigt sich, daß bei jedem Vergleich zwischen Auslaugungen nach dem DEV-S4 - Verfahren und alternativen Verfahren das DEV-S4 - Verfahren **höhere Auslaugungsraten** in Größenordnungen von bis zu zwei Zehnerpotenzen liefert (Tabelle 6-1, Tabelle 6-11, Tabelle 6-12).

Die Ursachen dafür sind:

- der nicht praxismgerechte maximale Korndurchmesser
- das 24 stündige Über-Kopf-Drehen
- keine Probenrepräsentativität.

#### 6.6.1.1 Maximaler Korndurchmesser

Die Dimensionierung des Prüfverfahrens nach DIN 38 414 Teil 4 stammt aus der Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung [43], wofür eine maximale Korngröße von 10 mm wahrscheinlich ausreicht.

Der maximale Korndurchmesser von 10 mm ist für aufzubereitende Baurestmassen jedoch nicht praxismgerecht. Die Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] definiert Baustoffe mit maximal 63 mm Korndurchmesser. Da bei einer Überschreitung eine Zerkleinerung durch geeignete Zerkleinerungsmethoden, wie Backenbrecher oder Mörser erforderlich wird, werden künstlich zusätzliche Oberflächen geschaffen. Aus Tabelle 6-4 ist ersichtlich, daß ein maßgeblicher Parameter für die Auslaugungsraten der maximale Korndurchmesser ist. Die elektrische Leitfähigkeit erhöhte sich mit kleiner werdendem Korndurchmesser bis auf den dreifachen Wert. Somit werden durch die erforderliche Zerkleinerung Auslaugungsraten künstlich erhöht.

Gemäß *Hinterhofer/Loidl/Wildscheck* [49] hat die Gewinnung einer repräsentativen Probe bei Eluationen eine besondere Bedeutung, eine Veränderung des Probengutzustandes sollte nicht vorgenommen werden. Aufgrund der im DEV-S4 Verfahren vorgeschriebenen Prüfgutzerkleinerung wird daher die Untersuchung einer repräsentativen Probe verhindert.

#### 6.6.1.2 Oberflächen durch Abrieb beim Über-Kopf-Drehen

Der Effekt der künstlichen Oberflächenvergrößerung wird durch das 24-stündige Über-Kopf-Drehen verstärkt. Auch diese Vorgangsweise nach der DIN 38 414 Teil 4 stammt aus der Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung [43] und kann für Recycling-Baustoffe nicht in gleichem Maße geeignet sein. Der Vorteil dieser Art der Auslaugung ist zwar die relativ kurze Prüfdauer; diese geht jedoch zu Lasten einer praxisgerechten Untersuchung.

#### 6.6.1.3 Zusammenfassung

Der Vorbemerkung der ÖNORM S 2072 [41] ist folgender Satz zu entnehmen:

*"Die Eluatqualität erlaubt eine Vorhersage über die im allfällig auftretenden Sickerwasser möglichen Inhaltsstoffe, nicht aber über deren Konzentration und zeitliches Auftreten."*

Für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit kann nur eine Aussage über die tatsächliche Auswaschung eines Recycling-Baustoffs durch Sickerwasser maßgeblich sein. Das zeitliche Auftreten ist in dieser Hinsicht wesentlich und wird durch diese ÖNORM nicht beantwortet.

Durch das DEV-S4-Verfahren werden laut *Hiersche/Wörner* [40] bautechnische und besonders straßenbauspezifische Praxisbedingungen labortechnisch hinsichtlich Korngröße und Einbaubedingungen **nicht** simuliert.

### 6.6.2 Mögliche Modifikationen des DEV-S4 Verfahrens

#### 6.6.2.1 Prüfmethoden

Um den in 6.6.1.1 und 6.6.1.2 beschriebenen unerwünschten Effekten der vorgeschriebenen Prüfmodalitäten nach ÖNORM S 2072 entgegenzuwirken, könnte man gemäß Tabelle 6-13 Modifikationen für die Eluierung grober Fraktionen (z.B. > 4 mm) von Baurestmassen vornehmen (siehe auch Tabelle 6-7).

Tabelle 6-13: Mögliche Verbesserungen des DEV-S4 Verfahrens nach *Hinterhofer/Loidl/Wildscheck* [49]

Parameter	Modifikation
Korngröße der Proben	> 10 mm möglich
Schüttelgefäß	Rohr aus Polyethylen
Probenmasse	3000g
Wassermenge	30 l
Bewegung	wechselweise Bewegung des Rohres um die horizontale Achse $\pm 22,5^\circ$
Frequenz	20 U/min

### 6.6.2.2 Probeentnahme

Die ÖNORM S 2072 schreibt eine Mindestprobemenge von 100 g vor.

Gemäß *Travnicek* [48] und Tabelle 6-5 müßte man Probenmengen je nach Korngrößen bis zu 50 kg nehmen, um eine repräsentative Probe zu erhalten. Die eigentliche Prüfmenge für das Labor wäre durch einen entsprechenden Probenteiler herzustellen.

### 6.6.3 Alternative Verfahren

#### 6.6.3.1 Trogverfahren

Dieses Verfahren, bei dem unbewegtes Prüfgut in bewegter Flüssigkeit ausgelaugt wird, hat folgende Vorteile gegenüber dem DEV-S4 - Verfahren:

- leichtere Handhabung größerer Probenmassen
- Prüfbarkeit unzerkleinerter gebundener Materialien
- keine Nachzerkleinerung durch die Prüfung.

Das Trogverfahren (Kapitel 6.4.3) wird gemäß der deutschen Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [44] das DEV-S4-Verfahren möglicherweise ersetzen, sofern sich die Grenzwerte übertragen lassen.

#### 6.6.3.2 Perkulationsverfahren

Das Perkulationsverfahren hat laut *Travnicek* [48] (siehe Kapitel 6.5.2.3) folgende Vorteile gegenüber dem DEV-S4 - Verfahren:

- keine künstliche Erhöhung der Oberfläche
- praxisgerechter Einbau der Korngemische in die Prüfvorrichtung ist möglich
- Kombinationen von Recycling-Baustoffen und Baustoffen aus natürlichen Vorkommen können in entsprechenden Schichtaufbauten nachvollzogen werden
- Bestimmbarkeit der Eluationsdynamik (zeitlicher Verlauf der Konzentration der ausgelaugten Stoffe).

Das Perkulationsverfahren wird von der deutschen Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [44] wegen des erforderlichen Zeitaufwandes als Routineverfahren nicht für geeignet gehalten. Im Vergleich zur 24-stündigen Auslaugdauer des DEV-S4-Verfahrens dauert das Perkulationsverfahren drei Tage [46]. Die erforderliche Prüfdauer des in Kapitel 6.5.1 beschriebenen Perkulationsverfahrens konnte dem Ergebnispapier der Untersuchung von *Holnsteiner* [47] nicht entnommen werden.

#### **6.6.4 Maßgebliche Parameter**

Die Parameter **pH-Wert**, **elektrische Leitfähigkeit** werden in den meisten Literaturquellen als maßgebliche und aussagekräftige Parameter genannt und sind daher unumstritten.

Die **Kohlenwasserstoffe (PAK, Gesamt)** sind aufgrund ihrer Aussage über Teer- bzw. Öl-Kontamination speziell bei Recycling-Asphalt unerlässlich.

Gemäß *Hinterhofer/Loidl/Wildscheck* [49] sind auch **Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)**, **Aluminium**, **Nitrat und Nitrit** maßgebliche Parameter, da diese in der durchgeführten Untersuchung mehrfach erhöht waren. Diese sind in der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] nicht vorgeschrieben.

In der Richtlinie für Recycling-Baustoffe [17] schon vorgeschrieben, aber aufgrund der nunmehr weißen anstatt der früher gelben Straßenmarkierung (Tabelle 6-1) wahrscheinlich nicht mehr erforderlich, ist der Parameter **Kupfer**. Die vorgeschriebenen Parameter **Chlorid und Sulfat** sind gemäß ÖNORM S 2072 [41] ohnehin durch die elektrische Leitfähigkeit begrenzt.

### **6.6.5 Zusammenfassung**

Die Überprüfung der Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen nach dem in Österreich derzeit vorgeschriebenen und genormten Verfahren nach ÖNORM S 2072 stellte sich insgesamt als nicht praxisgerecht heraus. Modifikationen, wie z.B. in Kapitel 6.6.2 wären dringend notwendig, der vollständige Umstieg auf ein anderes Verfahren (Trogverfahren oder Perkolationsverfahren) wird schon seit geraumer Zeit überlegt.

Nur durch das Zusammenspiel von

- bautechnischen Anforderungen
- Wirtschaftlichkeit
- Umweltverträglichkeit

können sich Sekundärbaustoffe im bestehenden System der Qualitätssicherung gegenüber Primärbaustoffen als gleichwertig erweisen.

## **7 ÖKOBILANZ VON RECYCLING-BETON**

In Kapitel 4, "Vom Altbeton zum Recycling-Beton", wurde dargestellt, unter welchen technischen Voraussetzungen die Verwendung von Recyclingbetongranulat als Zuschlag für neuen Beton sinnvoll ist. In Kapitel 5, "Methodik von Ökobilanzen", wurde der derzeitige Stand der ISO-Normung auf dem Gebiet der Ökobilanzierung zusammengefaßt.

Mit diesen Grundlagen wird im folgenden Kapitel der Versuch unternommen, eine Ökobilanz für Recyclingbeton zu erstellen. Um den derzeit aktuellen Stand der Normung auf dem Gebiet der Ökobilanzen möglichst stark einfließen zu lassen, richtet sich der inhaltliche Aufbau nach der in Kapitel 5 beschriebenen ISO-Normung. Außerdem erfolgt eine Dokumentation nach den Vorgaben des „Standardberichtsboogens für produktbezogene Ökobilanzen“ des Umweltbundesamtes Berlin [53]. Dadurch sollen die Nachvollziehbarkeit und Transparenz gewährleistet werden.

Ziel dieser Untersuchung ist, Aussagen darüber zu machen, ob und unter welchen Bedingungen das Recycling von Betonabbruch im Hinblick auf eine Verwendung als Betonzuschlag ökologisch sinnvoll ist.

### **7.1 Standardberichtsbogen**

Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten, Ökobilanzen zu erstellen und zu dokumentieren, und auch wegen der bis zu diesem Zeitpunkt aufgetretenen Probleme mit Ökobilanzen, wurde im Jahr 1995 vom deutschen Umweltbundesamt in Berlin der „Standardberichtsboogen für produktbezogene Ökobilanzen“ [53] herausgegeben. Dieser sieht für den Ersteller einer Ökobilanz ein Fragengerüst vor, das ihn dazu anhalten soll, seine Arbeit ausreichend nachvollziehbar und auch glaubwürdig zu dokumentieren.

Dieser Standardberichtsboogen wurde im Februar 1996 auch als Entwurf für die neue Norm DIN 33926 herausgegeben [54]. Inhaltlich entspricht dieser Normenentwurf genau dem Standardberichtsboogen des Umweltbundesamtes Berlin [53]

Folgende, bei der Erstellung früherer Ökobilanzen aufgetretene Probleme, führten zur Erstellung des Standardberichtsboogens:

- fehlende Übersichtlichkeit, Nutzungsfreundlichkeit und Vergleichbarkeit

- fehlende Orientierungshilfe
- fehlende Darstellung kritischer Annahmen und Vorgangsweisen
- fehlende Transparenz und Nachvollziehbarkeit.

Bei der Erstellung des Standardberichts bogens ergaben sich, aus den Problemen abgeleitet, folgende Anforderungen [53]:

- Überschaubarkeit (d.h. begrenzter Umfang)
- Verständlichkeit
- Nachvollziehbarkeit
- intersubjektive Orientierungshilfe
- intersubjektive vergleichbare Herstellbarkeit
- Glaubwürdigkeit
- Trennung zwischen Deskription und Würdigung
- Erklärung und Erläuterung von Aufbau, Vorgehen und Fachbegriffen.

Der inhaltliche Aufbau des vom Umweltbundesamt vorgeschlagenen Standardberichts bogens [53] gliedert sich wie folgt:

- **Titelblatt:**  
zur schnellen Erfassung des Themas (Untersuchungsgegenstand, Bilanzobjekte, bibliographische Angaben zur Studie selbst, Angaben zu den Autoren)
- **Teil A - Allgemeine Angaben:**  
allgemeine Angaben zur Studie, wie z.B. Titel, Autoren oder Verfügbarkeit
- **Teile B bis E:**  
Vorgehensweise nach DIN, SETAC<sup>6</sup> oder ISO
- **Teil F - Kritische Anmerkungen und Würdigung:**  
für abschließende kommentierende Hinweise des Erstellers des Standardberichts bogens
- **Teil G - Stellungnahme der Autoren:**  
Möglichkeit einer Replik der Autoren der Ökobilanz auf den Standardberichts bogen.

---

<sup>6</sup> Society of Environmental Toxicology and Chemistry

Wie bereits erwähnt, bezieht sich die Vorgehensweise der Teile B bis E auf die entsprechende ISO-Normung, die im Kapitel 5.3 beschrieben ist.

Die Erstellung der Ökobilanz und deren Beschreibung im Standardberichtsbogen sollen gemäß Umweltbundesamt Berlin [53] grundsätzlich von unterschiedlichen Personen durchgeführt werden, um Glaubwürdigkeit und Objektivität nach außen hin zu erhöhen. Die nachfolgend durchgeführte Ökobilanz über Recycling-Beton wird zwar durch die Beantwortung der Fragen des Standardberichtsbogen dokumentiert, kann jedoch in diesem Fall nicht durch eine andere Person als den Autor der Ökobilanz erfolgen.

Die im Kapitel 7.1 beschriebenen Teile A bis G gliedern sich in Unterpunkte, in denen spezifische Fragen durch Ankreuzen oder Ausfüllen zu beantworten sind. Zwecks Übersichtlichkeit werden anschließend nicht alle angegebenen Antwortalternativen, sondern nur die zutreffende Antwort und gegebenenfalls die Erläuterung angegeben.

Fragen, die im Standardberichtsbogen nicht eindeutig beantwortet werden können, sollen mit einem "?" versehen werden, Fragen zu denen keine Antworten gegeben werden können, sollen unbeantwortet bleiben.

Die nachfolgende Abbildung 7-1 zeigt das im Standardberichtsbogen vorgeschlagene Deckblatt, ausgefüllt mit den für diese Arbeit zutreffenden Daten.

<p><b>Allgemeine bibliographische Angaben zur Produktbilanz:</b></p> <p>Autor: .....<i>Robert Rosenberger</i></p> <p>Erscheinungsjahr: .....<i>1998</i></p> <p>Titel: .....<i>Ökobilanz von Recycling-Beton</i></p> <p>Erscheinungsort: .....<i>Wien</i></p> <p>Verlag: .....<i>Selbstverlag TU-Wien, Institut 206</i></p>
<p><b>Untersuchungsgegenstand:</b></p> <p><i>Baustoff-Recycling</i></p>
<p><b>Bilanzobjekt(e):</b></p> <p><i>Beton mit Zuschlag aus Recyclingbetongranulat und Natursand</i></p> <p><i>Beton mit Zuschlag aus reinem Primärmaterial</i></p>
<p><b>Autor(en) des Standardberichts bogens:</b></p> <p>Name (ggfs. Institution): .....<i>Robert Rosenberger</i></p> <p>Straße: .....<i>Karlsplatz 13 / 206</i></p> <p>Ort: .....<i>A-1040 Wien</i></p> <p>Tel.-Nr.: .....<i>588 01 / 3387</i></p> <p>Fax-Nr.: .....<i>505 67 26</i></p> <p>Ansprechpartner: .....<i>Dr. Bruckner</i></p>

Abbildung 7-1: Deckblatt zum Standardberichts bogen [53]

Im Teil A des Standardberichts bogens [53] sind allgemeine Angaben zur gegenständlichen Ökobilanz zu machen:

**TEIL A. ALLGEMEINE ANGABEN**

**A.1. Auftraggeber**

Name:.....*Univ.-Prof. Dipl.-Ing. DDr. Ulrich Schneider*

Name:.....*Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner*

**A.2. Verfasser der Studie**

Name:.....*Robert Rosenberger*

**A.3. Verfügbarkeit der Studie**

(X).....allgemein zugänglich

**A.4. Aktualisierung einer früheren Studie**

(X).....Nein

**A.5. Seitenumfang der Studie**

.....*160* Seiten

**A.6. Sprache der Studie**

ursprüngliche Sprache:.....*Deutsch*

Übersetzungen:.....*keine*

**A.7. Bezugsquelle**

Name:.....*Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU-Wien*

**A.8. Bezugspreis**

.....*500,- ATS*

## 7.2 Definition von Ziel und Umfang

### *Allgemeine Zielsetzung*

Ziel dieser Ökobilanz ist eine Aussage, inwieweit die Verwendung von Recyclingbetongranulat als Betonzuschlag ökologisch sinnvoll ist. Anhand eines Vergleichs der zwei möglichen Vorgangsweisen nach einem Anfall von Baurestmassen, die bei einem Auf- oder Abbruch anfallen, soll aufgezeigt werden, welche Vor- und Nachteile das Recycling bzw. die Deponierung von Baurestmassen mit sich bringen.

### *7.2.1 Untersuchungsrahmen*

Die Entscheidung, ob Baurestmassen einer Verwertung zugeführt oder deponiert werden, ist spätestens nach dem Abbruch (Hochbau) oder Aufbruch (Tiefbau, Straßenbau) eines Bauwerkes zu fällen.

Die angestrebte Vergleichbarkeit der zwei möglichen Vorgangsweisen (Recycling oder Deponierung) erfordert möglichst gleiche Rahmenbedingungen hinsichtlich Ausgangs- und Endsituation. Sofern ein Bauwerksab- oder -aufbruch erforderlich ist, liegt es nahe, daß das zuvor überalterte oder schadhafte Objekt durch ein neues ersetzt werden muß. Daher wird angenommen, daß unabhängig von der Entscheidung für Recycling oder Deponierung die Herstellung von neuem Beton einer bestimmten Güteklasse - in diesem Fall Beton B 300 - erforderlich ist. Folgende Anfangs- und Endsituationen werden somit den beiden nachfolgend beschriebenen Szenarien "Recycling" oder "Deponierung" gleichermaßen zugrunde gelegt:

- erforderlicher Ab- oder Aufbruch eines Betonbauwerkes
- Herstellung von unbewehrtem Beton der Güteklasse B 300.

Die Systemgrenze endet genau nach der Herstellung des Frischbetons und vor dem Einbau durch eine Betonpumpe oder durch Krankübel, da der Einbau für beide Szenarien - unabhängig ob Recyclingbeton oder Beton mit Zuschlag aus reinem Naturmaterial - methodisch gleich ist.

Die Herstellung des ursprünglichen Betons und die Nutzung bis zum Abbruch werden nicht in die Systemgrenzen einbezogen, da diese Voraussetzungen bei beiden Szenarien gleichermaßen als gegeben angenommen werden können.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Eignung der Baurestmassen zur Aufbereitung ist eine selektive Vorgangsweise beim Ab- oder Abbruch (z.B. gemäß dem "Leitfaden Verwertungsorientierter Rückbau" [21]). Diese dient dazu, möglichst sortenreine Baurestmassen zu erhalten und wird im Szenario "Recycling" vorausgesetzt. Methoden, wie Abreißen ohne vorhergehenden Rückbau oder Sprengungen liefern vermischte Baurestmassen, die sich nur mehr bedingt, weil nur mit großem Aufwand, für eine Aufbereitung eignen und im Regelfall deponiert werden müssen. Ein selektiver Rückbau wäre demgemäß für das Szenario "Deponierung" nicht erforderlich. Da jedoch für beide Szenarien die gleiche Ausgangssituation gelten soll, bei der dem Entscheidungsträger sowohl die Möglichkeit des Recyclings als auch die der Deponierung offensteht, wird bei beiden Szenarien von der Gewinnung sortenreinen Betonabbruchs ausgegangen.

### **7.2.2 Szenario „Recycling“**

Im ersten Szenario „Recycling“ fällt die Entscheidung nach dem Abbruch zugunsten der Aufbereitung der angefallenen Baurestmassen aus. Je nachdem, ob eine mobile Aufbereitungsanlage zur Verarbeitung des Auf- oder Abbruchs an Ort und Stelle zur Verfügung steht oder ob eine entfernte stationäre Aufbereitungsanlage angefahren werden muß, sind unterschiedliche Transportwege erforderlich. Hier wird der günstigste Fall, die Aufbereitung am Ort des Auf- oder Abbruchs angenommen. Sollte dies nicht möglich sein, wären noch zusätzliche Transporte (zum Ort der Aufbereitung, Recyclingmaterial zur Betonherstellung) erforderlich.

Der Transport der mobilen Recyclinganlage zur Baustelle wird nicht berücksichtigt. Die Recyclinganlage wird als Teil der Baustelleneinrichtung angesehen, deren Transporte oder Energieaufwände für Auf- und Abbauten nicht in die Systemgrenzen einbezogen werden. Sehr wohl wird jedoch der Betrieb der mobilen Aufbereitungsanlage im Bilanzrahmen berücksichtigt.

Wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben, eignet sich der bei der Aufbereitung von Baurestmassen erhaltene Brechsand (0/4) nicht als Zuschlag für die Herstellung von neuem Beton. Sofern

man diesen jedoch durch Natursand (0/4) ersetzt, kann dieser in Verbindung mit der aufbereiteten Betonsplittfraktion (z.B. 4/22) als Zuschlag für die Betonherstellung verwendet werden. Daher muß auch die Rohstoffgewinnung des Natursandes 0/4 berücksichtigt werden.

Da die nach dem Abbruch anfallenden Baurestmassen in diesem Szenario aufbereitet werden, entfällt die Deponierung und auch der dafür notwendige Transport. Jener Anteil, der nach der Aufbereitung dennoch deponiert werden muß, wird aufgrund der vorausgesetzten Gewinnung von sortenreinem Betonabbruch als sehr gering angenommen und daher vernachlässigt.

Nach der Anlieferung der erforderlichen Mengen an Zement und Wasser sowie der Frischbetonherstellung steht ein Kubikmeter Recyclingbeton B 300 am Ende des zu bilanzierenden Lebensabschnittes.

Die einzelnen Module (Lebenszyklusstufen) des Szenarios "Recycling" und deren Anordnung sind in Abbildung 7-2 dargestellt. Grundsätzlich werden in Modulen ein oder mehrere Prozesse zusammengefaßt, wie z.B. Zementherstellung, Rohstoffgewinnung oder Transport. Die zugehörigen Stoff- und Energieflüsse werden in den entsprechenden Input- und Outputtabellen bilanziert. Obwohl die Hauptkomponenten von Beton Wasser, Zement und Zuschlag sind, werden nur die Zementherstellung und die Zuschlagsgewinnung als eigene Module angesetzt. Da Wasser praktisch an jeder Baustelle zur Verfügung steht, wird kein eigenes Modul Wasser definiert, sondern die für den Beton erforderliche Wassermenge als Stoff-Input bei der Betonherstellung einbezogen.

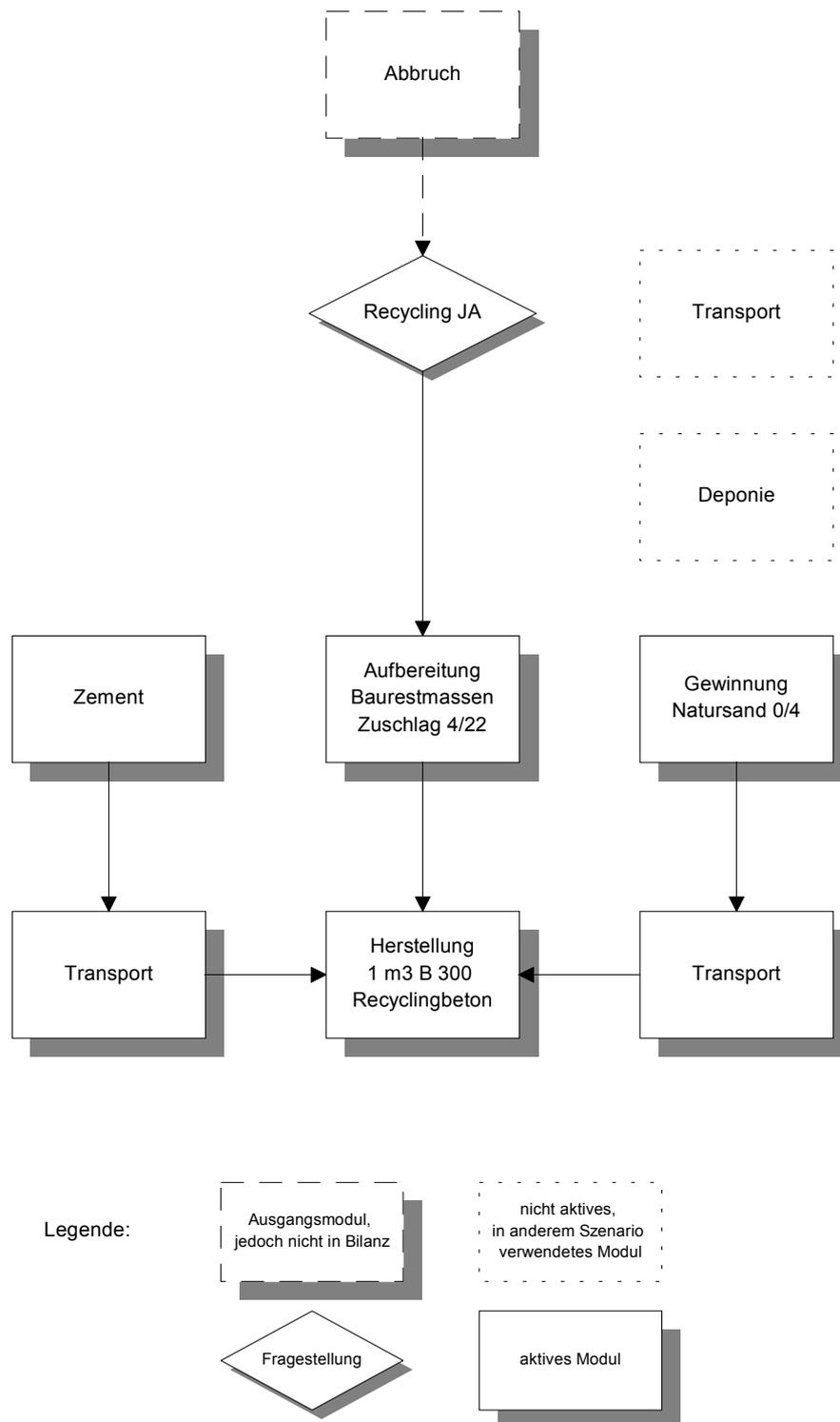


Abbildung 7-2: Szenario "Recycling", keine Deponierung, Betonzuschlag zum Teil aus Recyclingmaterial

### **7.2.3 Szenario „Deponierung“**

Im zweiten Szenario „Deponierung“ werden die beim Abbruch anfallenden Baurestmassen per Transport auf eine Deponie gebracht. Mögliche Gründe dafür sind, daß z.B. keine Recyclinganlage zur Verfügung steht oder daß die Qualität der Baurestmassen für eine Aufbereitung nicht geeignet ist. Das Modul "Aufbereitung Baurestmassen" wird in diesem Szenario nicht verwendet.

Der Betonzuschlag kommt zur Gänze aus der Rohstoffgewinnung. Mit der erforderlichen Menge Zement und Wasser wird ein Kubikmeter Beton B 300 hergestellt. Die einzelnen Module (Lebenszyklusstufen) des Szenarios "Deponierung" und deren Anordnung sind in Abbildung 7-3 dargestellt. Für Wasser wurde wie beim Szenario "Recycling" kein eigenes Modul angesetzt, sondern die erforderliche Wassermenge als Stoff-Input bei der Betonherstellung aufgenommen.

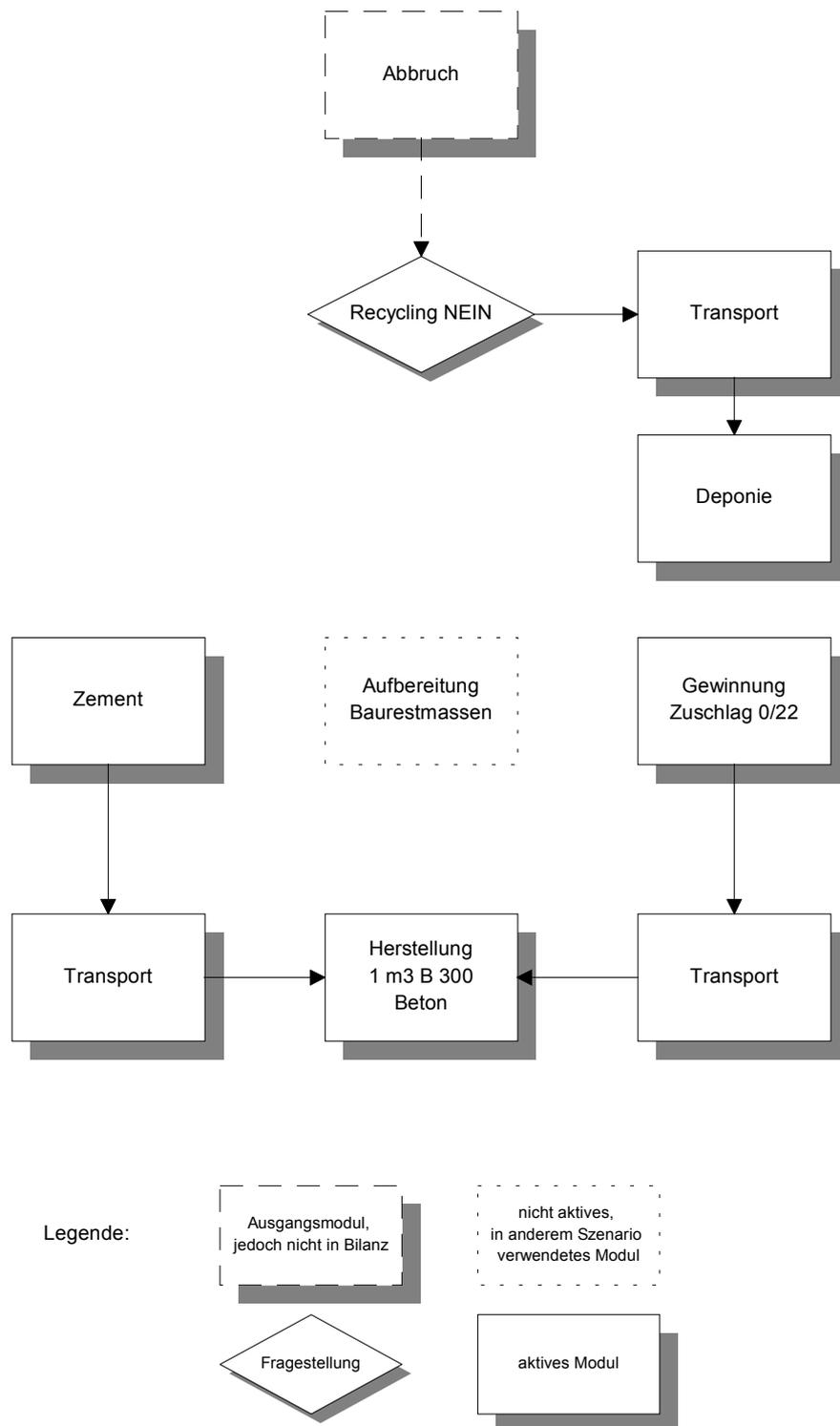


Abbildung 7-3: Szenario "Deponierung", kein Recycling, Beton zu 100 % aus Naturzuschlag

### 7.2.4 Funktionale Einheit / Betonrezepturen

Die funktionale Einheit ist bei beiden beschriebenen Szenarien 1 m<sup>3</sup> Beton der Güteklasse B 300 mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Zuschläge:

– **Szenario „Recycling“:**

Herstellung von 1 m<sup>3</sup> unbewehrtem Beton B 300,  
Zuschlag: Natursand (0/4) und Betonrecyclingsplitt (4/22)

– **Szenario „Deponierung“:**

Herstellung von 1 m<sup>3</sup> unbewehrtem Beton B 300,  
Zuschlag: reines Primärmaterial (0/22)

Für die Ermittlung der Zusammensetzung der Betoninhaltsstoffe Wasser, Zement und Zuschlag wird nachfolgend eine Betonrezeptur gemäß [55] ermittelt:

Betongüte .....	B 300
Zementgüte.....	Z 275
W/Z-Wert gewählt.....	0,52
Größtkorn .....	22 mm
Konsistenz .....	K 3 (plastisch)
Gesamtwasser für 1 m <sup>3</sup> .....	190 l/m <sup>3</sup>
Zementgehalt .....	365 kg/m <sup>3</sup>
Frischbetondichte .....	2450 kg/m <sup>3</sup>
Zuschlaganteil k .....	5,19
Mischungsverhältnis .....	1 : k : w = 1 : 5,19 : 0,70
Zuschlag 0/22 .....	1894 kg/m <sup>3</sup>

Die gewählte Rezeptur trifft für den Beton des Szenarios "Deponierung" zu, bei dem der Zuschlag zur Gänze aus Primärmaterial der Fraktion 0/22 besteht (Tabelle 7-1). Die Sieblinie soll dabei in der Mitte der Grenzsieblinien A und B (laut [55]) gelegen sein.

Tabelle 7-1: Betonrezeptur des Szenarios "Deponierung" mit 100 % Zuschlag aus Primärmaterial

Zusammensetzung 1 m <sup>3</sup> B 300	Gewählte Rezeptur
Zement PZ 275	365 kg/m <sup>3</sup>
Konsistenz	K 3
Wasser	190 l/m <sup>3</sup>
W/Z-Wert	0,52
Zuschlag	1894 kg/m <sup>3</sup>
Summe	2449 kg/m <sup>3</sup>

Um der im Kapitel 4.4.2 beschriebenen Eigenschaft des erhöhten Wassersaugverhaltens von Recyclingmaterialien Rechnung zu tragen, muß eine entsprechende Vornässung des im Szenario „Recycling“ zur Anwendung kommenden Betonrecyclingsplitts (4/22) erfolgen. Entsprechend der Tabelle 4-2 nach *Lukas* [31] wurden für die Vornässung eines gleichartigen Betons zusätzlich 1,2 M% des Zuschlages an Wasser benötigt, um die gewünschte Konsistenz zu erreichen. Der wirksame W/Z-Wert war - wie in der beschriebenen Rezeptur - 0,52, während der W/Z-Wert inklusive der erforderlichen Vornässung 0,59 betrug. Dennoch wird wie bei *Lukas* die Zementmenge gleich belassen. Der Zuschlag soll sich zu 40 % aus Natursand und zu 60 % aus Betonrecyclingsplitt zusammensetzen.

In der nachfolgenden Tabelle 7-2 werden die Betonrezepturen beider Szenarien gegenübergestellt:

Tabelle 7-2: Betonrezepturen der beiden Szenarien "Recycling" und Deponierung"

Zusammensetzung 1 m <sup>3</sup> B 300	Szenario „Recycling“	Szenario „Deponierung“
Zement PZ 275	365 kg/m <sup>3</sup>	365 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	190 l/m <sup>3</sup>	190 l/m <sup>3</sup>
Wasser für Vornässung	23 l/m <sup>3</sup>	-
Zuschlag Natursand 0/4	758 kg/m <sup>3</sup>	-
Zuschlag Betonrecyclingsplitt 4/22	1136 kg/m <sup>3</sup>	-
Zuschlag Primärmaterial 0/22	-	1894 kg/m <sup>3</sup>
Summe	2472 kg/m <sup>3</sup>	2449 kg/m <sup>3</sup>

### 7.2.5 Zieldefinition laut Standardberichtsbogen

Der Standardberichtsbogen [53] sieht für die Beschreibung der Zieldefinition Teil B vor:

#### TEIL B: ZIELDEFINITION

##### B.1. Erkenntnisinteresse:

*Beantwortung der Frage nach der ökologischen Relevanz von Beton-Recycling im Falle der Verwendung von Recyclingbetongranulat als Betonzuschlag.*

##### B.2. Zielgruppe:

- (X).....Wissenschaft  
 (X).....Politik  
 (X).....Andere: *Baustoff-Recycling-Wirtschaft*

##### B.3. Verwendungszweck der Studie:

- (X).....Politikberatung / Ausgestaltung der produktbezogenen Umweltpolitik  
 (X).....Andere: *Diplomarbeit*

##### B.4. An der Erarbeitung der Studie Beteiligte außer deren Verfasser:

B.4.1. Hauptbeteiligte des Auftraggebers:

*keine*

B.4.2. Hauptbeteiligte außerhalb des Auftraggebers:

*keine*

B.4.3. Vorherrschende Arbeitsweise:

- (X).....Fachgespräche

B.4.4. Dokumentation:

- (X).....verfügbar: *in dieser Arbeit integriert*

##### B.5. Fragestellung:

- (X).....Vergleichende Analyse von zwei oder mehreren Bilanzobjekten

##### B.6. Angewandte Methode:

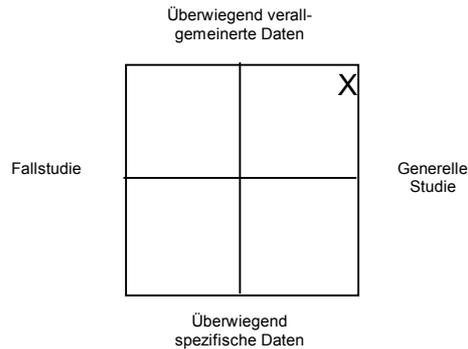
- (X).....*Orientierung nach ISO 14 040 [39] mit  
 Zieldefinition (Goal and scope definition)  
 Sachbilanz (Life cycle inventory analysis)  
 Wirkungsbilanz (Life cycle impact assesment)  
 Interpretation*

##### B.7. Bilanzeinheiten (funktionelle Einheit):

*Szenario „Recycling“: 1 m<sup>3</sup> Beton B 300 mit Zuschlag aus Recyclingmaterial und Natursand  
 Szenario „Deponierung“: 1 m<sup>3</sup> Beton B 300 mit Zuschlag aus reinem Primärmaterial*

##### B.8. Studententyp:

- ( ).....Fallstudie (Basis betriebs,- produktspezifische Messungen/Erhebungen)  
 (X).....Generelle Studie (Basis unternehmens,- produktübergreifende Daten)  
 ( ).....spezifische Daten (betriebs,- produktspezifisch)  
 (X).....Verallgemeinerte Daten (betriebs,- oder firmenunspezifisch)



Anmerkung: Der originale Standardberichtsbogen sieht bei diesem Punkt nur einen Eintrag in die Grafik (hier "X") vor, da auch Mischformen möglich sind.

## B.9. Untersuchungsrahmen:

### B.9.1. Geographischer Bilanzraum (räumlicher Untersuchungsrahmen):

- am gleichen Ort:* Ab- oder Aufbruchsort eines Bauobjektes, Aufbereitung der Baurestmassen, Herstellung von 1 m<sup>3</sup> (Recycling-)Beton
- variabel:* Ort der Zementherstellung, Ort der Sand- bzw. Gesamtzuschlags gewinnung und Ort der Deponierung im Szenario „Deponierung“

### B.9.2. Bilanzzeitraum (zeitlicher Untersuchungsrahmen):

*Der Erhebungszeitraum der einzelnen Daten ist bei den jeweiligen Quellen angegeben.*

### B.9.3. Sachlicher Untersuchungsrahmen (Hauptkette) des Hauptproduktes:

*Abbruch: Ausgangsprozess bei beiden Szenarien, wird aber nicht in Bilanz einbezogen*

*Szenario "Recycling": Aufbereitung der Baurestmassen am Ort des Anfalls, Rohstoffgewinnung von Natursand, Herstellung von Zement, Transporte, Herstellung Recyclingbeton*

*Szenario "Deponierung": Deponierung der Baurestmassen, Rohstoffgewinnung des gesamten Betonzuschlages, Herstellung von Zement, Transporte, Herstellung Beton*

Anmerkung: Beim Punkt B.9.3. sollen die einzelnen Lebenszyklusstufen (Module) für jedes Bilanzobjekt getrennt mit Schlagworten beschrieben werden.

## B.10. Abschneiden nicht bedeutsamer Input- und Outputströme:

### B.10.1. Wurden Vorketten berücksichtigt?:

- (X) .....Energie
- (X) .....Verkehr, Transporte
- (X) .....Rohstoffproduktion

### B.10.2. Berücksichtigung von Umweltbelastungen durch Herstellung und Instandhaltung des Anlagevermögens?

- (X) .....Nein

### B.10.3. Berücksichtigung von Umweltbelastungen durch menschliche Tätigkeiten?

- (X) .....Nein

Anmerkung: Das Abschneiden von nicht bedeutsamen Input- und Outputströmen ist bei allen Ökobilanzen erforderlich, um eine handhabbare Untersuchung durchführen zu können.

Bei B.10.3. ist beispielsweise der Aspekt des Verkehrsweges vom und zum Arbeitsplatz gemeint. Im Regelfall werden jedoch Umweltbeeinflussungen, wie in B.10.2. oder B.10.3. ausgeklammert, weshalb sich auch im Standardberichtsbogen keine weiteren Fragen dazu finden.

### 7.3 Sachbilanz

Die in Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 dargestellten Lebensabschnitte der zwei Szenarien "Recycling" und "Deponierung" sind die Grundlagen der nachfolgenden Sachbilanz. Für jedes der darin enthaltenen Module wird je eine Input- und eine Output-Tabelle erstellt, deren Inhalte anschließend in Ergebnistabellen (Stoff- und Energiebilanz für jedes Szenario) aufsummiert werden.

#### 7.3.1 *Module des Szenarios "Recycling"*

Gemäß der Annahmen, die in der Zieldefinition (7.2.2) beschrieben wurden, steht der Prozeß der Baurestmassen-Gewinnung (Ab- oder Aufbruch) am Anfang beider Szenarien, wird aber nicht in die Systemgrenzen miteinbezogen. Der Abbruch muß beim Szenario „Recycling“ derart erfolgen, daß eine Aufbereitung auch möglich wird, wie z.B. durch Rückbau gemäß dem Leitfaden „Verwertungsorientierter Rückbau“ [21]. Dabei ist eine Trennung in Stoffgruppen gemäß der Baurestmassentrennungsverordnung [6] anzustreben (Bauschutt, Glas, Kunststoff, Beton, etc.). Bei diesem Szenario wird nur die Verwertung der Stoffgruppe Betonabbruch untersucht, nicht jedoch die der anderen Stoffgruppen, welche auch bei einem Bauwerksabbruch anfallen.

