

TEXTE

05/2013

Optimierung des Rückbaus / Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials

sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3709 33 317
UBA-FB 001676

**Optimierung des Rückbaus/Abbaus von
Gebäuden zur Rückgewinnung und
Aufbereitung von Baustoffen unter
Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat)
des RC-Materials sowie ökobilanzieller
Vergleich von Primär- und
Sekundärrohstoffeinsatz inkl.
Wiederverwertung**

von

**Dr.-Ing. Karin Weimann
Dipl.-Ing. Jan Matyschik
Dr.-Ing. Christian Adam
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung**

**Dipl.-Ing. Tabea Schulz
Dr.-Ing. Elske Linß
Prof.Dr.-Ing. habil. Anette Müller
Bauhaus-Universität Weimar**

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4430.html> verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Richard-Willstätter-Str. 11 12489 Berlin	Bauhaus-Universität Weimar Coudray-Str. 7 99423 Weimar
Abschlussdatum:	Juni 2012	
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/	
Redaktion:	Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie Til Bolland	

Dessau-Roßlau, Februar 2013

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001676	2.	3.
4. Titel des Berichts Optimierung des Rückbaus/Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Weimann, Karin; Matyschik, Jan; Adam, Christian; Schulz, Tabea; Linß, Elske; Müller, Anette		8. Abschlussdatum Juni 2012
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, FG 4.3, Richard-Willstätter-Straße 11, 12489 Berlin Bauhaus-Universität Weimar, Professur Aufbereitung und Wiederverwertung von Baustoffen, Coudray-Straße 7, 99423 Weimar		9. Veröffentlichungsdatum
		10. UFOPLAN-Nr. 3709 33 317
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau		11. Seitenzahl 225 (14+211)
		12. Literaturangaben 151
		13. Tabellen und Diagramme 33
		14. Abbildungen 67
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Aufgrund der großen Massenströme ist das Recycling von Baurestmassen von besonderer Bedeutung für die Schonung von natürlichen Ressourcen. Eine wichtige Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling, wie z.B. eine Wiederverwertung von aufbereitetem Bauschutt/Altbeton als rezyklierte Gesteinskörnung im Hochbau, ist die Einhaltung von Grenzwerten für Stör- und Schadstoffe. Dabei steht der Sulfatgehalt im Eluat von Bauschutt besonders im Fokus. In der vorliegenden Studie wird untersucht, wie durch die Optimierung von Abbrucharbeiten und Bauschutt-aufbereitung hochwertige Gesteinskörnungen aus Altbeton gewonnen werden können. Anhand von Literatur- und Datenrecherchen werden zunächst Sulfatquellen in Gebäuden sowie verfügbare Abbruch- und Aufbereitungstechniken zusammengestellt. Am Beispiel von unterschiedlichen Gebäudetypen werden Szenarien für selektiven und nicht selektiven Abbruch (Schwerpunkt: Sulfatentfrachtung) in Hinblick auf ihre Umweltwirkungen ökobilanziell bewertet. Ergänzt werden diese Bewertungen durch Untersuchungen an realen Bauschuttmaterialien und Abbruchprojekten. Auf dieser Basis werden Handlungsempfehlungen für die Gewinnung von hochwertigen RC-Gesteinskörnungen erarbeitet und diskutiert.		
17. Schlagwörter Abbruchverfahren, Bauschutt-aufbereitung, hochwertiges Recycling, ökobilanzielle Betrachtung, Sulfatentfrachtung		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001676	2.	3.
4. Report Title Optimization of demolition/dismantling of buildings for the recovery and treatment of building materials considering the reduction of harmful substances (in particular sulphates) in the recycled building material and aspects of life-cycle analyses		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Weimann, Karin; Matyschik, Jan; Adam, Christian; Schulz, Tabea; Linß, Elske; Müller, Anette	8. Report Date Juni 2012	
	9. Publication Date	
6. Performing Organisation (Name, Address) Federal Institute for Materials Research and Testing Div. 4.3, Richard-Willstätter-Straße 11, 12439 Berlin Bauhaus-University Weimar, Chair of Mineral Processing of Building Materials and Reuse, Coudray-Straße 7, 99423 Weimar	10. UFOPLAN-Ref. No. 3709 33 317	
	11. No. of Pages 225 (14+211)	
	12. No. of Reference 151	
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt, Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau	13. No. of Tables, Diagrams 33	
	14. No. of Figures 67	
15. Supplementary Notes		
16. Abstract Due to the large-scale mass flow of construction and demolition wastes, the recycling of those residues is of particular importance for the conservation of natural resources. An important requirement for recycling on a high level, like the reuse of crushed concrete as recycled concrete aggregate, is the observation of limits for hazardous substances and impurities. This study is focusing on the reduction of sulphates in the eluate of crushed concrete. An investigation of possibilities to optimize demolition and dismantling as well as treatment of crushed concrete with the objective of gaining recycled concrete aggregates of high quality. Based on a literature research and a data review the origins of sulfates in buildings and also the availability of techniques for demolition and treatment of crushed concrete are listed and evaluated. Using the examples of different building types scenarios for selective dismantling and non-selective demolition (focused on reducing sulphates) are evaluated in terms of affecting the environment. In addition samples from real demolition construction sites and plants for treatment of construction rubble were investigated. Based on these results recommendations for the production of high quality recycled concrete aggregates are worked out.		
17. Keywords Demolition/dismantling, treatment of C&D wastes, high-grade recycling, environmental LCA, Reduction of sulphates		
18. Price	19.	20.

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	XI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XIII
Kurzfassung	1
1 Einleitung und Zielsetzung	14
1.1 Ziel des Projektes	18
1.2 Vorgehensweise im Projekt	18
2 Teilvorhaben 1: Literatur- und Datenrecherche	21
2.1 Ermittlung des Gipsaufkommens im Bauabfall in Deutschland	21
2.1.1 Output-Ansatz	23
2.1.2 Bottom-Up-Ansatz	26
2.1.3 Top-Down-Ansatz	32
2.1.4 Gipsaufkommen - Zusammenfassung	39
2.2 Flächenverbrauch bei der Kies- und Sandgewinnung	40
2.3 Abbruch- und Rückbautechniken	41
2.3.1 Einführung	41
2.3.2 Vorbereitende Maßnahmen	42
2.3.3 Begriffsbestimmungen	43
2.4 Abbruch/Rückbau von Gebäuden	46
2.4.1 Mechanische Abbruchverfahren	47
2.4.2 Sprengtechnik	53
2.4.3 Hydrodynamische Verfahren	56
2.4.4 Thermische Verfahren	57
2.4.5 Sonstige Verfahren	59
2.4.6 Einsatzbedingungen und Leistungsfähigkeit verschiedener Abbruchmethoden	60
2.5 Selektiver Abbruch	63
2.5.1 Eignung von Abbruchverfahren für den selektiven Abbruch	65
2.5.2 Anwendung von Rückbauverfahren zur Separierung gipshaltiger Baustoffe	67
2.6 Bauschuttzubereitungstechniken	68
2.6.1 Zerkleinerung	69
2.6.2 Klassierung	71

2.6.3	Sortierung	72
2.6.4	Wahl der Aufbereitungsanlage	76
2.6.5	Versuche zur Aufbereitung gipshaltiger Baustoffe	78
3	Teilvorhaben 2: Auswahl unterschiedlicher Abbruch- /Aufbereitungstechniken und Probenahme	79
3.1	Probenahmen in verschiedenen Bauschutt aufbereitungsanlagen	79
3.1.1	Probenahme in einer semimobilen Bauschutt aufbereitungsanlage	79
3.1.2	Analyseergebnisse von RC-Material aus einer semimobilen Anlage	81
3.1.3	Probenahme in einer stationären Bauschutt aufbereitungsanlage	83
3.1.4	Analyseergebnisse von RC-Material aus einer stationären Anlage	84
3.2	Beschreibung eines Abbruchprojektes in Thüringen	86
3.2.1	Beschreibung des abzubrechenden Gebäudes	86
3.2.2	Beschreibung der untersuchten Bauschutt aufbereitungsanlage	87
3.2.3	Untersuchungen beim Abbruch	92
3.2.4	Untersuchungen entlang der Aufbereitungsstrecke	94
3.2.5	Schlussfolgerungen	97
3.3	Auswahl von Abbruch- und Aufbereitungsverfahren	100
3.3.1	Anwendungshäufigkeit der Abbruchverfahren	100
3.3.2	Eigene Untersuchungen zur Relevanz von Abbruchtechniken	101
4	Teilvorhaben 3: Ökobilanzielle Betrachtungen	108
4.1	Hintergrund	108
4.2	Ökobilanzielle Bewertungen im Bauschuttrecycling	111
4.3	Vorgehensweise bei der ökobilanziellen Bewertung im Projekt	113
4.3.1	Zieldefinition und Untersuchungsrahmen	114
4.3.2	Funktionelle Einheit	114
4.3.3	Wirkungskategorien	115
4.3.4	Funktionen des Produktsystems	115
4.3.5	Modellierung der Szenarien	119
4.4	Sachbilanz	125
4.5	Wirkungsabschätzung	127
4.5.1	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, selektiver Abbruch	128
4.5.2	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, nicht selektiver Abbruch	129
4.5.3	Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien	131
4.5.4	Darstellung der Materialströme	136
4.5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	140
4.6	Auswertung	141
4.6.1	Identifizierung signifikanter Parameter	141

4.6.2	Beurteilung	142
4.6.3	Schlussfolgerungen aus der Sensitivitätsanalyse	152
4.7	Einsatz von RC- Gesteinskörnungen als Sekundärrohstoff in Beton	152
5	Teilvorhaben 4: Handlungsempfehlungen	159
5.1	Hintergrund	159
5.2	Verfahrensabläufe und –beteiligte beim Abbruch von sulfathaltigen Bauteilen	161
5.3	Abschließende Bemerkungen	168
	QUELLENVERZEICHNIS	171
	ANHÄNGE	181
Anhang A:	Gipsanteile bzw. Sulfatgehalte aus realen Abbruchbauvorhaben	182
Anhang B:	Auswertung der Eluat-Untersuchungen von RC-Körnungen	189
Anhang C:	Fragebogen für Abbruchunternehmen	195
Anhang D:	Stoffstromnetze	197
Modul T1:	Subnetz Baustelle Abriss // Rückbau	197
Modul T2:	Subnetz Transportmodul	198
Modul T3:	Subnetz Bauschuttzubereitung	199
Modul T4:	Subnetz Transport zum Abnehmer	200
Anhang E:	Detaillierte Grundlagen der Szenarienmodellierung	201
Anhang F:	Einzelergebnisse der Szenarien	207
Anhang G:	Betonrezepturen	210

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Anfall mineralischer Bauabfälle im Jahr 2004 [6]	15
Abbildung 2:	Verwendung von RC-Baustoffen im Jahr 2004 [6]	16
Abbildung 3:	Betonproduktion und Schätzung der daraus resultierenden Betonabbruchmengen in Deutschland [37]	19
Abbildung 4:	Vorgehensweise zur Ermittlung des Gipsgehaltes im Bauschutt	22
Abbildung 5:	Zusammenhang zwischen dem mit Sortieranalyse ermittelten Gipsgehalt und dem aus der chemischen Analyse berechnetem Gipsgehalt	24
Abbildung 6:	Durchschnittliche Gipsgehalte aus Sortieranalyse und durchschnittliche Sulfatgehalte aus chemischer Analyse für die gesammelten Daten	24
Abbildung 7:	Anteil der verschiedenen Fraktionen am gesamten Schüttvolumen bzw. an der gesamten Schüttgutmasse	29
Abbildung 8:	Anteil der verschiedenen Fraktionen am gesamten Schüttvolumen bzw. an der gesamten Schüttgutmasse	30
Abbildung 9:	Gegenüberstellung der jährlichen Produktionsmengen von Gipsbaustoffen und Hochbaubeton [43]	33
Abbildung 10:	Verbrauch an Baumaterialien im Wohnungs- und Hochbau [49, 53]	34
Abbildung 11:	Jährlicher Verbrauch an Gips in Deutschland (bis 1997 [53], ab 2003 [51])	34
Abbildung 12:	Schätzung des im Bauschutt gebundenen Zementes mittels Lebensdauermodell für die Jahre 2000-2030	36
Abbildung 13:	Schätzung des Gipsplattenaustrages mittels Lebensdauermodells für die Jahre 2000-2030	37
Abbildung 14:	Schätzung des Baugipsaustrages mittels Lebensdauermodells für die Jahre 2000-2030	37
Abbildung 15:	Graphische Darstellung des Gipsaustrages für die Jahre 2000 bis 2030	39
Abbildung 16:	Input- und Outputmassen an Gips in das Bauwesen der Bundesrepublik Deutschland	40
Abbildung 17:	Begriffsbestimmungen bei der RC-Baustoff-Herstellung	44
Abbildung 18:	Baureststoffe	45
Abbildung 19:	Grundstruktur eines Baustoffkreislaufs	46
Abbildung 20:	Hydraulikbagger mit hydraulisch drehbarer Abbruchzange (Betonbacken)	47
Abbildung 21:	Betonfräse beim Bunkerabbruch [72]	49
Abbildung 22:	Einschlagen mit einem Seilbagger mit angehängtem Stahlkörper [59]	50
Abbildung 23:	Fallphasen während der Sprengung eines Hochhauses [74]	54

Abbildung 24:	Beispiel einer stationären Bauschuttzubereitungsanlage	77
Abbildung 25:	Aufgabeeinrichtung der semimobilen Bauschuttzubereitungsanlage	79
Abbildung 26:	Brecherausgang mit anschließender Magnetabscheidung und Hand-sortierung	80
Abbildung 27:	Aufbereiteter Bauschutt der Körnung 0/32	80
Abbildung 28:	Austragsmaterial der Windsichtung	83
Abbildung 29:	Austrag der RC-Brechsandfraktion 0/4 mm aus der Mehrwegsiebung	84
Abbildung 30:	Abbruch der Plattenbauten in Gera Wohngebiet Biblach – Ost [52]	86
Abbildung 31:	Bagger bei der Vorsortierung und Vorzerkleinerung Vorort (links) und Bad-zellenwand (rechts)	86
Abbildung 32:	Fußbodenestrich (Anhydritestrich)	87
Abbildung 33:	Grundfließbild der Bauschuttrecyclinganlage	89
Abbildung 34:	Proben der verschiedenen Bauteile	93
Abbildung 35:	Schematische Darstellung der Aufbereitungsstrecke [52]	94
Abbildung 36:	Sulfatwerte der Eluate der Fraktionen 0/32 mm, 0/56 mm und der Leicht-stoff-Fraktion (links) und Sulfatwerte der Eluate der einzelnen Fraktionen der Probe 0/56 mm (rechts)	96
Abbildung 37:	Gesamtsulfatwerte der Fraktionen 0/32 mm und 0/56 mm (links) und Gesamtsulfatwerte der einzelnen Fraktionen der Probe 0/56 mm (rechts)	97
Abbildung 38:	Varianten für die Zerkleinerung von Verbundwerkstoffen	98
Abbildung 39:	Verteilung der Mitarbeiteranzahl der befragten Abbruchunternehmen	101
Abbildung 40:	Nutzung von unterschiedlichen Abbruchverfahren durch kleine Unter-nehmen und die Häufigkeit ihrer Nutzung durch diese Unternehmen	102
Abbildung 41:	Nutzung von unterschiedlichen Abbruchverfahren durch mittelgroße Unter-nehmen und die Häufigkeit ihrer Nutzung durch diese Unternehmen	103
Abbildung 42:	Nutzung von unterschiedlichen Abbruchverfahren durch große Unter-nehmen und die Häufigkeit ihrer Nutzung durch diese Unternehmen	103
Abbildung 43:	Separater Rückbau von Stoffströmen oder Bereichen durch kleine Unter-nehmen und die Häufigkeit der Durchführung dieser Methode	105
Abbildung 44:	Separater Rückbau von Stoffströmen oder Bereichen durch mittlere Unter-nehmen und die Häufigkeit der Durchführung dieser Methode	105
Abbildung 45:	Separater Rückbau von Stoffströmen oder Bereichen durch große Unter-nehmen und die Häufigkeit der Durchführung dieser Methode	106
Abbildung 46:	Bestandteile einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff.	109
Abbildung 47:	Systemgrenzen des Produktsystems der ökobilanziellen Betrachtung	116

Abbildung 48:	Grundmodell der ökobilanziellen Betrachtung	118
Abbildung 49:	Ergebnisse der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch	132
Abbildung 50:	Ergebnisse der Wirkungskategorie Landverbrauch	133
Abbildung 51:	Ergebnisse der Wirkungskategorie Klimawandel	134
Abbildung 52:	Ergebnisse der Wirkungskategorie Stratosphärischer Ozonabbau	134
Abbildung 53:	Ergebnisse der Wirkungskategorie Versauerungspotential	135
Abbildung 54:	Ergebnisse der Wirkungskategorie Überdüngungspotential	136
Abbildung 55:	Stoffstromdarstellung Szenario 2 (PB), selektiver Rückbau	138
Abbildung 56:	Stoffstromdarstellung Szenario 2 (PB), nicht selektiver Rückbau	139
Abbildung 57:	Wirkungskategorie Klimawandel (GWP 100a): Ergebnis der Variation der Entfernung von Baustelle zu Aufbereiter	144
Abbildung 58:	prozentualer Anteil des Transports an den jeweiligen Wirkungskategorien (selektiver Rückbau)	145
Abbildung 59:	Prozentuale Zunahme der Umweltwirkungen durch nicht selektiven Rückbau gegenüber selektivem Rückbau, inkl. Transporte	146
Abbildung 60:	Prozentuale Zunahme der Umweltwirkungen durch nicht selektiven Rückbau gegenüber selektivem Rückbau, ohne Transporte	147
Abbildung 61:	Szenario 1 (EFH) Wirkungskategorien im Detail	148
Abbildung 62:	Szenario 2 (PB) Wirkungskategorien im Detail	148
Abbildung 63:	Szenario 3 (IDB) Wirkungskategorien im Detail	149
Abbildung 64:	Vergleich der Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch für die Herstellung von jeweils einer Tonne natürlicher Gesteinskörnung und RC-Gesteinskörnungen aus selektiv und nicht selektiv geführten Abbrüchen	154
Abbildung 65:	Vergleich der Wirkungskategorien Klimawandel (GWP 100) und Landverbrauch für die Herstellung von 1 m ³ RC-Beton und 1 m ³ Referenzbeton	158
Abbildung 66:	Aspekte der Nachhaltigkeit und Bewertungshintergrund der Nachhaltigkeitsbeurteilung im Baubereich [148]	161
Abbildung 67:	Übersicht über die wesentlichen Handlungs- und Entscheidungsabläufe bei der Durchführung eines Abbruchs unter Berücksichtigung von gipshaltigen Bauteilen	163

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Errechnete Gipsmenge im Bauabfall für das Jahr 2006	25
Tabelle 2:	Typisierungsmerkmale des Gebäudebestandes [27]	26
Tabelle 3:	Berechneter Gipsanteil für Eigenheime erbaut 2006	28
Tabelle 4:	Daten für den Bestand sowie den jährlichen Abgang und Neubau von Wohnraum nach [51]	30
Tabelle 5:	Berechnung der Gipsmengen durch Neubau, Abriss und Modernisierungsmaßnahmen im Wohnungsbausektor	32
Tabelle 6:	Mittlere Lebensdauer T und Weibullmodul α für Gipsprodukte	35
Tabelle 7:	Berechnung des Gipsaustrages für 2000 bis 2030	38
Tabelle 8:	Abbruchverfahren in Abhängigkeit von den Abbruchbedingungen nach [7]	61
Tabelle 9:	Leistungsfähigkeit von Abbruchverfahren bei unterschiedlichen Materialien nach [7]	62
Tabelle 10:	Sortierverfahren für Bauschutt	73
Tabelle 11:	Ergebnisse der Analysen der 24-h-Eluate der RC-Körnungen aus Hessen Verdünnungsstufe 1:10)	82
Tabelle 12:	Ergebnisse der Analysen der 24-h-Eluate der RC-Körnungen aus Hessen (Verdünnungsstufe 1:2)	82
Tabelle 13:	Ergebnisse der Eluatanalysen der RC-Körnungen aus NRW (Verdünnungsstufe 1:10)	85
Tabelle 14:	Ergebnisse der Eluatanalysen der RC-Körnungen aus NRW (Verdünnungsstufe 1:2)	85
Tabelle 15:	Legende zu Abbildung 33	90
Tabelle 16:	Kenndaten der Bauschuttzubereitungsanlage	90
Tabelle 17:	Leistungsparameter der Einzelaggregate der Aufbereitungsanlage	91
Tabelle 18:	Sulfatgehalte verschiedener Bauteile der Plattenbauten in Gera [52]	94
Tabelle 19:	Anwendungshäufigkeit von Abbruchverfahren	100
Tabelle 20:	bilanzierte Entfernungen zwischen den Handlungsbeteiligten	119
Tabelle 21:	Darstellung der wichtigsten Stoffströme	126
Tabelle 22:	Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 (EFH, PB und IDB), selektiver Abbruch	128
Tabelle 23:	Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 (EFH, PB und IDB), nicht selektiver Abbruch	129
Tabelle 24:	prozentualer Anteil der Teilschritte an der Wirkungskategorie Klimawandel	141

Tabelle 25:	Reduzierung der Umweltwirkungen durch einstufiges Brechen	151
Tabelle 26:	Vergleich der Umweltwirkungen der Produktion (ohne Transporte) von jeweils einer Tonne rezyklierter Gesteinskörnung (PB, selektiver Abbruch) und Natursteinkörnung	156
Tabelle 27:	Umweltwirkungen der Rohstoffbereitstellung für die Herstellung von 1 m ³ RC-Beton mit einem Anteil von 20 % rezyklierter Gesteinskörnung	157
Tabelle 28:	Umweltwirkungen der Rohstoffgestellung für die Herstellung von 1m ³ Referenzbeton	157
Tabelle 29:	Anlagekomponenten mit spez. Leistungsaufnahmen nach Datenblättern	202
Tabelle 30:	Zusammensetzung der Wirkungskategorie Klimawandel (GWP 100a)	207
Tabelle 31:	Anteil des Transports an den jeweiligen Wirkungskategorien der Szenarien	207
Tabelle 32:	Zunahme der Umweltwirkungen in %, nicht selektiver Rückbau, ohne Transporte	208
Tabelle 33:	Sensitivitätsanalyse: Ergebnisse einfaches Brechen	209

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADP	abiotic depletion potential (abiotischer Ressourcenverbrauch / Verknappung von Rohstoffvorkommen VMR)
AP	Versauerungspotential
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
BIM	Baustoffkreislauf im Massivbau
CFC-11	CCl ₃ F (Trichlorfluormethan) ist ein FCKW
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
EFH	Einfamilienhaus
EP	Eutrophierungspotential (Überdüngungspotential)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff(e)
FE	Funktionelle Einheit
GFS	Geringfügigkeitsschwellen
GWP	Treibhauspotential (kumulative Effekte der Bildung von Treibhausgasen und ihre Auswirkungen auf die globale Erwärmung)
IDB	Industriebau
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
KEA	kumulierter Energieaufwand
KrW/-AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KWTB	Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau
MFH	Mehrfamilienhaus
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds (flüchtige organische Kohlenstoffe)
NS	Naturstein
ODP	Ozonabbaupotential
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PB	Plattenbau Typ P2
PCB	Polychlorierte Biphenyle
POCP	Potential bodennahes Ozon zu bilden (Sommersmog)

RC-Beton	Beton mit Anteilen von rezyklierter Gesteinskörnung
RC-Gesteinskörnung	zerkleinerte und klassierte Gesteinskörnung aus dem Bauschuttrecycling, die für den Einsatz in der Beton- oder Mörtelproduktion geeignet ist
RC-Sand	rezyklierte Sandfraktion aus dem Bauschuttrecycling
Referenzbeton	nach gleicher Rezeptur jedoch ausschließlich mit Natursteinkörnung hergestellter Vergleichsbeton zu einem RC-Beton
VMR	Verbrauch mineralischer Ressourcen

Kurzfassung

Da Bauabfälle in Deutschland – neben Bergbaurestmassen – den größten Anteil am Gesamtabfallaufkommen stellen, kann durch die Nutzung des in diesen Reststoffen enthaltenen Wertstoffpotentials ein wichtiger Beitrag für die Schonung von natürlichen Ressourcen geleistet werden. Entsprechend wird schon seit vielen Jahren an Lösungen für die Wiederverwertung bzw. Wiederverwendung dieser Stoffströme gearbeitet. Zahlreiche Studien haben belegt, dass die Voraussetzungen für ein möglichst hochwertiges Recycling dieser Stoffströme dabei mit der Sortenreinheit der anfallenden Materialien steigen.

Die mengenmäßig wichtigsten Stoffströme für Recyclingbaustoffe sind Bauschutt und Straßenaufbruch, in denen oftmals große Anteile an Altbeton enthalten sind. Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Ressourcenwirtschaft ist die Rückgewinnung dieses Baustoffs aufgrund seines hohen Wertstoffpotentials von besonderem Interesse. Eine Verwertung von sortenreinem und nicht kontaminiertem Altbeton als rezyklierte Gesteinskörnung für die Herstellung von RC-Beton ist ein Beispiel für einen besonders engen Produktkreislauf. Für eine sortenreine Gewinnung von Altbeton aus Bauschutt oder Straßenaufbruch können dabei zwei Strategien verfolgt werden: der selektive oder getrennte Abbruch und die optimierte Bauschuttzubereitung.

Einer der wichtigsten Gesichtspunkte in Hinblick auf die Herstellung von Recyclingprodukten ist die Umweltverträglichkeit der gewählten Verfahrensweise. Kriterium ist dabei, dass die Nutzung eines Sekundärproduktes nicht mit ökologischen Nachteilen, beispielsweise durch hohen Energieverbrauch bei der Produktion, verbunden ist. Eine vergleichende ökobilanzielle Bewertung mit der Nutzung des Primärproduktes ist dabei eine übliche Methode um die Nachhaltigkeit der angestrebten Substitution zu überprüfen.

Zielstellung

Die vorliegende Studie wurde in Ergänzung zu bzw. im Kontext mit anderen, bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten vor dem Hintergrund der angestrebten verstärkten Nutzung des Ressourcenschonungspotentials von Baurestmassen durchgeführt. Ziel war die Erfassung und Beschreibung von vorhandenen Abbruch- und Bauschuttzubereitungstechniken in Hinblick auf eine spätere Wiederverwertung der rezyklierten Gesteinskörnungen (RC-Körnungen) aus Altbeton im Hochbau. Im Fokus stehen dabei die Möglichkeiten zur Entfernung von sulfathaltigen resp. gipshaltigen Baumaterialien und Bauteilen aus dem Abbruchmaterial mit dem Ziel einer möglichst umweltverträglichen Gewinnung von hochwertigen RC-Gesteinskörnungen.

Grundlage der Untersuchung war die Auswertung verfügbarer Literatur und Datensammlungen sowohl zu Abbruch- und Zubereitungsverfahren als auch zu Menge und Zusammensetzung des Gipsreservoirs im Gebäudebestand in Hinblick auf eine Sulfatbelastung zukünftiger Baurestmassen. Zusätzlich wurden auch eigene Untersuchungen sowohl zu Bauschutt-

zusammensetzungen als auch zu den verfügbaren Techniken für Abbruch und Aufbereitung durchgeführt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden Stoffströme für Abbrucharbeiten und anschließende Bauschutttaufbereitung zur Gewinnung von RC- Gesteinskörnungen aus Altbeton modelliert und analysiert. Dabei wurden die Umweltwirkungen selektiver und nicht selektiver Vorgehensweisen bewertet und einem ökobilanziellen Vergleich unterzogen. Aus diesen Ergebnissen wurden Empfehlungen für die Vorgehensweise bei Abbruch und Aufbereitung mit dem Schwerpunkt einer Entfernung sulfathaltiger Baustoffe abgeleitet.

Ermittlung des Gipsaufkommens im Bauabfall in Deutschland

Durch den Anstieg des Betonverbrauchs in den vergangenen Jahrzehnten gibt es zeitversetzt einen Anstieg des Betonanteils in Bauschutt, der auch in den kommenden Jahren anhalten wird. Um die entsprechende Entwicklung des Gipsanteils zu erfassen, wurde über drei Ansätze auf unterschiedlicher Datenbasis abgeschätzt mit welchen Mengen an Gips zukünftig im Bauschutt zu rechnen sein wird. Dabei wurde auch die auf Bauprodukte (z.B. verschiedene Gipsbauelemente) bezogene Gipsmenge betrachtet.

Beim Top-Down-Ansatz wurde anhand allgemein verfügbarer Statistiken (Produktionsstatistiken) versucht, die Stoffströme und das Stofflager zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der Lebensdauer von einzelnen Bauteilen kann der vermutete Output aus dem System Bauen berechnet werden (siehe nachfolgendes Bild 0.1).

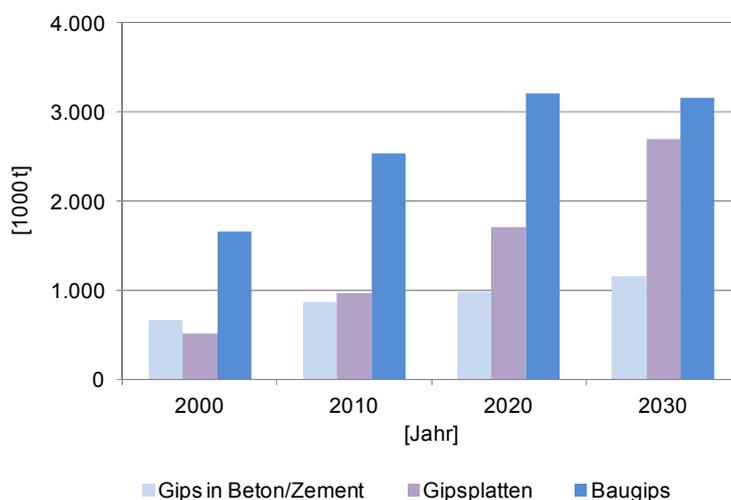


Bild 0.1: Prognose für den Gipsaustrag über Abbrucharbeiten basierend auf der Lebensdauer (Datengrundlage Gipsproduktion)

Betrachtet man jedoch den Anstieg der einzelnen Materialgruppen, so ist gut zu erkennen, dass der Anteil an Gipsplatten (und anderen raumauskleidenden Elementen aus Gips) am Gipsaustrag am stärksten anwachsen wird. Bis zum Jahr 2030 kann im Vergleich zum Jahr 2000 mit einer Verfünffachung der Menge an Gipsplatten in Baurestmassen gerechnet werden (siehe Bild 02).

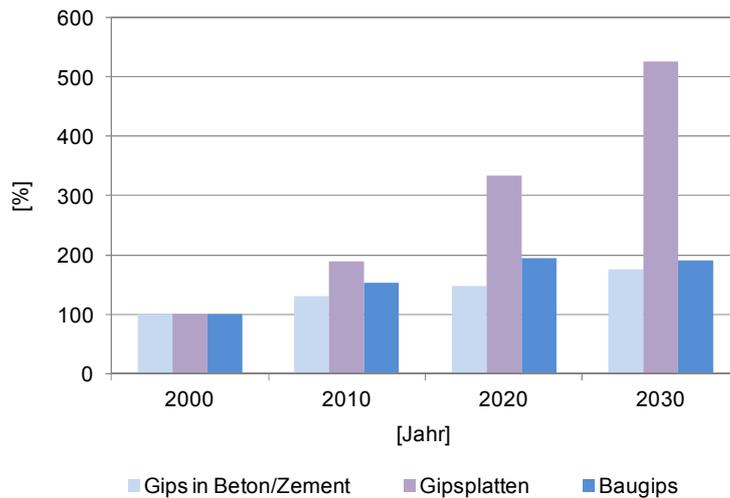


Bild 0.2: Prognose für den Anstieg des Gipsaustrags über Baurestmassen, bezogen auf das Jahr 2000, basierend auf der Lebensdauer (Datengrundlage Gipsproduktion)

Der Bottom-Up-Ansatz greift auf spezifische Daten der stofflichen Gebäudezusammensetzung und der Altersstruktur zurück. Mit Hilfe dieser Einzeldaten zu den Baustoffmengen werden die Stofflager und –ströme hochgerechnet.

Der sogenannte Output-Ansatz stellt eine Ergänzung zu den anderen zwei Ansätzen dar und berechnet mit Hilfe von gesammelten Daten zu Abfallmengen und Abfallzusammensetzungen den Austrag an Gips aus dem Stofflager.

Aus den Berechnungen in den ergibt sich der im Folgenden beschriebene Stofffluss für den Baustoff Gips. Zurzeit gelangen jährlich fast 9 Mio Tonnen Gips in Form von Baugips, Gipsbauelementen und als im Beton stofflich gebundener Gips in den Bau. Als Output aus dem Stofflager Bauwerk wurden 4,4 Mio Tonnen pro Jahr mittels Top-Down-Ansatz und 5,6 Mio Tonnen mittels Bottom-Up-Ansatz ermittelt. Diese Werte liegen relativ nahe beieinander, wobei der Bottom-Up-Ansatz nur den Wohnungsbau berücksichtigt. Die Ergebnisse des Output-Ansatzes liegen zwischen 0,8 und 5,5 Mio Tonnen und ergeben damit den geringsten Gipsoutput.

Die Unterschiede zwischen den drei Ansätzen haben mehrere Ursachen. Zum einen basieren die Ansätze auf voneinander unabhängigen Erhebungen. Trotz dieser Unterschiede zeigen die Zahlen, dass der Verbrauch an Gips im Bau erheblich ist – mit steigender Tendenz. Die Prognose über das Lebensdauermodell weist auf einen deutlichen Anstieg des Gipsaustrages für die nächsten Jahre hin. Die aufgeführten absoluten Zahlen sind jedoch vor dem Hintergrund der Unsicherheiten bei ihrer Erhebung nur unter Vorbehalt zu betrachten.

Abbruchverfahren

Bei der Erfassung von vorhandenen Abbruch- und Aufbereitungstechniken für Bauschutt lag der Fokus auf Vorgehensweisen, die eine möglichst sortenreine Gewinnung von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Altbeton ermöglichen. Ein weiterer Schwerpunkt war die Eignung der Verfahren zur Reduzierung des Sulfatgehaltes im Abbruchmaterial bzw. RC-Baustoff.

Da Gebäude in den vergangenen Jahren zunehmend aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Baustoffen konstruiert wurden, steigen auch die Ansprüche an die Ausführung von Abbrucharbeiten, um das Recyclingpotential des Abbruchmaterials nutzen zu können. Um sowohl Qualität und Sortenreinheit der unterschiedlichen beim Abbruch gewonnenen Stoffströme zu erhöhen als auch um die anfallenden und zu entsorgenden Abfallströme zu minimieren, werden zunehmend selektive Vorgehensweisen angewandt. Die selektive Gewinnung von Abbruchmaterial reduziert dabei entsprechend auch den Aufwand der für ein Recycling des Bauschutts erforderlichen Aufbereitung.

Für die Umsetzung eines selektiven Abbruchs ist eine umfassende Bestandsaufnahme der unterschiedlichen im rückzubauenden Gebäude befindlichen Bau- und sonstigen Inhaltsstoffe (z.B. Schadstoffe) Voraussetzung. Auf den Ergebnissen der Bestandsaufnahme aufbauend kann eine sorgfältige Vorplanung des Ablaufs erfolgen. Ziel ist die optimierte Erfassung der verschiedenen getrennt rückzubauenden Materialien. Beim eigentlichen Rückbau erfolgt mit unterschiedlichen Techniken die Demontage von einzelnen Bauteilen, Bauelementen und gegebenenfalls Bereichen in genau auf den gesamten Bauablauf abgestimmten Demontagestufen. Diese Vorgehensweise ist verbunden mit der Separierung und Getrennthaltung der anfallenden Reststoffe.

Für die einzelnen Arbeitsschritte beim Abbruch eines Gebäudes steht eine Vielzahl von Abbruchtechniken zur Verfügung. Diese Techniken können in mechanische, thermische, hydraulische und expansive Verfahren unterteilt werden. Der überwiegende Teil der eingesetzten Abbruchverfahren nutzt mechanische Techniken wie beispielsweise Abtragen, Abgreifen oder Eindrücken, mit denen durch den Eintrag kinetischer Energie der Verbund von Baustoffen wie Beton zerstört werden kann. Dadurch werden Bauwerke bzw. Bauwerksteile für einen Abtransport vorzerkleinert.

Der Vorteil von mechanischen Verfahren ist ihre Leistungsfähigkeit bei der Bewältigung großer Massen. Gleichzeitig kann durch den Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge, z.B. von Greifern, punktgenau und somit auch selektiv gearbeitet werden. Mechanische Verfahren können sowohl von Hand bzw. mit handgeführten Werkzeugen als auch maschinell mit Werkzeugen an Trägergeräten unterschiedlicher Größe ausgeführt werden. Die Wahl der eingesetzten Technik richtet sich dabei nach dem jeweiligen Anwendungsfall.

Grundsätzlich können alle verfügbaren Abbruchtechniken im Rahmen einer selektiven Vorgehensweise eingesetzt werden. Entscheidend ist, dass bereits bei der Durchführung der Arbeiten auf die sorgfältige Trennung der unterschiedlichen Baustofffraktionen und die

Erfassung und möglichst frühzeitige Separierung von Schad- und Störstoffen geachtet wird. Eine nachträgliche Sortierung von Baustoffgemischen verringert oft die Qualität der RC-Materialien. Vor dem Einsatz von Techniken wie Einschlagen oder Sprengen, mit denen sehr große Volumina bewegt werden, müssen bei selektiver Vorgehensweise Fremd-, Stör- und Schadstoffe mit anderen Techniken aus dem Materialhauptstrom entfernt werden.

Auch beim Rückbau gipshaltiger Baumaterialien werden in der Regel mechanische Verfahren eingesetzt. Gängige Praxis ist dabei der händische Rückbau von Trockenestrich und sonstigen gipshaltigen Platten, die auf diese Weise komplett separat erfasst werden können. Die selektive Entfernung von gipshaltigen Fließestrichen ist abhängig von der Art ihres Einbaus: schwimmend verlegte Estriche, also Estriche, die auf einer Dämmschicht verlegt wurden, lassen sich vergleichsweise gut unter Nutzung von maschinell oder handgeführten Stemmwerkzeugen von Betonböden lösen und dann mit anderen Kleingeräten (z.B. Mini-bagger) zusammentragen und separat weiterbehandeln.

Schwieriger und deutlich aufwendiger ist die Abtrennung von gipshaltigem Verbundestrich, da dieser direkt am Betonboden haftet. Möglich ist ein maschineller Abtrag unter Einsatz von Betonfräsen, die für eine Frästiefe von mindestens 20 mm ausgelegt sind. Es gibt jedoch nur wenige geeignete Geräte auf dem Markt und diese können aufgrund ihres für diese Frästiefen erforderlichen hohen Gewichts aus statischen Gründen nicht überall eingesetzt werden. Zudem sind dem Einsatz von Geräten in Abhängigkeit von der Zugänglichkeit der Flächen für die Maschinen Grenzen gesetzt. Das Abstemmen von Verbundestrichen mit Stemmwerkzeugen ist zeitaufwendig und falls die Arbeiten mit handgeführten Werkzeugen durchgeführt werden müssen auch sehr belastend für die Gesundheit der Mitarbeiter.

Besonders problematisch ist die Abtrennung von Gipswand- und Gipsdeckenputzen. Es ist kaum möglich diese Arbeiten maschinell auszuführen. Der Einsatz von handgeführten Werkzeugen ist in Hinblick auf den erforderlichen Zeitaufwand und die Belastung der ausführenden Mitarbeiter wenig sinnvoll, in Abhängigkeit von dem jeweiligen Abbruchobjekt auch ausgeschlossen. Während sich Gipsputze teilweise von Betonwänden und -decken lösen lassen, ist die Ablösung von Ziegelwänden im Regelfall nicht möglich.

Techniken zur Bauschuttzubereitung

Um den im Verlauf eines Abbruchs generierten Bauschutt zu einem RC-Baustoff aufzubereiten stehen ebenfalls verschiedene Techniken zur Verfügung. Generell lassen sich die Aufbereitungsschritte von Bauschutt in die folgenden Hauptverfahrensstufen unterteilen:

- Zerkleinerung und Aufschluss,
- Klassierung sowie
- Sortierung.

Diese Verfahrensstufen können sowohl in mobilen als auch in stationär betriebenen Anlagen eingesetzt werden. Der Ablauf des Aufbereitungsvorgangs wird dabei durch die jeweils ein-

gesetzten Techniken bestimmt. Dabei ist die Gewinnung von RC-Baustoffen aus sortenrein und stör- bzw. schadstoffarm gewonnenen Bauschuttfractionen deutlich weniger aufwändig als die Aufbereitung eines heterogenen Bauschutts.

In Abhängigkeit von der Gewinnung des Abbruchmaterials kann als erster Aufbereitungsschritt eine Vorsortierung erfolgen, in der Fremd- und Störstoffe aus dem eigentlichen Bauschutt entfernt werden. Hierzu gehört beispielsweise das Klauben, unter dem die Entfernung von Fremdstoffen wie z.B. Holzstücken oder Kunststofffolien per Hand zu verstehen ist.

Der beim Abbruch vorzerkleinerte und gegebenenfalls schon von Bewehrungseisen befreite Bauschutt wird in der Aufbereitungsanlage abgesiebt und das so erhaltene Vorsiebmaterial getrennt weiterverwertet bzw. bei Schadstoffbelastung entsorgt. Danach erfolgt das Zerkleinern des Bauschutts in Brechern. Dieser Verfahrensschritt dient der Gewinnung von entsprechend der geplanten Wiederverwertung möglichst optimalen Kornformen und Korngrößenverteilungen sowie dem Aufschluss von Fremd- und Störstoffen. Beim Brechen von Altbeton soll zudem der Verbund zwischen Zuschlagkorn und Zementstein gelöst werden. Anschließend erfolgt mittels einer Siebklassierung die Fraktionierung des zerkleinerten Bauschutts in die vorgesehenen Kornklassen.

Sortierprozesse dienen zur Entfernung von Fremd- und Störstoffen und können bei selektiv bzw. sortenrein gewonnenem Bauschuttfractionen gegebenenfalls entfallen. Neben klassischen Verfahren zur Abtrennung von Wertstoffen (Magnetscheidung) oder Störstoffen (Windsichtung, Klauben) wurde in den vergangenen Jahren verstärkt auch an der Entwicklung oder Weiterentwicklung von neuen oder modifizierten Methoden zur Verbesserung der Qualität von RC-Körnungen aus Bauschutt gearbeitet. In Abhängigkeit vom Aufbau der Bauschuttaufbereitungsanlage und der Art des Sortierverfahrens werden diese Aufbereitungsschritte an unterschiedlichen Stellen in den Aufbereitungsprozess integriert. Nassverfahren zur Verbesserung der Baustoffeigenschaften der RC-Körnungen werden nur in Ausnahmefällen eingesetzt.

Der Sulfatgehalt in Bauschutt aus Altbeton kann bereits im ersten Verfahrensschritt, der Vorsortierung, reduziert werden indem eventuell vorhandene Reste von raumauskleidenden Elementen aus Gips, die sich in der Farbe gut von Beton unterscheiden lassen, durch Klauben aussortiert werden. Dies ist jedoch nur bei größeren Bruchstücken möglich und wirtschaftlich sinnvoll. Selektiv gewonnenes Abbruchmaterial sollte keine Bruchstücke von Gipsplatten enthalten.

Zur Entfernung von Gipsresten aus Altbeton kann das unterschiedliche Bruchverhalten von Beton und Gips bei mechanischer Energieeinwirkung genutzt werden. Aufgrund der geringeren Härte von Gips im Vergleich zu Beton, wird Gips sowohl bei der Vorzerkleinerung beim Abbruch als auch beim Durchgang durch einen Brecher in feinere Partikel zerkleinert. Diese Gipspartikel reichern sich entsprechend in den feinen Fraktionen an und können mit dem Vorsiebmaterial und mit den Feinfraktionen aus dem aus Altbeton bestehenden Materialhauptstrom entfernt werden.

Entsprechend kann festgestellt werden, dass sich der Gehalt an gips- bzw. sulfathaltigen Bestandteilen in Bauschutt durch eine mehrstufige Bauschuttzubereitung reduzieren lässt. Speziell der Einsatz einer zweistufigen Brecheranlage ist aufgrund des unterschiedlichen Bruchverhaltens von Gips und Beton vorteilhaft. Auch eine Sortierstufe zur Leichtstoffabscheidung nach dem ersten Brecher kann den Sulfatgehalt des Materialhauptstroms verringern. Die Zubereitung von möglicherweise gipshaltigem Bauschutt sollte daher sinnvollerweise in einer stationären Bauschuttzubereitungsanlage erfolgen, da hier deutlichere Verringerungen des Gipsgehaltes zu erreichen sind als in mobilen Anlagen.

Praktische Untersuchungen zur Sulfatbelastung von Bauschutt

Zusätzlich zu der Literatur- und Datenrecherche wurden Bauschuttproben entlang der Zubereitungsstrecken unterschiedlicher Zubereitungsanlagen (semimobil und stationär) entnommen. Zudem wurde der Abbruch eines größeren Plattenbaus begleitet wobei die Beprobung sowohl auf der Baustelle als auch an verschiedenen Verfahrensstufen der nachfolgend beschickten stationären Bauschuttzubereitungsanlage erfolgte. Alle Proben wurden auf Sulfate und Chloride sowie auf verschiedene Schadstoffe und physikalische Parameter analysiert. Die Ergebnisse dieser Analysen ergänzen die Literatur- und Datenrecherche.

Untersuchung zur Praxisrelevanz von Abbruch- und Zubereitungsverfahren

Zur Ermittlung der Praxisrelevanz der betrachteten Techniken wurde in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Abbruchverband und dem Verband „Baustoff Recycling Bayern e.V.“ eine Befragung der Mitgliedsunternehmen der Verbände durchgeführt.

In der Umfrage bestätigten die befragten Abbruchunternehmen, dass sie in einem großen Teil ihrer Bauvorhaben selektive Rückbautechniken einsetzen. Die Art des Einsatzes war erwartungsgemäß abhängig von der Größe des Betriebes: während große Unternehmen (mehr als 50 Mitarbeiter) verstärkt Techniken einsetzen, die mit Trägergeräten und zugehörigen Anbauaggregaten (z.B. Zangen oder Greifern) ausgeführt werden, setzen kleine Betriebe (1 bis 10 Mitarbeiter) am häufigsten Handabbruch und die Nutzung von Kleingeräten für Abbrucharbeiten ein. Mit zunehmender Betriebsgröße steigt auch die Häufigkeit der selektiven Erfassung einzelner Baustoffströme. In Bild 0.3 ist die Durchführung von selektiven Rückbauschritten zur Erfassung gipshaltiger Baustoffe in Abhängigkeit von der Betriebsgröße dargestellt.

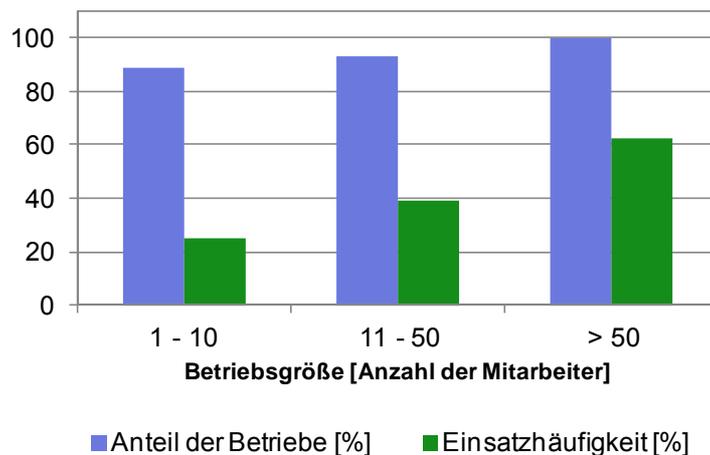


Bild 0.3: Selektiver Rückbau gipshaltiger Baustoffe in Abhängigkeit von der Betriebsgröße

Ebenso war der Betrieb von Bauschuttzubereitungsanlagen (mobil oder stationär) von der Betriebsgröße abhängig. Detaillierte Ergebnisse dieser Umfrage zu Abbruchtechniken und Bauschuttzubereitung werden in der Studie vorgestellt.

Ökobilanzielle Bewertungen

Auf der Basis der in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Untersuchungsergebnisse wurden verschiedene Wege der Gewinnung von RC-Gesteinskörnungen aus Altbeton konzipiert und ökobilanziell bewertet. Der Untersuchungsrahmen umfasste dabei Abbruch-/Rückbauarbeiten, Bauschuttzubereitung (mobil oder stationär) sowie die zugehörigen Materialtransporte. Die ökobilanziellen Betrachtungen wurden für drei Modellgebäude durchgeführt: Einfamilienhaus (EFH, bestehend aus Ziegelmauerwerk und Geschossdecken sowie Bodenplatte aus Beton), Mehrfamilienhaus in Plattenbauweise (PB, Typ P2) und ein Industriegebäude (IDB).

Die Modellgebäude wurden – unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Untersuchungen zum Gipsaufkommen – mit praxisorientierten Anteilen an gipshaltigen Bauteilen entworfen. Entsprechend waren die Gebäude mit gipshaltigen Estrichböden sowie mit Gipsfertigteilen ausgestattet. Für diese Modellgebäude, wurden jeweils zwei Verfahrenswege für die Gewinnung von RC-Gesteinskörnungen konzipiert: eine Vorgehensweise für Abbruch und Aufbereitung mit selektiven Schritten zur Entfernung von gipsbasierten Bauteilen und Baustoffen beim Abbruch sowie eine Vorgehensweise ohne selektive Schritte zur Gipsentfernung. Auf diese Weise wurden sechs Szenarien für die Abbruch- und Aufbereitungsarbeiten entwickelt.

Als Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Verfahrenswege von Abbruch und Aufbereitung wurden als Ausgangsbasis für die ökobilanzielle Betrachtung bereits teilentkernte Gebäudestrukturen gewählt. Die hierfür erforderlichen Arbeitsschritte,

wie beispielsweise die Entrümpelung des Gebäudes oder die Entfernung von kontaminierten Bereichen, wurden als bereits erfolgt vorausgesetzt.

Die Berechnungen erfolgten auf Grundlage der folgenden Vorgehensweise:

- Abbruch des Gebäudes (mit oder ohne selektive Arbeitsschritte zur Entfernung von gipshaltigen Bauteilen)
- Transport von Reststoffen aus dem Abbruch zur Deponie
- Transport des Materials aus dem Abbruch zu einer Bauschuttzubereitungsanlage
- Aufbereitung von Bauschutt in einer mobilen oder stationären Bauschuttzubereitungsanlage
- Transporte des aufbereiteten Materials und der Reststoffe aus der Aufbereitung zum Abnehmer bzw. zur Deponie.

Für die Modellierung der Stoffströme der sechs Szenarien wurden das Softwaretool Umberto® und die Datenbank Ecoinvent (Version 2.2) genutzt. Als funktionelle Einheit und damit als Bezugsgröße für die Berechnungen wurde die Bereitstellung einer Tonne RC-Gesteinskörnung des Liefertyps 1 nach DIN 4226-100 mit einem Betongehalt > 90 %, beim Abnehmer (in der Regel einer Betonproduktion) ausgewählt. Auf diese Bezugsgröße wurden alle Umweltwirkungen bezogen. Dabei wurden die Umweltwirkungen nach der Bewertungsmethode CML 2001 in den Wirkungskategorien Klimawandel, Ressourcenverbrauch, Landverbrauch, stratosphärischer Ozonabbau, Überdüngungspotential und Versauerungspotential evaluiert.

Die Auswertungen der ökobilanziellen Bewertung der unterschiedlichen Szenarien ergaben insgesamt ein einheitliches Bild. Dabei lagen die Umweltwirkungen für Abbruch und Aufbereitung des Gebäudetyps Einfamilienhaus in jeder Wirkungskategorie über den Werten für Plattenbau und Industriegebäude. Dies erklärt sich vor allem durch die unterschiedliche Baustoffzusammensetzung der Gebäudetypen und die Wahl der funktionellen Einheit, deren mineralische Zusammensetzung entsprechend der Norm mindestens zu 90 % aus Beton oder Natursteinkörnung bestehen muss. Während das Einfamilienhaus mit großen Anteilen an Ziegelmauerwerk konzipiert wurde, bestehen die Gebäudetypen Plattenbau und Industriegebäude größtenteils aus Beton. Daher ist die relative Masse an Altbeton, auf der die Umweltwirkungen als funktionelle Einheit bezogen werden können, im Gebäudetyp Einfamilienhaus deutlich geringer und die auf die funktionelle Einheit bezogenen Umweltwirkungen entsprechend größer als im Fall der beiden anderen Gebäudetypen (vgl. Bild 0.4).

In allen Wirkungskategorien hat sich für jedes in dieser Studie ökobilanziell bewertete Modellgebäude die Nutzung selektiver Vorgehensweisen bei Abbruch und Rückbau als ökologisch vorteilhafter dargestellt. Dabei dominieren die Umweltwirkungen der Kategorien Klimawandel und Landverbrauch ebenfalls alle Szenarien. Die Ergebnisse der Evaluierung

der Umweltwirkungen in diesen Kategorien sind für die drei Modellgebäude in der nachfolgenden Abbildung 0.4 dargestellt.

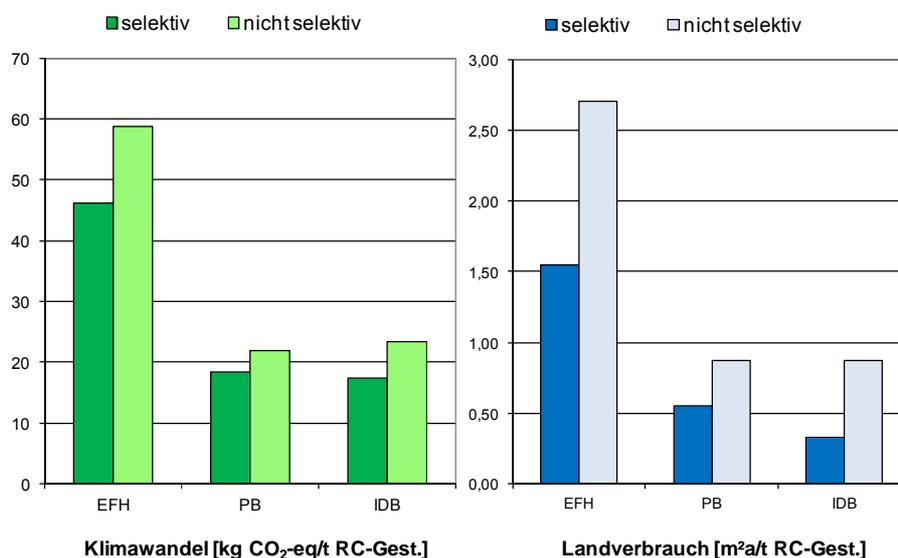


Bild 0.4: Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung in den Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch für die unterschiedlichen Modellgebäude (Verfahrensabläufe mit und ohne selektive Abbruchtechniken)

Aus den Stoffstromanalysen wurde ersichtlich, dass zwischen diesen Umweltbelastungen und dem Betrieb der genutzten Baumaschinen sowie dem Aufwand für die Deponierung von gipshaltigen Reststoffen ein enger Zusammenhang besteht. Weiterhin haben in allen Szenarien auch die zurückzulegenden Transportentfernungen (z.B. zwischen Abbruchbaustelle und Deponie) einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Im Vergleich zwischen selektiven und nicht selektiven Vorgehensweisen entstanden beim Abbruch der drei Modellgebäude jeweils erhöhte Umweltwirkungen durch die Anwendung selektiver Techniken. Sobald die anschließende Bauschuttzubereitung in die Bewertung einbezogen wurde, kehrte sich dieses Bild um und die betrachteten selektiven Vorgehensweisen zeigten geringere Umweltbelastungen. Dies kann mit den Umweltwirkungen der vergleichsweise größeren Mengen an zu deponierenden Reststoffen aus der Aufbereitung nicht selektiv gewonnenen Bauschutts erklärt werden. In der nachfolgenden Abbildung 0.5 wird dies am Beispiel des Modellgebäudes Plattenbau (PB) in den Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch deutlich.

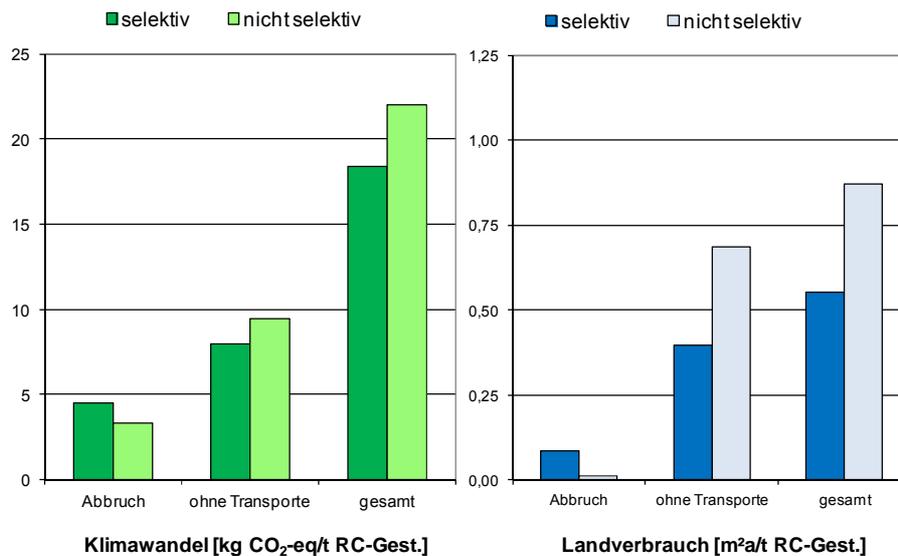


Bild 0.5: Ergebnisse der Untersuchung der Entstehung der Umweltwirkungen im Verfahrensablauf am Beispiel des Gebäudetyps Plattenbau (PB) in den Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch (Verfahrensabläufe mit und ohne selektive Abbruchtechniken)

Die Vorteile der Nutzung von selektiven Arbeitsschritten zur Entfernung von gipshaltigen Baustoffen beim Abbruch der untersuchten Modellgebäude gegenüber der Vorgehensweise ohne selektive Arbeitsschritte sind auch in allen anderen untersuchten Wirkungskategorien und für die anderen ökobilanziell bewerteten Modellgebäude ersichtlich.

Die durch die Gewinnung von Natursteinkörnung entstehenden klimarelevanten Emissionen liegen – unter Verwendung der Datenbank, die auch Basis für die Modellierung der hier betrachteten Szenarien war – in der gleichen Größenordnung wie die Werte der Herstellung von RC-Gesteinskörnungen in den Szenarien für die Modellgebäude Plattenbau und Industriegebäude. Die Werte für die Szenarien des Modellgebäudes Einfamilienhaus liegen höher. In Bezug auf die Wirkungskategorie Landverbrauch liegt das Ergebnis für die Generierung von Natursteinkörnungen deutlich über den Werten der RC-Gesteinskörnungen aus allen betrachteten Szenarien.

Bei einer Modellrechnung für Betone führt die Substitution von 20 % der Natursteinkörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung aus Altbeton (Szenario Plattenbau) nicht zu Veränderungen in der Wirkungskategorie Klimawandel. Demgegenüber führt der gleiche Anteil von rezyklierter Gesteinskörnung im RC-Beton zu deutlich geringeren Umweltbelastungen in der Wirkungskategorie Landverbrauch im Vergleich zum vollständig aus natürlichen Gesteinskörnungen hergestellten Referenzbeton.

Handlungsempfehlungen

Um das Wertstoffpotential von Altbeton durch die Wiederverwertung als rezyklierte Gesteinskörnung auszuschöpfen und die Recyclingquote zu erhöhen, ist die möglichst sortenreine Gewinnung des Altbetons von besonderer Bedeutung. In Bezug auf die Verringerung des Gehalts an eluierbaren Sulfaten liegt dabei der Schwerpunkt auf der Entfernung gipshaltiger Innenausbaumaterialien.

Für die optimierte Gewinnung von Altbeton in Hinblick auf eine Sulfatentfrachtung ist zunächst die Erfassung und Massenermittlung von gipshaltigen Baustoffen im Rahmen einer Bestandsaufnahme des abzubrechenden Gebäudes sinnvoll. Auf dieser Basis kann das Vorhandensein von gipshaltigen Materialien bereits in der Leistungsbeschreibung und entsprechend in der Angebotserstellung des Abbruchunternehmens berücksichtigt werden. Die Durchführung von selektiven Arbeitsschritten zur Entfernung von gipshaltigen Innenausbaumaterialien sollte in allen Phasen des Abbruchprojektes angestrebt werden.

Raumauskleidende Innenausbauelemente wie z.B. Gipsplatten oder Trockenestriche können in der Regel gut von Hand oder unter Einsatz von handgeführten Werkzeugen demontiert oder abgebrochen werden. Schwimmend verlegte Fließestriche lassen sich unter Einsatz von Stemmwerkzeugen vergleichsweise einfach aufbrechen. Die Reste des Estrichbodens lassen sich gegebenenfalls mit Kleingeräten zusammentragen und separieren.

Fließestrich lässt sich nur mit deutlich größerem Aufwand durch Abstemmen lösen bzw. in Abhängigkeit von dem jeweiligen Abbruchprojekt auch durch Fräsen entfernen. Auf den Einsatz von manueller Stemmarbeit sollte im Fall von Verbundestrich nach Möglichkeit verzichtet werden, da diese Stemmarbeiten sehr zeit- und energieaufwändig und auch durch die damit verbundenen Vibrationen und Lärmemissionen besonders belastend für die Mitarbeiter sind.

Die Abtrennung gipshaltiger Wand- und Deckenputze ist aufgrund der guten Haftung dieser Materialien an Beton (und Ziegeln) sowohl maschinell als auch mit handgeführten Geräten in vielen Fällen nicht möglich. Selbst wenn der Putz von manchen Flächen entfernt werden kann, beispielsweise durch Schleifen mit den entsprechenden Geräten, so sind diese Arbeiten in der Regel sehr aufwändig und belastend für die Ausführenden.

Beim Einsatz von handgeführten Maschinen sollte darauf geachtet werden, dass möglichst nur rückstoßarme und schallgedämpfte Geräte verwendet werden. Weiterhin ist das händische Arbeiten zeit- und damit kostenaufwändig und durch den Einsatz von kleineren Aggregaten mit größeren Umweltwirkungen verbunden als das Arbeiten mit größeren Geräten. Grundsätzlich ist es empfehlenswert auf in Handarbeit durchzuführende Arbeitsschritte in Bezug auf Gipsputze oder Verbundestrich zu verzichten.

Nach dem selektiven Rückbau von gipshaltigen Materialien ist zudem darauf zu achten, dass die separierten Reste getrennt gesammelt, gelagert und abtransportiert werden um eine

nachträgliche Vermischung mit anderen beim Abbruch anfallenden Stoffströmen zu vermeiden.

Der bei einem Abbruch entstandene Bauschutt wird, sofern das Material nicht entsorgt werden muss, durch verschiedene Aufbereitungsschritte zu marktfähigen RC-Baustoffen aufgearbeitet. Dies kann sowohl in mobilen als auch in stationären Bauschutt-aufbereitungsanlagen erfolgen.

Altbeton aus Abbruchmaßnahmen, in denen keine selektive Entfernung der gipshaltigen Bestandteile möglich war (Zeitgründe, Gipsputze etc.), sollte in einer stationären Bauschutt-anlage behandelt werden, da sich der Gehalt an gips- bzw. sulfathaltigen Bestandteilen in Altbeton durch mehrstufige Aufbereitungsverfahren in der Regel deutlich verringern lässt. Hierbei ist insbesondere der zweifache Durchgang durch Brecher mit anschließenden Sieb-aggregaten zu nennen. Zudem sollte zusätzlich eine Abstimmung mit der Aufbereitungs-anlage vor der Anlieferung des Bauschutts erfolgen, um größere gipshaltige Bestandteile, wie z.B. Teile von Gipsplatten, durch Handsortierung noch vor dem Durchgang durch die Aufbe-reitungsanlage zu entfernen. So kann die Verschleppung von Gipsanteilen in der Anlage verringert und die Qualität der Reststoffe des Aufbereitungsprozesses (z.B. Vorsiebmaterial) erhöht werden.

Die in dieser Untersuchung durchgeführten ökobilanziellen Bewertungen ausgewählter Ver-fahrensabläufe an Modellgebäuden haben gezeigt, dass selektive Vorgehensweisen zur Entfernung von gipshaltigen Innenausbaumaterialien (als Hauptquelle für eluierbare Sulfate in Bauschutt) die Umweltwirkungen bei der Gewinnung von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Altbeton reduzieren können. Ist die Separierung von gipshaltigen Materialien beim Abbruch nicht möglich oder aus anderen Gründen nicht sinnvoll, so kann durch eine geeig-nete Verfahrensweise bei der Bauschutt-aufbereitung eine Verringerung des Sulfatgehaltes in der Gesteinskörnung bewirkt werden. Dabei ist auf eine Minimierung der für die Behandlung, Wiederverwertung oder Entsorgung der unterschiedlichen Fraktionen der Baurestmassen erforderlichen Transporte zu achten. Durch geeignete Vorgehensweisen bei Abbruch und Bauschutt-aufbereitung können rezyklierte Gesteinskörnungen aus Altbeton umweltverträglich gewonnen und das Ressourcenschonungspotential dieses Reststoffes sinnvoll genutzt werden.

1 Einleitung und Zielsetzung

Der Bereich der Baurestmassen ist im Sinne der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie von besonderer Bedeutung [1]. Dies liegt zum einen daran, dass das Baugewerbe mit 44 % des gesamten Primärmaterialeinsatzes Deutschlands einen besonders hohen Ressourcenverbrauch und auch ein besonders großes Einsparpotential hat [2, 3]. Andererseits wird mit der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie eine Reduktion der Flächeninanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsflächen auf maximal 30 ha/Tag bis zum Jahr 2020 angestrebt. Zudem gehören die in der Bauindustrie verwendeten Primärrohstoffe zu den mineralischen Rohstoffen, die zu den erschöpflichen bzw. nicht erneuerbaren Ressourcen zählen [4]. Daher wird es zunehmend zu einer weiteren Nutzung bzw. Wiedernutzung von bereits bebauten Flächen und den damit verbundenen Rückbaumaßnahmen von Altbeständen kommen [5].

Die Verwendung von Recyclingbaustoffen als Sekundärrohstoffe erfüllt dabei die Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung gleich in mehrfacher Hinsicht: neben der zeitlichen Verlängerung der Verfügbarkeit von Primärrohstoffen kann auch Deponieraum eingespart werden. In Abhängigkeit von den für die Realisierung der Baustoffkreisläufe eingesetzten Techniken können auch Energieverbräuche gesenkt und entsprechend Emissionen reduziert werden.

Bereits jetzt stellen Baurestmassen in Deutschland die größten Massenströme auf dem Gebiet der mineralischen Reststoffe. Bau- und Abbruchabfälle umfassen unterschiedliche Fraktionen. Nach der statistischen Erfassung der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB) entfiel im Jahr 2004 der größte Anteil der 200,7 Mio t an Bau- und Abbruchabfällen mit 128,3 Mio t (63,9 %) auf Bodenaushub. Bauschutt und Straßenaufbruch stellten mit 50,5 Mio t (25,2 %) bzw. 19,7 Mio t (9,8 %) zusammen den zweitgrößten Massenstrom im Bereich der Baurestmassen. Baustellenabfälle (1,9 Mio t bzw. 0,9 %) und Bauabfälle auf Gipsbasis (0,3 Mio t bzw. 0,2 %) hatten einen deutlich geringeren Anteil (siehe Abbildung 1).

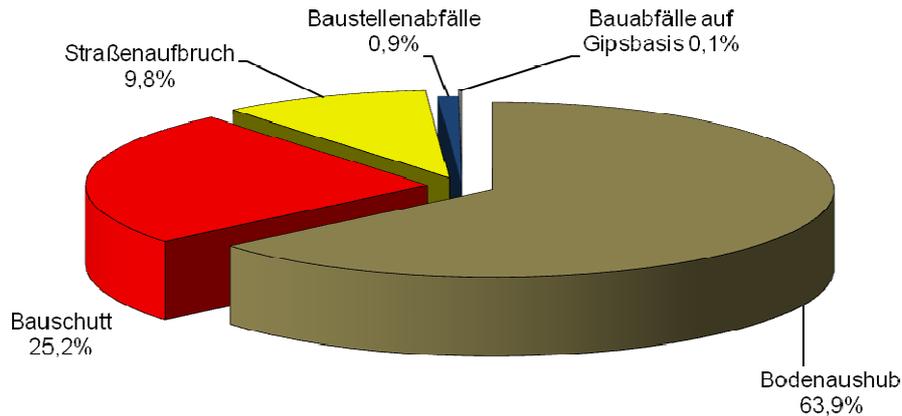


Abbildung 1: Anfall mineralischer Bauabfälle im Jahr 2004 [6]

Als Bauschutt werden mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, auch mit geringfügigen Fremdanteilen (nicht mineralisch), bezeichnet. Er kann neben Beton auch Reste von anderen mineralischen Baustoffen wie Ziegel, Glas, Putz usw. enthalten [7]. Von den erfassten Stoffströmen bieten Bauschutt und Straßenaufbruch aufgrund der Qualität der Materialien und der Möglichkeiten diese Stoffströme vergleichsweise sortenrein zu gewinnen die günstigsten Voraussetzungen für eine höherwertige weitere Nutzung.

Obwohl in den vergangenen Jahren Verwertungs- bzw. Recyclingquoten von über 70 % erreicht wurden [8-11], ist die Ausschöpfung des im Altbeton enthaltenen Wertstoffpotentials im Sinne der nach Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [12] anzustrebenden hochwertigen Verwertung nicht vollständig umgesetzt. Eine Wiederverwertung im Sinne eines „echten Recycling“, wie zum Beispiel der Einsatz von Altbeton als RC-Gesteinskörnung in der Betonproduktion wird nur in einem geringen Maße praktiziert. So wurden nur 4,9 % der im Jahr 2004 hergestellten 49,6 Mio t RC-Baustoffe als Gesteinskörnung in der Betonproduktion eingesetzt (siehe Abbildung 2). Dies entsprach zwar immerhin einer Verdreifachung des Anteils dieses Verwertungsweges an den gesamten RC-Baustoffen im Vergleich zum vorherigen Erfassungszeitraum [6, 11], dennoch ist gerade der Einsatz von RC-Baustoffen als Gesteinskörnungen im Hochbau deutlich von einem geschlossenen Materialkreislauf entfernt [13].

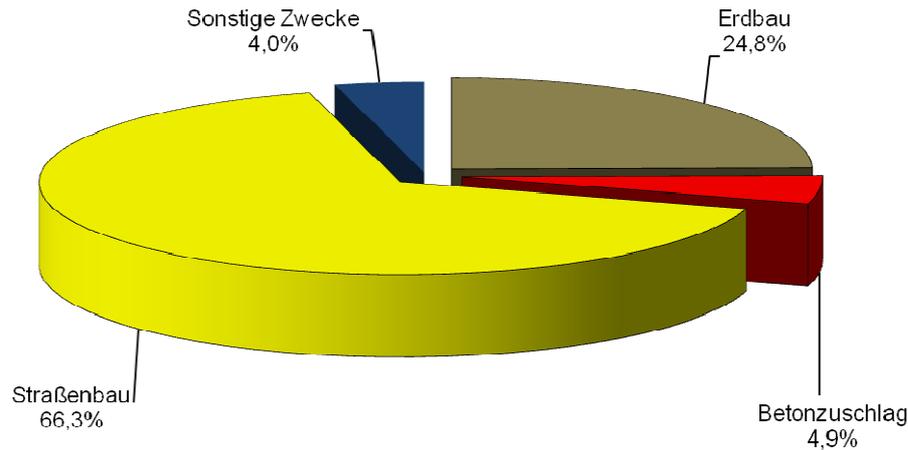


Abbildung 2: Verwendung von RC-Baustoffen im Jahr 2004 [6]

Ursache hierfür sind sowohl die im Vergleich zu Natursteinkörnungen ungünstigeren bautechnischen Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnungen als auch Bedenken hinsichtlich der Umweltverträglichkeit dieser Materialien. Minderungen in der bautechnischen Eignung können beispielsweise auf folgenden Materialeigenschaften beruhen:

- erhöhte Porosität,
- ungünstige Kornformen,
- ungleichmäßige Zusammensetzung der Körnungen oder
- dem Vorhandensein von Störstoffen .

Gleichzeitig kann die Umweltverträglichkeit von rezyklierten Gesteinskörnungen beeinträchtigt sein [14-17]. Auch hierfür gibt es unterschiedliche Ursachen:

- anorganische Schadstoffe wie beispielsweise Schwermetalle oder anorganische Fasern (Asbest),
- organische Schadstoffe, (z.B. Mineralölkohlenwasserstoffe, PCB) oder
- eluierbare Salze wie z.B. Chloride oder Sulfate aus gipshaltigen Materialien.

Weiterhin können rezyklierte Gesteinskörnungen inhomogen sein und ihre Sortenreinheit ist nicht immer gewährleistet [18-21]

Aufgrund dieser von natürlichen Gesteinskörnungen abweichenden, meist ungünstigeren Materialeigenschaften wurden die Anforderungen an die Qualität von RC-Baustoffen und an ihren sachgerechten Einsatz in verschiedenen Regelwerken für rezyklierte Gesteinskörnungen festgeschrieben. In diesen Regelwerken werden unter anderem auch stoffliche Anforderungen an die Umweltverträglichkeit der RC-Körnungen gestellt.

Für den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen in Beton und Mörteln wurde die DIN 4226-100 konzipiert [16]. In dieser DIN-Norm wird zwischen den Liefertypen 1 bis 4

unterschieden. Dabei unterliegt eine RC-Gesteinskörnung des Liefertyps 1 mit beispielsweise einem Masseanteil an Beton und natürlichen Gesteinskörnungen von $\geq 90\%$ den höchsten Anforderungen und steht somit für die beste Qualität. An Liefertyp 4 werden die geringsten Anforderungen gestellt, gleichwohl müssen auch diese eingehalten werden, damit das Material als rezyklierte Gesteinskörnung genutzt werden kann.

Weiterhin ist mit der Mitteilung 20, „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln“ der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), die Einstufung von Bauschutt in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung möglich [22]. In Abhängigkeit von den Ergebnissen dieser Einstufungen (Einbauklassen Z 0 bis Z 2) werden Verwertungswege bzw. –einschränkungen vorgegeben. Jedoch gibt es in der Anwendung der LAGA Mitteilung 20 Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesländern.

Dies war einer der Gründe für die Konzipierung einer bundesweit einheitlichen Regelung des Wiedereinsatzes von mineralischen Reststoffen im Baubereich. Im November 2007 wurde der 1. Arbeitsentwurf für die „Verordnung zur Regelung des Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und zur Änderung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung“ vom Bundesumweltministerium vorgelegt [23]. Seit Januar 2011 ist eine überarbeitete Fassung des Arbeitsentwurfs im Internet einzusehen [24].

Die vorgesehenen Anforderungen beziehen sich neben rezyklierten Gesteinskörnungen auch auf andere industrielle Abfälle und Nebenprodukte als Ersatzbaustoffe wie beispielsweise Gießereirestsande oder Hochofenschlacken. Für jeden Ersatzbaustoff soll der Einbau in definierte Bodenklassen unter Berücksichtigung von Schadstoffgrenzwerten und Einbauweisen geregelt werden. Der Entwurf stützt sich dabei nicht nur auf das Abfall- sondern auch auf das Bodenschutzrecht. Hintergrund sind neuere Vorgaben für den Boden- und Grundwasserschutz, die mit dem Erlass des Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) im Jahr 1998 und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) von 1999 in Kraft getreten sind [25].

Ein Schwerpunkt des Verordnungsentwurfs ist der Ansatz der schadlosen Verwertung von Materialien in Hinblick auf den vorsorgenden Grundwasserschutz durch Berücksichtigung von stoffbezogenen ‚Geringfügigkeitsschwellen‘ (GFS) für verschiedene Parameter. Der Grundgedanke dabei ist, den Eintrag von Stoffen ins Grundwasser nur dann zuzulassen, „...wenn trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber den regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxikologischen Wirkungen auftreten und wenn außerdem die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleitete Werte eingehalten werden...“. Für Konzentrationswerte, die diese Bedingungen einhalten, wird der Begriff ‚Geringfügigkeitsschwelle‘ verwendet.“ [26].

Die Orientierung an GFS ist im aktuellen Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung für einige Stoffe, unter anderem Sulfat, mit einer Verschärfung der Anforderungen verbunden. Zudem ist damit zu rechnen, dass durch die Zunahme von verbautem Gips in den vergangenen

Jahren zukünftig auch die Menge an Sulfat in rückzubauenden Gebäuden ansteigt [27]. Dies hat auch bautechnisch für die Anwendung von RC-Baustoffen Bedeutung.

Sulfate in Gesteinskörnungen können in Anwesenheit von Wasser und mit anderen reaktionsrelevanten Stoffen wie Aluminiumoxiden und Kalk die Mineralphasen Ettringit oder (seltener) Thaumasit bilden. Durch die damit verbundene Volumenvergrößerung kommt es zu Gefügestörungen sowohl in Beton oder Mörteln als auch in ungebundenen Tragschichten, wie z.B. Bettungsschichten [28-30]. Die zulässigen Sulfatgehalte verschiedener Klassen von RC-Baustoffen für den Einsatz im Beton sind nach DIN 4226-100 festgelegt [16].

Entsprechend wichtig ist es durch geeignete Techniken und Verfahren beim Rückbau von Gebäuden und der Aufbereitung der generierten Materialien auf eine möglichst sinnvolle Kreislaufführung der mineralischen Rohstoffe zu achten [31]. Mit optimiert eingesetzten Rückbauverfahren und geeigneter Aufbereitungstechnik können Stoffströme getrennt gehalten und die Herstellung qualitativ hochwertiger RC-Baustoffe erreicht werden [32]. Hohe Qualitätsstandards sind notwendig um die Marktfähigkeit der Recyclingbaustoffe zu gewährleisten [33].

1.1 Ziel des Projektes

Dieses Projekt wurde in Ergänzung zu bzw. im Kontext mit anderen, bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten vor dem Hintergrund der angestrebten verstärkten Nutzung des Ressourcenschonungspotentials von Baurestmassen [31, 34, 35] durchgeführt. Eine Zielstellung des Projektes war dabei die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Gewinnung von hochwertigen RC-Gesteinskörnungen durch optimierte Vorgehensweisen beim Abbruch und der anschließenden Bauschutttaufbereitung. Im Fokus stand die Sulfatentfrachtung des Bauschutts durch die Entfernung von gipshaltigen Bauteilen aus dem Materialhauptstrom, da Gipsanteile die Baustoffeigenschaften von Gesteinskörnungen verschlechtern können [36]. Ergebnisse von ökobilanziellen Betrachtungen der Umweltwirkungen von verschiedenen Abbruch- und Aufbereitungsszenarien stellen die Grundlage dieser Handlungsempfehlungen dar.

1.2 Vorgehensweise im Projekt

Im ersten Arbeitspaket wurde zunächst mit verschiedenen Methoden abgeschätzt, wie viel Gips als Hauptsulfatträger zurzeit im Bauschutt vorhanden ist bzw. mit welcher Entwicklung der Gipsanteile in zukünftigen Baurestmassen zu rechnen sein wird. Ebenso wurde die Herkunft der Gipse bzw. Sulfate im Baubestand betrachtet. Dabei wurden die unterschiedlichen Ansätze verschiedener Autoren zur Bestimmung des Stofflagers in Gebäuden berücksichtigt und auch weitere Stör- und Schadstoffe betrachtet. Zusätzlich wurden vorhandene Literatur und eigene Datensammlungen in Bezug auf Angaben zu

Sulfat- oder Gipsgehalten in Bauschutt bzw. RC-Körnungen gesichtet. Ergänzt wurden diese Recherchen durch Informationen aus Gesprächen mit den Vertretern von Industrieverbänden. Ergebnisse eigener Analysen von Bauschutt bzw. RC-Gesteinskörnungen unterschiedlicher Herkunft sowohl auf Sulfat- und Chloridgehalte als auch auf andere Schadstoffe ergänzten die Recherchen.

