

---

Teile dieses Kapitels wurden auszugsweise vorveröffentlicht in: Hillebrandt/Riegler-Floors/Rosen/Seggewies, Atlas Recycling, Edition Detail, München 2018 und seitdem überarbeitet und ergänzt.

## 6. **Recherchen und Untersuchungen zur Entwicklung von Benchmarks für die Einordnung der ökonomischen Kriterien**

Dieses Kapitel stellt die empirische Erhebung von notwendigen Daten zur Entwicklung von Benchmarks für die im vorigen Kapitel definierten Parameter Arbeit und Wert vor, welche die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus abbilden.

Da sich der Selektionsgrad und der damit verbundene Aufwand in der Praxis nach dem Wert der Materialien richten, beginnt das Kapitel mit dem Parameter Wert.

Mittels Umfrage wurden zunächst die heute üblichen Abfall- bzw. Wertstofffraktionen recherchiert und Preise für deren Entsorgung bzw. Verwertung erhoben.

In Versuchsständen und auf Rückbaustellen wurde anschließend der Aufwand für den Rückbau verschiedener beispielhafter Konstruktionen und für die sortenreine Trennung der Materialien in die zuvor ermittelten Abfallfraktionen dokumentiert.

Weiterhin wurden Daten anderer Studien ausgewertet, die die eigenen Recherchen ergänzen.

Den Abschluss des Kapitels bildet ein tabellarischer Bauteilkatalog, in dem die analysierten Konstruktionen zusammengeführt werden und anhand dessen die Benchmarks für den Rückbauaufwand gebildet werden.

6.1.	Empirische Erhebung von Entsorgungskosten und -erlösen nach Wertstofffraktionen	110
6.2.	Untersuchungen zum Rückbauaufwand am Beispiel von Fassaden- und Dachbekleidungen in Versuchsständen	116
6.3.	Recherchen zum Rückbauaufwand auf Baustellen	133
6.4.	Auswertung von Daten anderer Wissenschaftler zum Rückbauaufwand	142
6.5.	Tabellarischer Bauteilkatalog	146

## 6.1. Empirische Erhebung von Entsorgungskosten und -erlösen nach Wertstofffraktionen

Als Grundlage zur Entwicklung von Benchmarks für den Parameter Wert wurde zunächst eine deutschlandweite Erhebung von Entsorgungskosten und -erlösen durchgeführt. Abb. A 6.2 zeigt eine kartographische Übersicht der Preisabfrage. In jeder der 14 Städte bzw. im jeweiligen Umkreis wurden mindestens vier Entsorgungsunternehmen angefragt, um eine gute Durchmischung zu erhalten.

Dabei stellte sich zunächst die Frage, für welche Materialien der Wert nach dem Rückbau erhoben werden muss. Dies ist zum einen für die gezielte Abfrage von Preisen relevant, zum anderen ergeben sich dadurch auch Hinweise für die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erforderliche Trennung von Bau- und Abbruchabfällen.

Zuerst wurden deshalb im Internet verfügbare Preislisten recherchiert. Dabei stellte sich heraus, dass eine Preisabfrage gegliedert nach den Wertstofffraktionen in § 8 der GewAbfV nicht ausreichend ist, da die Entsorger eine von der GewAbfV abweichende Differenzierung von Bau- und Abbruchabfällen, z.B. nach dem Grad der Verschmutzung, vornehmen.

### 6.1.1. Preisabfrage

Die Preiserhebung wurde zweimal durchgeführt. Die erste Erhebung erfolgte im Sommer 2016. Via Internetrecherche wurden 63 Unternehmen ausgewählt, die entweder per E-Mail angefragt wurden oder die eine Preisliste auf ihrer Webseite veröffentlicht hatten. Die Auswahl erfolgte nach Region und nach einem möglichst breiten Leistungsspektrum. An der ersten Umfrage nahmen 30 Firmen teil, die Rücklaufquote lag somit bei rund 48%.

Im ersten Quartal 2019 wurde eine zweite Umfrage durchgeführt, um die Daten zu aktualisieren, aber auch um mögliche Änderungen nach Novellierung der GewAbfV aufzugreifen. So wurde diese Umfrage etwas differenzierter durchgeführt: Ziegel, Fliesen und Keramik wurden nicht mehr als Gemisch abgefragt, sondern nach neuer GewAbfV getrennt. Auch Dämmstoffe, Boden und biologische Faserstoffe wurden differenzierter abgefragt, basierend auf aktuellen Entwicklungen (HBCD- Problematik bei Styropor) und fortgeschrittenen Erkenntnissen im Laufe der Promotion.

Abb. A 6.3 zeigt die tabellarische Preisabfrage, die an die Entsorger per E-Mail versandt wurde. In beiden Umfragen wurden möglichst die gleichen Firmen angeschrieben, um Preisänderungen abbilden zu können. Da jedoch in der ersten Umfrage aus mehreren Städten nur vereinzelt Rückmeldungen kamen, wurden in diesen Gebieten weitere Unternehmen angefragt. An der zweiten Umfrage haben 36 von 70 angefragten Firmen teilgenommen. Die Rücklaufquote betrug somit 51,4%.

Um den Unternehmen die Teilnahme zu erleichtern, wurde die Einheit offen gehalten. Die meisten Preisangaben erfolgten nach Massen (Euro pro Tonne). Angaben nach Volumen (Euro pro Kubikmeter) wurden von der Verfasserin dieser Arbeit anhand baustoffspezifischer Schüttdichten umgerechnet, wobei auf verschiedene Quellen zurückgegriffen wurde [154]. Preisangaben in netto wurden in Bruttopreise umgerechnet.



A 6.2

Abfallschlüssel	Bezeichnung	Eigenschaft	Preis in €/t.	alternativ: €/m <sup>3</sup>
170101	Beton	unbewehrt bewehrt Kantenlänge > 0,6m		
170102	Ziegel <sup>1</sup>			
170103	Fliesen/Keramik <sup>1</sup>			
170107	Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	sauber gering verschmutzt stark verschmutzt		
170201	Holz	A1 A2		
170202	Glas			
170203	Kunststoffe, gemischt EPDM <sup>1</sup> PVC <sup>1</sup>	energ. Verwertung  hart weich		
	Polyethylen <sup>1</sup>			
170302	Bitumengemische Asphalt <sup>1</sup>			
170401	Kupfer			
170402	Aluminium			
170404	Zink			
170405	Stahl, Scherenschrott Edelstahl			
170407	gemischte Metalle <sup>1</sup>			
170504	Boden/sortenreine Lehmbaustoffe <sup>1</sup> Sand <sup>1</sup> Dachkies <sup>1</sup>			
170604	Dämmstoff Mineralwolle <sup>1</sup> Dämmstoff Schaumglas <sup>1</sup> Dämmstoffe EPS/XPS <sup>1</sup>	energ. Verwertung stoffliche Verwertung		
170802	Gips- u. Gipskarton Porenbeton			
170904	Baumischabfall zur Deponierung			
bisher ohne Abfallschlüssel in Gruppe 17	biologische Faserstoffe, kompostierbar <sup>1</sup> Klinker, gebraucht Natursteinplatten, gebraucht <sup>1</sup>			

<sup>1</sup> noch keine differenzierte Preiserhebung in 2016

A 6.2 Übersicht der Preiserhebung in Deutschland  
A 6.3 Preisabfrage für Bau- und Abbruchabfälle an die Entsorger

### 6.1.2. Auswertung und Ergebnisse

Die Ergebnisse beider Umfragen sind in Abb. A 6.4 grafisch dargestellt. Eine ausführliche tabellarische Aufstellung der Erhebung von 2019 befindet sich in Anlage 1. Extremwerte („Ausreißer“) in einzelnen Wertstoffgruppen blieben bei der Ermittlung des jeweiligen Durchschnittspreises unberücksichtigt.

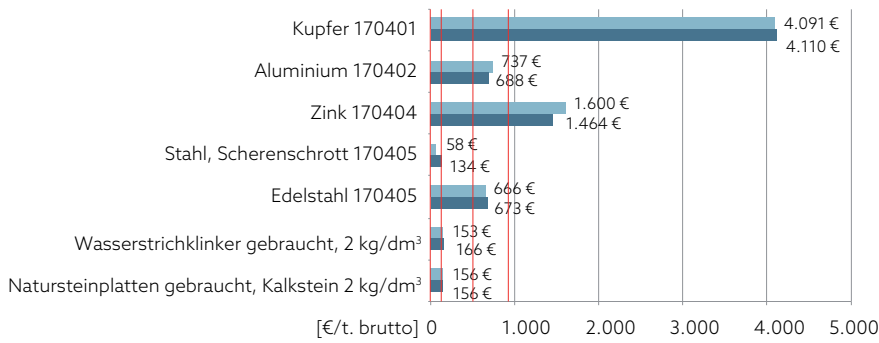
Bei der Auswertung stellte sich heraus, dass die meisten Entsorger nicht mit allen abgefragten Bau- und Abbruchabfällen handeln, sondern sich oftmals auf einzelne Gruppen, z. B. mineralische Abfälle und Böden oder Metalle (Schrott), spezialisieren. Insgesamt betrug die Quote von angegebenen Preisen zu abgefragten Preisen bei der ersten Umfrage im Durchschnitt 48%, bei der zweiten 40%. Die geringere Quote erklärt sich durch eine (zu) differenzierte Preisabfrage in der zweiten Umfrage. Bei einem Vergleich der Ergebnisse mit der Preisabfrage (Abb. A 6.3) zeigt sich, dass nicht für alle Materialien, die abgefragt wurden, Preise ermittelt werden konnten. Wurden bundesweit insgesamt weniger als fünf Preise ermittelt, wurde die Abfallart nicht einzeln ausgewiesen.<sup>44</sup> So werden Kunststoffe von den Entsorgern in der Regel nicht differenziert betrachtet, da Kunststoffe aus Bau- und Abbruchabfällen im Allgemeinen auf der Baustelle nicht nach Art der Kunststoffe getrennt werden. Dies hat zur Folge, dass sie in der Regel energetisch und nicht stofflich verwertet werden. Der Annahmepreis für verschiedene Kunststoffe ist deshalb derselbe.

Zur Abfallart „biologische Faserstoffe, kompostierbar“ ist anzumerken, dass diese von Verwertern für Bau- und Abbruchabfälle derzeit (noch) selten angenommen werden. Kommt es zur Umsetzung der von vielen Wissenschaftlern<sup>45</sup> geforderten Rohstoffwende, die den Übergang von einer überwiegend linearen zu einer zirkulären Wirtschaft markieren würde, könnte der Anteil kompostierbarer biologischer Faserstoffe steigen. Der Preis für diese Faserstoffe – derzeit ähnlich Holz A2 – würde dann vermutlich aufgrund höherer Durchsatzmengen fallen.

Bei einem Vergleich der Preise aus 2016 mit denen aus 2019 zeigt sich, dass die Entsorgungskosten bei den meisten Bau- und Abbruchabfällen gestiegen sind. Lediglich für Altbeton ist der Durchschnittspreis gesunken. Dies deutet an, dass Altbeton vermehrt getrennt entsorgt und verwertet wird, um daraus hochwertige Rezyklate zu gewinnen. Die Verknappung von Sand und Kies in Deutschland, die seit einiger Zeit in der Wirtschaft diskutiert wird (z. B. FAZ [156]), kann dazu beitragen, dass der Entsorgungspreis für Altbeton in den nächsten Jahren weiter fällt und sich das Material langfristig zu einem echten Wertstoff (mit positivem Marktwert bei der Übergabe vom Abbruchunternehmer zum Verwerter) entwickelt – zumindest solange weiterhin mit Beton gebaut wird und dafür Sand und Kies benötigt werden.

44 Eine Ausnahme bilden Metalle, die aufgrund geringer Rückmeldungen zusätzlich über [www.schrottpreis.org](http://www.schrottpreis.org) ermittelt wurden sowie wiederverwendbare Materialien, die aufgrund geringeren Angebots nur bei ausgewählten Händlern abgefragt wurden.  
45 Vgl. Öko-Institut: Rohstoffwende 2049, Jahrestagung 2016 [155].