##### 7.3.1.1 *Modul "Aufbereitung Baurestmassen 4/22"*

Nach der Entscheidung, den angefallenen Betonabbruch einer Wiederverwertung zuzuführen (siehe Raute „Recycling JA“ in Abbildung 7-2), wird der sortenreine Betonabbruch in einer mobilen Baustoff-Recycling-Anlage aufbereitet. Diese befindet sich in diesem Szenario idealerweise am Ort des Anfalls der Baurestmassen - auf der Baustelle.

Gemäß der gewählten Rezeptur des Recyclingbetons (Tabelle 7-2) sind 1136 kg Betonrecyclingsplitt der Kornfraktion 4/22 erforderlich. Laut einer Auskunft der Firma *Ökotechna* [56], die selbst eine mobile Recyclinganlage (mit Backenbrecher) betreibt, benötigt man für die Herstellung einer derartigen Fraktion etwa doppelt so viel Eingangsmaterial (Betonabbruch mit maximalem Durchmesser von etwa 80 cm), wie Material der gewünschten Körnung erzeugt werden kann. Nach dem Brechen und Sieben in der Recyclinganlage unterteilt sich das aufbereitete Material in:

- 50 % der Fraktion 4/22
- 50 % der Fraktion 0/4 und 22/X.

Somit sind für die Herstellung von 1136 kg Betonrecyclingsplitt der Kornfraktion 4/22 etwa 2272 kg an sortenreinem Betonabbruch erforderlich.

Sowohl die Fraktion 22/X, welche erneut dem Brechvorgang zugeführt werden kann, als auch der Brechsand der Fraktion 0/4 fallen bei diesem Modul als Kuppelprodukte an (Brechsand 0/4: laut Kapitel 4.4.3 ca. 20 % von 2272 kg  $\Rightarrow$  454 kg; Fraktion 22/X: 2272 - 1136 - 454  $\Rightarrow$  682 kg). Unter einem Kuppelprodukt wird laut Standardberichtsbogen [53] ein Nebenprodukt verstanden, das einer Verwendung zugeführt werden kann und sich somit vom Abfall unterscheidet. Auf die Möglichkeiten der Verwendung von derartigem Brechsand bzw. von Feianteilen wurde im Kapitel 4.4.3 eingegangen.

Die mobile Aufbereitungsanlage wird mit Diesel betrieben. Aufgrund der erwähnten Auskünfte der Firma *Ökotechna* [56] kann der auf die aufbereitete Menge bezogene Dieserverbrauch folgendermaßen abgeschätzt werden:

maximaler Anlageninput (Betonabbruch).....	500 m <sup>3</sup> /d
davon 50 % Fraktion 4/22 nach Aufbereitung .....	250 m <sup>3</sup> /d
Umrechnung in Tonnen/Tag (1 m <sup>3</sup> $\approx$ 1,4 t).....	350 t/d
bei 10 Betriebsstunden/Tag.....	35 t/h
Dieserverbrauch/Stunde .....	12 l/h
Dieserverbrauch je erzeugter Tonne 4/22.....	0,34 l/t
Umrechnung (1 l Diesel $\approx$ 0,8 kg).....	0,27 kg/t
Dieserverbrauch für 1 kg der Fraktion 4/22 .....	0,27 g/kg

Da es bezüglich der Abgasemissionen derartiger Aufbereitungsanlagen keine Untersuchungen gibt, werden allgemeine, auf 1 kg Diesel bezogene Emissionswerte angenommen [57, 58, 59, 60, 61]. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 7-3 dargestellt.

Tabelle 7-3: Abgasemissionen je kg Diesel [57, 58, 59, 60, 61]

Schadstoff	Emissionen je kg Diesel in [g/kg]
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	2,6
Blei (Pb)	1,1*10 <sup>-4</sup>
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	3180
Methan (CH <sub>4</sub> )	0,2
Benzol	0,001
Benzo(a)pyren	5*10 <sup>-6</sup>
Lachgas (NO <sub>2</sub> )	0,08
Partikel	1,2

Eine weitere Datenquelle bezüglich Luftschadstoffemissionen existiert von *Biet/Boes/Bringezu* [62]. Die darin genannten Emissionswerte beziehen sich jedoch auf den Straßengüterverkehr im allgemeinen und werden in einer anderen Einheit (g/tkm = Gramm pro Tonne und Kilometer) angegeben (Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Luftschadstoffemissionen in g/tkm laut *Biet/Boes/Bringezu* [62]

Schadstoff	Emissionen in g/tkm
Kohlenmonoxid (CO)	2,4
Kohlenwasserstoffe (HC)	1,1
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	3,6
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	207

Um möglichst alle Luftschadstoffemissionen zu erfassen, werden sowohl die Schadstoffe aus Tabelle 7-3 als auch die aus Tabelle 7-4 in der Sachbilanz berücksichtigt. Da die Angaben der beiden Tabellen auf verschiedenen Einheiten basieren, werden die Werte für Kohlendioxid in Tabelle 7-5 gegenübergestellt und anschließend durch Umformung verglichen.

Tabelle 7-5: Gegenüberstellung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in verschiedenen Einheiten

Schadstoff	Emissionswert aus Tabelle 7-3	Emissionswert aus Tabelle 7-4
CO <sub>2</sub>	3180 g/kg <sub>Diesel</sub>	207 g/tkm

Für die nachfolgenden Umformungen wird angenommen, daß ein LKW mit 16 t höchstzulässigem Gesamtgewicht einen Dieserverbrauch von 26 l auf 100 km hat. Das Ladevolumen wird mit 3 m<sup>3</sup> angesetzt, was bei einer Materialdichte von 1,5 t/m<sup>3</sup> einer Masse von 4,5 t Beladung für einen LKW entspricht.

Umrechnung des CO<sub>2</sub>-Schadstoffausstoßes von g/kg in g/tkm:

$$\frac{3180g}{kg_{Diesel}} \equiv \frac{3180g}{kg_{Diesel}} * \frac{26l}{100km} * \frac{0,8kg_{Diesel}}{l} * \frac{1}{4,5t} = \frac{147g}{tkm} \quad \text{Gl. (7-1)}$$

Umrechnung des CO<sub>2</sub>-Schadstoffausstoßes von g/tkm in g/kg:

$$\frac{207g}{tkm} \equiv \frac{207g}{tkm} * 4,5t * \frac{100km}{26l} * \frac{1l}{0,8kg_{Diesel}} = \frac{4478g}{kg_{Diesel}} \quad \text{Gl. (7-2)}$$

Obwohl die Werte nicht exakt übereinstimmen, ist die Größenordnung vergleichbar. In den nachfolgenden Berechnungen wird der Wert laut Tabelle 7-3 (3180 g CO<sub>2</sub> je kg Diesel) verwendet. Die Umrechnung der restlichen in Tabelle 7-4 angegebenen Werte (CO, HC, NO<sub>x</sub>) in g/kg erfolgt nach der folgenden Formel:

Umrechnung von g/tkm in g/kg:

$$\left[ \frac{g}{kg_{Diesel}} \right] = \frac{\left[ \frac{g}{tkm} \right] * Ladung[t]}{Kraftstoffverbrauch \left[ \frac{l}{km} \right] * Kraftstoffdichte \left[ \frac{kg}{l} \right]} \quad \text{Gl. (7-3)}$$

In Tabelle 7-6 werden die angegebenen und die berechneten Emissionswerte je kg Diesel zusammengefaßt.

Tabelle 7-6: Emissionen je kg Diesel in [g/kg<sub>Diesel</sub>]

Schadstoff	Emissionen je kg Diesel in [g/kg]
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	2,6
Blei (Pb)	1,1*10 <sup>-4</sup>
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	3180
Methan (CH <sub>4</sub> )	0,2
Benzol	0,001
Benzo(a)pyren	5*10 <sup>-6</sup>
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	0,08
Partikel	1,2
Kohlenmonoxid (CO)	52
Kohlenwasserstoffe (HC)	24
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	78

Der Heizwert je kg Diesel wird laut *Krapfenbauer* [7] mit 40 Megajoule bzw. 11,11 Kilowattstunden angenommen (1 kWh  $\equiv$  3,6 MJ). In Tabelle 7-7 scheint Diesel sowohl als Betriebsstoff (in kg) als auch mit dem entsprechenden umgerechneten Heizwert in der Kategorie Energieverbrauch (in MJ) auf. Dies ist insofern kein Widerspruch, als der durch die Aufbereitungsanlage verbrauchte Dieselkraftstoff durch Verbrennung in Energie umgewandelt wird und der dabei entstehende Schadstoffausstoß in der Outputtabelle dieses Moduls (Tabelle 7-8) berücksichtigt wird.

Da es sich bei der betrachteten Aufbereitungsanlage um eine mobile Anlage handelt, ist ein dauerhafter Flächenverbrauch nicht gegeben. Aus diesem Grund wird Bodenbeanspruchung auf der Baustelle nicht in die Sachbilanz miteinbezogen. Richtwerte für den Platzbedarf derartiger Anlagen nennen *Eschenbach/Grün/Horak/Plasonig* [63] mit 15 m<sup>2</sup> je Tonne der stündlichen Anlagenkapazität und 0,5 m<sup>2</sup> pro Tonne für die Zwischenlagerung des erzeugten Materials.

Ebenso entfällt der Verbrauch von Wasser, da bei der gegenständlichen Anlage keine Naßaufbereitung vorgenommen wird.

Die Schallemissionen bei der Aufbereitung von Baurestmassen betragen im Umkreis von 25 m einer mobilen Anlage durchschnittlich 67 dB, verursacht durch Motor und Brecher [63].

Daten zu den Staubemissionen bei einer Aufbereitungsanlage werden ebenfalls von *Eschenbach/Grün/Horak/Plasonig* [63] genannt. Der eingesetzte Wert in Tabelle 7-7 von  $371 \text{ mg/m}^2\text{d}$  entspricht dem Durchschnittswert von Langzeitstaubbelastungen in drei Meßbereichen einer Baustoffrecyclinganlage. Die deutschen Normwerte werden dabei um etwa 30 % überschritten [63]. Im Gegensatz dazu sind die Durchschnittswerte für die Kurzzeitstaubbelastung mit  $583 \text{ mg/m}^2\text{d}$  um 84 % höher. Allerdings werden die entsprechenden Grenzwerte nicht überschritten, da diese höher angesetzt sind als bei der Langzeitstaubbelastung. In der Sachbilanz (Tabelle 7-7) wird den Werten für die Langzeitstaubbelastung aufgrund ihrer Repräsentativität gegenüber jenen der Kurzzeitstaubbelastung der Vorzug gegeben.

Tabelle 7-7: Szenario "Recycling", Input des Moduls "Aufbereitung Baurestmassen 4/22"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 1: <b>Aufbereitung Baurestmassen 4/22</b>				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch	sortenreiner Betonabbruch	2272	kg	[56]
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen	Diesel	0,61	kg	[56]
Energieverbrauch	Diesel	24,54	MJ	[7]
Wasserverbrauch				
Bodenbeanspruchung				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-8: Szenario "Recycling", Output des Moduls "Aufbereitung Baurestmassen 4/22"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 1: <b>Aufbereitung Baurestmassen 4/22</b>				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte	Brechsand 0/4	454	kg	
	Grobfraktion 22/X	682	kg	
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle				
Luftemissionen	Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	1,59	g	
	Blei (Pb)	6,7E-05	g	
	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	1950,74	g	
	Methan (CH <sub>4</sub> )	0,12	g	
	Benzol	6,13E-04	g	
	Benzo(a)pyren	3,07E-06	g	
	Lachgas (N <sub>2</sub> O)	0,05	g	
	Partikel	0,74	g	
	Kohlenmonoxid (CO)	31,90	g	
	Kohlenwasserstoffe (HC)	14,72	g	
	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	47,85	g	
	Staub	371,00	mg/(m <sup>2</sup> d)	
Wasseremissionen				
Schall	Brecher und Motor (d=25m)	67	dB	
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

### 7.3.1.2 Modul "Herstellung Zement"

Die der Sachbilanz zugrundegelegte Betonrezeptur (Tabelle 7-2) ergibt eine erforderliche Zementmenge von 365 kg für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Recycling-Frischbeton.

Über die Zementherstellung wurden bereits umfangreiche ökologische Untersuchungen angestellt; in Österreich von *Knoflacher/Tuschl/Medwedeff* [64] im Auftrag der "Zement + Beton Handels- und WerbeGmbH", in der Schweiz vom Institut für Energietechnik der ETH Zürich [65]. In der nachfolgenden Tabelle 7-9 werden die Ergebniswerte einzelner Parameter gegenübergestellt, die für die Zementproduktion erforderlich sind.

Tabelle 7-9: Gegenüberstellung von Einzelwerten zweier Studien über die Zementproduktion [64, 65]

	<i>Knoflacher/Tuschl/Medwedeff</i> [64]	ETH-Zürich [65]
<b>ausgewählte Rohstoffe:</b>		
Gips [kg/t <sub>Zement</sub> ]	51,3	50,0
Kalkstein [kg/t <sub>Zement</sub> ]	1196	1150
Wasser [kg/t <sub>Zement</sub> ]	190	300
<b>ausgewählte Brennstoffe:</b>		
Erdgas [MJ/t <sub>Zement</sub> ]	55,2	60,8
Heizöl schwer [MJ/t <sub>Zement</sub> ]	806	867
Steinkohle [MJ/t <sub>Zement</sub> ]	1211	1650
<b>ausgewählte Emissionen:</b>		
As [g/t <sub>Zement</sub> ]	3,2*10 <sup>-3</sup>	18,0*10 <sup>-3</sup>
Cd [g/t <sub>Zement</sub> ]	2,0*10 <sup>-3</sup>	4,0*10 <sup>-3</sup>
Hg [g/t <sub>Zement</sub> ]	15*10 <sup>-3</sup>	30*10 <sup>-3</sup>
Ni [g/t <sub>Zement</sub> ]	1,3*10 <sup>-3</sup>	120*10 <sup>-3</sup>
Pb [g/t <sub>Zement</sub> ]	3,7*10 <sup>-3</sup>	90*10 <sup>-3</sup>
CO [g/t <sub>Zement</sub> ]	928	1100
CO <sub>2</sub> [g/t <sub>Zement</sub> ]	586000	880000
NO <sub>x</sub> [g/t <sub>Zement</sub> ]	1572	1800
SO <sub>2</sub> [g/t <sub>Zement</sub> ]	119	902
Staub [g/t <sub>Zement</sub> ]	171	270

*Knoflacher/Tuschl/Medwedeff* [64] beziehen ihre Daten ausschließlich auf Österreich, die ETH-Zürich ausschließlich auf die Schweiz.

Fast alle Werte von *Knoflacher/Tuschl/Medwedeff* [64] sind geringer als die der ETH-Zürich [65] (außer geringfügig Gips und Kalkstein). Auffallend ist, daß die Dimensionen bei den Roh- und Brennstoffen in etwa übereinstimmen, bei den Schwermetallemissionen jedoch die Werte der ETH-Zürich [65] die von *Knoflacher/Tuschl/Medwedeff* [64] um ein Vielfaches übersteigen. Dies ist möglicherweise durch bessere Prozeß- und Filtertechnologien in Österreich erklärbar. Aufgrund der Repräsentativität für Österreich werden die Werte von *Knoflacher/Tuschl/Medwedeff* [64] in die nachfolgenden Tabellen übernommen und auf die erforderliche Zementmenge von 365 kg bezogen. Dabei benötigte Hilfs- und Betriebsstoffe, die die Menge von 0,01 kg je

erzeugter Tonne Zement unterschreiten, werden nicht berücksichtigt, um die Übersicht zu wahren.

Tabelle 7-10: Szenario "Recycling", Input des Moduls "Herstellung Zement"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 2: Herstellung Zement				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch	Kalk-Mergel-Ton	426,8	kg	[64]
	Gips	18,7	kg	[64]
	Anhydrit	3,8	kg	[64]
	Sonstiges	6,2	kg	[64]
	Pyritabbrand	3,3	kg	[64]
	Rea-Gips	0,9	kg	[64]
	Hüttensand	44,6	kg	[64]
	Flugasche	9,9	kg	[64]
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen	Steinkohle	13,84	kg	[64]
	Petrolkoks	1,78	kg	[64]
	Heizöl schwer	7,39	kg	[64]
	Heizöl mittel	0,12	kg	[64]
	Heizöl leicht und extraleicht	0,01	kg	[64]
	Erdgas	0,56	kg	[64]
	Altreifen	2,50	kg	[64]
	Altöle	1,87	kg	[64]
	Lösungsmittel	0,64	kg	[64]
	Kunststoffe	0,04	kg	[64]
	Papierschlämme	1,09	kg	[64]
	Diesel	0,21	kg	[64]
	Säcke	0,23	kg	[64]
	Mehrwegpaletten	0,01	Stück	[64]
	Metalle	0,06	kg	[64]
	Maschinenersatzteile	0,05	kg	[64]
	Feuerfestes Material	0,26	kg	[64]
	Baumaterialien	0,02	kg	[64]
	Gummi und Kunststoffe	0,05	kg	[64]
	Fette	0,01	kg	[64]
	Öle	0,02	kg	[64]
	Mahlhilfen	0,09	kg	[64]
	Sprengstoffe	0,04	kg	[64]
	Reinigungsmaterial	0,01	kg	[64]
Druckluft	17,08	kg	[64]	
	Zündschnüre	0,01	m	[64]
Energieverbrauch	<i>Verbrennungsenergie:</i>			
	Steinkohle	442,12	MJ	[64]
	Petrolkoks	60,66	MJ	[64]
	Heizöl schwer	293,83	MJ	[64]
	Heizöl mittel	4,93	MJ	[64]
	Heizöl leicht und extraleicht	0,37	MJ	[64]
	Erdgas	20,15	MJ	[64]
	<i>Ersatzbrennstoffe:</i>			
	Altreifen	51,98	MJ	[64]
	Altöle	71,25	MJ	[64]
	Lösungsmittel	11,79	MJ	[64]
	Kunststoffe	1,28	MJ	[64]
	Papierschlämme	6,86	MJ	[64]
	<i>Antriebsenergie:</i>			
	Elektrischer Strom	139,61	MJ	[64]
	Diesel	8,47	MJ	[64]
Wasserverbrauch	190	kg	[64]	
Bodenbeanspruchung	keine Angaben			
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-11: Szenario "Recycling", Output des Moduls "Herstellung Zement"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 2: <b>Herstellung Zement</b>				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte				
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle	Elektromaterial	0,004	kg	[64]
	Metalle	0,123	kg	[64]
	Verpackungsmaterial	0,004	kg	[64]
	Alfette	0,003	kg	[64]
	Altöle	0,003	kg	[64]
	Reinigungsmittel	0,002	kg	[64]
	Sonstiges	0,021	kg	[64]
Luftemissionen	Staub	62,415	g	[64]
	CO <sub>2</sub>	213890	g	[64]
	CO	338,720	g	[64]
	NO <sub>x</sub>	573,780	g	[64]
	SO <sub>2</sub>	43,435	g	[64]
	Summe org. C	8,760	g	[64]
	Cd	7,30E-04	g	[64]
	Ti	2,70E-03	g	[64]
	Be	7,30E-05	g	[64]
	As	1,17E-03	g	[64]
	Co	5,11E-04	g	[64]
	Ni	4,75E-04	g	[64]
	Pb	1,35E-03	g	[64]
	Hg	5,48E-03	g	[64]
Wasseremissionen	Abwasser	0,001	kg	[64]
Schall	keine Angaben			
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

### 7.3.1.3 Modul "Transport Zement"

In Modul "Transport Zement" wird der Transport der erforderlichen Zementmenge vom Zementwerk zur Baustelle betrachtet. Um dies durchführen zu können, müssen Annahmen hinsichtlich Transportmittel und Transportwege getroffen werden. Obwohl der Transport per Schiene ökologisch am vernünftigsten wäre, ist die Wahl des Transportmittels LKW aufgrund der individuellen Lage von Baustellen realistischer.

Die Wahl der Transportweite ist ein großer Unsicherheitsfaktor, da die unzähligen Möglichkeiten hinsichtlich der Lage des versorgenden Zementwerkes, Lage der Baustelle, Route, etc. nicht abgrenzbar sind. *Mardo* [66] beziffert die durchschnittliche Transportweite von Zementwerken zu Betonwerken bzw. Baustellen im Wiener Raum mit 80 km inklusive Hin- und Rückfahrt. Laut *Huber* [67] beträgt der durchschnittliche Transportweg in Österreich vom Zementwerk zum Verbraucher etwa 100 km in eine Richtung (mit Rückfahrt 200 km). Da dieser Wert für Österreich angesetzt ist, wird dem Modul eine Transportstrecke von 200 km (hin und retour) zugrunde gelegt.