Seit Mitte des letzten Jahrhunderts wurde in zunehmendem Maße Beton bei der Errichtung von Gebäuden eingesetzt, daher steigt – in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Lebensdauer dieser Gebäude – auch der Anteil von Beton im Bauschutt (siehe Abbildung 3) [3, 37]

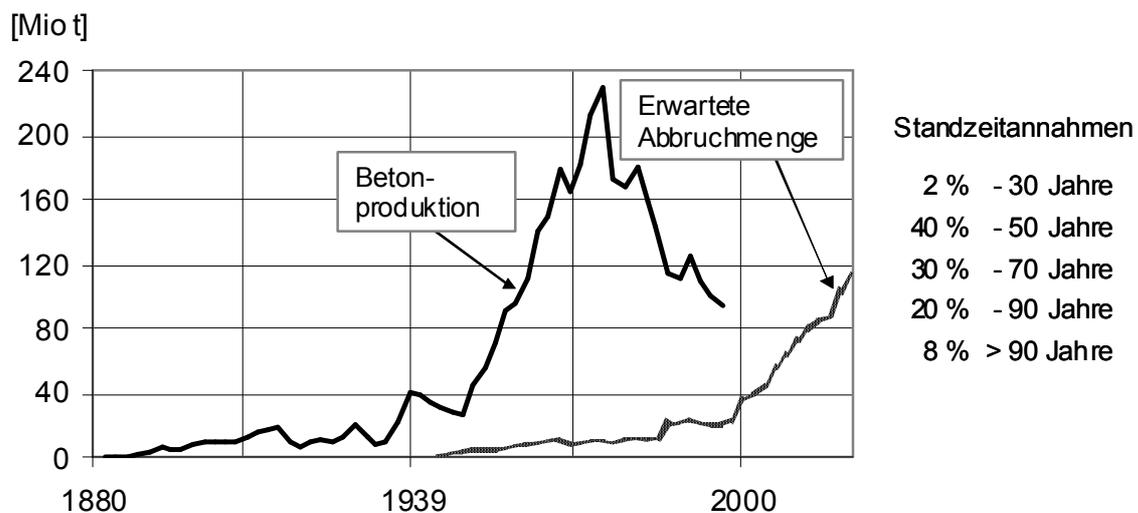


Abbildung 3: Betonproduktion und Schätzung der daraus resultierenden Betonabbruchmengen in Deutschland [37]

Altbeton hat weiterhin gegenüber Ziegelbruch günstigere Eigenschaften in Bezug auf den Wiedereinsatz als Sekundärgesteinskörnung in RC-Beton [3, 38, 39]. Daher wurde der Fokus in diesem Projekt auf den Wiedereinsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Altbeton gelegt. Die besseren Baustoffeigenschaften dieser Körnungen in Hinblick auf die Herstellung von RC-Beton ermöglichen höhere Anteile von RC-Gesteinskörnungen an der Gesamtgesteinskörnung. Sie haben ein größeres Wertstoffpotential und entsprechend könnten größere Mengen in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden, als dies bei RC-Körnungen aus Misch- oder Ziegelschutt der Fall wäre.

Weiterhin wurden in der Literatur verfügbare Informationen über Abbruchtechniken und Verfahren für die Aufbereitung von RC-Baustoffen gesammelt und ausgewertet. Dabei wurde in Bezug auf die betrachteten Abbruchtechniken die Eignung des jeweiligen Verfahrens für den selektiven Rückbau von gipshaltigen Materialien, bzw. die Eignung der Aufbereitungsverfahren in Hinblick auf eine Sulfatentfrachtung des RC-Baustoffs betrachtet.

Ausgewählte Verfahrenswege zur Gewinnung von RC-Gesteinskörnungen, die sowohl die Abbruchtechnik als auch die Aufbereitungsverfahren der Gesteinskörnung berücksichtigen, wurden einer ökobilanziellen Betrachtung unterzogen. Bei der Auswahl der ökobilanziell untersuchten Verfahrenswege für die Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnungen wurden sowohl Verfahren, die in der Praxis häufig angewandt werden berücksichtigt, als auch Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen, die für die sortenreine Erfassung von Altbeton besonders geeignet erscheinen.

Die ökobilanzielle Bewertung erfolgte mit der für die Bilanzierung von Stoffströmen entwickelten Software Umberto unter Nutzung der Datenbank Ecoinvent [40]. Hierbei wurde als Wirkungskategorie neben dem Ressourcenverbrauch auch die Naturrauminanspruchnahme berücksichtigt und bewertet.

Für die Erarbeitung der Handlungsempfehlungen wurden sowohl die im Verlauf des Projektes gewonnenen Erkenntnisse als auch entsprechende Literaturquellen und die gültigen Regelwerke herangezogen.

2 Teilvorhaben 1: Literatur- und Datenrecherche

Im Rahmen der Literatur- und Datenrecherche wurden sowohl das Aufkommen sowie Zusammensetzung und Schadstoffgehalte von Bauschutt als auch Abbruch- bzw. Rückbau- sowie Bauschuttzubereitungstechniken berücksichtigt.

2.1 Ermittlung des Gipsaufkommens im Bauabfall in Deutschland

Einer der mengenmäßig größten Abfallströme in der Bundesrepublik Deutschland entsteht im Bausektor. Im Jahr 2006 fielen 188,7 Mio t mineralische Bauabfälle an, abzüglich des Bodenaushubs beläuft sich die Zahl auf 82,7 Mio t. In den letzten Jahren wurden ca. 70 M.-% der Bauabfälle ohne Bodenaushub recycelt [41]. Die Qualität des RC-Materials ist hauptsächlich von der Zusammensetzung des Abfalls abhängig. Durch den Abbruch werden die Baumaterialien vermischt, wodurch eine hochwertige Verwertung erschwert wird. Kontrollierter Rückbau erfolgt nach wie vor nur in geringem Umfang. Stör-, Fremd- und Schadstoffe im Bauschutt mindern die Qualität des RC-Materials, wenn sie nicht vorher eliminiert werden.

Als einer der problematischsten Schadstoffe im Bauschutt ist derzeit der Gips zu nennen, da der Sulfatgehalt im Bauschutt schon bei sehr geringen Gipsgehalten über den zulässigen Grenzwerten liegt. Für die Verwendung von Bauschutt im Hochbau ist nach DIN 4226-100 ein Höchstwert von 0,2 M.-% an Fremdbestandteilen (z.B. Stückgips, Glas, Keramik, Leichtbeton, Porenbeton, Metall, Holz, Kunststoff) einzuhalten [16]. Ein zu hoher Anteil an Gips kann im RC-Material zur unkontrollierten Ettringitbildung und somit zum sogenannten Gipstreiben führen. Auch bei der Deponierung bzw. Ablagerung ist die Volumenzunahme aufgrund des Gipstreibens unerwünscht.

Um ein qualitativ hochwertiges Recycling zu ermöglichen, sind Kenntnisse über die stoffliche Zusammensetzung der Bauabfälle unabdingbar.

Die Zusammensetzung des Stofflagers Bauwesen ist weitgehend unbekannt. Es lassen sich nur schwer Aussagen über die qualitative und quantitative Zusammensetzung machen. Die unbefriedigende Datenlage zur Bestimmung von Mengen im System Bauwesen lässt nur Schätzungen zu den Stoffströmen und zum Bestand des Stofflagers „Bauwerk“ zu.

Durch drei verschiedene Ansätze mit unterschiedlicher Datenbasis (TOP-DOWN-Ansatz, BOTTOM-UP-Ansatz; OUTPUT-Ansatz) soll abgeschätzt werden, wieviel Gips als Hauptsulfatträger zurzeit im Bauschutt vorhanden ist bzw. mit welchen Mengen in Zukunft zu rechnen sein wird.

Versuche verschiedener Autoren, das Stofflager im Bau zu bestimmen, waren mit großen Schwierigkeiten verbunden. Bei der Berechnung von Glenck et al. beispielsweise ergab die Abschätzung des Stofflagers für Österreich eine Schwankungsbreite mit dem Faktor 3 [27].

Beim TOP-DOWN-Ansatz wird anhand allgemein verfügbarer Statistiken (Produktionsstatistiken) versucht, die Stoffströme und das Stofflager zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der Lebensdauer von einzelnen Bauteilen wird der Output aus dem System Bauwesen berechnet [27].

Der BOTTOM-UP-Ansatz greift auf spezifische Daten der stofflichen Gebäudezusammensetzung und der Altersstruktur zurück. Mit Hilfe dieser Einzeldaten zu den Baustoffmengen werden die Stofflager und –ströme hochgerechnet.

Der sogenannte OUTPUT-Ansatz stellt eine Ergänzung zu den anderen zwei Ansätzen dar und berechnet mit Hilfe von gesammelten Daten zu Abfallmengen und Abfallzusammensetzungen den Austrag an Gips aus dem Stofflager.

In Abbildung 4 ist die Vorgehensweise zur Bestimmung des Gipsgehaltes in Bauabfällen dargestellt.

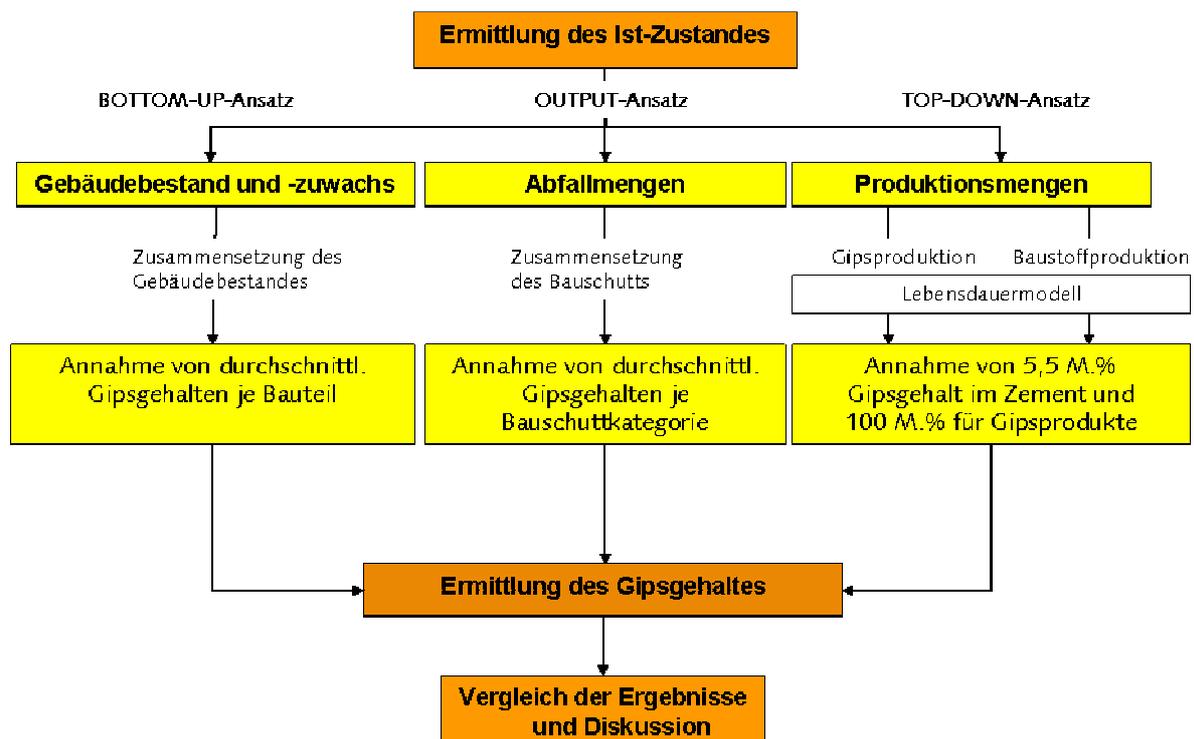


Abbildung 4: Vorgehensweise zur Ermittlung des Gipsgehaltes im Bauschutt

2.1.1 Output-Ansatz

Im ersten Ansatz werden verschiedene Statistiken über das Abfallaufkommen in der Bundesrepublik Deutschland und Daten zur stofflichen Zusammensetzung von mineralischen Abfällen betrachtet. Auf der Basis der geschätzten Gipsgehalte in den verschiedenen getrennten und gemischten Abfallarten konnte das jährliche Gipsaufkommen im Bauabfall berechnet werden.

Es wurden Daten, die in der Vergangenheit an der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung der Bauhaus-Universität Weimar über die Zusammensetzung von Bauschutt gesammelt wurden, zusammengestellt [42-44]. Innerhalb von Projekten, Studien-, Diplom- und Promotionsarbeiten wurden an der Professur Untersuchungen zur Bauschuttzusammensetzung durchgeführt. Dabei wurden hauptsächlich zwei Verfahren zur Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung verwendet.

Einerseits wurde auf das Verfahren der Sortieranalyse zurückgegriffen. Dazu wurde die stoffliche Zusammensetzung an einer Probe von 10 kg nach Augenschein ermittelt. Der Gipsanteil wurde als prozentualer Anteil an der Gesamtmenge angegeben. Als Grundlage dienen die Vorschriften der DIN 4226-100 und später der DIN EN 933-11 [16, 45].

Andererseits wurde von einem Großteil der Proben der Sulfatgehalt an der Professur Bauchemie der Bauhaus-Universität Weimar chemisch analysiert. Die Proben wurden rückstandsfrei durch einen Flusssäure-Salpetersäure-Aufschluss gelöst. Anschließend wurde unter anderem der Schwefelanteil mit einem ICP-Massenspektrometer der Fa. PERKIN ELMER quantitativ bestimmt und auf den Sulfatgehalt (SO_3^- in M.-%) hochgerechnet.

Das Sulfat kann unterschiedlich chemisch gebunden sein. Folglich lässt die chemische Analyse keinen Rückschluss auf den Gipsgehalt in der Probe zu. Sind jedoch im hohen Maße Ca-Ionen und SO_3^- vorhanden, so kann von einem gewissen Gipsgehalt ausgegangen werden. Dieser lässt sich als maximal möglicher Wert über die molaren Massenverhältnisse ermitteln. In den Tabellen A 5 und A 6 im Anhang sind die zusammengestellten Daten einzusehen.

In Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen chemischer Analyse und Sortieranalyse für Mauerwerksbruch und für Betonbruch zusammengefasst dargestellt. Die Ergebnisse aus Sortieranalyse und chemischer Analyse korrelieren recht gut. Es ist eine gewisse Abhängigkeit zu erkennen, jedoch kann man praktisch nicht von einem ermittelten Gipsgehalt auf den anderen schließen. Bei der Sortieranalyse muss der Gips vom Sortierer erkannt werden. Hier liegt die erste Fehlerquelle. Des Weiteren kann man oft davon ausgehen, dass es sich nicht um reinen Gips, sondern um gipshaltige Bestandteile in der Probe handelt. Auch dieser Fakt beeinflusst das Ergebnis der Sortieranalyse. Für die Qualität der chemischen Analyse ist im hohen Maße die Entnahme einer repräsentativen Probe entscheidend.

Abbildung 6 zeigt die sich ergebenden Mittelwerte für die Kategorien Mauerwerksbruch, Betonbruch und gipshaltige Bauabfälle. Zum einen sind die Durchschnittswerte für den Gips-

gehalt aus der Sortieranalyse und zum anderen der Sulfatgehalt aus der chemischen Analyse dargestellt. Bei Mauerwerk liegt der durchschnittliche Gipsgehalt bei ca. 0,7 M.-%, bei Beton sogar bei ca. 2 M.-%. Gipshaltige Abfälle wie Gipsfußböden und Materialien aus Badzellen ergeben einen Mittelwert für den Gipsgehalt von ca. 90 M.-%.

Die Sulfatgehalte liegen für Mauerwerksbruch und Beton bei ungefähr 1 M.-% und für gipshaltigen Abfällen bei 30 M.-%.

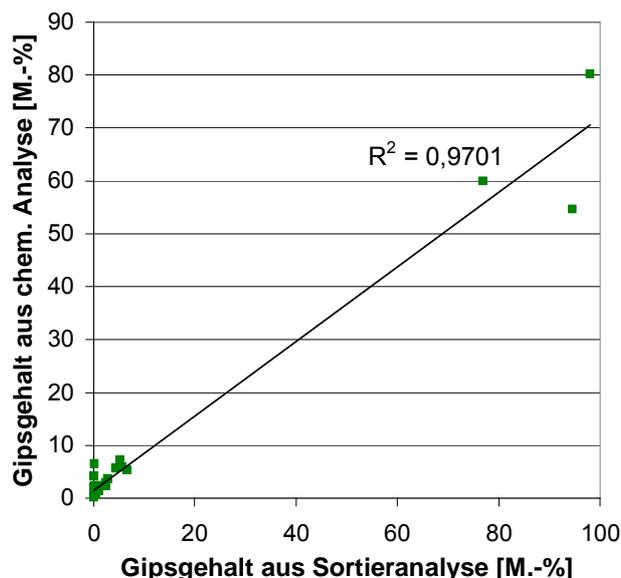


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen dem mit Sortieranalyse ermittelten Gipsgehalt und dem aus der chemischen Analyse berechnetem Gipsgehalt

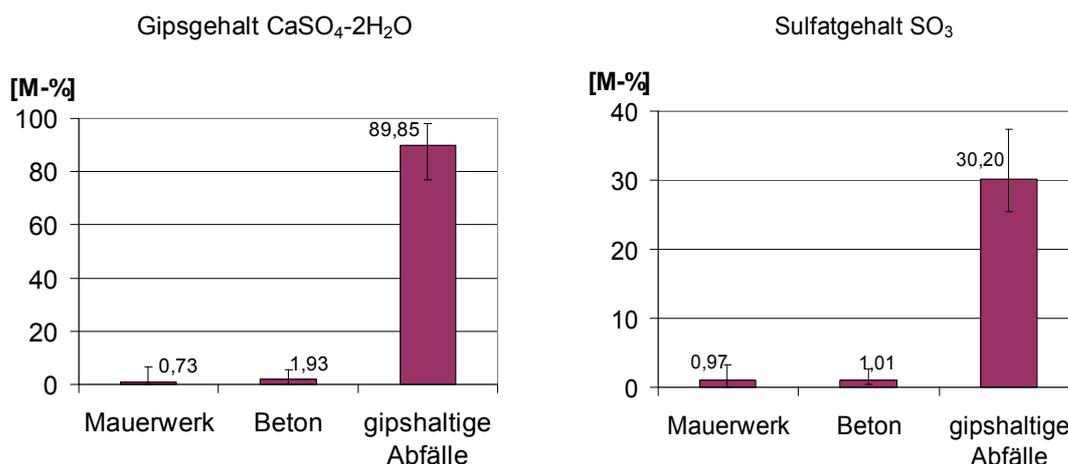


Abbildung 6: Durchschnittliche Gipsgehalte aus Sortieranalyse und durchschnittliche Sulfatgehalte aus chemischer Analyse für die gesammelten Daten

Für die Ermittlung der Gipsmengen im Abfallstrom wurden folgende Annahmen getroffen:

- Gipsanteil im Bodenaushub: 0 M.-%
- Gipsanteil im Straßenaufbruch auf Bitumenbasis: 0 M.-%
- Gipsanteil in Baustellenabfällen: 6,0 M.-%
- Gipsanteil im Bauschutt aus Mauerwerk- und Betonbruch
(berücksichtigt auch den im Beton chemisch gebundenen Gips): 0,9-7,6 M.-%
- Bauabfälle auf Gipsbasis: 76,9-98,1 M.-%.

Nach den Erhebungen des KWTB für das Jahr 2006 betrug die Menge an Bauabfällen 188,7 Mio Tonnen [41]. Hiervon stellte Bodenaushub mit 106,0 Mio Tonnen (56,2 %) den größten Anteil dar, gefolgt von Bauschutt mit 57,1 Mio Tonnen (30,2 %), Straßenaufbruch auf Bitumenbasis mit 14,3 Mio Tonnen (7,6 %) und Baustellenabfällen mit 10,9 Mio Tonnen (5,8 %) sowie Bauabfällen auf Gipsbasis mit 0,4 Mio Tonnen (0,2 %).

Daraus ergibt sich, wie Tabelle 1 zu entnehmen, eine Gipsmenge im Bauschutt, die sich zwischen 0,82 und 5,47 Mio Tonnen bewegt.

Tabelle 1: Errechnete Gipsmenge im Bauabfall für das Jahr 2006

	Boden- aushub	Straßen- aufbruch	Bau- schutt	Baustellen- abfälle	Bauabfälle auf Gipsbasis
Aufkommen [Mio t]	106	14,30	57,10	10,90	0,40
Gipsanteil [M.-%]	0	0,00	0,90	0,00	76,90
Gipsanteil [Mio t]	0	0,00	0,51	0,00	0,31
(mit Minimalwerten berechnet)					
gesamt Gips [Mio t]: 0,82					
Gipsanteil [M.-%]	0	0,00	2,80	3,60	89,90
Gipsanteil [Mio t]	0	0,00	1,60	0,39	0,36
(mit Durchschnittswerten berechnet)					
gesamt Gips [Mio t]: 2,35					
Gipsanteil [M.-%]	0	0,00	7,60	6,80	98,10
Gipsanteil [Mio t]	0	0,00	4,33	0,74	0,39
(mit Maximalwerten berechnet)					
gesamt Gips [Mio t]: 5,47					

Die Ergebnisse dieses Berechnungsansatzes ergeben im Gegensatz zu den Ergebnissen des TOP-DOWN- und des BOTTOM-UP-Ansatzes geringere Werte, wie nachfolgend

beschrieben. Die Tatsache, dass alle Ansätze auf bestimmten Annahmen und auf verschiedenen Erhebungen beruhen, erklärt diese Unterschiede. In die Abfallstatistik gehen zum Beispiel nur Meldungen von Unternehmen über 20 Mitarbeiter ein.

2.1.2 Bottom-Up-Ansatz

Anhand der stofflichen Zusammensetzung verschiedener Gebäude wurde über den Bestand von Gebäuden das Stofflager berechnet und der Abfallanfall bei Abbruch bzw. Modernisierung abgeschätzt. Voraussetzung für die Berechnung des Stofflagers wäre eine umfassende Datenbank über den Gebäudebestand und die stoffliche Zusammensetzung. Verschiedene Autoren haben zur Erfassung des Bestandes die Gebäude typisiert und einer stofflichen Zusammensetzung zugeordnet [46, 47]. Dabei weisen die Gebäude je nach Nutzung, Alter und Bauart unterschiedliche Zusammensetzungen auf. Die Datenlage ist zurzeit eher spärlich und regional begrenzt, sodass im Folgenden nur auf einzelne Beispiele zurückgegriffen wurde und diese verallgemeinert wurden.

Görg (1996) und das ITAS/ifib haben jeweils versucht, den bestehenden Gebäudebestand in sogenannte Substanzgruppen einzuteilen [42, 46]. Dabei wurden den Gebäuden in Abhängigkeit von Nutzung und Entstehungszeit typisch verwendete Baustoffe zugeordnet (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Typisierungsmerkmale des Gebäudebestandes [27]

Kriterium		ITAS/ifib	Görg
Nutzungs- klasse	Wohn- gebäude	Einfamilienhäuser	Ein- und Zweifamilienhäuser
		Reihenhäuser	Mehrfamilienhäuser
		Kleine Mehrfamilienhäuser	
		Große Mehrfamilienhäuser	
		Hochhäuser	
	Nicht- Wohn- gebäude	Büro- und Verwaltungsgebäude	Büro-, Verwaltungs- und Geschäftshäuser
		Anstaltsgebäude	Gewerbe- u. Industriebauten
		Hotels und Gaststätten	Sonderbauwerke Hochbau
		Handels- und Lagergebäude	
		Fabrik- und Werkstattbauten	
		Landwirtschaftl. Gebäude	
		Sonstige	
	Altersklasse ²⁹⁸	Vor 1870	Vor 1918
		1871-1918	
1919-1948		1918-1945	
1949-1965		1946-1955	
1966-1978		1956-1970	
1979-1990		1971-1990	
Bauart	Keine Aufgliederung nach Bauart ²⁹⁹	Massivbauart	
		Fachwerkbau	
		Skelettbauart	
		Block-/Streifenbauart	
		Plattenbau	
		Fachwerkbauart	
Sonderformen			

Die durchschnittliche Zusammensetzung der Eigenheime, die laut einer Studie des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie e.V., 2006 gebaut wurden, Tabelle 3 aufgeführt [48, 49].

Unter Berücksichtigung der Gipsgehalte der verschiedenen Baustoffe wurde der Anteil an Gips in den 2006 erbauten Eigenheimen berechnet. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen [27]:

- Zementanteil im Beton: 11-15 M.-%
- Gipsanteil im Zement: 3-6 M.-%
- Gipsanteil im Beton: 0,35-0,9 M.-%
- Gipsanteil im Anhydritestrich: 40-80 M.-%
- Gipsanteil in Gipskartonplatten: 70-90 M.-%
- Anteil Anhydritestrich an allen Estrichen: 10 M.-%
- Gipsanteil in der Bauschuttkategorie Putz/Mörtel: 15 M.-%

Daraus ergibt sich ein Gipsanteil im Rohbau für die 2006 neu gebauten Eigenheime von ca. 2,0 – 2,5 M.-% (siehe Tabelle 3). Der (potentiell) eluierbare Anteil, also der Anteil der nicht unlösbar in Zement bzw. Beton und Mauermörtel enthalten ist, beläuft sich auf ca. 1,5 - 1,7 M.-%.

Tabelle 3: Berechneter Gipsanteil für Eigenheime erbaut 2006

	spez. Baustoffverbrauch	Gipsanteil		Dichte	spez. Baustoffverbrauch	Gipsanteil	
	m ³ /1000m ³ UR	[m ³ /1000m ³ UR]		t/m ³	t/1000m ³	[t/1000m ³]	
		von	bis			von	bis
Ziegel	39,0			2,0	78,0		
Porenbeton	22,7			0,7	15,9		
Betonstein	5,6			1,2	6,7		
Ortbeton	78,0			1,5	117,0		
Betonfertigteil	18,8			0,7	13,2		
Holz	11,1			1,2	13,3		
Gipskarton	2,5	1,8	2,3	0,7	1,8	1,3	1,6
Mauermörtel	3,3	0,5	0,5	2,0	6,6	0,9	1,0
Putzmörtel	7,9	1,2	1,2	2,0	15,8	2,4	2,4
Estrich 94 m ² /1000m ³	3,8	0,2	0,3	2,0	7,5	0,4	0,6
Beton gesamt:	125,1	0,4	1,1	1,2	152,6	0,5	1,3
gesamt:	192,6	4,0	5,4		275,7	5,5	7,0
Gipsanteil:	2,1 - 2,8 Vol.-%				2,0 - 2,5 M.-%		
Eluierbarer Gipsanteil:	1,7 – 2,0 Vol.-%				1,5 - 1,7 M.-%		

Wenn die Lebensdauer eines Hauses also höher ist als die der Gipsprodukte, kann man davon ausgehen, dass die Gipsprodukte mindestens ein Mal in der Lebensdauer dieses Gebäudes ausgetauscht werden. Je nach Umfang und Häufigkeit der Baumaßnahmen kann sich der Gipsanteil, der für so ein Eigenheim verbraucht wird, vervielfachen.

Seemann verglich den Rückbau von 3 Mustergebäuden [47]. Diese wurden zuvor stofflich analysiert. Die ermittelten Daten bilden im Folgenden die Grundlage für eine Abschätzung des Gipsgehalts für diese Gebäude.

Bei dem ersten Musterhaus handelte es sich um ein 1,5-geschossiges in Massivbauweise errichtetes Wohngebäude mit einer Grundfläche von 92,75 m² und einem umbauten Raum von 650 m³. Vermutlich wurde es Ende des 19. Jahrhunderts errichtet. Die stoffliche Analyse ergab einen Gipsanteil von ca. 1 M.-% (siehe Anhang Tabelle A 1).

Das zweite Musterhaus war ein Wohngebäude in Holz-Fachwerkbauweise aus dem Jahr 1910. Es wurde auch zum Teil als Hotel mit Fremdenzimmer genutzt. Die Grundfläche

betragen 425 m² und der errechnete Bruttorauminhalt 4950 m³. Die Abschätzung des Gipsgehaltes in diesem Bauwerk ergab ca. 2 M.-% (siehe Anhang Tabelle A 2).

Das dritte in beschriebene Musterhaus war ein Gymnasium in Frankreich aus dem Jahr 1965 mit einer Grundfläche von 1775 m² und einem Bruttorauminhalt von 18000 m³ [47]. Das Gebäude wurde als Stahlbeton-Massivkonstruktion erbaut. Bei diesem Gebäude schwankt die Berechnung sogar zwischen 2,3 und 3 M.-% (siehe Anhang Tabelle A 3).

Als weiteres Beispiel wird ein von der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung begleitetes Abrissobjekt in Jena angeführt [50]. Der in den 70er Jahren erbaute Gebäudekomplex bestand aus einem Hörsaal- und einem Seminargebäude mit einer Gesamtfläche von 1020 m². Der Abriss erfolgte im Jahr 2011. Die hauptsächlich in Stahlbeton-Massivbauweise und Plattenbauweise errichteten Gebäude, wurden in den letzten 20 Jahren durch den Einbau von Gipskartonplatten auf den geforderten Brandschutzstandard gebracht. Es ist davon auszugehen, dass dies vor allem in den neuen Bundesländern eine übliche Vorgehensweise für die Modernisierung öffentlicher Gebäude war. Die Zusammenstellung der als Bauabfall anfallenden Mengen bzw. Volumina ergab für dieses Gebäude einen Gipsanteil im Rohbau von 2,7 M.-% bis 3,8 M.-% (siehe Anhang A 4).

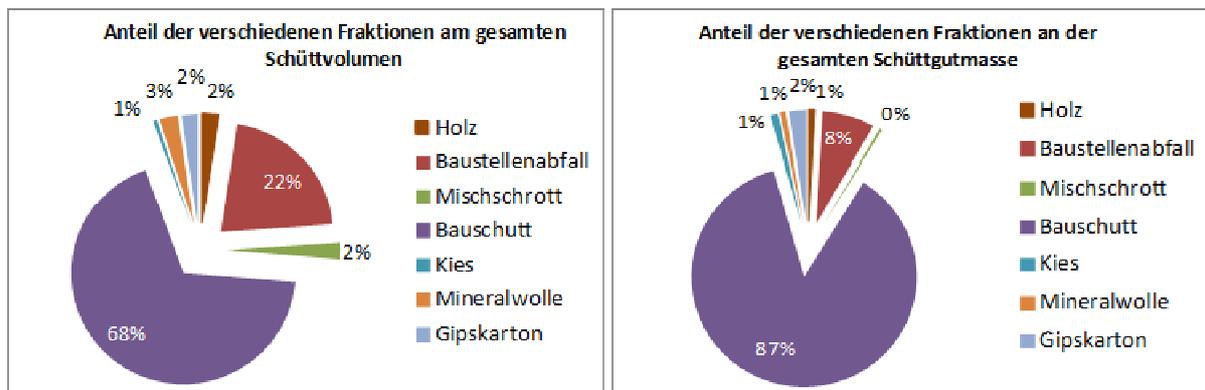


Abbildung 7: Anteil der verschiedenen Fraktionen am gesamten Schüttvolumen bzw. an der gesamten Schüttgutmasse

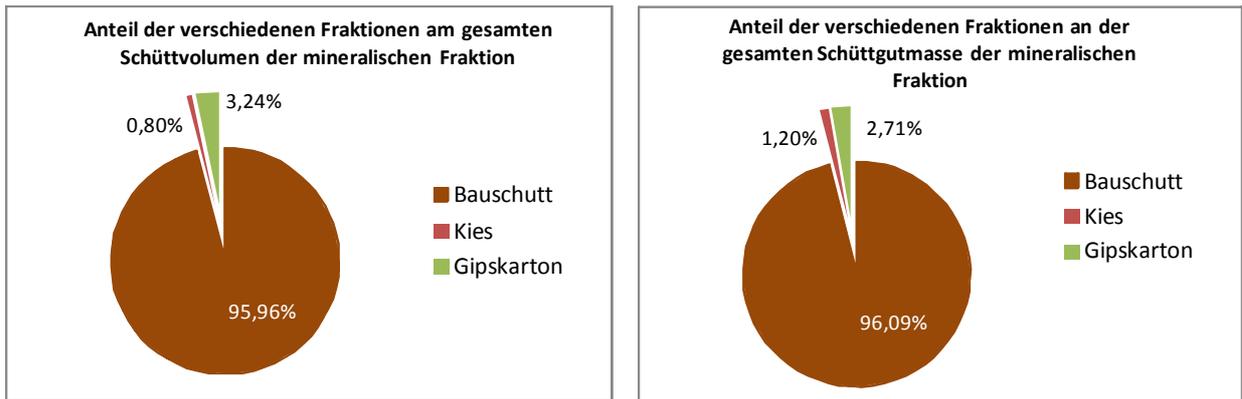


Abbildung 8: Anteil der verschiedenen Fraktionen am gesamten Schüttvolumen bzw. an der gesamten Schüttgutmasse

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die untersuchten Gebäude einen Massenanteil an Gipskarton von 1 bis zu 3,8 M.-% haben. Das bedeutet auch im Abfallstrom wird dieser Anteil vermutlich sogar als unterste Grenze zu finden sein, denn findet der Gipsabfall durch Modernisierungsmaßnahmen Berücksichtigung, wird auch der Gipsanteil im Bauschutt wachsen.

Um die Gipsmengen im Abfallstrom abzuschätzen wurden anhand der Daten eines Jahres folgende Betrachtungen durchgeführt. Auf Grund der Datenlage wurde das Jahr 2008 betrachtet.

Laut Statistischem Bundesamt betrug der Abgang an Wohnfläche aus Wohn- und Nicht-Wohngebäuden im Jahr 2008 etwa 2,6 Millionen Quadratmeter. Dagegen werden jährlich 35 Millionen Quadratmeter Wohnfläche geschaffen. Somit ist im Jahre 2008 ein Bestand von 3.462,4 Millionen Quadratmeter Wohnfläche zu verzeichnen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Daten für den Bestand sowie den jährlichen Abgang und Neubau von Wohnraum nach [51]

Jahr	Bestand [Mio m ²]	Abgang [Mio m ²]	Neubau [Mio m ²]
2008	3462,4	2,6	35

Aus Datensammlungen für Fertigteilhäuser konnte ein durchschnittlicher Verbrauch an Gipsplatten von 0,038 t/m² Wohnfläche ermittelt werden [52]. Der durchschnittliche Verbrauch an Gips im Beton wurde anhand der Datensammlung mit 0,002 t/m² Wohnfläche ermittelt. Der Anteil an Baugips in den Wohnungen setzt sich aus dem Anteil an Putz und Estrich zusam-

men und wurde eigener Schätzungen zu Folge mit 0,031 t/m² Wohnfläche angenommen. Diese Zusammensetzungen basieren auf Daten verschiedener Einfamilienhäuser in unterschiedlicher Bauweise, die vor allem Ende der Neunziger entstanden. Diese Gipsgehalte wurden als heutiger moderner Standard angenommen. Pro m² Wohnfläche sind demzufolge im Durchschnitt 0,071 Tonnen Gips verbaut. Dieser Wert korreliert sehr gut mit Werten aus der Literatur, die die gesamte Baustoffmasse im Wohnungsbau mit ca. 2,55 t/m² angeben [27]. Geht man von einem Gipsanteil von ca. 3 M.-% [27] im Bestand aus, so ergeben sich ungefähr 0,077 Tonnen Gips pro m² Wohnfläche.

Nach folgenden Berechnungsansätzen wurden die Gipsmengen für den Input und Output ermittelt:

Entstehende Gipsmenge im Output in t:

$$G_o = \cdot A + \cdot \frac{t}{T} * \frac{2}{3} B \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

Entstehende Gipsmenge im Input in t:

$$G_i = \cdot N + \cdot \frac{t}{T} * B \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

Mit: G_o [t] entstehende Gipsmenge für den Output

G_i [t] entstehende Gipsmenge für den Input

[t/m²]spezifischer Gipsanteil

B [m²] Bestand

A [m²] Abgang

N [m²] Neubau

T [a] Mittlere Lebensdauer

t=1 [a] Bezugszeitraum

Daraus ergeben sich die in Tabelle 5 berechneten Gipsmengen. Durch den Rückbau von Wohnraum wurden 0,18 Mio Tonnen Gips ausgetragen. Hinzu kommt der Austrag durch Modernisierungsmaßnahmen. Aufgrund der Altersstruktur der bestehenden Wohngebäude wurde angenommen, dass etwa 2/3 des Bestandes diesem Gipsniveau von 0,071 Tonnen Gips pro m² entsprechen. Für das andere Drittel wurden die Gipsplatten nicht in die Berechnung mit einbezogen. Geht man von verschiedenen Lebensdauern (siehe TOP-DOWN-Ansatz) der einzelnen gipshaltigen Bauteile aus, lässt sich ein Wert von 5,37 Mio. Tonnen jährlicher Gipsabfall durch Umbaumaßnahmen ermitteln. Zusammen ergibt das eine Gipsmenge im Abfallstrom von ca. 5,6 Mio. Tonnen.

Tabelle 5: Berechnung der Gipsmengen durch Neubau, Abriss und Modernisierungsmaßnahmen im Wohnungsbausektor

	spezifischer	Output durch		Input durch	
Bauelement	Gipsanteil	Rückbau	Modernisierung	Neubau	Modernisierung
	[t/m ²]	[Mio t]	[Mio t]	[Mio t]	[Mio t]
Gipsplatten	0,038	0,10	2,19	1,33	3,29
Baugips	0,031	0,08	3,07	1,05	3,07
Beton	0,002	0,01	0,11	0,07	0,11
		0,18	5,37	2,45	6,47
		gesamt Gips = 5,6 Mio t		gesamt Gips = 8,9 Mio t	

Unter der Annahme, dass alle Wohnungen auf heutiges durchschnittliches Gipsniveau modernisiert werden, erhält man einen Input in den Wohnungsbausektor von 6,47 Mio Tonnen Gips. Durch die Schaffung von neuem Wohnraum werden ca. 2,45 Mio Tonnen Gips verbraucht. Daraus ergeben sich jährlich 8,9 Mio. Tonnen Gips, die in den Wohnungsbau fließen.

Die berechnete jährliche Gipsmenge pro Quadratmeter Wohnraum entspricht einem Mittelwert. Berechnet man die Gipsmenge hingegen mit den Maximalwerten der Datensammlung ergibt sich eine dreimal höhere Gipsmenge. Unberücksichtigt bleiben in diesen Berechnungen aufgrund der mangelhaften Datenlage die Gipsmassen aus dem Nichtwohnungsbau, die jedoch zum Beispiel in Bürobauten nicht unerheblich sein können. Hier sind präzisere Modelle erforderlich.

2.1.3 Top-Down-Ansatz

Grundlage für diesen Berechnungsansatz sind Produktionsdaten für Gips und Gipsprodukte sowie Produktionsdaten anderer Baustoffe. Gips gelangt vornehmlich in Form von Gipsbauelementen, Gipskartonplatten, Baugipsen in Estrich, Putz- und Stuckgips und durch die Verwendung im Zement als Abbinderegler in die Bauwerke. Letzterer wird im Beton bei der Betonherstellung quasi „verbraucht“ und liegt dann chemisch gesehen nicht mehr als Gips vor.

Eine Gegenüberstellung der Produktionszahlen für im Hochbau verwendeten Beton mit den produzierten Mengen an Gipsbaustoffen ist in Abbildung 9 dargestellt. Sie zeigt, dass die auf die produzierte Betonmenge bezogene Gipsmenge seit Jahrzehnten zunimmt [43].

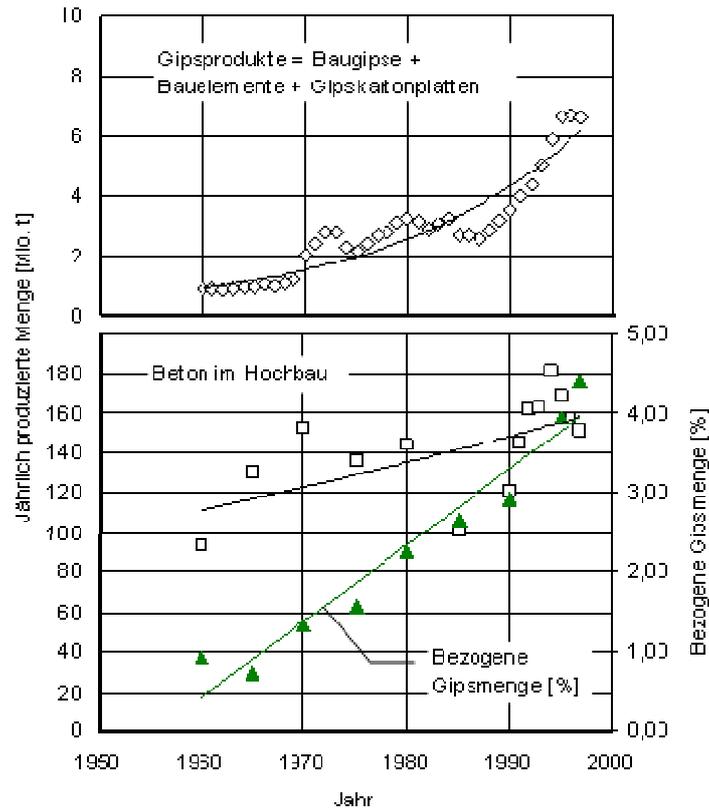


Abbildung 9: Gegenüberstellung der jährlichen Produktionsmengen von Gipsbaustoffen und Hochbaubeton [43]

Eine Studie des Bundesverbandes Baustoffe Steine und Erden e.V. zeigt den jährlichen Verbrauch an Baumaterialien im Hochbau für die Jahre 1986-1997 [53]. In Abbildung 10 ist die Zusammensetzung graphisch dargestellt. Die Werte für die Jahre 2004 und 2006 sind aus einem Datensatz des Bundesverbandes der deutschen Zementindustrie e.V. (bdz) hochgerechnet [48].

Der Anteil des Gipses an sämtlichen Baustoffen, die in den Bau pro Jahr gelangten, lag 1990 schon bei 2,9 M.-% und stieg bis 1997 auf über 3,6 M.-% an. Bis zum Jahr 2006 stieg der Gipsanteil sogar auf fast 6 M.-%. Der berechnete Gipsanteil umfasst die Baugipse, Gipselemente und den im Zement verwendeten Gips. Eventuell liegt der Anteil etwas unter dem hier berechneten, da die Gesamtheit aller Baustoffe nicht erfasst wurde.

Auch in [27] wurde der Anteil an Gips aller im Hochbau eingesetzter Baustoffe für das Jahr 2000 auf 3 M.-% geschätzt. Nach Ablauf der Lebensdauer der Gipsprodukte von 30-50 Jahren wird nach [27] auch im Abfallstrom ein Anteil von 3 M.-% zu erwarten sein. Diese Betrachtungsweise geht davon aus, dass die stoffliche Zusammensetzung als Input zeitlich versetzt der stofflichen Zusammensetzung des Outputs entspricht. Unberücksichtigt bleibt hierbei, dass die verschiedenen Bauteile auch unterschiedliche Lebensdauern haben. Um jedoch genauere Aussagen zu den Mengenströmen machen zu können, wurde ein dynamisches Lebensdauermodell gewählt.

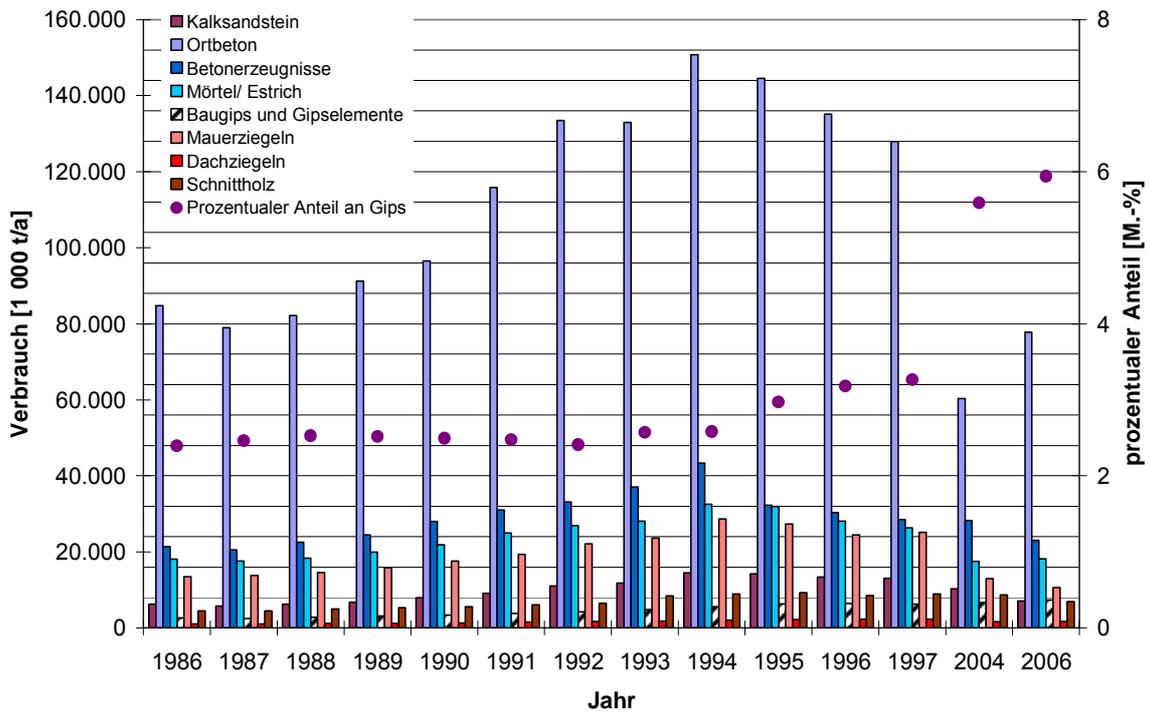


Abbildung 10: Verbrauch an Baumaterialien im Wohnungs- und Hochbau [49, 53]

In Abbildung 11 ist der Verbrauch von Gips seit 1880 im Bauwesen in Deutschland dargestellt. Zu erkennen ist ein deutlicher Anstieg des jährlichen Gipsverbrauchs.

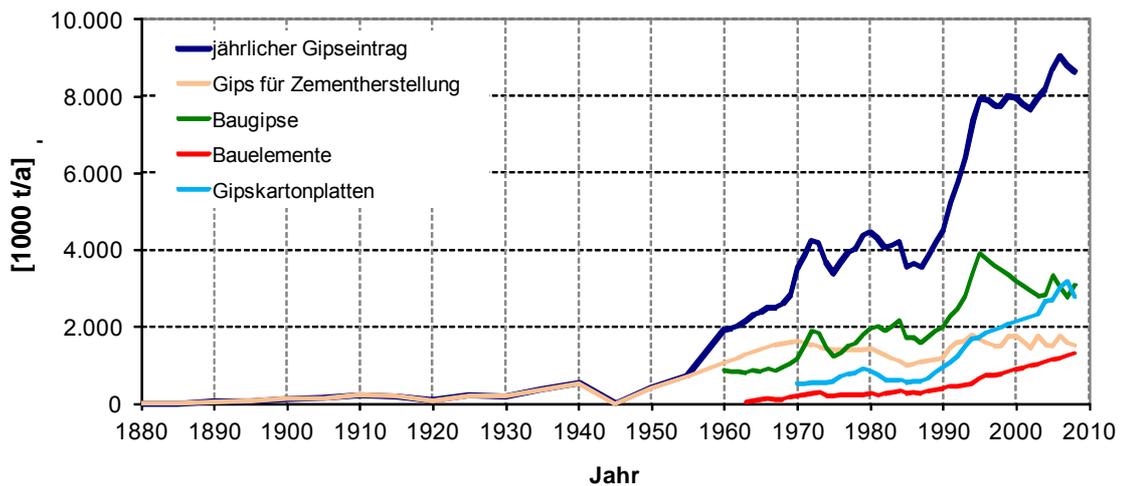


Abbildung 11: Jährlicher Verbrauch an Gips in Deutschland (bis 1997 [53], ab 2003 [51])

Zurzeit kann man den Inputstrom an Gips mit ca. 9 Mio t pro Jahr in Deutschland beziffern. Die Daten wurden aus verschiedenen Quellen entnommen und zusammengeführt [51, 53, 54]. Dabei ist zurzeit noch unklar, ob diese als Produktpalette für das Bauwesen vollständig sind. Zum Beispiel ist nicht zu erkennen, ob in dieser Statistik die Mengen an Gips für Anhydritestrich in den Daten für Baugips mit erfasst wurden. Weiterhin liegen für die Jahre vor 1960 keine Daten zur Verwendung von Gips, Gipsputz oder auch von Stuckgips vor.

Fehlende Daten wurden teilweise mittels linearer Interpolation zwischen zwei Datenpunkten oder durch Ermittlung eines Trends am Ende einer Datenreihe abgeschätzt.

Der Austrag an Gips aus dem Stofflager für die Jahre 2000, 2010, 2020 und 2030 wurde mittels eines Lebensdauermodells für die Gipsprodukte einschließlich des im Beton verbrauchten Gipsanteils prognostiziert.

Es wurde angenommen, dass der Ausfall an diesen Bauelementen weibullverteilt ist. Mittels dieser Funktion lässt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit und somit der Abfallstrom abschätzen. In Anlehnung an Annahmen zu dem Ausfallverhalten verschiedener Bauteile von Arendt wurden die in der Tabelle 6 angegebenen Weibullparameter verwendet [27]. Zur Vereinfachung der Berechnung wurden verschiedene Gipsprodukte zu den Gruppen Baugipse, Gipsplatten und sonstigen Anwendungen zusammengefasst. Diesen Gruppen wurden einheitliche Werte für die charakteristische Lebensdauer und das Weibullmodul (Streuung) zugrunde gelegt.

Tabelle 6: Mittlere Lebensdauer T und Weibullmodul α für Gipsprodukte

Gipsprodukte		Charakteristische Lebensdauer T [a]	Weibullmodul α [-]	
Baugipse		Anhydritestrich	35	6
		Gipsestrich		
		Putzmörtel		
		Gipskleber		
		Ansetzbinder		
Gipsplatten		Vollgipsplatten	40	2
		Gipsfaserplatte		
		Gipskartonplatte		
sonst. Anwendung		Zement	63	3

Für die Elemente Baugips, Gipsplatten und Zement wurden die Abbruchmassen für die oben genannten Jahre mittels Weibull-Verteilung berechnet. In Abhängigkeit von den spezifischen

Weibull-Parametern der Bauelemente und der jeweiligen Produktionsdaten wurden die jeweiligen Abbruchmassen ermittelt (Tabelle 7) und in Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 graphisch dargestellt. Für die Jahre 2005-2025 wurde eine gleichbleibende Produktion angenommen.

Die Diagramme zeigen einen deutlichen Anstieg der Gipsabbruchmassen für die nächsten Jahrzehnte. Bei der Berechnung des Gipsaustrages wurde vereinfacht angenommen, dass der Gipsanteil in den Gipsplatten und im Baugips ca. 100 M.-% sind. Der Gipsanteil im Zement wurde auf 5,5 M.-% geschätzt.

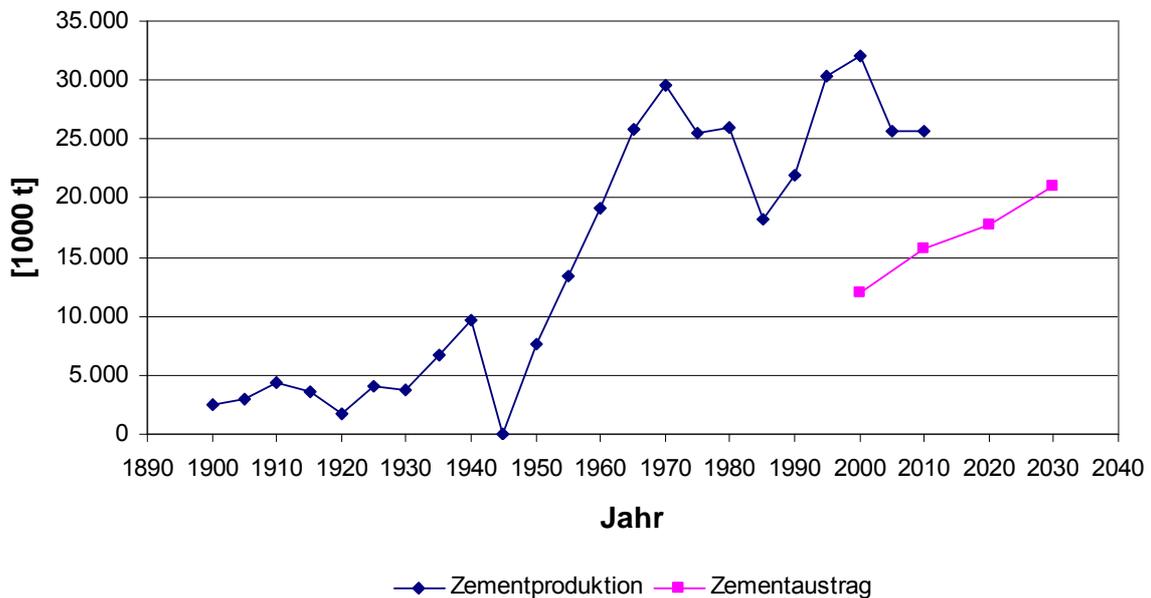


Abbildung 12: Schätzung des im Bauschutt gebundenen Zementes mittels Lebensdauermodell für die Jahre 2000-2030

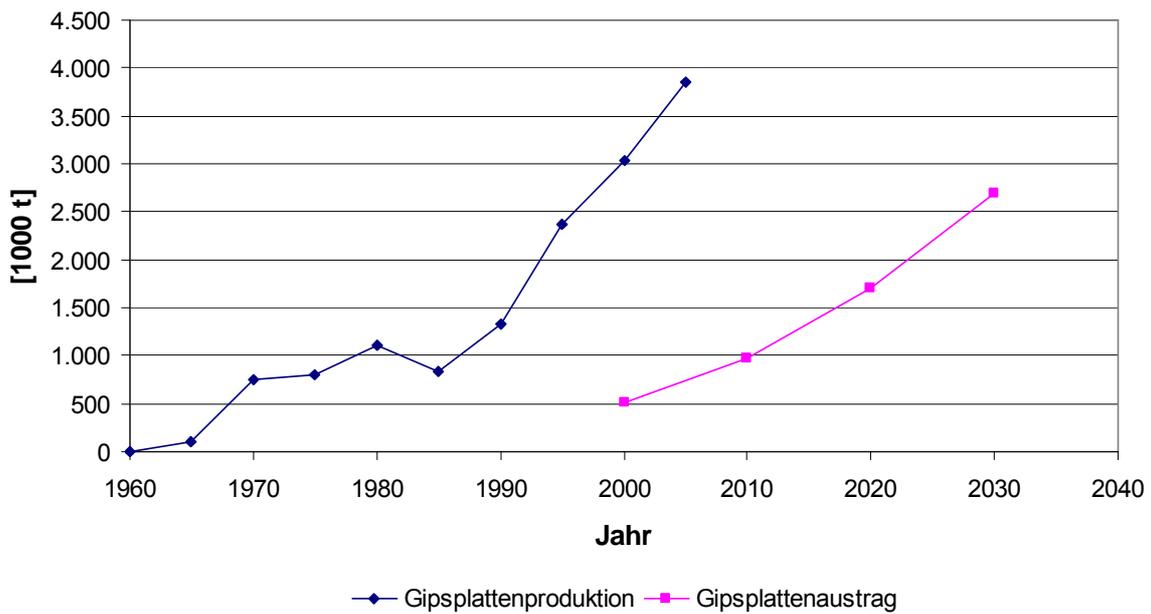


Abbildung 13: Schätzung des Gipsplattenaustrages mittels Lebensdauermodells für die Jahre 2000-2030

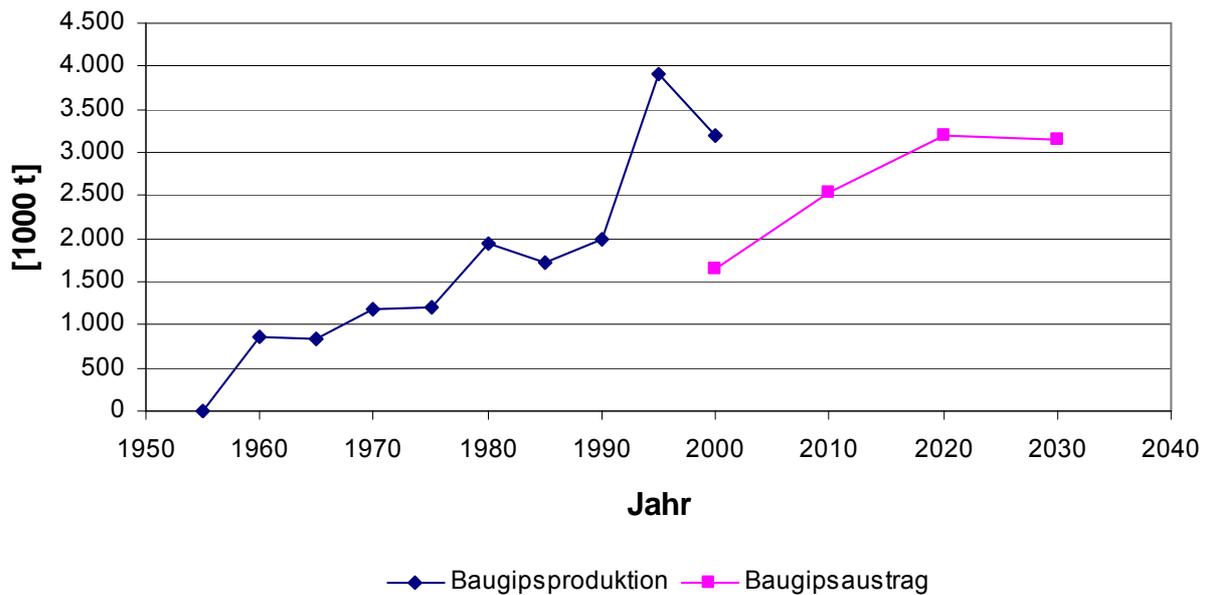


Abbildung 14: Schätzung des Baugipsaustrages mittels Lebensdauermodells für die Jahre 2000-2030

Daraus ergibt sich ein Gipsaufkommen im Abfallstrom für das Jahr 2010 von 4,4 Mio Tonnen, das sich bis zum Jahr 2020 auf ca. 5,9 Mio Tonnen erhöht. Als Prognosewert für das Jahr 2030 ergeben sich insgesamt sogar 7 Mio Tonnen Gips im Bauschutt. Die Gipsabfall-

menge wird sich demnach in den nächsten 20 Jahren fast verdoppeln, wenn die Produktion an Baugips, Gipsplatten und Zement gleich bleibt (Abbildung 15).

In dem berechneten Gipsaufkommen ist neben dem Aufkommen an Baugipsen und Gipsplatten auch der im Beton verbaute gipshaltige Zement enthalten. Für die Betrachtungen des Gipses im RC-Material muss folgendes unterschieden werden. Der im Beton als Abbinderegler eingebrachte Gips gilt als chemisch fest gebunden. Er wurde in die Betrachtungen mit einbezogen, um den gesamten Stofffluss für Gips dokumentieren zu können. Als Störstoff im Recyclingmaterial kann er unberücksichtigt bleiben. Problematisch dagegen sind die Baugipse und Gipsplatten im Abfallstrom. Einerseits können sie einen Sulfateintrag in das Grundwasser verursachen. Andererseits kann unter Anwesenheit von Wasser und weiteren Reaktionspartnern Ettringit und Thaumasit entstehen, was zur Volumenvergrößerung (Sulfattreiben) führt und deshalb den Wiedereinsatz von Bauabfällen mit hohem Gipsgehalt als RC-Material erschwert bzw. unmöglich macht.

Tabelle 7: Berechnung des Gipsaustrages für 2000 bis 2030

1000t	Zement	Gips 5,5%	Gipsplatten	Baugips	gesamt
Austrag 2000	12029	662	513	1653	≈ 2,8 Mio t
Austrag 2010	15703	864	970	2534	≈ 4,4 Mio t
Austrag 2020	17710	974	1712	3207	≈ 5,9 Mio t
Austrag 2030	21071	1159	2698	3157	≈ 7,0 Mio t

Abbildung 15 zeigt, dass der Austrag an Baugipsen den größten Anteil am Gipsmassenstrom ausmacht. Das könnte unter anderem an der relativ kurzen Lebensdauer liegen und daran, dass der Anteil an Gipsplatten erst in den letzten Jahrzehnten einen enormen Anstieg im Einbau erfuhr. Das Diagramm zeigt darüber hinaus, dass die Gipsplatten einen wesentlichen Anteil am Anstieg der Gipsabfallmenge haben. Der Austrag von im Beton chemisch gebundenem Gips steigt ebenfalls, aber im Vergleich zu Baugips und Gipsplatten ist der Anstieg eher gering.

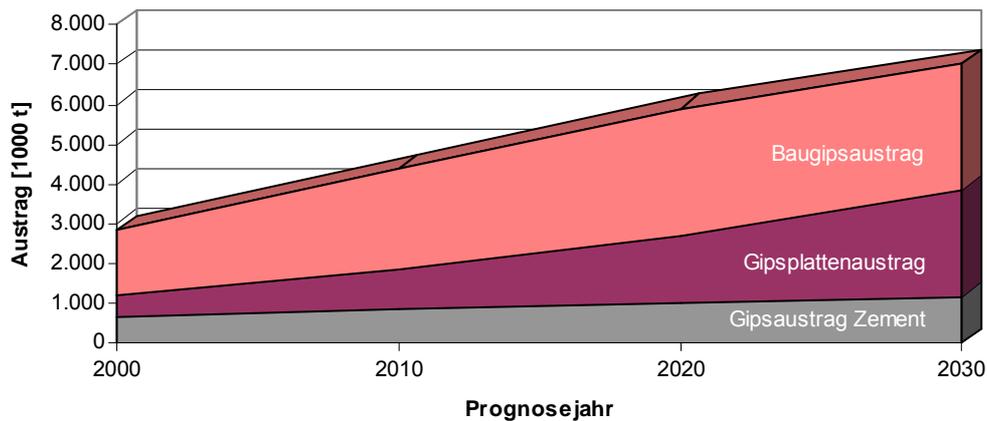


Abbildung 15: Graphische Darstellung des Gipsaustrages für die Jahre 2000 bis 2030

2.1.4 Gipsaufkommen - Zusammenfassung

Aus den Berechnungen in den Kap. 2.1.1 bis 2.1.3 ergibt sich der im Folgenden beschriebene Stofffluss für den Baustoff Gips (Abbildung 16). Zurzeit gelangen jährlich fast 9 Mio. Tonnen Gips in Form von Baugips, Gipsbauelementen und als im Beton stofflich gebundener Gips in den Bau. Als Output aus dem Stofflager Bauwerk wurden 4,4 Mio Tonnen pro Jahr mittels TOP-DOWN-Ansatz und 5,6 Mio Tonnen mittels BOTTOM-UP-Ansatz ermittelt. Diese Werte liegen relativ nahe beieinander, wobei der BOTTOM-UP-Ansatz nur den Wohnungsbau berücksichtigt. Die Ergebnisse des OUTPUT-Ansatzes liegen zwischen 0,8 und 5,5 Mio Tonnen und ergeben damit den geringsten Gipsoutput.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Ansätzen sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Zum einen basieren alle drei Ansätze auf völlig voneinander unabhängigen Erhebungen. Trotz dieser Unterschiede zeigen diese Zahlen, dass der Verbrauch an Gips im Bau erheblich ist – Tendenz steigend. Die vorerst beschriebene Prognose über das Lebensdauermodell weist auf einen deutlichen Anstieg des Gipsaustrages für die nächsten Jahre hin. Der prozentuale Anteil an Gips in den Bauabfällen wird in den nächsten Jahren massiv zunehmen und somit die Aufbereitung von hochwertigem Betonrecyclingmaterial stark beeinflussen. Das Ausgangsmaterial wird bei konventionellen Rückbauverfahren erhöhte Sulfatwerte aufweisen. Daher sollte verstärkt schon beim Rückbau von Gebäuden auf einen selektiven Rückbau zur Separierung der Gipsbaustoffe geachtet werden sollte. Des Weiteren sollten Aufbereitungstechniken so weiterentwickelt werden, dass Fremdstoffbelastungen im Ausgangsmaterial weitestgehend eliminiert werden können.

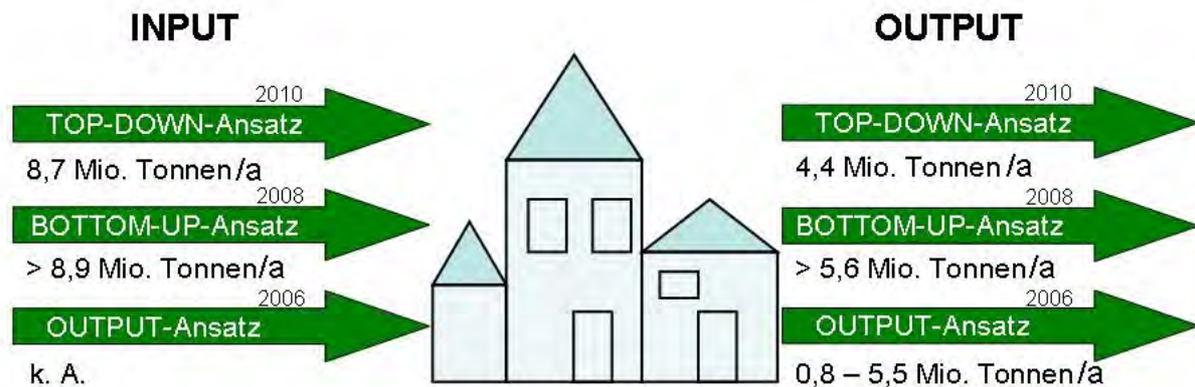


Abbildung 16: Input- und Outputmassen an Gips in das Bauwesen der Bundesrepublik Deutschland

Die Ausführungen der vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass die Abschätzung des im Bauschutt enthaltenen Gipsanteils sowie die Berechnung des Sulfatgehalts mit den beschriebenen Verfahren nur vergleichsweise mit Unsicherheiten erfolgen können. Um die Aussagen zu festigen und plausibel machen zu können, wird auf weitere Quellen zurückgegriffen. In Tabelle A 5 im Anhang sind beispielhaft Daten zu Gips- und Sulfatgehalten in realen Bauschuttgemischen aus einer Veröffentlichung von Görg aufgeführt [42]. Die Ergebnisse der Messungen des Sulfatgehaltes in Eluaten von 46 Proben RC-Körnungen aus Bauschutt finden sich in Tabelle A 7 im Anhang. Die untersuchten Proben entstammen 27 verschiedenen Bauschuttzubereitungsanlagen in Baden Württemberg [55].

2.2 Flächenverbrauch bei der Kies- und Sandgewinnung

Die Rohstoffsituation mineralischer Baustoffe ist in ökonomischer Hinsicht eine weitere wichtige Rahmenbedingung für die Kreislauflührung von Baustoffen und das damit verbundene Recycling von Baurestmassen. Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung des Bauschuttrecycling ist neben der Schonung der Ressourcen Kies und Sand auch der durch die Reduzierung des Abbaus von Kies und Sand verringerte Flächenverbrauch.

Schon in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde von der zunehmenden Schwierigkeit Flächen für die Nutzung zum Kies- oder Sandabbau auszuweisen berichtet [56]. Neben grundsätzlichen Bedenken in Hinblick auf umweltrelevante Aspekte des Eingriffs in naturbelassene Flächen steht auch das Interesse an anderen Flächennutzungsarten, wie z.B. Freizeitwirtschaft, Landwirtschaftsnutzung oder auch industrieller und kommunaler Bebauung in Konkurrenz zum Verbrauch natürlicher Ressourcen. Unter Berücksichtigung der im Rahmen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie [1, 2] angestrebten Reduzierung des Flächenverbrauchs in Deutschland ist mit einer zunehmenden Beschränkung der Nutzbarmachung von

Abbauf Flächen für die Kies- und Sandgewinnung zu rechnen. Auch in diesem Zusammenhang wird das Recycling von Baurestmassen stärker an Bedeutung gewinnen.

Obwohl der Flächenverbrauch für die Gewinnung von Bausand und Baukies bereits von 1997 bis 2001 von 13,870 km² auf 12,007 km² um knapp 15 % reduziert wurde (und in diesem Zusammenhang dürften auch konjunkturelle Einflüsse eine Rolle gespielt haben), besteht an dieser Stelle noch ein großes Einsparpotential durch die Nutzung von Sekundärbaustoffen [57].

2.3 Abbruch- und Rückbautechniken

2.3.1 Einführung

Abbruch- bzw. Rückbauarbeiten bilden die Grundlage für die Beräumung bzw. Neunutzung von vormals bebauten Flächen. Sie sind oftmals der erste Schritt im Umgang mit Bauabfällen: an dieser Stelle entscheidet sich vielfach ob die Baurestmassen einer – möglichst hochwertigen – Verwertung zugeführt werden können, oder ob die Materialien einer Beseitigung zugeführt werden müssen. Gesetzliche Vorgaben wie das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW/-AbfG) und steigende Kosten für die Entsorgung von Abfällen führen zu einer Steigerung der Wiederverwertungsquoten in unterschiedlichen Wirtschaftszweigen und beeinflussen auch nachhaltig das Abbruchgeschehen. Gegenüber konventionellen Abbrucharten gewinnen deshalb die Techniken an Bedeutung, mit denen Stoffströme getrennt erfasst werden können. Hierzu zählen Techniken des selektiven oder kontrollierten Rückbaus, Demontagetechniken sowie der verwendungsorientierte Rückbau.

Die Eignung von aufbereitetem Bauschutt als rezyklierte Gesteinskörnung wird maßgeblich durch den Grad an Inhomogenität bzw. durch mögliche Verunreinigungen des Materials bestimmt. Beim Abbruch oder Rückbau von Gebäuden sind sowohl die Auswahl des Abbruchverfahrens als auch die Festlegung der Vorgehensweise entscheidend [58]. Bereits Planer und ausschreibende Stellen von Rückbaumaßnahmen sind angehalten, sich Gedanken über die anfallenden Restmassen zu machen [59].

Zu beachten ist, dass der Aufwand für den Rückbau sowie für die Sortierung und die Aufbereitung in Wechselwirkung stehen. Ausschlaggebend ist dabei die Bilanzierung der gesamten Maßnahme. Einflussgrößen können nicht nur die Randbedingungen der Abbruchmaßnahme (z.B. Zeitrahmen und Platzverhältnisse), sondern auch beispielsweise die Entfernung zu einer Bauschutttaufbereitungsanlage oder Deponie sein [58]. In Abhängigkeit von der Größe des abzubrechenden Bauwerks sowie der anstehenden Aufgabe kommen bei einem Rückbau verschiedene Verfahren zur Anwendung und es werden entsprechend unterschiedliche Maschinen und Geräte eingesetzt. Hierbei werden die einzelnen Abbruchverfahren in der Regel miteinander kombiniert. In Abbruchgenehmigungen sind die durchzuführenden Maßnahmen zu beschreiben.

2.3.2 Vorbereitende Maßnahmen

Die Entscheidung zur Wahl eines Abbruchverfahrens richtet sich nach unterschiedlichen Kriterien:

- örtliche Gegebenheiten (Lage, Umgebung, Untergrund des Abbruchobjekts etc.),
- Art des Abbruchobjektes (Bauweise, Baustoffe, Standsicherheit etc.) und
- Abbruchvolumen (Umbau-, Teil-, Totalabbruch, Gebäudetyp und Geräteauswahl).

Zudem sollte vor dem Hintergrund der Anforderungen an einen umweltgerechten Abbruch/Rückbau die technische Vorgehensweise in Hinblick auf

- Umweltverträglichkeit und
- Sortenreinheit der erzeugten Stoffströme

optimiert werden.

Vor Beginn der Rückbaumaßnahme sollten die relevanten, die Durchführung des Rückbaus beeinflussenden Aspekte erfasst und in der Planung berücksichtigt werden. Die Planung des Rückbaus sollte durch entsprechende Fachleute erfolgen, welche die Vorgehensweise, einzusetzende Verfahren, Arbeitssicherheits- und Umweltschutzmaßnahmen festlegen. Im Rahmen der Planungsarbeiten erfolgt auch die Festlegung der Vorgehensweise: neben selektiven oder konventionellen Techniken gibt es auch die Möglichkeit einen teilselektiven Rückbau durchzuführen. Bereits in der Planungs- und Ausschreibungsphase kann somit über die späteren Verwertungs- und Entsorgungswege entschieden werden [59]. Zudem ist die Planung die Grundlage für die Kostenermittlung.

Im Zusammenhang mit der Planung einer Rückbaumaßnahme muss auf die Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen geachtet werden. Die grundlegende Norm für die Durchführung von Abbruch- und Rückbauarbeiten ist die ATV DIN 18459 [60]. Als Teil der VOB (Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen), Teil C: „Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen“ darstellt, sind in dieser DIN Norm Planung, Ausschreibung, Durchführung und Abrechnung von Abbruch- und Rückbauarbeiten geregelt. Dies betrifft u.a. Total- und Teilabbrüche, Arbeiten im Bestand, Modernisierungen, Umbauten und Erneuerungen. Weitere relevante Normen für die Abbruch- und Rückbaupraxis sind:

- DIN 18007 - Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche. Es werden u.a. die Begriffe, Verfahren und Anwendungsbereiche für den Abbruch von baulichen und technischen Anlagen geregelt [61] und
- DIN 18299 - Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeglicher Art [62].

Zusätzlich können in Zusammenhang mit Rück-, Um- und Neubaumaßnahmen auch die Rechts- und Regelungsbereiche von Bau- Abfall-, Arbeitsschutz-, Wasser-, Bodenschutz-,

Gefahrstoff-, Immissionsschutz- und Naturschutzrecht betroffen sein. Diese rechtlichen Regelungen können EU-Bestimmungen, Regelungen des Bundes, der Länder und der Kommunen umfassen.

Aufgrund ihrer Komplexität ist sorgfältige Planung von Abbruchmaßnahmen – ebenso wie von anderen Bauvorhaben – von besonderer Bedeutung. Störungen des Ablaufes, hervorgerufen durch Unfälle, Stillstände, Planungsdefizite oder Abstimmungsmängel zwischen den Beteiligten führen zwangsläufig zu Zeitverlusten und damit zu Mehrkosten. Aus diesem Grund nimmt die Planungsphase eines Vorhabens auch die Schlüsselrolle im Gesamtprozess ein. Die Ausführungs- und Rückbauphase kann nur so gut sein wie deren Planung und Organisation [63].

2.3.3 Begriffsbestimmungen

Gemäß den Regelungen in DIN 18007 [61] wird unter Abbruch „die Beseitigung der konstruktiven Elemente der technischen und/oder baulichen Anlagen oder deren Teilen mit Zerstörung der Funktionalität, teilweise oder vollständig, konventionell oder selektiv“ verstanden.

Der Begriff Rückbau kann übergeordnet verwendet werden: hierunter können sowohl konventionelle Abbrüche und als auch selektive Maßnahmen eingeordnet werden. Ein Rückbau kann alle Maßnahmen zur teilweisen oder vollständigen Beseitigung von Bausubstanz umfassen. Beim konventionellen Abbruch werden Hoch- und/oder Tiefbauten ohne aufwändige Vorarbeiten zur Entkernung oder Separierung einzelner Abfallströme zerkleinert und in transportable Bestandteile zerlegt. Es fällt ein heterogenes Gemisch aller Baustoffe an, das im Anschluss in der Regel einer Sortieranlage zugeführt werden muss [63].

Beim selektiven Rückbau wird ein zuvor mittels Entrümpelung und Demontage von installierten Anlagen oder Anlagenteilen geräumtes Gebäude oder Bauteil in Abhängigkeit von seiner Konstruktion und baustofflichen Zusammensetzung demontiert. Alle Bau-, Konstruktions- und Ausrüstungsteile werden nach ihrer Funktion oder Materialzusammensetzung und unter Berücksichtigung des sortenreinen Erfassens und Entsorgens des Abbruchmaterials zurückgebaut [64]. Hauptzweck eines selektiven Rückbaus ist die Wiederverwertung von Bauteilen sowie die sortenreine Verwertung und Beseitigung der Abfallfraktionen. Durch die sorgfältige Getrennthaltung von wiederverwertbaren Reststoffen und die Abtrennung von Abfällen bereits während des Abbruchs werden die Verwertungsmöglichkeiten der Stoffströme verbessert. Eine nachträgliche Sortierung von Baustoffgemischen verringert in der Regel die Verwertungsmöglichkeiten für die einzelnen Fraktionen [59].

Der teilselektive Rückbau beinhaltet eine vorhergehende, zumindest teilweise Vorbehandlung eines Gebäudes in Form einer Entkernung und Entfernung von einzelnen Abfallfraktionen. Auch beim teilselektiven Rückbau ist es ein wichtiges Ziel, eine Vermischung der anfallenden Abfallfraktionen zu vermeiden [63]. Die Grenzen zum selektiven Rückbau sind dabei fließend.

Die beim Rückbau gewonnenen Stoffströme sollten – je nach Fraktion und Sortenreinheit – möglichst hochwertig wiederverwertet werden. In Zusammenhang mit der Herstellung von RC-Baustoffen lassen sich bezugnehmend auf die jeweilige Verfahrensstufe unterschiedliche Begriffsbestimmungen ableiten. Diese werden nachfolgend in Abbildung 17 (nach Eibl und Walther [7]) definiert:

Während der durch den Abbruch von Betonbauwerken oder Betonbauteilen im Hochbau gewonnene Bauschutt als Altbeton oder Betonabbruch (-material) bezeichnet wird, wird der Aufbruch von Betondecken im Straßenbau (Straßenabruch) als Betonaufbruch bezeichnet. Gesteinskörnungen (früher Zuschläge), die aus aufbereiteten, wiederverwertbaren Materialien, wie z.B. Beton und Ziegel, bestehen, werden als rezyklierte Gesteinskörnungen (RC-Gesteinskörnungen) bezeichnet. Während natürliche Gesteinskörnungen auch als Primärrohstoffe definiert werden, sind aus Abbruchmaterial (Altbetonsplitt, Altbetonbrechsand, Bauschuttsplitt, Bauschuttbrechsand) gewonnene Gesteinskörnungen als Sekundärrohstoffe zu bezeichnen.

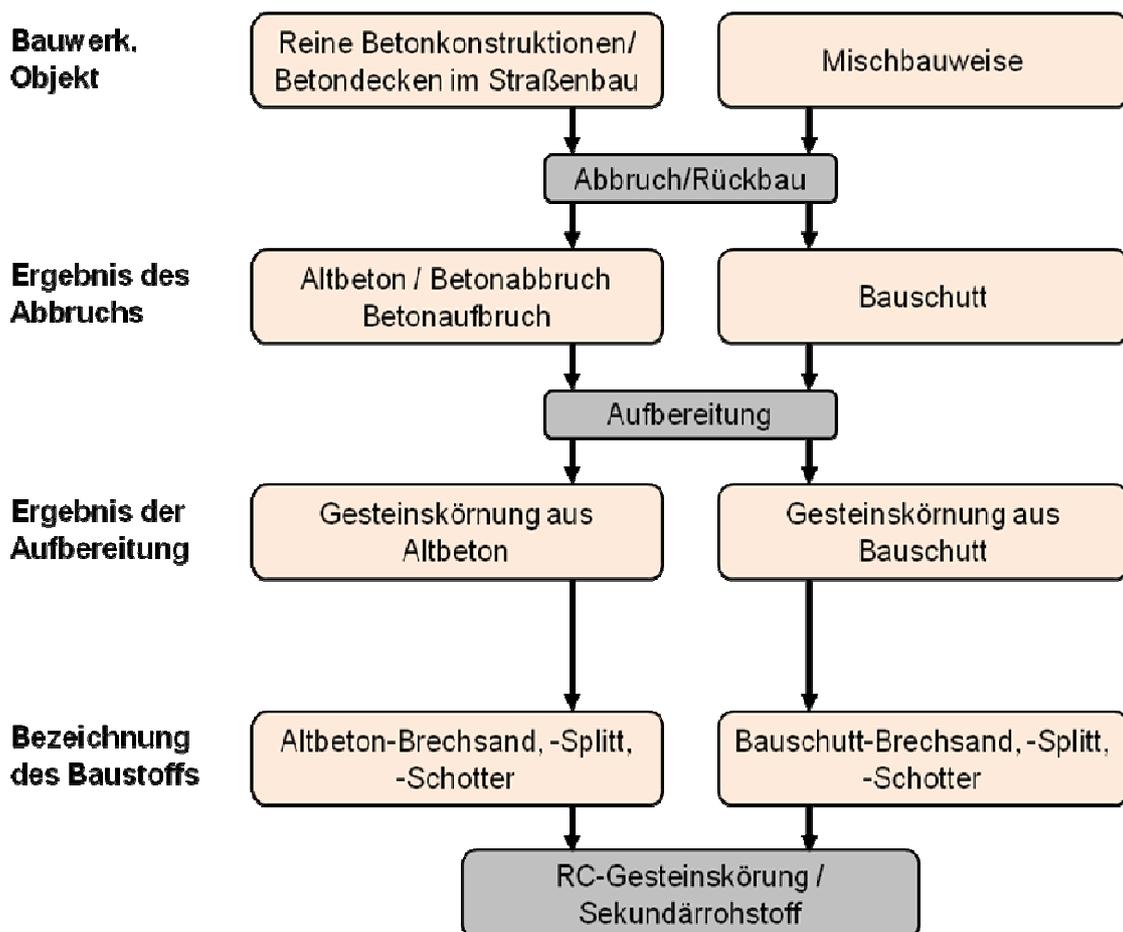


Abbildung 17: Begriffsbestimmungen bei der RC-Baustoff-Herstellung

Als Bauabfälle bzw. Baureststoffe oder Baurestmassen sind Bezeichnungen sowohl für Bauschutt, Baustellenabfälle, Bodenaushub als auch für Straßenaufbruch. Unter dem Begriff Bauschutt werden sämtliche mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, wie Beton, Mauerwerk, Mörtel und Steine zusammengefasst. Nichtmineralische Reststoffe von Bauhilfsarbeiten, Baustoffen bzw. Bauzubehör sowie nicht mineralische Baubestandteile von Umbau- und Abbrucharbeiten werden mit der Ausnahme von schadstoffbelasteten Baubestandteilen als Baustellenabfälle bezeichnet. Dies können gemäß Abbildung 18 beispielsweise Kunststoffe, Holz, Metalle oder Farben sein [65].