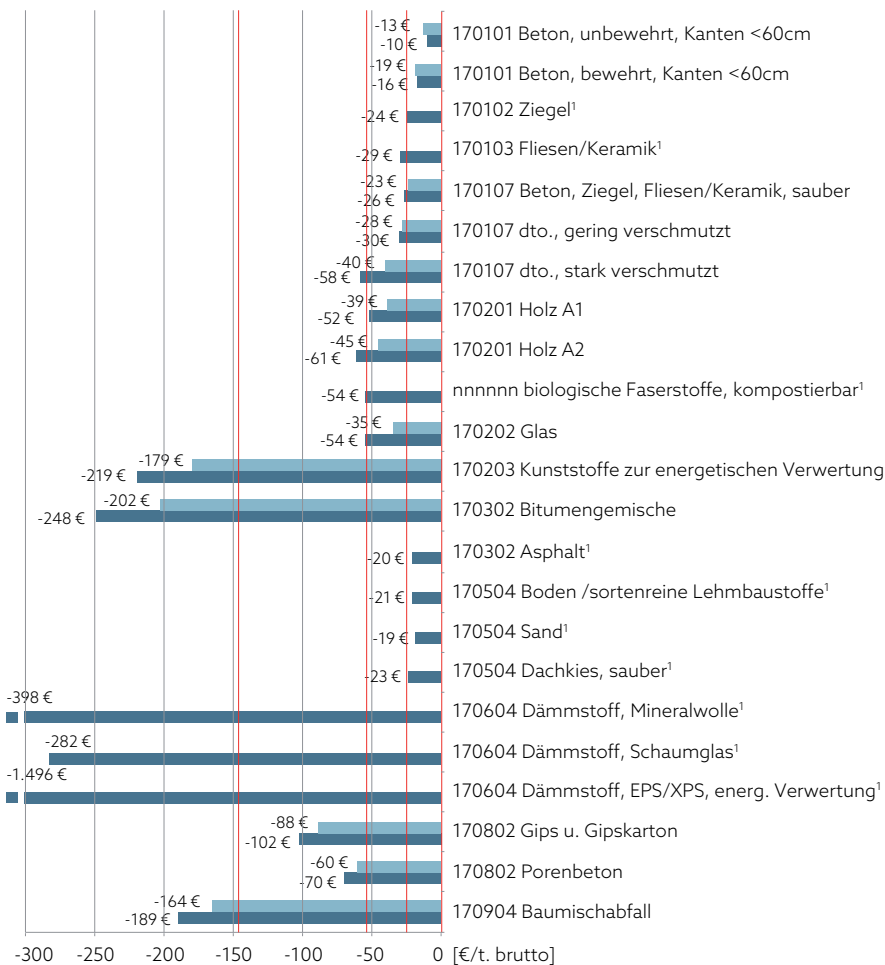


A 6.4 Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-) für Bau- und Abbruchabfälle, bundesweiter Durchschnitt

■ Preise 2016  
■ Preise 2019  
— Benchmarks für die Preise 2019

<sup>1</sup> noch keine differenzierte Preiserhebung in 2016

Hinweis:  
Die Preisübersicht wurde auszugsweise vorveröffentlicht im Atlas Recycling [157] und seitdem überarbeitet und ergänzt.  
Gegenüber der vorveröffentlichten Preisübersicht wurden in dieser Auswertung Extremwerte („Ausreißer“) herausgefiltert, so dass sich korrigierte Werte für das Jahr 2016 ggü. der Auswertung im Atlas Recycling ergeben.



### Marktwert wiederverwendbarer Materialien

Eine Besonderheit stellt die Preisabfrage für wiederverwendbare Materialien dar. In Deutschland existiert für gebrauchte Bauprodukte nur ein eingeschränkter Markt. Mangelnde Akzeptanz, bestehende rechtliche Regelungen, wonach z. B. Planer und bauausführende Unternehmen für gebrauchte Produkte mithafteten, sowie ein schneller technischer Fortschritt wirken sich hemmend aus. Begünstigt durch die Digitalisierung haben sich in den letzten Jahren im Internet vernetzte Händler<sup>46</sup> gegründet. Das Angebot ist jedoch stark schwankend.

**In dieser Arbeit wird nur für langlebige, nicht dem technischen Fortschritt unterworfenen Baustoffe ein Wiederverwendungspotenzial**

**Post-Use ausgewiesen.** Nach Recherche der Verfasserin existiert ein eta-

46 Zum Beispiel [www.bauteilboerse.de](http://www.bauteilboerse.de), [www.restado.de](http://www.restado.de)

---

blierter Markt z. B. für gebrauchte hochwertige Klinker und gebrauchte Natursteine. Diese Materialien haben einen positiven Wert, wenn sie heile und rückstandsfrei zurückgebaut werden. Die Annahmevergütungen für gebrauchte Klinker und Natursteine wurden bei ausgewählten Händlern<sup>47</sup> abgefragt und sind in Abb. A 6.4 ausgewiesen.

Wiederverwendbare Baustoffe, für die kein Markt existiert, sind jedoch nicht automatisch Abfall mit negativem Wert (weil der Besitzer sich ihrer entledigen will). Häufig werden solche Materialien kostenlos abgegeben.

**Im Folgenden wird deshalb für wiederverwendbare Baustoffe ohne Marktwert ein Nullwert am Ende der Nutzungsdauer angenommen. Ebenso wird ein Nullwert für Baustoffe mit Herstellerrücknahmesystem angenommen.**

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei eingeschränktem Markt bzw. Herstellerrücknahme ggf. erhöhte Transportkosten anfallen können. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die wiederverwendbaren Baustoffe ohne Marktwert und die Baustoffe mit Herstellerrücknahmeverfahren für den Empfänger mindestens einen so hohen Wert haben, dass sich die Transportkosten rentieren und so für den Besitzer der Wertstoffe weder Entsorgungskosten noch Verwertungserlöse anfallen.<sup>48</sup>

### 6.1.3. Benchmarks für den Faktor Wert

Wie kann der Faktor Wert nun konkret in die Bewertung der Kreislaufpotenziale einfließen? Wie lassen sich aus den Preisen Benchmarks ableiten?

In der Statistik bedient man sich bei der Erstellung von Skalen der Einteilung in Quantile. Das sind statistische Lagemaße, die die Anzahl der Werte (d. h. die Datenmenge) in gleich große Teile teilen. Besondere Quantile sind das Quartil (Viertel) und das Quintil (Fünftel).

Warum ist dies sinnvoll? Würde die Skala linear verlaufen, also zwischen dem geringsten und dem höchsten Preis in gleich große Preisabschnitte geteilt, hätte das den Nachteil, dass der höchste oder niedrigste Preis zu dominant sein könnte und deshalb viele Preise dieselbe Bewertung erhielten. Die Einteilung in Quantile (hier Quintile) bewirkt hingegen eine differenzierte Bewertung innerhalb des gesamten Spektrums.

Bei Unterteilung der Datenmenge der 2019 erhobenen Verwertungserlöse und Entsorgungskosten jeweils in Quartile ergibt sich eine Skala, die wie folgt bewertet werden kann:

---

47 Backsteinkontor Köln, Bose Antike Baustoffe Bremen, Natursteinpark Tübingen.

48 Siehe Beispiel in Kapitel 6.2.2, Seite 123.

	Preis	Bewertung
	880 €/t.	äußerst positiv
	420 €/t.	sehr hoch positiv
	150 €/t.	hoch positiv
<b>Erlöse</b>	0 €/t.	leicht positiv
<b>Kosten</b>	-23 €/t.	leicht negativ
	-54 €/t.	hoch negativ
	-146 €/t.	sehr hoch negativ
		äußerst negativ

Hinweis: Würden die Kosten und Erlöse jeweils in Quintile eingeteilt, würde sich eine mittlere Bandbreite ergeben (vgl. Seite 146). Die Erlöse und Kosten werden jeweils in Quartile eingeteilt, weil der Wert Null hier eher als Mitte gesehen wird bzw. betont werden soll.

Die Benchmarks sind in Abb. A 6.4 jeweils durch eine rote Linie dargestellt. In Kapitel 7.3.1 wird den bewerteten Benchmarks jeweils ein Faktor zugewiesen.

Zwischenzeitlich wurde überlegt, ob der Faktor Wert nicht aus dem Preis pro Tonne, sondern aus dem Preis pro rückzubauender Bauteilschicht abgeleitet werden muss. Dies wurde jedoch verworfen, da die Entsorgungskosten bzw. Verwertungserlöse für verschiedenste Konstruktionen bzw. Bauteilschichten ermittelt werden müssten, aus denen dann Benchmarks gebildet werden. Im Grunde bedarf es hierfür, ähnlich wie für Rückbaukosten, eines Abbruchkostenindex, der über die Inhalte dieser Arbeit hinausgeht (vgl. Kapitel 5.3, Seite 98).

Mit dem Preis pro Tonne liegt bereits eine vergleichende Grundlage für die Einordnung des Materialwerts vor. Für die Bildung von Faktoren zur Bewertung der Kreislaufpotenziale ist dies ausreichend. Zum einen werden Wertstoffe in der Regel gesammelt, so dass der Wert pro m<sup>2</sup> Fläche eine untergeordnete Rolle im Hinblick auf das Recycling spielt.

Entscheidend für das Recycling ist eher der Wert nach Reinheit des Materials, z.B. für sortenreines Altholz A1 statt für ein Gemisch mit Altholz A2 oder für sortenreinen, unverschmutzten Beton statt für mineralische Gemische. Die Masse hingegen spielt bei der Reinheit keine Rolle.

Um alternative Konstruktionen dennoch hinsichtlich der (derzeitigen) Entsorgungskosten und -erlöse vergleichen zu können, wird der Wert der verbauten Massen im Urban Mining Index zusätzlich ausgewiesen (siehe Auswertungen in Kapitel 8 und 9.2).

- A 6.5 wiederverwendbar: Wasserstrichklinker an massiver Außenwand, oben Kalkmörtel, unten Kalkzementmörtel (1)
- A 6.6 zurückgewonnene Ziegel: links mit Anhaftungen von Kalkmörtel-, rechts mit Kalk-Zementmörtel
- A 6.7 Dokumentation Rückbau und Wert: Wasserstrichklinker an massiver Außenwand (1)

Mitwirkende am Versuch:  
 Andreas Schubert, BZB Bildungszentrum des Baugewerbes, Krefeld; Deborah Hahn, Til Arlinghaus, Studierende der BUW



A 6.5



A 6.6

## 6.2. Untersuchungen zum Rückbauaufwand am Beispiel von Fassaden- und Dachbekleidungen in Versuchsständen

Um die Messbarkeit des Rückbauaufwands zu untersuchen, wurden in einer Versuchsreihe mit Studierenden der Bergischen Universität Wuppertal in Kooperation mit Ausbildungszentren und Herstellern beispielhaft verschiedene Fassaden- und Dachkonstruktionen erstellt und zurückgebaut. Im Hinblick auf die Demontage wurde bei der Konzipierung der Konstruktionen darauf geachtet, möglichst lösbare Materialverbindungen zu verwenden, die nach dem Rückbau eine hohe Sortenreinheit gewährleisten. Diese Untersuchungen werden im Folgenden anhand von neun beispielhaften Fassaden- und Dachkonstruktionen vorgestellt. In der Dokumentation werden zunächst die beim Rückbau gemessenen Daten und der Wert der Materialien festgehalten. Die Auswertung der Untersuchungen inkl. der Berechnung der Arbeit erfolgt in Kapitel 6.2.3.

### 6.2.1. Fassaden

Die Versuchsstände für Fassaden wurden in jeweils gleicher Kubatur und Größe bei verschiedenen Herstellern und Ausbildungsbetrieben erstellt. Eine Ausnahme bildet die Pfosten-Riegel-Fassade, für die ein Teststand des Herstellers zum Einsatz kam. Auch wenn die Fassaden auf die jeweilige Tragkonstruktion abgestimmt waren, stand stets die Fassadenbekleidung im Fokus der Untersuchung, nicht das tragende Bauteil.