Es wird angenommen, daß für den Transport von Zement entsprechend große LKW bzw. Sattelschlepper der Kategorie bis 40 t verwendet werden, deren Dieserverbrauch laut *Elsener/Strub* [68] etwa bei 38 l Diesel/100 km liegt. Die Zuladung würde bei einer Auslastung von 50 % etwa 12 t betragen. Dieser Wert wird auch für die Zementbeladung angesetzt, was etwa 4 m<sup>3</sup> Zement oder 240 Zementsäcken à 50 kg entspricht. Die Werte für den Dieserverbrauch und die Beladung bewegen sich in den von *Mardo* [66] genannten Bereichen von 10 und 15 Tonnen je Zementfuhrer für die Transportkapazität und einem Dieserverbrauch von 35 bis 40 l/100 km der verwendeten LKWs. Emissionen (laut Tabelle 7-6) und Verbrauch sind auf die erforderliche Zementmenge (365 kg) umgelegt.

Tabelle 7-12: Szenario "Recycling", Input des Moduls "Transport Zement"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 3: <b>Transport Zement</b>				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch				
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen	Diesel	2,31	l	laut Annahmen
Energieverbrauch	Diesel	92,47	MJ	laut Annahmen
Wasserverbrauch				
Bodenbeanspruchung				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-13: Szenario "Recycling", Output des Moduls "Transport Zement"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 3: <b>Transport Zement</b>				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte				
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle				
Luftemissionen	Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	6,01	g	Tabelle 7-6
	Blei (Pb)	2,54E-04	g	Tabelle 7-6
	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	7351,10	g	Tabelle 7-6
	Methan (CH <sub>4</sub> )	0,46	g	Tabelle 7-6
	Benzol	2,31E-03	g	Tabelle 7-6
	Benzo(a)pyren	1,16E-05	g	Tabelle 7-6
	Lachgas (N <sub>2</sub> O)	0,18	g	Tabelle 7-6
	Partikel	2,77	g	Tabelle 7-6
	Kohlenmonoxid (CO)	120,21	g	Tabelle 7-6
	Kohlenwasserstoffe (HC)	55,48	g	Tabelle 7-6
	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	180,31	g	Tabelle 7-6
Wasseremissionen				
Schall	keine Angaben			
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

#### 7.3.1.4 Modul "Gewinnung Natursand 0/4"

Da durch die Aufbereitung des Betonabbruchs die Zuschlagsfraktion 4/22 bereits vorhanden ist, muß nur noch der Zuschlagssand 0/4 aus Naturlagerstätten gewonnen werden. Die erforderliche Menge gemäß der gewählten Betonrezeptur beträgt 758 kg (Tabelle 7-2). Die in Tabelle 7-15 und Tabelle 7-16 eingesetzten Daten sind auf diese Menge bezogen und entstammen der ETH-Zürich [65].

Die Energie für den Lagerstättenabbau und die Aufbereitung erfolgt laut der genannten Datenquelle durch Strom. Elektrischer Strom wird teilweise durch emissionserzeugende Prozesse wie z.B. durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe erzeugt, ein anderer Teil

stammt aus der Wasserkraft oder wird importiert. Die durchschnittlichen Schadstoffemissionen je Stromeinheit errechnen sich aus dem Anteil der Stromerzeugungsart an der Gesamtstromerzeugung (Strom-Mix) und den jeweiligen Emissionen. Die durchschnittlichen Emissionen für eine Stromeinheit (kWh bzw. MJ) in Österreich sind in Tabelle 7-14 angeführt [69].

Tabelle 7-14: Emissionsfaktoren des österreichischen Strom-Mix [69]

<b>Emissionsfaktor</b>	<b>Strommix für Österreich [69]</b>	
	<b>g/kWh</b>	<b>g/MJ</b>
SO <sub>2</sub>	0,260	0,072
NO <sub>x</sub>	0,219	0,061
Staub	0,024	0,007
CO <sub>2</sub>	257,788	71,608
CO	0,173	0,048
HC	0,013	0,004

Tabelle 7-15: Szenario "Recycling", Input des Moduls "Gewinnung Natursand 0/4"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 4: Gewinnung Natursand 0/4				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch				
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen				
Energieverbrauch	Elektrischer Strom für Lagerstättenabbau	4,09	MJ	[65]
	Elektrischer Strom für Aufbereitung	1,36	MJ	[65]
Wasserverbrauch				
Bodenbeanspruchung	Rohstoffentnahme	758	kg	Tabelle 7-2
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-16: Szenario "Recycling", Output des Moduls " Gewinnung Natursand 0/4"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 4: Gewinnung Natursand 0/4				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte				
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle	Abraum	0,15	t	[65]
Luftemissionen	SO <sub>2</sub>	0,11	g	[65, 68]
	NO <sub>x</sub>	0,09	g	[65, 68]
	Staub	0,01	g	[65, 68]
	CO <sub>2</sub>	108,56	g	[65, 68]
	CO	0,07	g	[65, 68]
	HC	0,01	g	[65, 68]
Wasseremissionen				
Schall				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

### 7.3.1.5 Modul "Transport Natursand 0/4"

Die durchschnittliche LKW-Transportdistanz für Kies/Sand wird von der ETH-Zürich [65] sowohl für Europa, als auch für die Schweiz mit 20 km beziffert. Da jedoch daraus nicht hervorgeht, ob nur die Hinstrecke oder die Hin- und Retourestrecken gemeint sind, wird angenommen, daß Hin- und Retourestrecke 40 km ausmachen. *Mardo* [66] legt seiner Arbeit eine Strecke von 60 km vom Kieswerk zum Betonwerk zugrunde. In den nachfolgenden Berechnungen wird der Mittelwert beider Angaben mit 50 km angenommen; außerdem ein Dieserverbrauch von 26 l/100km und eine Lademenge von

6 Tonnen. Die Werte von Tabelle 7-17 und Tabelle 7-18 sind auf die zu transportierende Natursandmenge von 758 kg umgelegt.

Tabelle 7-17: Szenario "Recycling", Input des Moduls "Transport Natursand 0/4"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 5: <b>Transport Natursand 0/4</b>				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch				
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen	Diesel	1,64	kg	laut Annahmen
Energieverbrauch	Diesel	65,69	MJ	laut Annahmen
Wasserverbrauch				
Bodenbeanspruchung				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-18: Szenario "Recycling", Output des Moduls "Transport Natursand 0/4"

Sachbilanz-Outputströme					
Modul 5: <b>Transport Natursand 0/4</b>					
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle	
Kuppelprodukte					
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle					
Luftemissionen	Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	4,27	g	Tabelle 7-6	
	Blei (Pb)	1,81E-04	g	Tabelle 7-6	
	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	5222,62	g	Tabelle 7-6	
	Methan (CH <sub>4</sub> )	0,33	g	Tabelle 7-6	
	Benzol	1,64E-03	g	Tabelle 7-6	
	Benzo(a)pyren	8,21E-06	g	Tabelle 7-6	
	Lachgas (N <sub>2</sub> O)	0,13	g	Tabelle 7-6	
	Partikel	1,97	g	Tabelle 7-6	
	Kohlenmonoxid (CO)	85,40	g	Tabelle 7-6	
	Kohlenwasserstoffe (HC)	39,42	g	Tabelle 7-6	
	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	128,10	g	Tabelle 7-6	
Wasseremissionen					
Schall	keine Angaben				
Qualitative Aspekte					
Sonstige Aspekte					

g

### 7.3.1.6 Modul "Herstellung Recycling-Frischbeton"

Für das Betonmischen wird von der ETH-Zürich [65] ein elektrischer Energieaufwand von  $6,84 \cdot 10^{-3}$  MJ/kg<sub>Frischbeton</sub> angegeben. Gemäß der gewählten Betonrezeptur (Tabelle 7-2) wird 1 m<sup>3</sup> Recycling-Frischbeton der Güteklasse B 300 mit einer Masse von 2472 kg hergestellt. Die Luftemissionen aus dem Strom-Mix entstammen der Tabelle 7-14. Für Emissionen aus dem Mischvorgang der Komponenten Wasser, Zement und Zuschlag sind laut ETH-Zürich [65] keine Daten erhältlich. Lediglich mit einer geringen Staubbelastung ist zu rechnen, die in der Sachbilanz jedoch nicht aufgenommen wird. Der temporäre Platzbedarf der Mischanlage auf der Baustelle wird ebenfalls nicht einbezogen.

Tabelle 7-19: Szenario "Recycling", Input des Moduls "Herstellung Frischbeton"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 6: Herstellung Recycling-Frischbeton				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch	Zement	365	kg	Tabelle 7-2
	Natursand 0/4	758	kg	Tabelle 7-2
	Betonrecyclingsplitt 4/22	1136	kg	Tabelle 7-2
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen				
Energieverbrauch	Elektrischer Strom	16,96	MJ	[65]
Wasserverbrauch	Wasser	190	l	Tabelle 7-2
	Wasser für Vornässung	23	l	Tabelle 7-2
Bodenbeanspruchung				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-20: Szenario "Recycling", Output des Moduls "Herstellung Recycling-Frischbeton"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 6: Herstellung Recycling-Frischbeton				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte				
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle				
Luftemissionen	SO <sub>2</sub>	0,34	MJ	[65, 68]
	NO <sub>x</sub>	0,29	MJ	[65, 68]
	Staub	0,03	MJ	[65, 68]
	CO <sub>2</sub>	337,31	MJ	[65, 68]
	CO	0,23	MJ	[65, 68]
	HC	0,02	MJ	[65, 68]
Wasseremissionen				
Schall	keine Angaben			
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

### 7.3.2 Module des Szenarios "Deponierung"

Im Szenario "Deponierung" (Abbildung 7-3) wird die gleiche Menge an Betonabbruch auf einer Deponie entsorgt, die beim Szenario "Recycling" der Aufbereitungsanlage zugeführt wird (2272 kg). Ein Modul "Aufbereitung Baurestmassen" entfällt daher, statt dessen werden zusätzliche Module ("Transport Betonabbruch zu Deponie", "Deponierung Betonabbruch") in die Systemgrenzen miteinbezogen. Die Module "Zement" und "Transport" sind gleich wie beim Szenario "Recycling". Zusätzlich zum Natursand 0/4 muß hier auch die Grobfraktion 4/22 aus Naturlagerstätten gewonnen werden. Das letzte Modul innerhalb der Systemgrenzen ist die Mischung von  $1 \text{ m}^3$  Frischbeton B 300 gemäß der gewählten Rezeptur (Tabelle 7-2).

#### 7.3.2.1 Modul "Transport Betonabbruch zu Deponie"

Als Transportmittel für den Betonabbruch (2272 kg) von der Baustelle zu einer Bauschuttdeponie wird ein LKW angenommen. Die gleiche Problematik bei der Annahme der Transportstrecke, die schon im Modul "Transport Zement" (Kapitel 7.3.2.4) erwähnt wurde, trifft auch hier zu. Die Varianten hinsichtlich Ort der Baustelle und angefahrene Deponie sind einerseits nicht abgrenzbar, andererseits kommt hinzu, daß unter Umständen nicht die nächste, sondern eine billigere und weiter entfernte Bauschuttdeponie angefahren wird. Als Richtwert sei der in der Arbeit von *Mardo* [66] verwendete Durchschnittswert von 25 km genannt.

Die nachfolgende Überlegung bezieht sich auf das Bundesland Steiermark, in dem laut einer Karte von Bauschuttdeponien [14] eine relativ gleichmäßige Verteilung von derartigen Deponien vorherrscht. Bei einer Fläche von  $16\,400 \text{ km}^2$  und einer Anzahl von etwa 30 gleichmäßig verteilten Bauschuttdeponien ergibt dies ein Einzugsgebiet von etwa  $550 \text{ km}^2$  je Deponie. Trifft man nun die Annahme, daß das Einzugsgebiet eine Kreisfläche wäre, in deren Mittelpunkt sich die Deponie befindet, so wäre der Radius  $R$  dieser Kreisfläche etwa 13 km. Bei einer theoretisch gleichmäßigen Konzentration  $K$  von Baustellen im Einzugsgebiet (Baustellen/Fläche) stellt sich die Frage, wie hoch der durchschnittliche Anfahrtsweg der in der Kreisfläche gleichmäßig verteilten Baustellen zu der im Kreismittelpunkt gelegenen Deponie  $D$  ist. Dazu wird die Kreisfläche in

konzentrische Kreisringe mit den Dicken  $dr$  und den Flächen  $dA = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot dr$  eingeteilt (Abbildung 7-4).

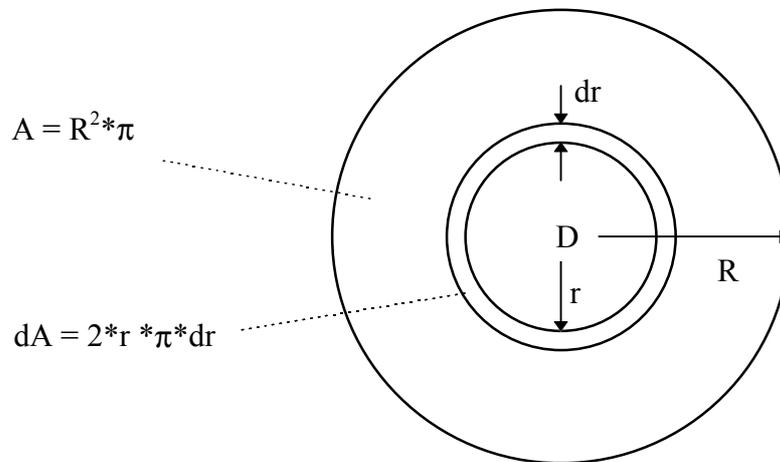


Abbildung 7-4 Theoretisches Einzugsgebiet einer im Kreismittelpunkt gelegenen Deponie D. Alle auf dem Teilkreisring mit der Fläche  $dA$  gelegenen Baustellen haben den gleichen Anfahrtsweg  $r$  zur Deponie D im Mittelpunkt der Kreisfläche.

Alle Baustellen auf dem in Abbildung 7-4 beispielhaft herausgezeichneten Kreisring haben den gleichen Anfahrtsweg  $r$  zur Deponie im Zentrum des Kreises. Der mittlere Anfahrtsweg  $r_{\text{mittel}}$  zur Deponie ergibt sich somit als Integral der mit  $r$  gewichteten Teilkreisringflächen  $dA$  über die Gesamtfläche, dividiert durch die Gesamtfläche  $A$ , da sich die als konstant angenommene Flächenkonzentration von Baustellen schon im Ansatz kürzen läßt:

$$r_{\text{mittel}} = \frac{\int A \cdot K \cdot r \cdot dA}{K \cdot A} = \frac{\int A \cdot r \cdot dA}{A} = \frac{\int_0^R r \cdot (2 \cdot r \cdot \pi \cdot dr)}{R^2 \cdot \pi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \int_0^R r^2 \cdot dr}{R^2 \cdot \pi} = \frac{2}{3} \cdot R \quad \text{Gl. (7-4)}$$

Die Auswertung ergibt als durchschnittlichen Anfahrtsweg  $2/3 \cdot R$ . Für die Hin- und Retourstrecke einer Deponiefahrt bei einem Radius von 13 km wären dies  $4/3$  des Radius, also etwa 17,3 km. Um der erwähnten Möglichkeit des Anfahrens weiter entfernter Deponien Rechnung zu tragen, wird diese Strecke auf 20 km aufgerundet. Obwohl sich

diese Überlegung auf die Steiermark bezieht, wird von einer ähnlichen österreichweiten Situation ausgegangen.

Der Diesel-Verbrauch wird mit 26 l/100km, die Lademenge mit 5 t/LKW angenommen. Die Schadstoffemissionen errechnen sich gemäß Tabelle 7-6.

Tabelle 7-21: Szenario "Deponierung", Input des Moduls "Transport Betonabbruch zu Deponie"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 1: <b>Transport Betonabbruch zu Deponie</b>				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch				
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen	Diesel	2,36	kg	laut Annahmen
Energieverbrauch	Diesel	94,52	MJ	laut Annahmen
Wasserverbrauch				
Bodenbeanspruchung				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-22: Szenario "Deponierung", Output des Moduls "Transport Betonabbruch zu Deponie"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 1: <b>Transport Betonabbruch zu Deponie</b>				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte				
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle				
Luftemissionen	Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	6,14	g	Tabelle 7-6
	Blei (Pb)	2,6E-04	g	Tabelle 7-6
	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	7513,96	g	Tabelle 7-6
	Methan (CH <sub>4</sub> )	0,47	g	Tabelle 7-6
	Benzol	2,36E-03	g	Tabelle 7-6
	Benzo(a)pyren	1,18E-05	g	Tabelle 7-6
	Lachgas (N <sub>2</sub> O)	0,19	g	Tabelle 7-6
	Partikel	2,84	g	Tabelle 7-6
	Kohlenmonoxid (CO)	122,87	g	Tabelle 7-6
	Kohlenwasserstoffe (HC)	56,71	g	Tabelle 7-6
	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	184,30	g	Tabelle 7-6
Wasseremissionen				
Schall	keine Angaben			
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

### 7.3.2.2 Modul "Deponierung Betonabbruch"

Im Modul "Deponierung Betonabbruch" wird die Ablagerung des Betonabbruchs auf einer Bauschuttdeponie betrachtet. Da angenommen wird, daß die Qualität des Betonabbruchs für eine Aufbereitung geeignet ist, wird die entsprechende Menge (2272 kg) als Rohstoffverbrauch eingestuft.

Während das durch die vorgegebene Menge an Betonabbruch bestimmbare Deponievolumen eindeutig bestimmt werden kann, ist eine Abschätzung der durch Sickerwässer ausgelaugten Schadstoffe aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten an Verunreinigungen bzw. Kontaminationen sehr problematisch. Die verwendete Datenquelle [70] beinhaltet

unter anderem die Ergebnisse von Eluationsversuchen nach dem DEV S4 - Verfahren verschieden zusammengesetzter Baurestmassenproben. Bei einer dieser Proben handelte es sich um Betonabbruch, deren Werte den Wasseremissionen der Tabelle 7-24 zugrunde gelegt wurden. Auf die Problematik des DEV-S4 - Verfahrens wurde in Kapitel 6.6.1 ("Kritik am Einsatz des DEV-S4 Verfahrens gemäß ÖNORM S 2072") eingegangen. Die in [70] angegebenen Versuchsergebnisse sind Konzentrationen in mg/l bei einer Probemenge von 80 g Feststoff und 800 ml Wasser. In Tabelle 7-24 wurden die Konzentrationen in Frachten ( $\text{mg/kg}_{\text{Feststoff}}$ ) umgerechnet und auf die zu deponierende Menge von 2272 kg bezogen. Die Dichte des Betonabbruchs wurde mit 1,8 angenommen.

Tabelle 7-23: Szenario "Deponierung", Input des Moduls "Deponierung Betonabbruch"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 1: <b>Deponierung Betonabbruch</b>				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch	Betonabbruch	2272	kg	
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen				
Energieverbrauch				
Wasserverbrauch				
Bodenbeanspruchung	Deponievolumen	1,26	m <sup>3</sup>	siehe Annahme
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-24: Szenario "Deponierung", Output des Moduls "Deponierung Betonabbruch"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 1: <b>Deponierung Betonabbruch</b>				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte				
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle				
Luftemissionen	keine Angaben			
Wasseremissionen	Chlorid	149,95	g	
	Sulfat	454,40	g	
	Eisen	1,82	g	
	Chrom	0,91	g	
	Zink	1,59	g	
Schall				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

### 7.3.2.3 Modul "Herstellung Zement"

Die erforderliche Zementmenge ist für beide Szenarien gemäß den gewählten Betonrezepturen (Tabelle 7-2) gleich und beträgt 365 kg. Die Input- und Outputwerte des Moduls "Herstellung Zement" im Szenario "Deponierung" sind daher ident mit jenen des Szenarios "Recycling" (Tabelle 7-10, Tabelle 7-11).

#### *7.3.2.4 Modul "Transport Zement"*

Für den Transport des erforderlichen Zements gilt das Gleiche wie beim Modul "Herstellung Zement" (Kapitel 7.3.2.3). Die entsprechenden Input- und Outputwerte entsprechen jenen des Szenarios "Recycling" (Tabelle 7-12, Tabelle 7-13).

#### *7.3.2.5 Modul "Gewinnung Zuschlag 0/22"*

Beim Szenario "Deponierung" ist es erforderlich, die gesamte Menge an Zuschlag 0/22 aus Naturlagerstätten zu gewinnen. Gemäß der gewählten Betonrezeptur beträgt die erforderliche Menge 1894 kg (Tabelle 7-2). Die Datengrundlagen für die Gewinnung des Materials sind ident mit jenen des Moduls "Gewinnung Natursand 0/4" beim Szenario "Recycling" (siehe Kapitel 7.3.1.4) und entstammen der ETH-Zürich [65]. Die in Tabelle 7-25 und Tabelle 7-26 eingetragenen Werte sind auf die Zuschlagsmenge von 1894 kg bezogen.

Tabelle 7-25: Szenario "Deponierung", Input des Moduls "Gewinnung Zuschlag 0/22"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 4: Gewinnung Zuschlag 0/22				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch				
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen				
Energieverbrauch	Elektrischer Strom für Lagerstättenabbau	10,23	MJ	[65]
	Elektrischer Strom für Aufbereitung	3,41	MJ	[65]
Wasserverbrauch				
Bodenbeanspruchung	Rohstoffentnahme	1894	kg	laut Betonzezeptur
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-26: Szenario "Deponierung", Output des Moduls "Gewinnung Zuschlag 0/22"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 4: Gewinnung Zuschlag 0/22				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte				
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle	Abraum	0,38	t	[65]
Luftemissionen	SO <sub>2</sub>	12,76	g	[65,68]
	NO <sub>x</sub>	10,75	g	[65,68]
	Staub	1,17	g	[65,68]
	CO <sub>2</sub>	12655,45	g	[65,68]
	CO	8,50	g	[65,68]
	HC	0,64	g	[65,68]
Wasseremissionen				
Schall	keine Angaben			
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

### 7.3.2.6 Modul "Transport Zuschlag 0/22"

Die Berechnungen und Annahmen des Moduls "Transport Zuschlag 0/22" gleichen jenen des Moduls "Transport Natursand 0/4" und unterscheiden sich nur durch die transportierte Menge von 1894 kg (Natursand 758 kg).