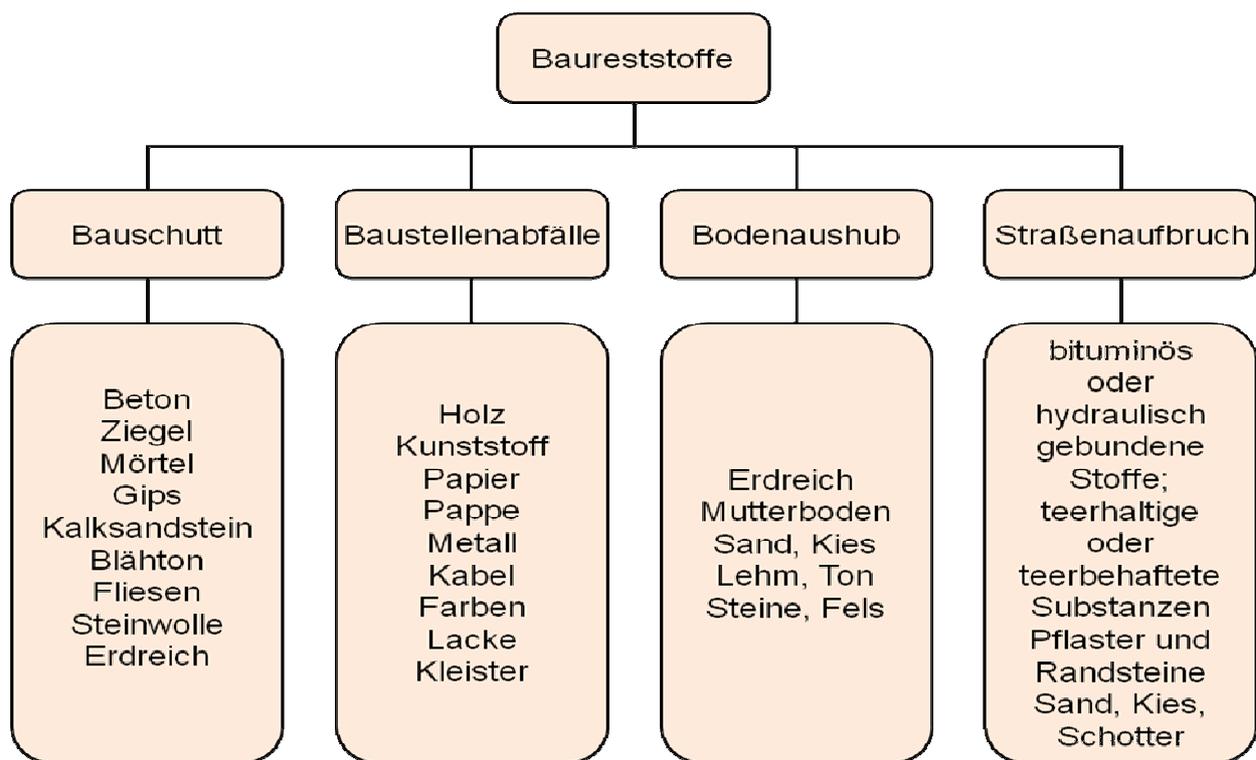


Abbildung 18: Baureststoffe

Während mineralische Stoffe aus nicht verunreinigtem Erd- oder Felsmaterial (z.B. Sand, Lehm, Ton, und Steine) als Bodenaushub definiert sind, gelten Gemische aus dem Fahrbahnaufbau, teerhaltige oder teerbehandelte Substanzen, Randbefestigungen sowie mineralischer Fahrbahnunterbau als Straßenaufbruch [7].

Als Baustoffrecycling oder Bauschuttrecycling werden Verfahren bezeichnet, bei denen ein neuer Baustoff aus Bauschutt gewonnen wird. Technisch kommen hierbei Anlagen zur Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung zum Einsatz [65]. Der Baustoffkreislauf bezeichnet die mehrfache Rückführung eines Baustoffes auf möglichst gleichem Qualitätsniveau. Ziel ist es, den in Abbildung 19 dargestellten Kreislauf für die nach Abbruch eines Gebäudes wieder als Sekundärrohstoffe zur Verfügung stehenden Baustoffe umzusetzen [7]. Dies würde

bedeuten, dass Primärbaustoffe – ggf. über eine Phase der Weiterverarbeitung – zunächst in ein Gebäude oder Bauwerk eingebaut werden. Im Laufe der Nutzungsphase führen evtl. Nutzungsänderungen des Gebäudes zu dessen Umbau, bis dieses schließlich mit Nutzungsende abgebrochen wird. Je nach Wahl des Abbruchvorgehens – konventionell oder selektiv – können die mineralischen Fraktionen entweder über den Umweg einer Sortieranlage bzw. direkt einer Recyclinganlage zugeführt werden. Nach der Aufbereitung werden die so gewonnenen Sekundärbaustoffe ggf. mit vorgelagerter Veredelungsphase wieder in den Gebäudeentstehungsprozess eingegliedert [7].

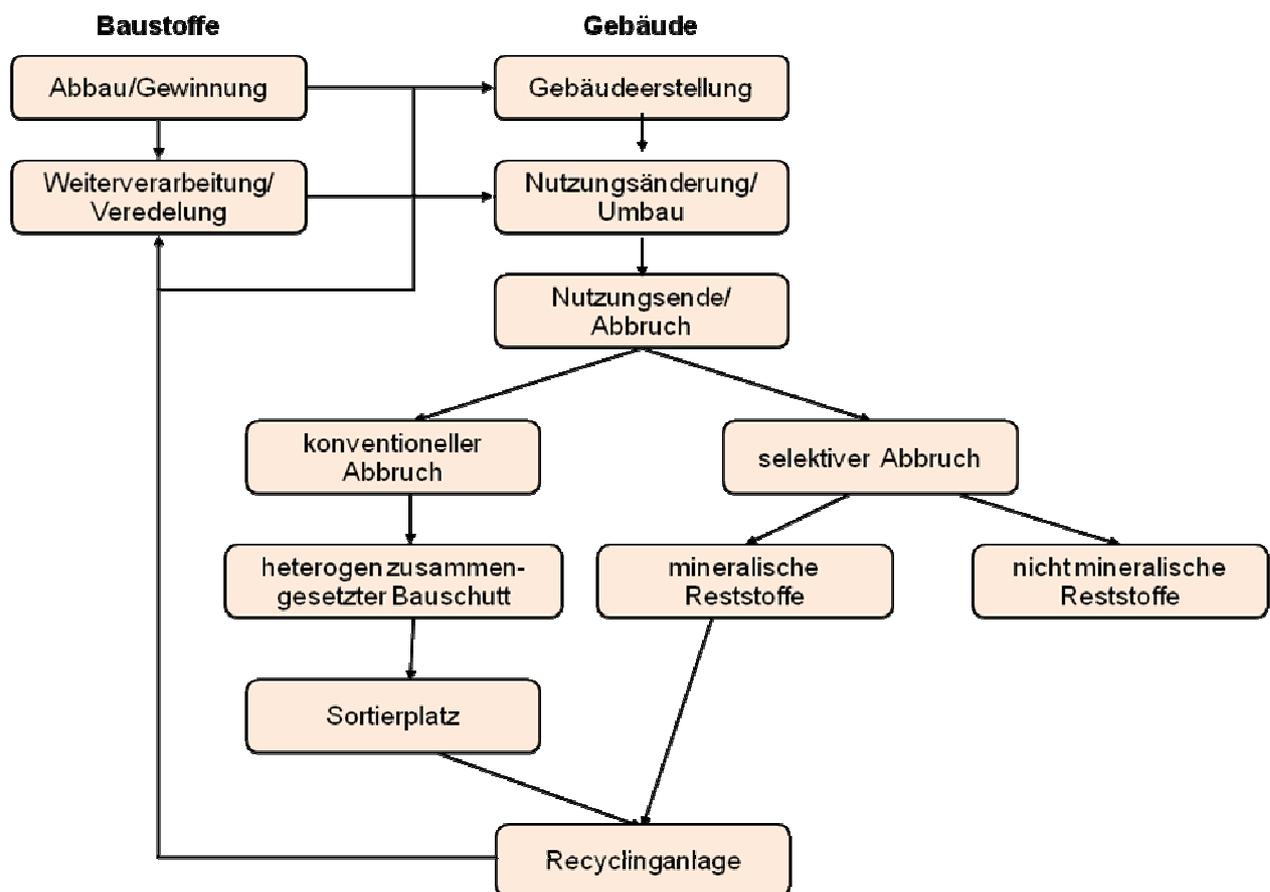


Abbildung 19: Grundstruktur eines Baustoffkreislaufs

2.4 Abbruch/Rückbau von Gebäuden

Beim Abbruch oder Rückbau von Gebäuden oder Hochbauten werden andere Techniken eingesetzt als beim Abbruch von Verkehrsflächen. Diese werden in der Regel entweder abgeschält bzw. abgefräst oder unter Nutzung von beispielsweise Fallgewichten aufgebrochen [66]. Demgegenüber stehen für den Abbruch von Hochbauten eine Vielzahl von Techniken zur Verfügung, die nachfolgend näher erläutert werden.

2.4.1 Mechanische Abbruchverfahren

Mechanische Abbruchtechniken sind die am häufigsten angewandten Verfahren. Sie basieren auf dem Prinzip Momente-, Zug- und Scherspannungen zu erzeugen und so mittels kinetischer Energie ein Bauwerk oder Bauwerksteile zu zerstören. Mechanische Verfahren lassen sich in das Abbrechen von Baustoffen mit handgeführten Werkzeugen oder mit Werkzeugen an Trägergeräten unterteilen. Im Vergleich zu maschinellen Verfahren unter Nutzung von Großgeräten ist die Nutzung von handgeführten Werkzeugen langsamer und kostenintensiver, jedoch kann bereichsweise genauer gearbeitet werden. Daher können handgeführte Abbruchtechniken auch zum kontrollierten Rückbau einzelner Bauteil oder Bauelemente eingesetzt werden.

Für die maschinellen Verfahren wird das Abbruchwerkzeug an ein Grundgerät oder Trägergerät montiert bzw. es werden Spezialgeräte verwendet. Als Trägergeräte werden in der Regel Hydraulikbagger oder Seilbagger eingesetzt, an die, in Abhängigkeit von dem geplanten Einsatz, unterschiedliche Anbaugeräte wie z.B. Abbruchhämmer, Abbruchzangen, Fräsen, Sägen oder Bohrer montiert werden können. Aufgrund der Flexibilität und Leistungsfähigkeit hat sich die Kombination von Hydraulikbagger und Abbruchwerkzeugen durchgesetzt (siehe Abbildung 20 [67]). Zu beachten sind ausreichender Platz für das Trägergerät, die Gewährleistung von Sicherheitsabständen sowie die Absicherung des Gefahrenbereichs [61, 66, 68]. In Abhängigkeit von der eingesetzten Technik und der jeweiligen Verfahrensweise werden die mechanischen Abbruchverfahren noch in verschiedene Techniken unterteilt.



Abbildung 20: Hydraulikbagger mit hydraulisch drehbarer Abbruchzange (Betonbacken)

Unter **Abtragen** versteht man das flächige Entfernen von Schichten. Das Abtragen kann sowohl von Hand, als auch mit Kompressor oder Bagger erfolgen und ist sowohl für den Abtrag von Mauerwerk als auch für Beton geeignet. Zum Abtragen können unterschiedliche Werkzeuge bzw. Anbaugeräte eingesetzt werden, die gebräuchlichsten sind Abbruchhämmer in unterschiedlichen Ausführungen. Die Arbeitsweise des Abtragens wird beispielsweise dann gewählt, wenn andere Verfahren für die örtlichen Verhältnisse (Verkehrswege oder angrenzende Bebauung) aufgrund von möglichen Erschütterungen nicht angewendet werden können. Abtragen kann auch als vorbereitende Maßnahme ausgeführt werden, bevor andere Abbruchverfahren zur Anwendung kommen. Dazu gehört auch das Lösen einzelner Bauteile [69, 70].

Als Einzeltechniken werden auch **Schlagen, Hämmern und Stemmen** als Methoden des Abtragens eingesetzt. Mit unterschiedlichen Werkzeugen wird ein schichtweiser Abbruch von Mauerwerk, Beton, Stahlbeton, Holz und anderen Baustoffen mit hand- oder maschinengeführtem Werkzeug durchgeführt. Das Zerkleinern bzw. Lösen von einzelnen Bauteilen erfolgt mittels Meißeln, die elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch vorgetrieben werden. Für den handgeführten Abbruch kommen Hydraulik- oder Druckluftschlämmer mit Spitz-, Flach- oder Keilmeißeln zum Einsatz, die wirkungsvoll beim Abbruch von Baustoffen mit geringer Festigkeit sowie geringem Bewehrungsgrad sind. Für den maschinellen Abbruch werden schwere Abbruchhämmer oder Meißel an Trägergeräten verwendet, die für den Rückbau von Beton- und Stahlbetonbauteilen eingesetzt werden.

Diese Art des Abbruchverfahrens kann entweder als eigenes Abbruchverfahren oder als vorbereitendes Verfahren für die Anwendung anderer Technologien bzw. im Falle von drohenden Gefährdungen oder Beschädigungen angrenzender Bebauung geplant werden. Es handelt sich hierbei um ein kontrolliertes Abbruchverfahren, bei dem die Größe der Schuttteile bestimmbar ist und ein geordneter Abtransport erfolgen kann. Da das notwendige Gerät bei vielen Unternehmen der Bauindustrie zur Verfügung steht, ist in der Abbruchpraxis weit verbreitet [66].

Neben mittleren Belastungen durch Staub treten beim Abbruch mittels Schlagen, Hämmern oder Stemmen starke Belastungen durch Lärm und Erschütterungen auf. Die Leistungsfähigkeit dieses Abbruchverfahrens variiert mit dem abzubrechenden Material. Für einen unbewehrten Beton können Abbruchmengen von 40 – 80 m³/h erzielt werden, wohingegen ein Stahlbeton nur eine Leistung von 20 – 50 m³/h zulässt [66].

Das typische Einsatzgebiet von Maschinen mit Anbaugeräten zum Schlagen, Hämmern und Stemmen ist der Abbruch von massiven Bauwerksteilen aus Mauerwerk, Beton- und Stahlbeton. Ebenso lassen sich mit Hilfe dieser Methode Schichten wie Putz, Estrich oder Fliesen entfernen. Des Weiteren kommt Schlagen, Hämmern oder Stemmen zum Einsatz für den Abbruch von Rand- und Übergangsbereichen des Abbruchbereichs bei angrenzender Bebauung [71].

Das **Fräsen und Schäl**en wird vielfach im Rückbau von Verkehrsflächen eingesetzt [66]. Ebenso wie das **Schleifen** kann es zu den Techniken des Abtragens gezählt werden. Beim Abbruch von Gebäuden wird das Bauwerk mittels rotierender Fräsmeißel abgetragen. Durch von einem Bagger geführte Anbaufräse ist die Bearbeitung von horizontalen bis senkrechten Flächen möglich (siehe Abbildung 21). Das Einsatzgebiet des Fräsens erstreckt sich auf den Abbruch von Konstruktionen aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton und bituminösen Flächen [66]. Mit dem Verfahren ist eine mittlere Leistungsfähigkeit zu erzielen, problematisch können dabei die Bewehrungsseisen sein [72]. Vorteilhaft beim Einsatz von Fräsen sind geringe Belastungen durch Erschütterungen.



Abbildung 21: Betonfräse beim Bunkerabbruch [72]

Beim Abtragen durch Schleifen werden Flächen mit Trennscheiben, die mit diamanthaltigem Schleifbelag versehen sind, schichtweise abgetragen. Diese Technik kann manuell ausgeführt werden. In Abhängigkeit von der Art der Ausführung kann es auch hier zum Anfall von Kühlwasser kommen, das bei der Ausführung berücksichtigt werden muss [61].

Die Technik des **Abgreifens** mittels Baggern mit Greifern als Anbaugeräten erfolgt beim Rückbau von Mauerwerks- und Holzkonstruktionen, von Fachwerksbauten sowie von dünnen und wenig festen Betonkonstruktionen. Für das Abgreifen von Stahlbeton werden Zangen als Anbaugerät eingesetzt. Der Einsatz dieser Technik erfordert Trägergeräte mit hoher Standfestigkeit und eine entsprechend geeignete Standfläche. Mit dem Abgreifen erfolgt ein teilweises oder vollständiges Entfernen von Bauwerksteilen mittels mechanischer oder hydraulischer Greifeinrichtungen. Hierbei wird das aus dem Verbund zu lösende Bauteil zangenförmig gefasst und abgehoben. Es ist zu beachten, dass das zu lösende Bauteil nur

lockere Verbindung mit anderen Bauteilen haben darf, da andernfalls andere Verfahren zur Verbundlösung notwendig werden. Eine vorhandene verstärkte Bewehrung muss separat abgetrennt werden. Die Separierung von Bauteilen kann ebenfalls durch Abgreifen erfolgen [70, 71].

Für das Abgreifen können Seil- oder Hydraulikbagger eingesetzt werden. Seilbagger werden bevorzugt mit Raupenfahrwerk in Verbindung mit einem Greifer (Seilgreifer) verwendet. Die Bauteile werden beim Abgreifen von oben nach unten abgetragen, so dass aufgrund weniger Zwischenzustände eine geringe Einsturzgefahr besteht sowie das Einrüsten und Anbringen von Absturzsicherungen nicht erforderlich ist. Der Abbruch und das Laden können in einem Arbeitsgang und mit einem Gerät erfolgen und auch eine Vorsortierung ist auf diese Weise möglich. Allerdings benötigt diese Abbruchmethode einen erhöhten Platzbedarf durch einzuhalten Sicherheitsabstände. Es kommt zu mittleren Beeinträchtigungen durch Staub sowie zu geringen Belastungen durch Lärm und Erschütterungen [7].

Das Prinzip des **Einschlagens** basiert auf dem Konzept, einzelne Bauteile mittels kinetischer Energie zu zertrümmern bzw. aus ihrem Verbund zu lösen. Hierbei kann der Abbruch einerseits manuell mit einem Vorschlaghammer oder maschinell durch einen an Seilen geführten Stahlkörper (hierbei ist ausreichender Platz für das Trägergerät und der Sicherheitsabstand zu beachten) erfolgen. Eine stählerne Fallbirne wird entweder aus der Senkrechten fallengelassen oder durch Schwenken des Auslegers zum Pendeln gebracht. Für diese Abbruchmethode sind Seilbagger mit einer maximalen Arbeitshöhe von 50 m bevorzugte Trägergeräte. Dabei gilt der Abbruch eines Gebäudes durch Einschlagen unter Nutzung eines Seilbaggers mit anhängendem, seilgeführten Stahlkörper (Abrissbirne) vielfach als typisch für einen konventionellen Abbruch (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Einschlagen mit einem Seilbagger mit angehängtem Stahlkörper [59]

Abhängig von der abzubrechenden Bausubstanz können unterschiedliche Leistungen erzielt werden. Für Mauerwerk gilt eine Leistungsfähigkeit von 13 – 25 m³/h, für Beton von 10 - 20 m³/h und für Stahlbeton von 5 - 19 m³/h und es können massive Bauteile bis 50 cm Dicke abgebrochen werden. Es lassen sich hohe durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit bei gleichzeitig niedrigen durchschnittlichen Kosten realisieren.

Das Einschlagen ist für Teilabbrüche ungeeignet, da es bei dieser Technik zu einem erheblichen Eintrag kinetischer Energie in das gesamte Bauwerk und entsprechenden Erschütterungen kommen kann. Auch das Trennen der Bewehrung bei Stahlbeton ist bei diesem Verfahren problematisch. Während des Abbruchs bestehen nur geringe Kontrollmöglichkeiten und eine Vorsortierung mit diesem Verfahren ist nicht möglich. Die eigentliche Schuttbeseitigung erfordert Arbeitsunterbrechungen. Zudem entstehen durch das Einschlagen für die Umwelt starke Beeinträchtigungen durch Staub, Lärm und Erschütterungen. Anwendung findet die Methode des Einschlagens beim Totalabbruch sowohl von Mauerwerkskonstruktionen als auch von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen. Sie ist auch bei größeren Höhen anwendbar, jedoch ungeeignet, wenn zu erhaltene Bauteile vorhanden sind [71].

Beim **Eindrücken und Einreißen** wird die abzubrechende Bausubstanz durch Umlegen von Bauwerken oder Bauwerksteilen mittels Ein- bzw. Umdrücken oder Herausziehen von Segmenten abgebrochen. Dies kann manuell erfolgen oder maschinell durch mechanisch oder hydraulisch geführte Druckwerkzeuge bzw. teleskopierbare Abbruchstielausrüstungen mit Reißzähnen oder hydraulischen Abbruchzangen. Bei geringer Abbruchhöhe erfolgt der Abriss mittels der Motorkraft eines Flachbaggers (Ketten-/ Radlader); für höhere Bauwerke werden Hydraulikbagger mit Stoßarmen und verstärktem Löffel eingesetzt. Zur Verfahrenskontrolle muss der Druck- bzw. Zugpunkt im oberen Bereich des Bauteils liegen. Kurzfristig auftretende gefährliche Zwischenzustände gefährden die Arbeitssicherheit und sind dementsprechend einzuplanen. Bei zusammenhängenden, teilweise zu erhaltenden Konstruktionen muss vorab eine Trennung mittels eines anderen Verfahrens erfolgen. Durch aussteifende Elemente wie Wand- oder Deckensteile sind dem Eindrücken Grenzen gesetzt. In diesen Fällen müssen andere Techniken, z.B. manuelles Abtragen oder Einreißen, eingesetzt werden [69, 70].

Das Eindrücken und Einreißen ist sowohl für den Abbruch von Mauerwerkskonstruktionen als auch von leicht bewehrten Stahlbetonbauteilen, Beton und Bauteilen aus Holz geeignet [71]. Diese Verfahrensweise ist durch eine hohe Leistungsfähigkeit gekennzeichnet, da bei niedrigen durchschnittlichen Kosten gleichzeitig eine hohe durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit generiert werden kann. Nachteilig sind die begrenzten Kontrollmöglichkeiten. Weiterhin ist ein ausreichender Abstand zur Nachbarbebauung einzuhalten und es entstehen für die Umwelt starke Beeinträchtigungen durch Emissionen, Staub, Lärm und Erschütterungen [66].

Beim **Einziehen** übt ein an einem ggf. teleskopierbaren Abbruchstiel montierter Reißzahn Zug- oder Druckkräfte auf das Bauwerk aus. Das Umlegen von Bauwerken oder Bauwerksteilen erfolgt dementsprechend durch Umziehen mittels Greifzügen oder Seilwinden (manuell) bzw. mittels Seilzügen oder Raupen mit Seilstropp/Kette. Die Einleitungspunkte für die Zugkräfte müssen im oberen Bereich liegen und Trennungen von zu erhaltenden Bauteilen sind vorab vorzunehmen.

Sowohl Mauerwerks-, Beton- als auch Stahlbetonkonstruktionen lassen sich durch Einziehen abbrechen. Das Hauptanwendungsgebiet liegt im Abbruch vertikaler Bauwerksteile und von Skelettkonstruktionen aus Stahl oder Holz [71]. Für Mauerwerkskonstruktionen lässt sich eine Leistungsfähigkeit von 20 – 35 m³/h erzielen, für Ausfachungen von Stahlbeton und Fachwerksbauten sind Leistungen von 10 – 15 m³/h bzw. 10 – 20 m³/h realisierbar [66]. Diese Abbruchmethode erzeugt mittlere Lärmemissionen, wohingegen es zu starken Belastungen durch Staub und Erschütterungen kommt.

Unter **Demontieren** ist das Auseinandernehmen von Konstruktionsteilen einer baulichen Anlage zu verstehen. Das geschieht in der Regel – in umgekehrter Reihenfolge wie bei der Montage – durch Lösen der Verbindungen oder Abtrennen durch Sägen oder autogenes Schneiden. Die Anwendung der Demontage erfolgt dann, wenn die Bauart es erfordert oder Konstruktionsteile wieder verwendet werden sollen. Die Methode des Demontierens wird im Stahlbau aber auch im Stahlbetonfertigtbau und in sonstigen Hochbauten eingesetzt [69, 70].

Das **Sägen** wird beim Abbruch von Bauwerken in der Regel für die Ausführung von Teilabbrüchen oder als vorbereitende Maßnahme eingesetzt. Eingesetzt werden je nach Aufgabenstellung Kreis-, Stich- oder Seilsägen. Das Sägen eignet sich zum Durchtrennen von Mauerwerk, Holz-, Beton- oder Stahlkonstruktionen. Ein weiteres Einsatzgebiet liegt in der genauen Trennung im Bestand für vorbereitende Arbeiten beim kontrollierten Rückbau [66].

Das Sägen zeichnet sich durch seine hohe Präzision aus und kann durch die kleinen und leichten Geräte flexibel eingesetzt werden. Mit diesem Verfahren kann weitgehend erschütterungsfrei gearbeitet werden. Belastungen entstehen durch Lärmemissionen im direkten Umfeld der Sägearbeiten. Staubemissionen kann – gerade bei Arbeiten mit Seilsägen – durch den Einsatz von Kühl- oder Spülwasser begegnet werden [70]. Jedoch muss die Handhabung des Kühlwassers bei der Planung berücksichtigt werden, dies gilt besonders falls das Verfahren in kontaminierten Bereichen angewandt wird.

Das **Bohren** zur Herstellung von Hohlräumen bzw. das Heraustrennen von Bauteilen mittels Kernbohrungen, ggfs. unter Einsatz von mit Industriediamanten besetzten Bohrrobotern und Zugabe von Kühlwasser, stellt eine weitere mechanische Abbruchmethode dar. Man unterscheidet zwischen Kernbohrungen und Vollbohrungen. Kernbohrungen werden durch einen mit diamantem Schneidbelag bestückten Hohlbohrer unter Zugabe von Kühl- und Spülwasser hergestellt. Bei der Anwendung ist der Kühlwasseranfall zu berücksichtigen [61].

Vollbohrungen werden mit Hartmetallbohrkronen durchgeführt. Die Voraussetzung zur Anwendung der Bohrtechnik ist die Kenntnis der Tragfähigkeit des Materials, umso mehr da die für diese Arbeiten eingesetzten Mitarbeiter direkt im Bereich des Rückbaus arbeiten. Zwar ist dieses Verfahren durch seine hohe Präzision gekennzeichnet, lässt sich mit ihm dennoch nur eine geringe Leistung bei gleichzeitig sehr hohen durchschnittlichen Kosten erzielen. Diese geringe Leistung ist maßgeblich von der zu bohrenden Materialhärte abhängig. Bauwerke aus Mauerwerk, Beton und Stahlbeton lassen sich mit Hilfe dieser Abbruchmethode rückbauen.

Das Bohren wird ähnlich dem Sägen als vorbereitendes Verfahren für weitere Maßnahmen des kontrollierten Rückbaus angewendet. Gut geeignet ist das Bohren für den Einsatz in erschütterungsgefährdeten Bereichen. Sowohl Holz- und Stahl- als auch Mauerwerks- und Betonbauteile lassen sich mit den entsprechenden Bohraufsätzen bohren. Ein weiteres bevorzugtes Einsatzgebiet liegt in der genauen Trennung im Bestand für beispielsweise vorbereitende Arbeiten des kontrollierten Rückbaus. Beim Bohren entstehen in der Regel keine besonderen Erschütterungen und einer evtl. Staubentwicklung kann mittels entsprechender Absaugung entgegen gewirkt werden. Allerdings entsteht eine mittlere Lärmbelastigung für das direkte Umfeld der Bohrarbeiten [66, 71].

Der Gebäudeabbruch erfolgt beim **Press- oder Scherschneiden** mit Abbruchzangen oder Abbruchscheren, welche die mineralischen Baustoffe mittels Druckbeanspruchung zerkleinern. Hierbei werden die zangenförmig angeordneten Backen hydraulisch zusammengedrückt so dass Schrottscheren das zwischen Backen angeordnete Material durch Abscheren zerteilen. Durch die Zerkleinerung des Materials kann auf einen separaten Brecher verzichtet werden, jedoch ist das Pressschneiden auch ein eher langsames Rückbauverfahren. Des Weiteren stellen mögliche herunterfallende Teile eine Gefahr für die Mitarbeiter dar.

Das Press-/Scherschneiden kommt hauptsächlich beim Abbruch von Decken, Wänden, Unterzügen und Stützen aus Mauerwerk, Beton und Stahlbeton zum Einsatz. Außerdem lassen sich Stahlkonstruktionen mit diesem Verfahren zurückbauen [71]. Für den Abbruch von Mauerwerk werden Leistungen von 35 – 40 m³/h erreicht. Mit Hilfe eines teleskopierbaren Abbruchstiels können Arbeitshöhen von bis zu 80 m realisiert werden, wobei normale Einsatzhöhen bei 50 m liegen. Die vor wirtschaftlichem Hintergrund maximal abzubrechende Bauteildicke beträgt beim Abgreifen für Stahlbeton 20 cm [66]. Dieses Verfahren erzeugt nur geringe Beeinträchtigungen durch Staub, Lärm und Erschütterungen und zeichnet sich durch vergleichsweise geringe Kosten aus [73].

2.4.2 Sprengtechnik

Beim Einsatz der Sprengtechnik als Abbruchverfahren wird mittels einer Explosion die vollständige oder teilweise Zerteilung bzw. Zertrümmerung von Bauwerken und Bauteilen bis

hin zum Einsturz herbeiführt. Die Sprengwirkung beruht dabei auf dem Einsatz von Explosivstoffen, also Stoffgemischen, die nach einer entsprechenden Aktivierung eine chemische Reaktion erfahren und dabei eine Druckwelle erzeugen.

Die Explosivstoffe werden als Bohrlochladungen eingebracht und erfahren nach der Zündung eine abrupte Volumenvergrößerung, die Druck auf die zu sprengenden Bauteile ausübt. Die Wirkung des Sprengstoffes ergibt sich dabei aus der Stoßwelle durch die Detonation und den sog. Gas- bzw. Schwadendruck. Die Stoßwelle, die sich bei der Detonation mit einer Geschwindigkeit von 2000 – 8000 m/s fortpflanzt, bewirkt in der unmittelbaren Umgebung des Sprengstoffes einen Druckaufbau von 50.000 – 200.000 bar. Dieser Druck setzt sich in Form einer mechanischen Druckwelle in dem abzubrechenden Bauwerk fort. Dabei wird das Material in der direkten Umgebung des Sprengstoffes vollständig zerstört, nachgelagerte Bereiche reißen. In Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Baustoffs schwächt der Detonationsstoß im Zuge seiner Ausbreitung ab [7].



Abbildung 23: Fallphasen während der Sprengung eines Hochhauses [74]

Bedingt durch die chemische Umsetzung des Sprengstoffes kommt es zur Bildung großer Mengen von Schwaden. Das bereits durch den Detonationsstoß vorgerissene Gefüge wird auseinander gedrückt und es ergeben sich weitere Risse und Zerstörungen. Die Wirkung des Gas- bzw. Schwadendruckes entspricht etwa dem zehnfachen des Detonationsstoßes

und wirkt entsprechend länger. Je nach Anordnung der Laderäume und Sprengladungen kann die Ausbruchrichtung und die Hauptrichtung der Schleuderwirkung beeinflusst werden. So kann z.B. bei Teilabbrüchen oder einem Abbruch in unmittelbarer Nähe einer nicht abzubrechenden Bebauung eine schonende Art des Sprengens zum Einsatz kommen.

Die einzusetzende Sprengstoffmenge bzw. die Art des einzusetzenden Sprengstoffs sind objektabhängig. Um die Sprengwirkung und das Ausmaß von Erschütterungen zu begrenzen, den Detonationsknall zu dämpfen, umher fliegende Bruchstücke zu vermeiden und eine präzisere Vorplanung der Fallrichtung gewährleisten zu können, wird das Zünden der einzelnen Sprengladungen räumlich und zeitlich versetzt. Schonendes Sprengen wird durch die gezielte Anordnung von Sprengladung in einem engeren als bei der konventionellen Sprengung zu wählendem Bohrlochmuster und einer Reduzierung der Sprengstoffmenge erreicht.

Die Sprengtechnik kommt hauptsächlich beim Abbruch hoher Schornsteine, von Hochhäusern, Türmen und hochbewehrten Fundamenten oder Brücken über nur kurzzeitig absperrbaren Verkehrswegen zum Einsatz. Voraussetzung ist, dass durch die Sprengung weder benachbarte Gebäude, Ver- und Entsorgungsleitungen, Freileitungen noch Verkehrswege beschädigt werden [7]. Nach der Sprengung wird das Abbruchmaterial durch Abtragen oder Abgreifen beseitigt [69].

Vorteilhaft an der Anwendung von Sprengungen ist die kurze Abbruchzeit bei insgesamt niedrigen Kosten. Statische Zwischenzustände brauchen anders als bei anderen Abbruchverfahren nicht berücksichtigt zu werden. Durch den gezielten Einsatz der Sprengtechnik lassen sich Teilabbrüche, Abbrüche bei enger Bebauung oder in der Nähe des öffentlichen Verkehrsnetzes durchführen, jedoch lässt sich die Einsturzkinetik nicht bei allen Arten von Bauwerken exakt voraus berechnen. Nicht vorhandene konsistente Sicherheitsnachweise müssen basierend auf halbempirischen Grundlagen durch die Verantwortung des Sprengmeisters ausgeglichen werden.

Die vorhandenen Unsicherheiten bei der Vorausberechnung des Abbruchverhaltens eines Gebäudes können gravierende Auswirkungen haben, da es im Nachgang von gescheiterten Sprengversuchen ausgesprochen kompliziert ist den Abbruch mittels erneuter Sprengung oder anderer Abbruchmaßnahmen zu beenden. Neben schwierigen örtlichen Verhältnissen durch Schutt und Trümmerteile liegen für die noch vorhandenen Gebäudeteile keine statischen Berechnungen vor, die bei der Planung der weiteren Maßnahmen berücksichtigt werden könnten.

Ein selektiver Rückbau kontaminierter Bereiche oder einzelner Stoffströme muss vor der Sprengung durchgeführt werden. Bei stark bewehrten Stahlbetonbauwerken müssen die nicht gerissene Bewehrung bzw. größere Bruchstücke nachzerkleinert werden. Durch die Sprengung werden alle eingebauten Bauteile unabhängig vom Material zerstört, so dass zudem eine unmittelbare Sortierung der Abbruchfraktionen nicht möglich ist. Weiterhin sind an das Abbruchobjekt angrenzende Bauteile aufwändig gegen Mitzerstörung zu schützen.

Sprengungen führen zu starken Emissionen durch Staub-, Lärm- und vor allem hohen Erschütterungen. Diese Umweltbelastungen treten zwar nur kurzzeitig, dafür aber besonders massiv auf. Durch einen entsprechend gut ausgearbeiteten Sprengplan und entsprechende Sicherungsmaßnahmen (gegen Streuflug, Lärm, Primärererschütterungen durch Detonation, Sekundärererschütterungen durch Aufprall, Schwaden von Sprenggasen und gegen Staub) kann allerdings das Ausmaß der Erschütterungen begrenzt werden, insgesamt die Umgebungsbelastungen zeitlich limitiert werden sowie eine bessere Kontrolle der entstehenden Emissionen erreicht werden [7, 70].

2.4.3 Hydrodynamische Verfahren

Hydrodynamische Verfahren können zur Trennung von Beton-, Stahlbeton- oder Stahlbauteilen eingesetzt werden. Zu diesen Verfahren zählt auch das **Hochdruckwasserstrahlen**, das ein gebräuchliches Verfahren bei Bauwerksinstandsetzungsarbeiten ist und in Ausnahmefällen auch im Rahmen von Rückbauverfahren eingesetzt wird. Durch die Beschleunigung des Wasserstrahls auf mehrere Hundert m/s erfolgt die Materialbeanspruchung durch Auswasch- und Geschosseffekte (bei Zugabe von Abrasivmitteln) bei Drücken von 60 bis 2500 bar und Austrittsgeschwindigkeiten von bis zu 1000 m/s. Dies führt zur Abtragung des beschossenen Materials. Die erreichbare Schneidleistung mit dem Hochdruckwasserstrahlen ist in harten Materialien begrenzt, entsprechend ist die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens von dem zu trennenden Material abhängig [66].

Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Hochdruckwasserstrahlens in Hinblick auf die Festigkeit der zu bearbeitenden Materialien kann ein Schneidmittel (Abrasiv) wie z.B. Eisenkies oder Quarz dem Strahlwasser zugegeben werden. Das sogenannte **Hochdruckwasserabrasivschneiden** ermöglicht aufgrund seiner höheren Schnittqualität auch die Durchtrennung von Beton, Stahlbeton und Stahl. Das Verfahren ist besonders für kleinere Umbau- oder Abbrucharbeiten von Mauerwerks- und Stahlbetonbauteilen mit Dicken bis zu 35 cm geeignet. Grundsätzlich ist die Bearbeitung von fast allen Materialien möglich. Einen entscheidenden Einfluss auf den Schneidfortschritt hat zu bearbeitende Stahlbewehrung, da mit zunehmendem Bewehrungsstabdurchmesser die erzielbare Trenngeschwindigkeit sinkt. Mit maschinellem Wasserstrahlabrasivschneiden können Leistungen von 0,41 m³/h und mit manuellem 0,05 m³/h erreicht werden [71].

Das hauptsächliche Einsatzgebiet des Hochdruckwasserstrahlens liegt im Reinigen von Materialien und weniger im Abbruch von Bausubstanz. Das Verfahren eignet sich sowohl für den Abtrag von Farbschichten und Rost als auch zur Betonsanierung [71]. Beton kann in Schichten von mehreren Zentimetern abgetragen werden, dabei können einzelne Bereiche gezielt ausgeschnitten bzw. abgetragen werden [75]. Somit kann das Verfahren für den selektiven Abtrag von z.B. kontaminierten Bereichen oder Betonflächen genutzt werden. Hierbei ist jedoch eine mögliche Verschmutzung des Wassers zu beachten.

Bei der Nutzung dieses Verfahrens wird die Entstehung von Staub, Gasen und Dämpfen vermieden [75]. Außerdem können Erschütterungen beim Arbeiten weitestgehend ausgeschlossen werden. Demgegenüber steht ein durch die hohe Austrittsgeschwindigkeit des Wassers beim Schneiden entstehender Schalldruck von bis zu 130 dB, so dass die ausführenden Mitarbeiter entsprechende Schutzausrüstungen tragen müssen. Als weitere Umweltwirkungen neben den Schallemissionen sind naturgemäß noch Wasserverbrauch und Abwasserbehandlung, zu nennen. Bei der Bestrahlung kontaminierter Bereiche sowie bei der Ablösung von Partikeln aus dem bestrahlten Bauteil muss das anfallende Abwasser aufbereitet werden [76, 77].

Aufgrund der geringen Belastung des unmittelbaren Arbeitsbereichs (keine Erschütterungen, keine Explosionsgefahr, kein Entstehen von Stäuben, Dämpfen oder Schlacken) bietet sich dieses Verfahren zur Durchführung von Teilabbrüchen innerhalb von Gebäuden, in denen sich erschütterungsempfindliche Materialien bzw. leichtentzündliche Stoffe befinden, an. Von Nachteil für die Anwendung ist, dass eine gleichmäßige Schnittfläche über die Trenndicke nicht gewährleistet werden kann und die Schneidleistung vom Schneidwerkzeug und der Geräteführung abhängt. Ebenso sprechen neben dem Abwasseranfall auch der hohe Wasser- (ca. 3 m³/h) und Abrasivbedarf (ca. 80 – 100 kg/h) sowie die Beseitigung der Wasser- und Feststoffmenge in Kombination mit dem hohen Verschleiß von Schneidköpfen und Fokussierrohren gegen die abbruchtechnische Anwendung dieses Verfahrens. Ferner besteht bei Teilabbrüchen die Gefahr von Wasserschäden in weiterhin genutzten Gebäudeteilen [71]. Insgesamt sind auch die Kosten der Hochdruckwasserstrahltechnik vergleichsweise hoch [78]. Der Einsatz des Hochdruckwasser(abrasiv)schneidens als Abbruchverfahren ist entsprechend nur in Ausnahmefällen sinnvoll.

2.4.4 Thermische Verfahren

Thermische Rückbauverfahren nutzen Energie, die zumeist durch das Verbrennen eines Gas-Sauerstoff-Gemisches erzeugt wird, um Bauteile zu durchtrennen. Dabei wird mit unterschiedlichen Techniken gearbeitet.

Man unterscheidet bei den thermischen Verfahren drei prinzipielle Mechanismen:

- Thermisches Trennen durch direkte Erhitzung,
- Thermisches Trennen durch energiereiche Strahlung und
- Thermisches Trennen mit elektromagnetischer Energie.

Für das Trennen von Massivbauwerken (Mauerwerk, Beton, Stahlbeton) durch direkte Erhitzung sind folgende Verfahren gebräuchlich:

- Trennen mit (Pulver-)Schneidbrennern,
- Bohren und Trennen mit Sauerstoffkernlanzen oder Pulverlanzen sowie
- Schneiden mit Plasmabrennern.

Beim **Schneidbrennen** wird thermische Energie durch die Verbrennung eines Gemisches aus Brenngas und Sauerstoff erzeugt. Größenabhängig kann zwischen Hand- und Maschinenschneidbrennern unterschieden werden. Zunächst erwärmt eine Heizflamme (Prinzip Schweißbrenner) das zu schneidende Material auf Zündtemperatur (meist über 1000°C). Durch das Zuschalten des Schneidsauerstoffs, der unter Druck durch die Heizflamme (Acetylen- oder Propan-Sauerstoff-Gemisch) geblasen wird, verflüssigt sich das zu schneidende Material oder verbrennt.

Beim Schneidbrennen können hohe Materialstärken (bis 300 mm, in Sonderbauformen bis 1000 mm) bei hoher Vorschubgeschwindigkeit durchtrennt werden. Dieses Verfahren eignet sich zum thermischen Trennen von Metallen und anderen Stoffen sowie von Stahl- und Eisenkonstruktionen. Allerdings wird die Anwendbarkeit durch Brandgefahr, Materialveränderungen an den Schnittkanten sowie den Spannungszustand der zu schneidenden Bauteile eingeschränkt. Zudem entstehen durch das Schneidbrennen hohe Belastungen durch Lärm und gegebenenfalls auch gasförmige Belastungen durch die Verbrennung von z.B. zuvor nicht erfassten Kontaminationen. Demgegenüber kommt es kaum zu Beeinträchtigungen durch Staub und Erschütterungen.

Das **Pulverschneidbrennen** ist ein thermisches Rückbauverfahren, das leise, erschütterungsarm und staubfrei arbeitet. Bei der Anwendung von Pulverschneidbrennern wird Energie durch die Verbrennung von Eisen- und Aluminiumpulver mit Sauerstoff generiert. Mit dieser Technik können Stahl und Eisen getrennt werden, die Schneidleistung liegt jedoch nur bei 50 – 100 mm/min. Dieser geringen durchschnittlichen Leistung stehen zudem hohe durchschnittliche Kosten gegenüber. Außerdem arbeiten die Mitarbeiter besonders nahe dem Gefahrenbereich [66].

Sauerstoff-Kernlanzen dienen dem erschütterungsfreien und geräuscharmen, thermischen Schneiden von Beton, gewachsenem Gestein, Ziegelmauerwerk sowie allen FE- und NE-Metallen. Ebenso können sie zum Bohren großer, tiefer Löcher in Beton sowie zum Abbruch von Beton-, leicht bewehrten Stahlbeton- und Stahlkonstruktionen bis zu einer Tiefe von 1,20 m bzw. bis zu einer Plattenstärke von 400 mm eingesetzt werden. Die Leistungsfähigkeit liegt bei 0,3 – 0,5 m²/h bzw. 1700 mm/min [66]. Sauerstoff-Kernlanzen können auch zum Betonschmelzen unter Wasser eingesetzt werden. Während der Arbeiten besteht Brandgefahr und es ist während des Schneidens auf ausreichende Belüftung zu achten, um die Gefahr der Sauerstoffanreicherung oder einer Rauchvergiftung zu vermeiden [71].

Pulverlanzen ähneln im Wirkungsprinzip der Kernlanze und dem Pulverschneidbrenner und erzeugen die thermische Energie durch die Reaktion eines Metallpulvers (Eisen oder Eisen/Aluminiumgemische) mit Sauerstoff. Pulverlanzen werden zum Bohren und Perforieren von Bauwerksteilen aus Stahl, Beton, Stahlbeton und Gusseisen eingesetzt: Das Verfahren hat ein breiteres Anwendungsspektrum als Kernlanzen, erfordert jedoch einen höheren Geräteaufwand. Es kann eine maximale Brenntiefe von 3.000 mm erreicht werden. Bei diesem Verfahren treten keine Beeinträchtigungen der Umgebung durch Lärm oder Erschütterungen auf, jedoch ist das Verfahren vergleichsweise aufwändig [66].

Der Schneidvorgang mit **Plasmabrennern** erfolgt durch einen Lichtbogen bzw. Plasmabogen, der über ein Plasmabildendes Gas erzeugt wird. In Abhängigkeit u.a. vom verwendeten Plasmagas können Temperaturen von bis zu 20.000 °C erreicht werden. Durch die hohe Plasmatemperatur und die große kinetische Energie des Lichtbogens können hochlegierte Stähle und Nichteisenmetalle mit großer Geschwindigkeit aufgeschmolzen und teilweise verdampft werden. So hat das Schneiden mit Plasmabrennern ein verbreitetes Einsatzgebiet bei der Trennung von Anlagenteilen im Kernkraftwerksbau [71]. Die hohe Arbeitsgeschwindigkeit beim Plasmabrennen geht mit einem vergleichsweise hohen Energieverbrauch und entsprechend hohen Kosten einher. Zudem ist die Anwendung dieses Verfahrens auf Dicken des zu schneidenden Materials von maximal 100 mm beschränkt [66].

Thermisches Trennen mit energiereicher Strahlung kann durch den Einsatz von Lasertechnologie, Elektronenstrahlen und mit elektromagnetischen Wellen erfolgen [7]. Diese Verfahren sind durch hohe Energieverbräuche und Kosten gekennzeichnet und werden trotz der teilweise hohen Genauigkeit beim Rückbau in der Praxis in der Regel nicht eingesetzt [7, 78].

Aufgrund der Genauigkeit beim Arbeiten können thermische Rückbau- oder Trennverfahren in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten bei selektiven Rückbaumaßnahmen eingesetzt werden. Während die einzelnen Verfahren unterschiedliche Umweltwirkungen haben, sind aufgrund der zumindest bereichsweise entstehenden hohen Temperaturen immer die entsprechenden Sicherheitsmaßnahmen zu beachten. Die Ausführung thermischer Rückbau- oder Abbruchverfahren ist in der Praxis aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten jedoch sehr selten [74].

2.4.5 Sonstige Verfahren

Bei in **Expansionsverfahren** eingesetzten Expansivstoffen handelt es sich um Quellmittel, beispielsweise gebrannter Kalk oder andere hydraulische Verbindungen, die in Verbindung mit Wasser eine Volumenzunahme erfahren. Werden diese vor der Expansion in Bohrlöcher gefüllt, wird das abzubrechende Bauwerk infolge der Volumenzunahme gespalten. Der entstehende Quelldruck bewirkt bei der Überschreitung der Spaltzugfestigkeit des zu

sprengenden Materials die Zerstörung des Bauteils. Die Spaltzugfestigkeit wird nach 3 – 8 Std. vom Quelldruck überschritten und es kommt zur Rissbildung [7, 66, 71].

Das Sprengen mit Expansivmitteln kommt beim Abbruch von kompakten aus harten, spröden Materialien bestehenden Bauwerken wie Mauerwerk, Beton und teilweise auch Stahlbeton zum Einsatz. Neben geringen Gerätekosten, dem vergleichsweise geringen Transportaufwand gegenüber beispielsweise dem Einsatz von Sprengstoffen oder Großgeräten sowie der einfachen und sicheren Handhabung der Expansivmittel besteht ein großer Vorteil in der Anwendung dieses Verfahrens darin, dass der Einsatz nicht durch zu berücksichtigende Grenzbebauung eingeschränkt ist und es auch bei kleinen Abbruchobjekten wirtschaftlich ist.

Nachteilig sind der dennoch notwendige hohe Zeitaufwand zur Herstellung der Bohrlöcher sowie die schwierige Vorhersagbarkeit des Zeitpunktes der Rissbildung. Darüber hinaus ist das Spalten durch Expansivmittel nicht zur Zertrümmerung anwendbar und zudem sinkt mit steigendem Bewehrungsgrad der Stahlbetonbauwerke die Effektivität dieses Verfahrens beim Einsatz für den Abbruch [66, 71]. Durch die Anwendung von Expansivmittel zur Sprengung abzubrechender Bausubstanz entstehen keine Umweltbelastungen aus Staub, Lärm, Erschütterungen, Schwaden oder Splitterwirkung bzw. aus Rückständen hydratisierten Gemisches.

Um durch **Spalten** ein Bauwerk abzubrechen sind in Vorarbeit Bohrungen herzustellen, in die hydraulisch angetriebene Pressen oder Keile eingesetzt werden. Das Bauteil wird anschließend durch das Einleiten von Druckkräften gespalten. Alternativ kann das Spalten durch Einfüllen eines Expansiv- oder Quellmittels in die Bohrungen erzeugt werden. Diese Abbruchmethode ist gut geeignet für den Rückbau harten Materials mit geringer Zugfestigkeit beispielsweise schwach oder unbewehrte Betonbauteile. Zwar resultieren aus dem Spalten keine emissionsbedingten Beeinträchtigungen, jedoch wird die geringe durchschnittliche Leistung zusätzlich mit hohen Kosten begleitet. Ferner arbeiten die Mitarbeiter dicht am Gefahrenbereich. Der Erfolg dieses Verfahrens ist abhängig von der Mächtigkeit des Bauteils. Bevorzugtes Einsatzgebiet ist der Abbruch von gering bewehrten, massiven Beton- und Mauerwerkskonstruktionen.

2.4.6 Einsatzbedingungen und Leistungsfähigkeit verschiedener Abbruchmethoden

Nachfolgende Übersichten geben einen zusammenfassenden Überblick über die Bedingungen für den Einsatz der gebräuchlichsten erläuterten Abbruch- und Trennverfahren und über ihre Leistungsfähigkeit. Wichtig ist für alle Rückbaumaßnahmen die eingesetzten Techniken auch in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit aufeinander abzustimmen um den Ablauf – gerade in Hinblick auf den zu Verfügung stehenden Zeitrahmen – zu optimieren.

Tabelle 8: Abbruchverfahren in Abhängigkeit von den Abbruchbedingungen nach [7]

Abbruchbedingungen	1) Mech. Abtragen mit handgeführten Werkzeugen	1) Mech. Abtragen mit Werkzeugen an Trägergeräten bis 5 t	1) Mech. Abtragen mit Werkzeugen an Trägergeräten ab 5 t	2) Mech. Abgreifen mit Seilgreifern	2) Mech. Abgreifen mit Zange	Mech. Einschlagen mit Fallgewichten	Mech. Eindrücken	Mech. Einreißen	Sprengen mit Explosivstoffen
Freier Zugang, Einsatz von Großgeräten möglich	-	-	+	+	+	+	+	+	+
Zugang beschränkt, nur Einsatz kleiner Geräte mit geringem Platzbedarf	-	+	*	*	*	*	*	-	+
Sehr schlechter Zugang. Von außen abbrechende Geräte sind nicht einsetzbar	+	+	*	-	-	-	-	-	*
Starke Erschütterungen wie Stöße und Vibrationen sind unzulässig	+	+ Z	+ Z	+	+	+	+	+	*
Starke Staubentwicklung, Gase, Rauch und Schwaden sind unzulässig	+	*	+	-	-	+	+	+	- X
Eine Lärmerzeugung über dem Lärmpegel von 70-80 dB(A) ist unzulässig	*	+ Z	+ Z	-	-	+	+	+	- X

+ vorzugsweise anzuwenden, - nicht anzuwenden, * möglicherweise anzuwenden, - x nur auf die Sprengung begrenzt, d.h. vorausbestimmbar

1) Die + sind abhängig von den jeweiligen Werkzeugen an den Geräten: Felsmeißel +, Betonzange +z

2) Materialabhängig: Mauerwerk mit Seilgreifer, Stahlbeton mit Zange

Tabelle 9: Leistungsfähigkeit von Abbruchverfahren bei unterschiedlichen Materialien nach [7]

Abbruchverfahren	Zum Einsatz kommende Geräte	Stahlbeton h/fm ³	unbew.Beton h/fm ³	Mauerwerk h/fm ³
Abtragen	· mit handgeführten Werkzeugen	6,0 bis 15,0	2,0 bis 10,0	1,0 bis 4,0
	· mit Werkzeugen an Trägergeräten über 5 t Eigengewicht	0,25 bis 5,0	0,1 bis 2,0	0,1 bis 0,6
	· mit hydraulischem Felsmeißel an Trägergeräten über 5 t Eigengewicht	0,2 bis 1,0	0,1 bis 0,8	0,1 bis 0,5
Abgreifen	· mit Greifern	-	0,1 bis 0,5	0,1 bis 0,5
	· mit Betonzangen	0,6 bis 6,0	0,3 bis 0,5	0,2
Einschlagen	· mit Fallbirne	0,1 bis 1,5	0,07 bis 0,2	0,05 bis 0,1
Eindrücken	· mit Gerätehydraulik	0,3	0,1 bis 0,4	0,05 bis 0,1
Einreißen	· mit Seilzug oder Gerätehydraulik	0,1 bis 0,3	0,07 bis 0,2	0,05 bis 0,1
Sägen	· mit Betonsägen	0,5 bis 10,0	0,4 bis 6,0	3
Sprengen	· mit Explosivstoffen	0,4	0,25	0,25
	Leistung in h/m² Schnittfläche	5,0 - 6,5	3,5 - 5,0	2,0 - 2,5

fm³: Kubikmeter feste Masse

2.5 Selektiver Abbruch

Neben einer konventionellen Vorgehensweise, bei welcher oftmals als Durchführungskriterium die Dauer der Abbruchmaßnahme im Vordergrund steht, hat sich auch die Vorgehensweise des selektiven Rückbaus (auch kontrollierter Rückbau) etabliert. Durch die Separierung und den getrennten Rückbau von Bereichen, die Störstoffe enthalten oder kontaminiert bzw. z.B. AKR-verdächtig sind (AKR: Alkali-Kieselsäure-Reaktion), können Verschleppungen von unerwünschten Stoffen verhindert oder minimiert werden. Weiterhin können durch die Anwendung von selektiven Rückbaumethoden unterschiedliche Materialien sortenrein erfasst werden. In der Regel ist die Vorgehensweise beim selektiven Rückbau zeitaufwändiger.

Ziele des selektiven Rückbaus sind neben der Minimierung der beim Abbruch anfallenden Abfallströme auch die Erhöhung der Qualität der gewonnenen Stoffströme und damit die Verbesserung ihres Recyclingpotentials. Die selektive Gewinnung von Abbruchmaterial reduziert dabei entsprechend auch den Aufwand der für ein Recycling des Bauschutts erforderlichen Aufbereitung [79]. Dadurch können auch die Entsorgungskosten gesenkt werden, da nur schadstoffbelastete/-verunreinigte Anteile zu entsorgen sind.

Für die Umsetzung eines selektiven Rückbaus ist eine umfassende Bestandsaufnahme des rückzubauenden Gebäudes und darauf aufbauend eine sorgfältige Vorplanung des Ablaufs Voraussetzung. Diese Vorplanung berücksichtigt die Ergebnisse der Erfassung der getrennt rückzubauenden unterschiedlichen Materialien. Beim eigentlichen Rückbau erfolgt mit unterschiedlichen Techniken die Demontage von einzelnen Bauteilen, Bauelementen und gegebenenfalls Bereichen in genau auf den gesamten Bauablauf abgestimmten Demontagestufen. Diese Vorgehensweise ist verbunden mit der Separierung der anfallenden Reststoffe [68, 80-82].

Als typisches Beispiel für die Vorgehensweise bei einem selektiven Abbruch werden die folgenden Schritte in der Literatur aufgeführt [59]: Entrümpelung, ggf. Entleerung und Reinigung von Anlagen, Demontage von Anlagenteilen, Entkernung des Gebäudes, Schad- sowie Störstoffentfernung und schließlich der Abbruch der mineralischen Reststoffe. Nach der Entrümpelung und gegebenenfalls der Demontage von noch vorhandenen Anlagen oder Anlagenteilen erfolgen die Schritte, die für die Trennung der Stoffströme im Rahmen der selektiven Maßnahme wesentlich sind. Diese werden im Zuge der Entkernung bzw. der Schad- und Störstoffentfernung der selektiven Maßnahme durchgeführt. Dabei sollten in Hinblick auf einen zufriedenstellenden Baufortschritt die Schritte Entkernung und Schad- und Störstoffentfernung soweit als möglich parallel durchgeführt werden.

Die ideale Rückbaustruktur für den kontrollierten Rückbau eines Gebäudes wird von Silbe noch etwas komplexer wie folgt dargestellt [73]:

- Sorgfältiger Ausbau verwendbarer Bauteile oder Bauelemente (z.B. Fester, Türen, Möbel, Apparate)
- Schadstoffentfrachtung unter Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften
- Demontage noch vorhandener nicht mehr verwendbarer Einrichtungsgegenstände
- Entkernung der raumauskleidenden, nicht mineralischen Elemente
- Entkernung der Technischen Gebäudeausrüstung
- Rückbau der Gebäudehülle (Dachbelag, Fenster, Fassade, etc.)
- Rückbau des Tragwerkes (Bodenplatte, Fundamente, etc.)
- Endzustand herstellen (Planum usw.).

Selektive bzw. kontrollierte Rückbaumaßnahmen werden bereits seit Jahren in der Praxis ausgeführt. Verschiedene Autoren haben schon in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts über Rückbauprojekte berichtet, die zum Teil auch Modellcharakter haben [81, 83-85]. Neben den zuvor erwähnten, grundsätzlich notwendigen Arbeitsschritten wie einer sorgfältigen Bestandsaufnahme und darauf aufbauend einer detaillierten Ablaufplanung zur Erfassung der einzelnen Stoffströme und der zu separierenden und gesondert abzutragenden Bereiche (z.B. AKR-Verdachtsstellen oder kontaminierte Bereiche) werden die technischen Arbeitsschritte während des Rückbaus direkt auf die jeweilige Maßnahme abgestimmt.

Infolge der projektbezogenen Anpassung des Arbeitsablaufs bei der eigentlichen Rückbaumaßnahme können – in Abhängigkeit von den jeweiligen Gegebenheiten und den ausführenden Unternehmen – diverse Techniken zur Anwendung kommen. Dabei sind die zuvor beschriebenen Rückbau- bzw. Abbruchverfahren unterschiedlich für den Einsatz beim selektiven Rückbau geeignet.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass durch selektive Rückbaumaßnahmen gewonnene Materialien von deutlich höherer Qualität sind als herkömmlich hergestellte Körnungen. Neben einer Steigerung der Sortenreinheit der Materialhauptströme fällt in der Regel auch eine größere Menge an nicht recyclingfähigen Materialien an, welche Schad- und Störstoffe in aufkonzentrierter Form enthalten [81-83, 86].

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigten, dass selektive Rückbaumaßnahmen auch kostengünstiger als herkömmliche Abbrüche von Vergleichsprojekten durchgeführt werden können. Auch hier ist wiederum eine sorgfältige Planung von großer Bedeutung. Zum Tragen kommen aber auch die Rahmenparameter des betreffenden Gebäudes sowie die örtlichen Bedingungen in Bezug auf Aufbereitungs- und Verwertungsmöglichkeiten sowie Entsorgungsmöglichkeiten und –preise und beispielsweise auch die Entfernungen zu den jeweiligen Einrichtungen [59, 73, 81, 82].

2.5.1 Eignung von Abbruchverfahren für den selektiven Abbruch

Beim selektiven Abbruch werden in der Regel Kombinationen unterschiedlicher Rückbauverfahren angewandt. Demontagetechniken können beispielsweise mit gängigen Abbruchverfahren für den Rückbau der Materialhauptströme, in der Regel Beton oder Ziegel, gekoppelt werden. Durch sie kann im Zuge des Rückbaus eine sofortige Trennung der Abbruchmassen erfolgen, wodurch sich hohe Recyclingquoten der Baurestmassen erreichen lassen. Die verschiedenen Abbruchfraktionen werden in den einzelnen Demontagestufen gewonnen und in den Stoffkreislauf rückgeführt.

Die meisten der beim konventionellen Abbruch eingesetzten Techniken können ebenfalls beim selektiven Rückbau angewandt werden. Sie dienen vorbereitenden Arbeiten, um gesondert rückzubauende Bereiche vor dem eigentlichen Abbruch der mineralischen Bausubstanz gezielt zu entfernen. Dies können Bereiche oder Bauteile sein, die z.B. durch Schadstoffe kontaminiert oder durch Sulfate belastet sind. Beispielhaft sind nachfolgend Techniken beschrieben, die sich für die Anwendung im Rahmen von selektiven Rückbaumaßnahmen eignen [71]:

Eine Vorgehensweise des kontrollierten Rückbaus ist das **Demontieren** bzw. **Bergen**. Dabei wird eine bauliche oder technische Anlage zurückgebaut um sie später wieder zu verwerten. Beim Demontieren ist ein sehr genaues Arbeiten möglich und es bestehen nur wenige Gefahren für umliegende Bauwerke. Diese Rückbauweise ermöglicht einen erschütterungsfreien Abbruch, ohne die Erzeugung von Staubemissionen. Nachteilig sind der insgesamt langsame Rückbaufortschritt bei hohen durchschnittlichen Kosten sowie die Tatsache, dass die Arbeiten zum Teil in Gefahrenbereichen erfolgen können. Dieses Verfahren wird bevorzugt für den Rückbau von Stahlkonstruktionen, Fertigbauteilen sowie technischen Anlagen eingesetzt. Dazu können in Abhängigkeit von der Bausubstanz unterschiedliche Techniken eingesetzt werden, wie beispielsweise Schneidbrennen oder Scherschneiden bei Stahlkonstruktionen. [69].

Eine Sonderform des Demontierens oder Bergens ist der **Rückbau von Bauteilen** zur Wieder- oder Weiterverwendung. Hierunter wird der Rückbau von einzelnen, zum Teil großformatigen Bauteilen verstanden. Hierzu gehören beispielsweise Betonplatten, die sich als Ganzes in Neubauten integrieren lassen, aber auch beispielsweise intakte Fenster, die sich in neue Gebäude oder bei Sanierungen wiederverwenden lassen [87, 88]. Die beim Rückbau von Bauteilen angewandten Techniken müssen so angewandt werden, dass eine weitestgehend zerstörungsfreie Lösung der Bauteile aus dem Verbund möglich ist.

Das **Abtragen** ist als Verfahren zur Entfernung von Schichten mit unterschiedlichen Techniken auch für den selektiven Rückbau geeignet. Dabei kann gerade durch den Abtrag per Hand sorgfältig an separaten Stellen gearbeitet werden. Dabei können sowohl flächige Schichten, wie Putze oder Bodenschichten als auch durch Schlagen oder Stemmen einzelne Bereiche, wie z.B. Kontaminationsverdachtsflächen, entfernt werden. Abtragen kann auch als vorbereitende Maßnahme ausgeführt werden, wie z.B. für das Lösen einzelner Bauteile [69, 70].

Das **Fräsen und Schälen** oder **Schleifen** kann ebenfalls beim kontrollierten Rückbau von Gebäuden eingesetzt werden. Durch die Möglichkeit zum flächigen Arbeiten können ebenso wie beim Abtragen Schichten von flächig aufgetragenen Störstoffen oder Kontaminationen beseitigt werden. Jedoch sind dem Einsatz in Abhängigkeit von der Zugänglichkeit der Flächen für die Maschinen Grenzen gesetzt. Ebenso ist der bereichsweise notwendige Einsatz von Kühlwasser zum Beispiel in kontaminierten Bereichen problematisch.

Das **Abgreifen** mittels mechanischer oder hydraulischer Greifeinrichtungen dient dem teilweisen oder vollständigen Entfernen von Bauwerksteilen, die – in der Regel durch vorhergehende Maßnahmen – nur locker mit anderen Bauteilen verbunden sind. Auf diese Weise können aus im Materialhauptstrom unerwünschten Stoffen bestehende Bauteile separiert werden. Daher ist diese Technik in Abhängigkeit von dem jeweiligen Gebäude auch im kontrollierten Rückbau einsetzbar.

Das **Sägen** ist aufgrund der hohen Präzision und der zum Teil kleinen und leichten Arbeitsgeräte gut in kontrollierten Rückbaumaßnahmen einsetzbar. Eingesetzt wird diese Technik bei Teilabbrüchen oder als vorbereitende Maßnahme. Auch hier kann der Einsatz von Kühl- oder Spülwasser aufgrund von Kontaminationen oder durch Nässen von Bauteilen problematisch sein.

Bohren kann ähnlich wie das Sägen als vorbereitendes Verfahren für weitere Maßnahmen des kontrollierten Rückbaus angewendet werden. Als Maßnahme für die direkte Entfernung von Schad- oder Störstoffen aus Beton oder Mauerwerk ist dieses Verfahren nur bedingt geeignet, da nur geringe Massen bewegt werden können.

Die Vorgehensweise beim **Press- oder Scherschneiden** beinhaltet das Zerkleinern/Lösen einzelner Bauteile mittels Zerpressen. Hierfür wird durch hydraulisches Zusammendrücken von zangenförmig angeordneten Backen das dazwischen befindliche Bauteil zerpresst. Das Verfahren arbeitet ein vergleichsweise leise und erschütterungsarm. Pressschneiden kann für den Rückbau von Decken, Wänden und Stützen aus Mauerwerk, Beton und Stahlbeton eingesetzt werden. Durch die erreichbare Genauigkeit ist der Einsatz des Scherschneidens auch beim selektiven Rückbau möglich.

Der Nutzung des **Hochdruckwasserstrahlens** bei kontrollierten Rückbaumaßnahmen sind durch den damit verbundenen Abwasseranfall sehr enge Grenzen gesetzt. Zwar ist mit diesem Verfahren eine sorgfältiges Arbeiten ohne die Entstehung von Staub, Gasen oder Dämpfen möglich, doch durch mögliche Kontaminationen des Schneidwassers ist das Verfahren für viele Anwendungsfälle im selektiven Rückbau nicht sinnvoll einsetzbar.

Thermische Verfahren können sich ebenfalls zur genauen Trennung von einzelnen Bauteilen eignen. Ihr Einsatz ist jedoch ebenfalls sehr begrenzt, da aufgrund der dabei entstehenden hohen Temperaturen die Gefahr von Bränden oder Ausgasungen besteht.

Ist ein Gebäude nach Beräumung, Entfernung von Kontaminationen sowie dem Rückbau von in den Materialhauptströmen unerwünschten Stoffströmen entkernt, so können für den Rückbau des von Stör- und Schadstoffen befreiten Gebäudes alle konventionellen

Techniken eingesetzt werden. Dies bedeutet, dass – nach der Durchführung der entsprechenden Vorbereitungsmaßnahmen – auch Techniken wie

- Einschlagen
- Eindrücken und Einreißen
- Einziehen oder
- Sprengtechnik

im Rahmen eines selektiven oder kontrollierten Rückbau eingesetzt werden können.

2.5.2 Anwendung von Rückbauverfahren zur Separierung gipshaltiger Baustoffe

Nach der Nutzungsphase können Gipsplatten, Gipswandplatten und Gipskartonplatten durch Handabbruch relativ einfach selektiv zurückgebaut werden. Ebenso lassen sich Trockenestriche auf diese Weise getrennt von anderen Stoffströmen rückbauen. Die Entfernung von gipshaltigen Estrichen oder Gipsputzen, die relativ fest am jeweiligen Trägermaterial haften, ist indessen nicht einfach möglich. Hier müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, damit der Gips nicht in die Fraktionen des rezyklierten Zuschlags und damit in den daraus hergestellt Beton gelangt [36]. Dabei sind sowohl die nur dünn aufgetragenen Putzschichten als auch Estriche, die in einer Mächtigkeit von mehreren Zentimetern gegossen werden, problematisch.

Eine Möglichkeit zur Entfernung von flächig verteilten Baustoffen ist das Abtragen. Es kann in Abhängigkeit vom jeweiligen Bauvorhaben als vorbereitende Maßnahme durchgeführt werden und beispielsweise auch für die Entfernung von Kontaminationen eingesetzt werden. Schwimmend verlegte Estriche können mit handgeführten Geräten oder maschinell schichtweise durch Abstemmen oder Abschieben (mittels Minibagger) vor dem Rückbau der Betonteile entfernt werden [71, 81]. Weiterhin ist der Abtrag von Verbundestrichen mit Fräsen möglich.

Der Einsatz von Fräsen zur Entfernung von Gipsputzen auf Decken oder Wänden hat sich in der Praxis nicht bewährt. Aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaften kann Gipsputz beim Versuch des Abfräsens verschmieren ohne sich vom Trägermaterial zu lösen. Zudem ist die Anhaftung des Putzes gerade an Ziegelwänden so gut, dass eine Abtrennung mit herkömmlichen Methoden in der Regel nicht möglich ist. Weiterhin ist zu beachten, dass diese Arbeiten überwiegend mit handgeführten Werkzeugen durchgeführt werden müssen und die ausführenden Mitarbeiter, durch die Handhabung der Geräte sowie durch auftretende Stäube, Vibrationen und Lärmbelastungen besonderen Belastungen ausgesetzt werden.

Versuche zur Anwendung des Hochdruckwasserstrahlens zur Entfernung von Gipsputzen in einem Pilotprojekt waren nicht erfolgreich. Neben unerwünschten Nebeneffekten wie Lärm, abspritzenden Bruchstücken und Spritzwasser, war die angestrebte Wiederverwendung der Bauteile infolge des Angriffs der Flächen durch den Wasserstrahl nicht möglich [81]. Das

Problem der Abtrennung von Gipsputzen zur Entfernung von Sulfaten aus potentiellen RC-Baustoffen konnte entsprechend noch nicht zufriedenstellend gelöst werden.

2.6 Bauschuttzubereitungstechniken

Nach dem Rückbau eines Bauwerks kann der gewonnene Bauschutt durch einen Zubereitungsprozess zu einer rezyklierten Gesteinskörnung (RC-Zuschlag) zubereitet werden. In Abhängigkeit von der ursprünglichen Bausubstanz und vom gewählten Rückbauverfahren kann der entstandene Bauschutt sowohl bautechnische Störstoffe wie Gips, Kunststoffe oder Pappe enthalten als auch mit Schadstoffen belastet sein. Das gewählte Zubereitungsverfahren kann sowohl dazu dienen die Sortenreinheit zu erhöhen, als auch Stör- und / oder Schadstoffe zu entfernen.

Fast alle in der Bauschuttzubereitung eingesetzten Verfahren haben ihren Ursprung in der Zubereitung mineralischer Bauabfälle. Der für die Zubereitung erforderliche Aufwand gestaltet sich in Abhängigkeit von den bauvorhabensspezifischen Rahmenbedingungen unterschiedlich aufwändig. Dabei richten sich Verfahrensführung und eingesetzte Techniken sowohl nach den Möglichkeiten der jeweiligen Zubereitungsanlagen als auch nach den Anforderungen an die zu produzierende RC-Gesteinskörnung.

Da das Preisniveau von Gesteinskörnungen für die Baustoffherstellung vergleichsweise niedrig ist, müssen die gewählten Verfahren möglichst kostengünstig zu betreiben sein. Deshalb werden ein niedriger Energieverbrauch, ein geringer Wartungsaufwand und vor allem eine einfache und robuste Betriebsweise, die einen möglichst geringen Personalaufwand erfordert, angestrebt. Die Gewinnung von RC-Baustoffen aus sortenrein und stör- bzw. schadstoffarm gewonnenen Bauschuttfraktionen ist dabei deutlich weniger aufwändig als die Zubereitung eines heterogenen Bauschutts.

Üblicherweise erfolgt als erster Zubereitungsprozessschritt eine Vorsortierung, in der Fremd- und Störstoffe aus dem eigentlichen Bauschutt entfernt werden. Hierzu gehört beispielsweise das Klauben, unter dem die Entfernung von Fremdstoffen wie z.B. Holzstücken oder Kunststofffolien per Hand zu verstehen ist.

Grundsätzlich lassen sich die Zubereitungsprozessschritte von Bauschutt in die folgenden Verfahrensstufen differenzieren:

- Zerkleinerung und Aufschluss,
- Klassierung sowie
- Sortierung.

Die für die Zubereitungsprozessschritte eingesetzten Aggregate sind zusätzlich durch entsprechende Förder- und Aufgabearrichtungen miteinander verbunden [89]. Der beim Rückbau vorzerkleinerte und gegebenenfalls von Bewehrungsseisen befreite Bauschutt wird zunächst abgesiebt und das so erhaltene Vorsiebmaterial getrennt weiterverwertet. Danach erfolgt das Zerkleinern in Brechern. Dieser Verfahrensschritt dient der Gewinnung einer

entsprechend der geplanten Wiederverwertung möglichst optimalen Korngrößenverteilung und Kornform sowie dem Aufschluss von Fremd- und Störstoffen. Beim Brechen von Altbeton soll zudem der Verbund zwischen dem Zuschlagkorn und dem Zementstein gelöst werden. Anschließend erfolgt mittels einer Siebklassierung die Fraktionierung des zerkleinerten Bauschutts in die vorgesehenen Kornklassen.

Nachfolgende Sortierprozesse dienen zur Entfernung von Fremd- und Störstoffen und können bei selektiv bzw. sortenrein gewonnenem Bauschuttfractionen größtenteils entfallen. Zu den Sortierprozessen gehören sowohl Vorsortierungen, wie die Entfernung von groben Störstoffen oder z.B. Bewehrungsstahl als auch Sortierungsverfahren mit denen das zerkleinerte Material von weiteren Fremdstoffen befreit wird.

2.6.1 Zerkleinerung

Die Zerkleinerung in Recyclinganlagen dient neben dem Herabsetzen der oberen Korngröße und der Erzeugung bestimmter Korngrößenverteilungen dem Aufschließen von Einzelkomponenten aus Verbundstoffen wie Beton [66]. Weiterhin werden die Kornform sowie im Falle von Altbeton auch Porosität und Wasseraufnahme der hergestellten Gesteinskörnungen durch Wahl und Betrieb des Brechers beeinflusst [90]. Ziel der Produktion von Gesteinskörnungen für die Betonherstellung ist dabei eine möglichst kubische Kornform bei einem geringen Feinstkornanfall.

Die bei der Zerkleinerung von Bauschutt, insbesondere von Altbeton, am häufigsten eingesetzten Brechertypen sind Backenbrecher und Prallbrecher. Beide Brechertypen sind für die Zerkleinerung von hartem bis hin zu sehr hartem, mineralischem Bauschutt geeignet.

Backenbrecher sind robuste Aggregate, die das Aufgabegut durch Druck- und Zwangsbeanspruchung zerkleinern. Dies führt zu inneren Spannungen im Aufgabegut, die einen Bruch oder Gefügestörungen hervorrufen. Backenbrecher sind für den Durchsatz von großen Massen mit Anteilen von Störstoffen, wie z.B. Bewehrungsseisen, geeignet, dabei wird jedoch nur ein vergleichsweise geringer Zerkleinerungsgrad erreicht. Dementsprechend ist auch der unerwünschte Brechsandanfall gering. Backenbrecher zeichnen sich auch durch eine geringere Verschleißanfälligkeit aus.

Backenbrecher kommen entweder als Vorbrecher für die Aufbereitung in zweistufigen Anlagen oder als Produktbrecher in einstufigen Anlagen zum Einsatz. Aufgrund des geringen Zerkleinerungsverhältnisses, der schlechten Zerkleinerung von flachen Bestandteilen sowie des schlechten Aufschlusses z.B. von Bewehrungsstahl, kann der Backenbrecher nur bei geringen Ansprüchen an das Fertigprodukt als wirtschaftliche Lösung betrachtet werden. Mit Backenbrechern lässt sich ein Durchsatz von etwa 200 m³/h erreichen. Die Kornform ist plattig bis splittrig und die Korngröße des RC-Baustoffes kann bei einem Zerkleinerungsverhältnis von 10:1 zwischen 0 – 150 mm schwanken. Eine zusätzliche Entstaubung des Endproduktes ist nicht erforderlich. Für die Umwelt entstehen keine Belastungen infolge von Staub- und Lärmemissionen [91].

Prallbrecher zerkleinern Bauschutt unter Einsatz von Pralleisten und Prallplatten. Unter Aufwand von hoher kinetischer Energie wird das zu brechende Material zerkleinert. Durch die Prallbeanspruchung werden anders als bei der Zwangsbeanspruchung durch den Backenbrecher keine inneren Spannungen hervorgerufen, so dass der Aufprall zum sofortigen Bruch führt. Prallbrecher erreichen einen hohen Zerkleinerungsgrad, mit ihrem Einsatz ist entsprechend auch ein höherer Brechsandanfall verbunden. Ein Vorteil von Prallbrechern ist der hohe Anteil von Körnern mit kubischen Kornformen im Austragsgut. Dieser Brechertyp ist jedoch vergleichsweise stör anfällig, daher sollten die Größe des Aufgabegutes und der Anteil an Störstoffen wie Bewehrungsseisen begrenzt werden.

Mit Prallbrechern sind bei einem Durchsatz von 200 m³/h Korngrößen zwischen 0 – 80 mm herstellbar. Das große, realisierbare Zerkleinerungsverhältnis macht das Einhalten von hohen Endprodukthanforderungen möglich. Nachteilig ist allerdings der hohe Feinkornanteil des Brechgutes zu nennen, wodurch eine zusätzliche Entstaubung bzw. ein Staubniederschlag erforderlich ist. Zusätzlich wird die Umwelt in näherer Umgebung des arbeitenden Prallbrechers durch hohe Lärmemissionen belastet. Gegenüber dem Backenbrecher weist der Prallbrecher allerdings eine deutlich bessere Aufschlussfähigkeit von Verbundbaustoffen, wie Stahlbeton, auf. Da der Prallbrecher zudem bereits in einer Brechstufe im geschlossenen Kreislauf ein Mineralgemisch erzeugt und sich somit der Einsatz dieser Brecheinheit als recht kosteneffizient gestaltet, werden heutzutage zunehmend Prallbrecher für die Zerkleinerung von Bauschutt eingesetzt [91].

In mobilen Anlagen werden in der Regel Prallbrecher eingesetzt, die infolge des hohen Zerkleinerungsgrads eine direkt einsetzbare Körnung erzeugen können. In stationären Anlagen erfolgt die Zerkleinerung in der Regel mehrstufig [90, 92]. Als günstig hat sich der aufeinanderfolgende Einsatz von Backenbrechern und Prallbrechern erwiesen. So wird zum Beispiel eine Vorzerkleinerung von Bauschutt mit einem Backenbrecher durchgeführt, danach erfolgt ein weiterer Brechvorgang in Prallbrechern [93]. Untersuchungen haben gezeigt, dass durch diese zweistufige Verfahrensweise die durch anhaftende Zementmatrix bedingte Wasseraufnahme des Brechgutes im Vergleich zu einstufigem Brechen in Prall- oder Backenbrecher reduziert werden kann [21].