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit*	Maschinenaufwand	Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert**
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine				
Dämmung	Glaswolle		5,52			n.r.	n.r.	Baumischabfall	-0,91
		Isoclip	0,03		0,00	n.r.	-	Kunststoff	-0,01
		Fassadenanker	0,10	0,6	-	n.r.	n.r.	Aluminium	0,07
U-Konstruktion	Edelstahlkonsolen	inkl. Schrauben	4,40			n.r.	-	Edelstahl	2,93
	Edelstahlanker		0,03		Akku-	0,05	n.r.	Edelstahl	0,20
	Edelstahlschienen		0,30	1,7	schräuber	n.r.	n.r.	Edelstahl	0,02
Vormauerschale	Wasserstrichklinker		230,0		Bohr-	ca. 5%	< 1%	Wiederverwendung	35,21
		Mörtel	31,25	48,3	hammer	0,16	n.r.	< 1%	miner. Bauschutt
			271,63	50,6		0,21			36,79

Legende :

n.r. = nicht relevant

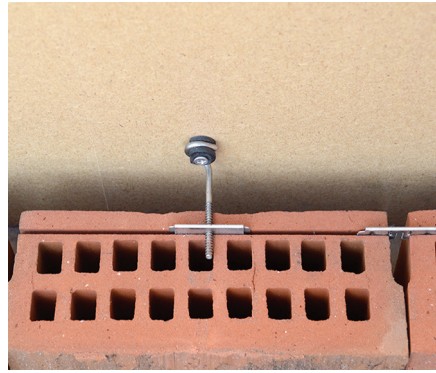
\* aus der Arbeitszeit und der Leistung der Personen gemäß Kapitel 5.3.1 wird erst in der Auswertung auf Seite 129 die Arbeit der Personen in MJ/m<sup>2</sup> berechnet. (s. Abb. A 6.36 und Tabelle in Abb. A 6.38)

\*\* Entsorgungskosten werden negativ, Verwertungserlöse werden positiv dargestellt

A 6.7



A 6.8



A 6.9

- A 6.8 trocken gestapelt: Ziegel an Dämmebene mit MDF-Ver Schalung (2)  
 A 6.9 leicht demontierbar: Ziegel mit Edelstahlankern befestigt  
 A 6.10 Dokumentation Rückbau und Wert: Ziegel an Dämmebene mit MDF-Ver Schalung (2)

Mitwirkende am Versuch:  
 Walter Bierens, Daas Baksteen Zeddam B.V.;  
 Dario Gräfe, Studierender der BUW

### Vormauerschale an massiver Außenwand

Das Material-Loop-Potenzial gebrannter Mauersteine ist nach Hillebrandt und Seggewies [159] begrenzt. Der Baustoff zeichnet sich jedoch besonders durch Langlebigkeit und modulare Bauweise aus. In zwei Versuchsständen wurde deshalb der Fokus auf die Wiederverwendbarkeit von Ziegelfassaden gelegt. Der erste Versuchsstand zeigt eine Vormauerschale aus Vollklinkern, die jeweils hälftig mit hochhydraulischem Kalkmörtel und mit Kalkzementmörtel vermauert ist (Abb. A 6.5 und A 6.38 Nr. 1). Im zweiten Versuchsstand wurden Ziegel im Trockenstapelsystem mit Edelstahlankern an einer Unterkonstruktion befestigt (Abb. A 6.8 und A 6.9 sowie A 6.38 Nr. 2).

Im Mittelpunkt der Untersuchung stand der Zeit- und Energieaufwand für die zerstörungsfreie Demontage. Während die Fassade im Trockenstapelsystem inklusive Dämmschale erwartungsgemäß schnell, mit einfachen Werkzeugen und ohne Zerstörung zurückgebaut werden konnte, überraschte die vermörtelte Vormauerschale: Obwohl der Kalkzementmörtel gegenüber dem hochhydraulischen Kalk einen festeren Verbund der Ziegel erwarten ließ, war es möglich, beide Ziegelverbünde – wenn auch mit hohem, aber nahezu gleichem Zeit- und Energieaufwand – unter Einsatz eines Hydraulikmeißels mit nur leichten Verlusten zu trennen, sodass in beiden Fällen Ziegel mit nur sehr geringfügigen Anhaftungen zurückgewonnen werden konnten (Abb. A 6.6). Der Grund hierfür ist in der Verwendung hochwertiger Wasserstrichklinker mit sehr geringer Wasseraufnahmekapazität zu sehen.

Die gemessenen Parameter sind in Abb. A 6.7 und A 6.10 dokumentiert.

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand	Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine				
U-Konstruktion	Holzlattung		6,58			-	< 1%	Holz A1	-0,30
	Holzfaserämmung	geklebt	1,62			ja	-	Holz A2	-0,07
		Edelstahlschrauben	0,02		Bohr-	n.r.	-	Edelstahl	0,01
		Langschaftdübel	0,01	4,0	maschine	0,09	ja	-	Kunststoff
Dämmung	Hanffasermatten		8,14	0,4	-	-	-	biologische Faser	-0,39
Beplankung	MDF-Platte		9,90			-	-	Holz A2	-0,44
		Holzschrauben	0,03	1,1	Akkuschr.	0,02	n.r.	-	Stahl, Scherenschr.
Luftschichtanker		Maueranker, Edelst.	0,10			n.r.	-	Edelstahl	0,07
		Holzschrauben	0,03			n.r.	-	Stahl, Scherenschr.	>0,00
		Kunststoffring	<0,00	1,1	Akkuschr.	0,02	-	-	Kunststoff
Vorsatzschale	Ziegel		142,06			-	-	Wiederverwendung	0,00*
		Edelstahlclips	0,05	7,1	-	-	n.r.	-	Edelstahl
			168,50	13,6		0,13			

\* kein Markt vorhanden (s. Punkt 6.1.2, Seite 114)

A 6.10



- A 6.11 reparaturfreundlich: VHF-Fassaden an massiver Außenwand (3-7)  
 A 6.12 Unterkonstruktion der VHF-Fassaden  
 A 6.13 Dokumentation Rückbau und Wert: VHF-Fassaden an massiver Außenwand (3-7)

Mitwirkende am Versuch:  
 Mirco Kurth, BWM Fassadensysteme GmbH;  
 Fan Ling, Georg Haizmann, Studierende der BUW



A 6.11



A 6.12

### *VHF-Fassaden an massiver Außenwand*

Vorgehängte, hinterlüftete Fassaden (VHF) lassen sich auf vielfältige Weise an der tragenden Wand befestigen. In einem Versuchsstand wurden zwei verschiedene Bekleidungsmaterialien mit unterschiedlichen Techniken auf einer Aluminium-Unterkonstruktion an einer massiven Wand befestigt (Abb. A 6.11 und A 6.38 Nr. 3–7).

- Faserzementplatten mit Agraffenhalterung
- Faserzementplatten sichtbar genietet
- Faserzementplatten verklebt
- Aluminiumblechkassetten geklemmt

Die Montagesysteme wurden auf zwei verschiedene Dämmstoffe abgestimmt: Während bei Mineralwolldämmmatten die Tragschienen mittels Blechwinkeln und Konsolen an der tragenden Wand befestigt waren, kamen bei Schaumglasplatten verdübelte Konsolen zum Einsatz. Durch eine Befestigung der Dämmstoffe mit Tellerdübeln bzw. Krallenplatten konnte auf eine Verklebung der Dämmstoffe an der tragenden Wand verzichtet werden. Im Fokus der Untersuchung stand der Aufwand für den Rückbau der Gesamtkonstruktion, also Bekleidung, Unterkonstruktion und Dämmung, wobei die Faserzementplatten aufgrund des eingeschränkten Recyclingpotenzials möglichst zerstörungsfrei demontiert werden sollten mit dem Ziel der Wiederverwendbarkeit.

Im Ergebnis waren die mit Agraffen befestigten Faserzementplatten in Kombination mit Mineralwolldämmung und Wandwinkeln am leichtesten und schnellsten zerstörungsfrei demontierbar. Die verklebten Platten hingegen ließen sich zwar unter Krafteinwirkung lösen, auf den Fügeanteilen verblieben jedoch schwer zu entfernende Rückstände des Polyurethanklebers.

Für die Demontage der auf einer Rasterklickschiene eingeklemmten Aluminiumblechkassetten war eine gewisse Übung in der Handhabung des Herstellerwerkzeugs erforderlich, wobei sich der gemessene Zeitaufwand bei großen Flächen relativiert.

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	Arbeitszeit [Min./m <sup>2</sup> ]	Maschinenaufwand Maschine	Zerstörung [MJ/m <sup>2</sup> ]	Rest- anhaftung	Wertstoff	Wert [€/m <sup>2</sup> ]	
<b>Faserzementplatten mit Agraffenhalterung</b>										
Dämmung	Schaumglasplatten	Krallenplatten	18,40	2,8	-	-	100%	miner. Bauschutt, s.	-0,43	
		Dübel	0,45				n.r.	Aluminium	0,30	
			0,00	1,2	-	-	n.r.	Kunststoff	<0,00	
U-Konstruktion	Alu-Konsole und -Festpunkt		0,28				n.r.	Aluminium	0,21	
		Edelstahlschrauben	0,34				n.r.	Aluminium	0,25	
		Dübel	0,03				n.r.	Edelstahl	0,02	
			0,07	4,2	Akkuschr.	0,11	n.r.	Kunststoff	-0,01	
	Alu-Tragprofile	Nieten, Aluminium		1,09		Bohr-	n.r.	-	Aluminium	1,54
				0,03	5,5	maschine	0,21	ja	Baumischabfall	<0,00
Agraffe	Agraffenfixierung		0,22				n.r.	Aluminium	0,16	
			0,01				n.r.	Edelstahl	0,01	
Bekleidung	Faserzementplatten		22,8	0,2	Akkuschr.	<0,00	nein	Wiederverwendung	0,00*	
			<b>44,70</b>	<b>13,8</b>		<b>0,32</b>			<b>2,04</b>	
<b>Faserzementplatten sichtbar genietet</b>										
Dämmung	Mineralwolle		7,36				n.r.	Baumischabfall	-1,21	
		Tellerdübel	0,05	0,7	-	-	n.r.	Kunststoff	-0,01	
U-Konstruktion	Edelstahlkonsole		0,18				n.r.	Edelstahl	0,12	
		Edelstahlschrauben	0,01				n.r.	Edelstahl	0,01	
		Dübel	0,03	2,0	Akkuschr.	0,03	n.r.	Kunststoff	-0,01	
	Fest- und Gleitpunktschwert		0,17					n.r.	Edelstahl	0,07
				0,17				n.r.	Aluminium	0,05
	Alu-Tragprofile	Kunststoffclip- und -Kupplung		0,01	1,4	-	-	ja	-	<0,00
			0,01	1,4	-	-	n.r.	Kunststoff	<0,00	
	Alu-Tragprofile		1,04		Bohr-		n.r.	Aluminium	0,77	
			0,01	1,6	maschine	0,06	ja	Baumischabfall	<0,00	
Bekleidung	Faserzementplatten		21,60	4,9	Bohrm.	0,11	nein	Wiederverwendung	0,00*	
			<b>30,50</b>	<b>10,6</b>		<b>0,20</b>			<b>-0,21</b>	
<b>Faserzementplatten verklebt</b>										
Dämmung	Mineralwolle		7,36				n.r.	Baumischabfall	-1,21	
		Tellerdübel	0,05	0,7	-	-	n.r.	Kunststoff	-0,01	
U-Konstruktion	Edelstahlkonsole		0,18				n.r.	Edelstahl	0,12	
		Edelstahlschrauben	0,01				n.r.	Edelstahl	0,01	
		Dübel	0,03	2,0	Akkuschr.	0,04	n.r.	Kunststoff	-0,01	
	Fest- und Gleitpunktschwert		0,17					n.r.	Edelstahl	0,07
				0,17				n.r.	Aluminium	0,05
	Alu-Tragprofile	Kunststoffclip- und -Kupplung		0,01	1,4	-	-	ja	-	<0,00
			0,01	1,4	-	-	n.r.	Kunststoff	<0,00	
	Alu-Tragprofile		1,04		Bohr-		n.r.	Aluminium	0,77	
			0,01	1,6	maschine	0,06	ja	Baumischabfall	<0,00	
Bekleidung	Faserzementplatten		21,60	2,8	-	-	nein	0,3%	miner. Bauschutt	-0,87
			<b>30,50</b>	<b>8,5</b>		<b>0,10</b>			<b>-1,08</b>	
<b>Aluminiumblechkassetten geklemmt</b>										
Dämmung	Schaumglas		18,40	2,8			100%	miner. Bauschutt	-0,43	
		Krallenplatten	0,45				n.r.	Edelstahl	0,30	
		Dübel	0,00	1,2	-	-	n.r.	Kunststoff	<0,00	
U-Konstruktion	Alu-Konsole und -Festpunkt		0,28				n.r.	Aluminium	0,21	
			0,34				n.r.	Aluminium	0,25	
		Edelstahlschrauben	0,03				n.r.	Edelstahl	0,02	
		0,07	4,2	Akkuschr.	0,11	n.r.	Kunststoff	-0,01		
	Rasterklickschiene	Nieten, Aluminium		1,46		Bohr-		n.r.	Aluminium	1,07
				0,01	2,8	maschine	0,10	ja	Baumischabfall	<0,00
Agraffe	Agraffenfixierung		0,22				n.r.	Aluminium	0,16	
			0,01	n.d.	Akkuschr.	<0,00	n.r.	Edelstahl	0,01	
Bekleidung	Alublechkassette		3,50	8,2			n.r.	Aluminium	2,58	
		Festpunktklemme	0,04				n.r.	Edelstahl	0,03	
		Kunststoffeinsätze	0,01	1,2	-	-	n.r.	Kunststoff	<0,00	
			<b>24,78</b>	<b>20,4</b>		<b>0,21</b>			<b>4,19</b>	