Tabelle 7-27: Szenario "Deponierung", Input des Moduls "Transport Zuschlag 0/22"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 5: <b>Transport Zuschlag 0/22</b>				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch				
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen	Diesel	4,10	kg	laut Annahmen
Energieverbrauch	Diesel	164,15	MJ	laut Annahmen
Wasserverbrauch				
Bodenbeanspruchung				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-28: Szenario "Deponierung", Output des Moduls "Transport Zuschlag 0/22"

Sachbilanz-Outputströme					
Modul 5: <b>Transport Zuschlag 0/22</b>					
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle	
Kuppelprodukte					
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle					
Luftemissionen	Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	10,67	g	Tabelle 7-6	
	Blei (Pb)	4,51E-04	g	Tabelle 7-6	
	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	13049,66	g	Tabelle 7-6	
	Methan (CH <sub>4</sub> )	0,82	g	Tabelle 7-6	
	Benzol	4,10E-03	g	Tabelle 7-6	
	Benzo(a)pyren	2,05E-05	g	Tabelle 7-6	
	Lachgas (N <sub>2</sub> O)	0,33	g	Tabelle 7-6	
	Partikel	4,92	g	Tabelle 7-6	
	Kohlenmonoxid (CO)	213,39	g	Tabelle 7-6	
	Kohlenwasserstoffe (HC)	98,49	g	Tabelle 7-6	
	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	320,09	g	Tabelle 7-6	
Wasseremissionen					
Schall	keine Angaben				
Qualitative Aspekte					
Sonstige Aspekte					

### 7.3.2.7 Modul "Herstellung Frischbeton"

Die Berechnung der Input- und Outputwerte des Moduls "Herstellung Frischbeton" ist ident mit jener des Moduls "Herstellung Recycling-Frischbeton" (Kapitel 7.3.1.6, Tabelle 7-19 und Tabelle 7-20). Die zu mischende Menge beträgt jedoch bei diesem Modul 2449 kg (bei Recycling-Frischbeton 2472 kg), da das Wasser zum Vornässen der Zuschläge entfällt. Die Werte unterscheiden sich dementsprechend geringfügig (Tabelle 7-29, Tabelle 7-30).

Tabelle 7-29: Szenario "Deponierung", Input des Moduls "Herstellung Frischbeton"

Sachbilanz-Inputströme				
Modul 6: <b>Herstellung Frischbeton</b>				
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffverbrauch	Zement	365	kg	Tabelle 7-2
	Naturzuschlag 0/22	1894	kg	Tabelle 7-2
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen				
Energieverbrauch	Elektrischer Strom	16,80	MJ	[65]
Wasserverbrauch	Wasser	190	l	Tabelle 7-2
Bodenbeanspruchung				
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

Tabelle 7-30: Szenario "Recycling", Output des Moduls "Herstellung Frischbeton"

Sachbilanz-Outputströme				
Modul 6: <b>Herstellung Frischbeton</b>				
Wesentliche Outputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Wert	Einheit	Quelle
Kuppelprodukte				
Verwertbare und zu beseitigende Abfälle				
Luftemissionen	SO <sub>2</sub>	0,34	MJ	[65, 68]
	NO <sub>x</sub>	0,28	MJ	[65, 68]
	Staub	0,03	MJ	[65, 68]
	CO <sub>2</sub>	334,17	MJ	[65, 68]
	CO	0,22	MJ	[65, 68]
	HC	0,02	MJ	[65, 68]
Wasseremissionen				
Schall	keine Angaben			
Qualitative Aspekte				
Sonstige Aspekte				

### 7.3.3 Energiebilanzen

In der nachfolgenden Tabelle 7-31 sind die Energieverbräuche aller Module des Szenarios "Recycling" zusammengestellt. Der Großteil der für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Recyclingbeton erforderlichen Energiemenge ist dabei der Zementherstellung zuzuschreiben (84 %), den zweitgrößten Anteil machen die Transporte von Zement und Natursand 0/4 mit 12 % aus. Außer bei der Aufbereitung der Baurestmassen waren keine Daten bezüglich Schall verfügbar.

Tabelle 7-31: Energiebilanz des Szenarios "Recycling"

ENERGIEBILANZ SZENARIO "RECYCLING"										
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Einheit	Aufbereitung	Herstellung	Transport	Gewinnung	Transport	Herstellung	Summe	
			Baurestmassen 4/22	Zement	Zement	Natursand 0/4	Natursand 0/4	Recycling Frischbeton		
Energieverbrauch (aus Input)	Diesel	MJ	24,54	8,47	92,47			65,69	191,17	
	Elektrischer Strom	MJ		139,61		5,46		16,96	162,03	
	Steinkohle	MJ		442,12					442,12	
	Petrolkoks	MJ		60,66					60,66	
	Heizöl schwer	MJ		293,83					293,83	
	Heizöl mittel	MJ		4,93					4,93	
	Heizöl leicht und extraleicht	MJ		0,37					0,37	
	Erdgas	MJ		20,15					20,15	
	Altreifen	MJ		51,98					51,98	
	Altöle	MJ		71,25					71,25	
	Lösungsmittel	MJ		11,79					11,79	
	Kunststoffe	MJ		1,28					1,28	
	Papierschlämme	MJ		6,86					6,86	
	<b>Summe</b>	<b>MJ</b>		<b>24,54</b>	<b>1113,29</b>	<b>92,47</b>	<b>5,46</b>	<b>65,69</b>	<b>16,96</b>	<b>1318,40</b>
	<b>Anteil Gesamtenergie</b>	<b>%</b>		<b>1,9%</b>	<b>84,4%</b>	<b>7,0%</b>	<b>0,4%</b>	<b>5,0%</b>	<b>1,3%</b>	<b>100,0%</b>
Schall (aus Output)	Brecher und Motor (d=25m)	dB	67						66,88	
	keine Angaben (k.A.)			k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		

In Abbildung 7-5 sind die prozentuellen Energieanteile der einzelnen Module an der Gesamtenergie für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Recyclingbeton B 300 graphisch dargestellt.

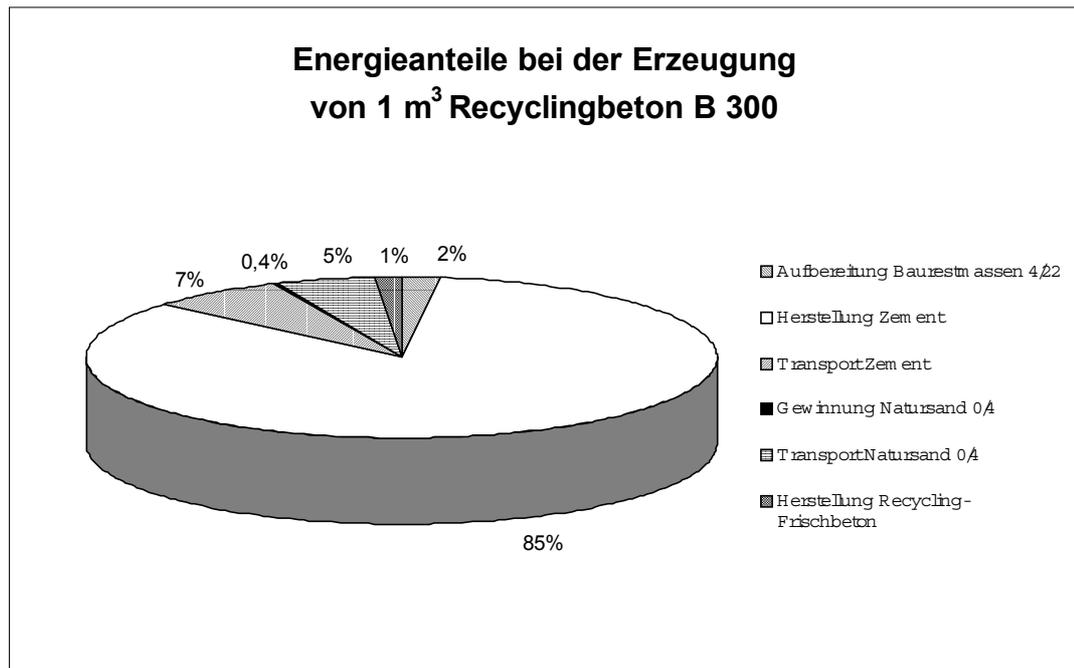


Abbildung 7-5: Zusammensetzung des Gesamtenergieaufwandes beim Szenario "Recycling"

Ebenso wie in Tabelle 7-31 wird in Tabelle 7-32 die Zusammensetzung der für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Normalbeton erforderlichen Energie dargestellt (Szenario "Deponierung").

Tabelle 7-32: Energiebilanz des Szenarios "Deponierung"

ENERGIEBILANZ SZENARIO "DEPONIERUNG"										
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Einheit	Transport	Deponierung	Herstellung	Transport	Gewinnung	Transport	Herstellung	Summe
			Betonabbruch zu Deponie	Betonabbruch	Zement	Zement	Zuschlag 0/22	Zuschlag 0/22	Frischbeton	
Energieverbrauch (aus Input)	Diesel	MJ	94,52		8,47	92,47		164,15		359,60
	Elektrischer Strom	MJ			139,61		13,64		16,80	170,05
	Steinkohle	MJ			442,12					442,12
	Petrolkoks	MJ			60,66					60,66
	Heizöl schwer	MJ			293,83					293,83
	Heizöl mittel	MJ			4,93					4,93
	Heizöl leicht und extraleicht	MJ			0,37					0,37
	Erdgas	MJ			20,15					20,15
	Altreifen	MJ			51,98					51,98
	Altöle	MJ			71,25					71,25
	Lösungsmittel	MJ			11,79					11,79
	Kunststoffe	MJ			1,28					1,28
	Papierschlämme	MJ			6,86					6,86
	<b>Summe</b>	<b>MJ</b>		<b>94,52</b>	<b>0,00</b>	<b>1113,29</b>	<b>92,47</b>	<b>13,64</b>	<b>164,15</b>	<b>16,80</b>
<b>Anteil Gesamtenergie</b>	<b>%</b>		<b>6,3%</b>	<b>0,0%</b>	<b>74,5%</b>	<b>6,2%</b>	<b>0,9%</b>	<b>11,0%</b>	<b>1,1%</b>	<b>100,0%</b>
Schall (aus Output)	keine Angaben (k.A.)		k.A.		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	

Die graphische Darstellung der prozentuellen Energiezusammensetzung bei der Erzeugung von 1 m<sup>3</sup> Normalbeton erfolgt in Abbildung 7-6.

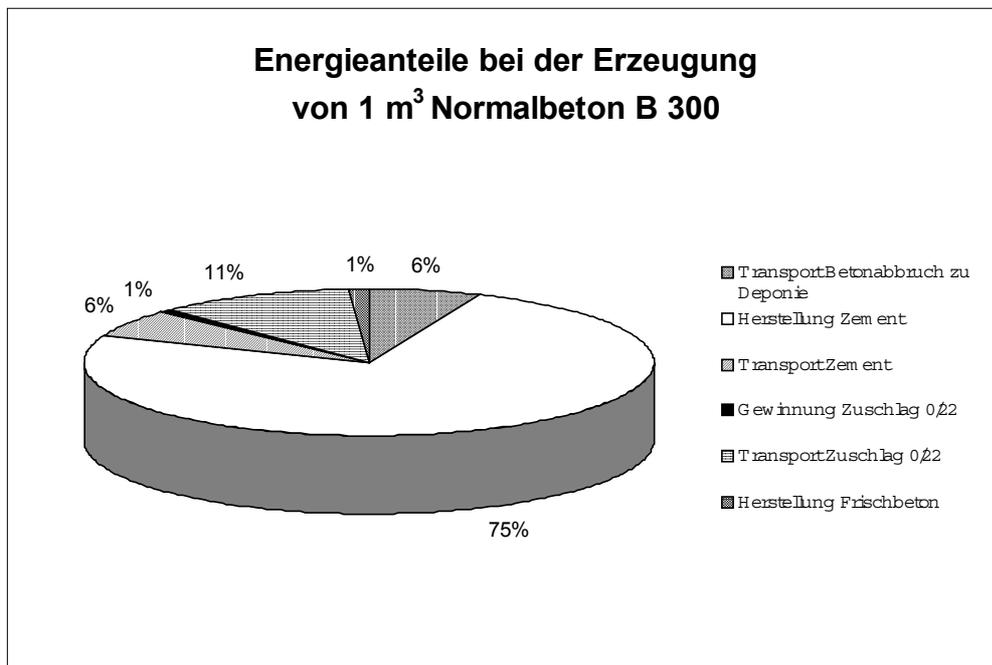


Abbildung 7-6: Zusammensetzung des Gesamtenergieaufwandes beim Szenario "Deponierung"

In Abbildung 7-7 sind die Gesamtenergieaufwände der Szenarien "Recycling" und "Deponierung" gegenübergestellt. Der Energieaufwand des Szenarios "Deponierung" beträgt etwa 1500 MJ und ist um 13 % höher als beim Szenario "Recycling". Hauptverantwortlich dafür ist im Vergleich ein zusätzliches Transportmodul (Baustelle-Deponie), sowie größere Mengen an zu transportierendem Zuschlagsmaterial. Dementsprechend ist der relative Anteil der Zementproduktion mit 75 % um 10 % geringer, da der Absolutwert bei beiden Szenarien gleich ist (Abbildung 7-6).

Wenn die im Szenario "Recycling" getroffene Annahme, daß sich die Aufbereitungsanlage am Ort des Abbruchs befindet, nicht zutrifft, ist ein Hin- und Retourtransport des Betonabbruchs bzw. des Recyclingbetons erforderlich. In diesem Fall würde sich der Gesamtenergieaufwand des Szenarios "Recycling" erhöhen.

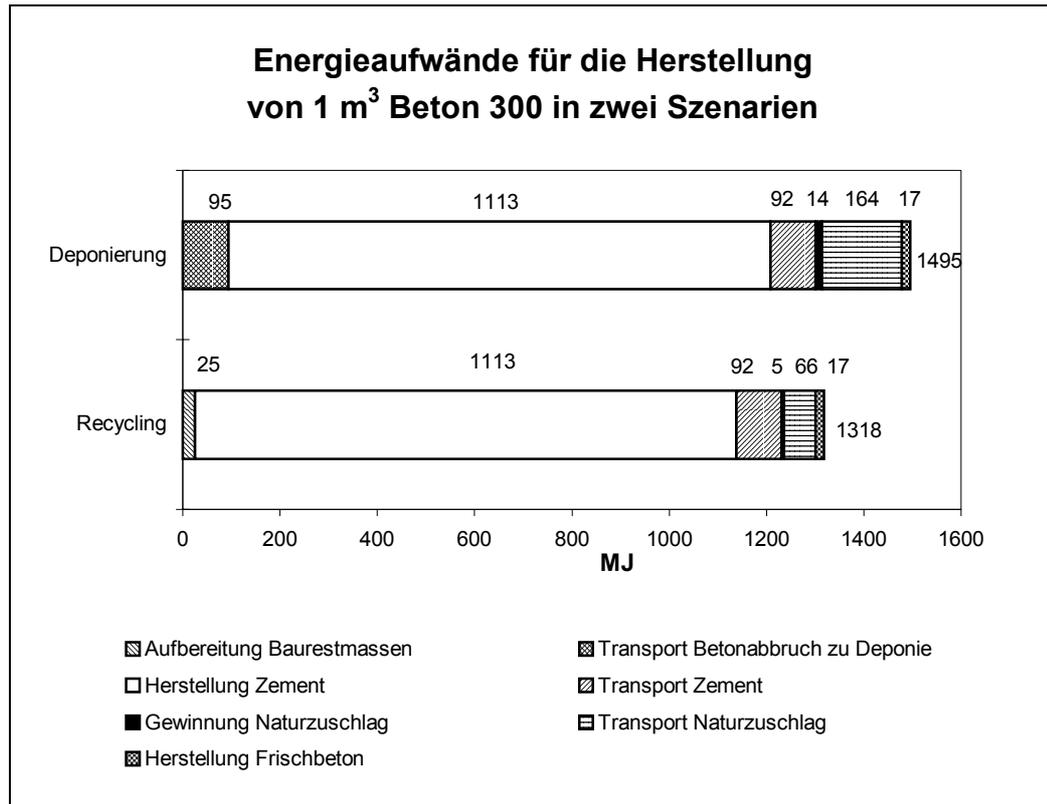


Abbildung 7-7: Gegenüberstellung der Gesamtenergieaufwände beider Szenarien

### 7.3.4 Stoffbilanzen

Die Stoffbilanzen der zwei untersuchten Szenarien (Tabelle 7-33, Tabelle 7-34) liefern eine Übersicht über die in den einzelnen Modulen (Prozessen) stattfindenden Stoffflüsse mit Basis der jeweiligen Input- und Outputtabellen. Die einzelnen Werte werden über die Module aufsummiert, um jene Mengen zu ermitteln, die im Zuge der vordefinierten Lebensabschnitte in die Systemgrenzen ein- und ausfließen. Anhand dieser Übersichten ist es möglich, die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Szenarien "Recycling" und "Deponierung" zu beurteilen.

Bei beiden Szenarien wird der nach dem Bauwerksabbruch erhaltene sortenreine Betonabbruch (2272 kg) als Rohstoffverbrauch verbucht: beim Szenario Recycling im Rahmen der Aufbereitung in einer Recycling-Anlage, beim zweiten Szenario durch die Deponierung. Die Aufbereitung liefert zwei Kuppelprodukte: 454 kg Brechsand und 682 kg der Fraktion 22/X, die erneut dem Brechvorgang zugeführt werden können. Das Deponieren der Baurestmassen bewirkt noch einen weiteren wesentlichen Unterschied der beiden Szenarien: Im Zuge der Deponierung finden durch Sickerwässer Auslaugungen statt, die als Wasseremissionen (Tabelle 7-34) in die Stoffbilanz Eingang finden.

Beim Recycling werden nur 758 kg Primärmaterial aus Naturlagerstätten (Bodenbeanspruchung/Rohstoffentnahme) benötigt, beim Szenario "Deponierung" 1894 kg, also um 149 % mehr.

Bei der Deponierung werden überdies 1260 m<sup>3</sup> an Deponievolumen verbraucht, die beim Szenario "Recycling" geschont werden.

Während die genannten Unterschiede zwischen beiden Szenarien in jedem Fall zutreffen, würde das Anfahren einer entfernten Recyclinganlage den Energieaufwand, den Treibstoffverbrauch und entsprechend die Schadstoffemissionen erhöhen.

Die Zementproduktion erweist sich in beiden Szenarien als stoff- und energieintensiver Prozeß, der jedoch unabdingbar ist, sofern Beton hergestellt werden soll.

Grundvoraussetzung für die Möglichkeit des Recyclings ist jedenfalls der Anfall von geeigneten Baurestmassen, da ansonsten nur das Szenario "Deponierung" möglich ist.