Ein weiteres Prozessziel der für die Zerkleinerung von Altbeton angewandten Verfahren kann das Aufschließen der Betonpartikel sein, indem durch eine abrasive Beanspruchung eine Ablösung von Anteilen der Zementmatrix vom Natursteinkorn erfolgt. Der abgeriebene Zementstein reichert sich in der Brechsandfraktion an und kann durch eine Siebklassierung abgetrennt werden. Es können weiterhin Schlagwalzenbrecher, Kreiselbrecher oder Kegelbrecher in Kombination mit Prallbrechern oder Backenbrechern als ergänzende Zerkleinerungsstufen wie z.B. als Vorbrecher eingesetzt werden. Andere Zerkleinerungsaggregate wie Hammerbrecher oder Shredder sind für die Aufbereitung von weicheren Materialien wie z.B. Holz geeignet und werden daher nicht für die Zerkleinerung von Bauschutt oder Altbeton eingesetzt [58, 89, 91, 94].

2.6.2 Klassierung

In der Bauschuttzubereitung werden in Abhängigkeit vom aufzubereitenden Material unterschiedliche Siebtypen wie beispielsweise Spannwellensiebe oder Schwingsiebe eingesetzt. Durch die Auswahl der Maschenweite der einzelnen Siebbeläge wird der gebrochene Bauschutt in die gewünschten Korngrößenklassen getrennt. Üblich ist die Klassierung in die Korngruppen 0/4, 4/8, 8/16, 16/32 und 32/45 mm. Der Anteil > 45 mm kann wieder der Zerkleinerungsstufe zugeführt werden. Kleinere oder mobile Bauschuttzubereitungsanlagen werden zum Teil auch als einfache Siebstationen für das beim Abbruch vorzerkleinerte Material betrieben.

Die Siebaggregate werden dabei zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt. Nachfolgende Ziele können mit einer Siebstufe verfolgt werden:

- die Begrenzung der oberen Korngröße oder die Erzeugung bestimmter Korngrößenverteilungen entsprechend der späteren Verwendung,
- das Abtrennen von Grobanteilen zum Schutz nachgeschalteter Brecher vor Überlastung und Beschädigung,
- das Abtrennen von Feianteilen zur Entlastung von Zerkleinerungsanlagen, zum Schutz vor Verschleiß bzw. zur Vermeidung von Verstopfungen oder
- die Vorbereitung der Sortierung.

In Einzelfällen kann eine Siebung auch als Sortierschritt erfolgen, beispielsweise wenn nur die Feinstfraktion einer Körnung mit Schadstoffen kontaminiert ist.

Der eigentliche Vorgang einer Siebklassierung erfolgt auf einem mehrfach wiederholten Größenvergleich der Körnungen mit den Sieböffnungen bei gleichzeitigem Transport des Gutes auf dem unbewegten oder bewegten Siebbelag. Der Trennvorgang und damit der Durchtritt des Feingutes durch die Sieböffnungen der Trennfläche mit einer vorgegebenen Sieböffnungsweite wird durch die Energie des bewegten Siebgutes ausgelöst. Unterstützend können schwingende oder rotierende Bewegungen des Siebbelags wirken. Die eingesetzten Siebverfahren lassen sich nach ihrer Funktionsweise, nach der Aufgabe im Verfahrensablauf sowie nach den Eigenschaften des Siebgutes unterscheiden.

Die Siebung in Siebmaschinen erfolgt mittels unterschiedlicher Roste. Hierbei ist prinzipiell zwischen festen und beweglichen Rosten zu unterscheiden. Feste Roste dienen in der Regel der Vorsortierung des Aufgabegutes. Diese dient durch Entfernung grober Störstoffe der Entlastung einer nachgeschalteten Zerkleinerungsstufe. Während entsprechend der Rostweite kleine Kornfraktionen den Rost passieren, werden die grobkörnigen Anteile durch Neigung des Rostes ausgefiltert. In die Kategorie der beweglichen Roste lassen sich Vibrationsroste, Rüttelroste, Stufenspaltroste sowie Rollenroste einordnen. Je nach Spaltweite und maximaler Aufgabekörnung kann beispielsweise mit dem Rollenrost ein Durchsatz von im Mittel 500 t/h erzielt werden. Die genannten Rostarten werden in unterschiedlichen Siebmaschinen, wie z.B. Schwingsiebmaschinen oder Trommelsiebe eingesetzt.

Schwingsiebe werden in Abhängigkeit von der Ausführung der Schwingung ihre Siebkastens in z.B. Kreisschwinger, Exzentrerschwingsiebe, Ellipsenschwinger oder Linearschwinger unterschieden. Zu den Rotationssiebmaschinen gehören beispielsweise Siebtrommeln. Die leicht geneigte Siebtrommel der Rotationssiebmaschine führt durch Rotation zur Separation der Kornfraktionen des eingespeisten Materials. Während das Feingut durch die Maschen des Siebes die Trommel verlässt, verbleibt das Grobgut im Inneren und kann durch Kippen der Trommel entfernt werden. Für die Bauschuttsiebung werden überwiegend robuste Siebtypen wie Trommelsiebe, Vibrationssiebe oder Spannwellensiebe eingesetzt [79]. Die Auswahl der einzusetzenden Siebe richtet sich nach den jeweiligen betrieblichen Anforderungen.

2.6.3 Sortierung

Ergänzt werden die Klassierverfahren durch Sortierverfahren. Die Sortierung wird als Trennung nach Stoffart unter Nutzung physikalischer Merkmale definiert [95]. In Bezug auf die Aufbereitung von Bauschutt bzw. Altbeton hat eine Sortierung vor allem die Entfernung von Störstoffen wie z.B. Ziegel-, Eisen- oder Holzanteilen zum Ziel. Bei bereits aufgeschlossenem Altbeton kann ein Sortierverfahren auch zur Trennung der Aufschlussprodukte Altzementstein und natürliche Gesteinskörnung eingesetzt werden, diese Zielrichtung wird jedoch selten verfolgt.

Eine Sortierung wird in der Bauschutttaufbereitung üblicherweise nur in stationären Bauschutttaufbereitungsanlagen eingesetzt. Die anzuwendenden Sortierverfahren hängen von der Art und der Menge der Störstoffe sowie der angestrebten Endproduktqualität ab und werden nach den genutzten physikalischen Eigenschaften, nach trockenen und nassen Verfahren sowie nach der entsprechenden Aufgabe im Verfahrensablauf klassifiziert. Dabei können auch Siebtechniken zur Sortierung eingesetzt werden. Nachfolgend findet sich in Tabelle 10 eine Aufstellung von Sortierverfahren die in der Bauschutttaufbereitung angewendet werden können.

Tabelle 10: Sortierverfahren für Bauschutt

Nassaufbereitung	Trockenaufbereitung
<i>Dichtesortierung</i>	<i>Dichtesortierung</i>
Schwimm-Sink-Sortierung	Windsichtung
Schwerkraftsortierung	<i>Sortierung in Magnetfeldern</i>
Filmschichtsortierung	Magnetscheidung
Aufstromsortierung	<i>Trennung nach optischen Eigenschaften</i>
Setzsortierung	Klauben
	Optoelektronische Sortierung
	<i>Sortierung nach mechanischen Eigenschaften</i>
	Selektive Zerkleinerung mit nachfolgender Klassierung

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass bei den in der industriellen Bauschutttaufbereitung eingesetzten Sortierstufen in der Regel trocken arbeitende Verfahren angewandt werden. Die für den Betrieb einer Nassaufbereitung erforderliche Führung eines Wasserkreislaufes gilt bei vielen Betreibern von Recyclinganlagen als zu aufwändig [96, 97]. Demgegenüber muss bei Trockenaufbereitungsverfahren die Materialfeuchtigkeitsgehalt im Sortierprozess berücksichtigt werden. Zudem können die Feinstkornanhaftungen durch die einzelnen Verfahren der Trockenaufbereitung nicht vollständig entfernt werden. Allerdings ist die **Trockenaufbereitung** energetisch günstiger als die Nassaufbereitung, da der Aufwand der Prozesswasseraufbereitung und -entsorgung entfällt.

Zu den trockenen Sortierverfahren in der Bauschutttaufbereitung gehört neben dem händischen Aussortieren (**Klauben**) von größeren Fremdkörpern bzw. Fremdstoffen als zurzeit wichtigstes Verfahren die Aussortierung von Bewehrungsseisen mit **Magnetabscheidern** [98]. Neben der Entfernung des Fremdstoffes Eisen aus dem Bauschutt lässt sich über den Schrottverkauf auch eine zusätzliche Einnahme erzielen.

Als Verfahren zur trockenen Dichtentrennung werden Windsichter in verschiedenen Ausführungen zur Aerosortierung eingesetzt [99, 100]. Sie dienen in der Regel zur Entfernung von leichten Störstoffen wie z.B. Holz, Styropor oder Kunststofffasern. Windsichter basieren auf dem Einsatz von Luft als Fluid für die Trennung. Nachteilig ist, dass für eine Aussortierung von Fremdstoffen ein ausreichender Dichteunterschied zwischen dem Bauschutt und dem Störstoff bestehen muss. Daher können mittels Windsichtung nur sehr leichte Störstoffe entfernt werden. Außerdem ist es notwendig, dass das Sortiergut eng klassiert ist, da sonst Klassierungseffekte die Dichtesortierung überlagern können [58]. Feine Fraktionen wie z.B. Betonbrechsand können nicht durch trockene Verfahren sortiert werden.

Ein weiteres Verfahren zur trockenen Sortierung ist die **optische Sortierung**. Voraussetzung hierfür ist, dass die zu trennenden Mineralien sich in Farbe oder Helligkeit erkennbar unterscheiden. In Abhängigkeit von den zu sortierenden Korngrößen und der Menge auszusortierender Anteile können mit diesem Verfahren Durchsätze von über 100 t/h Körnung sortiert werden [101]. Versuche zur Aufbereitung von gemischtem Bauschutt sind mit einer optischen Sortiereinheit, die mit einer sensorgestützten Hochgeschwindigkeitskamera zur Farbidentifizierung ausgerüstet war, durchgeführt worden. Gute Ergebnisse konnten dabei für die Aussortierung von Holz erzielt werden [97]. Über Untersuchungen zur optischen Sortierung von mineralischen Körnungen wie beispielsweise Beton und Ziegel liegen bisher wenige Informationen vor. Da die optische Sortierung auch ein vergleichsweise teures Verfahren ist, wird sie in der Produktion von Sekundärbaustoffen nicht angewandt [102].

Ein großer Vorteil von **Nassaufbereitungsverfahren** zur Sortierung ist die gleichzeitige Entfernung von auswaschbaren Schad- oder Störstoffen [103] sowie die vergleichsweise geringe Staubentwicklung während des Aufbereitungsprozesses. Weiterhin ist keine so enge Klassierung des Ausgangsmaterials erforderlich und auch Sandfraktionen können mit einem Nassverfahren aufbereitet werden [96]. Die Wirkprinzipien der meisten Nasssortierungsverfahren für Bauschutt basieren auf den unterschiedlichen Dichten der zu trennenden Materialien und den daraus resultierenden Unterschieden in den Sinkgeschwindigkeiten. Die als Wertstoff auszubringenden mineralischen Sekundärrohstoffe haben eine höhere Dichte als die auszusortierenden Fremdstoffe wie Holz, Styropor oder Leichtbaustoffe.

Nassverfahren zur Dichtentrennung weisen gegenüber trockenen Sortierverfahren eine weitaus höhere Trenndichte und Trennschärfe auf, so dass qualitativ höherwertige Produkte hergestellt werden können [96]. Die Qualität nass aufbereiteter RC-Gesteinskörnungen übertrifft die der RC-Körnungen aus trockener Aufbereitung in der Regel deutlich, daher kommen Nassaufbereitungsverfahren zur Anwendung, um Gesteinskornqualität für Konstruktionsbeton des RC-Baustoffes zu erhalten. Zudem kann durch die Nassaufbereitung die Abtrennung von Schadstoffen aus kontaminierten Bauabfällen erfolgen [104]. Die Effektivität der jeweiligen Verfahren ist dabei abhängig von der Korngrößenverteilung und der Dichte des zu trennenden Körnerkollektivs.

Die **Schwimm-Sink-Sortierung** trennt zwei feste Stoffe unterschiedlicher Dichte in einer Trennflüssigkeit. Die Dichte des Trennfluids, bei der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe in der Regel eine wässrige Schwerstoffsuspension, wird in Abhängigkeit vom Aufbereitungsziel festgelegt, sie liegt zwischen den Dichten der zu trennenden Stoffe. Für die Trennung von Bauschutt sollten bei der Trennung von Bauschutt Trenndichten von $1,4 \text{ g/cm}^3$ und höher realisiert werden [96]. Zur Abtrennung von Kunststoff- oder Holzresten aus Ziegelschutt oder Altbeton kann Wasser als Trennflüssigkeit eingesetzt werden. Im Sortierungsprozess sinkt der Stoff mit der höheren Dichte zu Boden, während der zweite Stoff aufgrund seiner geringeren Dichte auf der Oberfläche schwimmt, so dass beide Stoffarten getrennt erfasst werden können. Im Vergleich zu anderen Dichtesortierprozessen zeichnet sich dieses Verfahren durch seine hohe Trennschärfe aus, auch bei geringen Dichtedifferenzen können sehr gute Trennungen erzielt werden [58].

Im Feinkornbereich können **Hydrorinnen**, ausgebildet als Wendelscheider oder Sortierspiralen, zur Schwerkräftsortierung eingesetzt werden. Sortierspiralen sind Rinnen in spiralförmiger Ausbildung, auf denen Feststoffe mit unterschiedlichen Dichten nach ihrer Relativbewegung im Verhältnis zur Schwerkraft im flüssigen Medium, in der Regel Wasser, sortiert werden [105]. Auf die Partikel wirken neben der Schwerkraft kombinierte Einflüsse aus Zentrifugalkraft, Absetzgeschwindigkeit sowie quergerichteter Transversalströmungen. Die Partikeltrennung wird bei dieser Sortierung auch von Klassierungseffekten beeinflusst. Sie sind für den Einsatz bei Korngemischen mit einem hohen Leichtgutanteil und großen Dichteunterschieden geeignet [106].

Nach dem Prinzip der Filmschichtsortierung arbeiten **Hydrobandabscheider**. Hier werden aus Korngemischen Körner mit größerer Dichte durch den Einfluss von Fluidströmungen über eine geneigte Fläche angereichert. Bei Partikeln gleicher Korngröße, jedoch unterschiedlicher Dichte, herrschen zwischen den Partikeln und der Festkörperfläche unterschiedliche Reibungskräfte, die der Schleppkraft der Fluidströmung entgegenwirken. Daraus resultieren unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten, die für die Sortierung genutzt werden können. Neben der Dichte sind auch Korngrößenspektrum, Kornform sowie Oberflächenbeschaffenheit der Körner und der Festkörperfläche sowie die Eigenschaften der Fluidströmung wichtige Einflussfaktoren für den Erfolg der Sortierung. In der Bauschutt-aufbereitung wird mit dem Aquamator das Verfahren der Filmschichtsortierung bereits seit einigen Jahren großtechnisch zur Entfernung von Leichtstoffen umgesetzt [92, 107, 108].

Bei der **Aufstromsortierung** wird die unterschiedliche Endfallgeschwindigkeit von Partikeln unterschiedlicher Dichte, jedoch mit gleicher Größe in einem kontinuierlich aufsteigendem Fluidstrom genutzt. Da die Endfallgeschwindigkeit korngrößenabhängig ist, sollte die Sortierung innerhalb eines engen Kornspektrums erfolgen, um eine saubere Trennung zu erreichen. Umgesetzt wurde dieses Sortierprinzip beispielsweise im Schnecken-Aufstromklassierer [96, 108].

Anwendung in der Nassaufbereitung von Bauschutt findet auch die **Setztechnik**. Dieses Verfahren basiert ebenfalls auf der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeit von Körnern unterschiedlicher Dichte in einem Fluid. Im Setzprozess wird das Aufgabegut in einer Setzmaschine durch ein von unten pulsierend strömendes Fluid (bei der Bauschutt-aufbereitung Wasser) aufgelockert. Mit dem aufströmenden Fluid werden die Reibungskräfte zwischen den einzelnen Körnern weitgehend aufgehoben. Die Körner heben sich mit dem Fluid und befinden sich in der Schwebelage und sinken mit dem Abstrom wieder ab. Auf diese Weise erfährt das Stoffgemisch beim Durchgang durch die Setzmaschine eine Schichtung nach der Dichte. Leichtgut und Schwergut können am Anlagenausstritt in Abhängigkeit von den Austrittsöffnungen getrennt erfasst werden. Die Nutzung der Setztechnik ist vergleichsweise unkompliziert und mit relativ geringen Umweltbelastungen verbunden [109]. Das Verfahren wird schon seit einigen Jahren großtechnisch für die Aufbereitung von Bauschutt eingesetzt [103, 108-111].

2.6.4 Wahl der Aufbereitungsanlage

Die Aufbereitung des Bauschutts kann in mobilen Anlagen oder in stationären Anlagen erfolgen. Mobile Anlagen sind insbesondere für den direkten Einsatz auf Baustellen und für Baustellen mit einem geringen Bauschuttanfall geeignet. Durchsätze liegen zwischen 20-120 t/h [58]. Eine Ausnahme ist der Autobahnbau, hier kann das beim Straßenrückbau und durch Brechen und Klassierung aufbereitete Material gegebenenfalls direkt, z.B. als Tragschicht, wieder für den neuen Verkehrsweg recycelt werden.

Mobile Anlagen bestehen aus wenigen Komponenten und einer Transporteinheit. Üblich sind Aggregate zur Absiebung, Klassierung und Eisenseparation. Die Beschickung der Anlagen erfolgt über Radlader. Nachteilig sind hohe Betriebskosten aufgrund geringer Durchsätze sowie beschränkte Aufbereitungsmöglichkeiten infolge der begrenzten Variationsmöglichkeiten der vergleichsweise kleinen Anlagen. Demgegenüber stehen verschiedene Vorteile wie beispielsweise der Entfall des Transportaufwandes zu einer stationären Aufbereitungsanlage und die schnelle Rückführung der aufbereiteten Körnungen in den Stoffkreislauf. Grundsätzlich problematisch ist die analytische Kontrolle der Qualität der Gesteinskörnungen, da die beschränkten Platzverhältnisse auf den meisten Baustellen eine Zwischenlagerung der Bauschuttkörnungen nicht ermöglichen [58].

Stationäre Anlagen ermöglichen aufgrund Ihrer Größe und Ausstattung die Erzeugung guter Produktqualitäten bei großen Durchsatzleistungen. Sie sind oftmals mit zwei Brechstufen, einem zusätzlichen Vor- oder Nachbrecher, sowie mit zusätzlichen Sortieraggregaten wie Lesestationen oder Windsichtern ausgestattet. Nassaufbereitungsverfahren werden aufgrund des höheren Betriebsaufwandes nur in stationären Anlagen betrieben. Stationäre Anlagen sind fest installiert und eingehaust, was wiederum Schall- und Staubemissionen deutlich reduziert. Die nachfolgende Abbildung 24 zeigt als Beispiel ein Verfahrensschema für eine mehrstufige Bauschuttanfallaufbereitung in einer stationären Anlage.

Durch den höheren Aufwand bei der Aufbereitung können entsprechend auch bessere Produktqualitäten der erzeugten RC-Baustoffe erreicht werden und auch die Kontrolle der Qualität der erzeugten Gesteinskörnungen ist einfacher. Aufwändigere Siebstationen ermöglichen zudem die Aufteilung der Körnungen in ein exakteres Kornspektrum, was wiederum die Produktvielfalt erhöht. Einem deutlich höheren Investitionsvolumen stehen höhere Erlöse aufgrund besserer Produktqualitäten und teilweise niedrigere Produktionskosten pro Tonne RC-Körnung gegenüber.

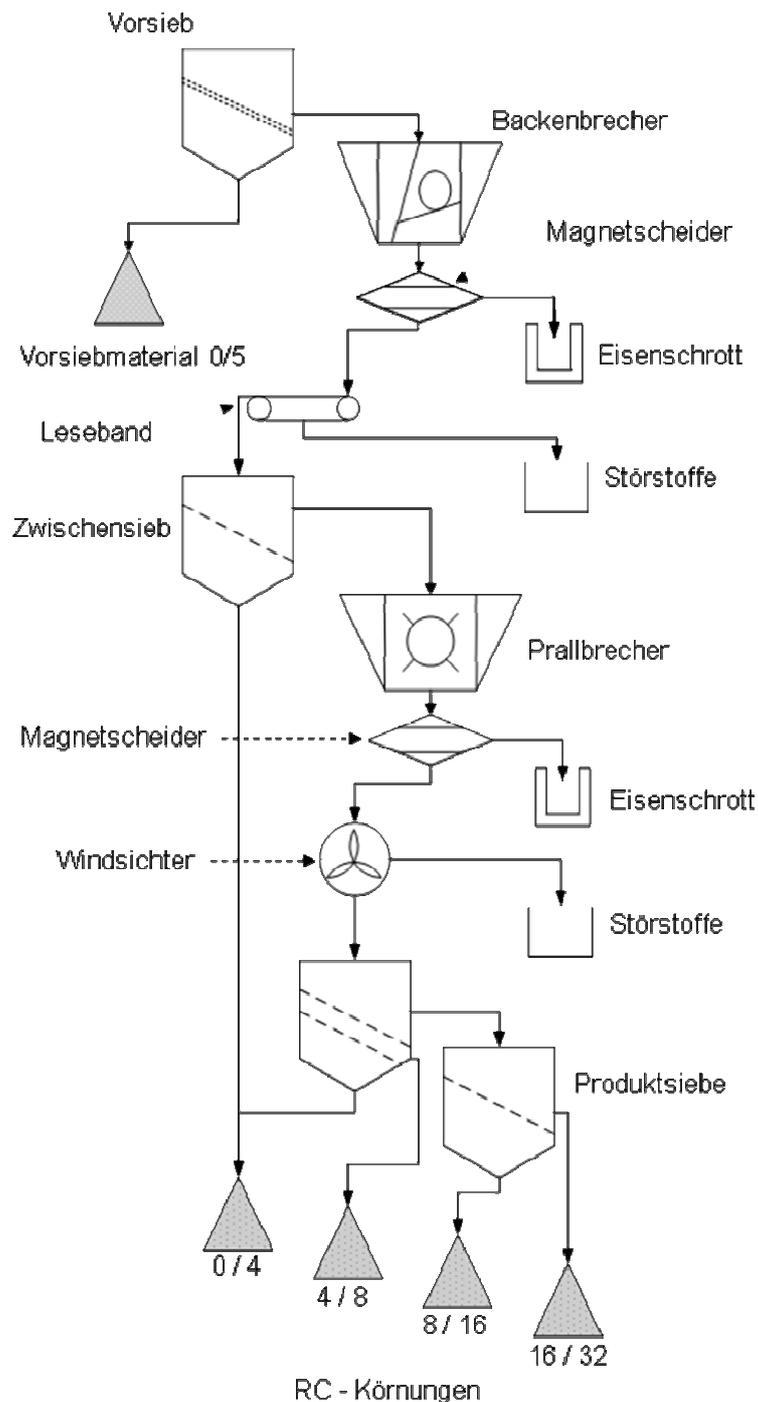


Abbildung 24: Beispiel einer stationären Bauschuttzubereitungsanlage

Ergänzend sind noch semimobile Aufbereitungsanlagen zu nennen, die aus mehreren transportfähigen Einheiten bestehen. Mit diesen Anlagen sind Durchsatzleistungen bis 200 t/h möglich [58], der Transport von semimobilen ist jedoch vergleichsweise aufwändig. In der Praxis spielen sie eine untergeordnete Rolle.

2.6.5 Versuche zur Aufbereitung gipshaltiger Baustoffe

Versuche zur Sortierung von Gips und Beton mittels Setztechnik wurden an der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt (AiF Pro Inno II – KF 0497501KF7). Ziel war es, den Einsatz der Setzmaschinenteknik bei der Sortierung der Gipsbestandteile aus Abbruchgemischen zu prüfen und zu optimieren [112].

Als Probematerial wurden sowohl selbst hergestellte Beton-Gips-Gemische als auch Praxisgemische, die aus Plattenbauabbruch stammten, verwendet. Nach der Optimierung der Setzmaschineneinstellungen wurden der Einfluss des Gipsgehaltes und anderer Parameter auf das Trennergebnis untersucht. In den Versuchsserien konnte nachgewiesen werden, dass die Abtrennung des Gipses aus der aufgegebenen tertiären Mischung möglich ist. Weiterhin konnte eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Gipsgehalt im Aufgabematerial und dem Gipsgehalt im Produkt der Setzmaschine festgestellt werden. Es wurde im Mittel eine Abreicherung des Gipsgehaltes des Produktes auf ein Drittel des Gehaltes im Aufgabematerial erreicht. Maßgebend für den erreichten Trenneffekt ist der Dichteunterschied zwischen den zu trennenden Komponenten: je größer der Dichteunterschied ist, desto höher ist auch der Trenneffekt.

Zudem konnte festgestellt werden, dass auch eine Sortierung feiner Fraktionen (2/4 mm) möglich ist, wenn die Maschineneinstellungen entsprechend angepasst werden. Bei den Experimenten mit Praxisgemischen ergab sich jedoch ein ungünstiges Trennverhalten, das vermutlich durch den hohen Gehalt der Fraktion 0/4 mm verursacht wurde. Deshalb sollte bei der Anwendung dieses Verfahrens das Aufgabematerial zunächst konventionell durch Brechen und Klassieren aufbereitet werden, um dann die Korngruppen 4/32 oder 4/45 der Setzmaschine aufzugeben. Durch die Sortierung mittels Setzmaschine ist eine deutliche Absenkung des Gipsgehaltes des aufbereiteten Betonbruchs möglich. Auch bei mittleren und hohen Gipsgehalten im Inputmaterial können - nach einem zweimaligen Durchlauf des Materials durch die Setzmaschine – die Anforderungen nach DIN 4226-100 erfüllt werden.

3 Teilvorhaben 2: Auswahl unterschiedlicher Abbruch- /Aufbereitungstechniken und Probenahme

Im Rahmen des Projektes wurden auch Stichproben in verschiedenen Bauschutt aufbereitungsanlagen entnommen. Weiterhin wurden ein Abbruchprojekt und die daran anschließende Bauschutt aufbereitung intensiver begleitet.

3.1 Probenahmen in verschiedenen Bauschutt aufbereitungsanlagen

3.1.1 Probenahme in einer semimobilen Bauschutt aufbereitungsanlage

Um Material aus realen Aufbereitungsanlagen in unterschiedlichen Regionen untersuchen zu können wurde u.a. eine semimobile Bauschutt aufbereitungsanlage in Hessen beprobt. Die Anlage wurde für den mobilen Einsatz konzipiert, wird derzeit aber stationär auf der Betriebsstätte eines mittelständischen Unternehmens betrieben. Die Durchsatzleistung beträgt ca. 100.000 Tonnen pro Jahr.

Der aufzubereitende Bauschutt wird von externen Unternehmen angeliefert. Angaben über das Abbruchobjekt, aus dem das Material stammte, lagen nicht vor. Das Aufgabematerial wird zunächst über eine Vorsiebinrichtung einem Backenbrecher zugeführt (siehe Abbildung 25). Das Vorsiebmaterial wird separat gelagert und einer gesonderten Verwertung zugeführt.



Abbildung 25: Aufgabeeinrichtung der semimobilen Bauschutt aufbereitungsanlage

Im Backenbrecher wird das Material auf eine Korngröße < 32 mm gebrochen. Anschließend erfolgt an einer Lesestation die manuelle Aussortierung von Fremd- und Störstoffen (siehe Abbildung 26).



Abbildung 26: Brecherausgang mit anschließender Magnetabscheidung und Handsortierung

Danach wird das Material nicht klassiert, sondern in der entstandenen Körnung $0/32$ mm in der Regel für die Verwertung im Straßenbau bereit gestellt (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27: Aufbereiteter Bauschutt der Körnung $0/32$

3.1.2 Analyseergebnisse von RC-Material aus einer semimobilen Anlage

Die Probenahme erfolgte am Austrag der Aufbereitungsanlage aus der laufenden Anlage. Das Austragsmaterial bestand aus einer Mischung aus Beton und Ziegel und wurde nicht als RC-Gesteinskörnung Liefertyp 1 nach DIN 4226-100 eingestuft. Es wurden vier Proben entnommen, im Labor homogenisiert und mittels Probenteilung wurde eine Mischprobe hergestellt. Diese wurde wiederum durch Siebung in die Fraktionen 0/2 mm, 2/4 mm und 4/32 mm klassiert.

Da aufgrund bisheriger Erkenntnisse davon ausgegangen werden konnte, dass sich Schad- und Störstoffe vornehmlich in den feinen Fraktionen anreichern, wurden zunächst nur die feinen Fraktionen näher betrachtet. Hierzu wurden (in Anlehnung an DIN 38414-4, Schüttelverfahren) 24-h-Eluate in den Verhältnissen Feststoff zu Wasser 1:10 und 1:2 hergestellt. Die Verdünnung 1:10 wurde ausgewählt, da für Vergleiche mit bekannten Daten zu Sulfatwerten fast ausschließlich mit dieser Verdünnungsstufe ermittelte Werte zur Verfügung stehen. In Bezug auf das im Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung vom Januar 2011 enthaltene Verfahren zur Eluatherstellung mit dem Feststoff zu Wasserverhältnis 1:2 wurden zum Vergleich auch Eluate mit diesem Feststoff/Wasserverhältnis untersucht.

Aus den Eluaten wurden Sulfat und Chlorid sowie ausgewählte Schadstoffe analysiert. Die Bestimmung von Sulfat und Chlorid erfolgte aus den Eluaten in Anlehnung an DIN 38414-4. Für die Messungen wurde ein Ionenchromatograph DX 320 (Dionex) verwendet. Die nicht angesäuerten Proben wurden über Spritzenfilter (Roth) mit 45 µm Porenweite filtriert und anschließend analysiert.

Schwermetalle wurden mittels Atomemissionsspektroskopie mit Atomisierung im induktiv gekoppelten Plasma (ICP-OES) nach DIN EN ISO 11885 gemessen. Die PAK wurden mit dem Verfahren der High Pressure Liquid Chromatographie (HPLC) nach DIN 38414 Teil 2 analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen finden sich nachfolgend in Tabelle 11 und Tabelle 12. Es wurden Doppelbestimmungen durchgeführt, die jeweils noch doppelt gemessen wurden. Die in der Tabelle aufgeführten Werte stellen entsprechend den Mittelwert aus den vier gemessenen Einzelwerten dar.

Tabelle 11: Ergebnisse der Analysen der 24-h-Eluate der RC-Körnungen aus Hessen (Verdünnungsstufe 1:10)

Eluat 1:10			
Parameter		0/2 aus 0/32	2/4 aus 0/32
Feuchte	[%]	8,07	4,95
pH-Wert		12,45	12,43
Leitfähigkeit	[mS/cm]	3,320	2,880
Chlorid	[mg/l]	14,69	10,05
Sulfat	[mg/l]	17,45	18,45
Arsen	[µg/l]	2,0	3,0
Chrom	[µg/l]	13,0	7,0
Kupfer	[µg/l]	65,0	22,0
Quecksilber	[µg/l]	3,0	< 1
Nickel	[µg/l]	20,0	5,0
Vanadium	[µg/l]	1,0	1,0
Zink	[µg/l]	79,0	56,0
PAK	[µg/l]	9,57	9,84

Tabelle 12: Ergebnisse der Analysen der 24-h-Eluate der RC-Körnungen aus Hessen (Verdünnungsstufe 1:2)

Eluat 1:2			
Parameter		0/2 aus 0/32	2/4 aus 0/32
Feuchte	[%]	8,07	4,95
pH-Wert		12,78	12,75
Leitfähigkeit	[mS/cm]	6,945	6,175
Chlorid	[mg/l]	48,22	30,20
Sulfat	[mg/l]	15,72	14,48
Arsen	[µg/l]	3,0	3,0
Chrom	[µg/l]	11,0	8,0
Kupfer	[µg/l]	162,0	58,0
Quecksilber	[µg/l]	< 1	< 1
Nickel	[µg/l]	46,0	11,0
Vanadium	[µg/l]	< 1	< 1
Zink	[µg/l]	126,0	154,0
PAK	[µg/l]	9,38	15,62

Die Untersuchungen zeigten nur geringfügige Belastungen der untersuchten feinen Körnungen, so dass auf eine Untersuchung der gröberen Körnungen verzichtet wurde. Die Sulfatwerte lagen aufgrund des offensichtlich nur gering mit Gipsrückständen belasteten Eingangsmaterials unter den Werten nach LAGA Z0.

3.1.3 Probenahme in einer stationären Bauschutt aufbereitungsanlage

Die im Ruhrgebiet gelegene Anlage wird stationär betrieben und gehört zu einer größeren Unternehmensgruppe. Die Durchsatzleistung der Anlage beträgt ca. 250.000 Tonnen pro Jahr. Auch hier wird der Bauschutt von externen Unternehmen angeliefert und die Herkunft des entnommenen Probematerials ist nur bedingt nachvollziehbar.

Vor der Aufgabe des angelieferten Bauschutts erfolgt auch in dieser Anlage zunächst eine Absiebung von Vorsiebmaterial der Körnung 0/5 mm. Dieses wird in der Regel als Z 1.2-Material nach LAGA eingestuft und als solches verwertet. Danach erfolgt der erste Zerkleinerungsschritt des Materials in einem Backenbrecher. Körnungen < 60 mm werden danach mittels Magnetscheidung von eisenhaltigen Bestandteilen getrennt und anschließend nochmals auf Korngrößen < 45 mm zerkleinert. Material > 60 mm wird zunächst in einer Prallmühle nachzerkleinert und danach werden – ebenfalls mit einem Magnetscheider – Eisenbestandteile entfernt. Als weiterer Sortierschritt der nun vorliegenden Körnung 0/45 mm folgt ein nachgeschalteter Windsichter zur Entfernung von leichten Störstoffen wie Holz oder Kunststoffpartikeln (Abbildung 28).



Abbildung 28: Austragsmaterial der Windsichtung

Als letzter Aufbereitungsschritt erfolgt eine Klassierung der Körnung 0/45 mm in einem Mehrwegsieb. Das Material kann dabei in die Körnungen 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm und 16/45 mm aufgeteilt werden (Abbildung 29). Bedarfsweise wird – in Abhängigkeit von der geplanten Wiederverwertung des RC-Materials – auch die Körnung 0/45 mm als Endprodukt produziert.



Abbildung 29: Austrag der RC-Brechsandfraktion 0/4 mm aus der Mehrwegsiebung

3.1.4 Analyseergebnisse von RC-Material aus einer stationären Anlage

Im Rahmen der Probenahme wurden die RC-Produkte aus gemischtem Bauschutt (Beton und Ziegel) der Körnung 0/45 mm und die Brechsandfraktion 0/4 mm sowie ein separat produzierter Betonbrechsand beprobt. Die Probenahmen erfolgten am Austrag der Aufbereitungsanlage aus der laufenden Anlage (Abbildung 29). bzw. aus Haufwerken der produzierten RC-Produkte.

Die entnommenen Proben wurden im Labor homogenisiert. Durch Probenteilung wurden Mischproben hergestellt und diese wurden wiederum durch Siebung in die Fraktionen 0/2 mm, 2/4 mm und > 4 mm klassiert. Die Untersuchung der Körnungen erfolgte gemäß der in Abschnitt 3.1.2 aufgeführten Vorgehensweise und den entsprechenden Analysemethoden in 24-h-Eluaten.

Die Auswertung der Eluatuntersuchungen ergab in allen untersuchten Proben nur geringe Sulfatgehalte < 30 mg/l und ebenfalls nur geringe Konzentrationen der sonstigen gemessenen Parameter. Beispielhaft sind in Tabelle 13 und Tabelle 14 die Ergebnisse des auf die Körnungen 0/2 mm und 2/4 mm abgeseibten Endprodukts (0/45 mm) dargestellt.

Tabelle 13: Ergebnisse der Eluatanalysen der RC-Körnungen aus NRW
(Verdünnungsstufe 1:10)

Eluat 1:10			
Paramter		0/2 aus 0/45	2/4 aus 0/45
Feuchte	[%]	8,43	4,75
pH-Wert		12,30	12,41
Leitfähigkeit	[mS/cm]	4,470	2,940
Chlorid	[mg/l]	13,62	9,27
Sulfat	[mg/l]	16,16	18,01
Arsen	[µg/l]	1,5	0,5
Chrom	[µg/l]	4,5	5,0
Kupfer	[µg/l]	27,0	8,5
Quecksilber	[µg/l]	<0,0	<0,0
Nickel	[µg/l]	7,5	0,5
Vanadium	[µg/l]	<0,0	<0,0
Zink	[µg/l]	80,5	54,0
PAK	[µg/l]	4,59	6,76

Tabelle 14: Ergebnisse der Eluatanalysen der RC-Körnungen aus NRW
(Verdünnungsstufe 1:2)

Eluat 1:2			
Paramter		0/2 aus 0/45	2/4 aus 0/45
Feuchte	[%]	8,43	4,75
pH-Wert		12,34	12,45
Leitfähigkeit	[mS/cm]	6,945	6,175
Chlorid	[mg/l]	39,37	28,09
Sulfat	[mg/l]	14,48	17,74
Arsen	[µg/l]	1,5	3,0
Chrom	[µg/l]	4,0	6,0
Kupfer	[µg/l]	67,5	57,0
Quecksilber	[µg/l]	<0,0	<0,0
Nickel	[µg/l]	19,5	3,5
Vanadium	[µg/l]	<0,0	<0,0
Zink	[µg/l]	199,0	172,0
PAK	[µg/l]	4,53	7,73

3.2 Beschreibung eines Abbruchprojektes in Thüringen

3.2.1 Beschreibung des abzubrechenden Gebäudes

Beim Abriss von fünfgeschossigen Ost-Plattenbauten zweier Straßenzüge im Wohngebiet Gera Bieblach-Ost wurde ebenfalls Probenmaterial entnommen.

Für die Untersuchungen wurden zum einen die verschiedenen Originalbauteile (Tabelle 3.1) in den baugleichen Gebäude beprobt, um den Sulfatanteil im Ausgangsmaterial festzustellen bzw. abzuschätzen. Während der Probenahme lagen die Bauteile als großes Haufwerk vor und wurden mit Baggern grob sortiert (Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32). Zum anderen wurden Proben entlang der Aufbereitungsstrecke in der Bauschutt aufbereitungsanlage entnommen, um den Stofffluss des Sulfates nachvollziehen zu können.



Abbildung 30: Abbruch der Plattenbauten in Gera Wohngebiet Biblach – Ost [52]



Abbildung 31: Bagger bei der Vorsortierung und Vorzerkleinerung Vorort (links) und Badzellenwand (rechts)



Abbildung 32: Fußbodenestrich (Anhydritestrich)

Das Ausgangsmaterial war Plattenbaumaterial ohne Entkernung. Es gab keinen selektiven Rückbau. Außer Fenstern und Türen wurde vorher nichts entfernt. Im Bauschutt waren unter anderem auch große Mengen an Metallschrott zu finden.

Anhand der analysierten Bauteile und der Planungsunterlagen wurden die zu erwartenden Gipsmengen bzw. Sulfatwerte hochgerechnet. Es wurde von einem P2-Standardgebäude mit 40 Wohneinheiten mit jeweils 60 m² Wohnfläche ausgegangen. Berechnungen ergaben, dass der prozentuale Masseanteil an Gipsbaustoffen ca. 3 M.-% (ohne Badzellen) bzw. ca. 3,5 M.-% (mit Badzellen) ausmacht. Das zu erwartende Aufkommen an Sulfat im Abbruchmaterial liegt zwischen 1,2 M.-% (ohne Badzelle) und 1,7 M.-% (mit Badzelle).

3.2.2 Beschreibung der untersuchten Bauschuttzubereitungsanlage

Die untersuchte Bauschutt-Recycling-Anlage besteht aus einer zweistufigen Brechanlage, einem Sortierkomplex und einer nachgeschalteten Siebstation. Innerhalb des Anlagenkomplexes sind alle Verfahrensschritte trockene Verfahren der mechanischen Aufbereitung. Nur als Bedüsung zur Staubbekämpfung an einzelnen Aggregaten wird Wasser eingesetzt. Der erreichbare Maximaldurchsatz dieser Anlage liegt bei 200 t/h bei einer installierten Leistung von 750 kW [52].

In Abbildung 33 ist das Grundfließbild der Anlage dargestellt. Das Abbruchmaterial wird mit dem LKW zur Anlage gebracht. Dieser passiert an der Zufahrt zunächst die Waage. Durch verschiedene Maßnahmen (Lieferbedingungen, Erklärungen der Anlieferer, Begutachtung und Analyse des gelieferten Materials) wird abgesichert, dass die angelieferten Stoffe frei von Kontaminationen sind. Anschließend wird das Material auf einer Halde zwischengelagert. Dies erfolgt getrennt nach Ziegelbruch, Betonteile, Straßenaufbruch und Baustellenmischwertstoffen. Als Vorbrecher kommt ein Schlagwalzenbrecher mit integriertem Kettenförderer zum Einsatz, der mit einem Radlader bestückt wird. Eisenteile werden nach dem Schlagwalzenbrecher durch einen Magnetscheider abgeschieden und mit dem Bagger abtransportiert. Auf einem Diskscheider (Siebmaschine Typ HEWA-Tec mit Vibrationsförder-

rinne und Schwergutsichter) mit Überbandmagneten erfolgt anschließend die Vorabsiebung, bei der zwei Fraktionen entstehen – der Durchgang 0/56 mm und der Überlauf > 56 mm.

Der Durchgang durch den Diskscheider (Fraktion 0/56 mm) wird im Windsichter von Leichtbestandteilen (Styropor, Holz, u.a.) gereinigt und über das Haldenabzugsband aufgehaldet.

Der Überlauf vom Diskscheider wird auf dem Leseband (Gurtförderer) von Fremdstoffen befreit bzw. verwertbare Bestandteile wie Holz, Plaste, Glas, Metalle (Nichteisen), Papier und Pappe werden händisch selektiert. Des Weiteren werden dort Abfälle zur Beseitigung wie Isoliermaterial und nichtmineralische Sortierreste abgetrennt. Im Anschluss erfolgt das Nachbrechen des Materials > 56 mm im Prallbrecher PB 1313SE mit Magnetabscheider. In der nachfolgenden Siebung mittels Vibrationssieben entsteht nach der 1. Stufe das Produkt 0/32 mm, welches einer weiteren Eisenabscheidung mittels Überbandmagneten unterzogen wird. Dieses wird auf einem Zwischenlager zeitlich vorgehalten und die Bestandteile > 32 mm abgetrennt. Die sich anschließende 2. Siebstation klassiert das Produkt in die Fraktionen 0/4 mm, 4/16 mm und 16/32 mm. Diese Fraktionen werden getrennt voneinander zwischengelagert bis sie als Produkt mit einem LKW über die Fahrzeugwaage das Werktor wieder verlassen.

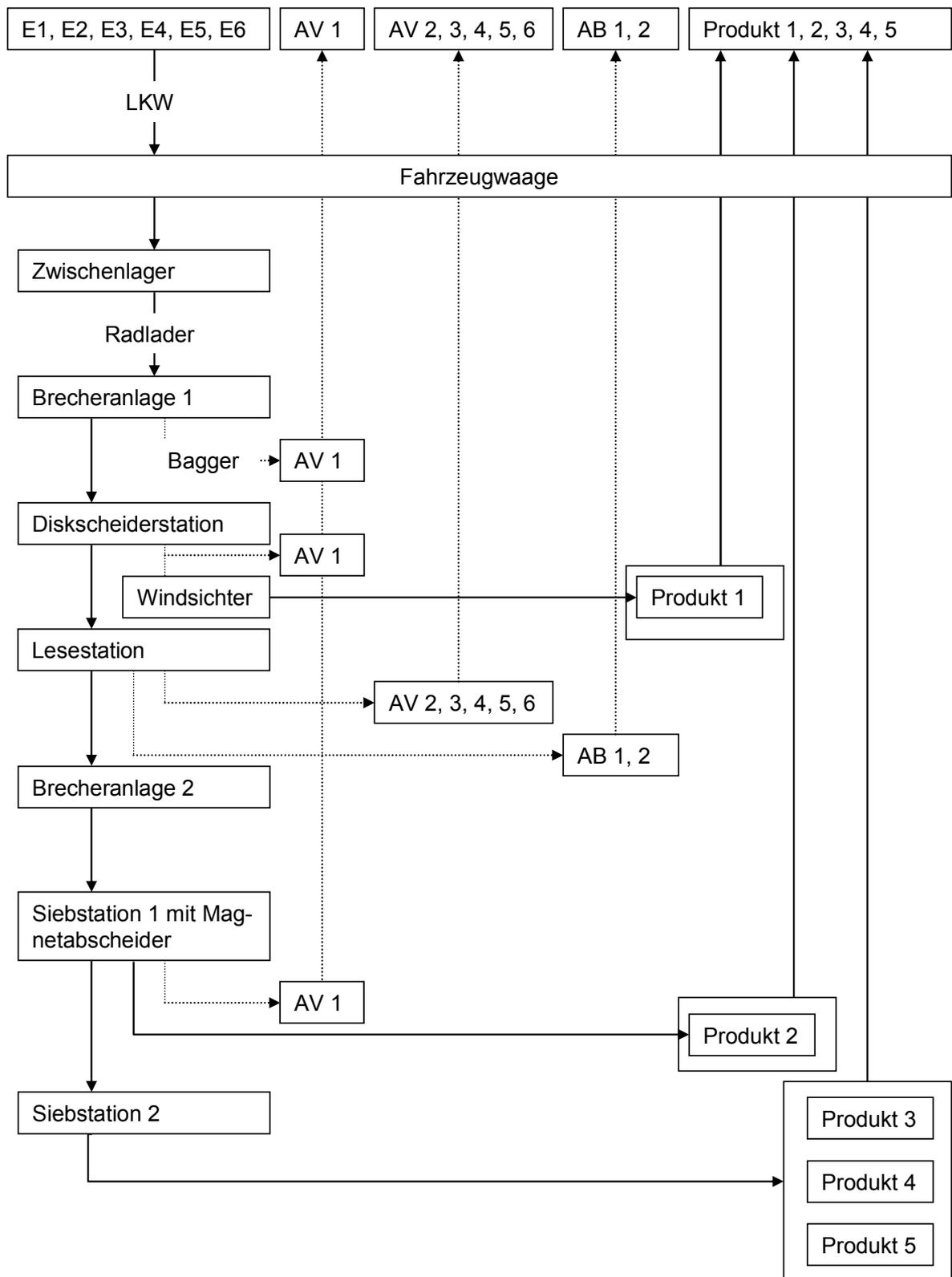


Abbildung 33: Grundfließbild der Bauschuttrecyclinganlage

Tabelle 15: Legende zu Abbildung 33

Kurzbezeichnung	Benennung	Technische Daten/ Bemerkungen
E1	Einsatzstoff 1	EAK-Code: 170101-Bauschutt: Beton
E2	Einsatzstoff 2	EAK-Code: 170102-Bauschutt: Ziegel
E3	Einsatzstoff 3	EAK-Code: 170103-Bauschutt: Fliesen und Keramik
E4	Einsatzstoff 4	EAK-Code: 170104-Bauschutt: Baustoffe auf Gipsbasis
E5	Einsatzstoff 5	EAK-Code: 170302-Bau- und Abbruchabfälle: Asphalt, teerfrei
E6	Einsatzstoff 6	EAK-Code: 170701-gemischte Bau- und Abbruchabfälle
AV 1	Abfall 1 zur Verwertung	Eisen- und Stahlabfälle
AV 2-6	Abfall 2-6 zur Verwertung	Bei der Lesestation anfallende Abfälle wie Holz, Plaste, Glas, Metalle (nichteisen), Papier/Pappe
AB 1 und 2	Abfall zur Beseitigung	Isoliermaterial Sortierreste – nichtmineralische Fraktion
P 1-5	Produkt 1-5	Unterscheidet sich nach der Materialart und der Körnung, wird der Marktsituation angepasst

Weitere Angaben zu der eingesetzten Bauschuttzubereitungsanlage sind in Tabelle 16 aufgelistet.

Tabelle 16: Kenndaten der Bauschuttzubereitungsanlage

Betriebseinheit	Anzahl	Bemerkung	Betriebsweise	Auslegungsdaten
Fahrzeugwaage	1		diskontinuierlich	50 t
Brecheranlage 1	1	Schlagwalzenbrecher, Magnetscheider	diskontinuierlich	200 t/h
Diskscheider	1	Disk-Separator, Magnetscheider	diskontinuierlich	350 bar
Sieb- und Sichterstation	1	Siebmaschine Typ HEWA-Tec, Vibrationsförderrinne, Schwergutsichter	diskontinuierlich	6,3 m ² Siebfläche
Lesestation	1	Gurtförderer als Leseband	diskontinuierlich	6 Leseplätze
Brecheranlage 2	1	Prallbrecher PB 1313SE mit Magnetabscheider	diskontinuierlich	200t/h
Siebstation 1	1	Vibrationssieb	diskontinuierlich	200t/h
Siebstation 2	1	Vibrationssieb	diskontinuierlich	200t/h
Radlader	1	Beschickung der Anlage und Beladung der LKW	diskontinuierlich	
Bagger	1	Verladung des Schrotts, Aussortierung von Übergrößen, Vorzerkleinerung	diskontinuierlich	

In der nachfolgenden Tabelle 17 sind weitere Kenndaten von in der Bauschutttaufbereitungsanlage eingesetzten Einzelaggregaten aufgeführt.

Tabelle 17: Leistungsparameter der Einzelaggregate der Aufbereitungsanlage

Pos.	Bezeichnung	Durchsatzleistung	Antriebsleistung
1	Schlagwalzenbrecher SB 1215 mit integriertem Kettenkratzförderer	200 t/h	305 kW
2	Schwingförderrinne, 4500 x 1600 mm	400 t/h	2 x 6 kW
3	Überbandmagnetscheider, 1400 x 1550 mm		3 kW
4	Transportband l x b=15m x 1000mm, 1,5 m/s		7,5 kW
5	Aufgabebunker mit Abzugsband, l x b= 7 x 1000 mm, 0,04 – 0,3 m/s		5,5 kW
6	Transportband, 24 m x 1000 mm, 0,5 m/s		7,5 kW
7	Disk-Seperator, 1500 x 4000 mm		15 kW
8	Leseband, 26m x 1200 mm, 0,3 m/s		11 kW
9	Prallbrecher PB 1313 SE	120-200 t/h	201 kW
10	Transportband 20m x 800 mm, 1,31 m/s		11 kW
11	Überbandmagnetscheider, 1030 x 940 mm, 1,66 m/s		2,2 kW
12	Eindeck-Hochleistungsvibrationssieb, 1400 x 4000 mm		7,5 kW
13	Transportband, 5,5 m x 800mm, 1,31 m/s		3 kW
14	Schwenkbares Transportband, 25 m x 800 mm, 1,31 m/s,		10,5 kW
15	Zweideck-Hochleistungsvibrationssieb, 1600 x 5000 mm		7,5 kW
16	Transportband, 6,5 m x 800mm, 1,31 m/s		3 kW
17	Transportbänder, 20 m x 650 mm, 1,31 m/s		je 5,5 kW
18	Transportband, 7,5 mx 800 mm, 1,26 m/s		5,5 kW
19	Überbandmagnetabscheider, 1020 x 940 mm, 1,66 m/s		2,2 kW
20	Transportband, 23 m x 650 mm, 1,17 m/s		7,5 kW
21	LIWELL Spezial-Siebmaschine Typ HEWA-Tec, 1500 x 4000 mm		15 kW
22	Vibrationsförderrinne, 1500 x 500 mm		2 x 1 kW
23	Transportband, 12m x 650 mm, 1,31 m/s		5,5 kW
24	Transportband, 20 m x 650 mm, 1,31 m/s		7,5 kW
25	Windsichtung		
	Abluftventilator		22 kW
	Schleusenmotor		1,5 kW
	Kompressor		4 kW
26	Transportband, 7,5m x 500 mm, 1,26 m/s		3 kW

3.2.3 Untersuchungen beim Abbruch

Bauteilproben wurden während des Abbruchs entnommen und analysiert. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf den Sulfatgehalt gelegt. Weitere Proben wurden während der Aufbereitung dieses Materials entnommen und hinsichtlich des Sulfatgehaltes analysiert.

Als Sulfatquellen wurden der Verbund zwischen Fliesen und Stahlbetonwand mittels einer Glasfasermatte und Gips sowie der Anhydritestrich des Fußbodens ausgemacht. In Abbildung 34 ist zu erkennen, dass der Anhydritestrich schollenartig teilweise vom Betonuntergrund gelöst aufgefunden wurde. Eine mechanische Vorabselektierung wäre hier denkbar gewesen.

Darüber hinaus zeigt Abbildung 34 die Proben der einzelnen Bauteile. Die chemischen Analysen der beprobten Bauteile sind in Tabelle 18 zu finden. Alle Einbauten wie die Fußböden und der Abzugsschacht als auch die Sanitärinnenwände sind stark sulfathaltig. Das ergaben die Werte der Eluatanalyse (SO_4^{2-}) und der Feststoffanalyse (SO_3). Zur Vorabschätzung der Sulfatgehalte wurde ein Schnelltest (Visocolor Schnelltest) durchgeführt. Alle Werte wurden durch Analysen von später genommenen Proben bestätigt. Die stark sulfathaltigen Bauteile sind in der Tabelle gelb markiert.



Glasfasermatte mit Gips



Außenwand



Balkonbrüstung



Innenwand



Deckenplatte (Oberseite)



Deckenplatte (Unterseite)



Anhydritestrich

Abbildung 34: Proben der verschiedenen Bauteile

Tabelle 18: Sulfatgehalte verschiedener Bauteile der Plattenbauten in Gera [52]

Probe		SO ₄ ²⁻ [mg/l]	SO ₃ [%]	Visicolor SO ₄ ²⁻ [mg/l]
1	Sanitärinnenwand	1481	13,6	1400
2	Aussenwandplatte, Aussenschale	60	0,4	45
3	Balkonbrüstung	100	1,0	450
4	Innenwandplatte	50,2	0,4	80
5	Deckenplatte oben	30	0,4	33
6	Deckenplatte unten	43	0,3	32
7	Fussbodenestrich	1463	15,7	1400
9	Abzugsschacht	1506	40,4	

3.2.4 Untersuchungen entlang der Aufbereitungsstrecke

Der Bauschutt dieser Abbruchobjekte wurde vor der Aufbereitung auf dem Gelände der Bauschuttrecyclinganlage gelagert. Entlang der Aufbereitungsstrecke wurden verschiedene Proben entnommen (siehe Abbildung 35). Diese wurden mittels Sortieranalyse, Eluatuntersuchung und Feststoffsulfatbestimmung stofflich analysiert.

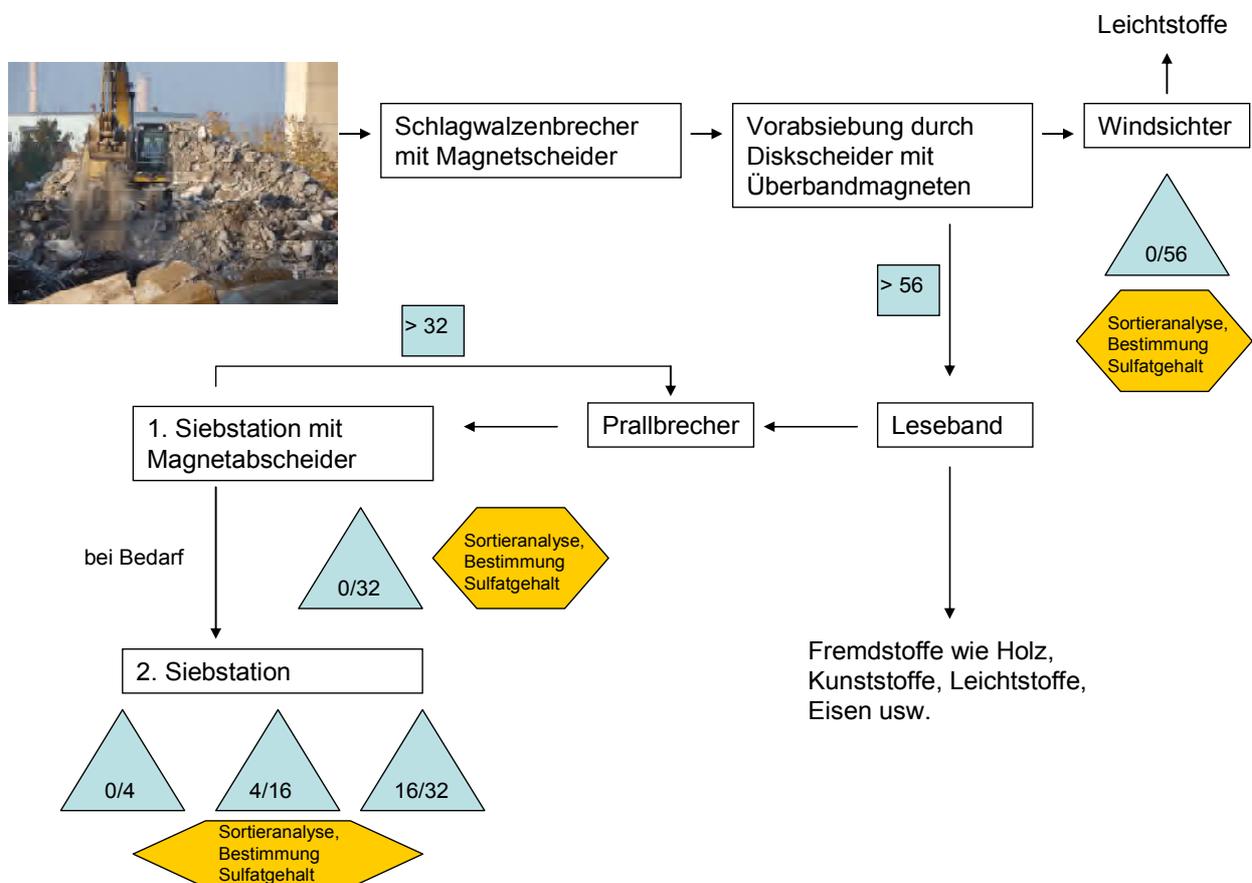


Abbildung 35: Schematische Darstellung der Aufbereitungsstrecke [52]

Ergebnisse der Sortieranalysen

Die Probenahme erfolgte stichprobenartig aus dem Haufwerk entsprechend DIN EN 932-1 [113].

Anfangs wurde die Fraktionen 0/56 mm und 0/32 mm der Anteil > 4 mm entsprechend DIN 4226-100 einer Sortieranalysen unterzogen. Nach DIN 4226-100 ist ein Anteil an Fremdstoffen wie Gips für den Liefertyp 1 für rezyklierte Gesteinskörnungen bis zu einem Wert von 0,2 M.-% zulässig. Bei der ersten Probenahme lag der Gipsanteil mit etwa 0 bis 0,04 M.-% weit unter diesem Wert. Dies lässt vermuten, dass der Gips bevorzugt in den feinen Fraktionen unter 4 mm zu finden ist. Außerdem konnte bei der Beprobung der Bauteile Estrich als Hauptsulfatquelle identifiziert werden. Dieser lässt sich im gebrochenen Zustand nur sehr schwer von Beton oder Mörtel unterscheiden. Die Sortieranalyse wird händisch nach Augenschein durchgeführt. Ein subjektiver Fehler ist bei der händischen Sortierung immer in Betracht zu ziehen.

Entlang der Aufbereitungsstrecke wurden erneut Proben entnommen. Dabei wurde sich auf die Entnahme des Materials nach dem ersten Brecher (Fraktion 0/56 mm) und nach dem zweiten Brecher (Fraktion 0/32 mm) beschränkt. Die Sortieranalysen der neuen Proben ergaben folgende Ergebnisse. Für das Material nach dem ersten Brecher wurden noch Gipsanteile von 0,46 M.-% ermittelt, also weit über dem Grenzwert nach DIN 4226-100. Das zweistufig gebrochene Material wies nur noch einen Massenanteil von 0,15 % Gips als Fremdbestandteil auf.

Ergebnisse der Eluatanalysen

Um für die jeweils gesamte Fraktion 0/32 mm und 0/56 mm einen Eluatwert zu erhalten, wurden die Proben mittels Laborbackenbrecher auf <10 mm gebrochen. Aus den probegeteilten Proben wurden nach dem Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung DEV 4 Eluate hergestellt und diese nasschemisch an der Professur Bauchemie an der Bauhaus-Universität Weimar hinsichtlich des Sulfatgehaltes untersucht.

Ähnlich wie bei der Sortieranalyse wurde auch anhand der Eluatanalysen ein höherer Sulfatgehalt für das einstufig gebrochene Material nachgewiesen.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 36 links dargestellt. Auch hier kristallisiert sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Produkten nach dem ersten Brecher und dem zweiten Brecher heraus. Der Sulfatgehalt des Produktes 0/56 mm ist um vielfaches höher als der des zweistufig gebrochenen Materials 0/32 mm. Weiterhin wurde auch die Leichtstofffraktion, welche mengenmäßig in nur sehr geringem Umfang anfällt, jedoch einen sehr hohen Sulfatgehalt aufweist.

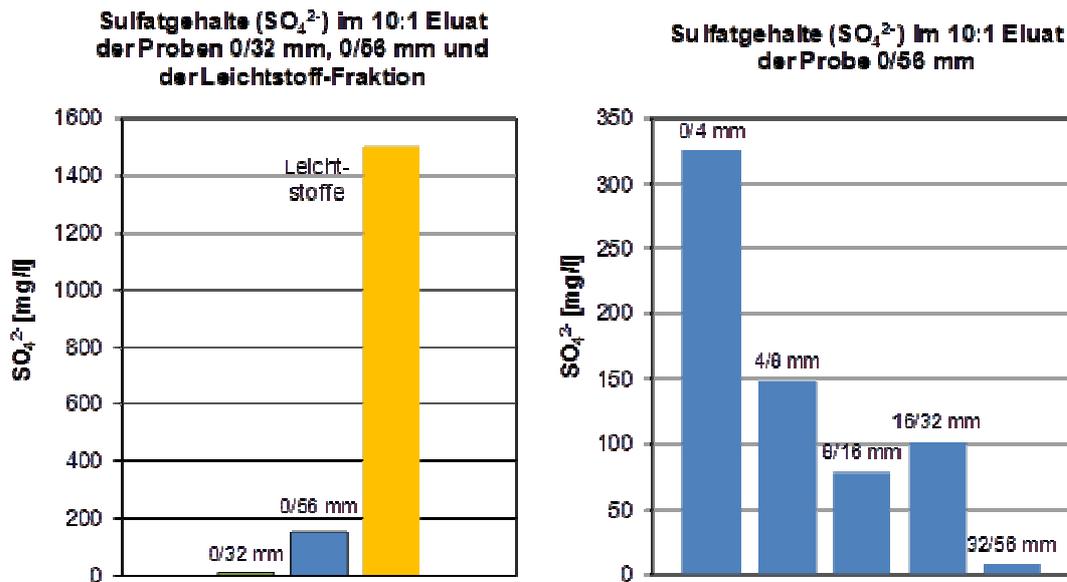


Abbildung 36: Sulfatwerte der Eluate der Fraktionen 0/32 mm, 0/56 mm und der Leichtstoff-Fraktion (links) und Sulfatwerte der Eluate der einzelnen Fraktionen der Probe 0/56 mm (rechts)

Ausgehend von diesem Ergebnis wurde untersucht, wie sich der Sulfatgehalt in den einzelnen Fraktionen des Materials 0/56 mm verteilt. Dazu wurde das Material in die Fraktionen 0/4 mm, 4/16 mm, 16/32 mm und 32/56 mm aufgeteilt und die Eluate untersucht. Die höchsten Sulfatwerte (siehe Abbildung 36 rechts) wurden in der Fraktion 0/4 mm gefunden. In den nächst größeren Fraktionen sind diese Werte wesentlich geringer. Man kann also davon ausgehen, dass die sulfathaltigen Bestandteile des Abbruchmaterials schon sehr früh innerhalb der Aufbereitungskette relativ klein gebrochen werden, was sich durch die unterschiedlichen Zerkleinerungswiderstände von Gips und Beton erklären lässt. Der gebrochene Gips reichert sich im untersuchten Fall bereits nach der ersten Brechstufe im Vorabsiebmaterial hauptsächlich in den feinen Fraktionen an.

Ergebnisse der Feststoffanalyse

Unterstützend zu den vorangegangenen Analysen wurde das Probematerial nach einer entsprechenden Probenvorbereitung (Mahlung und Teilung) zur Feststoffanalyse ins chemische Labor der Professur Bauchemie gegeben. Die Proben wurden mit einem Säureaufschlussverfahren vollständig gelöst und mit dem ICP-Massenspektrometer der Schwefelgehalt S ermittelt. Aus diesem lässt sich dann stöchiometrisch der Sulfatgehalt SO₃ berechnen. Für die Fraktion 0/32 mm nach dem ersten Brecher wurde ein Wert von 0,37 M.-% SO₃ ermittelt. Dieser Wert entspricht in etwa dem Sulfatgrundrauschen im Beton. Das Sulfatgrundrauschen beschreibt den natürlichen Sulfatgehalt im Beton. Dieser gilt vorerst als unbedenklich, da dieses chemisch gebundene Sulfat eher schwer in Lösung gehen kann.

In der Fraktion 0/56 mm wurde ein SO₃-Gehalt von 0,80 M.-% nachgewiesen, also doppelt so viel wie in dem Material der Probe 0/32 mm. Um die Verteilung des Schwefelgehaltes die-

ser Probe innerhalb der einzelnen Fraktionen zu erhalten, wurden Analysen in Abhängigkeit von der Korngröße durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt.

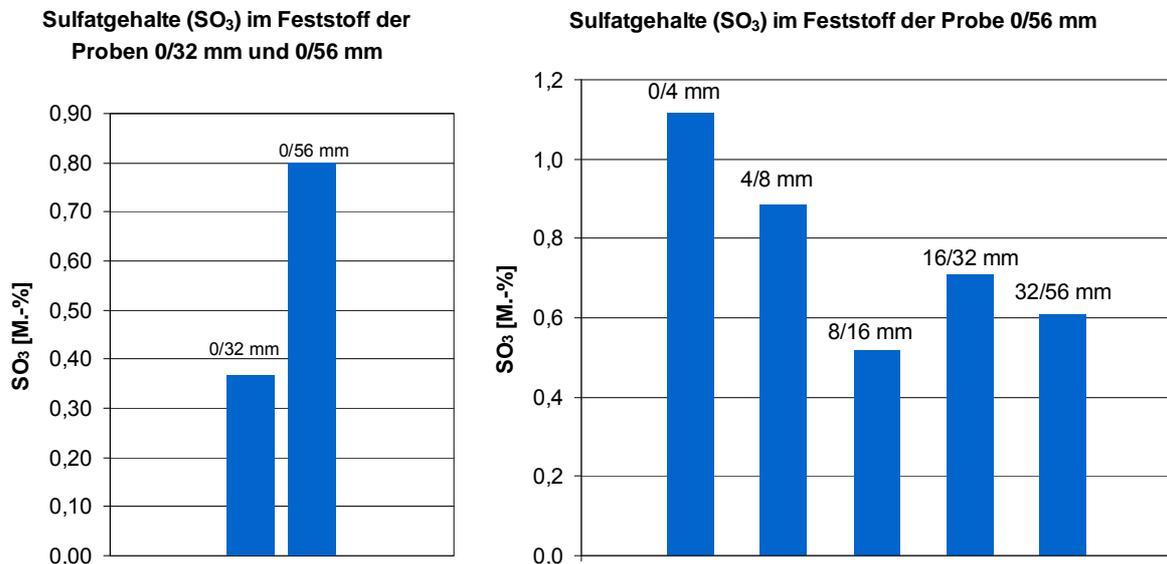


Abbildung 37: Gesamtsulfatwerte der Fraktionen 0/32 mm und 0/56 mm (links) und Gesamtsulfatwerte der einzelnen Fraktionen der Probe 0/56 mm (rechts)

Ähnlich wie in den vorangegangenen Analysen wurden die erhöhten Sulfatwerte überwiegend in den feinen Fraktionen gefunden.

3.2.5 Schlussfolgerungen

Die Analysen der beprobten Bauteile der verschiedenen Plattenbauten in Gera zeigen, dass die Wände und Decken ohne Fußbodenestrich frei von erhöhten Sulfaten sind. Vornehmlich in den Badzellen und als Estrich ist Gips als Sulfatquelle zu finden. Theoretische Hochrechnungen ergaben, dass der prozentuale Masseanteil an Gips im Gebäude ca. 3 M.-% (ohne Badzellen) bzw. ca. 3,5 M.-% (mit Badzellen) ausmacht. Nach DIN 4226-100 sind Fremdstoffe wie Gips für die Wiederverwendung des rezyklierten Materials im Hochbaubeton bis zu einem Wert von 0,2 M.-% zulässig. Ohne Separation der gefundenen Sulfatquellen wird der Grenzwert um ein Vielfaches überschritten.

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass die sulfathaltigen Baustoffe, hier hauptsächlich der Estrich, in den feineren Fraktionen zu finden sind. In Abbildung 38 sind verschiedene Zerkleinerungsvarianten von Verbundbaustoffen dargestellt. Diese sind maßgeblich abhängig von den Zerkleinerungswiderständen der Verbundbaustoffe. Unterscheiden sich die Widerstände nur sehr wenig, so spricht man vom summativen Zerkleinern. Das gesamte Material wird etwa gleichmäßig gebrochen. Als Produkt erhält man ein Gemisch aus den Verbundbaustoffen. Sind die Zerkleinerungswiderstände ähnlich groß, aber der Grenzflächenwiderstand relativ gering, so wird das Material entlang der Grenzfläche zerkleinert. Unterscheiden sich jedoch die Zerkleinerungswiderstände stark wie bei diesem Beispiel zwi-

schen Estrich und Betondecke, so wird selektiv zerkleinert. In der Feinfraktion reichert sich der Baustoff mit dem kleineren Zerkleinerungswiderstand an, also in diesem Fall der Estrich, und in der Grobfraktion verbleiben die bruchfesteren Bestandteile, der Beton.

Weiterhin ist prinzipiell festzustellen, dass die größte Menge an Gipsbaustoffen bereits nach dem ersten Brechvorgang im Schlagwalzenbrecher und dem Diskabscheider im Produkt 0/56 mm sowie in der Leichtstofffraktion ausgetragen wird. Die Fraktion > 56 mm wird relativ frei von Gipsbaustoffen im Prallbrecher weiter aufbereitet. Dieses zweistufig hergestellte Material ist also nur gering mit Sulfat belastet. Das im Schlagwalzenbrecher anfallende Produkt dagegen weist auffällig höhere Sulfatwerte auf. Eine zweistufige Aufbereitung von sulfathaltigem Abbruchmaterial aus dem Hochbau ist demzufolge empfehlenswert. Es muss an dieser Stelle auch darauf hingewiesen werden, dass die untersuchte Bauschutttaufbereitungsanlage einen vergleichsweise hohen technischen Standard aufweist. In der Praxis wird das Material häufig nur mittels einstufiger Brechung in mobilen Anlagen aufbereitet.

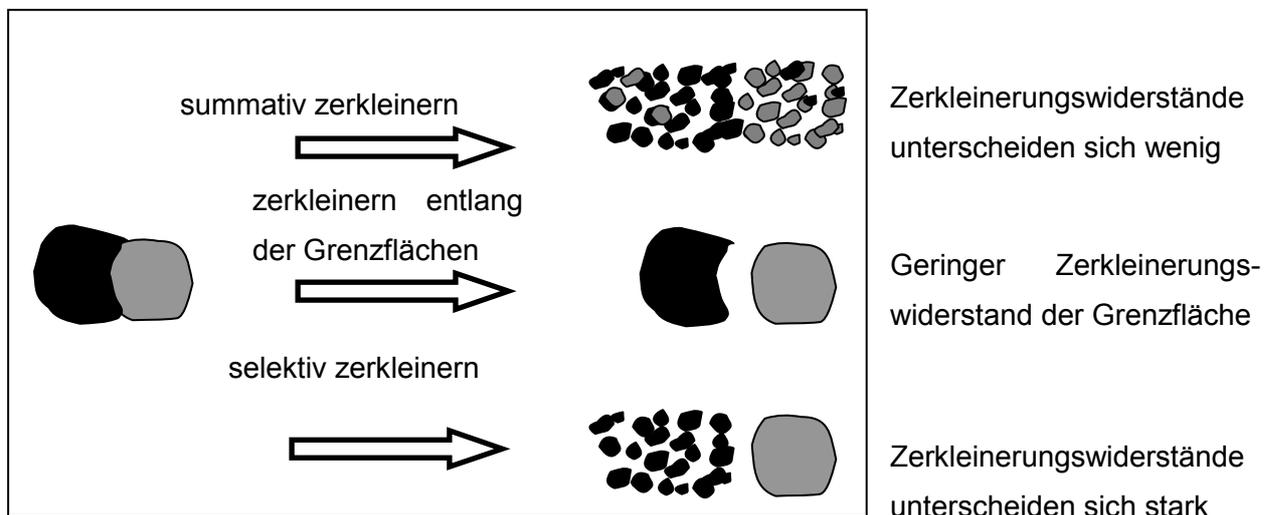


Abbildung 38: Varianten für die Zerkleinerung von Verbundwerkstoffen

Im Vergleich zu den theoretisch berechneten Gipsgehalten sind die Werte der Sortieranalyse sowie der chemischen Analysen zu gering. Nur ein Bruchteil der zu erwartenden Gehalte wurde nachgewiesen. Grund dafür ist zum einen das sehr inhomogene RC-Material, welches eine repräsentative Probenahme erschwert. Auch die nach Norm entnommenen Probenmengen sind für die sehr geringen nachzuweisenden Gips- bzw. Sulfatgehalte nicht ausreichend [112].

Denkbar ist auch, dass schon Vorort an der Abbruchstelle sulfathaltiges Feinmaterial verloren geht, da die Bruchfestigkeit der Gipsbaustoffe im Vergleich zu dem restlichen Baustoff Beton gering ist. Dieses „verlorene Material“ könnte am ehemaligen Gebäudestandort das Grundwasser mit Sulfat belasten oder Treiberscheinungen hervorrufen. Schon aus diesem Aspekt heraus sollten die gipshaltigen Baustoffe separat im Voraus entfernt werden. Eine

Prüfung des Sachverhaltes könnte durch Entnahme von Bodenproben an der Abbruchbaustelle erfolgen.

3.3 Auswahl von Abbruch- und Aufbereitungsverfahren

3.3.1 Anwendungshäufigkeit der Abbruchverfahren

Es gibt nur wenige Statistiken über die Häufigkeit des Einsatzes der unterschiedlichen Abbruchverfahren. Am aussagekräftigsten erscheint eine Auswertung von 2005, die Lippok im Jahr 2007 in [66] veröffentlicht hat. In dieser ist eine prozentuale Verteilung der Nutzung von gängigen Abbruchverfahren beim Abbruch von Bauwerken aufgeführt (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Anwendungshäufigkeit von Abbruchverfahren

Hauptverfahren (Stand 2005)	Anwendung [%]
Abbruch mit Hydraulikbaggern und Anbaugeräten	83,0
Sprengen	4,0
Abbruch mit Seilbaggern	2,0
Abbruch mit sonstigen Baumaschinen	3,0
Sägen, Hochdruckwasserstrahl, Fräsen	3,0
Handabbruch und Kleingeräte	3,0
sonstige Verfahren	1,7
Abbruch mit fernbedienten Abbruchrobotern	0,3

Die gleiche Aufstellung, jedoch von 2002, wird auch an anderer Stelle zitiert [63, 94]. Zumindest in den Jahren 2002 bis 2005 hat sich die Anwendung der aufgeführten Techniken nur marginal verändert. Auch einzelne Gespräche mit in der Abbruchpraxis tätigen Fachleuten im Jahr 2010 brachten keine anderen Erkenntnisse. Ein Rückschluss auf den verstärkten Einsatz von selektiven Verfahren kann auf diese Weise nicht gezogen werden.

Aus der o.a. Statistik ergibt sich, dass nach wie vor der Einsatz von Hydraulikbaggern mit unterschiedlichen Anbaugeräten in Bezug auf Abbruch- und Rückbauverfahren deutlich überwiegt. In Abhängigkeit von den Anbaugeräten und der Durchführung der Arbeiten kann mit dieser Technik auch selektiv oder teilselektiv gearbeitet werden.

Informationen über die tatsächliche Anwendung von selektiven Rückbautechniken lassen sich anhand der derzeit verfügbaren Literatur nur indirekt erhalten. Grundsätzlich wird der selektive Rückbau in Veröffentlichungen und Vorträgen einhellig befürwortet. Im deutschen Abbruchverband wird die Trennung der unterschiedlichen Fraktionen an Baumaterialien ebenfalls als Grundprinzip bei Abbruch- und Rückbaumaßnahmen gesehen [74].

3.3.2 Eigene Untersuchungen zur Relevanz von Abbruchtechniken

Um weitere Aussagen über die aktuelle Anwendungshäufigkeit von unterschiedlichen Rückbautechniken und die selektive Erfassung unterschiedlicher Stoffströme zu eruieren wurde in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt und dem Deutschen Abbruchverband ein Fragebogen ausgearbeitet und über den Deutschen Abbruchverband an dessen Mitgliedsfirmen verteilt (siehe Anhang C). Des Weiteren erfolgte die Übersendung des Fragebogens über den Verband „Baustoff Recycling Bayern e.V.“ an die Mitgliedsfirmen des Verbandes.

Der Fragebogen sollte sowohl der Erstellung einer Übersicht über die tatsächlich zum Rückbau eingesetzten Techniken dienen als auch Aussagen über Art und Umfang des separaten Rückbaus einzelner Stoffströme ermöglichen. Weitere Gesichtspunkte für die Auswertung waren einerseits die Größe des Betriebs, andererseits die Frage nach dem Betrieb von Bau- schuttaufbereitungsanlagen.

Der Rücklauf der Fragebögen über den Deutschen Abbruchverband war mit 30 Fragebögen durchaus zufriedenstellend. Bei einer Mitgliederanzahl des Deutschen Abbruchverbandes zwischen 400 und 500 Unternehmen und vor dem Hintergrund, dass einige Unternehmen ausschließlich Abbruch- bzw. Rückbaumaßnahmen im Tiefbau durchführen bzw. dass z.B. auch Ingenieurbüros zu den Mitgliedsunternehmen zählen, kann mit einem Rücklauf von knapp 10 % der interessierenden Unternehmen gerechnet werden. Ein Rückläufer wurde nicht gewertet, weil anhand der Antworten ersichtlich war, dass dieses Abbruchunternehmen (nahezu) ausschließlich im Bereich Tiefbau tätig ist.

Die Unternehmen wurden in Abhängigkeit von der Anzahl ihrer Mitarbeiter in kleine (1-10 Mitarbeiter), mittlere (11-50 Mitarbeiter) und große Unternehmen (>50 Mitarbeiter unterschieden). Eine Übersicht über die Verteilung der Mitarbeiteranzahl der befragten Abbruchunternehmen gibt die nachfolgende Grafik, Abbildung 39.

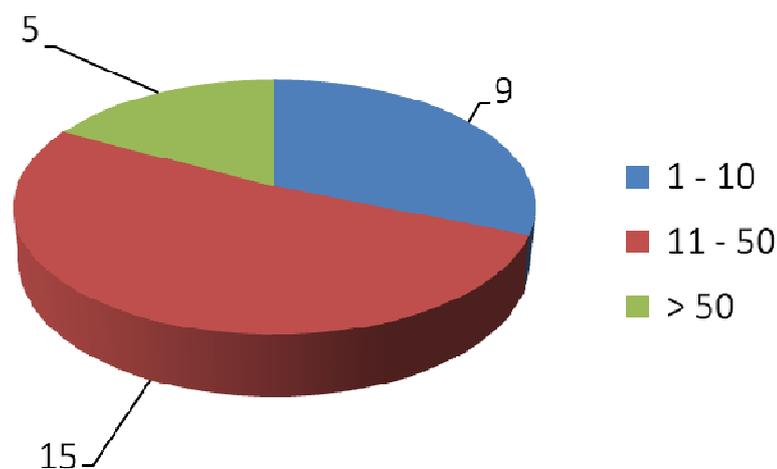


Abbildung 39: Verteilung der Mitarbeiteranzahl der befragten Abbruchunternehmen

Wie aus Abbildung 39 ersichtlich stammen rund 52 % der beantworteten Fragebögen aus Unternehmen mittlerer Größe, ca. 17 % der Fragebögen wurden von großen Betrieben und

31 % von kleinen Betrieben beantwortet. Aus vorliegenden Antworten lassen sich zunächst einige Rückschlüsse auf Zusammenhänge zwischen der Betriebsgröße und den eingesetzten Abbruchtechniken ziehen.