\* kein Markt vorhanden (s. Punkt 6.1.2, Seite 114)

A 6.13

- A 6.14 homogen: WDVS aus Mineralfaserplatten mit Leichtputz auf Porenbeton (8)
- A 6.15 WDVS: Glasgewebe mit Putzrückständen
- A 6.16 Dokumentation Rückbau und Wert: WDVS (8)

Mitwirkende am Versuch:  
 Jacob Kowol, Xella Deutschland GmbH;  
 Xenia Sagrebin, Nils Nengel, Studierende der BUW



A 6.14



A 6.15

### WDVS an Außenwand aus Porenbeton

Ein konventionelles Wärmedämmverbundsystem (WDVS) besteht aus einer Vielzahl untereinander verbundener Schichten inhomogener Materialien, die ein Recycling unmöglich machen. In einem Versuchsstand wurde deshalb eine hinsichtlich der Materialhomogenität optimierte Konstruktion getestet.

Bei dieser in Abb. A 6.14 und A 6.38 Nr. 8 dargestellten Konstruktion ist die tragende Außenwand aus Porenbeton mit einer Dämmplatte aus dem gleichen Grundmaterial, jedoch mit wesentlich größerem Porenanteil bekleidet. Der Mörtel für die Verklebung der Dämmplatten und der Außenputz bestehen ebenfalls aus dem gleichen Material. Einziger Fremdanteil ist ein Putzgewebe aus Glasfasern (Abb. A 6.15).

Im Ergebnis ließ sich die Putzschicht mit dem Gewebe durch Einschnitt und Abreißen leicht entfernen, wobei ein Teil des Putzes und das verunreinigte Gewebe verloren gingen. Tragende Wand und Dämmung konnten gemeinsam unter sehr geringem Zeit- und vergleichsweise niedrigem Energieaufwand maschinell abgebrochen und der Verwertung zugeführt werden.

Hinsichtlich der Kreislauffähigkeit ist zu berücksichtigen, dass ein Recycling sortenreiner Abbruchmaterialien zwar möglich, aber der Einsatz als Sekundärmaterial auf einen bestimmten Anteil in der Neuproduktion beschränkt ist (siehe „Material-Loop-Potenzial (MLP) – Post-Use“ auf Seite 94).

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand	Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine				
Dämmung	Mineralfaserplatte		11,50		Gabel-	n.r.	-	Porenbeton	-0,69
		miner. Leichtmörtel	3,85	0,06	stapler	0,06	n.r.	-	Porenbeton
Armierung	Glasfasergewebe		0,16			n.r.	100%	Baumischabfall	-0,03
		miner. Leichtmörtel	3,08			n.r.	-	Baumischabfall	-0,51
Putz	mineralischer Strukturputz				Winkel-	n.r.			
			2,00	0,55	schleifer	0,04	n.r.	-	Baumischabfall
				0,61					-1,79

n.r. = nicht relevant

A 6.16





A 6.17



A 6.18

A 6.17 Holzbekleidung auf Außenwand in Holzständerbauweise (9-10)

A 6.18 Holzständerwand mit OSB-Bekleidung

A 6.19 Dokumentation Rückbau und Wert:  
Holzbekleidung auf Außenwand in Holzständerbauweise (9-10)

Mitwirkende am Versuch:

Johannes Lang, Osmo Holz und Color GmbH & Co. KG;

Dario Gräfe, Studierender der BUW

### Holzbekleidung an Außenwand in Holzständerbauweise

Auch dem Aufbau dieses Versuchsstands ging die Konzipierung einer Konstruktion mit möglichst homogenen Materialien für den Rückbau voraus. So wurden größtenteils Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet, die in einer ein- oder mehrstufigen Kaskadennutzung im biotischen Kreislauf geführt werden können. Ein tragendes Holzständerwerk wurde mit unbehandelten Profilen aus Lärchenholz bekleidet, wobei die eine Hälfte aus verdeckt verschraubten Nut- und Feder-Profilen und die andere Hälfte aus sichtbar verschraubten Rhombusleisten bestand (Abb. A 6.17 und A 6.38 Nr. 9–10). Einzige Fremdanteile waren – abgesehen von den Bindemitteln in den Holzwerkstoffen – eine Winddichtungsbahn und ein Luftdichtungsband auf Kunststoffbasis sowie ein Eckschutzprofil aus Aluminium.

Der Rückbau erwies sich durch Lösen der vielen Verschraubungen als relativ zeitaufwendig. Jedoch konnten so die unbehandelten Hölzer (A1-Qualität nach Altholzverordnung, siehe Abb. A 3.5, Seite 45) von den Holzwerkstoffen sortenrein getrennt werden.

Damit ist eine stoffliche Verwertung der A1-Hölzer problemlos möglich, während die Holzwerkstoffe, die zum Teil Restanhaftungen aufwiesen (Klebeband auf OSB, s. Abb. A 6.18), eher einer energetischen Verwertung zugeführt werden.

Im realen Rückbaufall ist zu berücksichtigen, dass die Verschraubungen verwitterungsbedingt nur eingeschränkt lösbar sein können. Eine sortenreine Trennung ist dennoch relativ einfach mittels Sägen unter Zerstörung der Füge-teile möglich.

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand	Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert	
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine					[MJ/m <sup>2</sup> ]
Bekleidung	OSB-Platte		9,00		Akku-	-	0,11%	Holz A2	-0,40	
		Schrauben, verzinkt	0,03	2,6	schrauber	0,04	n.r.	-	Stahl, Scherenschr.	>0,00
		Fugendichtband	0,01	1,5	-	-	ja	>1%	Baumischabfall	<0,00
Holzständerwerk KVH			20,45		Bohr-	-	-	Holz A1	-0,79	
		Edelstahlschrauben	0,18	3,2	maschine	0,07	n.r.	-	Edelstahl	0,12
Dämmung	Holzweichfaser		9,89		Akku-	-	-	Holz A2	-0,45	
		Schrauben, verzinkt	0,03	2,4	schrauber	0,02	n.r.	-	Stahl, Scherenschr.	>0,00
Abdichtung	Winddichtungsbahn	geklammert	0,19	0,2	-	-	ja	-	Kunststoffgemisch	-0,03
U-Konstruktion	Holzlattung		1,54	1,7	Akku-	0,03	-	Holz A1	-0,06	
Bekleidung	Nut- u. Federschalung		13,27		schrauber	-	-	Holz A1	-0,51	
		Edelstahlschrauben	0,12	6,7		0,10	n.r.	-	Edelstahl	0,04
Eckschutz	Alu-Profil		0,16		Akku-	n.r.	-	Aluminium	0,12	
		Edelstahlschrauben	0,01	0,3	schrauber	0,01	n.r.	-	Edelstahl	>0,00
			54,88	18,6		0,27			-1,96	

n.r. = nicht relevant

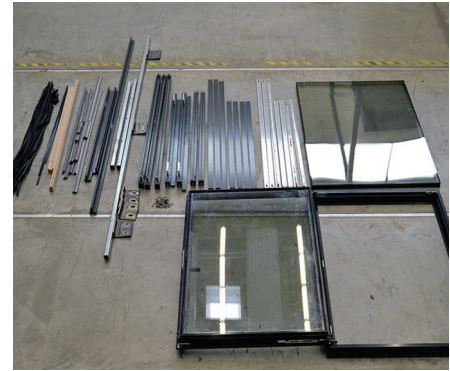
A 6.19

- A 6.20 Pfosten-Riegel-Fassade aus Aluminiumprofilen (11)
- A 6.21 Wertstoffe Pfosten-Riegel-Fassade
- A 6.22 Dokumentation Rückbau und Wert: Pfosten-Riegel-Fassade (11)

Mitwirkende am Versuch:  
 Felix Wagner, Schüco International KG  
 Till Arlinghaus, Studierender der BUW



A 6.20



A 6.21

### Pfosten-Riegel-Fassade

Eine Pfosten-Riegel-Fassade ist eine meist transparente, elementierte Außenwand, deren Komplexität sich erst im Detail zeigt. Die notwendigen Abdichtungen der Profile und Gläser gegen Feuchtigkeit und Luftaustausch bestehen häufig aus Materialien mit problematischen Stoffen (z. B. Weichmachern). Kunststoffisolatoren in Profilen und Metallbedampfung auf Gläsern werden eingesetzt, um hohe Anforderungen an den Wärmeschutz zu erfüllen.

Im Versuchsstand wurde die Konstruktion hinsichtlich ihrer Komplexität optimiert bzw. minimiert (Abb. A A 6.20 und A 6.38 Nr. 11). Pfosten und Riegel sowie Fensterrahmen und -flügel bestehen aus Cradle-to-Cradle-zertifizierten Aluminiumprofilen (siehe Kapitel 4.2.2).

Im Rückbauversuch wurde unter ähnlichen Bedingungen und mit den gleichen Werkzeugen oder Maschinen gearbeitet wie sie beim Rückbau auf der Baustelle Anwendung finden, beispielsweise Arbeitsbühne statt Gerüst oder krangesteuerte Entglasung mit Vakuum-Sauggreifern.

Im Ergebnis ließen sich die Einzelteile der Pfosten-Riegel-Fassade mit relativ geringem Zeit- und Energieaufwand demontieren und in weitgehend sortenreine Wertstofffraktionen trennen (Abb. A 6.21).

Die Fensterprofile wurden einer Aluminium-Recyclinganlage zugeführt, in der manuell unlösbare Fremdteile mechanisch vom Metall getrennt werden. Das Aluminium wird hochwertig recycelt, die Kunststoffanteile thermisch verwertet. Glas und EPDM-Dichtungsprofile sind stofflich verwertbar, jedoch größtenteils auf niedrigerem Qualitätsniveau und mit eingeschränkten Sekundäranteilen im Neuprodukt (Material-Loop-Potenzial).

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand	Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine				
PFR-System	Aluminiumprofile		6,45		Akku-	-	Pulverbe-	Aluminium	4,75
Fensterrahmen	Aluminium-Rahmen		3,27		schrauber	-	schichtung	Aluminium	2,41
		Edelstahlschrauben	0,08	5,6	-	0,07	n.r.	-	Edelstahl
Verglasung	3-fach Isolierglas		30,20	1,4	Glassauger	n.d.	zum Teil	Randverb. Glas	-1,05
Zubehör	Vierkant-Stahlprofil		5,33			n.r.	-	Stahl, Scherenschr.	0,31
	Konsole, Stahl verzinkt		3,05			n.r.	-	Stahl, Scherenschr.	0,18
	Beschläge, Edelstahl		2,63			n.r.	-	Edelstahl	1,75
	Isolierstege, PA		0,83			-	-	Kunststoff	-0,15
	Distanzklötze PP		0,02			-	-	Kunststoff	<0,00
Dichtungen	EPDM-Profil und								
	-Folien		1,80			-	-	Kunststoff	-0,32
Isolatoren	HI-Isolatoren, PE		0,32		Akku-	-	Alufolie 0,5%	Kunststoff	-0,05
Baukörperanschl.	PVC hart		1,33	1,9	schrauber	0,02	-	Kunststoff	-0,24
n.r. = nicht relevant			55,30	8,9		0,09			7,64
n.d. = nicht dokumentiert (vernachlässigbar)									

A 6.22



A 6.23



A 6.24

- A 6.23 »umgekehrt«: Bitumenabdichtung unter Schaumglasdämmung mit Kiesauflage (12)
- A 6.24 Herstellerrecycling: Sammlung und Sortierung von Altbitumenbahnen
- A 6.25 Dokumentation Rückbau und Wert: Bitumenabdichtung unter Schaumglasdämmung (12)

Mitwirkende am Versuch:  
 Martin Nicolas, derbigum Imperbel N.V./S.A.  
 Georg Haizmann, Fan Ling, Studierende der BUW

### 6.2.2. Dachbekleidungen

Beim Rückbau von Dächern bereiten verklebte Dachabdichtungen die größten Probleme bei der sortenreinen Trennung (s. Beispiel Seite 137). Für die Versuche wurden deshalb optimierte Konstruktionen entwickelt.