Tabelle 7-33: Stoffbilanz des Szenarios "Recycling"

STOFFBILANZ SZENARIO "RECYCLING"									
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Einheit	Aufbereitung Baurestmassen 4/22	Herstellung Zement	Transport Zement	Gewinnung Natursand 0/4	Transport Natursand 0/4	Herstellung Recycling Frischbeton	Summe
Rohstoffverbrauch (aus Input)	sortenreiner Betonabbruch	kg	2272,0						2272,00
	Kalk-Mergel-Ton	kg		426,83					426,83
	Gips	kg		18,72					18,72
	Anhydrit	kg		3,80					3,80
	Sonstiges	kg		6,17					6,17
	Pyritabbrand	kg		3,32					3,32
	Rea-Gips	kg		0,95					0,95
	Hüttensand	kg		44,64					44,64
	Flugasche	kg		9,93					9,93
	Zement	kg							365,00
Natursand 0/4	kg							758,00	758,00
Betonrecyclingsplitt 4/22	kg							1136,00	1136,00
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen (aus Input)	Diesel	kg	0,61	0,21	2,31		1,64		4,78
	Steinkohle	kg		13,84					13,84
	Petrolkoks	kg		1,78					1,78
	Heizöl schwer	kg		7,39					7,39
	Heizöl mittel	kg		0,12					0,12
	Heizöl leicht und extraleicht	kg		0,01					0,01
	Erdgas	kg		0,56					0,56
	Altreifen	kg		2,50					2,50
	Altöle	kg		1,87					1,87
	Lösungsmittel	kg		0,64					0,64
	Kunststoffe	kg		0,04					0,04
	Papierschlämme	kg		1,09					1,09
	Säcke	kg		0,23					0,23
	Mehrwegpaletten	Stk		0,01					0,01
	Metalle	kg		0,06					0,06
	Maschinenersatzteile	kg		0,05					0,05
	Feuerfestes Material	kg		0,26					0,26
	Baumaterialien	kg		0,02					0,02
	Gummi und Kunststoffe	kg		0,05					0,05
	Fette	kg		0,01					0,01
	Öle	kg		0,02					0,02
	Mahlhilfen	kg		0,09					0,09
	Sprengstoffe	kg		0,04					0,04
Reinigungsmaterial	kg		0,01					0,01	
Druckluft	kg		17,08					17,08	
Zündschnüre	m		0,01					0,01	
Wasserverbrauch (aus Input)	Wasser	l		190				213	403,00
Bodenbeanspruchung (aus Input)	Rohstoffentnahme	kg				758			758,00
Luftemissionen (aus Output)	Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	g	1,59	43,44	6,01	0,11	4,27	0,34	55,76
	Blei (Pb)	g	6,75E-05	1,35E-03	2,54E-04		1,81E-04		1,85E-03
	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	g	1950,74	213890	7351,10	108,56	5222,62	337,31	228860,33
	Methan (CH <sub>4</sub> )	g	0,12		0,46		0,33		0,91
	Benzol	g	6,13E-04		2,31E-03		1,64E-03		4,57E-03
	Benzo(a)pyren	g	3,07E-06		1,16E-05		8,21E-06		2,28E-05
	Lachgas (N <sub>2</sub> O)	g	0,05		0,18		0,13		0,37
	Partikel	g	0,74		2,77		1,97		5,48
	Kohlenmonoxid (CO)	g	31,90	338,72	120,21	0,07	85,40	0,23	576,53
	Kohlenwasserstoffe (HC)	g	14,72		55,48	6,06E-03	39,42	1,88E-02	109,64
	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	g	47,85	573,78	180,31	0,09	128,10	0,29	930,42
	Staubkonzentration	K	371,00						371,00
	Staub	g		62,415		0,01		0,03	62,46
	Summe org. C	g		8,76					8,76
	Cd	g		7,30E-04					7,30E-04
	Ti	g		2,70E-03					2,70E-03
	Be	g		7,30E-05					7,30E-05
As	g		1,17E-03					1,17E-03	
Co	g		5,11E-04					5,11E-04	
Ni	g		4,75E-04					4,75E-04	
Hg	g		5,48E-03					0,01	
Wasseremissionen (aus Output)	Abwasser	kg		1,46E-03					1,46E-03

Tabelle 7-34: Stoffbilanz des Szenarios "Deponierung"

STOFFBILANZ SZENARIO "DEPONIERUNG"										
Wesentliche Inputströme	Wesentliche erfaßte Kriterien bzw. Indikatoren	Einheit	Transport Betonabbruch zu Deponie	Deponierung Betonabbruch	Herstellung Zement	Transport Zement	Gewinnung Zuschlag 0/22	Transport Zuschlag 0/22	Herstellung Frischbeton	Summe
Rohstoffverbrauch (aus Input)	sortenreiner Betonabbruch	kg		2272,0						2272,00
	Kalk-Mergel-Ton	kg			426,83					426,83
	Gips	kg			18,72					18,72
	Anhydrit	kg			3,80					3,80
	Sonstiges	kg			6,17					6,17
	Pyritabbrand	kg			3,32					3,32
	Rea-Gips	kg			0,95					0,95
	Hüttensand	kg			44,64					44,64
	Flugasche	kg			9,93					9,93
	Zement	kg							365,00	365,00
Naturzuschlag 0/22	kg							1894,00	1894,00	
Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen (aus Input)	Diesel	kg	2,36		0,21	2,31		4,10		8,99
	Steinkohle	kg			13,84					13,84
	Petrolkoks	kg			1,78					1,78
	Heizöl schwer	kg			7,39					7,39
	Heizöl mittel	kg			0,12					0,12
	Heizöl leicht und extraleicht	kg			0,01					0,01
	Erdgas	kg			0,56					0,56
	Altreifen	kg			2,50					2,50
	Altöle	kg			1,87					1,87
	Lösungsmittel	kg			0,64					0,64
	Kunststoffe	kg			0,04					0,04
	Papierschlämme	kg			1,09					1,09
	Säcke	kg			0,23					0,23
	Mehrwegpaletten	Stk			0,01					0,01
	Metalle	kg			0,06					0,06
	Maschinenersatzteile	kg			0,05					0,05
	Feuerfestes Material	kg			0,26					0,26
	Baumaterialien	kg			0,02					0,02
	Gummi und Kunststoffe	kg			0,05					0,05
	Fette	kg			0,01					0,01
	Öle	kg			0,02					0,02
	Mahlhilfen	kg			0,09					0,09
	Sprengstoffe	kg			0,04					0,04
Reinigungsmaterial	kg			0,01					0,01	
Druckluft	kg			17,08					17,08	
Zündschnüre	m			0,01					0,01	
Wasserverbrauch (aus Input)	Wasser	l			190				190	380,00
Bodenbeanspruchung (aus Input)	Rohstoffentnahme	kg					1894			1894,00
	Deponievolumen	m <sup>3</sup>		1,26						1,26
Luftemissionen (aus Output)	Schwefeldioxid (SO2)	g	6,14		43,44	6,01	12,76	10,67	0,34	79,36
	Blei (Pb)	g	2,60E-04		1,35E-03	2,54E-04		4,51E-04		2,32E-03
	Kohlendioxid (CO2)	g	7513,96		213890	7351,10	12655,45	13049,66	334,17	254794,35
	Methan (CH4)	g	0,47			0,46		0,82		1,76
	Benzol	g	2,36E-03			2,31E-03		4,10E-03		8,78E-03
	Benzo(a)pyren	g	1,18E-05			1,16E-05		2,05E-05		4,39E-05
	Lachgas (N2O)	g	0,19			0,18		0,33		0,70
	Partikel	g	2,84			2,77		4,92		10,53
	Kohlenmonoxid (CO)	g	122,87		338,72	120,21	8,50	213,39	0,22	803,91
	Kohlenwasserstoffe (HC)	g	56,71			55,48	6,41E-01	98,49	1,87E-02	211,34
	Stickoxide (NOx)	g	184,30		573,78	180,31	10,75	320,09	0,28	1269,51
	Staubkonzentration	K								0,00
	Staub	g			62,415		1,17		0,03	63,62
	Summe org. C	g			8,76					8,76
	Cd	g			7,30E-04					7,30E-04
	Ti	g			2,70E-03					2,70E-03
	Be	g			7,30E-05					7,30E-05
	As	g			1,17E-03					1,17E-03
	Co	g			5,11E-04					5,11E-04
Ni	g			4,75E-04					4,75E-04	
Hg	g			5,48E-03					0,01	
Wasseremissionen (aus Output)	Abwasser	kg			1,46E-03					1,46E-03
	Chlorid	g		149,95						149,95
	Sulfat	g		454,40						454,40
	Eisen	g		1,82						1,82
	Chrom	g		0,91						0,91
	Zink	g		1,59						1,59

### 7.3.5 Sachbilanz laut Standardberichtsbogen

#### TEIL C: SACHBILANZ

##### C.1. Input- und Outputströme:

C.1.1. Inputströme:

*laut angegebenen Tabellen*

C.1.2. Outputströme

*laut angegebenen Tabellen*

C.1.3. Einheiten

In welchen Einheiten wurden die Daten überwiegend erhoben und dargestellt?

*bezogen auf Masseinheiten (z.B. g/kg<sub>Diesel</sub>)*

##### C.2. Energieerzeugung

Wie wurden Rohstoffe, die sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden, behandelt?

*Berücksichtigung von Masse und Heizwert bei fossilen Brennstoffen; bei elektrischer Energie*

*Annahme von Strom-Mix und entsprechenden Emissionen (Tabelle 7-14);*

##### C.3. Verkehr/Transporte

Sofern die durch den Verkehr und Transport entstehenden Umweltbelastungen berücksichtigt wurden:

Welches Transportsystem wurde dabei angenommen?:

(X) .....spezifischer Transportmix, nämlich:

*aufgrund der Annahmen ausschließlich LKW-Güterverkehr*

##### C.4. Verwendung, Verwertung und Entsorgung der verwertbaren und der zu entsorgenden Abfälle

C.4.1. Wieder- bzw. Weiterverwendung

Wurde eine Wieder- bzw. Weiterverwendung der Bilanzobjekte angenommen?

(X) .....Nein

*Anmerkung: (Bilanzobjekte = 1 m<sup>3</sup> Beton mit verschiedenen Zuschlägen)*

C.4.2. Stoffliche Verwertung von Abfällen

Verwertbare Abfälle wurden

(X) .....nicht berücksichtigt

C.4.3. Entsorgung

Welches Entsorgungssystem wurde gewählt:

*Szenario "Recycling": keines erforderlich; Szenario "Deponierung": Bauschuttdeponie;*

##### C.5. Kuppelprodukte

Die Verteilung der Input- und Outputströme zwischen dem Bilanzobjekt und den Kuppelprodukten wurde:

(X) .....berücksichtigt

wenn ja,

(X) .....entsprechend den jeweiligen Massen. Einheiten: kg/m<sup>3</sup>

## 7.4 Wirkungsbilanz

Gemäß dem Entwurf der ISO 14 040 [39] hat die Wirkungsbilanz (Life Cycle Assessment) zum Ziel, die Auswirkungen der in der Sachbilanz erhobenen Stoff- und Energieströme auf die Umwelt zu beurteilen (siehe auch Kapitel 5.3.3). Tabelle 7-35 zeigt die Unterscheidung von Wirkungskategorien des *Umweltbundesamtes Berlin* [71] in jene, die in einer Ökobilanz jedenfalls enthalten sein sollten (Pflichtkategorien), und solche, die je nach Zieldefinition zu berücksichtigen sind (Kürkategorien). In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf die 7 Pflichtkategorien eingegangen.

Tabelle 7-35: Wirkungskategorien gemäß Umweltbundesamt Berlin [71]

<b>Pflichtkategorien</b>	<b>Kürkategorien</b>
Inanspruchnahme von Ressourcen	Ozonabbau
Treibhauseffekt	Bildung von Photooxidantien
Humantoxizität	Eutrophierung der Gewässer
Ökotoxizität	Belästigungen (Lärm, Geruch)
Versauerung von Gewässern und Böden	Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz
Flächenbedarf	Abwärme und Strahlung
Abfall	Beeinträchtigung der Naturschönheit und Artenvielfalt

### 7.4.1 Inanspruchnahme von Ressourcen

Laut *Bruck/Jasch/Tuschl* [37] werden Ressourcen in 5 verschiedene Typen unterschieden (Tabelle 7-36). Ressourcen, die nicht erneuerbar sind, gelten als abiotisch (z.B. fossile Energieträger). Biotische Ressourcen können sich innerhalb von Jahren oder Jahrzehnten erneuern (z.B. Wald).

Tabelle 7-36: Ressourcentypen nach *Bruck/Jasch/Tuschl* [37]

Ressourcentyp	Beispiele
abiotisch - endlich	Mineralien, fossile Brennstoffe
abiotisch - regenerierbar	Grundwasser, Oberflächenwasser
biotisch - endlich	Tropenholz, Torf
biotisch - regenerierbar	Wildpflanzen, Wildtiere
Produkte von Prozessen außerhalb der Systemgrenzen	Altpapier, chemische Reaktionskatalysatoren

Die Inanspruchnahme der ersten 4 Ressourcentypen kann laut *Danzmayr* [72] zu einem sogenannten Ressourcenverknappungsfaktor ( $R_i$ ) zusammengefaßt werden, der sich aus Weltjahresverbrauch [t/a], Neubildung [t/a] und Weltreserven [t] errechnet.  $R_i$  ist umgekehrt proportional zur theoretischen Dauer in Jahren bis zur Erschöpfung einer Ressource bei gleichbleibendem Verbrauch, seine Einheit ist [a<sup>-1</sup>]:

$$R_i = \frac{\text{Weltjahresverbrauch} - \text{Neubildung}}{\text{Weltreserven}} \quad \text{Gl. (7-5)}$$

Der aggregierte Ressourcenverbrauchs faktor R wird durch Gewichtung mit dem auf die funktionale Einheit bezogenen Verbrauch  $m_i$  und durch Aufsummieren über alle in Anspruch genommenen Ressourcen ermittelt:

$$R = \sum_i (m_i * R_i) \quad \text{Gl. (7-6)}$$

Bei Ermittlung eines derartigen Wertes sollte bedacht werden, daß unterschiedliche Ressourcen zu einem Wert aggregiert werden.

Auch *Bruck/Jasch/Tuschl* [37] gehen auf den Ressourcenverknappungsfaktor R ein. Dabei werden "Abiotische Ressourcenerschöpfung" (dimensionsloser Wert) sowie "Biotische Ressourcenerschöpfung" (Einheit [a<sup>-1</sup>]) definiert. Die Ermittlung des Ressourcenverknappungsfaktors R geht daraus jedoch nicht hervor. Die Addition der beiden in unterschiedlichen Einheiten definierten Ressourcenverknappungsfaktoren ist jedenfalls nicht möglich.

Die entsprechenden Rohstoffverbrauchswerte wurden im Rahmen der Sachbilanz ermittelt (Tabelle 7-33, Tabelle 7-34). Der Ressourcenverbrauchsfaktor R konnte jedoch nicht berechnet werden, da Angaben bezüglich Weltjahresverbrauch, Neubildung und Weltreserven von Kies und Sand sowie von den Ausgangsrohstoffen für die Zementherstellung nicht verfügbar waren [66]. In diesem Zusammenhang erscheint die Verwendung von regionalen Verbrauchs- bzw. Reservewerten sinnvoller, da der Rohstofftransport im Bauwesen auf das regionale Umland begrenzt ist.

Während sich die untersuchten Szenarien durch den Zementverbrauch nicht unterschieden, wurden beim Szenario "Deponierung" 1894 kg Primärmaterial aus Naturlagerstätten verbraucht - 149 % mehr als beim Szenario "Recycling" (758 kg). Durch das Recycling von Betonabbruch werden die Kies- und Sandressourcen in den Naturlagerstätten um weniger als die Hälfte belastet als bei einer Deponierung der Baurestmassen.

#### **7.4.2 Treibhauseffekt**

Bei der Quantifizierung des Treibhauseffektes (global warming potential = GWP) durch die in der Stoffbilanz ermittelten Luftemissionen wird nicht der Beitrag zum Treibhauseffekt an sich berechnet, sondern der Beitrag in Bezug auf die Referenzsubstanz CO<sub>2</sub> [73]. Der Beitrag eines Stoffes i errechnet sich dann aus dem Produkt aus emittierter Menge  $m_i$  und dem zugehörigen GWP<sub>i</sub> - Wert:

$$\text{Treibhauseffekt} = \sum_i m_i * GWP_i \quad \text{Gl. (7-7)}$$

Je nach Zeithorizonten (20, 100 oder 500 Jahre) werden unterschiedliche GWP<sub>i</sub> - Werte definiert (Tabelle 7-37). Die treibhausverstärkende Wirkung von einem Kilogramm eines Treibhausgases wird durch Multiplikation mit dem GWP<sub>i</sub> - Wert im Vergleich zu jener eines Kilogramms CO<sub>2</sub> bestimmt. Der GWP<sub>i</sub> - Wert wird auch als CO<sub>2</sub> - Äquivalent bezeichnet.

Tabelle 7-37: GWPi - Werte von Treibhausgasen bei Zeithorizonten von 20, 100 bzw. 500 Jahren [65]

Treibhausgase	GWP 20 [kg CO <sub>2</sub> aeq]	GWP 100 [kg CO <sub>2</sub> aeq]	GWP 500 [kg CO <sub>2</sub> aeq]
CH <sub>4</sub>	62	24,5	7,5
CO <sub>2</sub>	1	1	1
Halon	6200	5600	2200
N <sub>2</sub> O	290	320	180
FCKW R 134a	3300	1300	420
FCKW R 221	4300	1700	520

In Tabelle 7-38 und Tabelle 7-39 werden die CO<sub>2</sub> - Äquivalente für einen Zeithorizont von 100 Jahren zugrunde gelegt.

Tabelle 7-38: Treibhauseffekt für das Szenario "Recycling"

Treibhausgas	Wert	GWPi	CO <sub>2</sub> aeq
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	228 860,33	1,00	228.860,33
Methan (CH <sub>4</sub> )	0,91	24,50	22,38
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	0,37	320,00	116,93
<b>Summe in Gramm</b>			<b>228 999,64</b>

Tabelle 7-39: Treibhauseffekt für das Szenario "Deponierung"

Treibhausgas	Wert	GWPi	CO <sub>2</sub> aeq
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	254 794,35	1,00	254 794,35
Methan (CH <sub>4</sub> )	1,76	24,50	43,01
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	0,70	320,00	224,72
<b>Summe</b>			<b>255 062,08</b>

Das CO<sub>2</sub> - Äquivalent und somit der Treibhauseffekt ist somit beim Szenario "Deponierung" um 11,4 % größer als beim Szenario "Recycling".

### 7.4.3 Humantoxizität

Die Quantifizierung der Humantoxizität erfolgt laut *Danzmayr* [72] durch Gewichtung von Emissionsfrachten. Dabei werden kritische Konzentrationen von Schadstoffen in einem m<sup>3</sup>

Luft definiert, und die in der Sachbilanz ermittelten Emissionswerte in kritische Volumina umgerechnet. Die Summe der kritischen Volumina ist dann jene Maßzahl, mit der eine vergleichsweise Abschätzung der Humantoxizität möglich ist. Die in Tabelle 7-40 und Tabelle 7-41 verwendeten kritischen Konzentrationen entstammen der Arbeit von *Danzmayr* [72].

Tabelle 7-40 Humantoxizität des Szenarios "Recycling"

Parameter	Abkürzung	kritische Konzentration [mg/m <sup>3</sup> ]	Werte laut Stoffbilanz [g]	kritisches Volumen [m <sup>3</sup> ]
Staub, Partikel		7,00E-05	67,94	970 564,48
Kohlenmonoxid	CO	8,00E-03	576,53	72 065,72
Stickoxide (inkl. N <sub>2</sub> O)	NO <sub>x</sub>	3,00E-05	930,79	31 026 184,46
Schwefeloxide	SO <sub>x</sub>	3,00E-05	55,76	1 858 621,81
Kohlenwasserstoffe	HC	1,50E-02	109,64	7 309,56
<b>Summe</b>				<b>33 934 746,04</b>

Tabelle 7-41: Humantoxizität des Szenarios "Deponierung"

Parameter	Abkürzung	kritische Konzentration [mg/m <sup>3</sup> ]	Werte laut Stoffbilanz [g]	kritisches Volumen [m <sup>3</sup> ]
Staub, Partikel		7,00E-05	74,15	1 059 346,97
Kohlenmonoxid	CO	8,00E-03	803,91	100 488,35
Stickoxide (inkl. N <sub>2</sub> O)	NO <sub>x</sub>	3,00E-05	1 270,21	42 340 445,48
Schwefeloxide	SO <sub>x</sub>	3,00E-05	79,36	2 645 280,08
Kohlenwasserstoffe	HC	1,50E-02	211,34	14 089,11
<b>Summe</b>				<b>46 159 649,99</b>

Die Humantoxizität ist beim Szenario "Deponierung" um 36 % größer als beim Szenario "Recycling".

#### 7.4.4 Ökotoxizität

Unter Ökotoxizität (Aquatic Ecotoxicity) werden laut [73] alle toxischen Wirkungen von Stoffen auf das Ökosystem verstanden. Für die Beurteilung der Ökotoxizität werden

maximal tolerierbare Schadstoffkonzentrationen definiert, bei denen keine Wirkungen mehr auf die Umwelt beobachtet werden können (no observable effect concentration, NOEC). Die Einheit wird in [m<sup>3</sup> Wasser] angegeben. Man unterscheidet in aquatische und terrestrische Wirkungsbereiche, für Luftemissionen sind keine Ökotoxizitäts-Indikatoren bestimmbar. Aufgrund der Aggregation verschiedenster potentieller Effekte (kanzerogene, allerergene Wirkungen etc.) bestehen bei dieser Wirkungskategorie noch große Unsicherheiten in der Bewertung [73].

Gemäß Umweltbundesamt Berlin [71] kann das Schadwirkungspotential einer Substanz auf das Ökosystem durch sogenannte "Effekte" angegeben werden. Diese werden in "single species tests" ermittelt und in LC<sub>50</sub>-Werten (Konzentration, bei der nach einem bestimmten Zeitraum 50 % der Individuen gestorben sind) oder in NOEL-Werten (no observed effect level) angegeben. Mit NOEC-Werten (laut [73]) und NOEL-Werten (laut [71]) dürfte das gleiche gemeint sein. Die Festlegung der entsprechenden Gewichtungsfaktoren stellt laut Umweltbundesamt [71] das größte Problem dar.