Während die großen Betriebe – bis auf Fräsen oder Sägen – alle nachgefragten Abbruchtechniken anwenden, werden nicht alle Abbruchverfahren in gleicher Größenordnung von den kleinen und mittleren Betrieben angewandt. Nachfolgend sind die Auswertungen der genutzten Abbruchverfahren sowie ihre Einsatzhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebsgröße dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Abbruchverfahren durchnummeriert. Die einzelnen Verfahren sind wie folgt dargestellt:

- 1 Schneiden mit Zangen /Scheren oder Abgreifen
- 2 Nutzung von Abbruchhämmern
- 3 Einschlagen, Eindrücken, Einreißen
- 4 Handabbruch und Kleingeräte
- 5 Sägen, Fräsen
- 6 Sprengen

In der nachfolgenden Abbildung 40 ist die Nutzung von unterschiedlichen Abbruchtechniken in Abhängigkeit von dem Anteil der sie nutzenden kleinen Betriebe sowie die Häufigkeit ihrer Nutzung durch diese Unternehmen dargestellt.

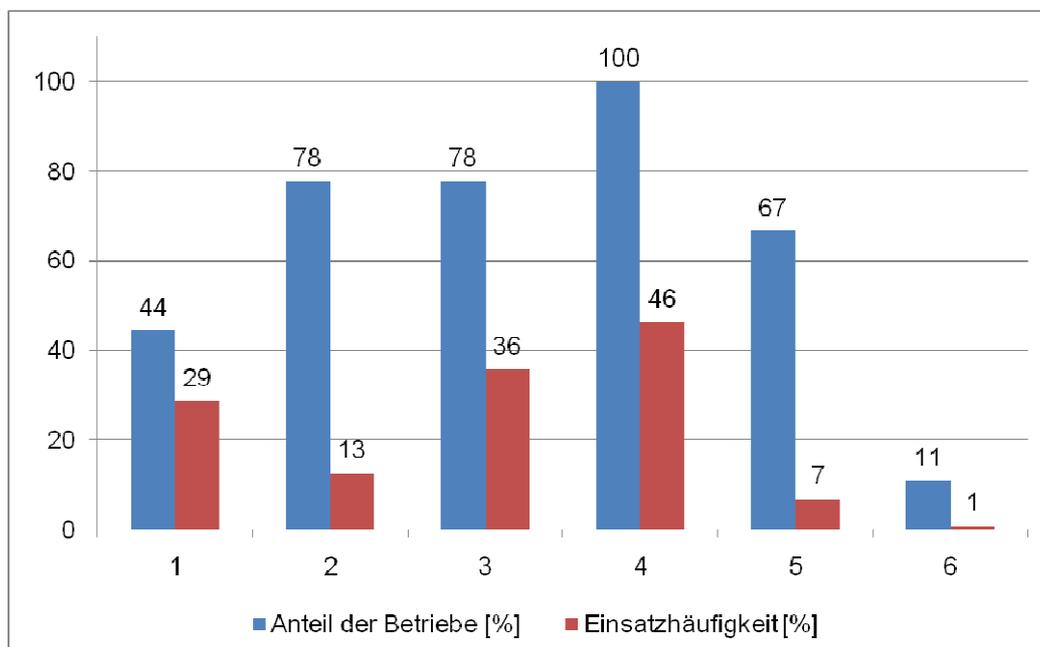


Abbildung 40: Nutzung von unterschiedlichen Abbruchverfahren durch kleine Unternehmen und die Häufigkeit ihrer Nutzung durch diese Unternehmen

In Abbildung 41 und Abbildung 42 sind nachfolgend die Ergebnisse dieser Auswertungen für mittelgroße und große Betriebe dargestellt.

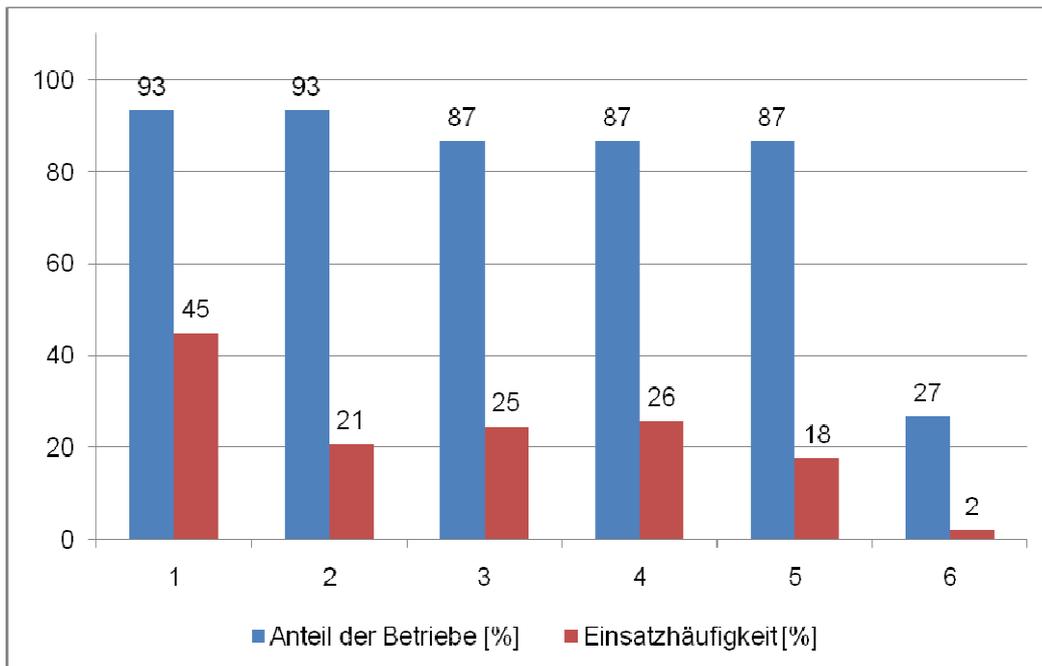


Abbildung 41: Nutzung von unterschiedlichen Abbruchverfahren durch mittelgroße Unternehmen und die Häufigkeit ihrer Nutzung durch diese Unternehmen

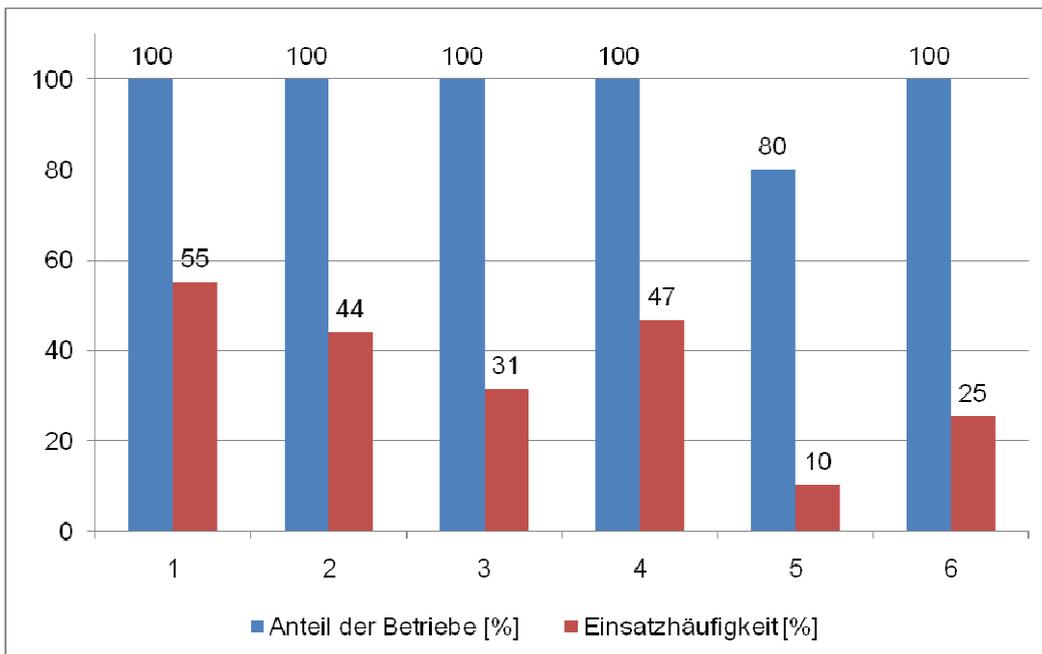


Abbildung 42: Nutzung von unterschiedlichen Abbruchverfahren durch große Unternehmen und die Häufigkeit ihrer Nutzung durch diese Unternehmen

Aus der ersten Auswertung ist eine Abhängigkeit der eingesetzten Abbruchtechniken von der Unternehmensgröße zu erkennen. Während große Unternehmen über eine größere Varia-

tionsbreite in ihren Abbruchtechniken verfügen und diese auch nutzen, sind kleine und mittelgroße Betriebe naturgemäß etwas eingeschränkter in den von ihnen genutzten Techniken.

Kleine Betriebe setzen ebenso wie große Betriebe mit 46 % bzw. 47 % vergleichsweise oft Handabbruch und / oder Kleingeräte für den Abbruch ein, also Vorgehensweisen die bei selektiven Rückbaumaßnahmen genutzt werden können. Kleine Betriebe geben mit 36 % als am zweithäufigsten genutzte Techniken das Einschlagen, Eindrücken oder Einreißen an, Techniken, die nicht direkt für einen selektiven Rückbau genutzt werden können. Demgegenüber sind die von großen und mittelgroßen Unternehmen mit 55 % bzw. 45 % am häufigsten genannten Techniken das Schneiden mit Zangen oder Scheren, bzw. das Abgreifen, die für selektive Rückbaumaßnahmen besser geeignet sind. Die Vorgehensweise des Einschlagens, Eindrückens bzw. Einreißens wird von den großen und mittelgroßen Unternehmen mit 31 % bzw. 25 % Einsatzhäufigkeit vergleichsweise weniger oft eingesetzt.

Die Tendenz zur Korrelation zwischen der Häufigkeit der separaten Erfassung einzelner Stoffströme und der Betriebsgröße spiegelt sich auch in den Antworten des zweiten Teils des Fragebogens wieder. In den nachfolgenden Grafiken Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45 finden sich Übersichten der Auswertungen der von den Betrieben selektiv rückgebauter Stoffströme sowie ihre Durchführung in Abhängigkeit von der Betriebsgröße. Zur Übersichtlichkeit der Darstellung sind die Maßnahmen zum separaten Rückbau einzelner Stoffströme wiederum durchnummeriert:

- 1 Separater Rückbau von Wertstoffen (z.B. Eisen, Kupfer)
- 2 Separater Rückbau schadstoffbelasteter Bereiche
- 3 Separater Rückbau AKR-verdächtiger Bereiche
- 4 Separater Rückbau gipshaltiger Bereiche
- 5 Nur nachträgliche Separierung / Weiterbehandlung.

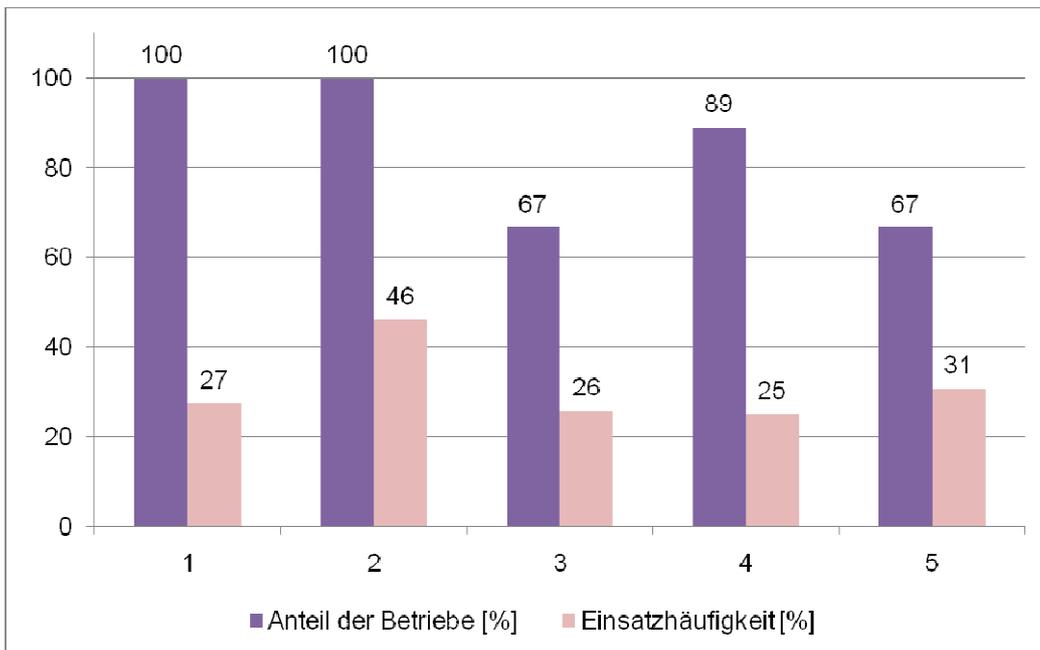


Abbildung 43: Separater Rückbau von Stoffströmen oder Bereichen durch kleine Unternehmen und die Häufigkeit der Durchführung dieser Methode

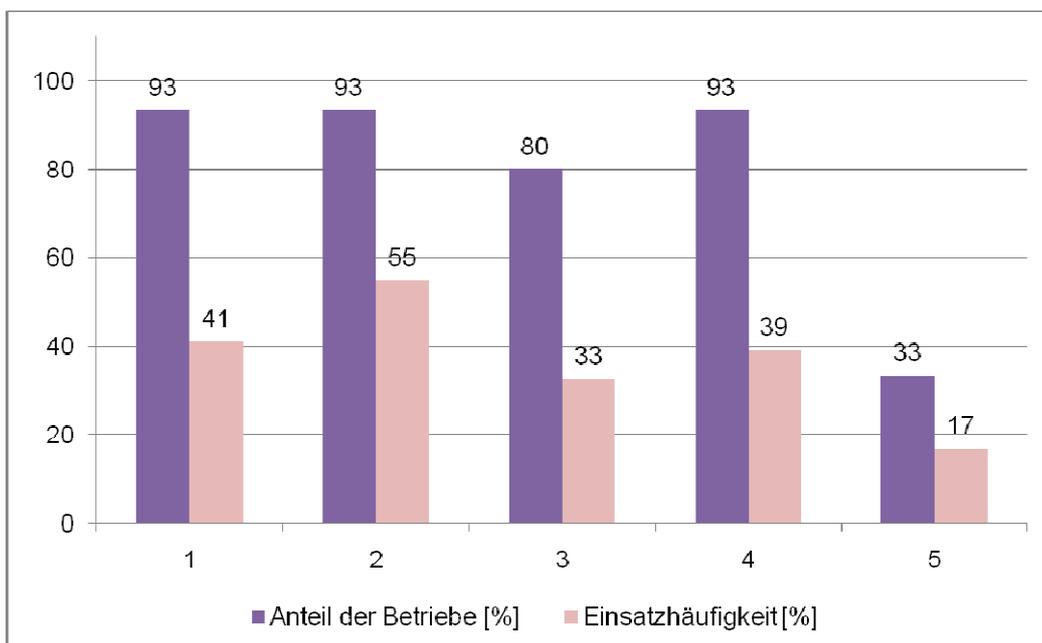


Abbildung 44: Separater Rückbau von Stoffströmen oder Bereichen durch mittlere Unternehmen und die Häufigkeit der Durchführung dieser Methode

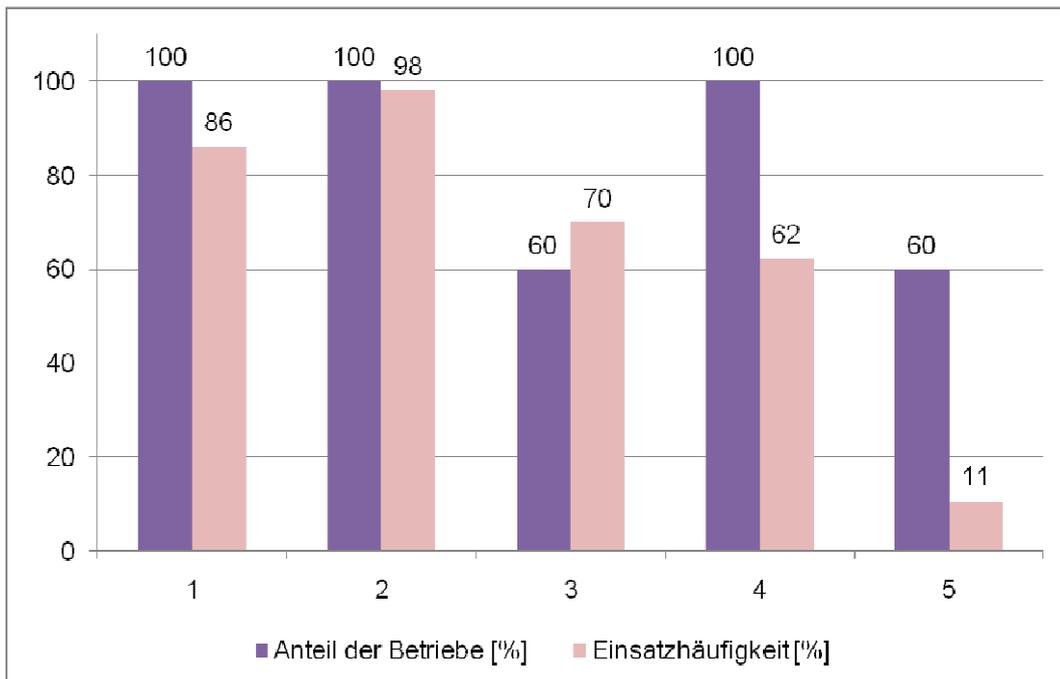


Abbildung 45: Separater Rückbau von Stoffströmen oder Bereichen durch große Unternehmen und die Häufigkeit der Durchführung dieser Methode

Bei der Auswertung des zweiten Teils der Fragebögen wird der Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem separaten Rückbau von unterschiedlichen Stoffströmen bzw. von Kontaminationen noch deutlicher. Alle Betriebe führen selektive Rückbaumaßnahmen durch. Doch während die Anwendung der Erfassung einzelner Stoffströme bzw. einzelner Schadstoffbereiche von kleinen Betrieben in 25 – 46 % der Rückbaumaßnahmen angewandt wird, betreiben die befragten großen Unternehmen dies in 62 – 98 % der Rückbauvorhaben. Die Unternehmen mit einer mittleren Betriebsgröße führen in 33 – 55 % der Anwendungsfälle den selektiven Rückbau von Stoffströmen oder kontaminierten bzw. störstoffbehafteten Bereichen durch. Nur bei 11 % (große Betriebe) bis 31 % (kleine Betriebe) der Rückbaumaßnahmen erfolgt lediglich eine nachträgliche Separierung bzw. Weiterbehandlung des Materials.

Der separate Rückbau gipshaltiger Bereiche erfolgt in 62 % der von großen Betrieben durchgeführten Rückbaumaßnahmen. Demgegenüber wird diese Maßnahme in 39 % bzw. 25 % der Rückbauvorhaben von mittleren bzw. kleinen Betrieben ausgeführt. Hier zeigt sich ein großes Verbesserungspotential, dessen Nutzung in den kommenden Jahren zu einer Steigerung der Qualität von RC-Körnungen aus Bauschutt in Hinblick auf die Sulfatgehalte führen könnte.

Demgegenüber ist der separate Rückbau von kontaminierten Bereichen weitaus verbreiteter. Kleine Betriebe setzen diese Maßnahme in immerhin 46 % der Rückbaumaßnahmen ein, mittlere in 55 % und große Unternehmen bauen sogar in 98 % der Maßnahmen kontaminierte Bereiche separat zurück.

Auch der Betrieb von Bauschuttzubereitungsanlagen steht in engem Zusammenhang mit der Betriebsgröße. Während alle befragten großen Betriebe über Bauschuttzubereitungsanlagen (überwiegend mobil) verfügten, machte nur ein kleiner Betrieb die Angabe eine eigene Bauschuttzubereitungsanlage (mobil) einzusetzen. Von den Betrieben mittlerer Größe verfügte etwa ein Drittel über eine stationäre Bauschuttzubereitungsanlage, ein Drittel über eine mobile Anlage und ein Drittel betrieb keine Bauschuttzubereitungsanlage.

Zusammenfassend kann anhand der vorläufigen Übersicht über die ausgewerteten Fragebögen festgestellt werden, dass sich erste Aussagen in Bezug auf die Anwendung von Abbruchtechniken und die Erfassung von separaten Stoffströmen treffen lassen. Diese Aussagen, z.B. die Anwendung von für den selektiven Abbruch geeigneten bzw. nicht geeigneten Techniken und ihre Korrelation zur Unternehmensgröße, bieten Ansätze für die Bearbeitung des Teilvorhabens 3, ökobilanzielle Betrachtungen, in dem u.a. mit ausgewählten Abbruchtechniken hergestellte RC-Gesteinskörnungen ökobilanziell bewertet werden.

4 Teilvorhaben 3: Ökobilanzielle Betrachtungen

4.1 Hintergrund

Die Ökobilanzierung (LCA - Life Cycle Assessment) ist eine international anerkannte und genormte Methode, DIN EN ISO 14040 ff., zur systematischen Analyse der Umweltwirkungen von Produkten, Stoffen oder Prozessen unter ökologischen Gesichtspunkten [114-118]. Diese Analyse kann sich – in Abhängigkeit von der Zielstellung - auf den gesamten Lebenszyklus des betrachteten Systems, beginnend bei Rohstoffentnahme der Herstellung über die Nutzungsdauer bis hin zur Verwertung oder Entsorgung beziehen. [119].

Eine ökobilanzielle Betrachtung lehnt sich an die Methodik einer Ökobilanz an, dabei werden allerdings einige Themen oder Kapitel (z.B. Sensitivitätsanalysen, Berücksichtigung von Allokationseffekten, kritische Prüfung, etc.) weniger detailliert betrachtet oder teilweise auch ganz ausgeklammert. Die Anwendung dieser vereinfachten Vorgehensweise kann aus zeitlichen und/oder finanziellen Gründen geschehen oder auch aufgrund einer unsicheren Datenlage. Kernaussagen können getroffen werden, jedoch reicht eine ökobilanzielle Betrachtung nicht in der Tiefe und Ausführlichkeit an eine nach Norm vollständige Ökobilanz heran.

Im Zuge einer Ökobilanzierung werden sämtliche umweltrelevanten Entnahmen aus der Umwelt (z.B. Erze, Rohöl) sowie Abgaben an die Umwelt (z.B. Abfälle, Kohlendioxidemissionen) und die damit verbundenen Umweltbelastungen des zu untersuchenden Systems analysiert und anschließend bilanziert. Allgemein unterscheidet man zwischen einer Ökobilanz, die die Umweltwirkungen eines einzelnen Produkts oder Systems untersucht, einer vergleichenden Ökobilanz, die eine Gegenüberstellung mehrerer Produkte oder Systeme verfolgt, sowie einer ganzheitlichen Bilanzierung, die wirtschaftliche, technische und/oder soziale Aspekte in die Bewertung einbezieht.

Für vergleichende Ökobilanzen, die auch für die Öffentlichkeit bestimmt sind, ist nach den Ökobilanznormen DIN EN ISO 14040 ff eine kritische Prüfung durch externe Sachverständige verbindlich festgelegt. Diese kritische Prüfung ist für ökobilanzielle Betrachtungen nicht vorgeschrieben. Da es in dieser Studie um den ökobilanziellen Vergleich unterschiedlicher Vorgehensweisen geht, wäre der Aufwand einer kritischen Prüfung hier auch nur bedingt sinnvoll. Beim direkten Vergleich von zwei Produkten, sollte auf eine kritische externe Prüfung aufgrund möglicher direkter Folgen der Veröffentlichung der Untersuchungsergebnisse für den oder die Hersteller jedoch nicht verzichtet werden.

Eine vollständige, normengerechte Ökobilanz umfasst folgende Arbeitsschritte:

- die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (Zieldefinition),
- eine Sachbilanz,
- eine Wirkungsabschätzung und
- eine Auswertung.

Um den Geltungs- und Wirkungsbereich einer ökologischen Bewertung eindeutig abzugrenzen, müssen zunächst Ziel und Untersuchungsrahmen des zu bewertenden Produktes oder Prozesses in der **Zieldefinition** festgelegt werden. In vielen Fällen wird in der Zieldefinition der Lebensweg z.B. eines Produkts, beginnend bei der Rohstoffgewinnung und endend mit der entsprechenden Entsorgung, definiert.

Außerdem werden Wechselbeziehungen mit anderen Stoffen berücksichtigt sowie die Grenzen der Untersuchung (Untersuchungsrahmen) festgelegt. Für ein aussagefähiges Resultat beim Vergleich von Produkten, müssen Ziele und/oder Randbedingungen übereinstimmen. Das Produktsystem „Müllverbrennungsanlage und anschließende Deponierung des behandelten Mülls“ liefert beispielsweise nebenbei ggf. elektrische Energie. Wollte man dieses System nun mit der Deponierung unbehandelten Mülls vergleichen, müsste das letztere System um die Erzeugung elektrischer Energie erweitert werden.

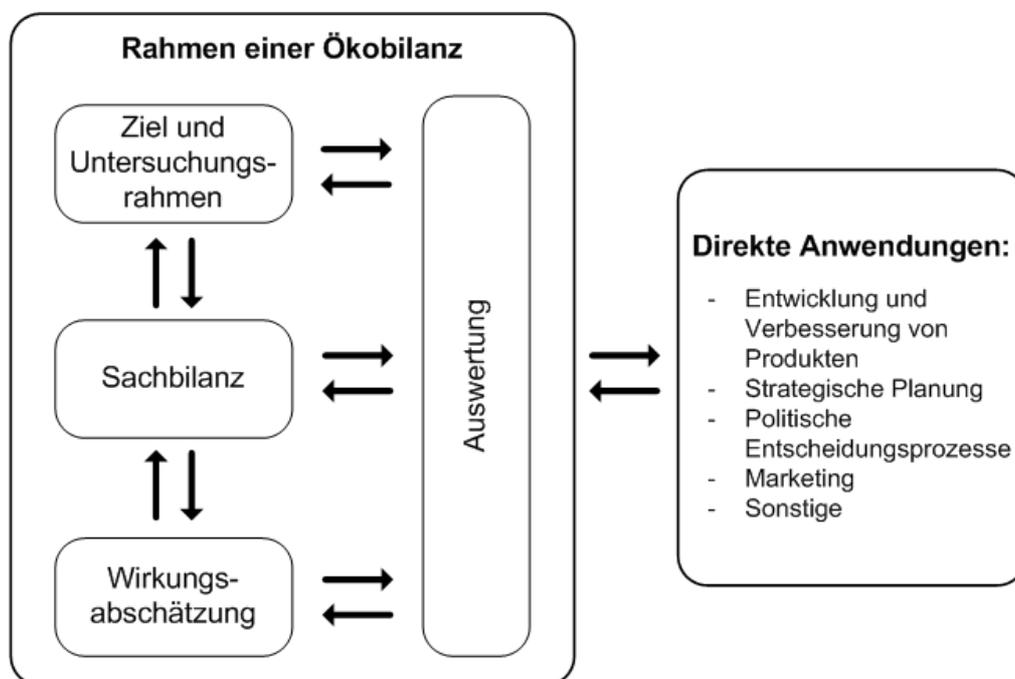


Abbildung 46: Bestandteile einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff.

In einem weiteren Schritt werden in einer **Sachbilanz** nach DIN EN ISO 14044 [118] quantitative Aussagen über den eben erfassten Produktlebensweg gemacht. Es werden Informationen über Ressourcenverbräuche und Emissionen erfasst und die Eingangsgrößen (Input-Parameter) den Ausgangsgrößen (Output-Parameter) gegenübergestellt.

Die **Wirkungsabschätzung** aggregiert nachfolgend die ökologischen Auswirkungen nach wissenschaftlich basierten qualitativen Gesichtspunkten. Als Ergebnis einer Wirkungsbilanz werden ca. 5-10 quantitative Umweltwirkungen, bezeichnet als Wirkungskategorien, benannt, die in Bezug auf das untersuchte System relevant sind.

Innerhalb der Wirkungsabschätzung werden die Ressourcenverbräuche und Emissionen aus der Sachbilanz je nach ihrer Gewichtung den einzelnen Wirkungskategorien zugeordnet. In

diesen Wirkungskategorien gibt es jeweils einen Leitindikator, auf welchen die einzelnen Parameter umgerechnet und zu einem Wirkungsindikator zusammengefasst werden. Ein Beispiel hierfür ist die Kategorie Treibhauseffekt GWP (Global Warming Potential). Beim Parameter GWP ist der Äquivalenzwert (eq.) für den Leitindikator Kohlendioxid (CO₂) mit 1 festgelegt worden. An diesem Wert orientiert sich die Einstufung anderer Substanzen. Lachgas (N₂O) beispielsweise hat einen Äquivalenzwert von 296, da es im Vergleich zu CO₂ ein 296-fach höheres Treibhauspotential hat [120].

Die gebräuchlichsten Wirkungskategorien und die zugehörigen Leitindikatoren finden sich in der nachfolgenden Auflistung:

- Energieverbrauch – kumulierter Energieaufwand (KEA),
beschreibt die Energiemenge, die für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes benötigt wird. Leitindikator: MJ
- Eutrophierungspotential (EP),
oder auch Überdüngungspotential: beschreibt das Potential durch die Wirkung von Nährstoffen (in der Regel Stickstoff- und Phosphorverbindungen) aquatische bzw. terrestrische Ökosysteme zu schädigen. Leitindikatoren: PO₄ eq. bzw. NO_x eq.
- Landverbrauch - Naturraumbeanspruchung
beschreibt den Flächenverbrauch der bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes erfolgt. Leitindikator: m²a
- Ozonabbaupotential (ODP – ozone depletion potential),
beschreibt das Potential die stratosphärische Ozonschicht abzubauen (Ozonloch), dies geschieht überwiegend durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Leitindikator: kg FCKW11-Äquivalent (kg CFC-11 eq.)
- Ressourcenverbrauch (ADP- abiotic depletion potential),
beschreibt den Verbrauch von abiotischen Ressourcen, wie z.B. Eisenerz, Kupfererz, Bauxit, Erdöl, Erdgas, Kohle, etc. also die Verknappung von Rohstoffvorkommen. Leitindikator: kg Antimon-Äquivalent (kg Sb eq.)
In einigen Untersuchungen wird der auch die Kategorie VMR (Verbrauch Mineralischer Ressourcen) verwendet.
Leitindikator: kg verbrauchte Ressourcen [121].
- Sommersmogpotential (POCP – photochemical ozone creation potential),
beschreibt das Potential bodennahes Ozon zu bilden (Sommersmog), überwiegend durch flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen.
Leitindikator: kg NMVOC eq.

- Treibhauseffekt, Klimaänderung (GWP – global warming potential),
beschreibt das Potential durch die Emission von Treibhausgasen durch kumulative Effekte über einen längeren Zeitraum das Klima zu verändern.
Leitindikator: CO₂ eq.
- Versauerungspotential (AP – acidification potential),
beschreibt das Potential für säurebedingte Schädigungen von Ökosystemen.
Leitindikator: SO₂ eq.

Die Betrachtung weiterer möglicher Wirkungskategorien wie z.B. Humantoxizität, Süßwasser Ökotoxizität, Meerwasser Ökotoxizität, terrestrische Ökotoxizität, etc., kann sinnvoll sein, diese sind in Bezug auf Baurestmassen jedoch in der Regel nicht relevant. Grundsätzlich sollten Toxizitäts-Wirkungskategorien (Ökosystem und/oder Human) allerdings aufgrund umstrittener Modellgrundlagen bei lebenswichtigen Nichteisenmetallen, wie Zink und Kupfer, nur unter Vorbehalt betrachtet werden [122].

Abschließend werden in einer Bilanzbewertung die zusammengefassten Daten in Hinblick auf ihre ökologische Bedeutung bewertet, d.h. gegeneinander gewichtet. Dieser letzte Schritt vereinfacht die Darstellung der Ergebnisse. Es existieren verschiedene, international unterschiedlich häufig eingesetzte Bewertungsmethoden mit den zugehörigen Wirkungskategorien, deren Anwendung entsprechend unterschiedliche Vor- und Nachteile hat. Die Bilanzbewertung kann aufgrund unterschiedlicher Gewichtung der Einzelaspekte in Abhängigkeit von der bewertenden Stelle zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Das Ergebnis einer Ökobilanzierung oder ökobilanziellen Betrachtung kann vor diesem Hintergrund als Annäherung an die Umweltwirkungen verstanden und entsprechend auch unterschiedlich interpretiert werden. Dies ist besonders in Hinblick auf die Bewertung von komplexen Systemen zu berücksichtigen.

4.2 Ökobilanzielle Bewertungen im Bauschuttrecycling

Seit Beginn der neunziger Jahre wurden die Umweltwirkungen, die durch die Aufbereitung von Bauschutt und beim Einsatz von RC-Materialien in Beton entstehen, näher untersucht. Die meisten dieser Untersuchungen sind ökobilanzielle Betrachtungen oder Vergleiche. Sie unterscheiden sich in Untersuchungstiefe und Schwerpunktsetzung. Im Jahr 1994 zeigte beispielsweise Lauritzen, dass durch das Recycling von Bauschutt neben der Senkung des Energieverbrauchs und einer Reduzierung der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen und Flächen, auch Kostenvorteile erreicht werden können [123].

Zwei von der EU geförderte Projekte, die Ende der 90er Jahre zum Thema Bauschuttrecycling durchgeführt wurden, enthielten ebenfalls ökobilanzielle Bewertungen. In einem Projekt im EU-Life-Programm wurde die Wiederverwertung von Ziegeln aus Bauschutt untersucht. Als Ergebnis konnte über eine deutliche Energieeinsparung und entsprechend verringerte Emissionen berichtet werden [124]. Ein weiteres Projekt beleuchtete die Möglich-

keiten zur vollständigen Wiederverwertung von Altbeton aus dem Bauschuttrecycling. Dabei wurden auch die Umweltwirkungen des Einsatzes von feinen, zementsteinreicheren Altbetonfraktionen in der Herstellung von Klinker resp. Zement untersucht. Für den Einsatz der RC-Gesteinskörnungen als Substitut für natürliche Rohstoffe konnten eine Verringerung von Emissionen und die Einsparung von Landschaftsverbrauch aufgezeigt werden [125].

Ebenfalls Ende der 90er Jahre wurden die Ergebnisse einer detaillierten Untersuchung aus Großbritannien zur Wiederverwertung von aufbereitetem Bauschutt veröffentlicht. In dieser Untersuchung wurden neben den Umweltwirkungen auch soziale und ökonomische Aspekte bewertet. Aus den durchgeführten Analysen wurde u. a. die These abgeleitet, dass die Verwendung von aufbereitetem Bauschutt ökologisch vorteilhafter ist als der Einsatz der untersuchten mineralischen Primärrohstoffe [126, 127].

Eine Untersuchung in Österreich hat 1999 die Umweltwirkungen von Sekundärbaustoffen, unter anderem von rezyklierten Gesteinskörnungen, gegenüber Primärbaustoffen bewertet [128]. Dabei wurden sowohl trocken als auch nass aufbereitete RC-Gesteinskörnungen in die Bewertung einbezogen. In den betrachteten Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Sommersmogpotential und Ozonabbaupotential lagen die Ergebnisse der Sekundärbaustoffe in derselben Größenordnung wie die der Primärbaustoffe oder leicht darunter. Zu beachten ist dabei jedoch, dass der ökobilanzielle Vergleich mit natürlichen Gesteinskörnungen aus Österreich erfolgte, die als gebrochene Körnungen produziert werden. Die Umweltwirkungen der Gewinnung dieser Natursteinkörnungen sind aufgrund der dafür notwendigen Brechvorgänge höher als bei dem überwiegenden Anteil der in Deutschland generierten natürlichen Gesteinskörnungen. Die Wirkungskategorie Landverbrauch bzw. Naturrauminanspruchnahme wurde nicht berücksichtigt. Die wesentlichste Einflussgröße bei diesem ökobilanziellen Vergleich stellten die Transportentfernungen dar.

In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2004 wurde in verschiedenen Szenarien im Straßenbau der Einsatz aufbereiteter Gesteinskörnungen mit der Nutzung von natürlichen Gesteinskörnungen (Kalkstein) verglichen. Das RC-Baustoff-Szenario stellte sich in den meisten Szenarien als ökologisch vorteilhaft gegenüber der Verwendung der natürlichen Ressource Kalkstein dar. Die Nutzung der rezyklierten Gesteinskörnungen hatte eine geringe Absenkung des Treibhauseffektes zur Folge. Als Haupteinflussgrößen wurden die Materialbereitstellung und die Transportstrecken festgestellt [129, 130].

Ebenfalls im Jahr 2004 wurden in einer weiteren Untersuchung die Umweltwirkungen von Betonen mit und ohne Anteile an rezyklierter Gesteinskörnung verglichen. Die von den Autoren erstellte, vergleichende Ökobilanz basierte auf selbst erhobenen Daten von unterschiedlichen Bauschuttaufbereitungsanlagen [131]. Als Wirkungsindikatoren wurden der kumulierte Energieaufwand, Treibhausgasemissionen und der Verbrauch von mineralischen Primärrohstoffen (VMR) untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass der Zementgehalt maßgeblich das ökobilanzielle Profil der Betone hinsichtlich KEA und GWP bestimmt. Weiterhin wurde durch die Untersuchung verschiedener Transportszenarien aufgezeigt, dass gesamtökologisch vorteilhafte Einsatzbereiche von RC-Beton in kiesärmeren Gebieten liegen, da hier die natürlichen Gesteinskörnungen aus weiten Entfernungen angeliefert werden müssen [121].

In einer Ökobilanz aus dem Jahr 2007 wurden Betone mit Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung und ein Referenzbeton mit vollständig natürlicher Gesteinskörnung verglichen [132]. Die Bewertung erfolgte anhand der Wirkungskategorien Treibhauspotential, Ozonabbau-potential, Sommersmogpotential, Versauerungspotential, Überdüngungspotential und dem kumulierten Energieaufwand. Der Ressourcenverbrauch wurde nicht betrachtet. Lediglich das Sommersmogpotential wies deutliche Nachteile für die RC-Betone auf, während sich die anderen Wirkungsindikatoren nur marginal unterschieden. Durch eine Dominanzanalyse wurde die Herstellung des Fließmittels als Ursache für den ungünstigen Wert des Sommersmogpotentials des RC-Betons identifiziert.

Für den Vergleich von RC-Betonen mit einem Anteil von 25 % rezyklierter Gesteinskörnung mit Referenzbetonen aus natürlicher Gesteinskörnung wurden 2009/2010 in der Schweiz die Wirkungskategorien Kiesabbau (Kies aus begrenzt verfügbaren Lagerstätten), Ökosystem – Schadenspotential durch Landnutzung (Siedlungsflächen – Äquivalent), Atemwegserkrankungen (Emissionen von Partikeln (<10 µm) in die Luft), Versauerung, Treibhauseffekt und Energieverbrauch (KEA) bewertet [133]. Als wesentliches Ergebnis wurde die Schonung der natürlichen Kiesressourcen durch den Einsatz von RC-Granulaten benannt. Andere Umweltwirkungen wurden durch die Nutzung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Beton nur in geringem Maße beeinflusst. Eine zusätzliche Umweltentlastung ist generierbar, wenn durch die Verwendung von RC-Granulat Bauabfälle vermieden werden können. Die anfallenden LKW-Transporte von RC-Gesteinskörnungen beeinflussen die Ökobilanz spürbar ab einer Distanz von 30 km [134].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es bei der Herstellung von Beton durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen als Substitut für natürliche Gesteinskörnungen positive Effekte in der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch (ADP/VMR) gibt. Demgegenüber können sowohl eine mögliche Erhöhung der Zementzugabe als auch eine Verlängerung der Transportwege der Gesteinskörnungen zu einer Erhöhung des CO₂-Ausstoßes führen.

4.3 Vorgehensweise bei der ökobilanziellen Bewertung im Projekt

Die Durchführung der ökobilanziellen Bewertungen in diesem Projekt richtete sich nach den Vorgaben der entsprechenden Normen und erfolgte analog zur in Kapitel 4.1 beschriebenen Vorgehensweise. Die Modellierung der Stoffströme wurde mit dem Softwaretool Umberto 5.5 durchgeführt [40]. Mit diesem Tool können Stoff- und Energieflüsse modelliert, berechnet und visualisiert werden. Weiterhin ist es auch möglich mit Umberto ökonomische Bewertungen durchzuführen und Prozesssysteme zu analysieren und zu optimieren.

Die Anwendung der Software erfolgte unter Nutzung der Datenbank „Ecoinvent Data v 2.2“ [135]. In dieser Datenbank steht umfangreiches Datenmaterial für Sachbilanzen, unter anderem auch aus dem Baubereich, zur Verfügung. Auch der Flächenverbrauch unterschiedlicher Prozessschritte und Produkte ist als Wirkungskategorie „Landverbrauch“ in dieser Daten-

bank erfassbar. Dies ist vor dem Hintergrund der laut nationaler Nachhaltigkeitsstrategie beabsichtigten Verringerung des Flächenverbrauchs von besonderer Bedeutung [1, 2].

Die Vorgehensweise bei der Herstellung von Sekundärbaustoffen wurde unter Einbeziehung relevanter Abbruch- und Aufbereitungstechniken modelliert. Grundlage der Verfahrensauswahl waren die Erkenntnisse zu Abbruch- und Aufbereitungstechniken aus den vorherigen Teilvorhaben. Es wurden sowohl häufig eingesetzte Techniken als auch besonders geeignet erscheinende Methoden ausgewählt.

Die Modellierung der Stoffströme erfolgte am Beispiel des Abbruchs von drei unterschiedlichen Modellhäusern mit praxisorientierten Baustoffzusammensetzungen unter besonderer Berücksichtigung von gipshaltigen Innenausbaumaterialien. Anhand bereits vorliegender Erkenntnisse über Wohngebäudetypen wurden die folgenden Modellhäuser entworfen [31, 94]:

- Modellhaus 1: Einfamilienhaus bzw. kleines Mehrfamilienhaus (EFH)
- Modellhaus 2: Mehrfamilienhaus/Plattenbau (PB)
- Modellhaus 3: Industriegebäude (IDB)

Da eine mögliche Nutzung der generierten Recyclingbaustoffe in der Betonherstellung eine Zielvorgabe im Rahmen dieses Projektes ist, wurde der Schwerpunkt auf den Abbruch von Beton zur Gewinnung von RC-Gesteinskörnungen aus Altbeton gelegt.

4.3.1 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen

In dieser Untersuchung werden Abbruch- bzw. Rückbauverfahren und Aufbereitungstechniken in Hinblick auf eine möglichst hohe Sortenreinheit bzw. Schadstoffentfrachtung des aus den Modellgebäuden hergestellten RC-Materials ökobilanziell miteinander verglichen. Der ökobilanzielle Vergleich umfasst den gesamten Handlungsstrang, beginnend beim Abbruch und nachfolgender Bauschutttaufbereitung bis hin zur Bereitstellung des gewonnenen RC-Materials beim Abnehmer, in der Regel einem Betonwerk, inklusive sämtlicher notwendiger Transporte und Umlagerungen des Materials zwischen den Handlungsbeteiligten. Es wurden die Umweltwirkungen ermittelt, die bis zur Bereitstellung einer erzeugten RC-Gesteinskörnung des Typs 1 (Betonanteil > 90 %) anfallen.

Die Umweltwirkungen wurden nach der Bewertungsmethode CML 2001 bestimmten Wirkungskategorien zugeordnet und entsprechend bewertet.

4.3.2 Funktionelle Einheit

Voraussetzung für den ökobilanziellen Vergleich verschiedener Produktsysteme ist eine gemeinsame funktionelle Einheit. Der Schwerpunkt in dieser Untersuchung ist die Bilanzierung der Erzeugung einer möglichst hochwertigen, im Hochbau einsetzbaren RC-Gesteinskörnung aus Altbeton. Im Rahmen der ökobilanziellen Bewertung werden unterschiedliche

Verfahrenswege zur Gewinnung dieses RC-Baustoffs miteinander verglichen. Entsprechend werden mögliche Alternativsysteme, wie die vollständige Entsorgung auf einer Deponie oder andere Verwertungswege für Bauschutt, z.B. als Verfüllmaterial, nicht betrachtet.

Eine Nutzengleichheit wird erreicht, indem eine erzeugte Menge RC-Gesteinskörnung die gleiche Menge der Primärressource Kies am selben Ort ersetzt. Im vorliegenden Fall ist die funktionelle Einheit daher eine durch Abbruch/Rückbau und Aufbereitung erzeugte Tonne RC-Gesteinskörnung des Liefertyps 1 (RC-1) beim Abnehmer/Betonwerk. Sämtliche Input- und Outputflüsse der Sachbilanz werden auf diese Größe bezogen.

4.3.3 Wirkungskategorien

Die Wirkungskategorien mit ihren internationalen Abkürzungen und ihren Einheiten mit den jeweiligen Äquivalenten wurden in diesem Projekt nach der Wirkungsabschätzung CML 2001 ausgewählt. Nachfolgend findet sich eine Aufzählung der für diese ökobilanzielle Bewertung untersuchten Wirkungskategorien mit den jeweiligen Äquivalenten.

- | | | |
|-------------------------------|---------------|------------------------|
| • Ressourcenverbrauch | (ADP) | kg Sb eq. |
| • Landverbrauch | Landverbrauch | m ² a |
| • Treibhauseffekt | (GWP100) | kg CO ₂ eq. |
| • Stratosphärischer Ozonabbau | (ODP 20) | kg CFC-11 eq. |
| • Versauerungspotential | (AP) | kg SO ₂ eq. |
| • Überdüngungspotential | (EP) | kg NO _x eq. |

4.3.4 Funktionen des Produktsystems

Ein Produktsystem ist eine Sammlung bzw. Zusammenfassung von Modulen (Verfahrenskomponenten), die durch Material- und Energieflüsse verbunden sind. Der Begriff Produkt gilt dabei nicht nur für Produkte im herkömmlichen Sinne, sondern auch für Dienstleistungen. Die Beschreibung eines Produktsystems enthält Module, Elementarflüsse und Produktflüsse über die Systemgrenzen in das System hinein bzw. hinaus sowie Zwischenproduktflüsse innerhalb des Systems. Die wesentliche Eigenschaft eines Produktsystems wird durch seine Funktion und nicht durch das Endprodukt bestimmt.

Die Systemgrenze des Produktsystems dieser ökobilanziellen Betrachtung wird nachfolgend in Abbildung 47 dargestellt. Der Handlungsstrang geht von oben nach unten, die dazu benötigten Inputströme stehen links und die erzeugten Outputströme rechts.

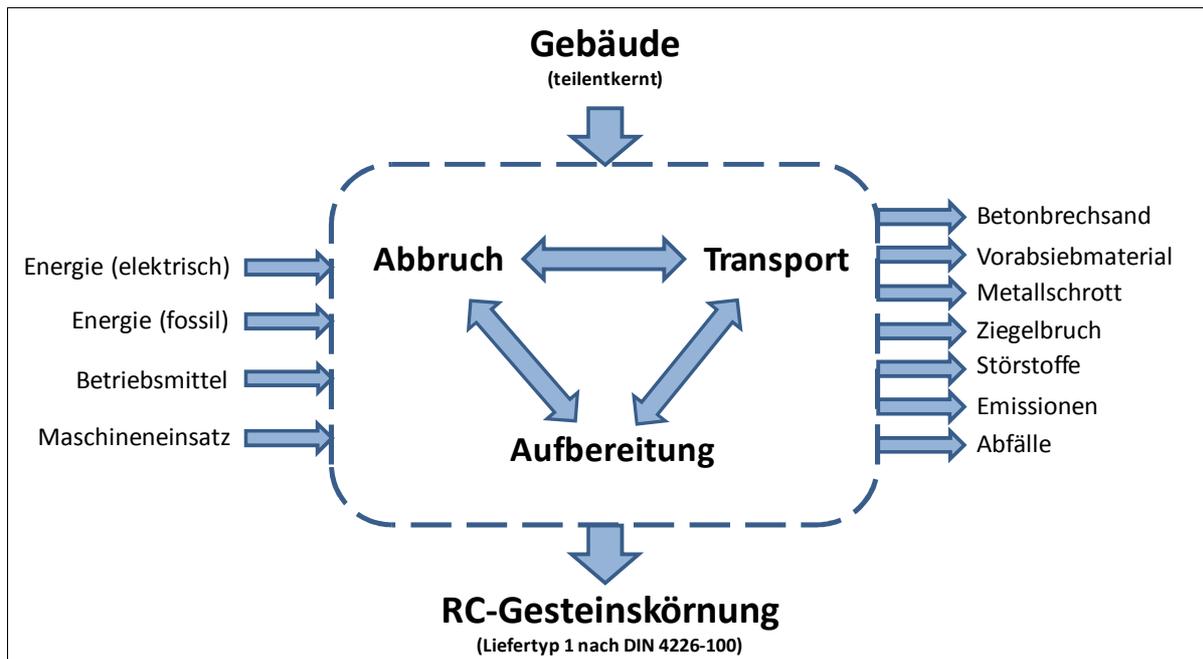


Abbildung 47: Systemgrenzen des Produktsystems der ökobilanziellen Betrachtung

Das Ausgangsmaterial, bestehend aus einem teilentkernten Gebäude, wird unter Zusammenwirkung von Rückbau/Abbruch, Transport und Aufbereitung zum Endprodukt: RC-Gesteinskörnung Typ 1. Für dieses Produktsystem sind als notwendige Inputströme in das System Energie (elektrisch und fossil), Betriebsmittel und Maschineneinsatz zu nennen, als Outputströme verlassen Betonbrechsand, Metallschrott, Störstoffe, Emissionen, Vorabsiebung und Abfall das System.

Der Systemanfang ist der Zeitpunkt beim Abbruch eines bereits teilentkernten Gebäudes an dem eine mögliche selektive Sulfatentfrachtung beginnen kann. Andere selektive Arbeitsschritte, die ohnehin durchgeführt werden, liegen außerhalb der Systemgrenzen und werden nicht betrachtet. Die Systemgrenze am Ende des Handlungsstranges ist der Zeitpunkt, an dem das aufbereitete RC-Material des Typs 1, dem Abnehmer vor Ort, in der Regel einem Betonwerk, zur Verfügung gestellt wird. Die Inputströme gliedern sich auf Basis der eingesetzten Datenbank wie folgt auf [135]:

- Energie (elektrisch): Strommix Deutschland
- Energie (fossil): Dieselkraftstoff, schwefelarm und nicht schwefelarm
- Betriebsmittel: Schmieröl und andere für den Betrieb notwendigen Materialien
- Maschineneinsatz: Abnutzung der Maschinen mit dazugehöriger Infrastruktur

Die Outputströme gliedern sich ebenfalls auf Basis der eingesetzten Datenbank wie folgt auf:

- Betonbrechsand: wird entweder dem Recycling oder der Deponierung zugeführt
- Vorsiebmaterial: Material aus Vorabsiebung wird der Deponierung zugeführt
- Metallschrott: wird dem Recycling zugeführt
- Ziegelbruch: wird bei Anfall dem Recycling zugeführt
- Störstoffe: werden einer thermischen Verwertung zugeführt
- Emissionen: entstehen durch Herstellung und Umsetzung des Inputstroms
- Abfall: z.B. durch den Betrieb der Maschinen anfallendes Altöl wird der wird einer thermischen Verwertung zugeführt

Falls Ziegelmaterial anfällt, wird dieses, ähnlich wie der Metallschrott, dem Recycling zugeführt – jedoch auf einem niedrigeren Wertstoffrückgewinnungsniveau als der Altbeton. Das Grundmodell der ökobilanziellen Betrachtung ist nachfolgend in Abbildung 48 dargestellt. Die zugehörigen Subnetze für Abbruch, Bauschutttaufbereitung und Transporte finden sich in Anhang D.

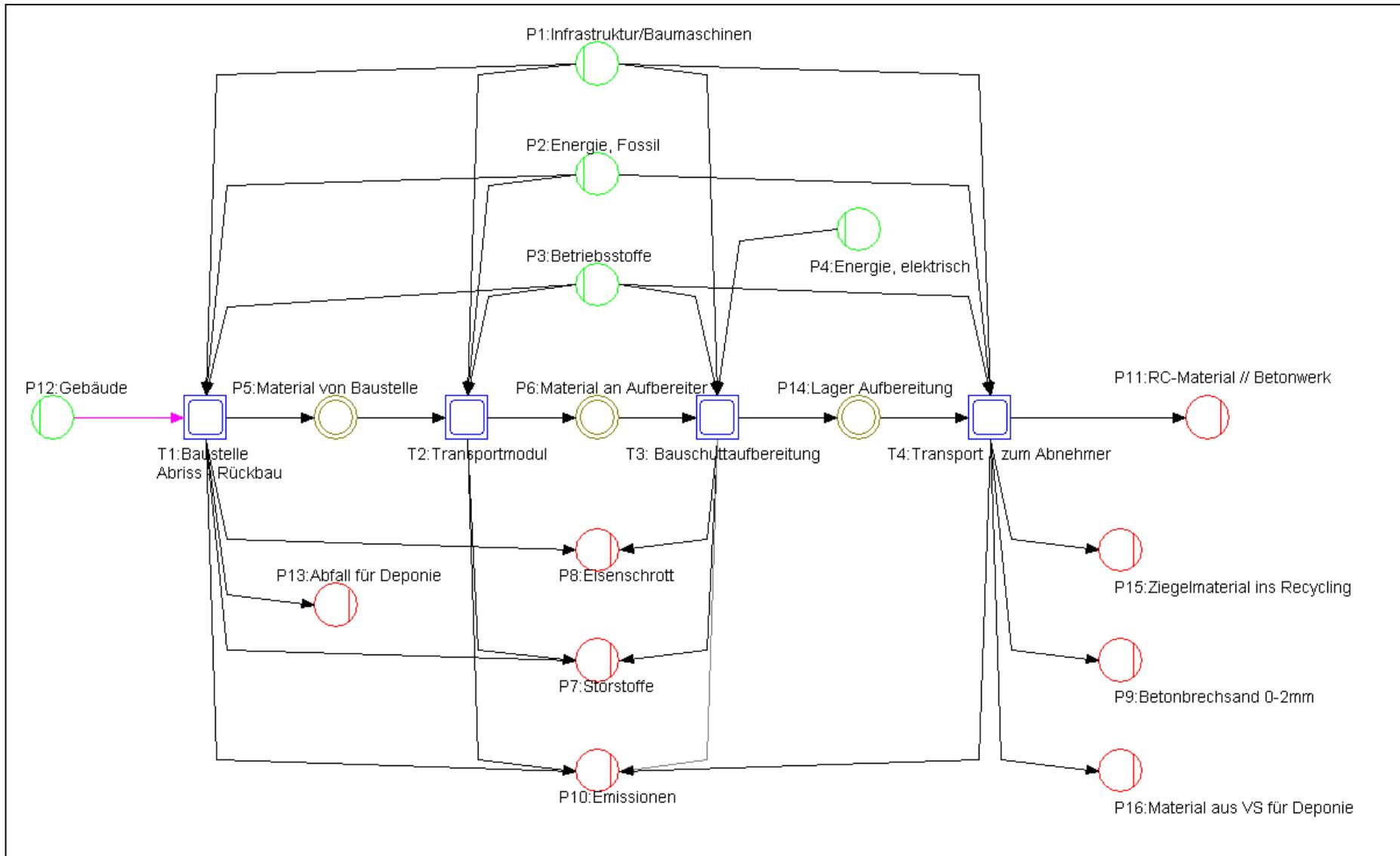


Abbildung 48: Grundmodell der ökobilanziellen Betrachtung

4.3.5 Modellierung der Szenarien

Die bei einem Abbruch eingesetzten Verfahren und Vorgehensweisen richten sich nach dem jeweiligen Gebäude, seiner Größe, Bausubstanz und Bauweise sowie – im Falle von Kontaminationen – nach der vorherigen Nutzung. Aufgrund der bestehenden großen Unterschiede zwischen verschiedenen Gebäudetypen ist auch für eine ökobilanzielle Bewertung die Betrachtung verschiedener Vorgehensweisen beim Abbruch der unterschiedlichen Häusertypen sinnvoll.

Auf Grundlage des Produktsystems, der Ergebnisse der eigenen Umfrage (siehe Kapitel 3.3.2) und der Literaturrecherche (siehe Kapitel 2.3 bis 2.5) wurden drei unterschiedliche Grundszenarien modelliert anhand derer übliche Abbruch- und Aufbereitungsoptionen möglichst weitgehend abgebildet werden. In Szenario 1 (EFH) wurde der Rückbau eines Einfamilienhauses oder eines kleinen Mehrfamilienhauses, mit anschließender Bauschutttaufbereitung in einer stationären Anlage, betrachtet. Das Stoffstrommodell in Szenario 2 (PB) zeigt den Abbruch eines ostdeutschen Plattenbaus Typ P2, ebenfalls mit anschließender Bauschutttaufbereitung in einer stationären Anlage. In Szenario 3 (IDB) wurde der Rückbau eines industriell genutzten Gebäudes mit anschließender Bauschutttaufbereitung vor Ort mit einer mobilen Aufbereitungsanlage modelliert. Diese Grundszenarien wurden jeweils mit und ohne selektiven Rückbau gipshaltiger Bauelemente entwickelt und ökobilanziell analysiert. Eine Beschreibung der einzelnen Szenarien findet sich in den nachfolgenden Abschnitten, detaillierte Angaben, z.B. zu den eingesetzten Geräten, sind in Anhang E aufgeführt.

In den bisher veröffentlichten ökobilanziellen Betrachtungen im Bereich Baurestmassen wurden die Transportentfernungen als ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Umweltwirkungen identifiziert. In der Modellierung der Szenarien in dieser Studie basieren die getroffenen Annahmen über die Entfernungen zwischen den Handlungsbeteiligten auf bisherigen Veröffentlichungen, (siehe Kapitel 4.2) sowie auf Daten des statistischen Bundesamtes [136]. Die aktuell veröffentlichten Zahlen des statistischen Bundesamtes weisen für das Jahr 2009 im Bundesgebiet eine Anzahl von 2055 Bauschuttaufbereitungsanlagen und 143 für die entsprechenden Abfallschlüssel zugelassene Deponien aus. Daraus folgt, dass der durchschnittliche Transportweg zu einer Deponie deutlich größer bilanziert werden muss als der Transportweg zu einer Bauschuttaufbereitungsanlage. In Tabelle 20 sind die in den Modellierungen angenommenen Transportentfernungen zwischen den Handlungsbeteiligten aufgeführt.

Tabelle 20: bilanzierte Entfernungen zwischen den Handlungsbeteiligten

bilanzierte Strecken	Entfernungen	
Baustelle - Aufbereiter	20	km
Baustelle - Deponie	50	km
Aufbereiter - Deponie	50	km
Aufbereiter - Abnehmer	10	km

Diese Annahmen gelten gleichermaßen für alle in den Szenarien bilanzierten Transportwege zwischen Baustelle und Deponie, Baustelle und Aufbereiter, Aufbereiter und Abnehmer und zwischen Aufbereiter und Deponie.

Grundsätzlich sollte auch die unterschiedliche geografische Lage der jeweiligen Standorte bei der Modellierung von Szenarien Berücksichtigung finden. Während Baustellen des Hochbaus meistens innerhalb des Stadtgebietes liegen, befinden sich Bauschuttzubereitungsanlagen überwiegend am Stadtrand und Deponiestandorte in der Regel im ländlichen Umland. Da diese Annahmen lediglich eine Tendenz widerspiegeln sind in realen Projekten Abweichungen der jeweiligen Entfernungen im Einzelfall zu erwarten.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die gewählten Szenarien kurz beschrieben: insbesondere die Sulfatquellen, die gewählte Modellgrenze und die Stammdaten des Umberto-Modells. Detaillierte Informationen zu Modellgrundlagen, technischen Daten und Bauweise der Gebäude, der in der Bilanz zugrunde gelegten Abbruchtechnik, der Leistung der eingesetzten Geräte und Details zur Bauschuttzubereitung sind ausführlich im Anhang E dargestellt.

Grundszenario 1: Ein- oder kleines Mehrfamilienhaus (EFH)

Sulfatquellen:

Anhydritestrich der Stärke 5 cm im Wohnbereich (Verbundestrich),

Gipsbauwände in den Nassbereichen, pauschal 150 kg Gips pro Wohnung und

Wandputz, dünne Schicht auf dem Mauerwerk, wird wegen der geringen Menge nicht weiter betrachtet.

Modellgrenze:

Das Gebäude ist teilentkernt, folgende Arbeitsschritte sind bereits erfolgt und werden in diesem Modell nicht berücksichtigt: Demontage des Ziegeldaches und des Dachstuhls inklusive Dachausbau mit Holz, der Heizungsanlage, der Sanitärkeramiken (Waschbecken, WC und Wanne), der Stromleitungen, der Fenster und Rahmen, Türen und Türzargen sowie Treppengeländer. Eventuell vorhandene Schadstoffe sind beseitigt.

Stammdaten Grundszenario 1, Einfamilien- / Mehrfamilienhaus (EFH):

Anhydritestrich:	25.200 kg
Beton aus Wänden und Decken:	100,34 t
Bodenplatte aus Beton:	33,45 t
Gipskartonplatten:	450 kg
Ziegelmauerwerk:	198,87 t

Szenario 1.1., EFH mit selektivem Abbruch

Der Abbruch des Gebäudes wird mit einem Hydraulikbagger mit Anbauteilen ausgeführt. Mauern und Innenwände aus Mauerwerk werden mit Abbruchstielen abgebrochen, die Bodenplatte und Betondecken werden getrennt eingerissen und abgegriffen. Die Gipsbauwände werden händisch zurückgebaut, der Verbundestrich wird mit Pressluftschlämmern händisch abgestemmt. Das getrennt abgebrochene gipshaltige Material wird deponiert. Der Bauschutt wird in einer stationären Anlage aufbereitet. (Details siehe Anhang E). Die Stoffströme in diesem Szenario entstehen analog zu den Stammdaten des Grundszenarios.

Grundszenario 2: Plattenbau, Typ P2 (PB)

Sulfatquellen:

Anhydritestrich der Stärke 5 cm im Wohnbereich (Verbundestrich) und
Gipsbauwände in den Nassbereichen, pauschal 150 kg Gips pro Wohnung.

Modellgrenze:

Das Gebäude ist teilentkernt, folgende Arbeitsschritte sind schon erfolgt und werden in diesem Modell nicht berücksichtigt: Demontage der Heizungsanlage, der Sanitärkeramiken (Waschbecken, WC und Wanne), der Stromleitungen, der Fenster und Rahmen, Türen und Türzargen sowie Treppengeländer. Eventuell vorhandene Schadstoffe sind beseitigt.

Stammdaten Grundszenario 2, Plattenbau Typ P2 (PB):

Anhydritestrich:	77.040 kg
Beton aus Wänden und Decken:	1.790,86 t
Bodenplatte aus Beton:	330,74 t
Gipskartonplatten:	4.500 kg
Ziegelmauerwerk:	0 kg

Szenario 2.1: PB mit selektivem Abbruch

Der Abbruch des Gebäudes wird mit einem Hydraulikbagger mit Anbauteilen ausgeführt. Die Gipsbauwände werden separat abgegriffen bzw. händisch zurückgebaut. Der Verbundestrich wird mit Presslufthämmern abgestemmt. Das getrennt abgebrochene gipshaltige Material wird deponiert. Der Bauschutt wird in einer stationären Anlage aufbereitet. (Details siehe Anhang E). Die Stoffströme in diesem Szenario entstehen analog zu den Stammdaten des Grundszenarios.

Grundszenario 3: Gewerbegebäude / Industriebau (IDB)

Sulfatquellen:

Anhydritestrich der Stärke 5cm im Bürobereich (Verbundestrich) und
Gipsbauwände in den Nassbereichen.

Modellgrenze:

Das Gebäude ist teilentkernt, folgende Arbeitsschritte sind schon erfolgt und werden in diesem Modell nicht berücksichtigt. Demontage des gesamten Maschinenparks, der Heizungsanlage, der Sanitärkeramiken (Waschbecken, WC, Duschen), der Stromleitungen, der Fenster und Rahmen, Türen und Türzargen sowie Treppengeländer. Eventuell vorhandene Schadstoffe sind beseitigt.

Stammdaten Grundszenario 3, Gewerbegebäude / Industriebau (IDB):

Anhydritestrich:	164.062,5 kg
Beton aus Wänden und Decken:	10.481,25 t
Bodenplatte aus Beton:	1.050 t
Gipskartonplatten:	5.000 kg
Ziegelmauerwerk:	0 kg

Szenario 3.1: IDB mit selektivem Abbruch

Der Abbruch des Gebäudes wird mit Hydraulikbagger mit Anbauteilen und Seilbagger mit Abrißbirne ausgeführt. Die Gipsbauwände werden separat abgegriffen bzw. händisch zurückgebaut. Der Verbundestrich wird mit einer Estrichfräse abgetragen. Das getrennt abgebrochene gipshaltige Material wird deponiert. Der Bauschutt wird in einer mobilen Anlage vor Ort aufbereitet (Details siehe Anhang E). Die Stoffströme in diesem Szenario entstehen analog zu den Stammdaten des Grundszenarios.

Szenario 1.2: Einfamilien- oder kleines Mehrfamilienhaus (EFH) ohne selektiven Abbruch

Dieses Modell beschreibt den Rückbau eines Einfamilien- oder kleinen Mehrfamilienhauses, allerdings ohne den gesonderten Rückbau gipshaltiger Bauelemente. Die Grunddaten dieses Szenarios basieren auf den Daten des zuvor beschriebenen Szenarios „Einfamilien- oder kleinem Mehrfamilienhaus (EFH) mit selektivem Rückbau“, die jedoch in den folgenden Punkten angepasst worden sind.

Die Masse der gipshaltigen Bauelemente, Anhydritestrich und Gipskartonplatten, wurde dem „Beton aus Wänden und Decken“ zugeschlagen, da diese Materialien hier mit den gleichen Verfahren abgebrochen werden.

Bei der stationären Bauschuttaufbereitungsanlage ist der Austrag von Betonbrechsand beim Zwischen- und beim Produktsieb erhöht worden (von jeweils 10% auf 17,5%), da der Anlage mehr fein brechendes, sulfathaltiges Material zugeführt wird. Es wird angenommen, dass sämtliches sulfathaltiges Material von diesen Sieben zusammen mit dem Betonbrechsand abgetrennt wird.

Der abgetrennte Betonbrechsand wird nicht wie beim selektiven Abbruch durch einen Abnehmer einer Wiederverwertung zugeführt, sondern aufgrund der hohen Sulfatbelastung deponiert.

Stoffströme Szenario 1.2, Einfamilien- // Mehrfamilienhaus ohne selektiven Abbruch:

Anhydritestrich:	0 kg
Beton aus Wänden und Decken, mit Estrich- und Gipsplattenresten:	125,99 t
Bodenplatte aus Beton:	33,45 t
Gipskartonplatten:	0 kg
Ziegelmauerwerk:	198,87 t

Szenario 2.2: Plattenbau Typ P2 ohne selektiven Abbruch

Dieses Modell beschreibt den Abbruch eines Plattenbaus Typ P2, allerdings ohne den gesonderten Rückbau gipshaltiger Bauelemente. Die Grunddaten dieses Szenarios basieren auf den Daten des Szenarios „Plattenbau Typ P2 mit selektivem Rückbau“, die jedoch in den folgenden Punkten angepasst worden sind.

Mit der Masse der gipshaltigen Bauelemente, Anhydritestrich und Gipskartonplatten, wurde wie zuvor im Szenario 1 für das Einfamilienhaus (ohne selektive Arbeitsschritte) beschrieben verfahren.

Bei der stationären Bauschuttzubereitungsanlage ist der Austrag von Betonbrechsand beim Zwischen- und beim Produktsieb von jeweils 10% auf 11,5% erhöht worden, da der Anlage mehr fein brechendes, sulfathaltiges Material zugeführt wird. Es wird angenommen, dass sämtliches sulfathaltiges Material von den beiden Sieben zusammen mit dem Betonbrechsand abgetrennt wird.

Die hohe Sulfatbelastung des Betonbrechsandes führt analog dem Szenario 1.2 zu einer Deponierung des abgetrennten Materials.

Stoffströme Szenario 2.2, Plattenbau Typ P2, ohne selektiven Abbruch:

Anhydritestrich:	0 kg
Beton aus Wänden und Decken, mit Estrich- und Gipsplattenresten:	1.872,4 t
Bodenplatte aus Beton:	330,74 t
Gipskartonplatten:	0 kg
Ziegelmauerwerk:	0 kg

Szenario 3.2: Gewerbegebäude / Industriebau (IDB) ohne selektiven Abbruch

Dieses Modell beschreibt den Rückbau eines Gewerbegebäudes / Industriebaus, allerdings ohne den gesonderten Rückbau gipshaltiger Bauelemente. Die Grunddaten dieses Szenarios basieren auf den Daten des Szenarios 3: „Gewerbegebäude / Industriebau mit selektivem Rückbau“ wie sie zuvor beschrieben wurden, jedoch erfolgte die nachfolgend aufgeführte Anpassung einiger Abläufe.

Mit der Masse der gipshaltigen Bauelemente, Anhydritestrich und Gipskartonplatten, wurde wie zuvor im Szenario 1 für das Einfamilienhaus (Abbruch ohne selektive Arbeitsschritte) dargestellt, verfahren. Bei der mobilen Bauschuttzubereitungsanlage ist der Austrag von Betonbrechsand von 25% auf 26% erhöht worden, da mehr fein brechendes, sulfathaltiges Material der Anlage zugeführt wird. Es wird die Annahme getroffen, dass sämtliches sulfathaltiges Material von dem Produktsieb zusammen mit dem Betonbrechsand abgetrennt wird. Falls der einstufige Brecher mit angeschlossenem Produktsieb der mobilen Anlage nicht in der Lage ist das sulfathaltige Material vollständig bzw. fast vollständig abzutrennen, ist die Qualität des Produktes RC-Material Liefertyp 1 aufgrund des erhöhten Sulfatgehaltes nicht gesichert. Das Material kann dann nicht mehr als RC-Gesteinskörnung in Beton eingesetzt werden und damit auch nicht entsprechend bilanziert werden.

Mit dem abgetrennten Betonbrechsand wird aufgrund der angenommenen hohen Sulfatbelastung wie für die Szenarien 1.2 und 2.2 beschrieben verfahren.

Stoffströme Szenario 3.2, Gewerbegebäude // Industriebau, ohne selektiven Abbruch:

Anhydritestrich:	0 kg
Beton aus Wänden und Decken, mit Estrich- und Gipsplattenresten:	1.650,31 t
Bodenplatte aus Beton:	1.050 t
Gipskartonplatten:	0 kg

4.4 Sachbilanz

In der Norm ISO 14040 [114] wird die Sachbilanz als „Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“ bezeichnet. Die Funktion einer Sachbilanz ist dabei die Identifikation der Elementarflüsse im betrachteten Produktsystem. Das Ergebnis der Sachbilanz liefert die Systembeschreibung und eine Darstellung der ermittelten Elementarflüsse von der oder zur Umwelt.

Eine Darstellung der wichtigsten In- und Outputströme aller betrachteten Szenarien findet sich in Tabelle 21.

Tabelle 21: Darstellung der wichtigsten Stoffströme

Szenario 1 (EFH)									
Inputströme	selektiv	nicht selektiv	Einheit	Veränderung	Outputströme	selektiv	nicht selektiv	Einheit	Veränderung
Gebäude	358,31	358,31	t	0,00%	RC-1 Material	96,88	96,97	t	0,09%
Energie (fossil) Diesel	486,46	576,86	kg	18,58%	Material für Deponie	58,85	138,11	t	134,68%
Energie (elektrisch)	972,65	1.007,59	kWh	3,59%	Material für Recycling	200,63	121,03	t	-39,68%
					CO ₂ -Emissionen	1.530,86	1.816,79	kg	18,68%
Szenario 2 (PB)									
Inputströme	selektiv	nicht selektiv	Einheit	Veränderung	Outputströme	selektiv	nicht selektiv	Einheit	Veränderung
Gebäude	2.203,14	2.203,14	t	0,00%	RC-1 Material	1.531,21	1.537,44	t	0,41%
Energie (fossil) Diesel	3.273,70	3.741,59	kg	14,29%	Material für Deponie	292,51	644,82	t	120,44%
Energie (elektrisch)	6.180,83	6.373,44	kWh	3,12%	Material für Recycling	359,37	0,00	t	-100,00%
					CO ₂ -Emissionen	10.292,88	11.769,15	kg	14,34%
Szenario 3 (IDB)									
Inputströme	selektiv	nicht selektiv	Einheit	Veränderung	Outputströme	selektiv	nicht selektiv	Einheit	Veränderung
Gebäude	11.700,31	11.700,31	t	0,00%	RC-1 Material	7.098,17	7.088,32	t	-0,14%
Energie (fossil) Diesel	24.232,94	28.204,86	kg	16,39%	Material für Deponie	1.288,65	4.089,42	t	217,34%
Energie (elektrisch)	14,89	54,39	kWh	265,28%	Material für Recycling	2.798,96	0,00	t	-100,00%
					CO ₂ -Emissionen	75.771,25	88.280,61	kg	16,51%

Tabelle 21 beschränkt sich auf die Darstellung der wichtigsten Stoffströme innerhalb der einzelnen Szenarien (vgl. Abbildung 48). Eine übersichtliche Darstellung sämtlicher in der Sachbilanz ermittelten Elementarflüsse ist bei sechs Modellen mit jeweils ca. 1300 Einzelpositionen nicht möglich.

Die jeweiligen In- und Outputströme orientieren sich an den Systemgrenzen und dem Produktsystem aus dem Kapitel 4.3.4. Eventuelle Abweichungen der Ergebnisse zu denen aus den Tabellen 22 und 23 ergeben sich dadurch, dass sie lediglich die innerhalb des Produktsystems liegenden Stoffflüsse, Ressourcenverbräuche und entstehenden Emissionen beinhalten und nicht die außerhalb liegenden Vor- und Nachketten der eingesetzten Produkte mit einbeziehen. Dadurch lässt sich auch der enge Zusammenhang zwischen der eingesetzten fossilen Energie (Diesel) und den CO₂-Emissionen erklären. Andere CO₂-Emissionsquellen, beispielsweise in der Vorkette durch die Energieerzeugung, sind in Tabelle 21 nicht berücksichtigt.

Die Stoff- und Energieströme des selektiven Abbruchs wurden denen des nicht selektiven Abbruchs unter Angabe der prozentualen Abweichung zueinander gegenübergestellt. Auf der Input-Seite wurde die Gebäudemasse und für die Prozesse innerhalb der Systemgrenzen benötigte elektrische und fossile Energie betrachtet. Kleine Stoffströme wie Maschineneinsatz oder notwendige Betriebsmittel wurden nicht explizit ausgewiesen. Auf der Output-Seite wurde erzeugtes RC-1 Material, Material für Deponierung (gipshaltige Bauabfälle, Vorsiebmaterial und je nach Sulfatbelastung Betonbrechsand), Material für andere Verwertungswege (Ziegelschutt und Betonbrechsand) und entstehende CO₂-Emissionen betrachtet. Kleine Stoffströme wie z. B. Metallschrott oder Störstoffe wurden nicht explizit ausgewiesen.

Es wurde die Annahme getroffen, dass bei beiden Rückbaumethoden die gleiche Masse an RC-1 Material erzeugt wird. Die dennoch geringfügigen Massenunterschiede zwischen selektiven und nicht selektiven Rückbau können als unbedeutend angesehen werden. Die Ursachen sind modellabhängig, da die Abtrennung von Vorabsiebung und Betonbrechsand aus dem Hauptstrom unterschiedlich bilanziert wurde (siehe Kapitel 4.3.4 und Anhang E).

Der in allen drei Szenarien festgestellte höhere Verbrauch elektrischer Energie beim nicht selektiven Abbruch gegenüber dem selektiven Abbruch basiert auf den Umweltwirkungen des Deponiebetriebs und ist aufgrund der vergleichsweise geringen Absolutwerte von untergeordneter Bedeutung.

4.5 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung ordnet Sachbilanzergebnisse verschiedenen Wirkungskategorien zu. Der Bezug zur funktionellen Einheit bleibt dabei bestehen. Die einzelnen Elementarflüsse der Sachbilanzergebnisse wurden den sechs betrachteten Wirkungskategorien nach den Vorgaben der Wirkungsabschätzung nach CML 2001 zugeordnet. Die Ergebnisse der öko-bilanziellen Bewertungen der drei Grundmodelle mit selektivem Rückbau sind nachfolgend in

Kapitel 4.5.1 in tabellarischer Form dargestellt. In Kapitel 4.5.2 sind die Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertungen mit nicht selektivem Rückbau dargestellt.

4.5.1 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, selektiver Abbruch

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung in Tabelle 22 sind auf die funktionelle Einheit (Tonne RC-Gesteinskörnung Liefertyp 1) bezogen und stellen die Umweltwirkungen der Wirkungskategorien beim selektiven Rückbau der drei Szenarien dar.

Tabelle 22: Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 (EFH, PB und IDB), selektiver Abbruch

Alle Wirkungskategorien nach CML 2001	Teileinheit	Gesamt	FE / t RC-1 Material	Äquivalente
Szenario 1 - selektiver Rückbau Grundmodell				
Zusammenfassung Auswertung	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente
RC-1 Material		96.878,75	1.000,00	kg
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	34,36	0,35	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	150,19	1,55	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	4.473,08	46,17	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	0,00	0,00	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	19,71	0,20	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	32,80	0,34	kg NO _x eq.
Szenario 2 - selektiver Rückbau Grundmodell				
Zusammenfassung Auswertung	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente
RC-1 Material		1.531.206,05	1.000,00	kg
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	213,24	0,14	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	844,36	0,55	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	28.226,88	18,43	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	0,00	0,00	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	127,95	0,08	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	214,45	0,14	kg NO _x eq.
Szenario 3 - selektiver Rückbau Grundmodell				
Zusammenfassung Auswertung	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente
RC-1 Material		7.098.168,90	1.000,00	kg
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	887,86	0,13	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	2.353,12	0,33	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	122.852,58	17,31	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	0,02	0,00	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	795,27	0,11	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	1.431,61	0,20	kg NO _x eq.

Die Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 (EFH, PB und IDB) zeigen in der Wirkungskategorie Klimawandel die größten absoluten Werte. Die Wirkungskategorien Ressourcenverbrauch, Landverbrauch, Versauerungspotential und Überdüngungspotential liegen zusammen in einer Größenordnung. Die Werte der Wirkungskategorie stratosphärischer Ozonabbau sind nochmals deutlich kleiner als die der anderen Kategorien.

Die Größenordnungen der Wirkungskategorien sind untereinander in der Regel nicht direkt vergleichbar, da ein Kilogramm CO₂-Äquivalente andere Umweltwirkungen verursacht als beispielsweise die gleiche Menge an SO₂-Äquivalenten oder NO_x-Äquivalenten. Korrelationen können jedoch durch die Abhängigkeit einzelner Wirkungskategorien von bestimmten Parametern, wie z.B. dem Energieverbrauch, vorhanden sein. Ein Vergleich kann daher in einigen Fällen erste Hinweise auf die Hauptumweltwirkungen in den Prozessketten liefern.

Die drei Szenarien selbst unterscheiden sich in den Größenordnungen ebenfalls deutlich voneinander, während sich die Relationen der einzelnen Wirkungskategorien in den einzelnen Szenarien untereinander ähneln. Die Umweltwirkungen der Kategorie Klimawandel in den Szenarien 2 (PB) und 3 (IDB) sind etwa gleich groß und betragen 35 bis 40 % von Szenario 1 (EFH), ähnlich verhält es sich bei den anderen Kategorien.

Dies liegt vor allem daran, dass als funktionelle Einheit eine Tonne RC-Gesteinskörnung des Liefertyps 1 gewählt wurde, deren mineralische Zusammensetzung nach DIN 4226-100 mindestens zu 90 % aus Beton oder Natursteinkörnung bestehen muss. Während die Gebäude in den Szenarien 2 und 3, Plattenbau und Industriegebäude, größtenteils aus Beton bestehen, wurde das Einfamilienhaus in Szenario 1 zu über 50 % aus Ziegelmauerwerk hergestellt. Daher ist die verhältnismäßige Menge an Material, auf welches die Umweltwirkungen als funktionelle Einheit bezogen werden können, in Szenario 1 deutlich geringer und die auf die funktionelle Einheit bezogenen Umweltwirkungen entsprechend größer als in den beiden anderen Szenarien.