#### Umkehrdach mit Bitumenabdichtung und Schaumglasdämmung

Bei einem Umkehrdach sind die zwei einzelnen Schichten der Dampfsperre und der Abdichtung eines konventionell ausgeführten Flachdachs in einer einzigen Lage unterhalb der Wärmedämmung zusammengefasst [160]. Im Versuchsstand wurde für diese gekoppelte Funktionsschicht eine Bitumen-Unterlagsbahn auf der Tragschicht lose verlegt und nur an den überlappenden Nähten verschweißt, eine zweite Lage dagegen auf der unteren Bahn vollflächig homogen verschweißt.

Für die Wärmedämmung kamen aus Altglas hergestellte, geschlossenzellige Schaumglasplatten zum Einsatz, die weder Wasser aufnehmen noch quellen oder schrumpfen, wodurch Wärmebrücken vermieden werden. Gegen Aufschwemmen und Windsog schützt eine Auflage aus Kies; ein wasserableitendes Vlies trennt diese von der Wärmedämmung (Abb. A 6.23 und A 6.38 Nr. 12).

Der Dachaufbau ist mit nur manuellem, sehr geringem Aufwand rückbaubar. Die Bitumenbahnen lassen sich problemlos stofflich recyceln, wenn auf eine Metalleinlage verzichtet wird (keine Dampfsperrfunktion). Der Hersteller hat hierfür ein Rückholssystem aufgebaut: Alte Bahnen aus Plastomerbitumen werden kostenlos eingesammelt (Abb. A 6.24), geschreddert, eingeschmolzen und zu neuen Bahnen verarbeitet.

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand	Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine				
Auflast	Kies	geschüttet	80,25	3,0	-	-	-	Wiederverwendung	-0,00*
Trennlage	Kunststoffvlies, PP	lose verlegt	0,50	0,1	-	-	-	Kunststoff	-0,09
Dämmung	Schaumglasplatten, 2-lagig	lose verlegt	29,40	0,5	-	-	-	miner. Bauschutt, sauber	-0,69
Abdichtung	Bitumenbahn, obere Lage	vollflächig verschweißt	5,50	-	-	n.r.	-	Herstellerrücknahme	0,00
	Bitumenbahn, untere Lage	lose verlegt, Nähte verschweißt	5,20	1,3	-	-	n.r.	Herstellerrücknahme	0,00
			120,80	4,9					-0,78

n.r. = nicht relevant

\* kein Markt vorhanden (s. Punkt 6.1.2, Seite 114)

A 6.25

A 6.26 punktuell fixiert: Abdichtung aus nachwachsenden Rohstoffen mit Holzfaserdämmung (13)

A 6.27 Dachbahn mit Restanhaftungen des Dämmstoffdübels

A 6.28 Dokumentation Rückbau und Wert: Abdichtung aus nachwachsenden Rohstoffen mit Holzfaserdämmung (13)

Mitwirkende am Versuch:

Martin Nicolas, derbigum Imperbel N.V./S.A.

Georg Haizmann, Fan Ling, Studierende der BUW



A 6.26



A 6.27

### Flachdachabdichtung aus nachwachsenden Rohstoffen

Als Alternative zu Dachabdichtungsbahnen aus fossilen Rohstoffen hat ein belgisches Unternehmen eine Abdichtung entwickelt, die hauptsächlich aus Pflanzenöl und Kiefernharz besteht. Nach Herstellerangaben kann die mit einer Trägereinlage aus Polyester- und Glasvlies ausgestattete, Cradle-to-Cradle-zertifizierte Dachbahn vollständig recycelt werden. Aufgrund des Innovationscharakters gibt es bisher in Deutschland kein anwendbares, allgemein anerkanntes Prüfverfahren, sodass das Produkt noch über kein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP) verfügt. Die Abdichtung wird gemäß Verarbeitungshinweis des Herstellers in der Regel vollflächig verschweißt. Im Versuchsstand kam jedoch eine mechanische Fixierung testweise zum Einsatz, um die sortenreine Trennbarkeit zu optimieren. So wurde die Unterlagsbahn mit metallischen Tellerdübeln durch eine trittfeste Holzweichfaserdämmung hindurch am Untergrund befestigt und eine obere Bahn vollflächig aufgeschweißt (Abb. A 6.26 und A 6.38 Nr. 13).

Im Rückbauversuch erwies sich die Verdübelung als hinderlich, da die Tellerdübel unter der Oberlage verschwinden und nicht manuell herausgeschraubt werden können (Abb. A 6.27). Auf einer Rückbaustelle wäre eine Demontage mit einem mechanischen Greifer realistisch.

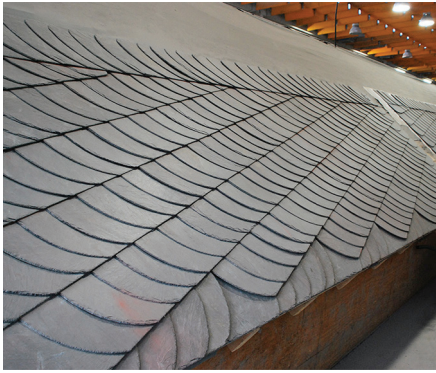
Da die Abdichtungsbahn nicht dampfdicht erhaltlich ist, wurde unter der Dämmung eine herkömmliche Bitumenbahn mit Metalleinlage als Dampfsperre lose verlegt. Diese konnte rückstandsfrei demontiert werden, ist jedoch nur thermisch verwertbar unter Verlust der Aluminiemeinlage.

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand		Zerstörung	Restanhaftung	Wertstoff	Wert
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine	[MJ/m <sup>2</sup> ]				
Abdichtung	Derbipure, obere Lage	vollflächig verschweißt	3,40				n.r.	-	Herstellerrücknahme	0,00
	Derbipure, untere Lage	mechanisch befestigt	3,40				n.r.	Tellerdübel 0,4%	Herstellerrücknahme	0,00
		Metall-Tellerdübel	0,30	3,6	-	-	n.r.	n.r.	Edelstahl	0,20
Dämmung	Holzweichfaser, 2-lagig mit Gefälle	lose verlegt	35,20	0,6	-	-	ja	-	Holz A2	-1,58
Dampfsperre	Bitumenbahn mit Aluminiemeinlage	lose verlegt, Nähte verschweißt	4,50	1,1	-	-	ja	Alufolie 0,4%	Bitumengemisch	-0,91
			46,80	5,3						

n.r. = nicht relevant

A 6.28





A 6.29



A 6.30

A 6.29 langlebig: Schieferdeckung auf geneigtem Dach (14)  
 A 6.30 Demontage Schieferdeckung  
 A 6.31 Dokumentation Rückbau und Wert: Schieferdeckung

Mitwirkende am Versuch:  
 Hans-Peter Eiserloh, Bundesbildungszentrum des Dt. Dachdeckerhandwerks (BBZ) Mayen.  
 Nils Nengel, Xenia Sagrebin, Studierende der BUW

### Schieferdeckung auf geneigtem Dach

Geneigte Dächer werden am häufigsten mit mineralischen Materialien gedeckt. Tonziegel, Betondachsteine und Schuppen aus Faserzement oder Schiefergestein sind jedoch, ebenso wie mineralische Materialien für Fassaden, nur eingeschränkt recyclingfähig. Ziel dieses Rückbau-Versuchsstands war die zerstörungsfreie Demontage eines mit hochwertigen Schieferplatten gedeckten Dachs zur Wiederverwendung (Abb. A 6.29 und A 6.38 Nr. 14).

Die Demontage der Dämmung und der Schalung war nicht Teil der Untersuchung. Zwecks Vergleichbarkeit der Gesamtkonstruktion mit den untersuchten Flachdächern wurden ersatzweise Teilergebnisse des Rückbaus der „Holzbekleidung an Außenwand in Holzständerbauweise“ auf Seite 121 herangezogen.

Im Vergleich von konventionellem Abbruch mit Demontage in Handarbeit zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit zwischen Rückbauaufwand und Zerstörungsfreiheit. Bei der doppelt so zeitaufwendigen Demontage (Abb. A 6.30) blieben etwa 75% der vernagelten Platten unbeschädigt, beim Abbruch wurden etwa 90% zerstört.

Da mineralische Dachdeckungsmaterialien verwittern, ist die Wiederverwendbarkeit eingeschränkt. Im Falle eines Umbaus (z.B. Dachausbau) bildet die Wiederverwendung vorhandener Dachsteine zwar eine ressourcenschonende Alternative; da jedoch für gebrauchte Schieferplatten nach Recherche der Verfasserin kein Markt existiert, haben die wiederverwendbaren Platten keinen Marktwert (s. Kapitel 6.1.2, Seite 114).

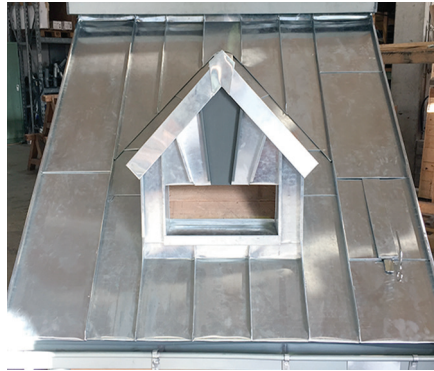
Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand		Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine	[MJ/m <sup>2</sup> ]				
Dachdeckung	Schieferplatten	Nägeln	54,05	6,8	-	-	25%	-	Wiederverwendung	-0,32*
			0,26				n.r.	-	Edelstahl	0,17
Unterdeckbahn	PP-Vlies mit PEEE-Membran	geklammert	0,19	0,3	-	-	ja	-	Kunststoffgemisch	-0,44
Bepunktung	MDF	Edelstahlschrauben	0,05	1,5	Akku-	0,02	-	-	Holz A2	-0,44
		Schrauben, verzinkt	0,03	2,4	schrauber		n.r.	-	Edelstahl	0,03
Dämmung	Holzweichfaserplatten	Akku-	13,26	11,0	schrauber	0,02	-	-	Holz A2	-0,59
		Schrauben, verzinkt	0,03				2,4	n.r.	-	Stahl, Scherenschra.
			77,74			0,04				-1,18

n.r. = nicht relevant

\* Anteil Wiederverwendung 75% mit 0,00€ kalkuliert (kein Markt vorhanden), zerstörter Anteil 25% als Bauschutt (sauber) kalkuliert

- A 6.32 Closed-Loop-Konstruktion: Stehfalzdeckung aus Zinkblech auf geneigtem Dach (15)
- A 6.33 Rückbau Zinkdeckung
- A 6.34 Dokumentation Rückbau und Wert: Stehfalzdeckung aus Zinkblech auf geneigtem Dach (15)

Mitwirkende am Versuch:  
 Hans-Peter Eiserloh, Bundesbildungszentrum des Dt. Dachdeckerhandwerks (BBZ) Mayen.  
 Nils Nengel, Xenia Sagrebin, Studierende der BUW



A 6.32



A 6.35

### Zinkblech als Doppelstehfalzdeckung auf geneigtem Dach

Metalldächer stellen eine sehr langlebige und recyclingfähige Alternative zu mineralisch gedeckten Steildächern dar. Eine Stehfalzdeckung ist eine materialhomogene, formschlüssige Verbindung von Zink- oder Kupferbändern. Das Doppelstehfalzdach besteht aus Scharen (Metallbahnen) mit seitlichen Aufkantungen, die mit der danebenliegenden Aufkantung doppelt verfalzt sind. Die Befestigung erfolgt mit speziellen Haften aus Blech, die im Bereich der Aufkantung auf die Schalung geschraubt und durch das doppelte Verfalzen Bestandteil des Systems werden.