Gemäß *Bruck/Jasch/Tuschl* [37] errechnen sich aquatische bzw. terrestrische Ökotoxizität aus den Klassifikationsfaktoren ECA<sub>i</sub> bzw. ECT<sub>i</sub>, die Kehrwerte der maximal tolerierbaren Wasser- bzw. Bodenkonzentrationen darstellen. Die Variablen m<sub>w,i</sub> bzw. m<sub>s,i</sub> stehen für die vorhandene Menge der kritischen Substanz i im Wasser (w) bzw. Boden (s). Die Einheiten sind für die aquatische Ökotoxizität [m<sup>3</sup> Wasser] und für die terrestrische Ökotoxizität [kg Boden]. Die beiden Maßzahlen können laut *Bruck/Jasch/Tuschl* [37] nicht aggregiert, sondern müssen getrennt werden:

$$\text{Aquatische Ökotoxizität} = \sum_i ECA_i * m_{w,i} \quad \text{Gl. (7-8)}$$

$$\text{Terrestrische Ökotoxizität} = \sum_i ECT_i * m_{s,i} \quad \text{Gl. (7-9)}$$

ECA- bzw. ECT-Werte für kritische Substanzen waren nicht verfügbar, weshalb die Ökotoxizität in dieser Wirkungsbilanz nicht berechnet werden kann. Die möglichen Wasseremissionen durch Sickerwässer beim Szenario "Deponierung" werden daher nur aufgezählt (Tabelle 7-42). Bei der Herstellung von 365 kg Zement fallen in beiden

Szenarien 1,46 g an nicht näher definiertem Abwasser an (siehe Stoffbilanzen Tabelle 7-33 und Tabelle 7-34).

Tabelle 7-42: Wasseremissionen bei beiden Szenarien

Wasseremissionen	Szenario "Recycling"	Szenario "Deponierung"
Chlorid	-	149,95 g
Sulfat	-	454,40 g
Eisen	-	1,82 g
Chrom	-	0,91 g
Zink	-	1,59 g
Abwasser	1,46E-03 g	1,46E-03 g

#### 7.4.5 Versauerung von Gewässern und Böden

Die Emission von Substanzen, die Erde und Luft versauern, führt zu pH-Senkungen in Gewässern und Böden und damit zur erhöhten Mobilisierung von Schwermetallen. Die Ermittlung des Versauerungspotentials wird ähnlich dem Treibhauseffekt (Kapitel 7.4.2) mit einem Äquivalenzwert ermittelt, dem SO<sub>2</sub> - Äquivalent. Die Säurebildung wird durch Multiplikation der Menge  $m_i$  mit dem entsprechenden  $AP_i$  - Wert (acidification potential) und anschließende Aufsummierung bestimmt [73].

Ermittlung des Versauerungspotentials laut [73]:

$$\text{Säurebildung} = \sum_i AP_i * m_i \quad \text{Gl. (7-10)}$$

Die entsprechenden  $AP_i$  - Werte laut [73] sind in Tabelle 7-43 dargestellt.

Tabelle 7-43: APi - Werte verschiedener Emissionen

Emissionen	AP <sub>i</sub> -Wert in [kg SO <sub>2</sub> aeq]
HCl Salzsäure	0,88
HF Fluorwasserstoff	1,60
NH <sub>3</sub> Ammoniak	1,88
NO <sub>x</sub> Stickoxide als NO <sub>2</sub>	0,70
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	1,00

Das durch die zwei untersuchten Szenarien verursachte Versauerungspotential wird anhand der SO<sub>2</sub> - und NO<sub>x</sub> - Werte der Stoffbilanzen (Tabelle 7-33, Tabelle 7-34) für beide Szenarien ermittelt (Tabelle 7-45, Tabelle 7-44).

Tabelle 7-44: Versauerungspotential des Szenarios "Recycling"

Emissionen	APi - Wert	Werte laut Stoffbilanz	Versauerung
SO <sub>2</sub>	1,00	55,76	55,76
NO <sub>x</sub>	0,70	930,42	651,29
<b>Summe</b>			<b>707,05</b>

Tabelle 7-45: Versauerungspotential des Szenarios "Deponierung"

Emissionen	APi - Wert	Werte laut Stoffbilanz	Versauerung
SO <sub>2</sub>	1,00	79,36	79,36
NO <sub>x</sub>	0,70	1269,51	888,66
<b>Summe</b>			<b>968,02</b>

Das Versauerungspotential ist beim Szenario "Deponierung" um 37 % größer als beim Szenario "Recycling".

#### 7.4.6 Flächenbedarf/Bodenbeanspruchung

Während das Umweltbundesamt Berlin in "Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung" [71] die Wirkungskategorie "Flächenbedarf" definiert,

wird im "Standardberichtsbogen für produktbezogene Ökobilanzen" des Umweltbundesamtes Berlin [53] der Ausdruck "Bodenbeanspruchung" verwendet.

Bodenbeanspruchungen im Szenario "Deponierung" finden durch die Rohstoffentnahme des gesamten Betonzuschlages sowie durch die Inanspruchnahme von Deponievolumen durch den deponierten Betonabbruch statt. Im Gegensatz dazu wird beim Szenario "Recycling" nur der Natursand aus Rohstoffvorkommen entnommen, Deponievolumen wird nicht verbraucht. Die Bodenbeanspruchungen der beiden Szenarien gemäß Tabelle 7-33 und Tabelle 7-34 sind in Tabelle 7-46 gegenübergestellt. Die Bodenbeanspruchungen durch die Rohstoffentnahme für die Zementproduktion werden darin nicht dargestellt, da die entsprechenden Größen bei beiden Szenarien gleich groß sind und daher bei der vergleichenden Bewertung keine maßgebende Rolle spielen.

Tabelle 7-46: Maßgebende Bodenbeanspruchungen beider Szenarien

Art der Bodenbeanspruchung	Szenario "Recycling"	Szenario "Deponierung"
Rohstoffentnahme	758 kg Natursand 0/4	1894 kg Zuschlag 0/22
Deponievolumen	-	1,26 m <sup>3</sup>

Das Deponieren von Betonabbruch im Szenario "Deponierung" würde eine erhöhte Rohstoffentnahme um 149 % sowie den Verbrauch von 1,26 m<sup>3</sup> Deponievolumen im Vergleich zu 0 m<sup>3</sup> beim Szenario "Recycling" bewirken.

#### 7.4.7 Abfall

Unter der Kategorie "Verwertbare und zu beseitigende Abfälle" der Outputtabellen werden Abfälle aus der Zementherstellung und aus der Gewinnung von Naturmaterial (Sand 0/4 und Zuschlag 0/22) angeführt. Die entsprechenden Mengen sind in Tabelle 7-47 zusammengestellt.

Tabelle 7-47: Abfallmengen beider Szenarien

Abfallart	Szenario "Recycling"	Szenario "Deponierung"
<i>Gewinnung Primärmaterial:</i>		
Abraum	0,15 t	0,38 t
<i>Zementherstellung:</i>		
Elektromaterial	0,004 kg	0,004 kg
Metalle	0,123 kg	0,123 kg
Verpackungsmaterial	0,004 kg	0,004 kg
Altfette	0,003 kg	0,003 kg
Altöle	0,003 kg	0,003 kg
Reinigungsmittel	0,002 kg	0,002 kg
Sonstiges	0,021 kg	0,021 kg

Entsprechend der höheren erforderlichen Menge an Naturmaterial beim Szenario "Deponierung" ist auch der Anfall an Abraum beim Rohstoffabbau um 149 % höher als beim Szenario "Recycling".

Die beim Szenario "Recycling" bei der Baurestmassenaufbereitung anfallenden Kuppelprodukte (Tabelle 7-8: Szenario "Recycling", Output des Moduls "Aufbereitung Baurestmassen 4/22") stellen definitionsgemäß (laut [53]) keine Abfälle dar, sondern Nebenprodukte, die einer Verwendung zugeführt werden **können** (Tabelle 7-48). Die bei der Herstellung der Fraktion 4/22 anfallende Grobfraktion 22/X kann erneut dem Brechvorgang zugeführt werden. Die möglichen Anwendungsgebiete (siehe Kapitel 4.4.3) für den anfallenden Brechsand 0/4 sind möglicherweise nicht an Ort und Stelle gegeben, weshalb die entsprechende Menge an Brechsand auch Abfall darstellen könnte.

Tabelle 7-48: Anfallende Kuppelprodukte bei der Baurestmassenaufbereitung

Kuppelprodukt	Menge [kg]
Brechsand 0/4	454
Grobfraktion 22/X	682

### 7.4.8 Wirkungsbilanz laut Standardberichtsbogen

#### TEIL D: WIRKUNGSBILANZ

##### D.1. Wurde vor der Verwertung eine Wirkungsbilanz erstellt?

(X).....Ja

##### D.2. Welche Kriterien wurden berücksichtigt?

(X).....Humantoxizität

(X).....Treibhauseffekt

(X).....Bodenbeanspruchung

(X).....Ökotoxizität

(X).....Versauerung

(X).....Ressourcenverbrauch

##### D.3. Welche Wirkungsindikatoren wurden innerhalb der Wirkungskategorien herangezogen?

Humantoxizität.....kritisches Volumen

Treibhauseffekt..... $CO_2$  - Äquivalente

Bodenbeanspruchung.....Rohstoffentnahme in kg, Deponievolumen in  $m^3$

Ökotoxizität.....nicht quantifiziert

Versauerung..... $SO_2$  - Äquivalente

Ressourcenverbrauch.....nicht quantifiziert

## 7.5 Interpretation

Laut ISO 14.040 [39] soll die Interpretation einer Ökobilanz eine Synthese von Erkenntnissen aus Sach- und Wirkungsbilanz beinhalten; Schlußfolgerungen, Empfehlungen oder die Einleitung eines iterativen Schrittes bei Zielverfehlung sind möglich.

### 7.5.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den Sach- und Wirkungsbilanzen werden in Tabelle 7-49 gegenübergestellt. Die Spalte "Beton" bezieht sich auf das Szenario "Deponierung", bei dem anfallender Betonabbruch deponiert und 1 m<sup>3</sup> Beton B 300 mit Zuschlag zu 100 % aus Naturmaterial erzeugt wird. In der Spalte "Recycling + Beton" sind die entsprechenden Werte des Szenarios "Recycling" enthalten. Der anfallende Betonabbruch wird darin aufbereitet und teilweise als Betonzuschlag für 1 m<sup>3</sup> Recyclingbeton B 300 verwendet. Der bei der Aufbereitung anfallende Brechsand 0/4 kann im Zuschlag des Recyclingbetons nicht verwendet werden und muß durch entsprechenden Natursand ersetzt werden.

Die Spalte "Recycling" beinhaltet die Werte des Moduls "Aufbereitung Baurestmassen 4/22" (Tabelle 7-7, Tabelle 7-8) aus dem Szenario "Recycling". Dadurch soll der geringe Einfluß der Baurestmassenaufbereitung an den Stoff- und Energiewerten des Szenarios "Recycling" veranschaulicht werden. Die Werte dieser Spalte sind in den Werten der Spalte "Recycling + Beton" enthalten. Nicht enthalten sind die Werte der Spalte "Recycling" in denen der Spalte "Beton", da dort keine Aufbereitung vorgenommen wird.

Der strukturelle Aufbau der einzelnen Kategorien und Subkategorien (Sachbilanz, Stoffbilanz, etc.) einer Ökobilanz ist ebenfalls aus der Tabelle 7-49 ersichtlich. Zwecks Darstellbarkeit wurden einige mengenmäßig sehr kleine Größen zu einer aufsummiert und unter "Sonstiges" dargestellt.

Tabelle 7-49: Gegenüberstellung von aus Stoff- und Wirkungsbilanzen (n.b. = nicht berechenbar)

			Einheit	Beton	Recycling	Recycling + Beton	
Sachbilanz	Stoffbilanz	Rohstoffverbrauch					
		sortenreiner Betonabbruch	kg	2.272,00	2.272,00	2.272,00	
		Kalk-Mergel-Ton	kg	426,83		426,83	
		Gips	kg	18,72		18,72	
		Anhydrit	kg	3,80		3,80	
		Sonstiges	kg	6,17		6,17	
		Pyritabbrand	kg	3,32		3,32	
		Rea-Gips	kg	0,95		0,95	
		Hüttensand	kg	44,64		44,64	
		Flugasche	kg	9,93		9,93	
		Zement	kg	365,00		365,00	
		Naturzuschlag 0/22	kg	1.894,00			
		Natursand 0/4	kg			758,00	
		Betonrecyclingsplitt 4/22	kg			1.136,00	
		Betriebs- und Hilfsstoffe				0,61	
		Diesel	kg	8,99			4,78
		Steinkohle	kg	13,84			13,84
		Petrolkoks	kg	1,78			1,78
		Heizöl schwer	kg	7,39			7,39
		Heizöl mittel	kg	0,12			0,12
		Heizöl leicht und extraleicht	kg	0,01			0,01
		Sonstiges	kg	24,62			24,62
		Wasserverbrauch					
		Wasser	l	380,00			403,00
		Bodenbeanspruchung					
		Rohstoffentnahme	kg	1.894,00			758,00
		Deponievolumen	m3	1,26			0,00
		Luftemissionen					
		Schwefeldioxid (SO2)	g	79,36		1,59	55,76
		Blei (Pb)	g	2,32E-03		6,75E-05	1,85E-03
		Kohlendioxid (CO2)	g	254.794,35		1.950,74	228.860,33
		Methan (CH4)	g	1,76		0,12	0,91
		Benzol	g	8,78E-03		6,13E-04	4,57E-03
		Benzo(a)pyren	g	4,39E-05		3,07E-06	2,28E-05
		Lachgas (NO2)	g	0,70		0,05	0,37
		Partikel	g	10,53		0,74	5,48
		Kohlenmonoxid (CO)	g	803,91		31,90	576,53
		Kohlenwasserstoffe (HC)	g	211,34		14,72	109,64
		Stickoxide (NOx)	g	1.269,51		47,85	930,42
		Staubkonzentration	K			371,00	371,00
		Staub	g	63,62			62,46
		Summe org. C	g	8,76			8,76
		Sonstiges	g	1,11E-02			1,11E-02
		Wasseremissionen					
		Abwasser	kg	1,46E-03			1,46E-03
		Chlorid	g	149,95			
		Sulfat	g	454,40			
		Eisen	g	1,82			
		Chrom	g	0,91			
		Zink	g	1,59			
		Energiebilanz	Energieverbrauch				
		Diesel	MJ	359,60		24,54	191,17
		Elektrischer Strom	MJ	170,05			162,03
		Steinkohle	MJ	442,12			442,12
		Petrolkoks	MJ	60,66			60,66
		Heizöl schwer	MJ	293,83			293,83
		Heizöl mittel	MJ	4,93			4,93
Heizöl leicht und extraleicht	MJ	0,37			0,37		
Erdgas	MJ	20,15			20,15		
Sonstige Energie	MJ	143,15			143,15		
<i>Gesamt</i>	<i>MJ</i>	<i>1.494,85</i>		<i>24,54</i>	<i>1.318,40</i>		
Abfall bzw. Kuppelprod.	Abraum aus Primärmaterialgewinnung	t	0,38		0,25		
Abfall aus Zementproduktion	kg	0,16			0,16		
Kuppelprodukte							
Brechsand 0/4	kg			454,00	454,00		
Grobfraktion 22/X	kg			682,00	682,00		
Wirkungsbilanz	Kriterien						
Inanspruchnahme von Ressourcen	R	n.b.	n.b.				
Treibhauseffekt	CO2 aeq	255.062	1.969		229.000		
Humantoxizität	krit V	46.159.650	1.665.230		33.934.746		
Ökotoxizität	m3 H2O	n.b.	n.b.		n.b.		
Versauerung von Gewässern und Böden	SO2 aeq	968,02	35,09		707,05		
Flächenbedarf / Bodenbeanspruchung							
Rohstoffentnahme	kg	1894,00			758,00		
Deponievolumen	m3	1,26					

Auffallend ist der geringe Energieeinfluß der Baurestmassenaufbereitung an der Gesamtenergie des Szenarios "Recycling" (24,54 MJ  $\equiv$  1,9 %). Die Luftemissionswerte bei der Aufbereitung sind auf die Dieselerbrennung zurückzuführen.

Besonders zu beachten sind die höheren Bodenbeanspruchungen durch erhöhte Rohstoffentnahme und durch den Verbrauch von Deponievolumen beim Szenario "Deponierung" (Spalte "Beton").

### **7.5.2 Zusammenfassung**

Ziel der vorgenommenen Ökobilanzierung war eine Aussage, ob und unter welchen Bedingungen das Recycling von Betonabbruch im Hinblick auf eine Verwendung als Betonzuschlag ökologisch sinnvoll ist.

#### *Gewählte Szenarien*

Ausgangspunkt der Überlegungen war der Anfall einer bestimmten Menge von Betonabbruch eines alten Betonbauwerkes und ein anschließender Neubau aus Beton am gleichen Ort. Unter der Annahme, daß man nach dem Abbruch 1 m<sup>3</sup> Beton B 300 benötigt, wurde ein Szenario definiert, bei dem ein Teil des Zuschlags (4/22) aus dem vor Ort aufbereiteten Betonabbruch stammt ("Recycling"). In einem zweiten Szenario ("Deponierung") wird keine Aufbereitung vorgenommen, der angefallene Betonabbruch wird auf eine Deponie verführt. Der gesamte erforderliche Zuschlag (für 1 m<sup>3</sup> B 300) muß im Szenario "Deponierung" in Naturlagerstätten abgebaut und angeliefert werden.

#### *Kritische Annahmen*

Nachfolgend werden jene Annahmen zusammengefaßt, die aufgrund der Komplexität der Materie getroffen werden mußten, um eine nachvollziehbare und transparente Bilanzierung überhaupt vornehmen zu können.

- Der Betonabbruch ist sortenrein, unvermischt und für eine Aufbereitung geeignet.
- Der Anfall anderer Baurestmassen bei einem Abbruch wurde nicht in die Systemgrenzen miteinbezogen.
- Die Aufbereitung des Betonabbruchs erfolgt in einer mobilen Recyclinganlage am Ort des Anfalls des Betonabbruchs.

- Die Verwendung des aufbereiteten Materials zielt auf einen Einsatz als Betonzuschlag hin; ebenso gibt es viele andere Einsatzmöglichkeiten mit weniger hohen Anforderungen an das aufbereitete Material.
- Es wurden zwei mögliche Lebensabschnitte von Beton betrachtet; eine zyklische mehrmalige Verwertung von Betonabbruch wurde nicht ins Kalkül gezogen.
- Die zugrundegelegten Transportwege stellen Durchschnittswerte dar und basieren auf genau beschriebenen Annahmen; Transportwege in der Praxis können davon je nach Rahmenbedingungen stark abweichen.
- Als Transportmittel wurde ausschließlich Straßengüterverkehr vorausgesetzt, da nicht angenommen werden konnte, daß sich ein Bauvorhaben direkt an einer Bahnstrecke befindet; auch dann wären Zwischentransporte per LKW erforderlich.
- Die tatsächliche Verwendung der bei der Aufbereitung anfallenden Kuppelprodukte wurde nicht in die Systemgrenzen mit einbezogen.
- Die Werte der Wasseremissionen bei der Deponierung entsprechen Versuchsergebnissen aus dem DEV-S4 - Verfahren (Kapitel 6.4.2) und müssen nicht der tatsächlich freigesetzten Menge durch Sickerwässer in einer Deponie entsprechen.

Eine Abkehr von einzelnen Annahmen kann ebenso realistische Szenarien liefern. Die Systemgrenzen, der Aufbau der Module und die Stoffflüsse müßten dann eventuell neu überlegt und auf Vergleichbarkeit überprüft werden.

#### *Ergebnisse des Szenarienvergleichs*

Erwartungsgemäß zeigten sich beim Szenario "Deponierung" höhere Energieaufwendungen durch mehr Transporte (Transport zur Deponie, größere Zuschlagsmenge aus Steinbruch). Dementsprechend erhöhten sich auch die entsprechenden Emissionen aus dem Dieserverbrauch der LKWs und die daraus abgeleiteten Äquivalenzwerte in der Wirkungsbilanz. Obwohl auch bei der Baurestmassenaufbereitung Energie verbraucht wird, ist diese mit 1,9 % Anteil an der Gesamtenergie (Szenario "Recycling") wesentlich geringer als der Energieanteil des Transportes zur Deponie mit 6,3 % (Szenario "Deponierung").

Die verwendete Zementmenge und die entsprechend erforderliche Energiemenge für die Zementproduktion war bei beiden Szenarien gleich. Der relative Anteil der Zementproduktion an der Gesamtenergie von 85 % beim Szenario "Recycling" ist wegen der geringeren Gesamtenergiemenge um 10 % höher als beim Szenario "Deponierung" mit 75 %.

Im Szenario "Recycling" wurde die ökologisch günstigste Variante der Aufbereitung von Baurestmassen am Ort des Anfalls durch eine mobile Anlage angenommen. Sofern dies nicht möglich ist und ein Transport zu einer entfernten Aufbereitungsanlage erforderlich wäre, würden sich Energieverbrauch und Emissionsausstoß im Szenario "Recycling" entsprechend erhöhen.

Durch einen anderen Ort der Aufbereitung jedoch nicht beeinflussbar sind das verbrauchte Deponievolumen und der weit höhere Rohstoffverbrauch durch die Zuschlagsgewinnung aus Naturlagerstätten im Szenario "Deponierung".

#### *Endergebnis*

Sofern die Rahmenbedingungen für eine Aufbereitung von Betonabbruch gegeben sind, wie z.B. Reinheit und Unvermischtheit der Baurestmassen, verfügbare Recyclinganlage, ausreichender Platz für Aufbereitung und Zwischenlagerung etc., kann im Hinblick auf geringere Energieaufwände sowie Schonung von Rohstoffreserven und Deponievolumen nicht am Baustoff-Recycling vorbeigegangen werden.