4.5.2 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, nicht selektiver Abbruch

Im direkten Vergleich sind die Ergebnisse der Abschätzungen der Umweltwirkungen von nicht selektiv durchgeführten Abbrüchen höher als die Werte für die Umweltwirkungen der Abbrüche mit selektiven Arbeitsschritten. Dies gilt für alle drei Szenarien und alle Wirkungskategorien (siehe Tabelle 23).

Die größten prozentualen Unterschiede zwischen selektiven und nicht selektiven Abbrüchen sind in der Wirkungskategorie Landverbrauch zu verzeichnen. Die größte absolute Zunahme der Umweltwirkungen ist in allen drei Szenarien in der Wirkungskategorie Klimawandel zu verzeichnen, hier wurden auch mit Werten von mehr als 10 kg CO₂-Äquivalenten in jedem untersuchten Szenario die größten Absolutwerte erreicht.

Tabelle 23: Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 (EFH, PB und IDB), nicht selektiver Abbruch

Alle Wirkungskategorien nach CML 2001	Teileinheit	Gesamt	FE / t RC-1 Material	Äquivalente
Szenario 1 - nicht selektiver Rückbau Grundmodell				
Zusammenfassung Auswertung	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente
RC-1 Material		96.986,37	1.000,00	kg
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	46,17	0,48	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	261,99	2,70	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	5.703,89	58,81	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	0,00	0,00	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	25,14	0,26	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	41,75	0,43	kg NO _x eq.
Szenario 2 - nicht selektiver Rückbau Grundmodell				
Zusammenfassung Auswertung	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente
RC-1 Material		1.537.435,65	1.000,00	kg
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	266,94	0,17	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	1.338,26	0,87	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	33.896,61	22,05	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	0,00	0,00	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	153,92	0,10	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	257,79	0,17	kg NO _x eq.
Szenario 3 - nicht selektiver Rückbau Grundmodell				
Zusammenfassung Auswertung	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente
RC-1 Material		7.088.329,56	1.000,00	kg
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	1.300,88	0,18	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	6.180,66	0,87	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	166.251,09	23,45	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	0,02	0,00	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	1.004,99	0,14	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	1.786,22	0,25	kg NO _x eq.

In Szenario 1 (EFH), steigen die Umweltwirkungen in der Kategorie Klimawandel beim nicht selektiven Rückbau um ca. 27 % gegenüber dem selektiven Rückbau. Dies bedeutet eine Zunahme von 46,17 kg CO₂ eq. auf 58,81 kg CO₂ eq. pro Tonne rezyklierte Gesteinskörnung. In der Kategorie Landverbrauch ist bei Szenario 1 (EFH) mit rund 74 % die größte Zunahme der Umweltwirkungen zu erkennen.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse von selektivem und nicht selektivem Rückbau in Szenario 2 (PB), ähnelt der von Szenario 1. In Bezug auf den Klimawandel steigen die Umweltwirkungen in Szenario 2 (PB) um ca. 20 % und damit etwas geringer als in Szenario 1.

rio 1 (EFH), sie steigen von 18,43 kg CO₂ eq. auf 22,14 kg CO₂ eq. Auch hier ist eine deutliche Zunahme des Landverbrauchs zu erkennen.

Auch der Vergleich der Ergebnisse der beiden betrachteten Vorgehensweisen beim Abbruch in Szenario 3 (IDB), zeigt ähnliche Unterschiede innerhalb und zwischen den Wirkungskategorien wie die ersten beiden Szenarien. Die CO₂-Äquivalente in der Kategorie Klimawandel steigen um ca. 35 % von 17,31 kg CO₂ eq. auf 23,42 kg CO₂ eq. und damit etwas stärker als in den anderen Szenarien. Dies liegt überwiegend daran, dass die Anlage für die mobile Bauschutttaufbereitung in Szenario 3 (IDB) mit Diesel betrieben wird und dieser Prozess im Vergleich mit der elektrisch betriebenen stationären Aufbereitungsanlage zu einem höheren Ausstoß an CO₂ eq. führt.

Ähnlich wie in der Kategorie Klimawandel ist in der Kategorie Landverbrauch ebenfalls eine im Vergleich zu den Szenarien des selektiven Abbruchs deutliche Erhöhung erkennbar. Auch dies ist mit der unterschiedlichen Energiebereitstellung für die Aufbereitung des Bauschutts zu erklären.

4.5.3 Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien

Um die Ergebnisse detailliert darstellen zu können, ist es notwendig die einzelnen Wirkungskategorien der verschiedenen Szenarien getrennt zu betrachten. Die Farbwahl der Wirkungskategorien als auch die Kennzeichnung vom selektiven Rückbau (vollfarbig) und nicht selektiven Rückbau (gestreift) zieht sich einheitlich durch die folgenden Grafiken.

Die bereits zuvor (Kapitel 4.5.1 und 4.5.2) dargestellten Parallelen zwischen den Ergebnissen werden bei detaillierter Betrachtung der einzelnen Wirkungskategorien bestätigt. In allen Wirkungskategorien (Abbildung 50 bis Abbildung 55) zeigt Szenario 1 die größten Umweltwirkungen während die Szenarien 2 und 3 etwa auf gleichem Niveau liegen und geringere Auswirkungen auf die Umwelt aufweisen. Weiterhin wird nochmals bestätigt, dass bei den vorgegebenen Transportstrecken (siehe Tabelle 20) durch nicht selektiven Rückbau bei allen Wirkungskategorien größere Umweltwirkungen auftreten als durch den selektiven Rückbau.

In der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch in Abbildung 50 spiegeln sich beispielhaft die Verhältnisse untereinander und das vorher beschriebene Ergebnisbild wider.

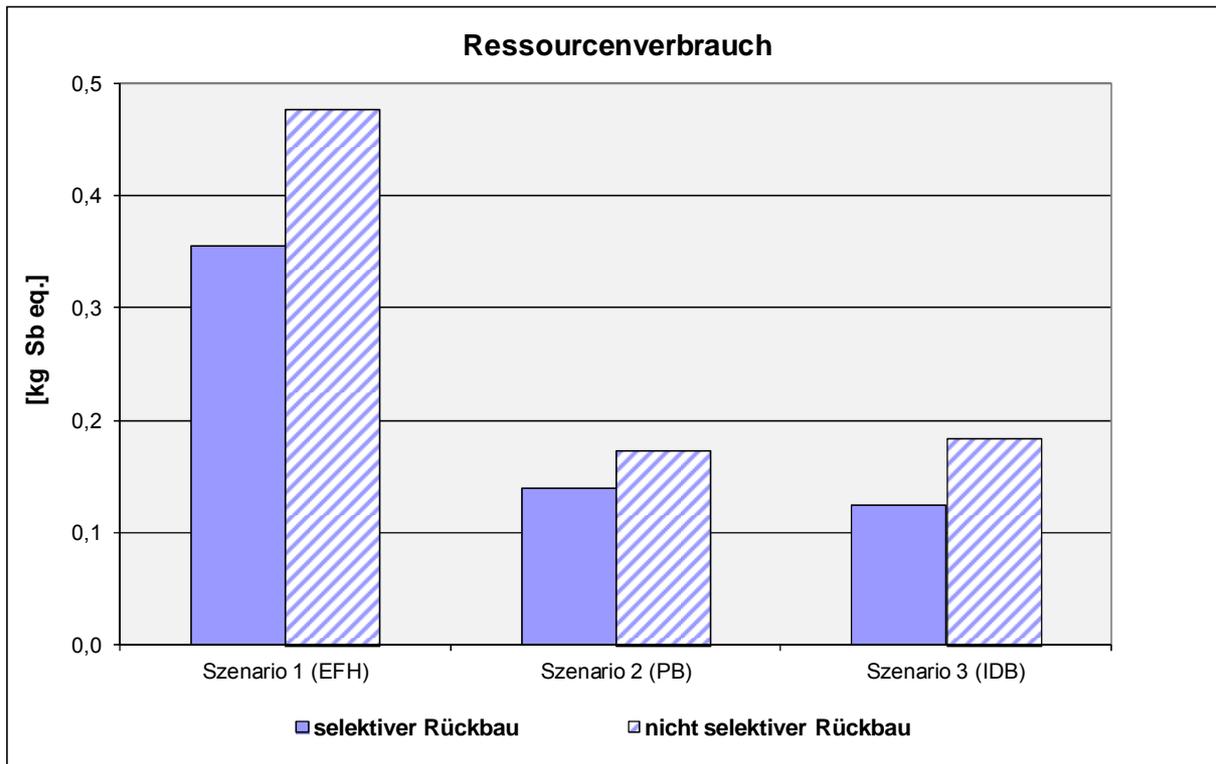


Abbildung 49: Ergebnisse der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch

Beim selektiven Rückbau weist Szenario 3 leicht geringere Umweltwirkungen als Szenario 2 auf, beim nicht selektiven Rückbau verhält es sich umgekehrt. Dort sind die Umweltwirkungen in Szenario 3 etwas größer und nehmen damit, relativ gesehen, stärker zu als in Szenario 2. Diese Unterschiede sind jedoch im Vergleich zu Szenario 1 sowie im Vergleich zwischen selektivem und nicht selektivem Abbruch gering.

Die Ergebnisse der Wirkungskategorie Landverbrauch in Abbildung 50 zeigen ebenfalls das vorher beschriebene Bild. Auffallend ist eine relativ große Zunahme der Umweltwirkungen vom selektiven zum nicht selektiven Rückbau in Szenario 1 und Szenario 3 gegenüber Szenario 2. Des Weiteren weist Szenario 3 beim selektiven Rückbau deutlich geringere Umweltwirkungen auf als Szenario 2.

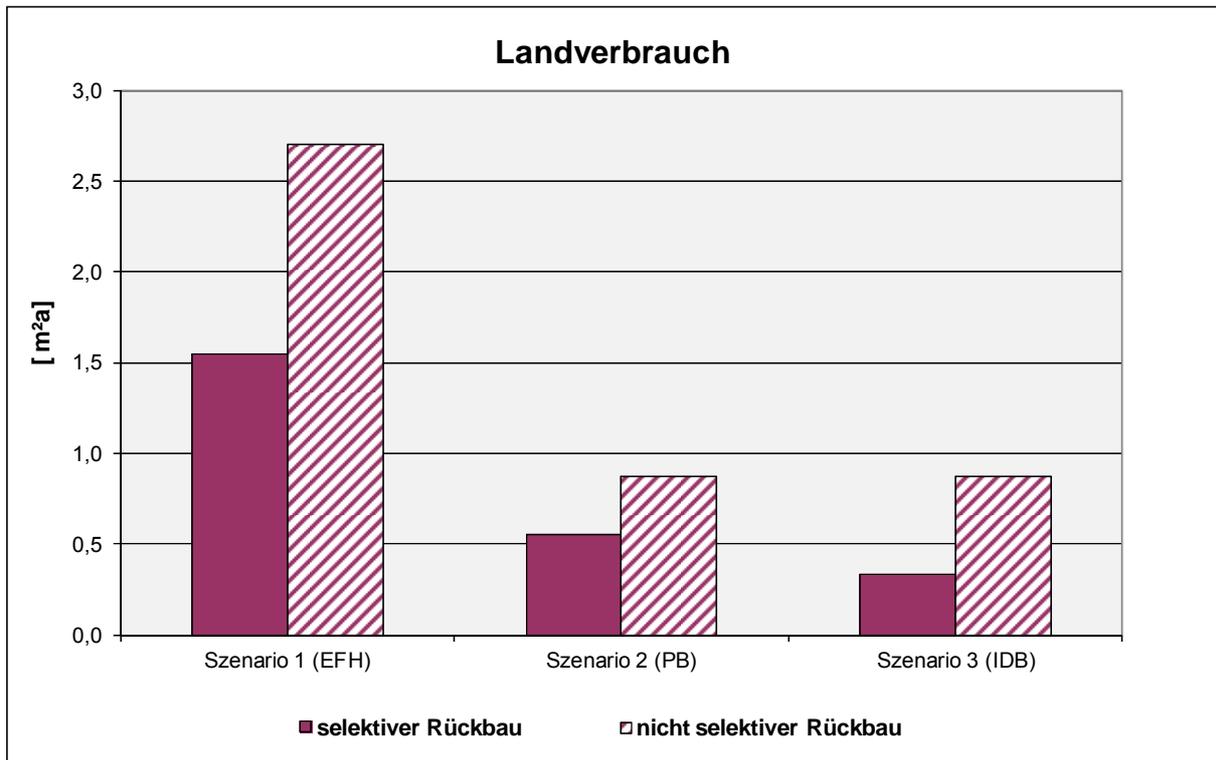


Abbildung 50: Ergebnisse der Wirkungskategorie Landverbrauch

Bei der Wirkungskategorie Klimawandel in Abbildung 52 spiegeln sich ebenfalls die schon bekannten relativen Verhältnisse untereinander wider. Szenario 1 weist die größten Umweltwirkungen auf, Szenario 2 und Szenario 3 liegen mit ihren Auswirkungen auf die Umwelt sowohl beim selektiven Rückbau als auch beim nicht selektiven Rückbau auf vergleichbarem Niveau.

Die Wirkungskategorie Stratosphärischer Ozonabbau (Abbildung 53) weist in ihren relativen Verhältnissen Parallelen zur Kategorie Klimawandel auf. Die Relationen der Umweltwirkungen in den Szenarien 1 bis 3 innerhalb der Kategorie verhalten sich untereinander sowohl beim selektiven Rückbau als auch beim nicht selektiven Rückbau sehr ähnlich.

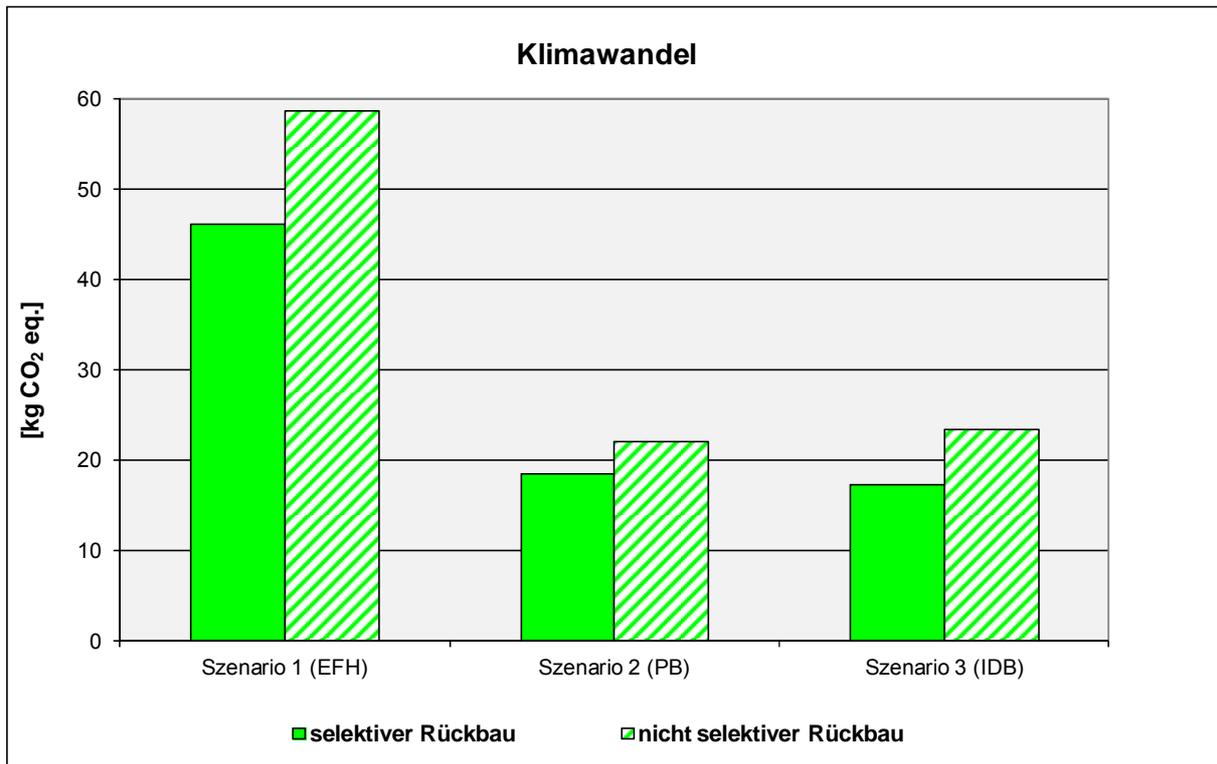


Abbildung 51: Ergebnisse der Wirkungskategorie Klimawandel

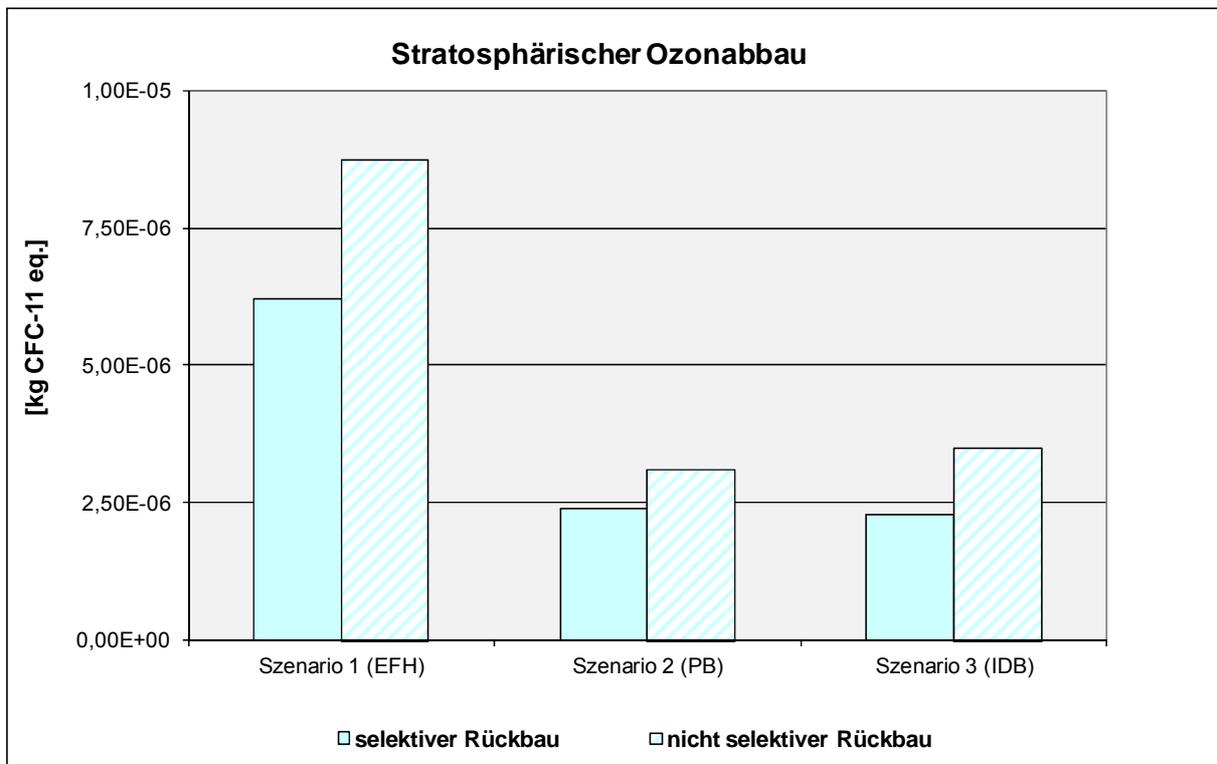


Abbildung 52: Ergebnisse der Wirkungskategorie Stratosphärischer Ozonabbau

In der Wirkungskategorie Versauerungspotential in Abbildung 54 sind geringe Unterschiede zu dem vorher beschriebenen Ergebnisbild und in den Verhältnissen untereinander zu erkennen. Während in Szenario 1 noch die größten Umweltwirkungen vorhanden sind, sind im Gegensatz zu den Wirkungskategorien Ressourcen, Landverbrauch, Klimawandel und Ozonabbau beim selektiven Rückbau die Umweltwirkungen in Szenario 2 kleiner als in Szenario 3. Darüber hinaus zeigen sich auch beim nicht selektiven Rückbau in Szenario 3 deutlich größere Auswirkungen auf die Umwelt als in Szenario 2. Dies beruht zum Teil auf dem größeren Versauerungspotential resultierend aus der Energieversorgung der mobilen Bauschutttaufbereitungsanlage in Szenario 3 mit Diesel im Vergleich zu der mit elektrischer Energie betriebenen Aufbereitung in der stationären Anlage in Szenario 2.

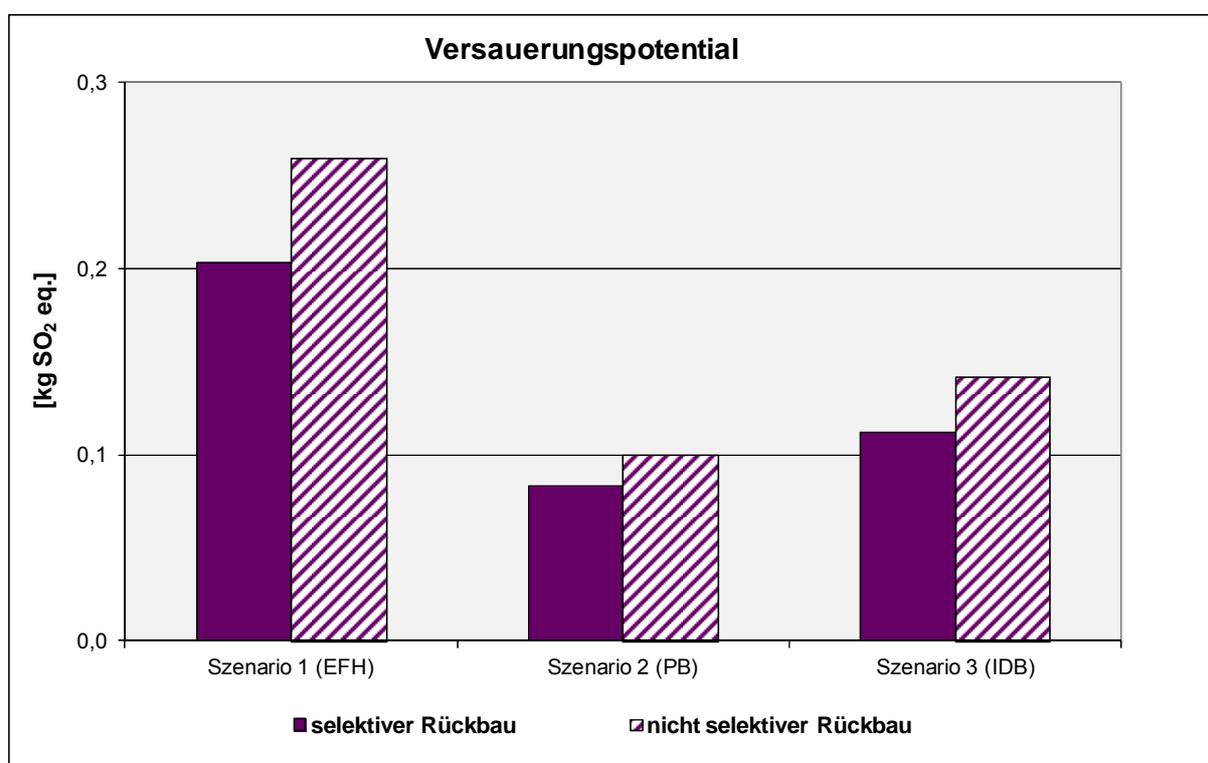


Abbildung 53: Ergebnisse der Wirkungskategorie Versauerungspotential

Die Ergebnisse in der Wirkungskategorie Überdüngungspotential in Abbildung 55 ähneln denen der Kategorie Versauerungspotential. Auch hier sind beim selektiven und beim nicht selektiven Rückbau die Umweltwirkungen in Szenario 2 geringer als in Szenario 3, was wiederum mit der unterschiedlichen Art der Energieerzeugung für die Bauschutttaufbereitung zu erklären ist.

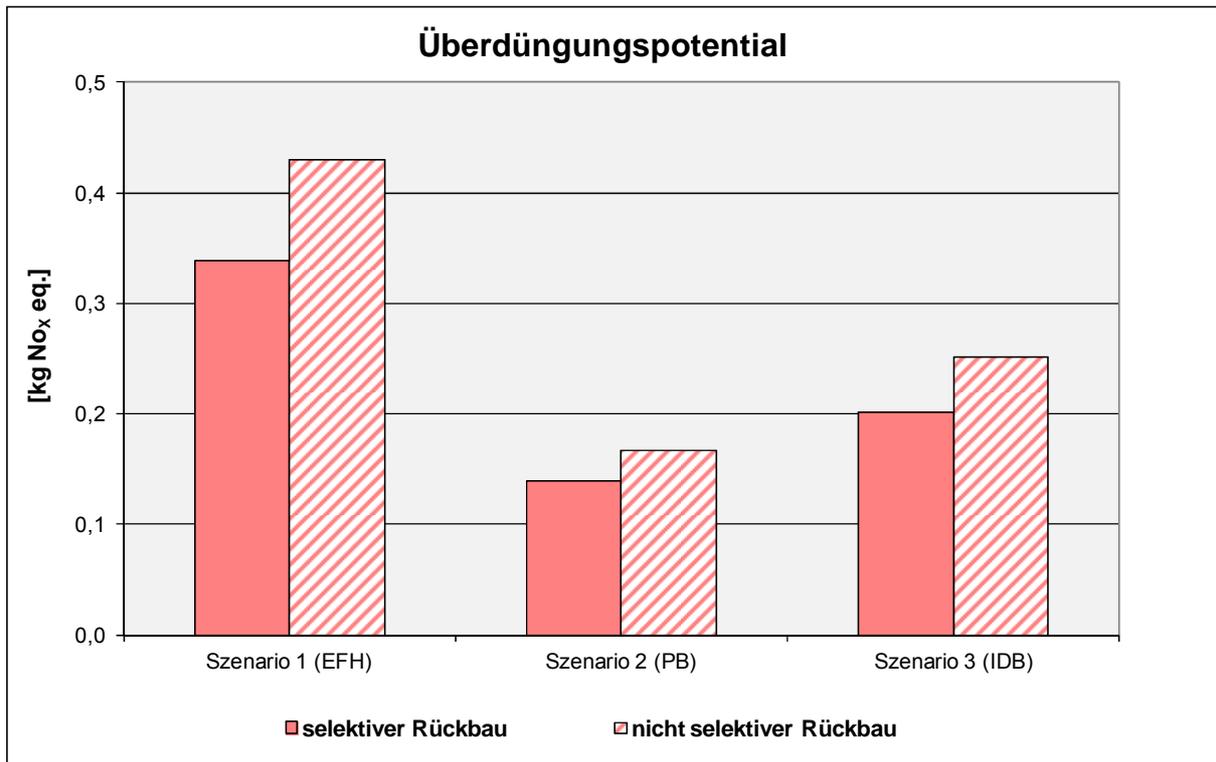


Abbildung 54: Ergebnisse der Wirkungskategorie Überdüngungspotential

4.5.4 Darstellung der Materialströme

Die Stoffstrommodelle ergänzen die Ergebnisdarstellungen. Aufgrund der Massenunterschiede im Bereich von Faktor 1000 bis 10.000 zwischen der Menge der eingesetzten Rohstoffe und den freigesetzten Emissionen einerseits und den bewegten und bearbeiteten Materialien andererseits, ist eine zusammenfassende Darstellung der Stoffströme in Form eines Sankey-Diagramms nicht hilfreich, da eine maßstabsgerechte Darstellung der Stoffströme nicht möglich ist. Umweltwirkungen und damit die sie verursachenden Effekte wie Ressourcenverbrauch und Emissionen werden nachfolgend in Kapitel 4.6 detailliert betrachtet, deshalb beschränkt sich die Darstellung der Stoffströme auf die Materialflüsse.

Da der Vergleich der Materialflüsse zwischen selektivem Abbruch und nicht selektivem Abbruch innerhalb der Szenarien sehr ähnlich verläuft, werden in den nachfolgenden Abbildungen 56 und 57 nur die Materialflüsse des Szenarios 2 (PB) exemplarisch dargestellt. Dieses Szenario wurde ausgewählt, weil Materialflüsse hier am deutlichsten darstellbar sind.

Innerhalb der Handlungskette bewegt sich der Materialfluss von links nach rechts. Ein Gebäude wird über die einzelnen Verfahrensschritte Baustelle Rückbau, Transport, Bauschutttaufbereitung und Transport zum Abnehmer unter Ausschleusung der Störstoffe und Begleitstoffe in rezyklierbare Gesteinskörnung überführt und beim Abnehmer, in der Regel einem Betonwerk, bereitgestellt. Die gelben Ringe zwischen den Verfahrensschritten stellen

lediglich softwarebedingte notwendige imaginäre Lagerplätze dar, an denen aber keine Handlung oder Umwandlung stattfindet.

Beim selektiven Rückbau in Abbildung 55 wird beim ersten Verfahrensschritt T1 Baustelle Abriss-Rückbau auf der Baustelle die sulfathaltige Fraktion abgetrennt, sichtbar als dünner roter Pfeil von T1 nach P13, und einer Deponie zugeführt. Weiterhin werden an dieser Stelle noch Teile des Bewehrungsstahls als Eisenschrott dem Materialfluss entzogen. Dies ist als dünner dunkelgrüner Pfeil von T1 nach P8 dargestellt. In der Bauschutttaufbereitung, dem dritten Verfahrensschritt findet die eigentliche Aufbereitung und Separierung der Reststoffe statt. Der ankommende Bauschutt wird gebrochen und in die Fraktionen RC-Material (dunkelblau), Betonbrechsand (hellblau), Material aus Vorabsiebung (rot) und Eisenschrott (dunkelgrün) separiert. Von diesen Stoffströmen muss lediglich die Fraktion Material aus Vorabsiebung aufgrund höherer Schad- und Störstoffbelastung deponiert werden, während der anfallende Betonbrechsand noch als RC-Produkt verwertet werden kann.

Die Menge des zu deponierenden Materials setzt sich aus der separierten sulfathaltigen Fraktion von der Baustelle (roter Pfeil von T1 nach P13) und dem Material der Vorabsiebung aus der Bauschutttaufbereitung (roter Pfeil von T4 nach P15) zusammen.

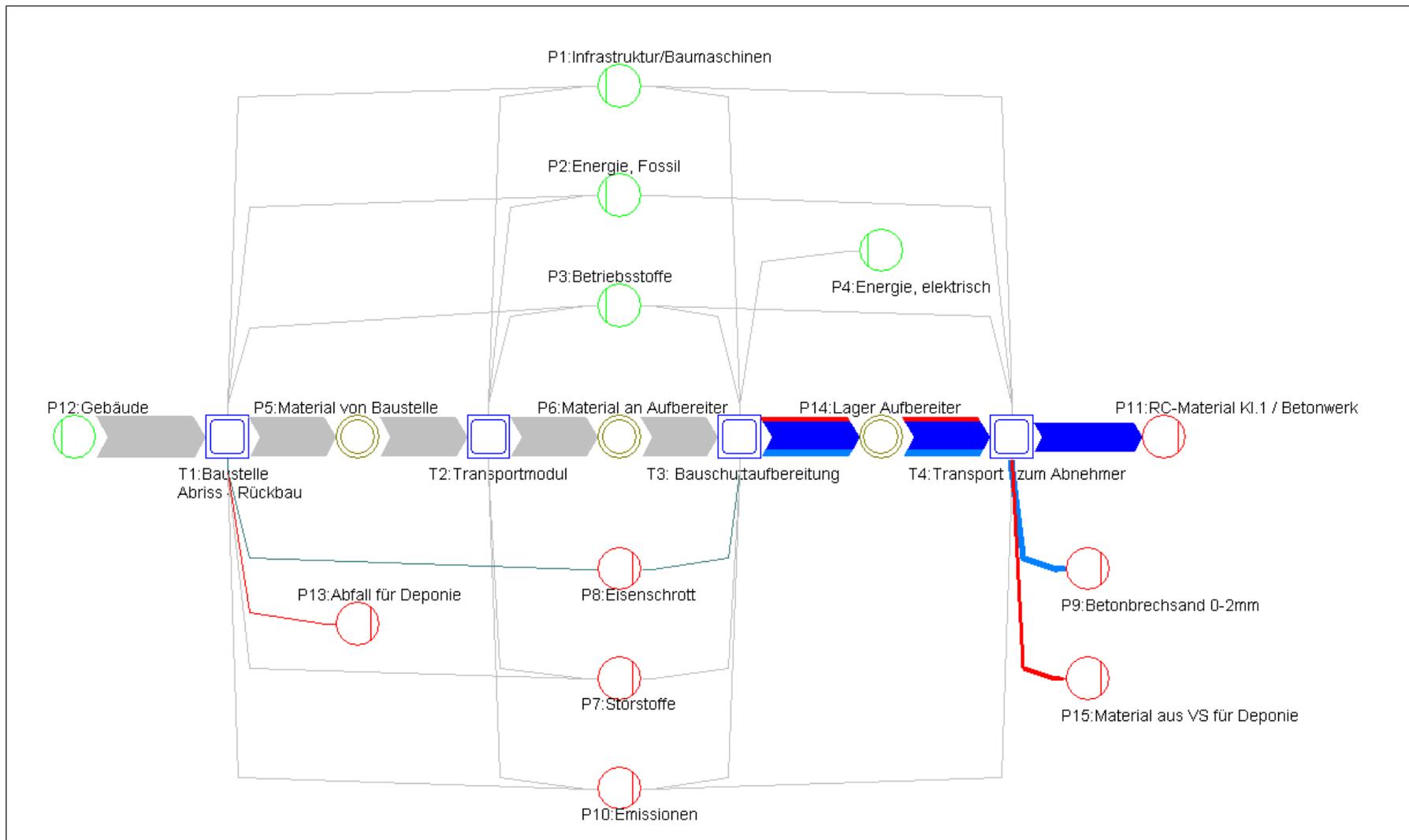


Abbildung 55: Stoffstromdarstellung Szenario 2 (PB), selektiver Rückbau

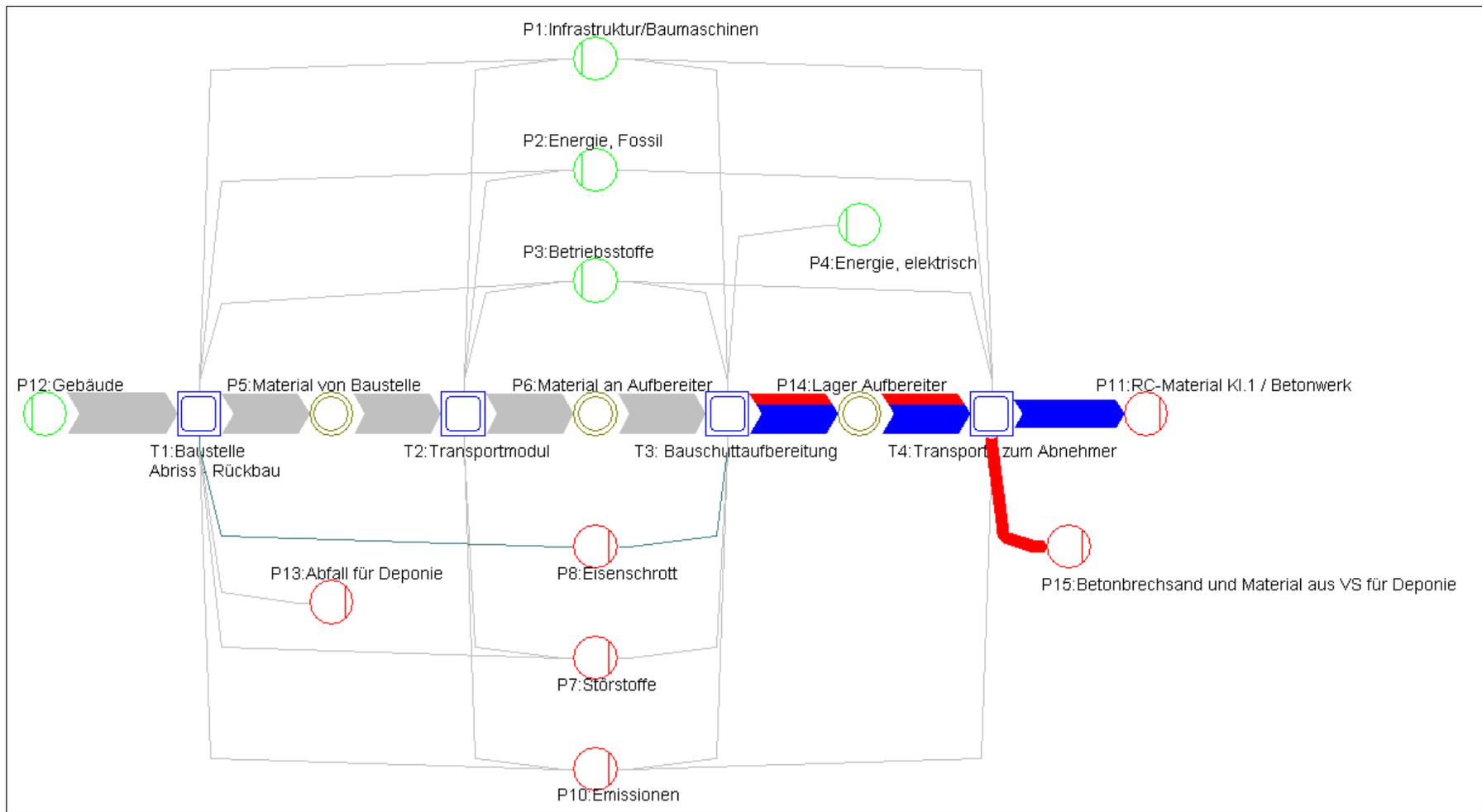


Abbildung 56: Stoffstromdarstellung Szenario 2 (PB), nicht selektiver Rückbau

Beim nicht selektiven Rückbau in Abbildung 56 wird beim ersten Verfahrensschritt T1 Baustelle Abriss-Rückbau auf der Baustelle die sulfathaltige Fraktion nicht abgetrennt sondern im Materialstrom belassen. Teile des Bewehrungsstahls werden als Eisenschrott (dünner dunkelgrüner Pfeil von T1 nach P8) ebenso wie beim selektiven Rückbau dem Materialfluss entzogen. In der Bauschuttzubereitung wird der ankommende Bauschutt gebrochen und in die Fraktionen RC-Material (dunkelblau), Betonbrechsand/Material aus Vorabsiebung (rot) und Eisenschrott (dunkelgrün) separiert. Die gesamte Fraktion Betonbrechsand/Material aus Vorabsiebung muss aufgrund der Sulfatbelastung deponiert werden (roter Pfeil von T4 nach P15). Der darin enthaltene Betonbrechsand kann nicht mehr als hochwertiges RC-Produkt verwertet werden, was zu einer deutlichen Erhöhung der zu deponierenden Menge führt.

4.5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in den betrachteten Szenarien sowohl bei dem selektiven Abbruch als auch bei der nicht selektiven Verfahrensweise der Klimawandel die dominierende Wirkungskategorie ist. Weiterhin ist in der Kategorie Landverbrauch die deutlichste relative Zunahme der Umweltwirkungen erkennbar.

Sieht man von den deutlichen Größenunterschieden zwischen den einzelnen Kategorien und den kleinen Abweichungen in Szenario 2 und Szenario 3 beim Versauerungspotential und Überdüngungspotential ab, so ergibt die Betrachtung der Wirkungskategorien ein sehr einheitliches Bild. Beim selektiven Rückbau treten in allen Szenarien und in allen Wirkungskategorien geringere Umweltwirkungen auf als beim nicht selektiven Rückbau.

Beim Vergleich der betrachteten Szenarien untereinander zeigt sich, dass in Szenario 1 (EFH) die stärksten Umweltwirkungen verursacht werden. Die Auswirkungen auf die Umwelt in Szenario 2 (PB) und Szenario 3 (IDB) liegen in etwa auf vergleichbarem Niveau und sind im Vergleich zu Szenario 1 (EFH) deutlich geringer. Dieser Unterschied ist mit dem wesentlich geringeren Betonanteil dieses Gebäudetyps zu erklären. Da dieser Beton das Ausgangsmaterial für die funktionelle Einheit, rezyklierte Gesteinskörnung, Liefertyp 1 nach DIN 4226-100, ist, werden die Umweltwirkungen auf eine prozentual erheblich geringere Menge des Produktes bezogen.

Die Darstellung der Stoffströme zeigt bei den drei Szenarien ein einheitliches Bild. Während die bereitgestellte Menge an hochwertigem RC-Material Typ 1 beim Abnehmer beim selektiven Rückbau und beim nicht selektiven Rückbau nahezu gleichbleibt, steigt die Menge des zu deponierenden Materials beim nicht selektiven Rückbau vergleichsweise deutlich an, da der Betonbrechsand nicht mehr hochwertig verwertet werden kann.

Für weitere Aussagen zu Zusammenhängen, Ursachen und Einflussfaktoren ist eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Wirkungskategorien und der Hauptstoffströme in Form einer Auswertung nach DIN EN ISO 14044 [118], siehe Kapitel 4.6, sinnvoll.

4.6 Auswertung

In einer Auswertung nach DIN EN ISO 14044 werden aus den Ergebnissen der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen entsprechend der Zielsetzung der Studie ausgesprochen. Gleichzeitig sollte aber auch die Leistungsfähigkeit dieser Methode nicht überschätzt werden und eine Überinterpretation der Resultate der Wirkungsabschätzung vermieden werden [120]. In dieser Norm ISO 14040 [114] selbst wird explizit aufgeführt, „... dass die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auf einem relativen Ansatz beruhen, dass sie potentielle Umweltwirkungen anzeigen und keine tatsächlichen Wirkungen auf Wirkungsendpunkte, Grenzwertüberschreitungen von Schwellenwerten, Sicherheitsspannen oder Gefahren voraussagen.“

Die Arbeitsschritte der Auswertung sind nach ISO 14044 [118] in folgende Unterpunkte gegliedert:

- Identifizierung signifikanter Parameter,
- Beurteilung,
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

4.6.1 Identifizierung signifikanter Parameter

Da die Nutzung fossiler Energie (Dieselverbrauch) einer der Hauptbestandteile sämtlicher bilanzierter Prozessketten bildet, ist es naheliegend, dass die Wirkungskategorie Klimawandel einen inhaltlichen Schwerpunkt der Beurteilung bildet. Dafür spricht auch, dass die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (siehe Kapitel 4.5.1) die größten absoluten Werte in dieser Schlüsselkategorie aufweisen. Die größten Unterschiede zwischen dem selektiven und dem nicht selektiven Rückbau sind in der Kategorie Landverbrauch zu beobachten, daher sollte sich auch diese Wirkungskategorie in der Beurteilung wiederfinden.

Wenn man die Zusammensetzung der Wirkungskategorie Klimawandel näher analysiert, um Hauptverursacher zu identifizieren, zeigt sich, dass CO₂-Äquivalente in sämtlichen Szenarien und den jeweiligen Verfahrensschritten entstehen, da die Nutzung fossiler Energie in allen Prozessketten stattfindet. Die detaillierten Modelle der einzelnen Verfahrensschritte sind in Anhang D aufgeführt. Der prozentuale Anteil der Verfahrensschritte an der Wirkungskategorie Klimawandel ist in Tabelle 24 dargestellt. Die Einzelwerte sind in Tabelle 30 in Anhang E aufgelistet. Die prozentualen Verteilungen in Szenario 1 (EFH) und Szenario 2 (PB) ähneln einander stark, während Szenario 3 (IDB) deutlich davon abweicht.

Tabelle 24: prozentualer Anteil der Teilschritte an der Wirkungskategorie Klimawandel

Wirkungskategorie Klimawandel (GWP 100a)	Szenario 1 (EFH)	Szenario 2 (PB)	Szenario 3 (IDB)
T 1 Subnetz Abbruch	24,84%	24,32%	39,00%
T 2 Transport	33,86%	34,09%	3,04%
T 3 Bauschuttzubereitung	14,10%	14,20%	24,79%
T 4 Transport zum Abnehmer	27,20%	27,39%	33,17%
Gesamtsumme	100,00%	100,00%	100,00%

Der Transport (T2) des Bauschutts über 20 km von der Baustelle zur Bauschuttzubereitung per LKW ist mit ca. 30 % sowohl in Szenario 1 (EFH) als auch in Szenario 2 (PB) die Hauptursache der CO₂-Äquivalente. In Szenario 3 (IDB) findet dieser Transport aufgrund des Einsatzes einer mobilen Bauschuttzubereitungsanlage vor Ort nicht statt. Der geringe Anteil der dennoch vorhanden ist, basiert auf der Bilanzierung des Radladers, der das Abbruchmaterial der mobilen Anlage zuführt.

4.6.2 Beurteilung

Ziel einer Beurteilung ist die Überprüfung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse und der signifikanten Parameter. Um dieses Ziel zu erreichen ist die Anwendung einer der folgenden quantitativen Methoden vorgeschrieben [118]:

- Vollständigkeitsprüfung,
- Sensitivitätsprüfung,
- Konsistenzprüfung.

Angelehnt an die Norm wird in dieser ökobilanziellen Betrachtung zur Beurteilung der Ergebnisse die Sensitivitätsprüfung, oder auch Sensitivitätsanalyse genannt, angewendet.

4.6.2.1 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist eine häufig angewandte quantitative Methode in der Beurteilung mit dem Ziel, Rückschlüsse auf die Belastbarkeit der Modelle und des Produktsystems ziehen zu können und die getroffenen Aussagen zu verifizieren. Durch die Variation wichtiger Parameter dient eine Sensitivitätsanalyse dazu, die bisher gewonnenen Ergebnisse auf ihre Konsistenz zu überprüfen. Weiterhin erlaubt sie den Einfluss eines geänderten Parameters auf die Endergebnisse festzustellen [120].

Die folgenden Parameter wurden variiert um den Einfluss des Faktors Transport auf das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung genauer zu untersuchen:

Beim selektiven Rückbau in Szenario 1 (EFH) und Szenario 2 (PB) wurde die Streckenlänge des LKW-Transports (T2 Transport) zwischen Baustelle und Bauschuttzubereitung, im Grundmodell mit 20 Kilometern bilanziert, von 0 bis 100 Kilometer variiert.

Weiterhin wurden in den drei Szenarien sowohl beim selektiven als auch beim nicht selektiven Rückbau alle in den Grundmodellen bilanzierten verschiedenen Entfernungen zwischen den Handlungsbeteiligten (Tabelle 20) auf null gesetzt, um Aussagen über den Einfluss der LKW-Transporte an den auftretenden Umweltwirkungen treffen zu können. Die Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch wurden detailliert gegenübergestellt um sie den jeweiligen Haupteinflussfaktoren Transport und Deponienutzung genauer zuordnen zu können.

Zusätzlich zu den Betrachtungen der Einflussfaktoren Transport und Deponienutzung wurde der Verfahrensschritt Bauschuttzubereitung in die Sensitivitätsanalyse einbezogen. Um den Einfluss des zweiten Brechers in der stationären Zubereitungsanlage auf die Umweltwirkungen zu untersuchen, wurde in den Szenarien 1 (EFH) und 2 (PB) sowohl beim selektiven Rückbau als auch beim nicht selektiven Rückbau die Bauschuttzubereitung in der stationären Anlage mit lediglich einer Brecherstufe (Prallbrecher) berechnet. Diese Berechnung erfolgte allerdings unter einem deutlichen Qualitätsvorbehalt in Bezug auf die entstehenden Kornformen und eine mögliche Störstoffentfrachtung. Es wird vorausgesetzt, dass eine vollständige Sulfatentfrachtung der Baurestmassen durch einstufiges Brechen mit einem Prallbrecher möglich ist.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind nachfolgend in Kapitel 4.6.2.2 dargestellt.

4.6.2.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Variation der Streckenlänge des LKW-Transports (T2 Transport) zwischen Baustelle und Bauschuttzubereitung in Abbildung 57 zeigen, sowohl in Szenario 1 (EFH) hellgrün, als auch in Szenario 2 (PB) dunkelgrün, eine lineare Abhängigkeit von Entfernung und CO₂-Äquivalenten in der Wirkungskategorie Klimawandel. Diese Linearität selbst ist zunächst wenig überraschend, da der bilanzierte Kraftstoffverbrauch der eingesetzten Fahrzeuge bei der hier angenommenen konstanten Beladung lediglich kilometerabhängig ist.

Die markierten Punkte auf den Geraden zeigen die Ursprungswerte der Grundmodelle mit einer bilanzierten Entfernung von 20 Kilometer. Aufschlussreich sind hingegen jedoch die unterschiedlichen Steigungen der Geraden. In Szenario 1 (EFH) werden nahezu doppelt so viele CO₂-Äquivalente pro Kilometer erzeugt wie in Szenario 2 (PB). Während das Transportgewicht und der LKW in beiden Szenarien gleich bilanziert werden, hat das Transportgut in Szenario 1 einen größeren Fremdstoffanteil, wie beispielsweise Ziegel, und einen kleineren Betonanteil und damit eine unterschiedliche Zusammensetzung im Vergleich zu dem Transportgut in Szenario 2.

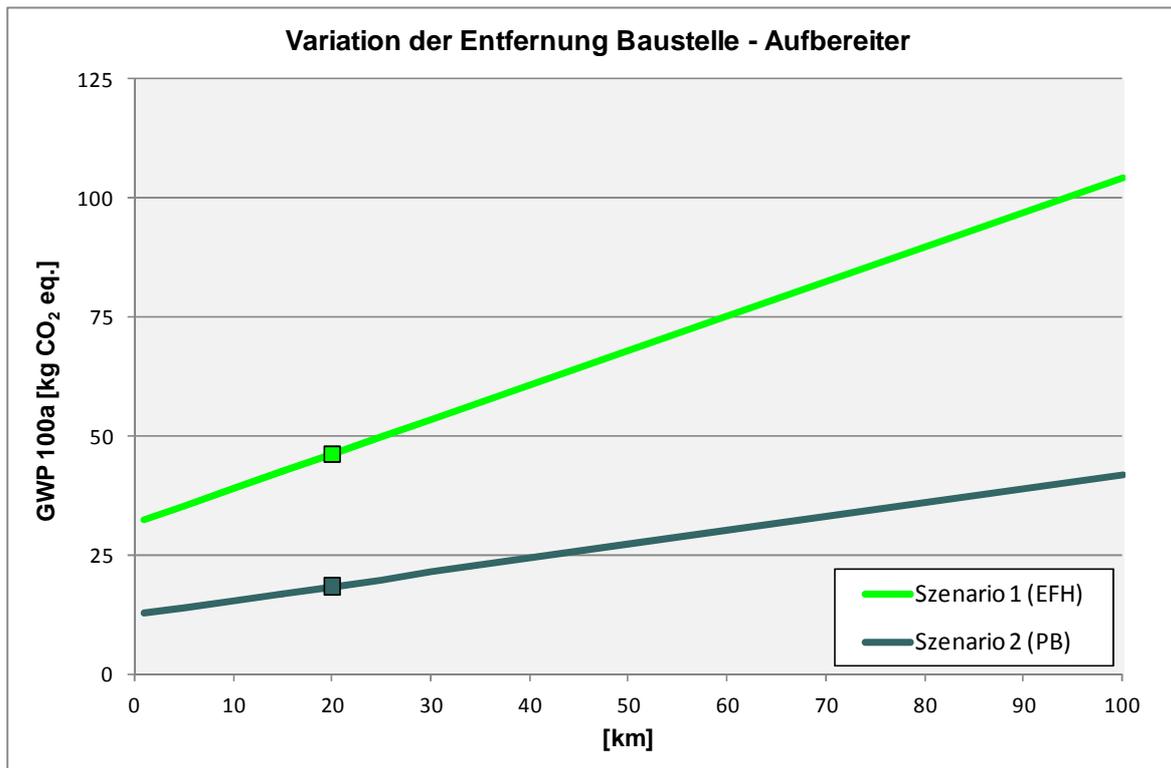


Abbildung 57: Wirkungskategorie Klimawandel (GWP 100a): Ergebnis der Variation der Entfernung von Baustelle zu Aufbereiter

Da die Bilanzierung auf der funktionellen Einheit (eine Tonne rezyklierte Gesteinskörnung Liefertyp 1) beruht, finden in Szenario 1 mehr Transporte pro funktionelle Einheit statt. Dies bewirkt die unterschiedlichen Steigungen der Geraden in Abbildung 57.

Abbildung 58 zeigt den prozentualen Anteil der Transporte (Transportentfernungen wie in Tabelle 20 dargestellt) an den jeweiligen Wirkungskategorien beim selektiven Rückbau. Die Ergebnisse der Grundmodelle in Tabelle 22 und Tabelle 23 bilden den jeweiligen 100 %-Wert. In Szenario 1 (EFH) und Szenario 2 (PB) ist der Anteil der LKW-Transporte an den Umweltwirkungen annähernd gleich, während in Szenario 3 (IDB) der spezifische Anteil an den Umweltwirkungen wesentlich geringer ist. Dies liegt daran, dass der Zwischentransport zur stationären Aufbereitungsanlage aufgrund des Einsatzes einer mobilen Bauschutt-aufbereitungsanlage entfällt.

Abgesehen von der Wirkungskategorie Landverbrauch mit etwa 25 Prozent liegt der Transportanteil in den Szenarien 1 und 2 bei sämtlichen Wirkungskategorien bei etwa 60 Prozent. Die Transportanteile an der Wirkungskategorie Ozonabbau liegen etwas darüber, in den Wirkungskategorien Versauerungspotential und Überdüngungspotential liegen diese Anteile etwas niedriger.

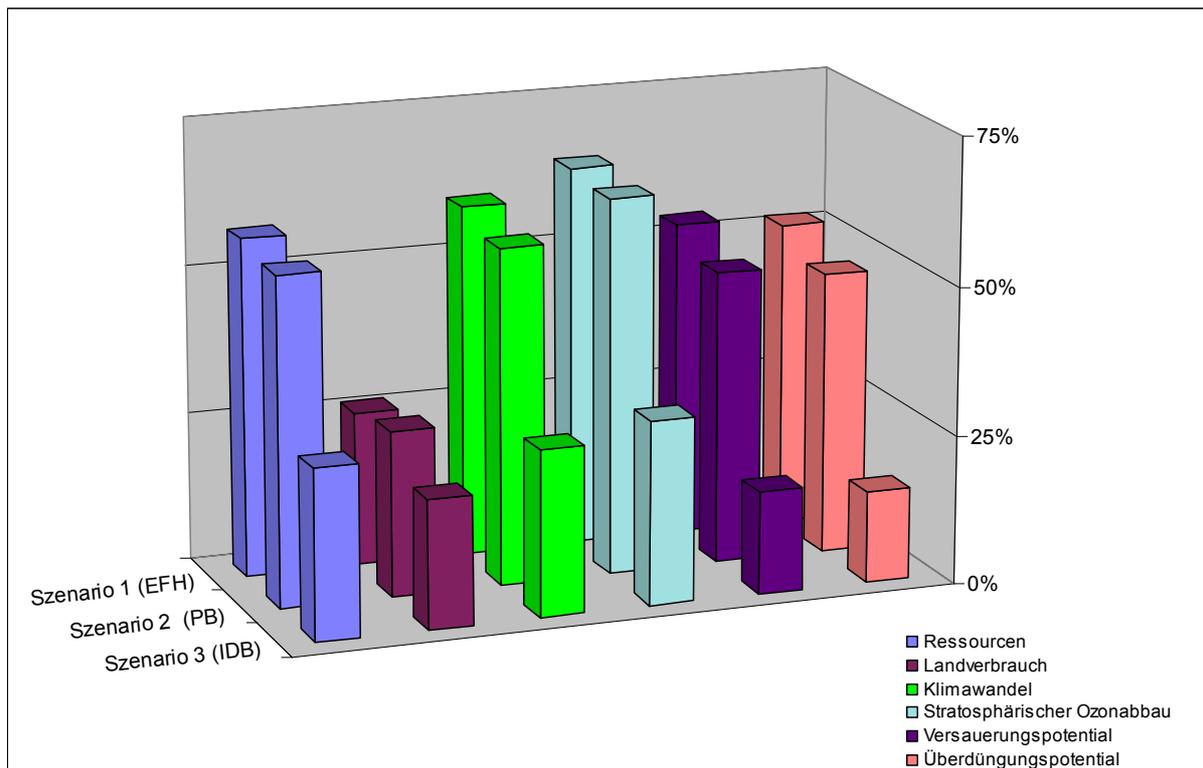


Abbildung 58: prozentualer Anteil des Transports an den jeweiligen Wirkungskategorien (selektiver Rückbau)

Der deutlich geringere Anteil der Transporte an der Wirkungskategorie Landverbrauch zeigt, dass die Hauptursache dieser Umweltwirkungen nicht der dem Transport zugerechnete Landverbrauch durch Straßenbau sein kann, sondern der Deponienutzung zugeordnet werden muss. Um an dieser Stelle eine genauere Aussage treffen zu können sind noch weitere Angaben notwendig.

Der deutlich geringere Anteil der LKW-Transporte auf die Umweltwirkungen von Szenario 3 (IDB) zeigt den Einfluss des in diesem Szenario fehlenden Bauschutttransportes per LKW von der Baustelle zur stationären Bauschuttzubereitung, da die Zubereitung mobil vor Ort erfolgt. Den im Vergleich zu den anderen Szenarien gleich hohen Anteil in der Kategorie Landverbrauch kann man als weiteren Anhaltspunkt in Hinblick auf den Einfluss der Deponienutzung deuten.

Der Vergleich zwischen selektivem Rückbau und nicht selektivem Rückbau in den drei betrachteten Szenarien in Kapitel 4.5 zeigt eine Zunahme der Umweltwirkungen beim nicht selektiven Rückbau. Die relative Zunahme in den einzelnen Szenarien und Wirkungskategorien ist in Abbildung 60 dargestellt. Die Ergebnisse der Grundmodelle in Tabelle 22 und Tabelle 23 bilden wiederum den jeweiligen 100 %-Wert.

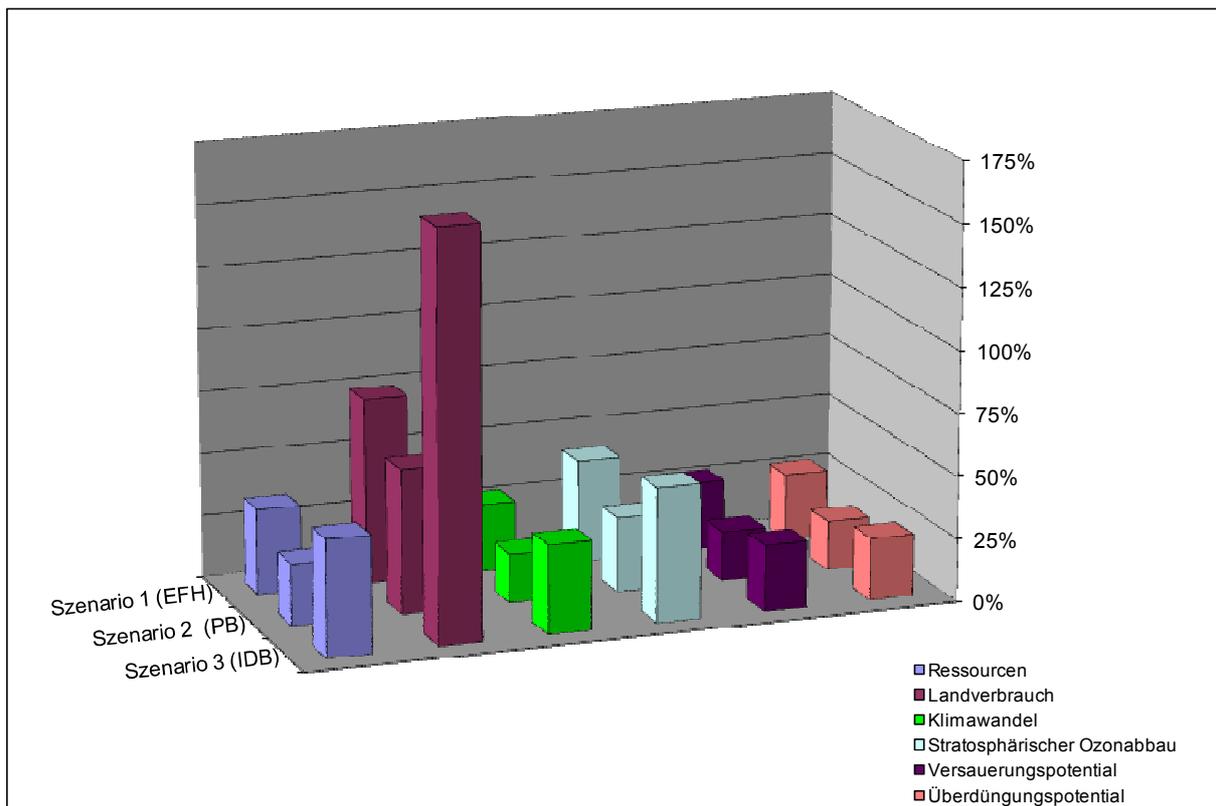


Abbildung 59: Prozentuale Zunahme der Umweltwirkungen durch nicht selektiven Rückbau gegenüber selektivem Rückbau, inkl. Transporte

Die deutliche Zunahme der Umweltwirkungen der Kategorie Landverbrauch, im Gegensatz zu den anderen Kategorien, kann wiederum als weiterer Hinweis auf den Einfluss der Deponienutzung gedeutet werden, da wie in Kapitel 4.5.4 aufgezeigt, die zu deponierende Menge beim nicht selektiven Rückbau deutlich ansteigt.

Abbildung 60 zeigt die prozentuale Zunahme der Umweltwirkungen beim nicht selektiven Rückbau unter Ausschluss der in Tabelle 20 bilanzierten LKW-Transportentfernungen. Die Ergebnisse der Grundmodelle in Tabelle 22 und Tabelle 23 bilden wiederum den jeweiligen 100%-Wert, diesmal jedoch abzüglich des ausgewiesenen Transportanteils in Abbildung 59. Andere Einflussgrößen (Bauschutttaufbereitung, Deponienutzung) sind in der Berechnung weiterhin enthalten. Die Ähnlichkeiten mit der Abbildung 60 stellen den in der Abbildung 59 ausgewiesenen gleichmäßigen Einfluss der LKW-Transporte auf die Wirkungskategorien nochmals deutlich heraus.

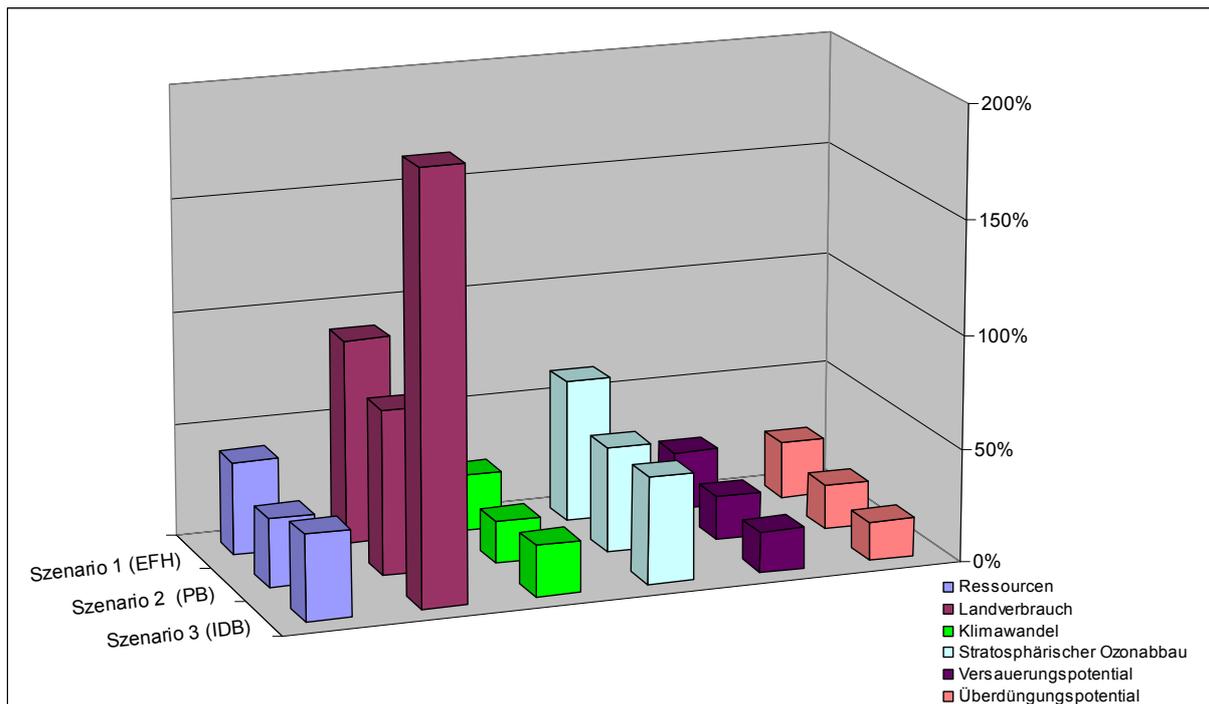


Abbildung 60: Prozentuale Zunahme der Umweltwirkungen durch nicht selektiven Rückbau gegenüber selektivem Rückbau, ohne Transporte

Die auch in diesem Fall im Vergleich zu den anderen Wirkungskategorien erkennbare Zunahme der Umweltwirkungen der Kategorie Landverbrauch ist wiederum ein Hinweis auf den Einfluss der Deponienutzung.

Bei der Gegenüberstellung der Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch (Abbildung 62 bis Abbildung 64) der drei Szenarien wurden jeweils drei Werte miteinander verglichen. Die Farben der jeweiligen Wirkungskategorien, des selektiven und des nicht selektiven Rückbaus wurden analog zu Abbildung 51 und Abbildung 52 gewählt.

Die Werte „Abbruch T1“ zeigen den isoliert betrachteten Rückbau/Abbruch (siehe Abbildung 48 Transition T1 oder Anhang D Modul T1) auf der Baustelle. Die Werte „ohne Transport“ beinhalten die Ergebnisse der Abbildung 60. „Gesamt“ bezieht sich auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung die in Kapitel 4.5.1 und 4.5.2 dargestellt sind.

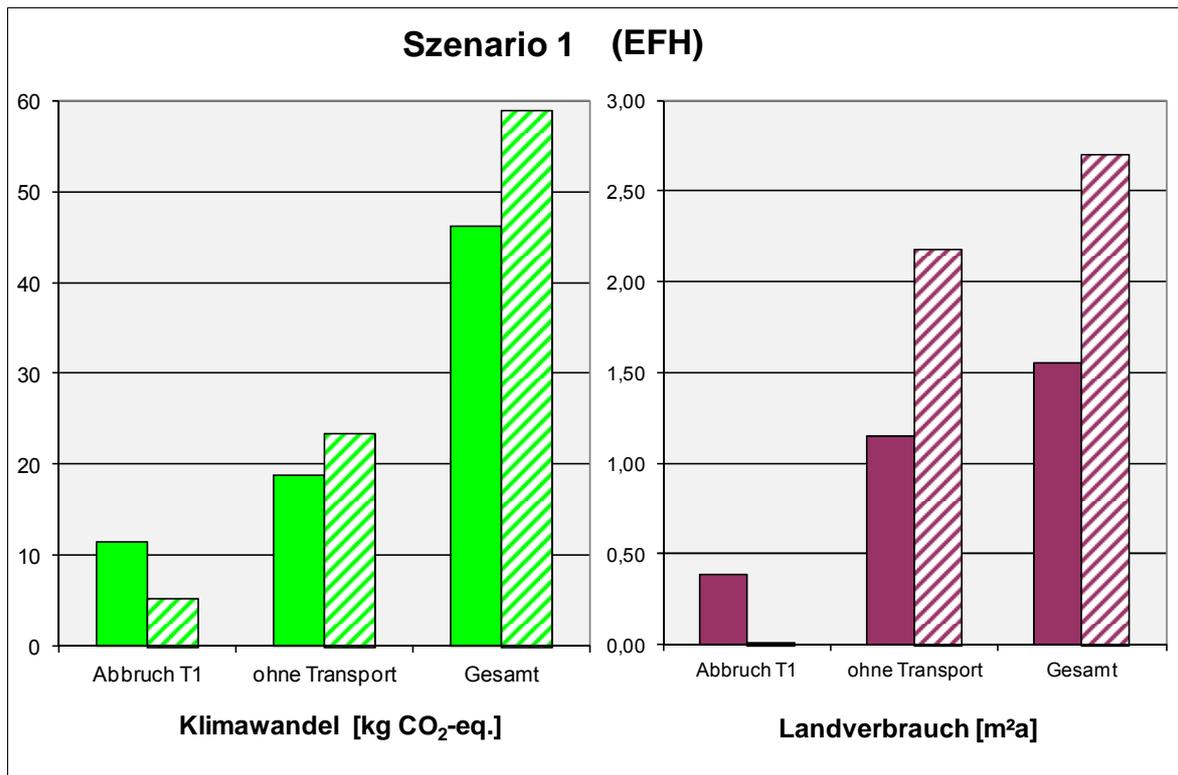


Abbildung 61: Szenario 1 (EFH) Wirkungskategorien im Detail

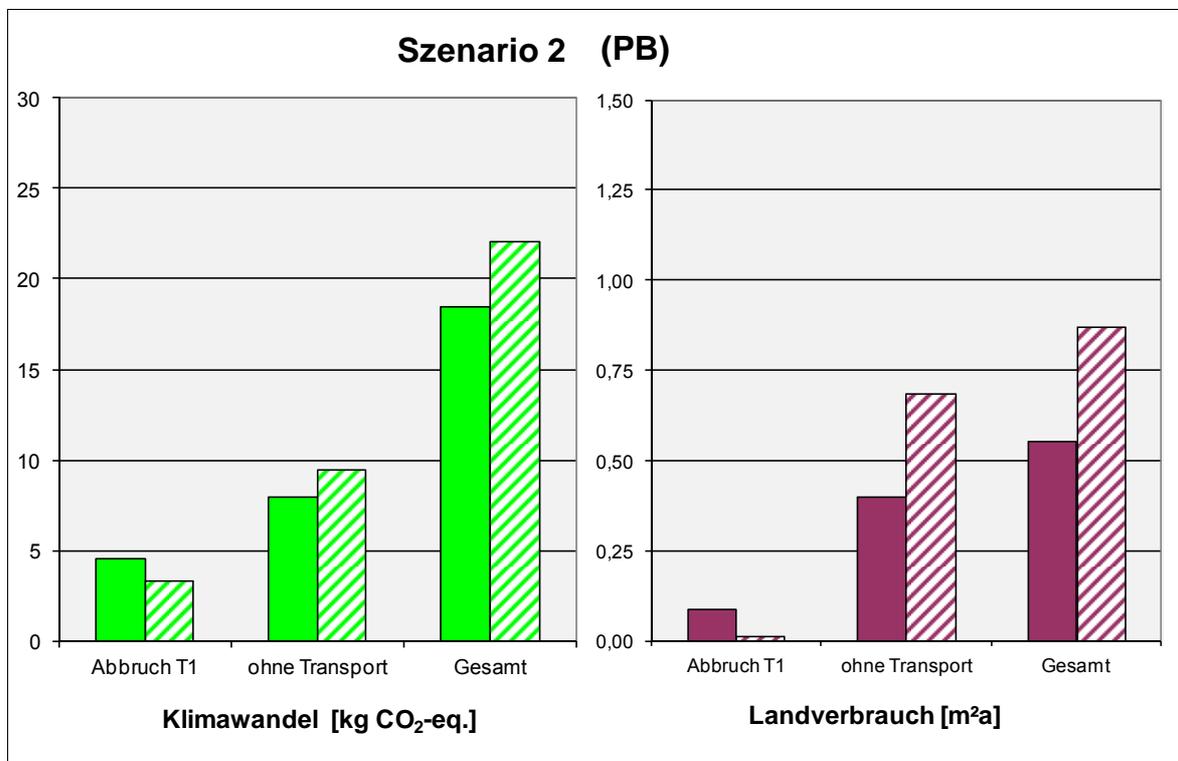


Abbildung 62: Szenario 2 (PB) Wirkungskategorien im Detail

Die Gegenüberstellungen der Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch weisen in allen drei Szenarien deutliche Übereinstimmungen auf. Sowohl die Szenarien untereinander als auch der selektive und der nicht selektive Rückbau zeigen ähnliche Verhältnisse.

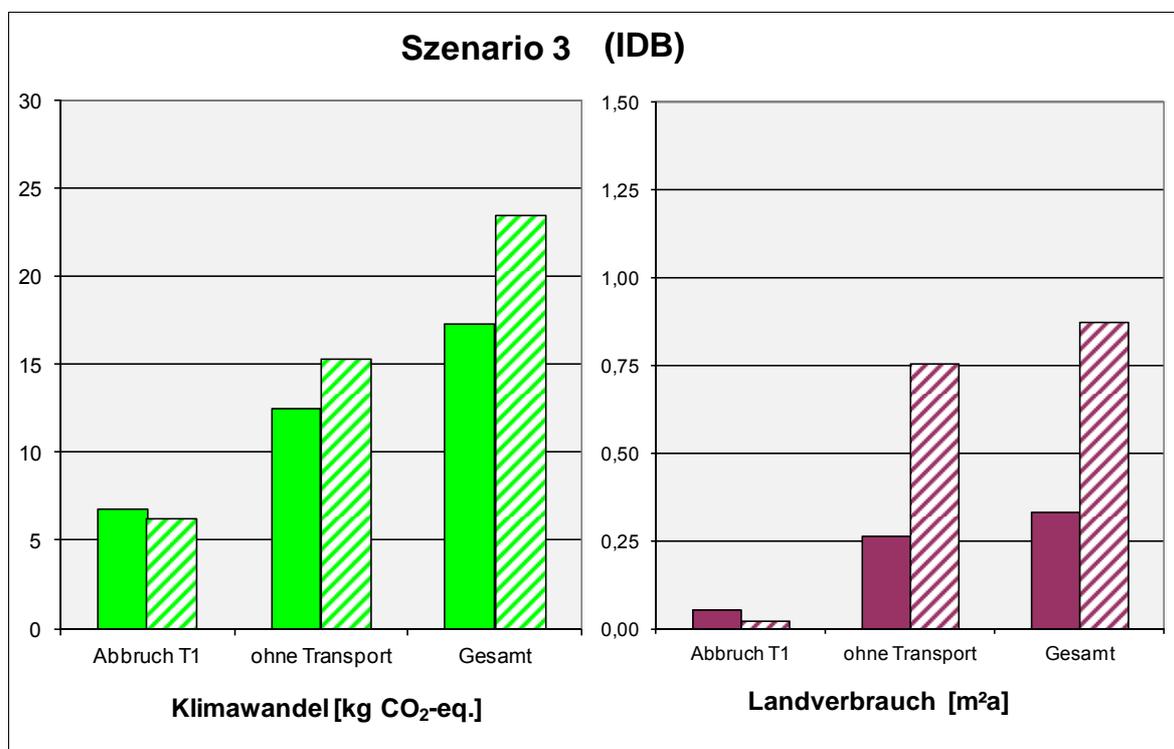


Abbildung 63: Szenario 3 (IDB) Wirkungskategorien im Detail

Wenn die Umweltwirkungen der Abbruchmaßnahmen separat betrachtet werden, vergrößern selektive Rückbaumaßnahmen die Umweltwirkungen in den Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch. Während die Zunahme beim Klimawandel hauptsächlich auf dem zusätzlichen Einsatz dieselbetriebener Maschinen, wie Presslufthammer oder Estrichfräse beruht, ist die deutliche Steigerung beim Landverbrauch auf die Deponierung der frühzeitig separierten gipshaltigen Bauabfälle zurückzuführen.

Der dargestellte umweltbilanzielle Nachteil durch die Durchführung des Abbruchs ändert sich, sobald die Bauschutttaufbereitung und die anschließende Deponierung der Reststoffe („ohne Transport“) in der Bewertung berücksichtigt werden. In der Kategorie Landverbrauch ist die deutliche Zunahme durch die Bilanzierung der Deponieraumnutzung beim nicht selektiven Rückbau nachvollziehbar.

In Bezug auf die Wirkungskategorie Klimawandel ergibt sich ein komplexeres Bild, da hier verschiedene Ursachen zugrunde liegen. Da das beim selektiven Rückbau frühzeitig abgetrennte und deponierte Material beim nicht selektiven Rückbau ebenfalls der

Bauschuttzubereitungsanlage zugeführt wird, kann man eine leichte Zunahme der Umweltwirkungen durch den zusätzlichen Energieverbrauch erwarten. Die zweite Ursache liegt in der zu bilanzierenden Baumaschine auf der Deponie, die das Deponiegut verteilt, einbaut und verdichtet. Dieser Arbeitsschritt wird in der Ecoinvent-Datenbank [135] mit 0,632 kg Diesel pro Tonne Deponiegut bilanziert und befindet sich damit in einer ähnlichen Größenordnung wie der bilanzierte Verbrauch der mobilen Bauschuttzubereitungsanlage mit 0,694 kg Diesel pro Tonne.

Aus der Gegenüberstellung der Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch (Abbildungen 62 bis 64) der drei Szenarien folgt, dass durch die Anwendung selektiver Abbruchmaßnahmen zur Sulfatentfrachtung nicht nur benötigter Deponieraum minimiert wird sondern unabhängig von den Transportentfernungen auch CO₂-Emissionen reduziert werden können.

Die Untersuchung der Bauschuttzubereitung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse erfolgte mit der Modellierung eines einstufigen Brechvorgangs in einer stationären Anlage, die anderen Aggregate der modellierten stationären Bauschuttzubereitungsanlage bleiben unverändert. Bei der Modellierung wurde lediglich der Backenbrecher ausgeschlossen, so dass die spezifische Leistungsaufnahme der stationären Anlage von ehemals 410 kW auf 250 kW sinkt und entsprechend bilanziert wurde (siehe Tabelle 29 im Anhang E).

Tabelle 25 zeigt auf, dass durch einstufiges Brechen in der stationären Bauschuttzubereitungsanlage bei allen Wirkungskategorien eine Reduzierung der Umweltwirkungen möglich ist. Die erreichbaren Reduzierungen sind bei den vier betrachteten Modellen etwa gleich groß. Sie reichen von etwas unter einem Prozent bei der Wirkungskategorie Überdüngungspotential bis an die fünf Prozent bei den Kategorien Ressourcenverbrauch und Klimawandel. Die genauen Ergebnisse der Modellrechnungen sind in Tabelle 33 im Anhang F aufgeführt.

Eine mögliche negative Beeinflussung der bilanzierten Leistungsfähigkeit des einstufigen Brechvorgangs von 120 t/h durch anfallendes Überkorn wird nicht berücksichtigt. Wenn die Leistungsfähigkeit durch erneutes Brechen des Überkorns sinkt, steigt der auf den Durchsatz bezogen spezifische Energieaufwand des Brechers und die damit verbundenen Umweltwirkungen. Die in der Tabelle 25 aufgezeigten ohnehin nur leichten Verringerungen der Umweltwirkungen durch einstufiges Brechen würden dann noch geringer ausfallen und sich damit etwa im Bereich der Bilanzierungsungenauigkeit befinden.

Tabelle 25: Reduzierung der Umweltwirkungen durch einstufiges Brechen

Szenario 1.1 (EFH) - selektiver Rückbau Differenz => ein Brecher // zwei Brecher					
Wirkungskategorien	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente	Differenz
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	-1,68	-0,02	kg Sb	-4,89%
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	-3,86	-0,04	m ² a	-2,57%
Klimawandel	GWP 100a	-229,06	-2,36	kg CO ₂ eq.	-5,12%
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	-6,93E-06	-7,15E-08	g CFC-11 eq.	-1,15%
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	-0,31	-0,003	kg SO ₂ eq.	-1,59%
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	-0,25	-0,003	kg NO _x eq.	-0,76%
Szenario 1.2 (EFH) - nicht selektiver Rückbau Differenz => ein Brecher // zwei Brecher					
Wirkungskategorien	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente	Differenz
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	-1,66	-0,02	kg Sb	-3,59%
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	-3,81	-0,04	m ² a	-1,45%
Klimawandel	GWP 100a	-226,08	-2,33	kg CO ₂ eq.	-3,96%
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	-6,84E-06	-7,05E-08	g CFC-11 eq.	-0,81%
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	-0,31	-0,003	kg SO ₂ eq.	-1,23%
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	-0,25	-0,003	kg NO _x eq.	-0,59%
Szenario 2.1 (PB) - selektiver Rückbau Differenz => ein Brecher // zwei Brecher					
Wirkungskategorien	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente	Differenz
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	-10,67	-0,01	kg Sb	-5,00%
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	-24,50	-0,02	m ² a	-2,90%
Klimawandel	GWP 100a	-1455,56	-0,95	kg CO ₂ eq.	-5,16%
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	-4,40E-05	-2,87E-08	g CFC-11 eq.	-1,20%
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	-1,99	-0,001	kg SO ₂ eq.	-1,56%
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	-1,59	-0,001	kg NO _x eq.	-0,74%
Szenario 2.2 (PB) - nicht selektiver Rückbau Differenz => ein Brecher // zwei Brecher					
Wirkungskategorien	Teileinheit	Gesamt	FE / t	Äquivalente	Differenz
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	-10,89	-0,01	kg Sb	-4,08%
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	-25,02	-0,02	m ² a	-1,87%
Klimawandel	GWP 100a	-1486,25	-0,97	kg CO ₂ eq.	-4,38%
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	-4,49E-05	-2,92E-08	g CFC-11 eq.	-0,94%
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	-2,03	-0,001	kg SO ₂ eq.	-1,32%
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	-1,63	-0,001	kg NO _x eq.	-0,63%

Als Ergebnis dieser Modellierung bleibt festzuhalten, dass der Verzicht auf eine Brecherstufe bei der stationären Bauschuttzubereitungsanlage nur sehr geringfügig positive Effekte auf die Umweltwirkungen sämtlicher Wirkungskategorien hat und sich daher nicht durch eine signifikante Senkung der Umweltbelastungen auszeichnet.