Der Rückbau im Versuchsstand (Abb. A 6.32 und A 6.38 Nr. 15) mit dem Ziel der stofflichen Verwertung der Metalle erfolgte unter Inkaufnahme der Zerstörung des Deckungsmaterials, da sortenreine Metalle durch Einschmelzen problemlos auch mehrfach recycelt werden können. Der zeitliche Aufwand für den Rückbau war entsprechend gering.

Die Demontage der Dämmung und der Schalung war auch hier nicht Teil der Untersuchung. Zwecks Vergleichbarkeit der Gesamtkonstruktion mit den untersuchten Flachdächern wurden wiederum ersatzweise Teilergebnisse des Rückbaus der „Holzbekleidung an Außenwand in Holzständerbauweise“ auf Seite 121 herangezogen.

Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand	Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert	
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine				[MJ/m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]
Dachdeckung	Stehfalz-Zinkblech		4,99			n.r.	-	Zink	7,99	
		Haften	0,04			n.r.	-	Zink	0,06	
		Schrauben, verzinkt	0,06	4,2	-	-	n.r.	-	Stahl, Scherenschr.	>0,00
Unterdeckbahn	PP-Vlies mit									
	PEEE-Membran	geklammert	0,19	0,3	-	ja	-	Kunststoffgemisch	-0,03	
Beplankung	MDF		9,90		Akku-	-	-	Holz A2	-0,44	
		Edelstahlschrauben	0,05	1,5	schrauber	0,02	n.r.	-	Edelstahl	0,03
Dämmung	Holzweichfaserplatten		13,26		Akku-	-	-	Holz A2	-0,59	
		Schrauben, verzinkt	0,03	2,4	schrauber	0,02	n.r.	-	Stahl, Scherenschr.	>0,00
			28,52	8,4		0,04				7,02

n.r. = nicht relevant

A 6.34

### 6.2.3. Auswertung

An den beispielhaft untersuchten Fassaden- und Dachbekleidungen lassen sich die in Kapitel 5 aufgestellten Parameter zur Quantifizierung der Kreislaufpotenziale messen. Die Konstruktionen wurden mit dem Ziel der Wiederverwendbarkeit der Bauteile oder eines hochwertigen Recyclings am Ende der Nutzungsdauer ausgewählt. Die Untersuchungen konzentrierten sich damit auf die Post-Use-Phase. Die Pre-Use-Phase, d.h. der Einsatz von wiederverwendeten oder recycelten Materialien und der Austauschbedarf während der Nutzung (Use-Phase) blieb bei der Versuchsreihe zunächst außen vor. Im Folgenden werden deshalb nur die Parameter der Post-Use-Phase betrachtet.

#### Konstruktive Ebene

Die konstruktive Ebene wird anhand der Parameter zerstörungsfreie Lösbarkeit und Sortenreinheit betrachtet.

##### *Zerstörungsfreie Lösbarkeit*

Eine Demontage ohne Zerstörung ist nur für Baumaterialien und -produkte relevant, die wiederverwendet werden sollen. In den Versuchständen wurde bei mineralischen Baustoffen mit eingeschränkter Recyclingfähigkeit die Demontage auf Wiederverwendbarkeit ausgelegt. Nach dem Rückbau konnte der jeweilige Massenanteil zerstörter und nicht zerstörter Materialien gemessen werden.

##### *Sortenreinheit*

Nahezu alle untersuchten Konstruktionen zeichneten sich durch eine hohe Sortenreinheit der Materialien nach dem Rückbau aus. Vereinzelt Restanhaftungen wurden gemessen und als Massenanteil ausgewiesen. Zur Beurteilung, ob die Fremdbestandteile den Recyclingprozess stören, wurde ein Entsorger<sup>49</sup> mit Erfahrung im Rückbau befragt. So wurde z.B. die VHF-Fassade mit verklebten Faserzementplatten nicht als wiederverwendbar, sondern als verschmutzter mineralischer Bauschutt eingestuft, da die Kleberrückstände mit unverhältnismäßig hohem Aufwand entfernt werden müssten.

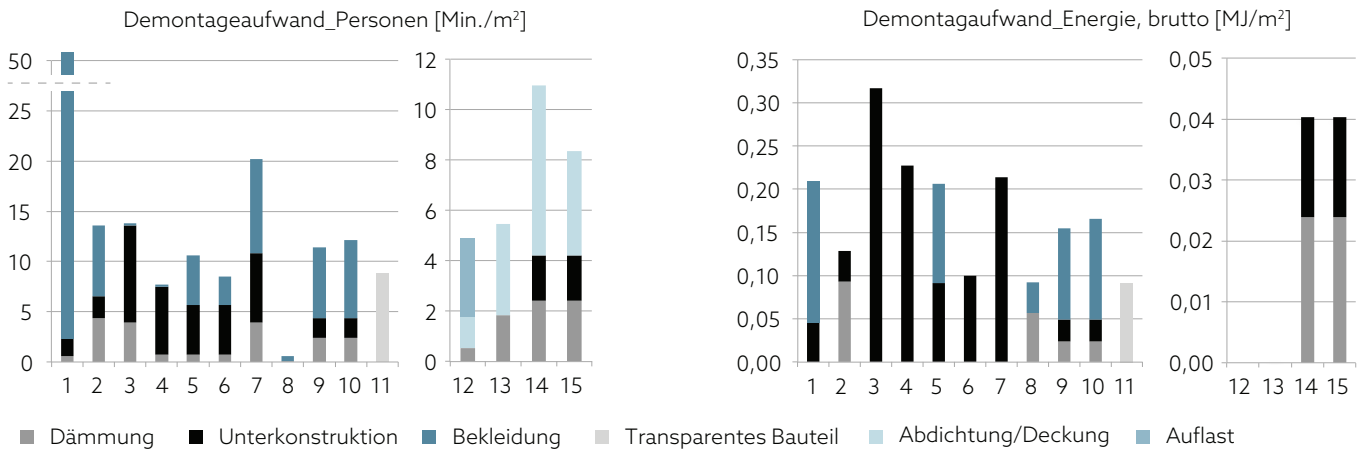
#### Wirtschaftliche Ebene

Die Parameter der Wirtschaftlichkeit werden, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, am Arbeitsaufwand und am Wert der zurückgewonnenen Materialien gemessen.

##### *Arbeit*

Der Demontageaufwand wurde anhand der Personenarbeitszeit und der eingesetzten Maschinenenergie gemessen und auf einen Quadratmeter Bauteilfläche bezogen. Abb. A 6.35 zeigt diese Parameter für alle Konstruktionen der Versuchsreihe (ohne tragendes Element), zusammengefasst nach Bauteilen.

49 Simon Lehmann, SERVISA Dienstleistungen für die Immobilienwirtschaft GmbH, Berlin, 02/2016.



A 6.35

Im Vergleich wird für den Rückbau der vermörtelten Klinkerfassade aufgrund der manuellen Entfernung des Mörtels die längste Personenarbeitszeit und für den Rückbau des WDVS unter Zerstörung die geringste Zeit benötigt. Bei Betrachtung des Energieaufwands fällt auf, dass die VHF-Fassaden mit genieteten Verbindungen für die Demontage verhältnismäßig viel Energie benötigen. Für demontagefreundliche Konstruktionen sind deshalb Klemm- oder Klicksysteme zu bevorzugen.

**Die Personenarbeitszeit lässt sich nun anhand der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Formeln und Kenngrößen in die physikalische Größe Arbeit umrechnen und damit auf die gleiche Einheit bringen wie die eingesetzte Maschinenarbeit.**

Aus der Arbeitszeit multipliziert mit der Leistung der Personen in Höhe von 0,335 MJ/h (s. Kapitel 5, Seite 104) wird die Arbeit der Personen in MJ/m² berechnet.

Beispiel: Für die Demontage der Klinkerfassade mit Mineralwolle (Nr. 1) ergibt sich gemäß Dokumentation aus Abb. A 6.7 folgende Arbeit:

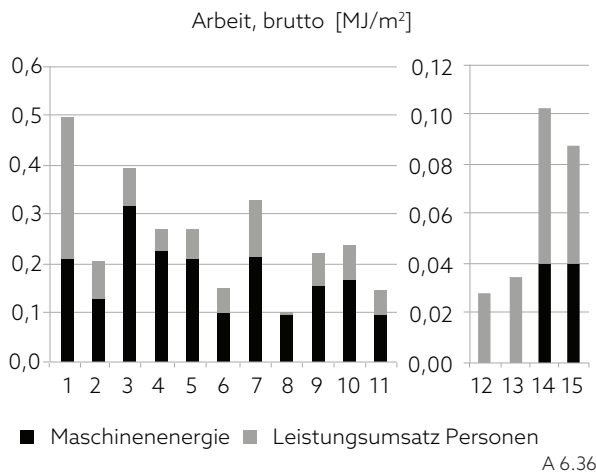
Arbeitszeit	=	50,6 Min./m²	△	0,85h/m²
Ø Leistung Personen [ $P_p$ ]	=	0,335 MJ/h		
Arbeit Personen [ $W_p$ ]	=	0,335 MJ/h × 0,85h/m²		
	=	0,285 MJ/m²		
zzgl. Arbeit Maschinen [ $W_M$ ]	+	0,210 MJ/m²		
Gesamt Arbeit [ $W$ ]	=	0,495 MJ/m²		

Abb. A 6.36 zeigt den Parameter Arbeit für Personen und Maschinen zur Demontage der untersuchten Fassaden- und Dachbekleidungen bezogen auf 1 m² Bauteilfläche.

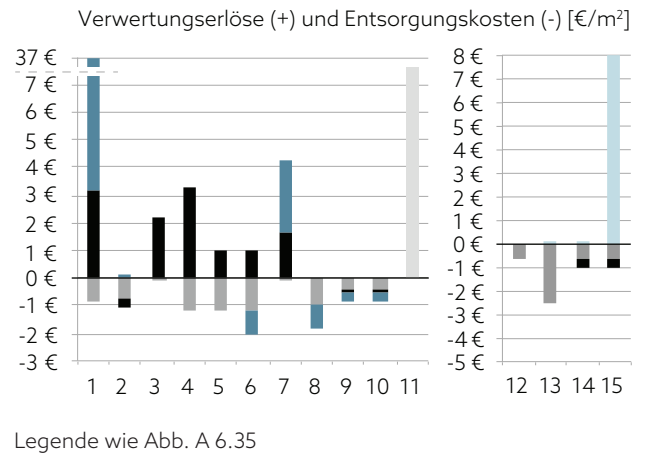
*Wert*

Der Parameter „Wert“ wurde ebenfalls für 1 m² Bauteilfläche berechnet. Er ergibt sich aus der Multiplikation der Masse pro Quadratmeter mit den in Abschnitt 6.1 erhobenen Preisen pro Masseinheit. In Abb. A 6.37 sind die ermittelten Verwertungserlöse und Entsorgungskosten für die zurückgewonnenen Wertstoffe nach Bauteilen zusammengefasst. Da die Versuche von Oktober 2015 bis Januar 2016 durchgeführt wurden, liegt den Berechnungen die Preiserhebung aus dem Jahr 2016 zugrunde.





A 6.36



Legende wie Abb. A 6.35

A 6.37

### Erkenntnisse für die wirtschaftliche Ebene

Aus dem grafischen Vergleich der Faktoren Arbeit und Wert lassen sich wichtige Aspekte zur Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus ablesen: Der Arbeitsaufwand steht in engem Zusammenhang mit dem Wert der Materialien. So weisen das mineralische Wärmedämmverbundsystem und die verklebten Faserzementplatten zwar den geringsten Rückbauaufwand auf, da sie nicht demontiert, sondern unter Zerstörung abgebrochen wurden, allerdings haben die Materialien auch den geringsten Wert.