Selbst wenn die Anforderungen an neuen Beton derart sind, daß nur Naturzuschläge verwendet werden können, wäre die Deponierung von Betonabbruch eine ökologische Sünde. Gemäß der Richtlinie für Recyclingbaustoffe [17] gibt es vielerlei Möglichkeiten der Verwendung, für die sonst Primärmaterial aus Naturlagerstätten verwendet werden müßte.

### 7.5.3 Interpretation laut Standardberichtsbogen

#### TEIL E: INTERPRETATION

##### E.1. Wurde eine Interpretation vorgenommen?

(X).....Ja

##### E.2. In welcher Weise erfolgte die Interpretation der Daten?

(X).....nicht standardisierte, verbal argumentative Bewertung

##### E.3. Teilaggregation <sup>7</sup>

E.3.1. Welche Maß- und Kennzahlen wurden herangezogen?

(X)..... Ergebnisse der Wirkungsbilanz

(X)..... Einzelne Maßzahlen <sup>8</sup>

(X)..... Einzelne Kennzahlen <sup>9</sup>

E.3.2. Nach welchen Kriterien wurden die Maßzahlen gebildet?

(X).....Umweltmedien (Luft, Boden, Wasser)

E.3.3. Wie wurde innerhalb der Maßzahlen aggregiert?

*siehe Wirkungsbilanz*

E.3.4. Welche Maßzahlen wurden gebildet?

*siehe Wirkungsbilanz*

E.3.5. Welche Kennzahlen wurden gebildet?

(X).....Energieverbrauch

(X).....Rohstoffentnahme

(X).....Deponievolumen

##### E.4. Nach welcher Methode wurde eine Vollaggregation <sup>10</sup> zu einer Maßzahl durchgeführt?

*es wurde keine Vollaggregation durchgeführt*

##### E.5. Wurden neben ökologischen auch andere Aspekte zur Interpretation herangezogen?

(X).....Nein

Wurden die Herstellungsmengen der Bilanzeinheiten berücksichtigt?

(X).....Nein

##### E.6. Ergebnisse

*siehe verbale Interpretation*

##### E.7. Empfehlungen/Verbesserungsvorschläge

---

<sup>7</sup> Zusammenfassung von Ergebnissen der Sachbilanz zu mehreren Maßzahlen

<sup>8</sup> Zahlen, die mehrere unterschiedliche Aspekte zu einer Zahl aggregieren

<sup>9</sup> Spezifische Zahlen, die direkt aus der Sachbilanz in die Bilanzinterpretation übernommen werden

<sup>10</sup> Zusammenfassen von Ergebnissen der Sach- und Wirkungsbilanz zu einer einzigen Maßzahl

Die Teile F und G des Standardberichtsbogens [53] beinhalten noch weitere Fragen zur Dokumentation der erstellten Ökobilanz. Die darin vorgesehene kritische Beurteilung der Arbeit sowie eine Stellungnahme der Auftraggeber kann jedoch nicht vom Autor vorgenommen werden und entfällt daher. Nachfolgend sind die entsprechenden Fragen aufgelistet.

#### **TEIL F: KRITISCHE ANMERKUNGEN UND WÜRDIGUNGEN**

##### **F.1. Allgemeiner Eindruck der Studie**

F.1.1. Nachvollziehbarkeit und Transparenz

F.1.2. Stimmigkeit in der Abgrenzung und Einengung des Untersuchungsrahmens und der Festlegung der notwendigen Maßnahmen

F.1.3. Offenlegung der Datenquellen

F.1.4. Übersichtlichkeit der Studie

##### **F.2. Allgemeine Anmerkungen**

##### **F.3. Verbesserungsvorschläge**

##### **F.4. Datum der Erstellung des Standardberichtsbogens**

#### **TEIL G: STELLUNGNAHME DER AUFTRAGGEBER DER PRODUKTILANZ ZUM STANDARDBERICHTSBOGEN**

##### **G.1. Stellungnahme zum vorliegenden Standardberichtsbogen**

##### **G.2. Verfasser der Stellungnahme**

##### **G.3. Datum der Erstellung der Stellungnahme**

## **8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

In Österreich fallen jährlich etwa 39 Millionen Tonnen Restmassen und Abfälle an, davon etwa 22 Millionen Tonnen Baurestmassen inklusive Baustellenabfälle. Die Wiederverwertung bzw. das Recycling von Baurestmassen ist vom Gesetzgeber vorgeschrieben und dient der Schonung von Rohstoffreserven und Deponievolumen.

### *Technische Eigenschaften von Recycling-Baustoffen*

Da Recycling-Baustoffe im Vergleich zu Primärbaustoffen über teilweise andere technische Eigenschaften verfügen, müssen je nach Anwendungsgebiet Überlegungen angestellt werden, unter welchen Umständen Recycling-Baustoffe in der Praxis zur Anwendung kommen können.

So stellte sich heraus, daß man Recyclingbetongranulat als Zuschlagsstoff für Beton (B 300) problemlos verwenden kann. Die entsprechenden Betoneigenschaften lassen gleich gute Ergebnisse wie bei der Verwendung von herkömmlichem Zuschlagsmaterial erwarten. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß der Recyclingbrechsand (0-4 mm) durch Natursand ersetzt wird und daß das erhöhte Wasseraugverhalten von Recyclingbetongranulat in der Betonrezeptur entsprechend berücksichtigt wird.

Da für die entsprechende praktische Umsetzung noch keine technischen Regelwerke oder Richtlinien existieren, wäre die Schaffung einer derartigen Richtlinie für die Ausschreibungsfähigkeit von Beton mit Zuschlag aus Recyclingmaterial notwendig.

### *Ökologische Eigenschaften von Recycling-Baustoffen*

Für die Ermittlung der Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen in Österreich wird das sogenannte DEV-S4 - Verfahren vorgeschrieben. Je nach Schadstoffkonzentrationen in den Eluaten wird in unterschiedliche Eluatklassen nach ÖN S 2072 eingestuft. Dieses Verfahren stellte sich jedoch aufgrund seiner Versuchsanordnung als nicht praxisgerecht heraus und sollte daher entweder modifiziert oder durch ein alternatives Verfahren ersetzt werden.

### *Ökobilanz von Recycling-Beton*

In dieser Arbeit wurde eine vergleichende Ökobilanz zweier Szenarien "Recycling" und "Deponierung" vorgenommen, um die Frage nach der ökologischen Relevanz des Recyclings von Betonabbruch im Hinblick auf eine Verwendung als Betonzuschlag zu beantworten. Der Aufbau der Ökobilanz entspricht der noch im Entwurfsstadium befindlichen ISO 14.040 [39]. Zusätzlich wurde eine Dokumentation nach dem "Standardberichtsbogen" des Umweltbundesamtes Berlin [53] vorgenommen. Die getroffenen Annahmen wurden genau dokumentiert, um die Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

Die Erzeugung von 1 m<sup>3</sup> Beton B 300 mit Recyclingbetongranulat in der Splittfraktion 4/22 ergab einen geringeren Energieaufwand als die Erzeugung von 1 m<sup>3</sup> Beton mit Zuschlag aus Naturmaterial bei gleichzeitiger Deponierung des Betonabbruchs. Auch wenn die angenommene Aufbereitung durch eine mobile Recyclinganlage am Ort des Anfalls des Betonabbruchs nicht möglich ist, wäre die Deponierung von sortenreinem Betonabbruch eine ökologische Sünde, da es hierfür eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten gibt, für die sonst Naturmaterial verwendet werden müßte.

Die Ökobilanz stellt ein Instrument dar, mit dem man versuchen kann, der ökologischen "Wahrheit" näher zu kommen. Die in der Entstehung befindliche Normung kann dafür bestenfalls Grundgerüste und allgemeine Anforderungen definieren, nicht aber die richtigen Vorgangsweisen in der Umsetzung. Da die Ökobilanz ein Universalinstrument für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete sein soll, wäre dies auch nicht möglich. Daher obliegt es dem Ersteller bzw. Autor der Ökobilanz, geeignete Systemgrenzen und Module zu definieren, sorgfältig Daten zu erfassen und getroffene Annahmen nachvollziehbar zu dokumentieren. Damit stehen oder fallen Qualität und Aussagekraft einer Ökobilanz.—

## 9 MASTER'S THESIS

More than half of the waste in Austria (22 million tons) is made up of construction debris. Recycling of building materials is stipulated by laws in Austria and helps to protect valuable resources and to keep dumps small.

### *Technical properties of recycling building materials*

Some properties of recycling building materials are different compared to traditional raw materials. Therefore it must be considered under which circumstances recycling building materials can be used in practice depending on the application.

Experiments showed that recycled concrete can be used for the production of new concrete without problems. The using of recycled concrete for the production of new concrete can bring the same results like using traditional raw material. The requirements for using recycled concrete are that the crushed sand fraction is replaced by sand from the quarry and that water absorption of the recycled material is considered in the concrete mix.

Though the knowledge from experiments, how recycled concrete can be used for the production of new concrete, no guidelines have been developed for the technology yet. This would be important for the realization of its application in practice.

### *Environmental compatibility of recycling building materials*

The testing of environmental compatibility of recycling building materials according to the DEV-S4 - method which is stipulated in Austria is not in agreement with practical conditions. The DEV-S4 - method should either be modified or replaced by an alternative method that is more suitable for recycling building materials.

### *Live cycle assesment (LCA) of recycled concrete*

It was tried to find out the ecological relevance of concrete recycling by comparing two scenarios "recycling" and "deposition". The structure of the LCA is in accordance to the draft of the ISO 14.040 [39], the documentation was made in accordance to the "Standardberichtsbogen" of the "Umweltbundesamt Berlin" [53]. Suppositions have been documented exactly to guarantee transparency of the LCA.

The production of 1 m<sup>3</sup> concrete by recycled concrete needs less energy than the production of 1 m<sup>3</sup> concrete by using material from a quarry and deposition of the old concrete. The process of recycling was supposed on the construction site. Even if it was not possible to recycle the old concrete on this place, deposition of the old concrete would be an ecological sin, because the recycled concrete can also be used in many other ways instead of raw material from the quarry.

LCA may be an instrument to coming a little closer to the ecological "truth". An ISO-guideline can define structure and general requirements of LCAs but not the realization in practice because of the great number of possible applications. It is up to the author of the LCA to create realistic system boundaries, to find the necessary datas and to describe suppositions understandable. The quality of a life cycle assesment depends on the quality of how these problems are solved by the author.—

## 10 QUELLENVERZEICHNIS

- [1].....*Hösle*, „Philosophie der ökologischen Krise“, Verlag Beck, München, 1991
- [2].....infoROM, Lexikon auf CD-ROM, Bertelsmann Electronic Publishing GmbH, München, 1997
- [3].....Abfallwirtschaftsgesetz (AWG), BGBl. 1990/325
- [4]....."Freiwillige Vereinbarung des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten und den Fachorganisationen der Bauwirtschaft über die Heranziehung von Recycling-Materialien", Wien, 1990
- [5]....."Abfallwirtschaft: Verwertungsmöglichkeiten für Hochbaurestmassen", Schriftenreihe der Sektion V, Band 13, Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien, 1994
- [6]....."Verordnung über die Trennung von bei Bautätigkeiten anfallenden Materialien", BGBl. Nr. 259/1991
- [7].....*Krapfenbauer/Sträussler*, Bautabellen, Auflage Nr. 9, Verlag Jugend und Volk, Wien, 1991
- [8]....."Informationsblatt für Bauherrn und Planer zur Baurestmassentrennungsverordnung", Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Baustoff-Recycling Verband, Wien, 1993
- [9].....Abfallnachweisverordnung, BGBl. 1991/65
- [10]....Altlastensanierungsgesetz, BGBl. 1989/299
- [11]....*Drug/Thomasitz*, Abfallrecht, Österreichische Staatsdruckerei, Wien 1990
- [12]....entnommen dem Rundschreiben Nr. 14 vom 9.4.96 des "Fachverbandes der Bauindustrie"
- [13]...."Baustoff-Recycling 1996/97: Auswertung der Mitgliederumfrage des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes", Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, Wien 1997
- [14]...."Deponien und Deponiepreise in Österreich", Wirtschaftskammer Österreich, Wien, 1996
- [15]...."Bundesabfallwirtschaftsplan, Bundesabfallbericht 1995", Bundesministerium für Umwelt, Wien, 1995
- [16]...."Baustoff-Recycling Anlagen in Österreich", Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, Wien, 1997
- [17]...."Richtlinie für Recycling-Baustoffe", Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe, 2. Auflage, Wien, 1993
- [18]...."Baustoff-Recycling, Annahme-, Abgabepreise", Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, Wien, 1997

- [19]...."Richtlinie für Recycling Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Zementgebundene Massen", Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe, Wien, 1995
- [20]...."Richtlinie für Recycling Baustoffe aus Hochbaurestmassen, Anwendungsgebiet Ungebundene Massen", Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe, Wien, 1996
- [21]...."Verwertungsorientierter Rückbau, Ein Leitfaden für Bauherren und Ausführende zur ÖN B 2251 Abbrucharbeiten", Österreichisches Normungsinstitut, Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, Wien, 1996
- [22]...."Richtlinie für die Aufbereitung kontaminierter Böden und Bauteile", Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe, Wien, 1995
- [23]....*Maydl*, "Verwertungsmöglichkeiten für Hochbaurestmassen, Kurzfassung der Studie und des Forschungsvorhabens des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes", Umweltministerium, Gemeinde Wien, Forschungsförderungsfonds für die gewerbliche Wirtschaft, Wien, 1995
- [24]....Verwertung von Hochbau- und Tiefbaurestmassen - Informationsfolder, Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, Wien, 1996  
siehe auch Internet: <http://www.br.v.or.at/brv/verwert.htm>
- [25]...."Liste der gütegeschützten Recycling-Baustoffe", Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe; Wien, 1997
- [26]....*Wesche/Schulz*, "Beton aus aufbereitetem Altbeton - Technologie und Eigenschaften", Zeitschrift "Beton", 2/1982
- [27]....*Mannsberger*, "Aufbereitung von Altbeton", Informationsveranstaltung Baustoff-Recycling und Umweltschutz, Wien, 1990
- [28]....*Sommer*, "Von Beton zu Altbeton", Informationsveranstaltung des Wirtschaftsministeriums: Baustoff-Recycling und Umweltschutz, Wien, 1990
- [29]....*Sommer*, "Wiederverwendung von Altbeton für neue Betonfahrbahndecken", Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung, Heft 403
- [30]...."Baurestmassen: Vermeidung-Verwertung-Behandlung", Umweltbundesamt, Wien, 1995
- [31]....*Lukas*, "Auswirkung auf technologische Kenngrößen von Beton bei Verwendung von Recycling-Material", Zeitschrift "Zement und Beton", 3/1993
- [32]....*Wöhl*, "Recyclingbeton für Bauteile im Hochbau", Zeitschrift "Beton", 9/1994
- [33]....*Krass*, "Bautechnische und ökologische Aspekte des Beton-Recyclings", Zeitschrift "Betonwerk + Fertigteiltechnik", 1/1994

- [34]...."Baurestmassen von Mantelbeton-Bauten", Informationsblatt, Arbeitskreis Naturbaustoffe des Fachverbandes der Stein- und keramischen Industrie Österreichs, Wien
- [35]....*Drees*, "Recycling von Baustoffen im Hochbau", Bauverlag
- [36]....*Sommer*, "Beton aus Altbeton und lärmarme Betonoberflächen auf Autobahnen in Österreich", Zeitschrift "Straße und Autobahn", 3/1992
- [37]....*Bruck/Jasch/Tuschl*, "Handbuch für ökologische Bilanzierung, Fachverband der Stein- und keramischen Industrie Österreichs", Wien, 1996
- [38]....*Huber*, "Erstellung einer Ökobilanz am Beispiel der österreichischen Zementindustrie", Zeitschrift "Zement und Beton", 4/94
- [39]....ISO 14.040 - Revised draft, ISO/TC 207/SC 5/N 60, Life cycle assesment, November 1995
- [40]....*Hiersche/Wörner*, Alternative Baustoffe im Bauwesen, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [41]....ÖNORM S 2072 "Gefährdungspotential (Eluatklassen) von Abfällen"
- [42]...."Richtlinien für Recycling-Baustoffe und deren Überwachung", Bundesfachabteilung Recycling-Baustoffe und Bundesüberwachungsverband Recycling-Baustoffe (D)
- [43]....DIN 38 414 - Teil 4, "Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4)"
- [44]...."Umweltverträglichkeit von Mineralstoffen, Teil: Wasserwirtschaftliche Verträglichkeit", Arbeitspapier Nr. 28/1 der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1994 (D)
- [45]....*Weigel*, "Umweltverträglichkeitsprüfungen und Bewertung von Recycling-Baustoffen: Vorschläge zur einheitlichen Bewertung im Hinblick auf eine breite Anwendung", Diplomarbeit TU-Dresden, Dresden, 1995
- [46]...."Perkolationsverfahren zur Auslaugung von Mineralstoffen", Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Zeitschrift Straße und Autobahn, 10/1994
- [47]....*Holnsteiner*, "Praxisgerechte Prüfung des Auslaugverhaltens von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen", Forschungsvorhaben Straßenforschung 3.045, Bundesforschungs - und Prüfzentrum Arsenal, Geotechnisches Institut
- [48]....*Travnicek*, "Prüftechnische Einflüsse auf die Ermittlung der Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen", Tagungsband des 7. Internationalen Baustoff-Recycling-Forum, Interlaken/Schweiz, 1996
- [49]....*Hinterhofer/Loidl/Wildscheck*, "Klassifizierung von Bauschutt zur Wiederverwertung im Straßenbau", Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten - Straßenforschung, Heft 432

- [50]....*Begert*, "Eluierung von Asphaltgranulat im Praxisversuch", Informationsveranstaltung des Wirtschaftsministeriums: Baustoff-Recycling und Umweltschutz, Wien, 1990
- [51]....*Gregori*, "Umweltverträglichkeit von Ausbauphosphat", Informationsveranstaltung des Wirtschaftsministeriums: Baustoff-Recycling und Umweltschutz, Wien, 1990
- [52]....*Müller/Hohberg*, "Umweltverträglichkeit von Recyclingmaterialien - Ansätze zur Bewertung im Hinblick auf die Verwendung als Betonzuschlag", Kurzberichte aus der Bauforschung Nr. 37, Heft 12, IRB-Verlag, Stuttgart, 1996
- [53].... "Standardberichtsbogen für produktbezogene Ökobilanzen", Umweltbundesamt, Berlin, 1995
- [54]....DIN 33926 - Entwurf, "Umweltmanagement, Produktbezogene Ökobilanzen, Standardberichtsbogen", Stand Februar 1996
- [55]...."Zement und Beton", 24. Auflage, Bauberatungsstelle der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie und des Österreichischen Betonvereins, Wien, 1990
- [56]....persönliche Mitteilung Hr. *Wieser* / Fa. *Ökotechna* vom 17.11.97
- [57]...."Schwermetallbestimmung in Dieselöl", Amt für Umweltschutz des Kantons Solothurn, Solothurn/CH, 1990
- [58]...."Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks", Final report from the OECD experts meeting, Organisation of Economic Cooperation and Development (OECD), 1991
- [59]....*Metz*, "Personenwagen-Abgasemissionen im Spurenbereich", Automobiltechnische Zeitschrift Nr. 86, 1984
- [60]....*Gebler*, "Ökobilanzen in der Abfallwirtschaft", Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, 2. Auflage, Bielefeld 1992
- [61]...."Schadstoffemissionen des privaten Straßenverkehrs 1950-2000", Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 55 inkl. Nachtrag vom September 1988, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 1986
- [62]....*Biet/Boes/Bringezu*, "Texte Ökobilanzen für Produkte, Bedeutung - Sachstand - Perspektiven", Umweltbundesamt, Berlin, 1992
- [63]....*Eschenbach/Grün/Horak/Plasonig*, "Baustoff-Recycling, ein Ansatz gezielten Umweltmanagements", Manz-Verlag, Wien, 1990
- [64]....*Knoflacher/Tuschl/Medwedeff*, "Die ökologische Standortbestimmung des in österreichischen Werken hergestellten Bindemittels Zement", Zement + Beton Handels- und WerbeGmbH, Wien, 1995
- [65]...."Baustoffdaten - Ökoinventare", Institut für Energietechnik der ETH Zürich, Zürich, 1995

- [66]...*Mardo Ghasan*, "Ökologische Untersuchung von Beton am Beispiel eines Normalbetons B 300", Diplomarbeit am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU-Wien, Wien, 1997
- [67]...persönliche Mitteilung Hr. *DI Huber* / Vereinigung der österreichischen Zementindustrie vom 20.11.97
- [68]...*Elsener/Strub*, "Material- und Energiebilanz für den Güterverkehr - Teil Infrastruktur und Fahrzeugpark", Semesterarbeit an der ETH Zürich, Institut für Energietechnik, Zürich, 1993
- [69]...*Dolezal Franz*, Diplomarbeit am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU-Wien, Wien, 1997
- [70]... "Fachgrundlagen zur Beurteilung der Deponiefähigkeit von Bauschutt", Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Schriftenreihe der Sektion V - Band 1, Wien 1991
- [71]... "Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung", Umweltbundesamt, Berlin, 1995
- [72]...*Danzmayr Susanne*, "Beitrag zur vergleichenden Ökobilanzierung von Bauteilen, im Besonderen von Lehm- und Ziegelaußenwänden", Diplomarbeit am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU-Wien, Wien, 1996
- [73]... "Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien", Institut für Energietechnik der ETH Zürich, Zürich, 1995