4.6.3 Schlussfolgerungen aus der Sensitivitätsanalyse

Die nachfolgenden Schlussfolgerungen beziehen sich nicht auf die während der Sensitivitätsanalyse ermittelten Ergebnisse sondern lediglich auf die angewandte Methodik mit dem Ziel, Rückschlüsse auf die Qualität der Modelle, des Produktsystems und der gewählten Rahmenbedingungen ziehen zu können.

Die durch die Variation von signifikanten Parametern im Rahmen der Sensitivitätsanalyse berechneten Ergebnisse zeigen deutliche Verknüpfungen und Zusammenhänge auf. Die Teilergebnisse, auf denen die Sensitivitätsanalyse beruht, bauen aufeinander auf und sind nachvollziehbar, so dass erkennbar ist, welche Faktoren einzelne Wirkungskategorien beeinflussen. Besonders relevant erscheinen an dieser Stelle der Einfluss des LKW-Transports zwischen Baustelle und stationärer Bauschuttzubereitungsanlage auf die Wirkungskategorie Klimawandel und die Auswirkungen der Deponienutzung auf die Kategorie Landverbrauch.

Insgesamt ergibt sich ein schlüssiges Bild für die Ergebnisse des Produktsystems in Abbildung 47, die ausgewählten Szenarien in Kapitel 4.3.5 und die betrachteten Wirkungskategorien in Kapitel 4.3.1. Das am Anfang definierte Ziel und der gewählte Untersuchungsrahmen sowie die ausgewiesene funktionelle Einheit ergeben in diesem Zusammenhang einen sinnvollen Untersuchungsrahmen.

4.7 Einsatz von RC- Gesteinskörnungen als Sekundärrohstoff in Beton

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, ist die Erzeugung von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Altbeton in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen ihrer Herstellung mit unterschiedlichen Umweltwirkungen verbunden. Die Gewinnung von natürlichen Gesteinskörnungen wiederum führt ebenfalls zu Umweltbelastungen, die in Abhängigkeit von der Art ihrer Generierung variieren. Die Herstellung von gebrochenen natürlichen Gesteinskörnungen, als Splitten, ist beispielsweise meist mit einem höheren Energieaufwand und entsprechenden Umweltbelastungen verbunden als die Förderung von Rundkiesen.

Zudem sind auch bei der ökobilanziellen Betrachtung von natürlichen Gesteinskörnungen die damit verbundenen Materialtransporte eine wichtige Einflussgröße. Um bei einem Vergleich der Umweltwirkungen von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen regionale Einflussfaktoren und die entsprechenden Transportentfernungen auszuschließen, werden die Umweltwirkungen von Materialtransporten zunächst nicht berücksichtigt.

Da der Abbruch eines Gebäudes nicht mit dem Ziel der Gewinnung von RC-Baustoffen durchgeführt wird, sollten bei einem Vergleich der Umweltwirkungen von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen die Umweltwirkungen für die Abbrucharbeiten als „Sowiesokosten für die Umwelt“ nur dann berücksichtigt werden, wenn sie die Umweltwirkungen der herkömmlichen Abbrucharbeiten nicht überschreiten. Würde der Aufwand für die Abbrucharbeiten mit selektiven Arbeitsschritten über den Aufwendungen für einen herkömm-

lichen Abbruch liegen, so müsste diese Differenz in die ökobilanzielle Bewertung einfließen. Dies war in den untersuchten Szenarien nicht der Fall. Daher wurden für den Vergleich mit Natursteinkörnungen die Aufwendungen für die Bauschutttaufbereitung bis zur Bereitstellung der Gesteinskörnungen an der Anfallstelle zur Abholung durch den Anwender herangezogen. Die zu vergleichenden Werte für natürliche Gesteinskörnungen wurden entsprechend ebenfalls bei der Bereitstellung an der Anfallstelle betrachtet.

Um einen sinnvollen Vergleich zwischen RC-Baustoffen und den zu substituierenden natürlichen Baustoffen vorzunehmen ist es zudem naheliegend die zu vergleichenden Daten wenn möglich aus der gleichen Datenquelle zu generieren. Da in der vorliegenden Untersuchung die Berechnungen der Umweltwirkungen bei der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen unter Nutzung der Datenbank Ecoinvent durchgeführt wurden, wurden auch die Angaben zu natürlichen Gesteinskörnungen der gleichen Quelle entnommen.

Die in dieser Studie untersuchten Modellszenarien und die dabei entstehenden Umweltwirkungen wurden in den vorangegangenen Kapiteln näher erläutert. Als signifikante Parameter für die Beurteilung der Umweltwirkungen in Bezug auf rezyklierten Gesteinskörnungen wurden die Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch identifiziert (vgl. Kapitel 4.6.1). Entsprechend ist es sinnvoll bei einem Vergleich von RC-Gesteinskörnungen mit natürlichen Gesteinskörnungen diese Wirkungskategorien zu betrachten.

In der nachfolgenden Abbildung 64 sind daher die Ergebnisse der Wirkungskategorien Klimawandel (GWP 100 a) und Landverbrauch für die Herstellung von einer Tonne natürlicher Gesteinskörnung und von einer Tonne RC-Gesteinskörnung aus den Modellszenarien 1 (Einfamilienhaus) und 2 (Plattenbau) dargestellt.

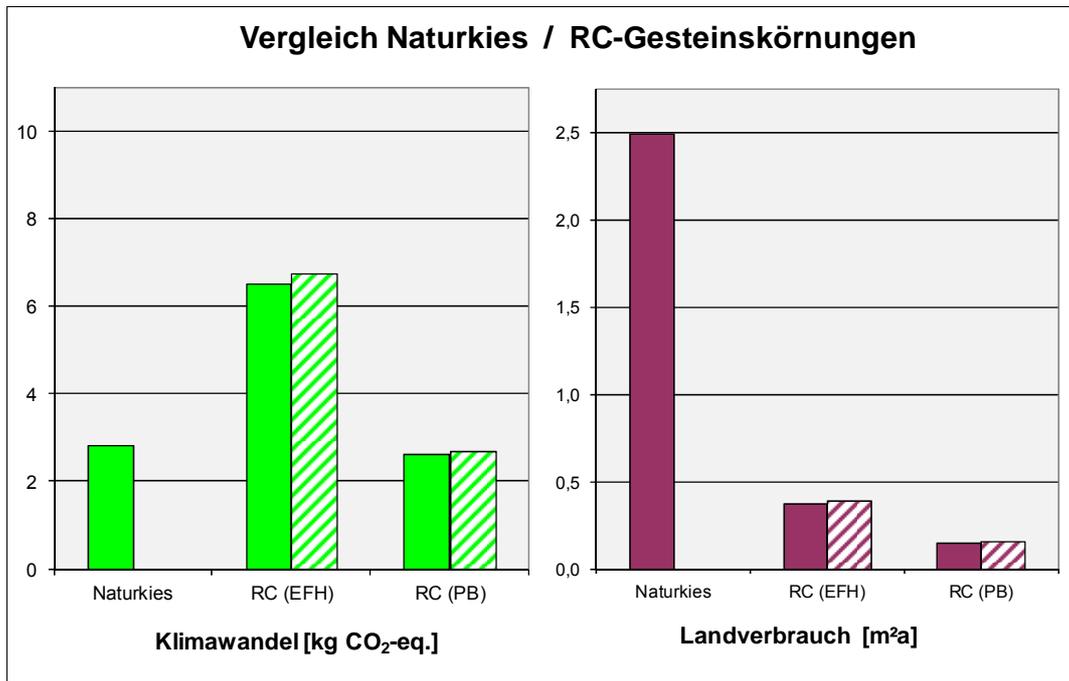


Abbildung 64: Vergleich der Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch für die Herstellung von jeweils einer Tonne natürlicher Gesteinskörnung und RC-Gesteinskörnungen aus selektiv und nicht selektiv geführten Abbrüchen

Während sich die Entstehung von klimarelevanten Emissionen bei der Generierung von Natursteinkörnungen und RC-Gesteinskörnungen des Szenarios 2, Plattenbau, mit 2,81 bzw. 2,62 kg CO₂-Äquivalenten pro Tonne Gesteinskörnung in der gleichen Größenordnung bewegt, liegt dieser Wert für die RC-Gesteinskörnung aus dem Szenario 1, Einfamilienhaus, mit über 6 kg CO₂-Äquivalenten pro Tonne RC-Gesteinskörnung (sowohl für selektiven als auch für nicht selektiven Abbruch) erwartungsgemäß höher (vergl. Kapitel 4.5.1). Die geringfügig höheren Werte für die Behandlung des Materials aus nicht selektiv geführten Abbrüchen sind vor allem mit dem etwas geringeren Anfall an RC-Gesteinskörnungen bei dieser Vorgehensweise zu erklären (vgl. Kapitel 4.3.5).

Da sowohl die Umweltwirkungen bei der Gewinnung von natürlichen Gesteinskörnungen als auch bei der Generierung von RC-Gesteinskörnungen überwiegend durch die Energiebereitstellung zur Bearbeitung der Körnungen verursacht werden, ergibt sich in Bezug auf die anderen Wirkungskategorien wie Versauerungspotential oder Eutrophierungspotential ein ähnliches Bild wie in der Kategorie Klimawandel. Unterschiede treten erwartungsgemäß in der Wirkungskategorie Landverbrauch auf. Weiterhin ist das Ozonabbaupotential (ODP) der RC-Gesteinskörnungen deutlich höher als der entsprechende Wert der natürlichen Gesteinskörnungen, die ODP-Werte liegen jedoch insgesamt in einem vergleichsweise niedrigen Bereich.

In Bezug auf die Kategorie Landverbrauch liegt das Ergebnis für die Generierung von einer Tonne Natursteinkörnung deutlich über den Werten aller betrachteten RC-Gesteinskörnungen (siehe Abbildung 65). Dies ist mit dem für den Abbau von Kies- und Sand notwendigen Flächenverbrauch zu erklären. Bei der hier betrachteten Erzeugung von rezyklierten Gesteinskörnungen fallen vergleichsweise geringe Werte für diese Kategorie an. Die im direkten Vergleich des Landverbrauchs bei der Generierung rezyklierter Gesteinskörnungen festgestellten Unterschiede zwischen den betrachteten Szenarien untereinander fallen im Vergleich zu der Differenz zum beim Abbau natürlicher Gesteinskörnungen entstehenden Landverbrauch nur gering aus (vgl. Abbildung 51).

Zusammenfassend ist in Bezug auf die Umweltwirkungen bei der Herstellung von RC-Gesteinskörnungen festzustellen, dass diese in Abhängigkeit vom betrachteten Szenario und der betrachteten Wirkungskategorie durchaus vorteilhaft gegenüber der Generierung von natürlichen Gesteinskörnungen sein können. Nicht zu vernachlässigen ist an dieser Stelle aber die in der Regel nicht vollständig erreichte technische Gleichwertigkeit dieses RC-Baustoffs.

In Abhängigkeit von dem späteren Einsatzgebiet des herzustellenden Betons gibt es eine Vielzahl von Betonqualitäten und entsprechend auch von Betonrezepturen. Beim ökobilanziellen Vergleich von RC-Beton mit einem Referenzbeton, dessen Gesteinskörnung vollständig aus Natursteinkörnung besteht, ist es sinnvoll Betone gleicher Rezeptur oder möglichst ähnlicher Zusammensetzung zu betrachten. Dies vereinfacht einen ökobilanziellen Vergleich.

Die Umweltwirkungen der Betonproduktion werden bekanntermaßen stark von dem im Beton enthaltenen Zement dominiert [35, 137]. Die schlechteren Baustoffeigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen gegenüber natürlichen Körnungen werden in einigen Rezepturen durch eine erhöhte Zementzugabe oder durch den Einsatz anderer Zusatzstoffe wie z.B. Verflüssiger ausgeglichen [121, 134]. Um die damit verbundene Beeinflussung der Umweltwirkungen auszuschließen, wurde in der hier durchgeführten ökobilanziellen Betrachtung vorausgesetzt, dass die Zusammensetzung von RC-Beton und Referenzbeton nach der gleichen Rezeptur und mit dem gleichen Zementanteil erfolgt. Dies bedeutet eine Begrenzung des Anteils von rezyklierter Gesteinskörnung an der gesamten Gesteinskörnung.

In Anlehnung an Literaturangaben und eigene Versuche wurde deshalb für die ökobilanzielle Bewertung eine Betonrezeptur mit einem Anteil von 20 % RC-Gesteinskörnung an der gesamten Gesteinskörnung gewählt [35, 138]. Ein so hergestellter RC-Beton erreicht in der Regel auch ohne eine Erhöhung der Zementanteils oder die Zugabe sonstiger Zusatzstoffe die gleichen Festigkeiten wie der entsprechende Referenzbeton. In der Schweiz gelten Betone beispielsweise grundsätzlich erst ab einem Anteil von mindestens 25 % rezyklierter Gesteinskörnung an der gesamten Gesteinskörnung als RC-Betone [139, 140].

In der nachfolgenden Tabelle 26 sind die Daten der Umweltwirkungen für die in der Berechnung für RC-Beton und Referenzbeton eingesetzten Gesteinskörnungen aufgeführt. Für die rezyklierte Gesteinskörnung wurden die Werte für selektiven Abbruch eines Plattenbaus (Szenario 2) ohne Transporte verwendet. Die Daten der natürlichen Gesteinskörnung entstammen auch hier der Datenbank Ecoinvent, und beziehen sich ebenfalls auf die Bereitstellung ab Werk. Die Rezepturen der Betone finden sich in Anhang G.

Tabelle 26: Vergleich der Umweltwirkungen der Produktion (ohne Transporte) von jeweils einer Tonne rezyklierter Gesteinskörnung (PB, selektiver Abbruch) und Natursteinkörnung

Umweltwirkung pro FE	Äquivalente	natürliche Gesteinskörnung	RC-Gesteinskörnung PB selektiver Abbruch
Klimawandel	[kg CO ₂ -eq.]	2,81	2,62
Landverbrauch	[m ² a]	2,49	0,15
strat. Ozonabbau	[kg CFC-11-eq.]	2,8E-07	1,9E-02
Ressourcenverbrauch	[kg Sb-eq.]	0,019	0,019
Versauerungspotential	[kg SO ₂ -eq.]	0,016	0,004
Überdüngungspotential	[kg NO _x -eq.]	0,026	0,003

Die Umweltwirkungen der Rohstoffbereitstellung für die Herstellung von einem m³ RC-Beton und dem zugehörigen Referenzbeton sind in den nachfolgenden Tabellen 27 und 28 aufgeführt. Der Energieaufwand zur Bearbeitung des Frischbetons wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da der Aufwand für die Bearbeitung der beiden Betone gleich ist. Die Unterschiede ergeben sich durch den zusätzlichen Wasseranspruch der rezyklierten Gesteinskörnung, der aus der Porosität der am RC-Gesteinskorn anhaftenden Zementsteinanhaftungen der Altbetonekörnung resultiert. Um trotz der zusätzlichen Wasseraufnahme durch den Altbetonestein den vorgegebenen Wasserzementwert (hier 0,6) einstellen zu können muss zusätzliches Wasser bei der Anmischung des Betons zugegeben werden. Basierend auf Literaturwerten wurde eine Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung von 4 % angenommen [39, 141].

Tabelle 27: Umweltwirkungen der Rohstoffbereitstellung für die Herstellung von 1 m³ RC-Beton mit einem Anteil von 20 % rezyklierter Gesteinskörnung

Umweltwirkung der Rohstoffe zur Herstellung von 1 m ³ RC - Beton mit einem Anteil von 20% RC-Gesteinskörnung								
Rohstoffe			Klimawandel	Landverbrauch	Umweltwirkungen			
					strat. Ozonabbau	Ressourcenverbrauch	Versauerungspotential	Überdüngungspotential
					kg [CFC-11-eq.]	kg [Sb-eq.]	kg [SO ₂ -eq.]	kg [NO _x -eq.]
Zement (Portlandzement)	310,0	[kg]	254,42	1,68	6,17E-06	0,4811	0,3518	0,4741
Wasser	199,4	[l]	0,06	0,01	3,79E-09	0,0004	0,0003	0,0002
N-Gesteinskörnung	1439,0	[kg]	4,05	3,58	3,97E-07	0,0272	0,0236	0,0376
RC-Gesteinskörnung	360,0	[kg]	0,94	0,05	6,84E-03	0,0068	0,0014	0,0011
GESAMT			259,48	5,32	6,85E-03	0,52	0,38	0,51

Tabelle 28: Umweltwirkungen der Rohstoffgestellung für die Herstellung von 1m³ Referenzbeton

Umweltwirkung der Rohstoffe zur Herstellung von 1 m ³ Referenzbeton aus natürlicher Gesteinskörnung								
Rohstoffe			Klimawandel	Landverbrauch	Umweltwirkungen			
					strat. Ozonabbau	Ressourcenverbrauch	Versauerungspotential	Überdüngungspotential
					kg [CFC-11-eq.]	kg [Sb-eq.]	kg [SO ₂ -eq.]	kg [NO _x -eq.]
Zement (Portlandzement)	310,0	[kg]	254,42	1,68	6,17E-06	0,4811	0,3518	0,4741
Wasser	185,0	[l]	0,06	0,01	3,52E-09	0,0004	0,0003	0,0001
N-Gesteinskörnung	1821,0	[kg]	5,12	4,54	5,02E-07	0,0344	0,0299	0,0475
RC-Gesteinskörnung	0,0	[kg]	0,00	0,00	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000
GESAMT			259,60	6,22	6,68E-06	0,52	0,38	0,52

Da der Zementgehalt die Umweltwirkungen von Betonen dominiert, unterscheiden sich die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung der hier betrachteten Betone gleicher Rezeptur in den Wirkungskategorien Klimawandel, Ressourcenverbrauch sowie Versauerungs- und Überdüngungspotential nur geringfügig. Der RC-Beton zeigt im Vergleich zum Referenzbeton die gleichen oder leicht geringere Umweltwirkungen. Das Ozonabbaupotential des RC-Betons ist im Verhältnis zum Referenzbeton deutlich höher – jedoch bei sehr niedrigen Absolutwerten.

Ein klarer Vorteil von RC-Beton gegenüber dem Referenzbeton ist in der Wirkungskategorie Landverbrauch zu erkennen. Obwohl nur 20 % der Gesteinskörnung des RC-Betons aus RC-Material besteht, bewirkt der im Vergleich zur Natursteingewinnung geringe Landverbrauch bei der Bauschutttaufbereitung (vgl. Abbildung 65) eine Reduzierung dieser Kategorie um fast 17 %.

In Abbildung 66 sind die Umweltwirkungen Klimawandel und Landverbrauch nach den Anteilen, welche die einzelnen im Beton eingesetzten Rohstoffe an der jeweiligen Umweltwirkung haben, aufgeschlüsselt. Während der Zementgehalt, wie schon zuvor beschrieben, die Umweltwirkung Klimawandel sehr deutlich dominiert, beeinflussen die eingesetzten Gesteinskörnungen die Kategorie Landverbrauch stärker als der Zement.

Entsprechend wirken die Vorteile von RC-Gesteinskörnungen in dieser Wirkungskategorie (vgl. Tabelle 26 bzw. Abbildung 65) auch beim Einsatz im Beton. Demgegenüber zeigt die für den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen erforderliche Erhöhung der Wassermenge bei der Betonherstellung in keiner der untersuchten Wirkungskategorien Auswirkungen.

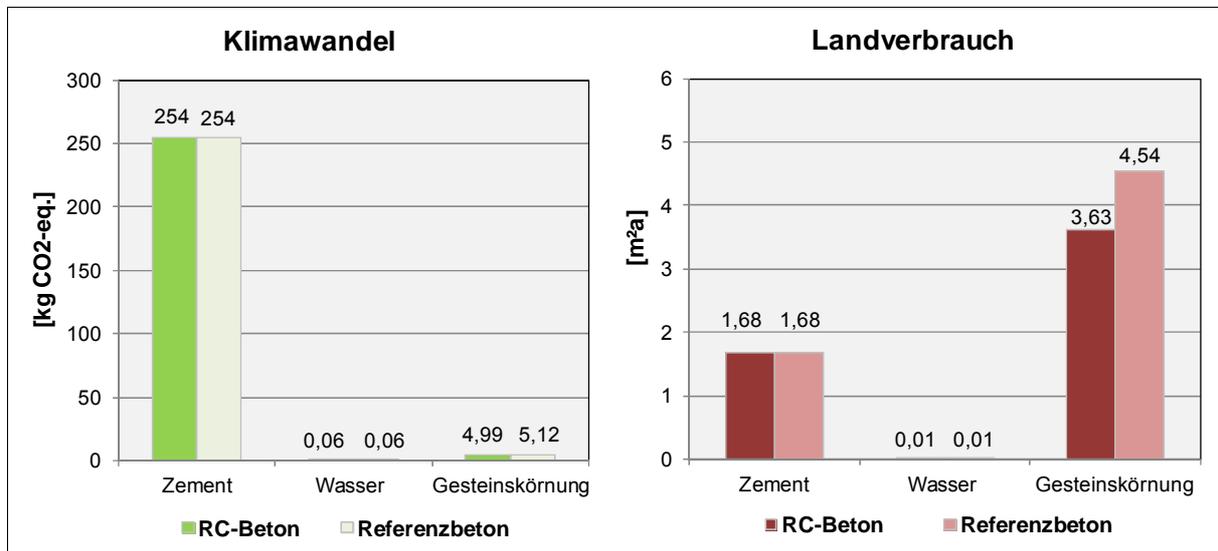


Abbildung 65: Vergleich der Wirkungskategorien Klimawandel (GWP 100) und Landverbrauch für die Herstellung von 1 m³ RC-Beton und 1 m³ Referenzbeton

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen als Sekundärrohstoff für die Betonherstellung bei unveränderter Betonrezeptur die Umweltwirkungen des Betons in den meisten Wirkungskategorien nur wenig beeinflusst. Dies ist mit dem großen Einfluss, den die mit der Zementzugabe verbundenen Umweltwirkungen auf die ökobilanzielle Bewertung von Betonen haben, zu erklären. Zugleich ist jedoch bei RC-Betonen in der Wirkungskategorie Landverbrauch eine deutliche Verringerung der Umweltbelastung zu verzeichnen. Entsprechend kann – unter der Voraussetzung, dass die technischen Eigenschaften des Betons den jeweiligen Anforderungen entsprechen – die Anwendung von hochwertigen rezyklierten Gesteinskörnungen in der Betonherstellung sinnvoll sein und zur Schonung von natürlichen Ressourcen beitragen.

Zu beachten ist, dass in dieser Betrachtung von RC-Gesteinskörnungen als Sekundärrohstoffe die mit der Betonherstellung verbundenen Transporte sowohl bei den RC-Betonen als auch bei den Referenzbetonen nicht gewertet wurden. Aufgrund des großen Einflusses von Transportentfernungen auf die Umweltwirkungen bei der Herstellung von Betonen und Gesteinskörnungen (vgl. Kapitel 4.6) können Einzelfallbetrachtungen unterschiedlich ausfallen und zu anderen Ergebnissen führen.

5 Teilvorhaben 4: Handlungsempfehlungen

5.1 Hintergrund

Im Sinne der Nachhaltigkeit im Bauwesen sollte die Stofftrennung beim Rückbau von unterschiedlichen Bauwerken bereits in der Planungsphase für den Neubau berücksichtigt werden [3, 58, 59]. Dies beinhaltet sowohl eine Begrenzung der Anzahl unterschiedlicher Materialien als auch die Optimierung der Konstruktion in Hinblick auf den späteren Rückbau, wie z.B. durch einfache, trennbare Baukonstruktionen. Die technischen Bedingungen für nachhaltig optimierte Gebäude beeinflussen sich dabei gegenseitig: Herstellungsprozesse für Baustoffe, Bauteile und Gebäude sind die Grundlage für die späteren Abbruch-, Rückbau- oder Zerlegungsarbeiten, die wiederum die möglichen Aufbereitungs- und Verwertungsoptionen beeinflussen. Hierzu finden sich in der Literatur diverse Ansätze [33, 142, 143].

In der Konstruktion optimierte Gebäude sind jedoch in Bezug auf die in den kommenden Jahren in Deutschland durchzuführenden Abbruch- /und Rückbaumaßnahmen noch nicht von Belang, daher wurde dieser Bericht in Hinblick auf den derzeitigen Gebäudebestand, der heterogen zusammengesetzt ist, erarbeitet.

Die Erarbeitung der Handlungsempfehlungen basiert auf den Ergebnissen dieses UFOPLAN-Projektes sowie auf der Auswertung von in der Literatur vorhandenen Ansätzen bzw. Handlungsempfehlungen zu Abbrucharbeiten. Es konnte in diesem Zusammenhang auf eine Vielzahl von bereits vorliegenden Informationsquellen und Empfehlungen zurückgegriffen werden, die sich mit unterschiedlichen Aspekten von Abbrucharbeiten sowie auf kontrollierte Vorgehensweisen zur selektiven Erfassung von problematischen Baureststoffen befassen. Nachfolgend sind einige der wichtigsten Informationsquellen aufgeführt:

- DIN 18007: Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche [61],
- DIN 18459: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Abbruch- und Rückbauarbeiten [60],
- Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) [144],
- Handlungsanleitung „Selektiver Abbruch und verwendungsorientierter Rückbau“ der von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) herausgegeben wurde [85],
- „Arbeitshilfen zum Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie zum Einsatz von Recycling-Baustoffen auf Liegenschaften des Bundes“, herausgegeben von BMVBS und BMVG [145],

- Empfehlungen der Berufsgenossenschaft Bau für die Durchführung von Abbrucharbeiten „BGI 665: Abbrucharbeiten“ [146],
- Handlungsansätze nach Knappe (ifeu-Institut) „Von der Abfallwirtschaft zur Rohstoffwirtschaft - Handlungsansätze am Beispiel von Bauabfällen“ [5].

Die in dieser Studie entwickelten und untersuchten Szenarien basieren auf drei Gebäudetypen unterschiedlicher Größe und Materialzusammensetzung. In den Szenarien wurden vorhandene marktübliche Techniken für Abbruch und Bauschuttzubereitung der Bewertung zugrunde gelegt. Dabei wurden die Umweltwirkungen des Abbruchs jedes Gebäudetyps mit und ohne separate Schritte zur Entfernung von gipshaltigen Bauteilen (als Sulfatquellen) betrachtet und diese einander gegenüber gestellt (siehe Kapitel 4).

Davon unabhängig wurden vorab die grundlegenden Verfahrensschritte für einen selektiven Abbruch, wie sie bereits in Kapitel 2.5 beschrieben wurden, nicht in der Entwicklung der Szenarien berücksichtigt. Da das Ziel der durchgeführten Abbruch- und Aufbereitungsarbeiten die sortenreine Verwertung und gegebenenfalls Beseitigung des anfallenden Abbruchmaterials sowie die Separierung von Stör- und Schadstoffen aus den jeweiligen Abfallfraktionen ist, wurden die folgenden, für einen selektiven Abbruch typischen Arbeitsschritte [147], [73]) als bereits durchgeführt vorausgesetzt und gingen nicht in die Bewertung des Aufwands für den separaten Abbruch von gipshaltigen Materialien ein:

- Entrümpelung des Gebäudes
- Sorgfältiger Ausbau verwendbarer Bauteile oder Bauelemente (z.B. Fenster, Türen, Möbel, Apparate)
- Schadstoffentfernung (z.B. Entfernung von Mineralölkontaminationen im Heizungskeller) unter Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften
- Demontage noch vorhandener nicht mehr verwendbarer Einrichtungsgegenstände
- Entfernung der raumauskleidenden Elemente
- Entfernung der Technischen Gebäudeausrüstung
- Rückbau der Gebäudehülle (Dachbelag, Fenster, Fassade, etc.).

Vor dem Hintergrund der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie [1, 2] sind neben einer ökobilanziellen Bewertung von recycelten Gesteinskörnungen auch ökonomische und soziale Aspekte von Bedeutung. Im Baubereich sind zudem die technischen Anforderungen an Funktionalität und Qualität insbesondere in Bezug auf sicherheitstechnische Aspekte unerlässliche Voraussetzung für die Eignung dieser RC-Baustoffe als Ersatz für natürliche Gesteinskörnungen. Diese technischen Anforderungen finden über die in den technischen Regelwerken formulierten Qualitätskriterien ihren Niederschlag im Bauschuttrecycling. In der nachfolgenden

Abbildung 66 sind die Zusammenhänge der unterschiedlichen Aspekte der Nachhaltigkeit für ganzheitliche Bewertungen im Baubereich dargestellt [148].

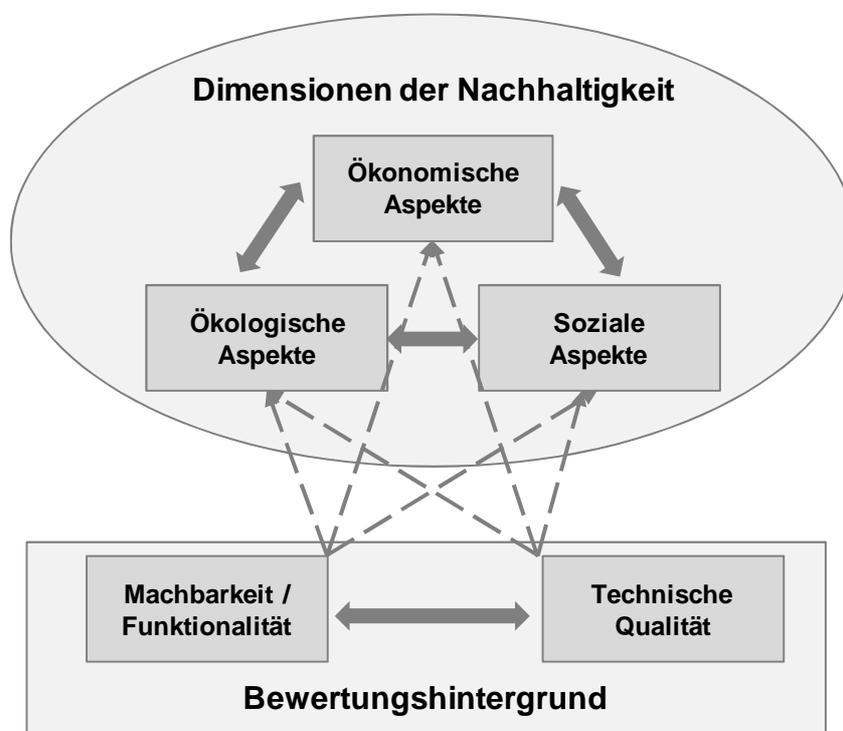


Abbildung 66: Aspekte der Nachhaltigkeit und Bewertungshintergrund der Nachhaltigkeitsbeurteilung im Baubereich [148]

In diesen Handlungsempfehlungen bilden die ökologischen Aspekte vor dem Hintergrund der ökobilanziellen Bewertungen die Basis der Aussagen. Gleichwohl sind die betrachteten Techniken in Hinblick auf ihre Funktionalität und technische Qualität ausgewählt worden (siehe Kapitel 2). Zudem sind in die Empfehlungen auch offensichtliche soziale Aspekte eingeflossen. Ökonomische Aspekte wurden hier nicht berücksichtigt.

5.2 Verfahrensabläufe und –beteiligte beim Abbruch von sulfathaltigen Bauteilen

Eluierbare Sulfate gelangen in der Regel durch gipshaltige Innenausbaumaterialien in den Bauschutt. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Studie haben gezeigt, dass diese Materialien – in relevanten Mengen – primär als Gipsfertigelemente (Gipsplatten etc.), Gipsputze und Estriche vorkommen (vergleiche Kapitel 2). Da die Sortenreinheit für die technische Qualität von recycelten Baustoffen einen entscheidenden Faktor darstellt, ist es

grundsätzlich sinnvoll Stoffströme beim Abbruch möglichst frühzeitig zu trennen [149]. Daher stand der selektive Abbruch dieser Materialien zunächst im Vordergrund der Untersuchungen.

Für die Ausführung des selektiven Rückbaus von gipshaltigen Innenausbaumaterialien stehen verschiedene Abbruchverfahren zur Verfügung (Kap. 2.5.2), deren Einsatz in Deutschland auch üblich und verbreitet ist (siehe Kap. 3.3.2). Weiterhin besteht die Möglichkeit auch durch die Anwendung geeigneter Bauschuttzubereitungsverfahren sulfathaltige Bestandteile aus den zu generierenden rezyklierten Gesteinskörnungen zu entfernen (vergl. Kap. 2.6.5 und 3.2.5).

Daher geht es in diesen Handlungsempfehlungen vor allem darum, die Voraussetzungen aufzuführen, welche die Gewinnung einer hochwertigen RC-Gesteinskörnung ermöglichen. Die Handlungsempfehlungen für die Optimierung des Abbruchs von Gebäuden in Hinblick auf die Rückgewinnung von sulfatarmen RC-Gesteinskörnungen richten sich mit unterschiedlichen Ansätzen an die verschiedenen Verfahrensbeteiligten, welche die Ausführung des Abbruchs maßgeblich gestalten:

- Bauherr
- Fachplaner
- ausführende Firmen.

Die wesentlichen Entscheidungsschritte dieser Verfahrensbeteiligten sind in der nachfolgenden Abbildung 67 dargestellt.

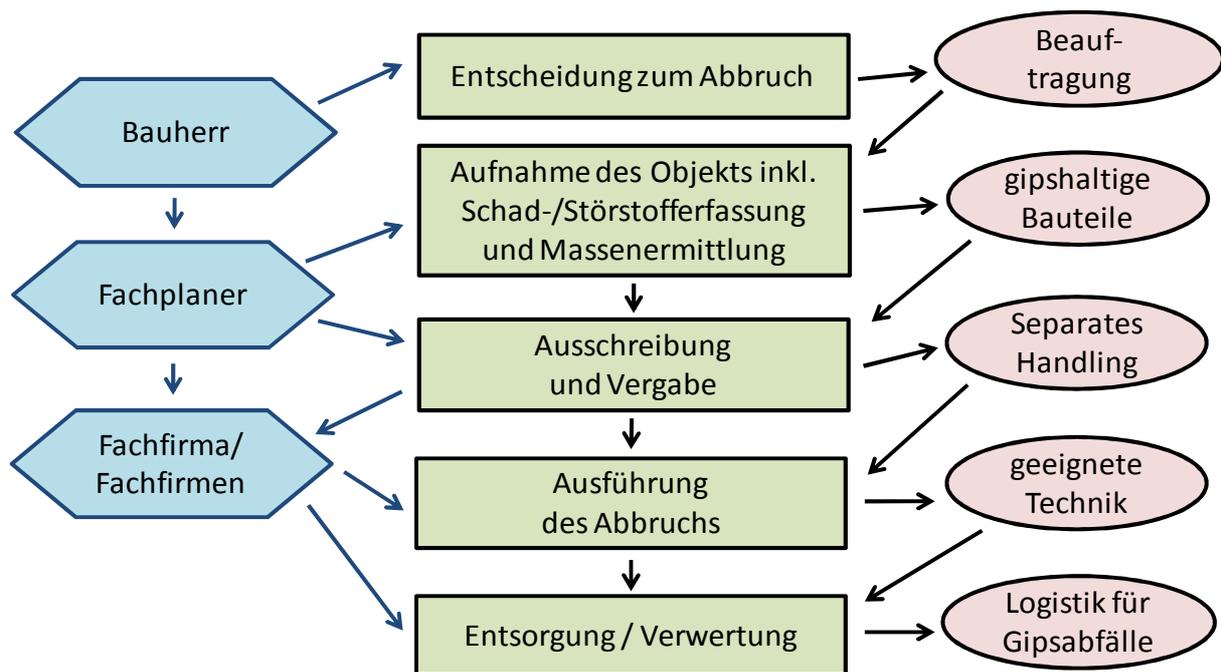


Abbildung 67: Übersicht über die wesentlichen Handlungs- und Entscheidungsabläufe bei der Durchführung eines Abbruchs unter Berücksichtigung von gipshaltigen Bauteilen

Die erste Weiche eines Abbruchs mit der gesonderten Entfernung von gipshaltigen Bauteilen muss der **Bauherr** bei seiner Entscheidung zur Beauftragung einer Abbruchmaßnahme stellen. Gerade bei Bauvorhaben, welche die Größenordnung eines Einfamilienhauses oder einer Doppelhaushälfte überschreiten, ist es in der Regel sinnvoll einen Fachplaner hinzuzuziehen.

Bei der Beauftragung eines Fachplaners ist darauf zu achten, dass schon bei der Planung und Ausschreibung der Abbrucharbeiten die Vorgehensweise des kontrollierten Abbruchs gewählt wird und dass dabei die gipshaltigen Bauteile berücksichtigt werden. Dazu gehört die separate Erfassung sulfathaltiger Bauteile bei der Bestandsaufnahme des Bauwerks und falls erforderlich bei der Ausschreibung. An dieser Stelle könnten auch gerade ausschreibende Stellen der öffentlichen Hand mit der besonderen Beachtung dieser Problemstoffe eine Vorreiterrolle spielen.

Mit der Planung und Ausschreibung von Abbruchmaßnahmen beauftragte **Fachplaner** sollten entsprechend bei der für das Bauvorhaben erforderlichen **Massenermittlung** darauf achten, dass die gipshaltigen Bauelemente separat erfasst werden. Wenn diese Angaben vorliegen, kann der selektive Abbruch auch von Gipsfertigbauteilen und Estrichen auf Sulfatbasis sowie die anschließende Entsorgung des sulfathaltigen Materials geplant sowie sachgerecht massegenau ausgeschrieben werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Getrennthaltung der Stoffströme auf der Baustelle z.B. durch separate Zwischenlagerung

und die Entsorgung gipshaltiger Bauteile auch Teil von Planung und Ausschreibung sind. Weiterhin ist die notwendige Entsorgungslogistik für die separat gewonnenen gipshaltigen Materialien wie z.B. Container zur Getrenntlagerung, frühzeitige Kontakte zu Entsorgungsunternehmen etc. zu planen und in der Ausschreibung zu berücksichtigen.

Im Zuge der Planung sollte bereits eine baustellenbezogene Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden [63]. Vor Beginn der Abbrucharbeiten ist der bauliche Zustand des abzubrechenden Bauwerks und angrenzender Bauteile in statischer und konstruktiver Hinsicht zu untersuchen. In Hinblick auf die Entfernung von Estrichen mit Geräten wie Fräsen oder Minibagger ist die Standsicherheit der entsprechenden Bereiche nachzuweisen.

Falls die getrennte Erfassung von gipshaltigen Baurestmassen nicht möglich sein sollte, so ist ebenfalls schon in der Planungs- bzw. Ausschreibungsphase darauf zu achten, dass die Aufbereitung des erzeugten sulfathaltigen Abbruchmaterials in einer geeigneten Bauschutt-aufbereitungsanlage erfolgt (vergl. Kap. 2.6.5 und 3.2.53.2.5). Die Beauftragung der Abbrucharbeiten sollte nur an Unternehmen erfolgen, die sowohl über geeignete Geräte und Einrichtungen als auch über fachlich geeignete Mitarbeiter verfügen. Die Planung und Ausschreibung bezieht zudem die rechtskonforme Entsorgung der Bauabfälle ein. Dies kann z. B. über eine verbindliche Abfrage bei den Unternehmen zu den Entsorgungswegen geschehen. [144]

Zwar obliegt jeder **Fachfirma für Abbrucharbeiten** die Entscheidung über das einzusetzende Abbruchverfahren, jedoch sollte bei Vorhandensein von gipshaltigen Innenausbauteilen grundsätzlich schon in der Ausschreibung die Durchführung des selektiven Ausbaus dieser Bauelemente aufgeführt werden. Dies hat unter Berücksichtigung der Gebäudestatik und den für diese Arbeiten geltenden Arbeitsschutzvorschriften zu erfolgen. Weiterhin sollten die Hinweise zum Umgang mit gipshaltigen Bauelementen in der jeweiligen Abbrucharweisung enthalten sein.

Im Einzelnen ist die Beachtung der nachfolgend aufgeführten Punkte für die Bearbeitung eines Abbruchvorhabens zu empfehlen:

- **Raumauskleidende Elemente** wie Gipsplatten, Gipswandbauplatten, Gipsfaserplatten u. Trockenestrich:
Diese zuvor als Fertigbauteile eingebauten Innenausbaumaterialien können in der Regel gut von Hand oder unter Einsatz von handgeführten Werkzeugen abgebrochen oder demontiert werden. Beim Einsatz von Schlagbohr- oder Stemmgeräten sollte darauf geachtet werden, dass möglichst nur rückstoßarme und schallgedämpfte Geräte eingesetzt werden.

Der selektive Abbruch von raumauskleidenden Elementen ist heutzutage bereits gängige Praxis und wird vielfach bei Abbrucharbeiten eingesetzt.

➤ **Fließestrich, schwimmend verlegt:**

Schwimmend verlegte Fließestriche auf Calciumsulfatbasis, also Estriche, die durch den Einbau einer Dämmschicht keinen direkten Kontakt zum unterliegenden Betonfußboden haben, lassen sich unter Einsatz von Stemmwerkzeugen aufbrechen. Dieser Aufbruch sollte – in Abhängigkeit von der Statik des abzubrechenden Gebäudes – aus zeitlichen Gründen und aus Aspekten des Arbeitsschutzes nach Möglichkeit maschinell erfolgen, z.B. mit einem mit Stemmhammer ausgestatteten Minibagger. Sollte ein maschineller Abbruch nicht möglich sein, so können handgeführte Werkzeuge eingesetzt werden. Auch bei diesen Arbeiten sollten möglichst nur rückstoßarme und schalldämpfte Geräte eingesetzt werden.

Der aufgestemmte Estrich kann – auch hier in Abhängigkeit von den jeweiligen örtlichen Randbedingungen wiederum möglichst maschinell, z.B. mittels Minibagger, zusammengetragen oder -geschoben und separat weiterbehandelt werden.

Auch diese Vorgehensweise wird vielfach bei Abbrucharbeiten in der Praxis durchgeführt und sollte auch durch entsprechende Berücksichtigung in Planungen und Ausschreibungen verstärkt ausgeführt werden. Dabei ist der Vorteil maschinell ausgeführter Arbeiten gegenüber der Arbeit mit handgeführten Werkzeugen zu berücksichtigen. Eine maschinelle Ausführung der Arbeiten ist neben Aspekten des Gesundheitsschutzes der Mitarbeiter sowohl schneller auszuführen als auch mit weniger Umweltwirkungen verbunden und daher der manuellen Arbeit mit handgeführten Geräten zu bevorzugen.

➤ **Fließestrich, als Verbundestrich verlegt:**

Verbundestriche auf Calciumsulfatbasis haften direkt am Betonboden. Die Verbindung zwischen diesen beiden Baustoffen ist sehr wirksam und daher nur mit erhöhtem Aufwand zu lösen. Es besteht die Möglichkeit einen Verbundestrich durch Abstemmen vom Beton zu lösen. Im Vergleich zum Abstemmen eines schwimmend verlegten Estrichs ist diese Maßnahme aufgrund der guten Haftung des Estrichs am Betonuntergrund deutlich aufwändiger (7,55 MJ/m²). Der abgestemmte Estrich kann wiederum zusammengetragen oder -geschoben und separat weiterverbracht werden. Besonders beim Abbruch eines Verbundestrichs sollte maschinell gearbeitet werden, da die Stemmarbeiten eine große körperliche Belastung der Mitarbeiter darstellen und zudem erheblich zeitaufwendiger und durch erhöhten Energieaufwand ökologisch ungünstiger sind. Wenn es die Statik des abzubrechenden Gebäudes erlaubt, besteht auch die Möglichkeit eine Betonfräse mit einer Frästiefe von mehr als 2 cm einzusetzen. Dieser Frästyp ist aufgrund seines hohen Gewichts und des mit dem Fräsaufwand verbundenen Verschleißes in der Nutzung relativ aufwändig und

wird nicht oft eingesetzt (9,895 MJ/m²). Dennoch bietet er eine gute Alternative zum Abstemmen per Hand.

Grundsätzlich sollte beim Vorfinden von Verbundestrichen auf Handarbeit verzichtet werden. Die Stemmarbeiten an den üblicherweise mehr als 5 cm starken Estrichschichten sind zeit- und energieaufwändig und vor allem durch die mit ihnen verbundenen Vibrationen und Lärmemissionen sehr belastend für die Mitarbeiter.

➤ **Gipshaltige Wand- und Deckenputze:**

Die Verwendung von Gipsputz hat aufgrund der guten Eigenschaften dieses Baustoffs für den Innenausbau in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Gerade die intensive Haftung des Putzes an Wänden und Decken hat jedoch in Bezug auf den selektiven Abbruch bzw. die Entfernung des Putzes vor dem Abbruch der Wände bzw. Decken sehr ungünstige Auswirkungen. Die Putze lassen sich maschinell kaum vom Untergrund lösen. Auch der Einsatz üblicher Methoden des flächigen Abtrags wie schleifen, fräsen oder schälen mit handgeführten Werkzeugen ist in der Regel nicht erfolgreich. Auch Versuche zur Anwendung des Hochdruckwasserstrahlens zur Gipsputzentfernung brachten nicht die gewünschten Ergebnisse.

Zusätzlich zu der guten Haftung des Putzes am Untergrund kann es durch die hygroskopische Speicherfähigkeit von Gips, die für das Innenraumklima eines Gebäudes erwünscht ist, auch zu weiteren Problemen beim Abtrag kommen. Wasserhaltige Gipsputze können z.B. beim Versuch der Bearbeitung mit einem Handschleifgerät so verschmieren, dass ihr Abtrag praktisch unmöglich ist. Zudem wäre der flächige Abtrag von Putzen an Wänden und Decken aufgrund der erhöhten körperlichen Belastung der Mitarbeiter durch permanentes Anheben der eingesetzten Geräte während des Abtrags zusätzlich zu den Belastungen durch Vibrationen und Schallemissionen aus Arbeitsschutzgründen nicht zu empfehlen. Weiterhin ist das händische Arbeiten zeit- und damit kostenaufwändig und mit größeren Umweltwirkungen verbunden als das Arbeiten mit größeren Geräten.

- Entscheidend beim Abbruch aller gipshaltigen Materialien ist die Getrennthaltung der gipshaltigen Reststoffe vor dem Abtransport. Zu **Sammlung, Lagerung** und zum **Abtransport** gerade von kleinteiligen Gipsabfällen (z.B. nach Stemmarbeiten) ist die Nutzung von Containern erforderlich. Bei der Befüllung der Container ist darauf zu achten, dass die Staubentwicklung möglichst gering. In der Praxis bewährt haben sich beispielsweise geschlossene Rutschen, in denen Gipsabfälle in z.B. abgedeckte Container befördert werden können, ohne dass die Umgebung durch Staubentwicklung beeinträchtigt wird. Gleichzeitig wird so verhindert, dass sulfathaltige Bauschuttanteile durch offene Lagerung vor Ort den Witterungsverhältnissen ausgesetzt sind

und z.B. durch Niederschläge Sulfate in Boden und Grundwasser ausgewaschen werden.

Ist es aufgrund der baustellenspezifischen Verhältnisse (Platzbegrenzung, Bauablauf, Bauzeitenplan etc.) oder sonstiger Gründe (z.B. selektive Entfernung von Gipsputzen nicht durchführbar) nicht möglich die gipshaltigen Materialien vor dem Abbruch des Materialhauptstroms zu separieren, so ist darauf zu achten, dass die Abfuhr des Bauschutts möglichst zeitnah erfolgt. Der Austritt von Sulfaten aus gelagertem Bauschutt in den Untergrund sollte durch eine Begrenzung der Zwischenlagerzeit minimiert werden.

- Die **ökobilanzielle Bewertung** der Szenarien selektiver und nicht selektiver Rückbau von verschiedenen Gebäudetypen (Kap.4) hat gezeigt, dass es grundsätzlich sinnvoll ist, durch selektive Schritte gipshaltige Baumaterialien aus dem Materialhauptstrom Altbeton zu entfernen. Der selektive Abbruch führt zwar beim Abbruch selbst in der Regel zu einer Erhöhung der Umweltwirkungen durch zusätzlichen Energieverbrauch, gleichwohl fallen die gipshaltigen Bauabfälle konzentriert an. Dadurch sind die zu deponierenden Abfallmengen nach der Abbruchmaßnahme geringer als ohne die selektiven Arbeitsschritte. Die Arbeitsschritte bei einer Deponierung verursachen relativ große Umweltwirkungen (beispielsweise durch die beim Einbau des Abfalls verbrauchte Energie), so dass sich durch den geringeren Anfall gipshaltiger Abfälle letztendlich durch die selektiven Arbeitsschritte eine Verringerung der Umweltbelastungen ergibt. Nicht zu vernachlässigen ist die Abhängigkeit der Umweltwirkungen von den erforderlichen Materialtransporten, welche das Gesamtergebnis wesentlich beeinflussen.

Obwohl die selektive Entfernung von gipshaltigen Produkten aus dem Bauschutt Hauptstrom grundsätzlich anzustreben ist, ist es vor dem Hintergrund der angestrebten Nachhaltigkeit empfehlenswert auf die oben beschriebenen, in Handarbeit durchzuführenden Arbeitsschritte in Bezug auf Gipsputze oder Verbundestrich zu verzichten.

- Nach den Abbrucharbeiten wird unkontaminierter Altbeton **Bauschuttzubereitungsanlagen** zugeführt um zu marktfähigen Recycling-Baustoffen verarbeitet zu werden. Diese Bauschuttzubereitung kann sowohl in stationären als auch in mobilen Bauschuttzubereitungsanlagen erfolgen. Bauschutt aus Abbruchmaßnahmen, in denen aus unterschiedlichen Gründen (Platzverhältnisse ermöglichen keine Getrennthaltung von gipshaltigen Bauteilen, Zeitgründe, Gipsputze etc.) keine selektive Entfernung der gipshaltigen Bestandteile möglich ist, sollte in einer stationären Bauschuttanlage behandelt werden.

Recherchen bei Verbänden und eigene Untersuchungen (siehe Kapitel 3.) weisen darauf hin, dass sich der Gehalt an gips- bzw. sulfathaltigen Bestandteilen in Bauschutt durch eine mehrstufige Aufbereitung deutlich reduzieren lässt. Speziell der Einsatz einer zweistufigen Brecheranlage ist aufgrund des unterschiedlichen Bruchverhaltens von Beton und Gips bei mechanischer Energieeinwirkung vorteilhaft. Die leichter brechbaren Gipspartikel reichern sich in den feinen Fraktionen an. Diese Feinfraktionen sollten – ebenso wie das Vorabsiebmaterial – bei möglicherweise gipshaltigem Aufgabematerial vor einer Weiterverwertung auch auf eluierbare Sulfate untersucht bzw. gleich deponiert werden. Auch eine Sortierstufe zur Leichtstoffabscheidung nach dem ersten Brecher kann den Sulfatgehalt des Materialhauptstroms verringern. Vergleichbare Verringerungen des Gehalts an eluierbaren Sulfaten sind in der Regel mit mobilen Bauschuttaufbereitungsanlagen nicht zu erreichen.

Wenn in einem Abbruchvorhaben vorhandene gipshaltige Baumaterialien nicht selektiv abgebrochen werden können, so ist zusätzlich eine Abstimmung mit der vorgesehenen Aufbereitungsanlage im Vorfeld der Anlieferung des Bauschutts sinnvoll. Auf diese Weise kann in der Bauschuttaufbereitungsanlage darauf geachtet werden, dass z.B. Teile von Gipsplatten nach Möglichkeit noch vor dem Durchgang durch den ersten Brecher händisch aussortiert werden können. So kann die Gefahr einer Verschleppung von Gipsanteilen durch die unterschiedlichen Stufen der Aufbereitungsanlage verringert und die Qualität der Reststoffe des Aufbereitungsprozesses (z.B. Vorsiebmaterial) erhöht werden.

5.3 Abschließende Bemerkungen

Ressourcenschonung in Bezug auf Gebäude bedeutet nicht nur die Nutzung von wiederverwertbaren Materialien und die Minimierung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase unter Sicherstellung einer möglichst langen Gebäude-Lebensdauer, sondern auch die Minimierung des Energieaufwands für die Baustoffproduktion, für die Errichtung und Nutzung des Gebäudes, sowie für Rückbau, Abbruch und Entsorgung [33].

Dabei ist es wichtig, die einzelnen Punkte im Kontext mit den anderen betroffenen Bereichen zu sehen und die Umweltwirkungen insgesamt zu betrachten. Zusätzlich zu den ökobilanziell zu bewertenden Auswirkungen von Verfahren sollten auch die anderen Bereiche, die im Sinne der Nachhaltigkeit betroffen sind, nämlich ökonomische und soziale Wirkungen nicht außer Acht gelassen werden. Die Optimierung von technischen Verfahren in Bezug auf eine Reduzierung von Störstoffgehalten kann zu anderen Umweltwirkungen wie einem erhöhten Energieverbrauch und den damit verbundenen Emissionen führen. Gleichzeitig können auch andere negative Auswirkungen – wie beispielsweise die zusätzliche körperliche Belastung von mit den Arbeiten betrauten Menschen – diese Ansätze ungünstig beeinflussen.

Die anstehende Ersatzbaustoffverordnung wird voraussichtlich zu einer Verschärfung der Grenzwerte für eluierbare Sulfate in RC-Baustoffen führen [24]. Die Qualitätsanforderungen an die RC-Baustoffe steigen und dies führt zu einer Veränderung der Einsatzmöglichkeiten für diese Materialien außerhalb der Wiederverwertung als rezyklierte Gesteinskörnung im Hochbau. Entsprechend wird ein erhöhter Aufwand zur Entfernung gips- bzw. sulfathaltiger Bauelemente erforderlich sein, um den künftigen Anforderungen zu genügen. An dieser Stelle erscheint es sinnvoll, dass die öffentliche Hand als Auftraggeberin für Abbrucharbeiten eine Vorreiterrolle einnimmt und die Abbrucharbeiten unter der Berücksichtigung der separaten Entfernung von gipshaltigen Bauelementen vor dem eigentlichen Abbruch ausschreiben lässt und beauftragt. Wenn die rechtliche Vorgabe zur Reduzierung von Sulfatgehalten in RC-Baustoffen gegeben ist, sollte der Einsatz von geeigneten Fachfirmen und die Nutzung bereits vorhandener Arbeitsweisen eben durch entsprechende Vergabepraktiken der öffentlichen Hand auch gefördert werden.

Da die Aufgaben auf dem Gebiet von Abbruch und Baustoffaufbereitung wie in vielen anderen technischen Bereichen zunehmend anspruchsvoller werden, sollte bereits in der Ausbildung von Bauingenieuren und Baufacharbeitern der Fokus auch auf den Abbruch bzw. Rückbau von Bauwerken gerichtet werden. Dazu gehören nicht nur die Planung und das Konstruieren von Bauwerken unter Berücksichtigung des zu einem späteren Zeitpunkt möglichst sortenrein durchzuführenden Rückbaus, sondern auch die Kenntnis von Planung, Techniken und Logistik für den Einsatz in aktuellen Abbruchverfahren und in der Bauschutttaufbereitung.

Für die Sicherung der Verwertungsquoten für Baurestmassen auch vor veränderten rechtlichen Rahmenbedingungen sind neben der Optimierung von Abbruch und Aufbereitung nach wie vor auch andere Einflussgrößen von Bedeutung [65]:

- Verstärktes Gewicht für Sekundärbaustoffe in Ausschreibungen der öffentlichen Hand und Akzeptanzförderung bei privaten Ausschreibern
- Nutzung der Ansätze für recyclinggerechte Bauweise, um die zukünftige getrennte Erfassung von Baustoffen zu gewährleisten
- Einführung des qualifizierten Abbruchs, d.h. frühzeitige Stoffselektion, um nachgeschaltete Aufbereitungstechnologien zu entlasten
- Verstärkte Nutzung und gegebenenfalls Weiterentwicklungen von Sortier- und Reinigungstechnologien zur Entfernung von Störstoffen, welche die Qualität des Alternativ-Baustoffes beeinflussen

Zahlreiche Instrumente für die Optimierung von Abbrucharbeiten sind bereits vorhanden. Grundsätzlich gilt, dass für den Abbruch eines Gebäudes das Gebot der weitestgehenden und möglichst hochwertigen Weiter- und Wiederverwendung von Stoffen sowie der Minimierung von Abfall beachtet werden sollte. Die Nutzung von Techniken für den selektiven Abbruch von gipshaltigen Baustoffen entspricht diesem Gebot. Zudem haben die

ökobilanziellen Betrachtungen im Rahmen dieses Projektes ergeben, dass der selektive Abbruch in der Regel ökologische Vorteile gegenüber dem nicht selektiven Rückbau hat.

Diese auf den ersten Blick eindeutigen Ergebnisse müssen differenziert betrachtet werden, da sie auf verschiedenen Annahmen für die bilanzierten Verfahrensweisen beruhen und sich im Einzelfall, z.B. aufgrund unterschiedlicher Transportentfernungen, anders darstellen können. Zudem müssten weiterreichende Auswirkungen einzelner Arbeitsschritte, wie beispielsweise gesundheitliche Belastungen von Mitarbeitern durch den Einsatz bestimmter selektiver Techniken erweitert, z.B. mit einer weitergehenden vertiefenden SLCA (Sustainability Life Cycle Assessment) betrachtet werden.

Weiterhin sollte der Einfluss von einzelnen Bauschuttzubereitungsstechniken auf den Gehalt an eluierbaren Sulfaten in den rezyklierten Gesteinskörnungen näher untersucht werden. Eine Bilanzierung des Sulfatverbleibs innerhalb von Bauschuttzubereitungsanlagen wäre sinnvoll um die Möglichkeiten des Ersatzes von selektiven Techniken durch erweiterte Aufbereitungsschritte, gerade in Hinblick auf Verbundestriche und Gipsputze, festzustellen. Vor dem Hintergrund des zu erwartenden Anstiegs der Gipsgehalte in abzubrechenden Gebäuden (vgl. Kapitel 2) wäre dies ein guter Weg zur Evaluierung von Grenzwerten für Recyclingbaustoffe.

QUELLENVERZEICHNIS

- 1 Bundesregierung, *Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung*. (2002). 243 Seiten.
- 2 Bundesregierung, *Für ein nachhaltiges Deutschland - Fortschrittsbericht 2008 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie*. (2008). 220 Seiten.
- 3 Keßler, H., et al., *Bauschutt als Rohstoffquelle – Ressourcenschonung durch optimierten Einsatz von RC-Baustoffen*, (2008). in *BDB-Jahrbuch 2008*. Jahrbuch-Verlag Foester & Partner: Leudersdorf. 82-95 Seiten.
- 4 Endres, A., Bertram, R., Finus, M., und Rundshagen, B., *Umweltökonomie*. (2007). Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer. 175 Seiten.
- 5 Knappe, F. und Schorb, A. *Von der Abfallwirtschaft zur Rohstoffwirtschaft - Handlungsansätze am Beispiel von Bauabfällen*. (2009). in *Stoffstrommanagement Rheinland-Pfalz*. Mainz.
- 6 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB), *5. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2004)*. (2007). 40 Seiten.
- 7 Eibl, J. und Walther, H.-J., *Umweltgerechter Rückbau*, (1996). in *Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Reststoffe*, DAfStB, Editor. Beuth Verlag GmbH: Berlin Seiten.
- 8 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB), *1. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 1996)*. (2000). 1: 38 Seiten.
- 9 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB), *2. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 1998)*. (2001). 2: 82 Seiten.
- 10 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB), *3. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2000)*. (2003). 83 Seiten.
- 11 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB), *4. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2002)*. (2005). 83 Seiten.
- 12 KrW-/AbfG, *Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen*. (1994). in *BGBI. I*. 2705 Seiten.
- 13 Knappe, F. *Hochwertiger Einsatz von Recyclingbaustoffen - Hemmnisse, Potenziale und ökologische Bewertung*. (2009). in *Fachtagung Re-source 2009*. Berlin S. 35-36.
- 14 Brameshuber, W. *Umweltverträglichkeit von Baustoffen*. (2003). in *ibausil*. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. S. 1-0049-0060.
- 15 DAfStB, *DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100"*. (2004). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Berlin. 5 Seiten.
- 16 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 4226-100 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen*. (2002). Berlin: Beuth-Verlag. 29 Seiten.
- 17 Jacobs, F., *Nachhaltiges Bauen mit Beton*. (1999). TFB cementbulletin, CH, 68 (7/8).

- 18 Breitenbücher, R., *Recyclingbaustoffe aus der Sicht der Bauausführung*, (2000). in *Ressourcen und Recycling mineralischer Rohstoffe für die Bauindustrie*, H. Budelmann and J. Wolff, Editors. Zentrum für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig: Braunschweig. 127-136 Seiten.
- 19 Maultzsch, M., Mellmann, G., und Meinhold, U. *Eigenschaften hochwertiger Betone aus aufbereitetem Bauschutt*. (2003). in *Ibausil 2003*. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. S. 33-47.
- 20 Meißner, M., *Konsequenzen aus den Materialeigenschaften von Recycling-Betonen für die Bemessung zum Zwecke deren vergleichbarer Einstufung*. (1997). 06/97 TP F04: 16 Seiten.
- 21 Müller, A. *Baustoffkreisläufe - Stand und Entwicklung*. (2003). in *Ibausil 2003*. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. S. 1289-1308.
- 22 LAGA (Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall), *"Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln" Mitteilung 20*. (2003). LAGA: Mainz. 52 Seiten.
- 23 ErsatzbaustoffV, *Verordnung zur Regelung des Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und zur Änderung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung - 1. Arbeitsentwurf*. (2007). Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, 55 Seiten.
- 24 ErsatzbaustoffV. *Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material*. [Verordnung] (2011) 06.01.2011); Website: http://www.bmu.bund.de/gesetze_und_verordnungen/verordnungsentwuerfe/regierung_sinterne_abstimmung/doc/46921.php.
- 25 Busche, L. und Neumann, J. *Die geplante „Ersatzbaustoffverordnung“ des Bundes*. (2008). in „*Verwertung mineralischer Abfälle – wie geht's weiter?*“. 28.05.2008, Hamburg/Wentorf.
- 26 LAWA - Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, *Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz (GAP-Papier)*. (2002). Seiten.
- 27 Arendt, M., *Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel von Gips*. (2001). Dissertation: Forschungszentrum Karlsruhe. 296 Seiten.
- 28 DAfStB, *Positionspapier des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton: "Sulfatangriff auf Beton - Stellungnahme des DAfStb"*. (2003). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Seiten.
- 29 Scholz, W. und Hiese, W., *Baustoffkenntnis*. (2007). Vol. 16. Köln: Werner Verlag. 975 Seiten Seiten.
- 30 Soretz, M., *Gründungsschäden - Schadenanalyse - Verfahren zur Sanierung*. (2010). Tiefbau, 54 (1): S. 10-19.
- 31 Schiller, G., et al., *Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung* (2010). Umweltbundesamt (Hrsg.), UFOPLAN. 178 Seiten.
- 32 Mettke, A. *Pilotprojekt Recycling-Beton - Sind Normal- und RC-Betone vergleichbar?* . (2009). in *12. Baustoff-Recycling-Tag „Steine und Erden – Kreislaufwirtschaft am Scheideweg“*. Filderstadt.

- 33 Bruck, M., Geissler, S., und Lechner, R., *Total Quality Planung und Bewertung (TQ-PB) von Gebäuden - Leitfaden*. (2002). Bundesministerium für Verkehr; Innovation und Technologie; Österreich (Hrsg.), Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften. 390 Seiten.
- 34 Knappe, F., *Hochwertige Verwertung von Bauschutt als Zuschlag für die Betonherstellung - Dokumentation - Teilvorhaben BWV Stuttgart* (2010). 51 Seiten.
- 35 Mettke, A. und Heyn, S., *Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen)*. (2010). DBU (Hrsg.): 84 Seiten.
- 36 Grübl, P. und Becker, D., *Der Einfluss von Gips aus Bauschutt im rezyklierten Zuschlag auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften*. (1998). BiM Abschlussbericht Teilprojekt E/13. 5 Seiten.
- 37 Görg, H., *Bauen für den Umweltschutz: Es gibt viel zu tun - nur wissen wir nicht wann! Teil 2*. (2001). Altlasten Spektrum, 10 (3): S. 152-153.
- 38 Grübl, P. und Rühl, M., *Der Einfluß von Recyclingzuschlägen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045*. (1998). BiM Zwischenbericht Teilprojekt E/03. 09/98 TP E03: 7 Seiten.
- 39 Schießl, P. und Müller, C. *Bewertung der bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallenden Recyclingzuschläge hinsichtlich der Eignung als Betonzuschlag*. (1998). in *Statusseminar Baustoffkreislauf im Massivbau*. TU Darmstadt, Institut für Massivbau. S. 16.
- 40 ifu. *Umberto*. [Internet] (2010); Website: <http://www.umberto.de/de/>.
- 41 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB), *Entwurf 6. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2006)*. (2009). Mündliche Mitteilung an Prof. Dr.-Ing. habil. A Müller; Bauhaus-Universität Weimar.
- 42 Görg, H., *Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*. (1997). Schriftenreihe WAR 98. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. 300 Seiten.
- 43 Müller, A., Schnellert, T., und Kehr, K., *Gips im Griff - Gipsbestandteile in Betonrezyklaten - Herkunft, Auswirkungen und Abtrennung mittels Setztechnik. Teil 1*. (2010). AT Technical Solutions, 51 (6): S. 34-43.
- 44 Winkler, A., *Herstellung von Baustoffen aus Baurestmassen - Erstellung eines ganzheitlichen Konzepts zur Wiederverwertung von Mauerwerksabbruch in zementgebundenen Systemen*. (2001). Schriftenreihe: Berichte aus dem Bauwesen. Aachen: Shaker Verlag. 178 Seiten.
- 45 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 933-11:Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober rezyklierter Gesteinskörnung*. (2009). Beuth Verlag: Berlin Seiten.
- 46 Kohler, N. und Hassler, U., *Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen*. (1999), Hrsg. H. Paschen. Karlsruhe: Springer-Verlag. 301 Seiten.
- 47 Seemann, A., *Entwicklung integrierter Rückbau- und Recyclingkonzepte für Gebäude*. (2003). Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (kit). 236 Seiten.

- 48 Bundesverband der deutschen Zementindustrie (bdz) - Arbeitskreis Marktforschung, *Baustoffverbrauch im Hochbau*. (2009). bdz. 4 Seiten.
- 49 Arbeitskreis Marktforschung des bdz, *Baustoffverbrauch im Hochbau*. (2009). Bundesverband der deutschen Zementindustrie (bdz). 4 Seiten.
- 50 Chopard, A. und Gärtner, M., *Vom Abbruch zum neuen Produkt - Klinikgebäude Jena*. (2011). F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Projektarbeit. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar. Seiten.
- 51 Statistisches Bundesamt, *Statistisches Jahrbuch 2008*. (2009). 753 Seiten.
- 52 Seifert, G. und Müller, A., *Raumstabile RC-Baustoffe*. (2010). AiF - Zwischenbericht: 22 Seiten.
- 53 Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V., *Der Bedarf an mineralischen Rohstoffen*. (2000). 191 Seiten.
- 54 Verein Deutscher Zementwerke e.V. (vdz), *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2004*. (2005). 54 Seiten.
- 55 Schäfer, C., Gramm, A., und Weiß, W., *Analytische Untersuchung von Bauschuttrecyclingmaterial auf Sulfat und PAK*. (2003). Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg (Hrsg.),Az: 35-8980.11/Bauschutt: 20 Seiten.
- 56 Willkomm, W., *Baustoff-Recycling*. (1988). Lengerich: Rationalisierungs-Kuratorium der Deutschen Wirtschaft (RKW) e.V. 92 Seiten.
- 57 Wellmer, F.-W. und Kosinowski, M., *Rohstoffgewinnung und nachhaltige Entwicklung*. (2003). Die Naturstein-Industrie, 39 (7): S. 27-33.
- 58 Gewiese, A., Gladitz-Funk, I., und Schenk, B., *Recycling von Baureststoffen*. (1994). Renningen-Malmsheim: expert Verlag. 137 Seiten.
- 59 Krey, F. *Selektiver Abbruch - Beispiele aus der Praxis*. (2008). in *Gut erhalten - Die Nutzung gebrauchter Bauteile bei Neubau und Sanierung*. Potsdam: SBB - Sonderabfallgesellschaft Berlin Brandenburg GmbH.
- 60 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 18459: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Abbruch- und Rückbauarbeiten*. (2006). Berlin: Beuth-Verlag Seiten.
- 61 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 18007: Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche*. (2000). Berlin: Beuth-Verlag. 8 Seiten.
- 62 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 18299: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art*. (2006). Berlin: Beuth-Verlag Seiten.
- 63 Jung, W., *Rückbauleitfaden*. (2005). Staatliches Umweltamt Hagen (Hrsg.): 112 Seiten.
- 64 Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung und Bundesministerium der Verteidigung, *Arbeitshilfen Recycling*. (2008). 54 Seiten.
- 65 Bilitewski, B., *Recycling von Baureststoffen*. (1993): EF-Verlag für Energie-und Umwelttechnik GmbH. 370 Seiten.

- 66 Lippok, J. und Korth, D., *Abbrucharbeiten*. (2007). 2. Aufl., Hrsg. Deutscher Abbruchverband. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG. 494 Seiten.
- 67 Eckert Erdbau und Industrieabbruch GmbH. *Hydraulikbagger mit Meißel*. [Internet] (2010); Website: <http://www.eckert-industrieabbruch-gmbh.de/glossar/2.html>.
- 68 Koch, E. und Schneider, U., *Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau*. (1997). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag Seiten.
- 69 Albrecht, R., *Moderner Abbruch*. (1981). Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH. 146 Seiten.
- 70 Osebold, R., *Abbruch von Massivbauwerken*. (1981). Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller. 272 Seiten.
- 71 Toppel, C.O., *Technische und ökonomische Bewertung verschiedener Abbruchverfahren im Industriebau*. (2003). Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt Seiten.
- 72 Werner, W. *Verfahren und Erkenntnisse beim Abbruch von Stahlbetonbunkern*. (2010). in *16. Fachtagung Abbruch und Rückbau*. Berlin: Abbruch und Sprengtechnik Consult ASCO GmbH.
- 73 Silbe, K., *Wirtschaftlichkeit kontrollierter Rückbauarbeiten*. (1999). Fachbereich Bauingenieurwesen. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt. 208 Seiten.
- 74 Werner, W. *Das bisschen Abbruch? - Von der Spitzhacke zur Spitzentechnologie*. (2010). in *39. VDBUM Seminar*. Stuhl: Verband der Baumaschinen-Ingenieure und -Meister (VDBUM).
- 75 Momber, A.W., et al., *Materialrecycling mit Hochdruckwasserstrahlen*. (2000). Kontakt & Studium; Bd. 575. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag Seiten.
- 76 Deutscher Abbruchverband. *Rückbauarbeiten*. (2010); Website: www.abbruch.de/informationen/abbruch_rueckbauarbeiten/.
- 77 Momber, A.W. und Bendix, S., *Hochdruckwasserstrahlen von Beton*. (1991). BMT Baumaschinentechnik, (5): S. 227-232.
- 78 Gerlach, L. und Eibl, J., *Neue umweltfreundliche Abbruchmethoden*. (1998). BiM - Baustoffkreislauf im Massivbau. BiM - Teilprojekt B/01: 4 Seiten.
- 79 Walker, I. und Tränkler, J., *Untersuchungen zur künftigen Verwertbarkeit von Bauschutt*. (1993). Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), LWA-Materialien. 7/93: 224 Seiten.
- 80 Klose, B., *Selektiver Rückbau*. (1996). Baustoff-Recycling + Deponietechnik, 12 (2): S. 12-15.
- 81 Rentz, O., et al., *Selektiver Gebäuderückbau und konventioneller Abbruch, Technisch-wirtschaftliche Analyse eines Pilotprojektes*. (1998). Abfallpraxis. Landsberg: ecomed Verlag. 133 Seiten Seiten.
- 82 Seemann, A., Schultmann, F., und Rentz, O., *Trilogie im Baustoffrecycling: Kostensenkung beim Gebäuderückbau durch Kopplung von Demontage, Sortierung und Aufbereitung*. (2002). tec21, 128 (37): S. 7-11.
- 83 Seemann, A. und Renz, O., *Szenarienbildung zur Bestimmung der günstigsten Demontagetiefe beim selektiven Rückbau am Beispiel eines Gymnasiums*. (2000). Müll und Abfall, 32 (5): S. 290-296.

- 84 EG-Bayern, *Selektiver Rückbau - mehr Qualität beim Abbruch kontaminierter Gebäude*. (2002). Terratech, 1: S. 49-52.
- 85 Wangler, O., Opitz, J., und Hawer, M., *Selektiver Abbruch und verwendungsorientierter Rückbau*. (2004). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.), Technik. 62 Seiten.
- 86 Rentz, O., Schultmann, F., Ruch, M., und Sindt, V., *Demontage und Recycling von Gebäuden: Entwicklung von Demontage- und Verwertungskonzepten unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit*. (1997). Umweltforschung in Baden-Württemberg. Landsberg: ecomed Verlag. 274 Seiten.
- 87 Krey, F., Dechantsreiter, U., und Frisch, K.-R., *Werte entdecken - gebrauchte Bauteile wieder verwenden*. (2007). Abbruch aktuell, 9 (2): S. 16-18.
- 88 Mettke, A., Heyn, S., Asmus, S., und Thomas, C. *Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf*. (2008). Cottbus: BTU Cottbus. S. 340.
- 89 Drees, G., *Recycling von Baustoffen im Hochbau: Geräte, Materialgewinnung, Wirtschaftlichkeitsberechnung*. (1989). Wiesbaden Berlin: Bauverlag. 132 Seiten.
- 90 Müller, A., *Aufbereiten und Verwerten von Bauabfällen - Stand und Entwicklung*, (2004). in *Ratgeber Abbruch & Recycling 2004*, A. Müller and H. Strauß, Editors. Stein-Verlag Baden-Baden GmbH: Iffezheim. 14-24 Seiten.
- 91 Kohler, G., Kurkowski, H., und Penzel, U., *Wiederaufbereitung*, (1996). in *Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Reststoffe*, DAfStb, Editor. Beuth Verlag GmbH: Berlin. 93-139 Seiten.
- 92 Petit, E., *Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Naßaufbereitung von Bauschutt*. (1997). Aachener Beiträge zur angewandten Rechentechnik des Instituts für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde. Dissertation: RWTH Aachen. 138 Seiten.
- 93 Grübl, P. und Rühl, M. *German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb) - Code: Concrete with Recycled Aggregates*. (1998). in *"Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*. London, U.K.: University of Dundee, Concrete Technology Unit, London, UK.
- 94 Müller, A., *Unterlagen zur Vorlesung "Abbruch und Rückbau" WS 2009/2010*. (2009). Bauhaus Universität Weimar, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung Seiten.
- 95 Schubert, H., *Aufbereitung fester Stoffe, Band II: Sortierprozesse*. (1996). 4 Aufl. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 540 Seiten.
- 96 Buntenbach, S., Petit, E., und Hohberg, H., *Naßmechanische Aufbereitung von Bauschutt*. (1997). Aufbereitungs-Technik, 38 (3): S. 130-138.
- 97 de Jong, T., Fabrizi, L., und Kuilman, W. *Dry density separation of mixed construction and demolition waste*. (2005). in *Sortieren - Innovationen und Anwendungen*. Berlin: Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik & Aufbereitung, Technische Universität Berlin. S. 89-97.
- 98 Kellerwessel, H., *Neue Entwicklungstendenzen in der Aufbereitungstechnik - Anwendungen und Anlagentechnik*. (1996). Aufbereitungs-Technik, 37 (9): S. 438-444.
- 99 Kurkowski, H. und Penzel, U. *Einfluss der Aufbereitungstechnologie auf Eigenschaften des rezyklierten Zuschlags*. (1998); Website: <http://www.b-i-m.de/>.

- 100 Reichel, W. und Heldt, P., *Einflüsse der Aufbereitung von Bauschutt für eine Verwendung als Betonzuschlag*, (2003). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb: Berlin. 93-131 Seiten.
- 101 Dehler, M., *Optische Sortierung von mineralischen Rohstoffen*. (2004). Die Naturstein-Industrie, 40 (6): S. 14-36.
- 102 Xing, W., *Quality Improvement of Granular Secondary Raw Building Materials by Separation and Cleansing Techniques*. (2004). Section of Material Science and Sustainable Construction, Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Dissertation. Delft: Delft University of Technology. 139 Seiten.
- 103 Hendriks, C.F. und Xing, W. *Suitable separation treatment of stony components in construction and demolition waste*. (2004). in *Use of recycled materials in buildings and structures*. Barcelona: RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, France. S. 166-172.
- 104 Schubert, H., *Aufbereitung fester Stoffe (Band II)*. (1996). Vol. 2. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Seiten.
- 105 Bohle, B., *Einsatz und Anwendungen von Sortierspiralen im europäischen Umweltschutz*. (1993). *Aufbereitungs-Technik*, 34 (11): S. 579-590.
- 106 Pretz, T. *Vorlesungsskript "Aufbereitung fester Abfallstoffe und Recyclingtechnologien III - Teil 8"*. (2006); Website: <http://www.iar.rwth-aachen.de>.
- 107 Bakker, M.A., *12 Jahre erfolgreiche Naßaufbereitung von Bauschutt in Rotterdam*. (1993). *Aufbereitungs-Technik*, 34 (4): S. 201-210.
- 108 Schießl, P., Müller, Ch., *Bewertung der bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallenden Recyclingzuschläge hinsichtlich der Eignung als Betonzuschlag*. (1997). BiM Teilprojekt D/03. F 1550/1: 23 Seiten.
- 109 Mesters, K. und Krass, K., *Großtechnische Aufbereitung von RC-Baustoffen mittels Dichtentrennung*. (1997). FE 961215: 66 Seiten.
- 110 Mesters, K. und Kurkowski, H., *Dichtesortierung von Recycling-Baustoffen mit Hilfe der Setzmaschinenteknik*. (1997). *Aufbereitungstechnik*, 38 (10): S. 536-542.
- 111 Schachermayer, E., Lahner, T., und Brunner, P., *Stoffflussanalyse und Vergleich zweier Aufbereitungstechniken für Baurestmassen*. (1998). Monographien. Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Österreich. 105 Seiten.
- 112 Müller, A. und Linß, E. *Qualitätsparameter von Recyclingbaustoffen*. (2010). in *Fachtagung R`10 Weimar*.
- 113 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 932-11: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probenahme*. (2006). Beuth Verlag: Berlin Seiten.
- 114 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen*. (1997). Beuth Verlag: Berlin Seiten.
- 115 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14041: Umweltmanagement - Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz*. (1998). Beuth Verlag: Berlin Seiten.
- 116 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14042: Umweltmanagement - Ökobilanz - Wirkungsabschätzung*. (2000). Beuth Verlag: Berlin Seiten.
- 117 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14043: Umweltmanagement - Ökobilanz - Auswertung*. (2000). Beuth Verlag: Berlin Seiten.