Im Versuchsergebnis weist keine der untersuchten Konstruktionen einen hohen Verwertungserlös bei geringem Arbeitsaufwand aus. Ein hoher Arbeitsaufwand ist wirtschaftlich vertretbar, wenn dadurch Verwertungserlöse erzielt oder Entsorgungskosten gespart werden. Je höher die prognostizierten Verwertungserlöse oder je geringer die Entsorgungskosten, desto lohnender ist die Demontage. Ein hoher Arbeitsaufwand lohnt sich für „Wertstoffe“ im wortwörtlichen Sinn.

Verwertungserlöse können erzielt werden, wenn für die Abfallstoffe eine Nachfrage besteht bzw. ein Markt vorhanden ist. Dies gilt z. B. für sämtliche Metallschrotte und für hochwertige Klinker (vgl. Kapitel 6.1.2).

So ist der Rückbau der Fassade mit vermörtelter Vormauerschale zwar sehr aufwendig, kann aber durchaus wirtschaftlich sein, da Entsorgungskosten gespart werden und ein Markt für hochwertige gebrauchte Klinker existiert. Bei einem Unternehmer-Stundensatz von durchschnittlich 40 € müsste ein Preis von ca. 0,80 bis 1,00 € pro Mauerstein erzielt werden, was dem derzeitigen Ankaufspreis für alte Vollziegel entspricht. Ein Ertrag ließe sich aufgrund des geringen Rückbauaufwands auch mit der Klinkerfassade im Trockenstapelsystem erzielen, vorausgesetzt hierfür würde sich zukünftig ein Markt entwickeln. Im Falle von wiederverwendbaren Baustoffen ohne Marktwert (z. B. gebrauchte Faserzement- oder Schieferplatten) und bei Materialien mit Herstellerrücknahmesystem (z. B. recyclingfähige Bitumenbahnen) wurde davon ausgegangen, dass keine Entsorgungskosten anfallen, aber auch keine Verwertungserlöse erzielt werden (Nullwert, vgl. Kapitel 6.1.2, Seite 114).

Die wirtschaftlichsten Verhältnisse zwischen Arbeitsaufwand und Verwertungserlös ergeben sich in diesem Vergleich für die Pfosten-Riegel-Fassade und das Zinkdach. Dies lässt sich an den hohen Verwertungserlösen bei mittlerem Arbeitsaufwand ablesen.

A 6.35 Demontageaufwand im Vergleich

A 6.36 Vergleich Parameter „Arbeit“

A 6.37 Vergleich Parameter „Wert“ auf Basis der Preiserhebung 2016

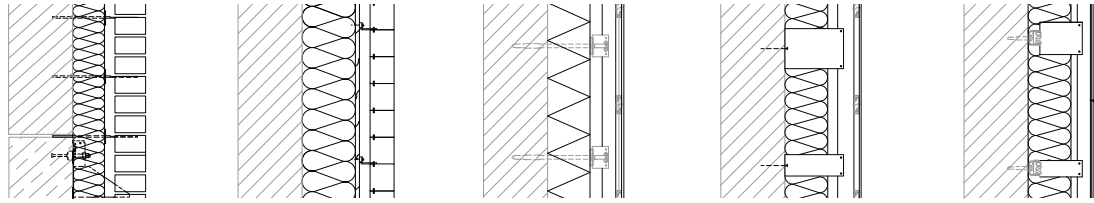
#### Fassaden:

- 1 Klinkerfassade, Mineralwolldämmung
- 2 Ziegel-Systemsteine, Holz-UK, Hanfdämmung
- 3 Faserzement mit Agraffe, Alu-UK, Schaumglas
- 4 Faserzement mit Agraffe, Alu-UK, Mineralwolle
- 5 Faserzement, genietet auf Alu-UK, Mineralwolle
- 6 Faserzement, geklebt auf Alu-UK, Mineralwolle
- 7 Alukassetten, geklemmt, Alu-UK, Schaumglas
- 8 mineralisches WDVS
- 9 Profilholzschalung, Holzweichfaserdämmung
- 10 Rhombus-Holzleisten, Holzweichfaserdämm.
- 11 Pfosten-Riegel-Fassade (Alu), Isolierverglasung

#### Dächer:

- 12 Umkehrdach, Bitumenabdichtung, Schaumglas, Kies
- 13 Flachdachdichtung aus nachwachsenden Rohstoffen, Holzweichfaserdämmung
- 14 geneigtes Dach, Schieferdeckung, Holzweichfaserdämmung
- 15 geneigtes Dach, Zinkdeckung, Holzweichfaserdämmung

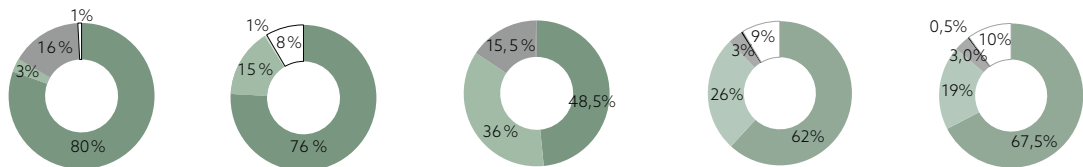
## Fassaden



Nr.	1	2	3	4	5
Aufbau	240 mm Außenwand massiv 160 mm Mineralwolle, verdübelt 40 mm Luftschicht 115 mm Wasserstrichklinker auf Edelstahlkonsole je zur Hälfte mit Kalkmörtel und Kalkzementmörtel	240 mm Außenwand massiv 200 mm Hanfdämmung geklemmt zwischen Holzleiterträgern 15 mm MDF-Platte 40 mm Luftschicht 90 mm Ziegel im Trockenstapelsystem	240 mm Außenwand massiv 160 mm Schaumglas auf Krallenplatten 12 mm Faserzementplatten, Agraffenhalterung auf Aluminium-Unterkonstruktion an Edelstahlkonsole	240 mm Außenwand massiv 160 mm Mineralwolle, verdübelt 12 mm Faserzementplatten, Agraffenhalterung auf Aluminium-Unterkonstruktion an Wandwinkeln	240 mm Außenwand massiv 160 mm Mineralwolle, verdübelt 12 mm Faserzement sichtbar genietet auf Aluminium-Unterkonstruktion an Gleitpunktschwert
Wandstärke [mm]	555	585	530	530	485
Wärmedurchgangskoeffizient U [W/m²K]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Arbeitszeit Personen Demontage [Min./m²]	50,6 ÷ 60 Min./h	13,6	13,8	7,7	10,6
Arbeit Personen Demontage [MJ/m²]	0,28 × 0,335 MJ/h	0,08	0,08	0,04	0,06
Arbeit Maschinen Demontage [MJ/m²]	0,21	0,13	0,32	0,23	0,20
Verwertungserlöse (+) Entsorgungskosten (-) [€/m²]	+36,79	-1,09	+2,04	+2,05	-0,21

Material-Loop-Potential, kumuliert

- Wiederverwendung
- Recycling
- Downcycling
- thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe
- thermische Verwertung fossile Rohstoffe
- Entsorgung / Deponierung



## Materielle Ebene

Für die materielle Ebene wurden in Kapitel 5.1 qualifizierende Kriterien und quantifizierbare Parameter definiert. Diese wurden in der Versuchsreihe angewandt bzw. gemessen. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst und grafisch gegenübergestellt.

### Schadstofffreiheit

Alle Konstruktionen wurden unter Beachtung der Schadstofffreiheit konzipiert. Bei der Auswahl der Materialien wurden Schadstoffe, die in Kapitel 5, Abb. A 5.3 auf Seite 91 aufgelistet sind und die ein Recycling am Ende der Nutzungsdauer möglicherweise verhindern, gezielt vermieden. Das Ausschlusskriterium Schadstofffreiheit ist deshalb für die untersuchten Konstruktionen eingehalten.

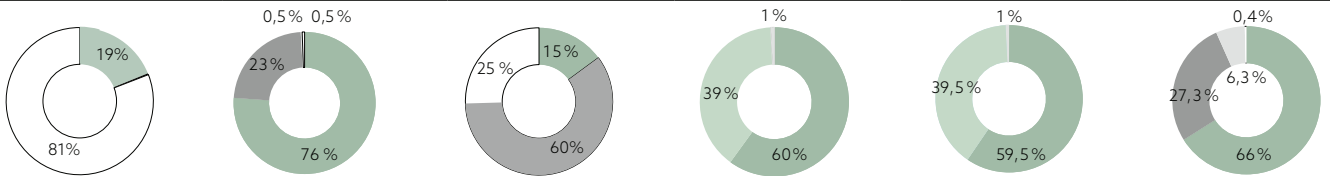
### Qualitätsstufen des Recyclings

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Verwertbarkeit der Materialien nach dem Rückbau. Die zurückgewonnenen Wertstoffe wurden anhand der Matrix in Abb. A 5.4 auf Seite 92 ihren jeweiligen End-of-Life-Szenarien zugewiesen. Abbildung A 6.38 zeigt eine Übersicht aller untersuchten Fassaden, in der die Qualitätsstufen des Recyclings farblich dargestellt sind. Die anteiligen Qualitätsstufen der Gesamtkonstruktion ergeben sich aus den Recyclingpotenzialen der verwendeten Baumaterialien. Die Kreisdiagramme zeigen die Massenanteile der Wertstoffe nach Qualitätsstufen. Je mehr der Kreis geschlossen ist (farbige Anteile), desto größer ist das Kreislaufpotenzial Post-Use insgesamt.

A 6.38 Übersicht der untersuchten Fassaden  
A 6.39 Übersicht der untersuchten Dachbekleidungen

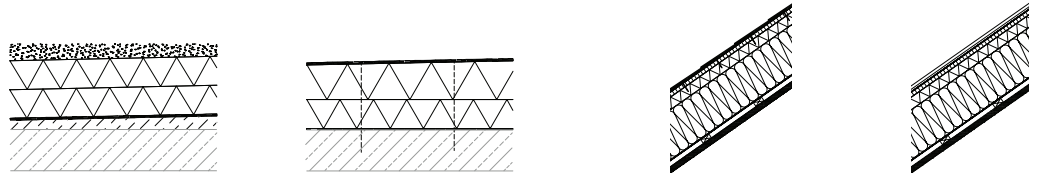
\* Die tragenden Elemente sind in Zeichnung und Text nur grau dargestellt, da sie in den Daten nicht enthalten sind.

6	7	8	9	10	11
240 mm Außenwand massiv 160 mm Mineralwolle, verdübelt 12 mm Faserzement verklebt auf Aluminium-Unterkonstruktion an Gleitpunkt-schwert	240 mm Außenwand massiv 160 mm Schaumglas auf Krallenplatten 1 mm Aluminiumblechkassetten an Rasterklackschiene, Aluminium-Unterkonstruktion an Edelstahlkonsole	240 mm Porenbeton 5 mm Leichtmörtel 100 mm Mineraldämmplatte 5 mm Leichtmörtel mit Glasfaserarmierung 2 mm Oberputz aus Leichtmörtel	15 mm OSB-Platte 180 mm KVH mit flexibler Holzfaserdämmung 20 mm Holzweichfaserplatte 0,5 mm PP-Vlies mit TEEE-Membran, getackert 30 mm Lattung Fichte schwarz lasiert 27 mm Schalung Lärche	15 mm OSB-Platte 180 mm KVH mit flexibler Holzfaserdämmung 20 mm Holzweichfaserplatte 0,5 mm PP-Vlies mit TEEE-Membran, getackert 30 mm Lattung Fichte schwarz lasiert 30 mm Rhombusleisten	50 mm Aluminiumprofile mit Einsetzelement 42 mm Dreischeibenisolierverglasung 40 mm Stahlrohr 150 mm Stahlwinkelkonsole, Abdichtungsprofile und verklemmte Folien aus EPDM
485	530	352	273	273	135
0,20	0,20	0,19	0,21	0,21	0,80
8,5	20,2	0,6	11,4	12,2	8,8
0,05	0,11	0,01	0,06	0,07	0,05
0,10	0,21	0,09	0,15	0,17	0,09 ohne Energiebedarf der Alu-Recyclinganlage
-1,08	+4,19	-1,79	-0,89	-0,88	+7,64