- 118 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. (2006). Beuth Verlag Seiten.
- 119 Eyerer, P. und Reinhardt, H.-W., *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden*. (2000). Baupraxis. Basel: Birkhäuser Verlag. 229 Seiten.
- 120 Klöpffer, W. und Grahl, B., *Ökobilanz (LCA)*. (2007). Weinheim: Wiley-VCH Verlag Seiten.
- 121 Weil, M., *Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen*. (2004). Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. 172 (229) Seiten.
- 122 Chapman, P., et al. *Declaration of Apeldoorn on LCIA of Non-Ferro Metals*. (2004). in *ICMM (International Council on Mining and Metals) Workshop at TNO Apeldoorn*.
- 123 Lauritzen, E., *Economic and environmental benefits of recycling waste from the construction and demolition of buildings*. (1994). UNEP Industry and Environment: S. 26-31.
- 124 Sára, B., Antonini, E., und Tarantini, M., *Application of Life Cycle Assessment (LCA) methodology für valorization of building demolition materials and products*. (1999). 9 Seiten.
- 125 BRITE/EURAM, *Construction recycling technologies for high quality cement and concrete - Task 5 Cement production*. (2000). Brite/Euram Project BRPR950131 - BE 2145 TASK5-CEMENT: 52 Seiten.
- 126 Craighill, A. und Powell, J., *Lifecycle assessment and economic evaluation of recycling: a case study*. (1996). Resources Conservation & Recycling, 17 (2): S. 75-96.
- 127 Craighill, A. und Powell, J., *A lifecycle assessment and evaluation of construction and demolition waste*. (1999). CSERGE Working Paper WM 99-03. 49 Seiten.
- 128 Bach, H., Bruck, M., Fellner, M., und Vogel, G., *Ökologische Bewertung des Bauschuttrecyclings*. (1999). A.d.S. Landesregierung (Hrsg.), Land Salzburg - Für unsere Umwelt. 72 Seiten.
- 129 Gallenkemper, B., Harms, S., Beck, M., und Becker, G., *Einsatz ökologisch of vorteilhaft*. (2004). Baustoff Recycling + Deponietechnik (BR), 20 (3): S. 34-38.
- 130 Gallenkemper, B., et al., *Ökologischer Nutzen des Recyclings und der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*. (2004). Müll und Abfall, (6): S. 260-266.
- 131 Jeske, U., Buchgeister, J., Schebek, L., und Weil, M., *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - eine Ökobilanz*. (2004). Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe: 6 Seiten.
- 132 Stengel, T. und Schießl, P., *Ressourcenschonung und Umweltentlastung durch den Einsatz von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung am Europäischen Patentamt München*. (2007). cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung (Hrsg.), Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 11 (2007). 2 Seiten.
- 133 Kytzia, S. *Ökobilanzen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen*. (2009). in *FSKB Herbstanlass 2009 - Chancen und Grenzen von Recycling*. Zürich, Schweiz: Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz.
- 134 Kytzia, S. *Ökobilanz von Betonen*. (2010). Rapperswil, Schweiz: Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz.

- 135 Ecoinvent, *The Life Cycle Inventory Data v 2.2.* (2010). in *Ecoinvent v2.2*, Althaus et al., Editor. Swiss Centre for Life Cycle Inventories: St. Gallen Seiten.
- 136 Statistisches Bundesamt, *Abfallentsorgung 2009* (2011). Fachserie 19, Reihe 1: 209 Seiten.
- 137 Kytzia, S., et al., *Vorzüge nachhaltigen Bauens mit Beton - Schlussbericht.* (2009). R. Hochschule für Technik, Institut für Bau und Umwelt (IBU) - Fachstelle Umweltingenieurwesen (Hrsg.): 100 Seiten.
- 138 Weimann, K., *Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik.* (2009). Fakultät Bauingenieurwesen. Dissertation. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar. 250 Seiten.
- 139 Hoffmann, C. und Moser, K., *Aktualisiertes SIA-Merkblatt "Recyclingbeton".* (2010). EMPA. 3 Seiten.
- 140 SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, *SN EN 206-1: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.* (2000). Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Zürich. 77 Seiten.
- 141 Bretschneider, A. und Rühl, M. *The influence of recycled aggregate on the compressive strength and the elastic modulus of concrete.* (1998). in *Darmstadt Concrete 1998*. Darmstadt: Institut für Massivbau - TU Darmstadt. S. 131-141.
- 142 Bredenbals, B., Willkomm, W., und Weber, H., *Abfallvermeidung in der Bauproduktion.* (1994). Bundesministerium für Raumordnung Bauwesen und Städtebau (Hrsg.): 197 Seiten.
- 143 Löfflad, H., *Das globalrecyclingfähige Haus.* (2002). Dissertation. Eindhoven, Niederlande: Technische Universität Eindhoven. 215 Seiten.
- 144 Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), *Leitfaden Nachhaltiges Bauen.* (2001). Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen (Hrsg.): 121 Seiten.
- 145 Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und Bundesministerium der Verteidigung (BMVG), *Arbeitshilfen Recycling.* (2008). Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.): 170 Seiten.
- 146 Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU), *Abbrucharbeiten.* (2008). BGI 665: 44 Seiten.
- 147 Rentz, O., Seemann, A., und Schultmann, F., *Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden - Handlungshilfe.* (2001). Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg (Hrsg.), Texte und Berichte zur Abfallwirtschaft. 20 Seiten.
- 148 Graubner, C.-A., *Nachhaltigkeitsbeurteilung baulicher Lösungen aus Beton - Projekt A,* (2007). in *Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens "Nachhaltig Bauen mit Beton"* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Editor. Beuth-Verlag: Berlin. 340 Seiten.
- 149 Jehle, P., *Ziel noch nicht erreicht – ATV DIN 18459 „Abbruch- und Rückbauarbeiten“.* (2008). VOB aktuell, Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen (DVA), Beuth-Verlag, 15 (4): S. 15-17.
- 150 Kloft, H., *Baustoffliche Bewertung von Gebäuden.* (1997). Darmstädter Massivbau-Seminar 1997 Band 18,

- 151 Plümecke, K., et al., *Preisermittlung für Bauarbeiten*. (2008). 26 Aufl., Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Vol. 26. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG. 575 Seiten.

ANHÄNGE

Anhang A: Gipsanteile bzw. Sulfatgehalte aus realen Abbruchbauvorhaben

Tabelle A 1: Mustergebäude 1: Stoffliche Zusammensetzung und daraus berechneter Gipsgehalt (Einfamilienhaus, Massivbau, Mauerwerk) [47]

Baustoffnummer	Baustoff	Masse [kg]	Gipsgehalt [%]	Gipsgehalt in [kg]		chem. ungebundener Gips
				von	bis	
1000	Natürliche Steine und Erden	187.096	0			
1210	Sand (naturfeucht)	93.875	0			
1530	Blähton (z.B. in Decken)	53	0			
2130	Zementmörtel	79.953	0,6-1,2	480	959	
2210	Gipsmörtel	1.925	90-100	17.33	1.925	1.925
2220	Gips (in Gipsplatten mit Papierumhüllung)	1.701	90-100	1.531	1.701	1.701
2320	Kies und Splittbeton	19.678	0,35-0,9	69	177	
2630	Kalksand-Lochsteine	5.598	0			
2710	Betonhohlblocksteine	25.024	0,35-0,9	88	225	
3300	Vollziegel	6.753	0			
3600	Dachziegel	5.511	0			
3700	Fliesen	327	0			
3800	Keramik	43	0			
4100	Flachglas	151	0			
5000	Metalle	31	0			
5100	Gußeisen	196	0			
5200	Stahl	52	0			
5600	Zink	63	0			
6300	Fichte/Tanne/Kiefer	3.361	0			
6310	Fichte/Tanne/Kiefer behandelt	18.623	0			
6550	Spanplatten	476	0			
6660	Holzfasern	141	0			
6730	Pappe	13	0			
6830	Schilfrohr/Stroh	219	0			
7000	Kunststoffe und Beläge	55	0			
7430	PVC hart	39	0			
7460	PVC weich	114	0			
7600	Teppichboden	37	0			
7730	Tapete bedruckt	358	0			
8100	Asphalt	5.060	0			
10000	Elektronikschrott	78	0			
10100	Kabel	42	0			
Gesamtmasse [kg]:		456.646		3.900	4.988	3.626
Gesamtgipsanteil [%]:				0,85	1,09	0,79
Rohbaumasse [kg]:		430.898		3.900	4.988	3.626
Gipsgehalt im Rohbau [%]:				0,90	1,15	0,84

Tabelle A 2: Mustergebäude 2: Stoffliche Zusammensetzung und daraus berechneter Gipsgehalt (Zweifamilienhaus, Holz-Fachwerkkonstruktion) [47]

Baustoffnummer	Baustoff	Masse [kg]	Gipsgehalt [%]	Gipsgehalt in [kg]		chem. ungebundener Gips
				von	bis	
1140	Sandstein	464336				
1610	Steinkohlenschlacke (z.B. in Decken)	69.266				
2110	Kalkmörtel	61.455				
2140	Zementestrich	41.986	0,35-0,9	146,951	377,874	
2210	Gipsmörtel	21.985	90-100	19786,5	21985	21.985
2310	Stahlbeton	31.164	0,35-0,9	109,074	280,476	
2320	Kies und Splittbeton	36.701	0,35-0,9	128,4535	330,309	
2420	Bimsbeton	101.739	0,35-0,9	356,0865	915,651	
2660	Bimssteine-Vollsteine	15.995	0,35-0,9	55,9825	143,955	
2710	Betonhohlblocksteine	24.235	0,35-0,9	84,8225	218,115	
3300	Vollziegel	24.642				
3400	Lochziegel	4.674				
3600	Dachziegel	67.333				
3700	Fliesen	4.195				
3800	Keramik	502				
4100	Flachglas	2.871				
4400	Spiegelglas	24				
5100	Gußeisen	450				
5200	Stahlbeton	12.466				
5500	Aluminium	165				
5600	Zink	248				
6100	Eiche/buche	22.389				
6300	Fichte/Tanne/Kiefer	86.806				
6310	Fichte/Tanne/Kiefer behandelt	9.931				
6500	Holzspanplatten	383				
7400	PVC	212				
7430	PVC hart	14				
7460	PVC weich	186				
7600	Teppichboden	518				
7760	Tapete, unbedruckt	478				
8200	Bitumen	1.281				
10000	Elektronikschrott	109				
10100	Kabel	121				
11000	ölverunreinigte Baustoffe	4.000				
Gesamtmasse [kg]:		1.112.860		20.668	24.251	21.985
Gesamtgipsanteil [%]:				1,86	2,18	1,98
Rohbaumasse [kg]:		1.057.014		20.668	24.251	21.985
Gipsgehalt im Rohbau [%]:				1,96	2,29	2,08

Tabelle A 3: Mustergebäude 3: Stoffliche Zusammensetzung und daraus berechneter Gipsgehalt (Schulgebäude, Beton-Massivbau, Frankreich) [47]

Baustoffnummer	Baustoff	Masse [kg]	Gipsgehalt [%]	Gipsgehalt in [kg]		chem. ungebundener Gips [kg]
				von	bis	
1250	Kies (z.B. in Decken)	24.949				
1900	Min. Faserdämmstoffe	314				
1910	Steinwolle	1.068				
2120	Kalkzementmörtel	565.798	minimal			
2140	Zementestrich	17.015	0,35-0,9	60	153	
2210	Gipsmörtel	53.513	90-100	48.162	53.513	53.513
2220	Gips (in Gipsplatten mit Papierumhüllung)	3.3015	90-100	29.714	33.015	33.015
2310	Stahlbeton	2.330.130	0,35-0,9	8.155	20.971	
2330	Ziegelsplittbeton	335.749	0,35-0,9	1.175	3.022	
2420	Bimsbeton	47.294	0,35-0,9	166	426	
2910	Asbestzement	17.365	0,35-0,9	61	156	
3300	Vollziegel	161.541				
3700	Fliesen	46.523				
3900	Porzellan	2.169				
4000	Glas	10.943				
4500	Glaswolle	29.122				
5000	Metalle	875				
5100	Gußeisen	17.696				
5200	Stahl	16.179				
5300	Kupfer	261				
5500	Aluminium	11				
5600	Zink	531				
6300	Fichte/Tanne/Kiefer	66.729				
6400	Sperrholz	11.222				
6550	Spanplatten	542				
6800	Pflanzliche Faserdämmstoffe (Torf, Kokos...)	17.836				
6960	Kork	8.955				
7000	Kunststoffe und Beläge	34				
7100	Kunststoff (in Fußbodenbelag)	8.266				
7130	Linoleum	24				
7200	Acrylglas	27				
7300	Polysterol	756				
7400	PVC	83				
7430	PVC hart	389				
7600	Teppichboden	270				
8200	Bitumen	6.653				
10000	Elektronikschrott	4.896				
12000	Materialien in Bauteilen zur Weiterverwendung	17				
Gesamtmasse [kg]:		3.838.760		87.492	111.256	86.528
Gesamtgipsanteil [%]:				2,28	2,90	2,25
Rohbaumasse [kg]:		3.653.098		87.492	111.256	86.528
Gipsgehalt im Rohbau [%]:				2,39	3,05	2,37

Tabelle A 4: Mustergebäude 4: Stoffliche Zusammensetzung und daraus berechneter Gipsgehalt (Seminar- und Lehrgebäude, Beton-Massivbau und Plattenbauweise, Jena) [50]

Baustoffnummer	Baustoff	Masse [t]	Gipsgehalt [%]	Gipsgehalt in [t]		chem. ungebundener Gips
				von	bis	
1250	Kies	40				
1900	Min. Faserdämmstoffe	31				
2140	Zementestrich	219	0,35-0,9	0,8	2,0	
2310	Stahlbeton	1892	0,35-0,9	6,6	17,0	
2320	Kies- und Splittbeton	567	0,35-0,9	2,0	5,1	
2220	Gips	113	70-90	79,2	101,8	101,8
2710	Betonhohlblocksteine	119	0,35-0,9	0,4	1,1	
3300	Vollziegel	392				
3700	Fliesen	20				
4000	Glas	6				
5200	Stahl	8				
5500	Aluminium	6				
6300	Fichte/Tanne/Kiefer	26				
6550	Spanplatten	6				
6730	Pappe	220				
7000	Kunststoff	3				
7130	Linoleum	49				
8200	Bitumen	1				
Gesamtmasse		3719,3		89,0	127,0	101,8
Gesamtgipsanteil [%]				2,4	3,4	2,7
Rohbaumasse [t]		3302,0		89,0	127,0	101,8
Gipsgehalt im Rohbau [%]				2,7	3,8	3,1

Tabelle A 5: Zusammenstellung der Daten zu Gips- und / oder Sulfatgehalten in realen Bauschuttgemischen [42]

	Material		Gipsgehalt aus		Sulfatgehalt
			Sortieranalyse	chem. Analyse	
1	Beton	Plattenbau M1	2,5	2,8	1,3
2		Plattenbau M2	5,4		
3		Beton	0,0		
4		Beton I,II,III		1,1	0,5
5		Beton IV, V		1,5	0,7
6		Betonbruch	0,0	1,5	0,7
7		Betonbruch	0,0	1,0	0,45
8		Porenbeton	5,6	5,8	2,69
9		Beton Bahschwelle	0,0	1,5	0,7
10	gipshaltige Materialien	Material aus Badzelle	94,6	54,6	25,4
11		Fußboden M1	98,1	80,2	37,3
12		Fußboden M2	76,9	60,0	27,9
13	Mauerwerk	Mauerwerkabbruch	4,4	5,6	2,6
14		Mauerwerkabbruch Vorsieb	6,7	5,4	2,5
15		Mauerwerk 0/32	0,0	4,1	1,93
16		Mauerwerk 0/8	0,0	2,2	1,02
17		Mauerwerk 8/32	0,0	0,7	0,33
18		Mauerwerk 1	0,0		
19		Mauerwerk 2	0,0		
20		Mauerwerk 3	0,0		
21		Mauerwerk		1,3	0,6
22		Mauerwerkbruch (60% Ziegel)		1,1	0,5
23		Mauerwerk <2mm		1,3	0,6
24	Ziegel	Ziegel	0,8	2,4	1,1
25		Abbruchziegel	0,0	0,9	0,4
26	Kalksandstein		0,0	0,6	0,26

Tabelle A 6: Zusammenstellung der Daten zum Gips- und / oder Sulfatgehalts [M.-%] in realen Bauschuttgemischen (Zusammenstellung verschiedener Proben mit ermittelten Gipsgehalten)

	Material	Gipsgehalt aus		Sulfatgehalt	Aufbereitung	Brecher	Störstoffabtrennung	
		Sortieranalyse	chem. Analyse					
27	A	0/8		0,4	einstufig	Prallbrecher	Aerosortierung ab 8mm	
28		8/16	0,04	0,6				
29		16/32	0,02	1,1				
30	B	0/32	0,38		einstufig	Prallbrecher		
31	C	0/32	0,41		einstufig	Prallbrecher	manuelle Sortierung d. gebrochenen Materials	
32		32/110	0					
33	D	0/4		1,9	einstufig	Prallbrecher	Aerosortierung	
34		4/8	0,08	1,3				
35		8/16	0,06	0,9				
36		16/32	0,33	2,4				
37		<32		2,8				
38		0/45	0,52	1,5				
39	E	0/5		1,1	einstufig	Prallbrecher	manuelle Vorsortierung, bei Bedarf Aerosortierung	
40		0/45	0,03	0,9				
41		5/45	0,04	1,1				
42		0/100	0,17	6,5				
43	F	0/45	0,35		einstufig	Prallbrecher	manuelle Vorsortierung, bei Bedarf Aerosortierung	
44	G	0/8		4,5	einstufig	Prallbrecher	Aerosortierung	
45		8/16	2,39	2,4				
46		16/56	5,2	7,1				
47		0/56	2,76	3,7				
48	H ungewaschen	0/8		1,1	zweistufig	Backenbrecher Prallbrecher	Naßsortierung (Wäsche)	
49		8/16	0,06	1,1				
50		16/32	0,97	1,3				
51		32/45	0	0,1				
52		0/45	0,05	1,9				
53		H gewaschen	8/16	0,04				
54			16/32	0,13				
55			32/45	0				
56	0/45		0					
57	J	0/8		1,3	einstufig	Prallbrecher	Aerosortierung	
58		8/16	0,07	1,1				
59		0/45	0,36	1,5				
60	K	0/45	0,52	0,6	einstufig	Prallbrecher		

Tabelle A 7: Sulfatgehalte im Eluat von 46 RC-Körnungen aus Bauschutt [55]

	Mittelwert	Median	Perzentil 80
Sulfatgehalt in mg/l	191,85	69,0	296,0

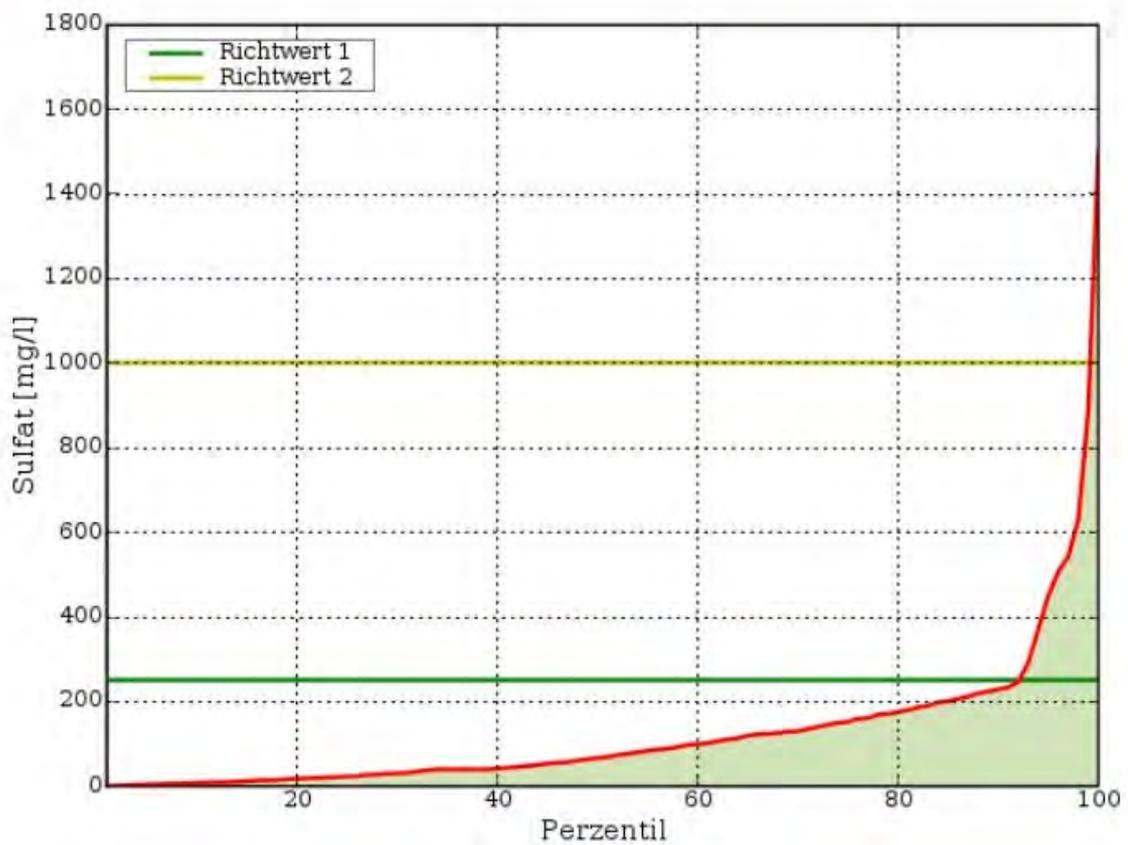
Anhang B: Auswertung der Eluat-Untersuchungen von RC-Körnungen

1. Ergebnisse Sulfat

Auswertung der Messungen von Sulfat

Die Anzahl der Werte n beträgt 1077.

Median	Perzentil 90	Perzentil 98
69.4 [mg/l]	234.0 [mg/l]	890.0 [mg/l]



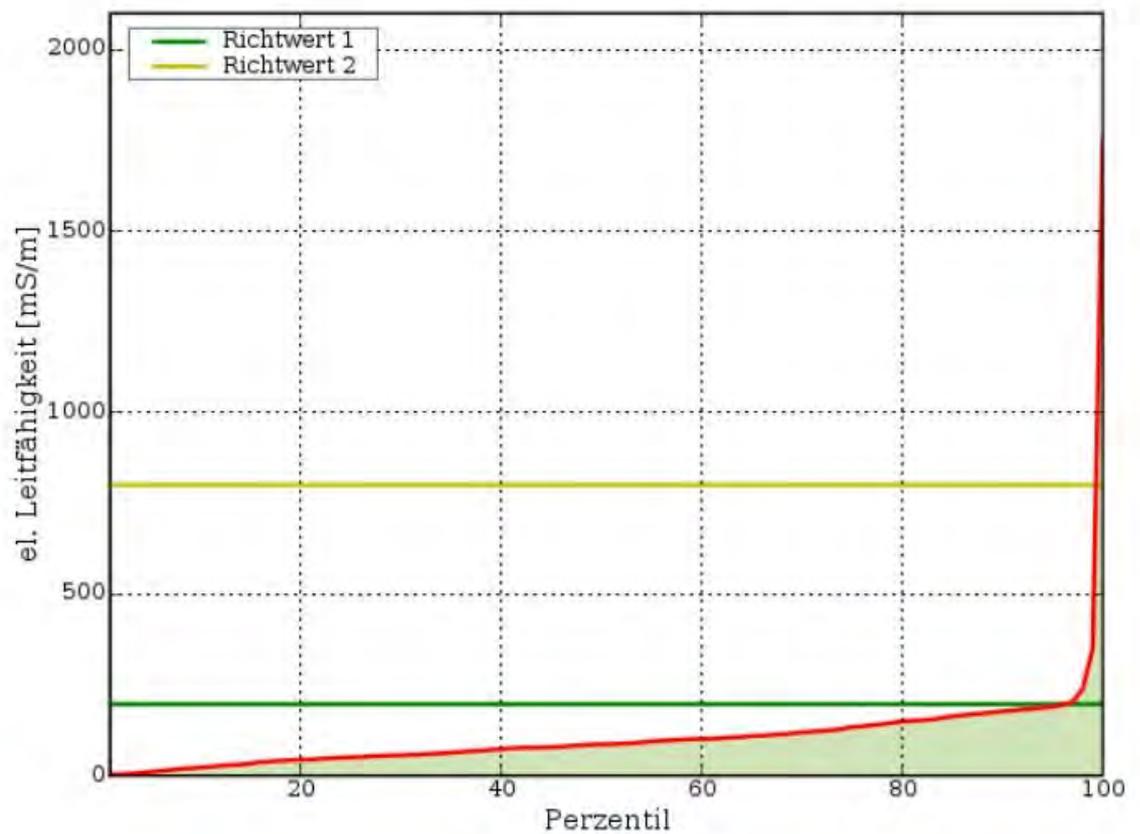
Anhang B: Auswertung der Untersuchungen von RC-Körnungen

2. Ergebnisse elektrische Leitfähigkeit

Auswertung der Messungen von el. Leitfähigkeit

Die Anzahl der Werte n beträgt 1077.

Median	Perzentil 90	Perzentil 98
87.0 [mS/m]	180.0 [mS/m]	350.0 [mS/m]



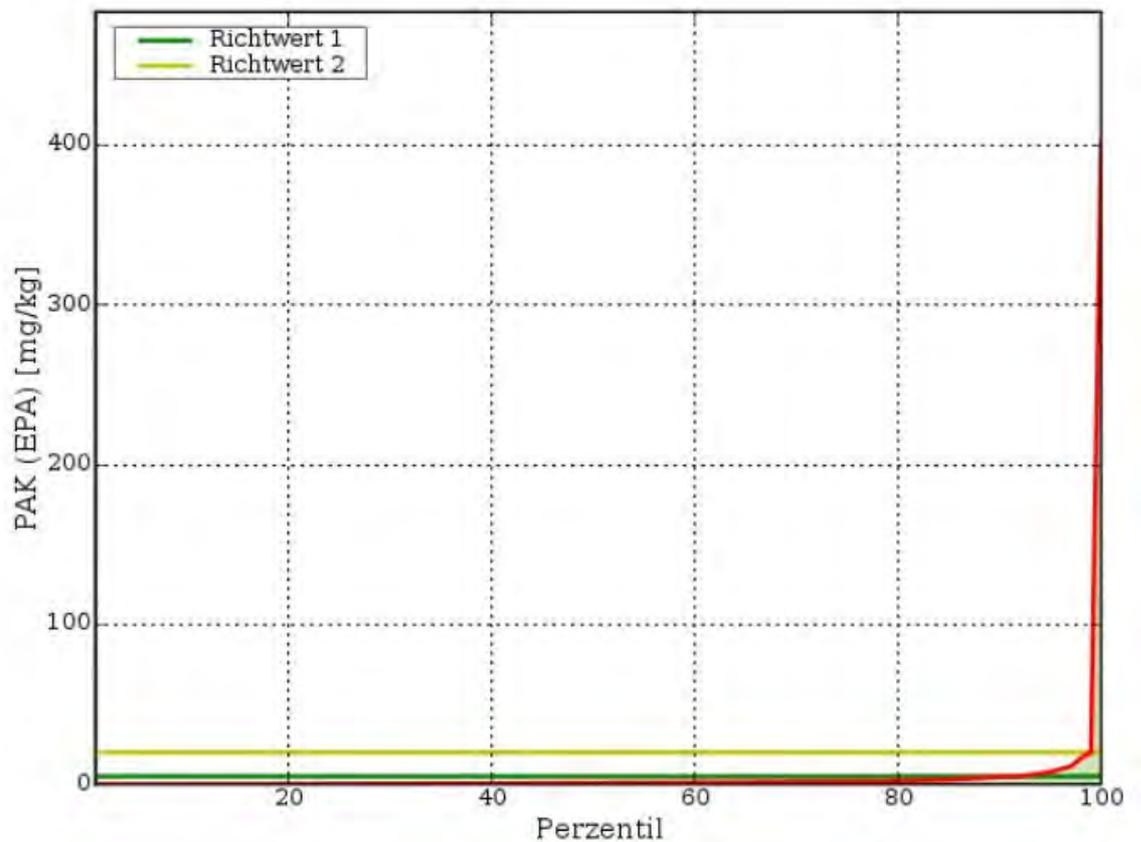
Anhang B: Auswertung der Untersuchungen von RC-Körnungen

3. Ergebnisse: PAK (nach EPA)

Auswertung der Messungen von PAK (EPA)

Die Anzahl der Werte n beträgt 1070.

Median	Perzentil 90	Perzentil 98
1.0 [mg/kg]	4.79 [mg/kg]	20.0 [mg/kg]



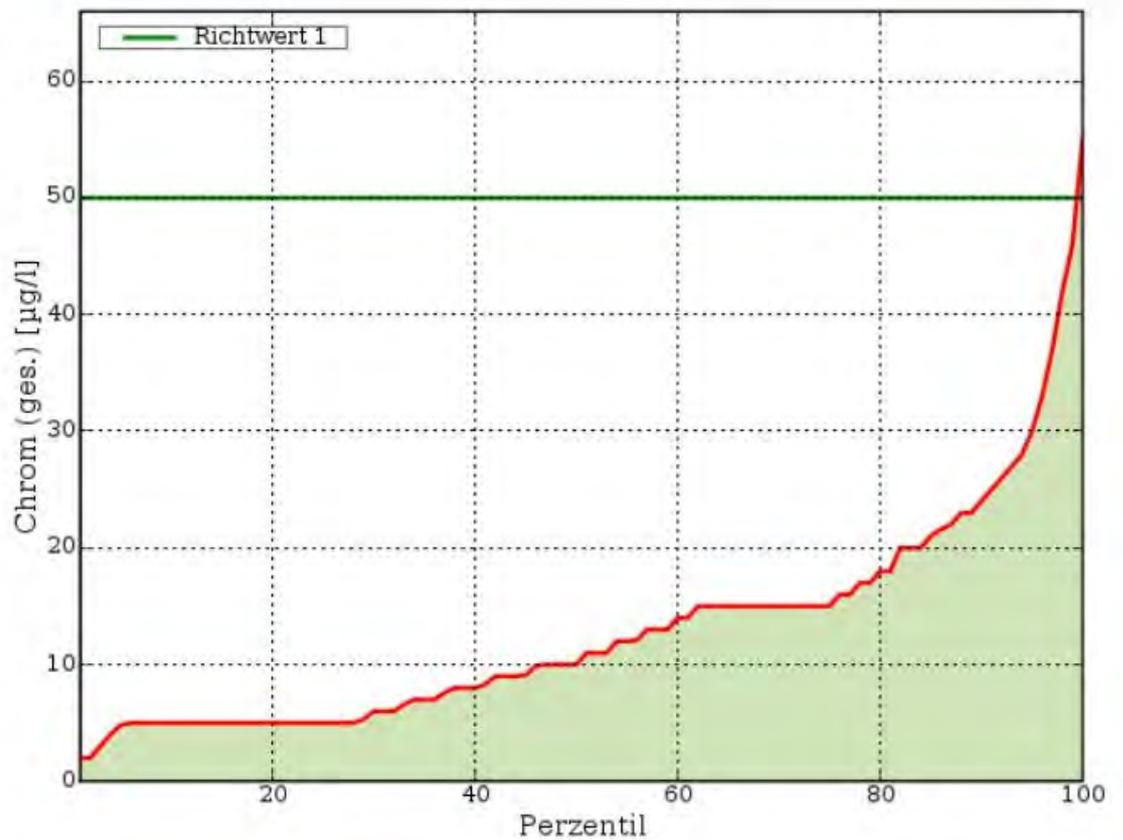
Anhang B: Auswertung der Untersuchungen von RC-Körnungen

4. Ergebnisse: Chrom (ges.)

Auswertung der Messungen von Chrom (ges.)

Die Anzahl der Werte n beträgt 1077.

Median	Perzentil 90	Perzentil 98
11.0 [$\mu\text{g/l}$]	25.0 [$\mu\text{g/l}$]	46.0 [$\mu\text{g/l}$]



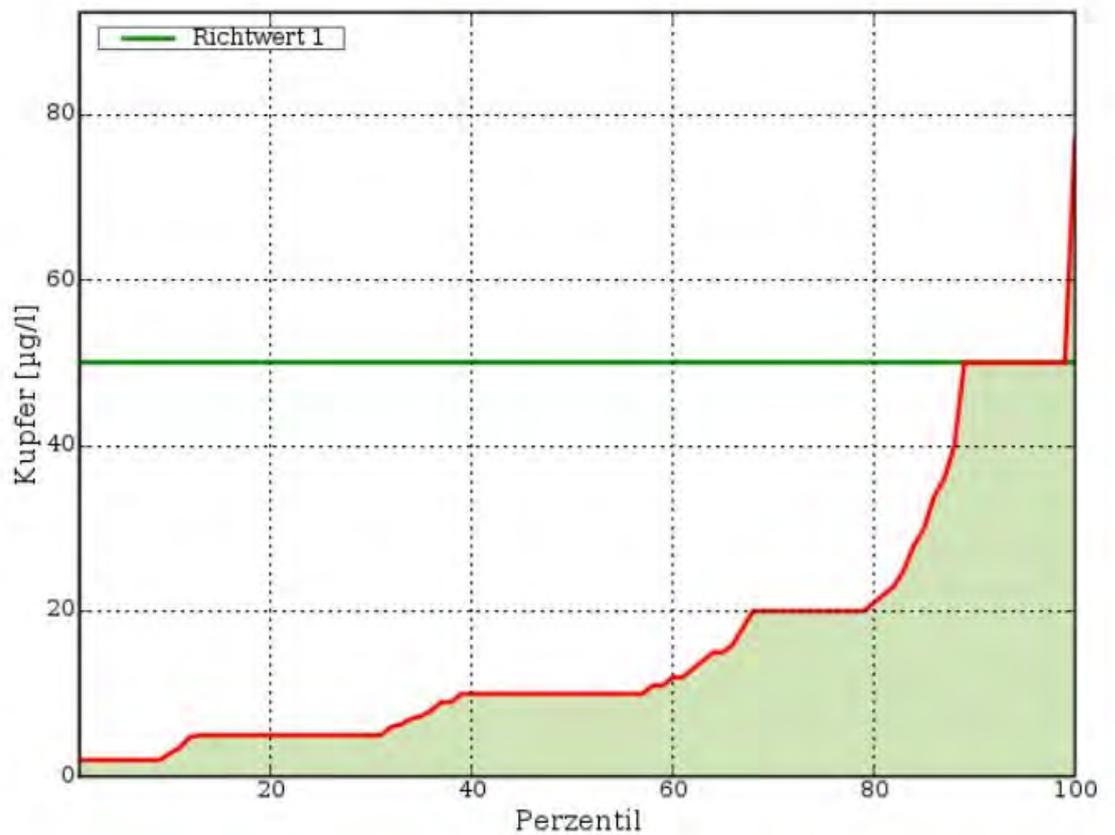
Anhang B: Auswertung der Untersuchungen von RC-Körnungen

5. Ergebnisse: Kupfer

Auswertung der Messungen von Kupfer

Die Anzahl der Werte n beträgt 1077.

Median	Perzentil 90	Perzentil 98
10.0 [µg/l]	50.0 [µg/l]	50.0 [µg/l]



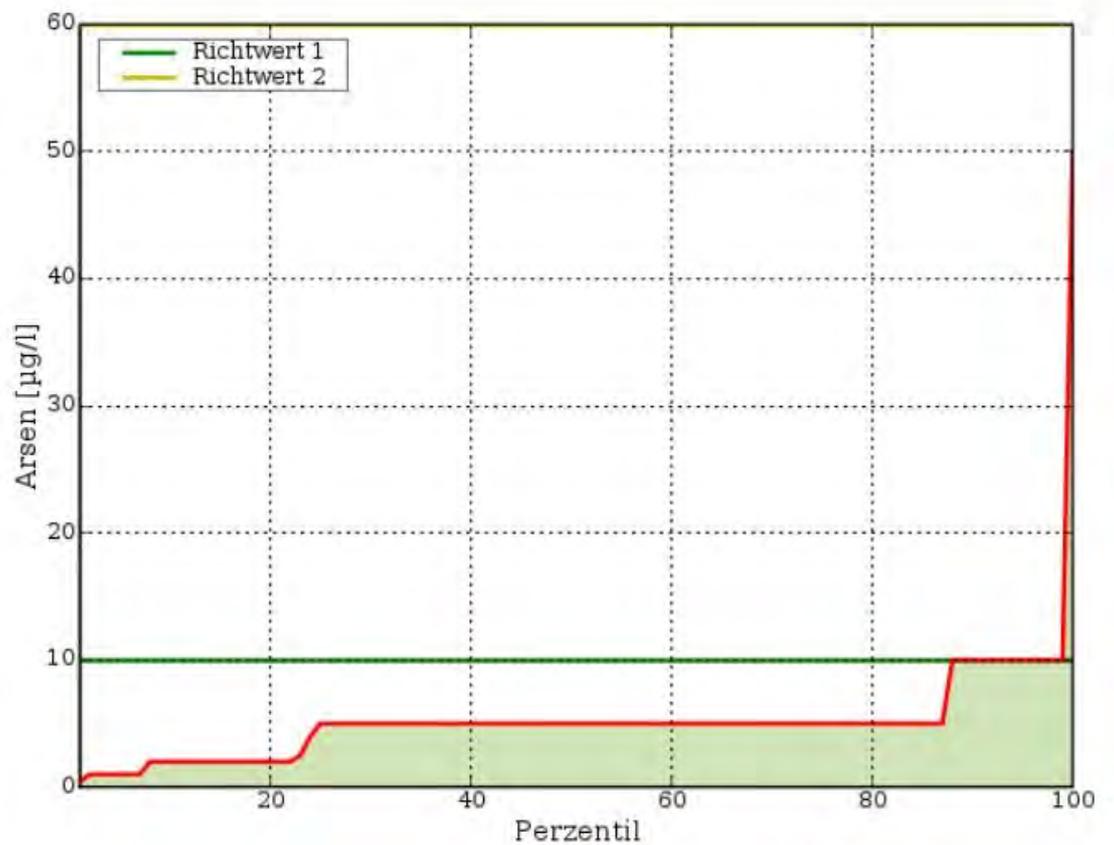
Anhang B: Auswertung der Untersuchungen von RC-Körnungen

6. Ergebnisse: Arsen

Auswertung der Messungen von Arsen

Die Anzahl der Werte n beträgt 1077.

Median	Perzentil 90	Perzentil 98
5.0 [µg/l]	10.0 [µg/l]	10.0 [µg/l]



Anhang C: Fragebogen für Abbruchunternehmen

Fragebogen zur Erfassung der Aktivitäten von Abbruch- und Rückbauunternehmen in Deutschland

Alle Daten werden vertraulich behandelt und anonymisiert zusammengefasst. Bitte kreuzen Sie die für Ihr Unternehmen zutreffenden Angaben an.

Größe des Betriebs nach Mitarbeiteranzahl:

1 - 10

11 - 50

> 50

Eingesetzte Abbruchverfahren und –geräte beim Abbruch/Rückbau von Hochbauten (Häufigkeit innerhalb eines Bauvorhabens):

ungefähre Häufigkeit (%)

Schneiden mit Zangen / Scheren oder Abgreifen

Nutzung von Abbruchhämmern

Einschlagen, Eindrücken, Einreißen

Handabbruch und Kleingeräte

Sägen, Fräsen

Sprengen

Sonstige (welche?): _____

Organisation des Abbruchs/Rückbaus (Häufigkeit bezogen auf die Anzahl der Bauvorhaben):

ungefähre Häufigkeit (%)

Separater Rückbau von Wertstoffen (z.B. Eisen, Kupfer)

Separater Rückbau schadstoffbelasteter Bereiche

Separater Rückbau AKR-verdächtiger Bereiche

Separater Rückbau gipshaltiger Bereiche

Nur nachträgliche Separierung / Weiterbehandlung

Betreibt Ihr Unternehmen auch Bauschuttzubereitungsanlagen?

Stationär Durchsatz: von bis m³/h

Mobil Durchsatz: von bis m³/h

Haben Sie Rückfragen zum Projekt bzw. zu den Fragestellungen? Haben Sie Anregungen zur Bearbeitung dieser Thematik? Möchten Sie für detailliertere Rückfragen einen Ansprechpartner nennen?

Für telefonische Rückmeldungen oder per E-Mail stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung:

BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung

Fachgruppe IV.3 Abfallbehandlung und Altlastensanierung

Frau Dr.-Ing. Karin Weimann Tel.: 030 / 6392 5958

karin.weimann@bam.de

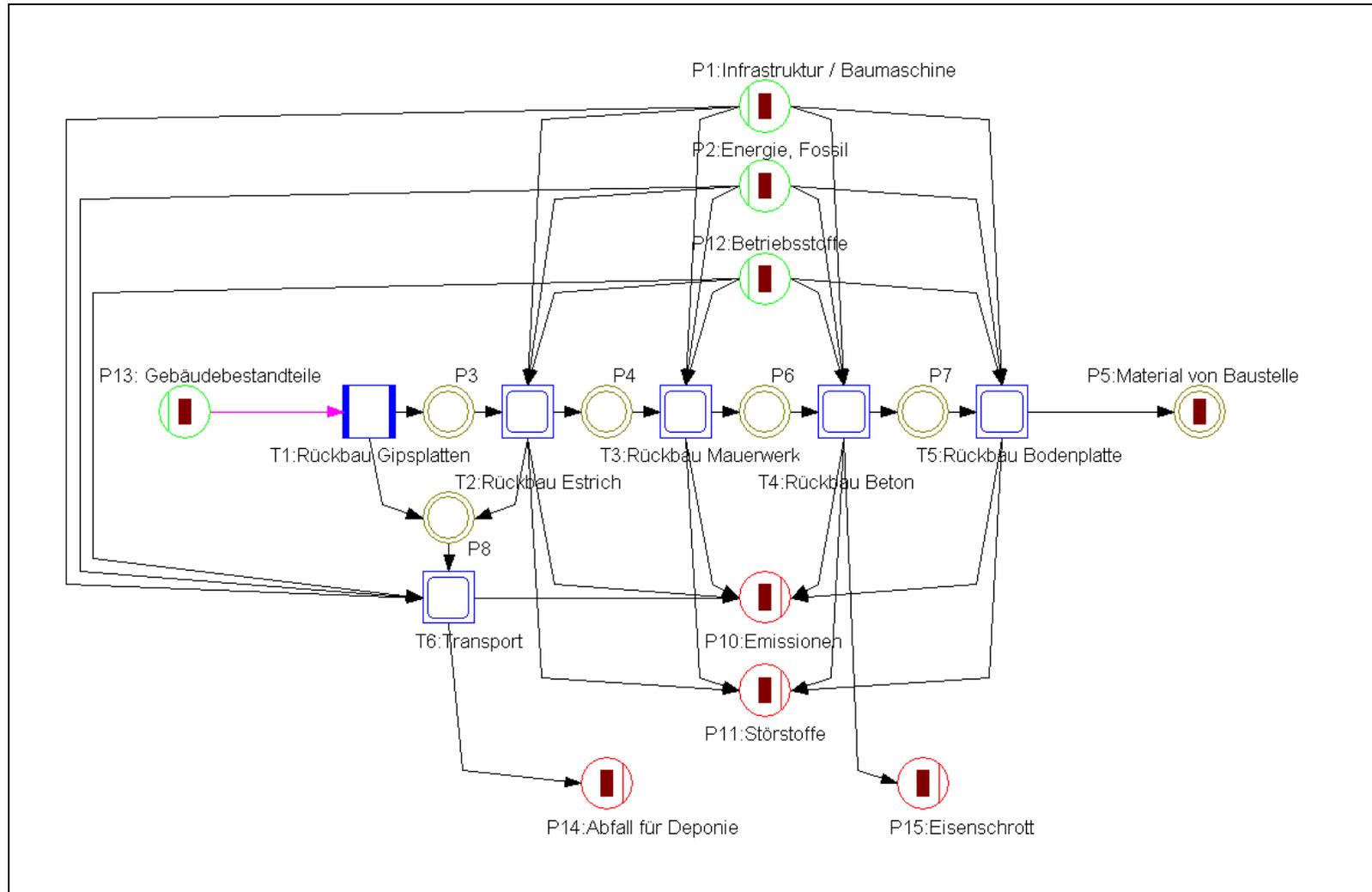
oder

Herr Dipl.-Ing. Jan Matyschik Tel.: 030 / 6392 5988

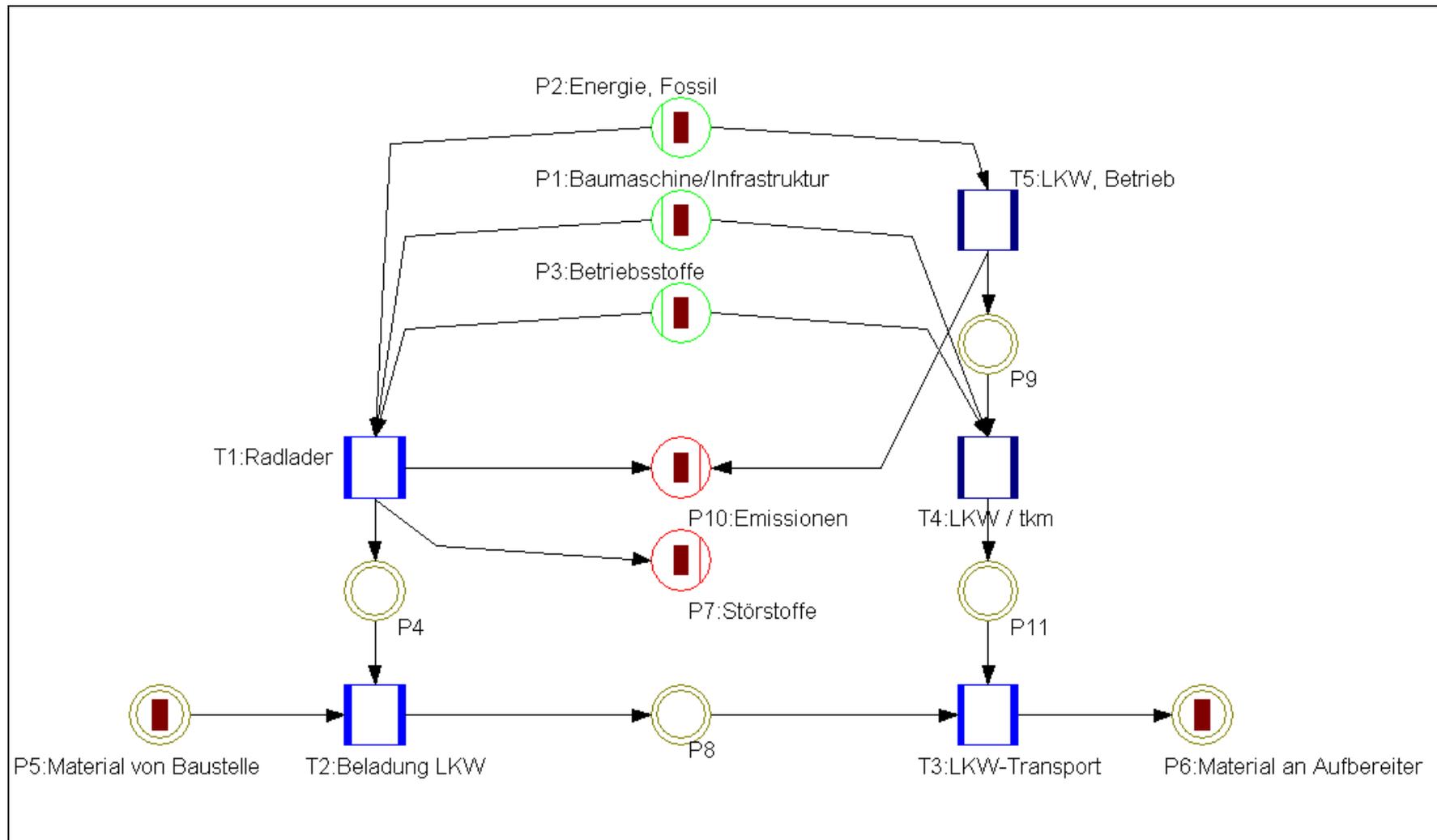
jan.matyschik@bam.de

Anhang D: Stoffstromnetze

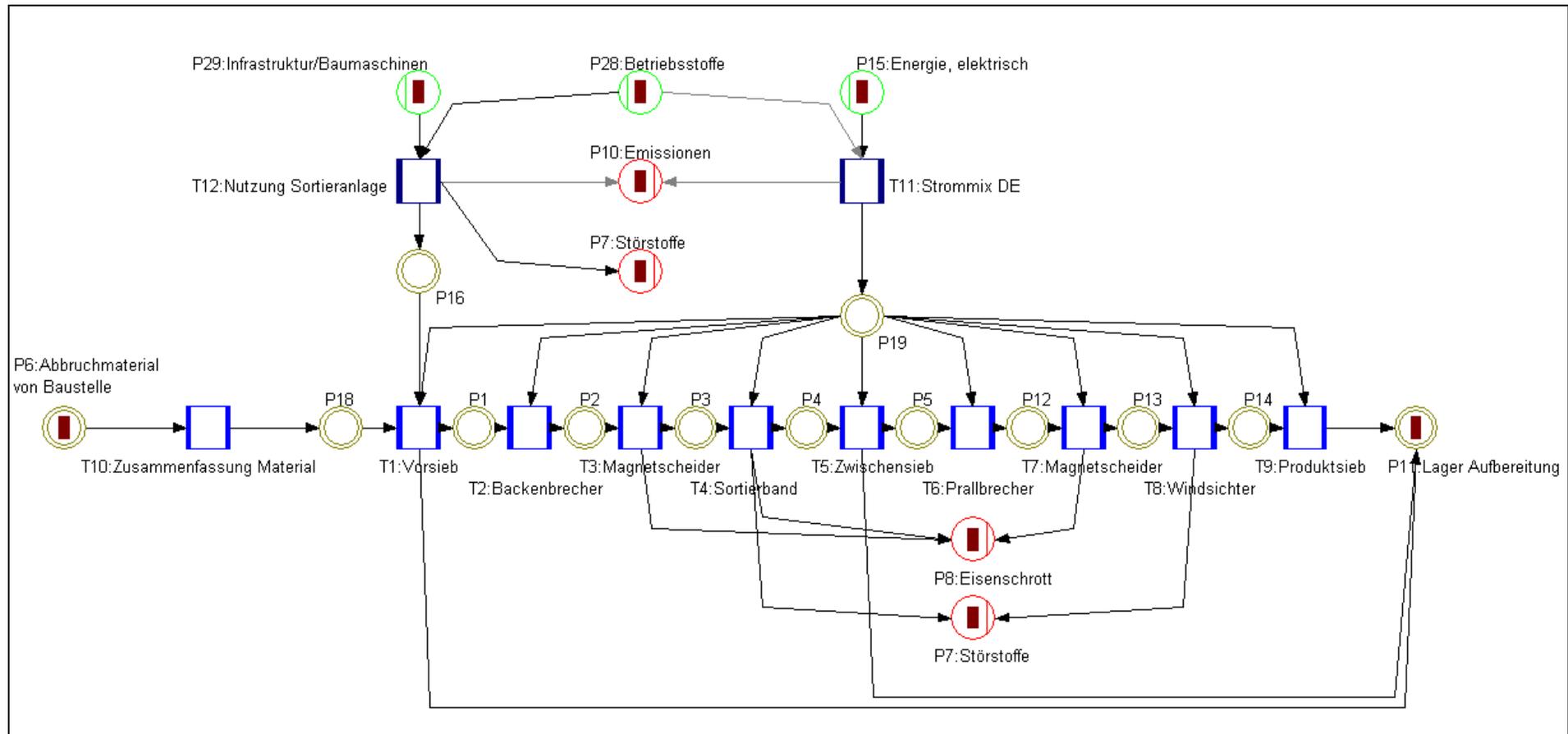
Modul T1: Subnetz Baustelle Abriss // Rückbau



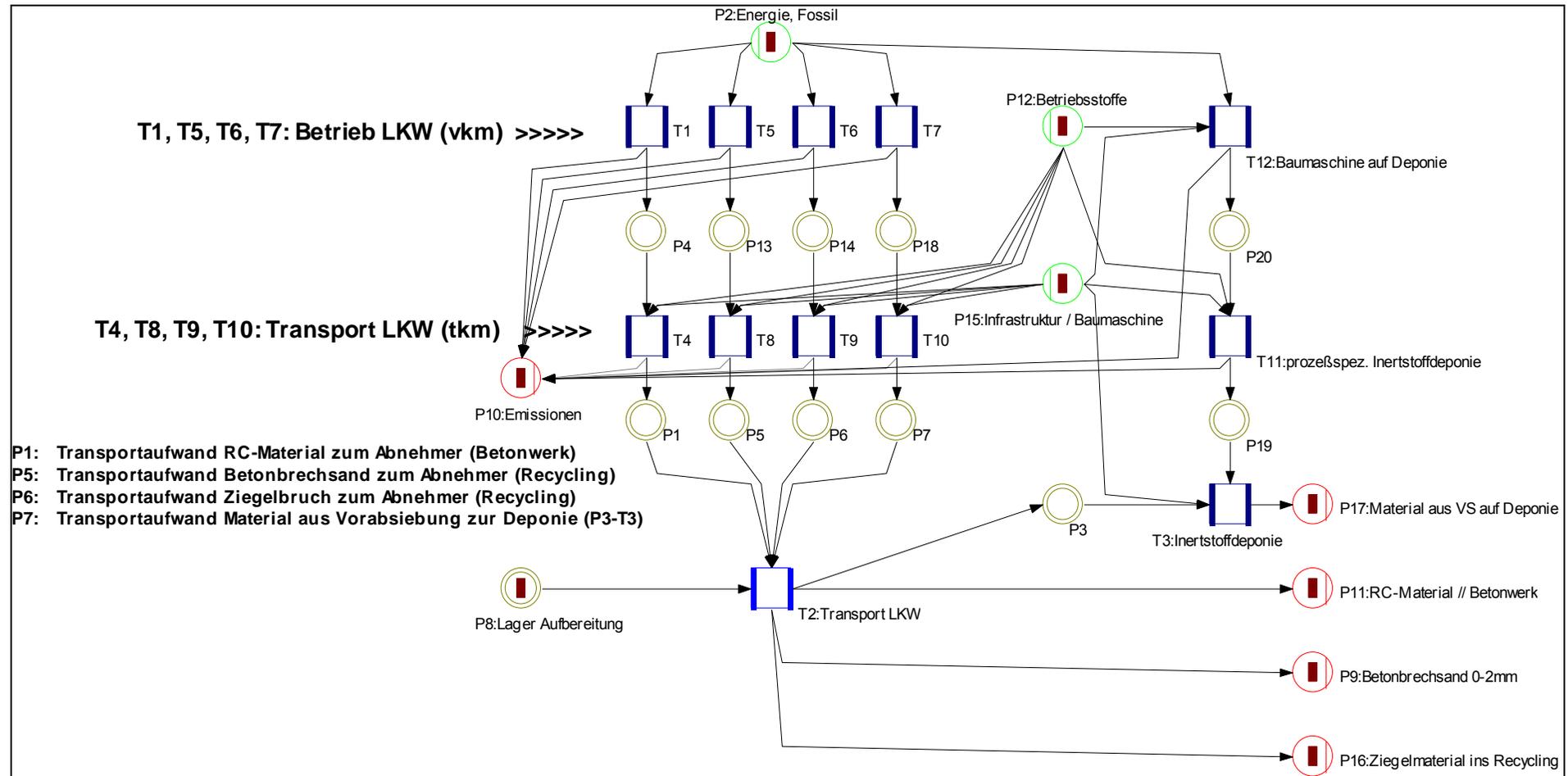
Modul T2: Subnetz Transportmodul



Modul T3: Subnetz Bauschutttaufbereitung



Modul T4: Subnetz Transport zum Abnehmer



Anhang E: Detaillierte Grundlagen der Szenarienmodellierung

Szenario 1: Ein- oder kleines Mehrfamilienhaus mit selektivem Rückbau (EFH)

Vorlagen der Modellierung:

Massivbau ab 1949 nach Lippok/Korth [66], Musterhaus 3, nach 1945 nach Görg [42],
Verhältnis von Beton zu umbauter Raum von 0,07 bis 0,15 nach B.I.M. [150].

Bauweise:

Grundplatte und Deckenplatten aus leichtbewehrtem Beton, Holz nur im Dachstuhl,
Ziegeldach, gemauerte Wände, voll unterkellert.

Technische Daten:

Grundfläche $8\text{ m} \times 12\text{ m} = 96\text{ m}^2$,

Gesamte Betonfläche $\Rightarrow 4 \times 96\text{ m}^2 = 384\text{ m}^2$, davon $240\text{ m}^2 \Rightarrow 25,2\text{ t}$ Verbundestrich
im Wohnbereich,

Geschosshöhe ist $2,70\text{ m}$, Gebäude besteht aus Keller, Erdgeschoss, erstem
Obergeschoss und zweitem Obergeschoss, teilweise mit Dachschrägen (Faktor
 $0,75$).

Umbauter Raum (UR) $= 3,75 \times 2,7\text{ m} \times 96\text{ m}^2 = 972\text{ m}^3$

Gesamtabbruchmasse nach Lippok/Korth [66]: $0,372\text{ t/UR} \times 972\text{ m}^3 = 361,584\text{ t}$

37% Betonanteil nach Lippok/Korth [66] in Gesamtabbruchmasse $\Rightarrow 133,786\text{ t}$; dies
entspricht einem Verhältnis von Beton zu umbauter Raum von $0,137$ und bestätigt die
Vorgabe nach B.I.M,

Anteil Bewehrungsstahl ca 1% ,

55% Ziegelanteil nach in Gesamtabbruchmasse $\Rightarrow 198,8712\text{ t}$,

Eingesetzte Geräte (Abbruch/Rückbau):

Hydraulikbagger 20 Tonnen (Typ Liebherr 914, Verbrauch Diesel $21,28\text{ Liter/Std}$,
[151]) mit Anbauteilen (Zange, Stiel und Hammer)

Presslufthammer mit Kompressor (Typ Atlas Copco XAS 66) Verbrauch Diesel
 $6,4\text{ Liter/Std}$, nach Datenblatt.

Mauern und Innenwände aus Mauerwerk werden mit Abbruchstielen eingedrückt,
eingerissen bzw. abgegriffen, Leistung ca. $20\text{ m}^3/\text{h}$, [66].

Der Verbundestrich wird mit Presslufthammer händisch herausgestemmt, Leistung
ca. $30\text{ m}^2/\text{h}$, [66].

Die Betondecken werden separat mit Abbruchzangen zerteilt, Leistung ca. 30 m³/h, [66]. Dabei wird folgende Annahme getroffen: 2/3 des vorhandenen Bewehrungsstahl wird abgetrennt und separiert. 1/3 des Bewehrungsstahls geht mit den zerteilten Betonelementen in die Aufbereitungsanlage.

Die Bodenplatte aus Beton wird mit einem hydraulischen Abbruchhammer zerkleinert, Leistung ca. 30 m³/h, [66].

Seilbagger mit Abrissbirne werden nicht eingesetzt.

Eingesetzte Geräte (Transport mit Radlader auf Baustelle):

Radlader (Typ Liebherr L550): Motor 129 kW, Verbrauch Diesel 24,51 Liter/Std, [151].

Annahme: Der Radlader belädt den LKW mit einer Kapazität von => 240 t/h

Eingesetzte Geräte (Transport des Bauschutts von Baustelle zu Aufbereiter):

Für den Transport des Bauschutts zwischen Baustelle und Aufbereiter wird ein LKW eingesetzt und nach dem Modell „Transport, Lkw >32t, EURO4“ der Ecoinvent Datenbank [135] bilanziert. Der Verbrauch ist für beladene und unbeladene Transporte gemittelt und mit 30,64 Liter Diesel auf 100km angegeben. Die Ladekapazität des LKW wird mit 25 Tonnen abgeschätzt und das Modell „Transport, Lkw >32t, EURO4“ entsprechend angepasst.

Eingesetzte Geräte (stationäre Bauschutt aufbereitungsanlage):

Die bilanzierte stationäre Bauschutt aufbereitungsanlage mit einem Durchsatz von ca. 120 Tonnen pro Stunde besteht aus den in der Tabelle 29 gelisteten Komponenten mit den dazugehörigen Leistungsaufnahmen und wird mit elektrischem Strom betrieben.

Tabelle 29: Anlagekomponenten mit spez. Leistungsaufnahmen nach Datenblättern

Maschine	Beispiel/Bezeichnung/Kommentar	Leistungsaufnahme
Vorsieb	Typ Siebtechnik 14/37,5-1	15 kW
Backenbrecher	Nordberg C110	160 kW
Magnetscheider	Typ IFE MEQL 1401 S	10 kW
Sortierband	abgeschätzt	5 kW
Zwischensieb	Typ Siebtechnik 14/37,5-1	15 kW
Prallbrecher	Verbrauch wie Backenbrecher	160 kW
Magnetscheider	Typ IFE MEQL 1401 S	10 kW
Windsichter	abgeschätzt	20 kW
Produktsieb	Typ Siebtechnik 14/37,5-1	15 kW
Gesamte Leistungsaufnahme stationäre Bauschutt aufbereitungsanlage:		410 kW

Darüber hinaus wurden für den Betrieb der stationären Bauschuttzubereitungsanlage noch weitere notwendige Annahmen für die Bilanzierung getroffen.

Das eingesetzte Vorsieb trennt 10% des aufgegebenen Materials ab, welches dann deponiert wird. Die beiden Magnetscheider und das Sortierband entfernen zusammen das restliche, noch vorhandene Drittel an Bewehrungsstahl im Verhältnis:

60%	Entfernung durch 1. Magnetscheider,
10%	Entfernung durch Sortierband,
30%	Entfernung durch 2. Magnetscheider,

Das Sortierband entfernt zusätzlich zu einem Windsichter die Leichtfraktion und die leichten Störstoffe im Umfang von 0,1% (Sortierband) und 0,05% (Windsichter), die als Abfall der thermischen Verwertung zugeführt werden.

Das Zwischensieb und das Produktsieb trennen jeweils 10% des durchlaufenden Materials ab, was als Betonbrechsand durch den Abnehmer dem Recycling zugeführt wird.

Darüber hinaus noch vorhandene Förderbänder zwischen den Anlagekomponenten und Beleuchtungsanlagen sind den einzelnen Komponenten bereits pauschal zugeordnet.

Der Transport der jeweiligen aufbereiteten Materialien zum Abnehmer findet per LKW statt, der wie oben aufgezeigt bilanziert wird. Das Material aus der Vorabsiebung wird deponiert, der Betonbrechsand und das Ziegelmaterial werden beim Abnehmer im Recycling weiterverwendet und das gewonnene RC-Material Liefertyp 1 wird zum Betonwerk geliefert.

Szenario 2: Plattenbau Typ P2 mit selektivem Rückbau (PB)

Vorlagen der Modellierung:

Abfallmenge und Zusammensetzung eines 5-geschossigen P2-Standardgebäudes mit 30 Wohneinheiten, [31, 88]

Verhältnis von Beton zu umbauter Raum von 0,11 bis 0,18 nach B.I.M. [150].

Bauweise:

Grundplatte aus Beton, Wände und Deckenplatten aus insgesamt 1.084 leichtbewehrten Betonfertigelementen, voll unterkellert.

Technische Daten:

Grundfläche: 36 m x 12,76 m = 459,36 m²

Gesamthöhe ist 16,20 m, Gebäude besteht aus Keller und 5 Etagen

Umbauter Raum (UR): = 6.742 m³

Gesamtabbruchmasse: = 2.403 t

Betonanteil 84% [31, 88] in Gesamtabbruchmasse => 2029 t; dies entspricht einem Verhältnis von Beton zu umbauter Raum von 0,137 und bestätigt die Vorgabe nach B.I.M. [150]

Verhältnis Bewehrungsstahl zu Betonanteil: 1%;

Weitere Bestandteile [31, 88]:

Estrich/Anhydrit: = 77,040 t; dies entspricht 856 m² bei einer angenommenen Estrich-Stärke von 50mm, (Die Nenndicke von Calciumsulfatestrichen sollte laut DIN 18560-3 die Stärke von 50 mm nicht überschreiten)

Terrazzofliesen: = 92,620 t; da Terrazzo größtenteils aus Zement besteht, werden sie dem Betonanteil zugeschlagen

Durch die Addierung der Terrazzo-Fliesen ergibt sich ein Betonanteil von 88,3% in Gesamtabbruchmasse => 2121,6 t; dies entspricht einem Verhältnis von Beton zu umbauter Raum von 0,143 und bestätigt weiterhin die Vorgabe nach B.I.M. [150] Daraus ergibt sich ein spezifischer Betoneinsatz von 315 kg/m³ umbauter Raum.

Eingesetzte Geräte (Abbruch/Rückbau):

Hydraulikbagger 40 Tonnen mit Anbauteilen (Zange und Hammer) (Typ Liebherr 944, Verbrauch Diesel 36,1 Liter/Std, [151])

Die Betonfertigelemente werden mit Abbruchzangen zerteilt, Leistung ca. 30 m³/h, [66].

Die Angaben zu Presslufthammer mit Kompressor, vorhandener Bewehrungsstahl, der Bodenplatte und dem Seilbagger mit Abrissbirne gleichen denen in Szenario 1,

Eingesetzte Geräte (Transport mit Radlader auf Baustelle):

Der eingesetzte Radlader wird wie in Szenario 1 bilanziert.

Eingesetzte Geräte (Transport des Bauschutts von Baustelle zu Aufbereiter):

Der Transport des Bauschutts zwischen Baustelle und Aufbereiter wird wie in Szenario 1 bilanziert.

Eingesetzte Geräte (stationäre Bauschuttaufbereitungsanlage):

Die stationäre Bauschuttaufbereitungsanlage wird wie in Szenario 1 mit einem Durchsatz von ca. 120 Tonnen pro Stunde bilanziert.

Darüber hinaus für den Betrieb der stationären Bauschuttaufbereitungsanlage weiteren notwendigen Annahmen wurden wie in Szenario 1 getroffen.

Eingesetzte Geräte (Weitertransport des aufbereiteten Materials zum Abnehmer):

Der Transport der jeweiligen aufbereiteten Materialien zum Abnehmer findet per LKW statt, der wie in Szenario 1 aufgezeigt bilanziert wird. Das Material aus der Vorabsiebung wird deponiert, der Betonbrechsand wird beim Abnehmer im Recycling weiterverwendet und das gewonnene RC-Material Typ 1 zum Betonwerk geliefert.

Szenario 3: Gewerbegebäude / Industriebau mit selektivem Rückbau (IDB)

Vorlagen der Modellierung:

Materialbestand in Abhängigkeit von der Bauwerkskonstruktion [94]: Betonmassivbau
Verhältnis von Beton zu umbauter Raum von 0,11 bis 0,18 nach B.I.M. [150].

Bauweise:

Grundplatte, Wände, Säulen und Deckenplatten aus bewehrten Beton, nicht unterkellert.

Technische Daten:

Grundfläche: $50 \text{ m} \times 25 \text{ m} = 1250 \text{ m}^2$

Gesamthöhe ist 25m, Gebäude besteht 5 Etagen und ist nicht unterkellert

Umbauter Raum (UR): $= 31.250 \text{ m}^3$

Gesamtabbruchmasse: $= 13.408 \text{ t}$

Betoneinsatz von 369 kg/m^3 umbauter Raum nach Lippok/Korth

86% Betonanteil nach Lippok/Korth in Gesamtabbruchmasse $\Rightarrow 11531,25 \text{ t}$; dies entspricht einem Verhältnis von Beton zu umbauter Raum von 0,168 und bestätigt die Vorgabe nach B.I.M. [150].

Weitere Bestandteile:

Estrich/Anhydrit: $= 25\%$ der Gebäudefläche; dies entspricht $1562,5 \text{ m}^2$ bei einer angenommenen Estrich-Stärke von 50 mm (Die Nenndicke von Calciumsulfatestrichen sollte laut DIN 18560-3 die Stärke von 50 mm nicht überschreiten)

Verhältnis Bewehrungsstahl zu Betonanteil: $4,8\%$, entspricht 120 kg/m^3

Eingesetzte Geräte (Abbruch/Rückbau):

Bagger 1, 60 Tonnen: Seilbagger mit Abrissbirne, (Typ Liebherr R964, Verbrauch Diesel $60,8 \text{ Liter/Std}$, [151])

Bagger 2, 40 Tonnen: Hydraulikbagger mit Anbauteilen (Typ Liebherr R944, Verbrauch Diesel $36,1 \text{ Liter/Std}$, [151])

Estrichfräse zur Entfernung des Anhydritestriches (Typ CPU 12, Verbrauch Diesel 4,18 Liter/Std, [151])

Der Estrich wird von einer Estrichfräse abgetragen, Leistung bei Estrichstärke 50 mm ca. 15 m²/h, abgeschätzt.

Der bewehrte Beton wird zu 60% eingeschlagen (Bagger 1) mit Seilbagger und Abrissbirne, Leistung ca. 15 m³/h, und zu 40% abgegriffen mit Hydraulikbagger 2 und Zange, Leistung ca. 20 m³/h, [66].

Die Bodenplatte aus Beton wird mit einem hydraulischen Abbruchhammer zerkleinert, Leistung ca. 30 m³/h, [66].

Eingesetzte Geräte (Transport mit Radlader auf Baustelle):

Der eingesetzte Radlader wird wie in den Szenarien 1 und 2 bilanziert. Allerdings transportiert er abweichend von den bisherigen Szenarien das Abbruchmaterial nicht zum LKW, sondern zur mobilen Aufbereitungsanlage vor Ort. Bilanziell ergeben sich für den Radlader dadurch keine Veränderungen.

Eingesetzte Geräte (Transport des Bauschutts von Baustelle zu Aufbereiter):

Ein Transport des Bauschutts zwischen Baustelle und Aufbereiter per LKW findet nicht statt.

Eingesetzte Geräte (mobile Bauschutttaufbereitungsanlage):

Die mobile Bauschutttaufbereitungsanlage wird mit einem Durchsatz von ca. 60 Tonnen pro Stunde bilanziert.

Hersteller Nordberg, Verbrauch Diesel 50 Liter/Std, abgeschätzt.

Darüber hinaus wurden für den Betrieb der mobilen Bauschutttaufbereitungsanlage noch weitere notwendige Annahmen für die Bilanzierung getroffen.

Der An- und Abtransport per Schwerlast-LKW der mobilen Anlage wird nicht bilanziert.

Das eingesetzte Vorsieb wird gleich dem Vorsieb der stationären Anlage in den Szenarien 1 und 2 bilanziert. Es trennt ebenfalls 10% des aufgegebenen Materials ab, welches dann deponiert wird. Der Magnetscheider und das Sortierband entfernen zusammen das restliche, noch vorhandene Drittel an Bewehrungsstahl.

Das Produktsieb trennt 25% des durchlaufenden Materials ab, was als Betonbrechsand durch den Abnehmer dem Recycling zugeführt wird.

Eingesetzte Geräte (Weitertransport des aufbereiteten Materials zum Abnehmer):

Der Transport der jeweiligen aufbereiteten Materialien von der Baustelle zum Abnehmer findet per LKW statt, der wie in Szenario 1 aufgezeigt, bilanziert wird. Das Material aus der Vorabsiebung wird deponiert, der Betonbrechsand wird beim

Abnehmer im Recycling weiterverwendet und das gewonnene RC-Material Liefertyp 1 zum Betonwerk geliefert.

Anhang F: Einzelergebnisse der Szenarien

Tabelle 30: Zusammensetzung der Wirkungskategorie Klimawandel (GWP 100a)

Wirkungskategorie Klimawandel (GWP 100a)	Szenario 1 (EFH)	Szenario 2 (PB)	Szenario 3 (IDB)	Einheit
T1 Subnetz Abbruch	11,47	4,48	6,75	kg CO ₂ -Eq // FE
T2 Transport	15,63	6,28	0,53	kg CO ₂ -Eq // FE
T3 Bauschuttzubereitung	6,51	2,62	4,29	kg CO ₂ -Eq // FE
T4 Transport zum Abnehmer	12,56	5,05	5,74	kg CO ₂ -Eq // FE
Gesamtsumme	46,17	18,43	17,31	kg CO ₂ -Eq // FE

Tabelle 31: Anteil des Transports an den jeweiligen Wirkungskategorien der Szenarien

Wirkungskategorien	Einheit	Grundmodell	Transportanteil	Anteil in %
Szenario 1 (EFH), selektiver Rückbau				
Ressourcenverbrauch	kg Sb	0,35	0,20	57,12%
Landverbrauch	m ² a	1,55	0,40	26,00%
Klimawandel	kg CO ₂ eq.	46,17	27,40	59,35%
Stratosphärischer Ozonabbau	CFC-11 eq.	6,19E-06	3,98E-06	64,32%
Versauerungspotential	kg SO ₂ eq.	0,20	0,11	53,16%
Überdüngungspotential	kg NO _x eq.	0,34	0,17	51,53%
Szenario 2 (PB), selektiver Rückbau				
Ressourcenverbrauch	kg Sb	0,14	0,08	55,51%
Landverbrauch	m ² a	0,55	0,15	27,89%
Klimawandel	kg CO ₂ eq.	18,43	10,45	56,71%
Stratosphärischer Ozonabbau	CFC-11 eq.	2,40E-06	1,52E-06	63,37%
Versauerungspotential	kg SO ₂ eq.	0,08	0,04	49,40%
Überdüngungspotential	kg NO _x eq.	0,14	0,07	47,52%
Szenario 3 (IDB), selektiver Rückbau				
Ressourcenverbrauch	kg Sb	0,13	0,04	28,77%
Landverbrauch	m ² a	0,33	0,07	21,59%
Klimawandel	kg CO ₂ eq.	17,31	4,87	28,12%
Stratosphärischer Ozonabbau	CFC-11 eq.	2,28E-06	7,08E-07	31,06%
Versauerungspotential	kg SO ₂ eq.	0,11	0,02	17,15%
Überdüngungspotential	kg NO _x eq.	0,20	0,03	15,36%

Tabelle 32: Zunahme der Umweltwirkungen in %, nicht selektiver Rückbau, ohne Transporte

Wirkungskategorien	Einheit	selektiv	n. selektiv	Differenz in %
Szenario 1 (EFH), selektiver vs nicht selektiver Rückbau -- Differenz ohne Transport				
Ressourcenverbrauch	kg Sb	0,15	0,21	40,97%
Landverbrauch	m ² a	1,15	2,18	90,09%
Klimawandel	kg CO ₂ eq.	18,77	23,42	24,79%
Stratosphärischer Ozonabbau	kg CFC-11 eq.	2,21E-06	3,59E-06	62,50%
Versauerungspotential	kg SO ₂ eq.	0,10	0,12	25,33%
Überdüngungspotential	kg NO _x eq.	0,16	0,21	25,05%
Szenario 2 (PB), selektiver vs nicht selektiver Rückbau -- Differenz ohne Transport				
Ressourcenverbrauch	kg Sb	0,06	0,08	30,21%
Landverbrauch	m ² a	0,40	0,69	72,39%
Klimawandel	kg CO ₂ eq.	7,98	9,48	18,75%
Stratosphärischer Ozonabbau	kg CFC-11 eq.	8,79E-07	1,29E-06	46,35%
Versauerungspotential	kg SO ₂ eq.	0,04	0,05	19,37%
Überdüngungspotential	kg NO _x eq.	0,07	0,09	19,25%
Szenario 3 (IDB), selektiver vs nicht selektiver Rückbau -- Differenz ohne Transport				
Ressourcenverbrauch	kg Sb	0,09	0,12	37,83%
Landverbrauch	m ² a	0,26	0,75	188,99%
Klimawandel	kg CO ₂ eq.	12,44	15,24	22,51%
Stratosphärischer Ozonabbau	kg CFC-11 eq.	1,57E-06	2,31E-06	46,97%
Versauerungspotential	kg SO ₂ eq.	0,09	0,11	17,81%
Überdüngungspotential	kg NO _x eq.	0,17	0,20	16,99%

Tabelle 33: Sensitivitätsanalyse: Ergebnisse einfaches Brechen

Szenario 1 (EFH) selektiver Rückbau // ein Brecher

Wirkungskategorien	Teileinheit	Gesamt	FE / Tonne	Äquivalente
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	32,68	0,34	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	146,34	1,51	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	4244,02	43,81	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	5,93E-04	6,12E-06	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	19,40	0,200	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	32,55	0,336	kg NO _x eq.

Szenario 1 (EFH) nicht selektiver Rückbau // ein Brecher

Wirkungskategorien	Teileinheit	Gesamt	FE / Tonne	Äquivalente
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	44,51	0,46	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	258,18	2,66	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	5477,81	56,48	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	8,40E-04	8,67E-06	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	24,83	0,256	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	41,50	0,428	kg NO _x eq.

Szenario 2 (PB) selektiver Rückbau // ein Brecher

Wirkungskategorien	Teileinheit	Gesamt	FE / Tonne	Äquivalente
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	202,57	0,13	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	819,86	0,54	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	26771,32	17,48	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	3,63E-03	2,37E-06	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	125,96	0,082	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	212,86	0,139	kg NO _x eq.

Szenario 2 (PB) nicht selektiver Rückbau // ein Brecher

Wirkungskategorien	Teileinheit	Gesamt	FE / Tonne	Äquivalente
Ressourcenverbrauch	Erschöpfung abiot. Ressourcen	256,05	0,17	kg Sb
Landverbrauch	Landverbrauch, Inanspruchnahme	1313,24	0,85	m ² a
Klimawandel	GWP 100a	32410,36	21,08	kg CO ₂ eq.
Stratosphärischer Ozonabbau	ODP 20a	4,74E-03	3,08E-06	kg CFC-11 eq.
Versauerungspotential	Europäischer Durchschnitt	151,88	0,099	kg SO ₂ eq.
Überdüngungspotential	Europäischer Durchschnitt	256,17	0,167	kg NO _x eq.

Anhang G: Betonrezepturen

Rezeptur Referenzbeton

Betonsorte:	Referenzbeton aus natürlicher Gesteinskörnung nach DIN 1045							
Wassermenge	0,60					Konsistenz:	F3	
Sieblinie n. DIN 1045:	B 16					Körnungsziffer (k-Wert):	3,66	
Sieblinie des Zuschlags:								
Sieblochweite in mm	0,25	0,5	1	2	4	8	16	k-Wert
Durchgang in Vol. -%	9,1	18,7	32,1	42,0	56,3	76,8	99,0	3,66
Berechnung der Betonzusammensetzung								
Stoffart	Stoffmenge		Dichte bzw. Rohdichte		Stoffraum		Sonstiges/Bemerkungen	
	kg/m ³		kg/dm ³		dm ³		---	
Zement	310		3,10		100,0		CEMI 32,5 R	
Wasser (gesamt)	185		1,00		185,0			
Wasser (wirksam)	---		---		---			
Luftgehalt	---		---		15,0			
Zusatzstoff	0		1,40		0,0			
Zusatzmittel	0		1,07		0,0			
Gesamt	495		---		300,0			
Zuschlag (gesamt)	1821		---		700,0	Vol. -%		
0 / 0,3	0		2,60		0,00	0,0		
0 / 0,5	328		2,60		126,00	18,0		
0,5 / 1,0	255		2,60		98,00	14,0		
1,0 / 2,0	182		2,60		70,00	10,0		
2,0 / 4,0	255		2,60		98,00	14,0		
4,0 / 8,0	382		2,60		147,00	21,0		
8,0 / 16,0	419		2,60		161,00	23,0		
2,0 / 16	0		2,35		0,00	0,0	RC-Gesteinskörnung	
	---		---		--	--		
Frischbeton	2316		---		1000		Wasseraufnahme RC	
	---		---		---		M.-%:	4
Mörtelanteil	---		---		---		kg:	

Rezeptur RC-Beton

Betonsorte:	RC-Beton mit 20% Schwergut nach DIN 1045								
Wassermenge	0,60					Konsistenz:	F3		
Sieblinie n. DIN 1045:	B 16			Körnungsziffer (k-Wert):			3,66		
Sieblinie des Zuschlags:									
Sieblochweite in mm	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	k-Wert
Durchgang in Vol. -%	9,3	18,4	31,8	42,9	56,3	76,0	99,0		3,66
Berechnung der Betonzusammensetzung									
Stoffart	Stoffmenge		Dichte bzw. Rohdichte		Stoffraum		Sonstiges/Bemerkungen		
	kg/m ³		kg/dm ³		dm ³		---		
Zement	310		3,10		100,0		CEMI 32,5 R		
Wasser (gesamt)	199,40		1,00		199,4				
Wasser (wirksam)	185		---		185,0		WA (10 min):4 %		
Luftgehalt	---		---		15,0				
Zusatzstoff	0		1,40		0,0				
Zusatzmittel	0		1,07		0,0				
Gesamt	495		---		300,0				
Zuschlag (gesamt)	1799		---		700,0	Vol. -%			
0 / 0,3	36		2,60		14,00	2,0			
0 / 0,5	309		2,60		119,00	17,0			
0,5 / 1,0	218		2,60		84,00	12,0			
1,0 / 2,0	164		2,60		63,00	9,0			
2,0 / 4,0	182		2,60		70,00	10,0			
4,0 / 8,0	239		2,63		91,00	13,0			
8,0 / 16,0	291		2,60		112,00	16,0			
2,0 / 16	360		2,45		147,00	21,0	RC-Gesteinskörnung		
	---		---		--	--			
Frischbeton	2308		---		1000		Wasseraufnahme		
Mehlkornanteil	---		---		---		M.-%:	4	
Mörtelanteil	---		---		---		kg:		