A 6.38

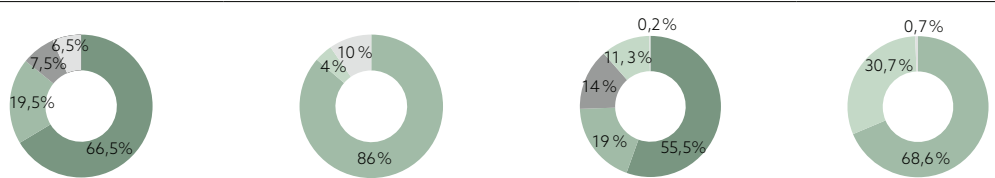
**Dachbekleidungen**



Nr.	12	13	14	15
<b>Aufbau</b>	50 mm Kies 5 mm PP-Vlies 2= 140 mm Schaumglasdämmplatten, lose verlegt, obere Lage mit Glasbeschichtung 5 mm Bitumenabdichtungsbahn, vollflächig verschweißt 5 mm Bitumenabdichtungsbahn, nur Nähte verschweißt 2 % Gefälleestrich (homogener Verbund mit Decke: nicht untersucht) 200 mm Stahlbetondecke	2= 3 mm Abdichtungsbahn aus nachwachsenden Rohstoffen, obere Lage vollflächig verschweißt, untere Lage mechanisch befestigt 50-170 mm Holzweichfaser-Gefälledämmung, lose verlegt 160 mm Holzweichfaserdämmung lose verlegt 3,5 mm Bitumen-Dampfspernbahn, nur Nähte verschweißt 200 mm Stahlbetondecke	7 mm Schieferplatten, genagelt 0,5 mm Unterdeckbahn, PP-Vlies mit TEEE-Membran, geklammert 20 mm MDF-Platte 40 mm Holzweichfaserdämmung 220 mm Holzweichfaser-Zwischensparrendämmung	1 mm Doppelstehfalzdeckung aus Zinkblech 0,5 mm Unterdeckbahn, PP-Vlies mit TEEE-Membran, geklammert 20 mm MDF-Platte 40 mm Holzweichfaserdämmung 220 mm Holzweichfaser-Zwischensparrendämmung
Wärmedurchgangskoeffizient U [W/m²K]	0,14	0,15	0,16	0,16
Arbeitszeit Personen Demontage [Min./m²]	4,9	5,4	11,0	8,4
Arbeit Personen Demontage [MJ/m²]	0,03	0,03	0,06	0,05
Arbeit Maschinen Demontage, [MJ/m²]	0,00	0,00	0,04	0,04
Verwertungserlöse (+) Entsorgungskosten (-) [€/m²]	-0,78	-2,29	-1,17	+7,02

Material-Loop-Potenzial, kumuliert

- Wiederverwendung
- Recycling
- Downcycling
- thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe
- thermische Verwertung fossile Rohstoffe
- Entsorgung / Deponierung



A 6.39

### *Material-Loop-Potenzial (MLP)*

Für die Berechnung des Material-Loop-Potenzials wurde auf die Angaben von Hillebrandt und Seggewies im Atlas Recycling [162] zurückgegriffen. Die Auswertung berücksichtigt somit, wie hoch der Recyclinganteil im Neuprodukt unter Berücksichtigung des technisch Machbaren maximal sein kann (siehe Seite 94). Das MLP ist somit nur für das End-of-Life-Szenario Recycling relevant.

Beträgt das MLP weniger als 100%, kann trotz selektiven Rückbaus und sortenreiner Trennung nur ein Teil der Materialien dauerhaft in geschlossenen Kreisläufen geführt werden. Der restliche Anteil (in Abb. A 6.40 als „Rest“ bezeichnet) würde dann einem nachrangigen EoL-Szenario zugeführt. Dieses Szenario muss (genauso wie das erstrangige EoL-Szenario) für jeden Wertstoff spezifisch festgelegt werden, um die Anteile der Qualitätsstufen an der Gesamtkonstruktion berechnen zu können.

Abb. A 6.40 zeigt die Berechnung des Anteils der jeweiligen Qualitätsstufen unter Berücksichtigung des MLP am Beispiel der Pfosten-Riegel-Fassade (Nr. 11).

Im Vergleich der Fassaden zeigt sich, dass die VHF-Fassade mit verklebten Faserzementplatten (Nr. 6) das geringste Kreislaufpotenzial aufweist, gefolgt von dem mineralischen Wärmedämmverbundsystem (Nr. 8).

Bei der verklebten VHF-Fassade wird prognostiziert, dass der Großteil der Materialien (81%) deponiert werden muss. Dies resultiert aus der nicht sortenreinen Trennbarkeit und den damit verbundenen Anhaftungen von PUR-Kleber an den Faserzementplatten.

Für das WDVS ergibt sich eine Deponierungsquote von 25%. Für den Putz mit Glasfaserarmierung wird eine Deponierung wegen nicht sortenreiner Trennbarkeit angenommen. Die restlichen 75% entfallen auf die Verwertung der Mineraldämmplatten mit Mörtel aus dem gleichen Basismaterial. Diese Materialien könnten derzeit zwar komplett recycelt werden, verfügen aber nur über ein MLP von 20%, d. h., sobald die Gesamt-Abbruchmenge das Material-Loop-Potenzial der gleichzeitigen industriellen Gesamtproduktion übersteigen würde, wäre bestenfalls eine Weiterverwertung (Downcycling) möglich. Somit ergibt sich ein Recyclingpotenzial der Gesamtkonstruktion von 15% (75% verwertbare Materialien x 20% MLP) und ein Downcyclingpotenzial von 60% (75% minus 15%).

Bei der Vormauerschale mit Ziegeln im Trockenstapelsystem (Nr. 2) wurde für die Ziegel ein Deponierungsanteil von 10% angenommen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die unterste und oberste Ziegelschicht, ggf. auch im Bereich von Stürzen und Brüstungen, vermörtelt oder verklebt werden müssen und somit nicht zerstörungsfrei zurückgewonnen werden können, was im Versuchsstand nicht berücksichtigt wurde.

Die Dachbekleidungen weisen allesamt ein hohes Kreislaufpotenzial auf, wie Abb. A 6.39 zeigt. Materialien, die deponiert werden müssen, wurden komplett vermieden. Auch aufgrund der sortenreinen Trennbarkeit fallen keine Abfälle zur Deponierung an. Das Material mit dem qualitativ geringsten Kreislaufpotenzial sind die Bitumenbahnen, da deren MLP für

Material	Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	EoL-Szenario erstrangig	MLP	EoL-Szenario nachrangig (Rest)	Recycling [kg/m <sup>2</sup> ]	Downcycling [kg/m <sup>2</sup> ]	energ. Verwertung [kg/m <sup>2</sup> ]	Deponierung [kg/m <sup>2</sup> ]
Aluminiumprofile	6,45	Recycling	98 %	Deponierung	6,32	-	-	0,13
Aluminium-Rahmen	3,27	Recycling	98 %	Deponierung	3,21	-	-	0,07
Edelstahlschrauben	0,08	Recycling	100 %	-	0,08	-	-	-
3-fach Isolierglas	30,20	Recycling	50 %	Downcycling	15,10	15,10	-	-
Vierkant-Stahlprofil	5,33	Recycling	100 %	-	5,33	-	-	-
Konsole, Stahl verzinkt	3,05	Recycling	100 %	-	3,05	-	-	-
Beschläge, Edelstahl	2,63	Recycling	100 %	-	2,63	-	-	-
Isolierstege, PA	0,83	energ. Verwertung	-	-	-	-	0,83	-
Distanzklotze PP	0,02	energ. Verwertung	-	-	-	-	0,02	-
EPDM-Profil und -Folien	1,80	Recycling	45 %	energ. Verwertung	0,81	-	0,99	-
HI-Isolatoren, PE	0,32	energ. Verwertung	-	-	-	-	0,32	-
PVC hart	1,33	energ. Verwertung	-	-	-	-	1,33	-
Summe	55,30				36,53	15,10	3,49	0,20
Masse-Anteil					66,0 %	27,3 %	6,3 %	0,4 %

A 6.40

das Recycling nur 30% beträgt und folglich 70% der energetischen Verwertung zugerechnet werden.

Die Unterscheidung zwischen Closed-Loop-Potenzial und Loop-Potenzial mit Zuweisung der jeweiligen Qualitätsstufen wird in Kapitel 7 beschrieben.

### 6.3. Recherchen zum Rückbauaufwand auf Baustellen

Um einen Überblick über die Rückbaupraxis zu erhalten und insbesondere die Unterschiede zwischen selektivem Abbruch und selektivem Rückbau zu analysieren, wurden Gespräche mit Abbruchunternehmern geführt und Vor-Ort-Recherchen auf Baustellen durchgeführt. Hierzu ist anzumerken, dass je nach individueller Rückbauaufgabe vielfältige Abbruchmethoden und -technologien angewandt werden (siehe Kapitel 3.3). Daten zum Rückbauaufwand für das gesamte Spektrum konnten in einem für diese Promotionsarbeit angemessenen Zeitrahmen nicht gesammelt werden. In Abstimmung mit den Abbruchunternehmern wurden deshalb beispielhafte Rückbauprojekte ausgewählt, die häufig vorkommende Gebäudetypologien abbilden und deren Bauweise weitgehend der noch heute üblichen Neubauplanung entsprach. Ziel der Recherche war zum einen, Problematiken zu identifizieren, die zu erhöhtem Rückbauaufwand und/oder untrennbaren Materialverbänden führen und in der Bewertung berücksichtigt werden müssen. Zum anderen sollte die generelle Messbarkeit der definierten Parameter überprüft und Daten zum Aufwand des selektiven Rückbaus erhoben werden.

#### 6.3.1. Problematiken beim selektiven Abbruch

Anhand der beiden folgenden beispielhaften Projekte wird beschrieben, welche Aspekte zu besonderen und zu typischen Problemen beim selektiven Abbruch führen können.

Die beiden Bauwerke, ein Geschäftshaus und ein Bürogebäude, wurden von der Fa. Antal Abbruch und Baumanagement GmbH aus Frankfurt selektiv abgebrochen. Das Verfahren entspricht dem heute am häufigsten vorkommenden Rückbauverfahren.

A 6.40 Anteil der Qualitätsstufen unter Berücksichtigung des Material-Loop-Potenzial am Beispiel der Pfosten-Riegel-Fassade





A 6.41



A 6.42



A 6.43

### „Zeilgalerie“ in der Frankfurter Innenstadt (Geschäftshaus)

Hoher Flächendruck und ein falsches Architekturkonzept führte bei dem 1992 errichteten Geschäftshaus an der Frankfurter Einkaufsmeile Zeil (Abb. A 6.41) zu frühzeitigem Rückbau. Die außergewöhnliche Erschließung der Ladenlokale im Inneren mit einer sich um das Atrium windenden Rampe (s. Abb. A 6.42) führte vor allem in den mittleren Etagen des neugeschossigen Gebäudes zu hohem Leerstand. Trotz neuer Fassade und umfangreicher Umbaumaßnahmen in 2011 wurde das Bauwerk 2016 nach nur 24 Jahren Nutzungszeit komplett zurückgebaut. Wertvolle Flächen mit hohen Mietpreisen in „1A-Lagen“ feuern auf diese Weise den Ressourcenverbrauch an, da Investitionen sich schnell rentieren und der Materialeinsatz den geringsten Aufwand darstellt.

#### *Besondere Herausforderungen*

Die Lage und die engen Baustellenverhältnisse stellten das Abbruchunternehmen vor große Herausforderungen hinsichtlich der Logistik. In der Fußgängerzone konnten Abtransporte nur in den frühen Morgen- und späten Abendstunden durchgeführt werden. Erschütterungen mussten aufgrund der U-Bahn-Tunnel in direkter Nachbarschaft unbedingt vermieden werden. Es wurden kontinuierlich seismographische Messungen durchgeführt. Ebenso mussten Staubemissionen vermieden werden, sowohl zur Einkaufsmeile Zeil als auch zur rückwärtigen Gebäudeseite, da hier die Anlieferung zur Galeria Kaufhof erfolgt, unter anderem mit frischen Lebensmitteln.

Das hohe Atrium und Raumhöhen im Kinosaal von bis zu 20 m (Abb. A 6.43) machten darüber hinaus besondere Sicherungsvorkehrungen erforderlich, sodass Industriekletterer eingesetzt werden mussten.

Weitere Arbeitsschutzmaßnahmen, wie mechanische Entlüftung der Räume während des Rückbaus, wurden durch die erforderliche Schadstoffentfrachtung (Asbest, KMF, PAK, PCB etc.) notwendig.

#### *Entkernung*

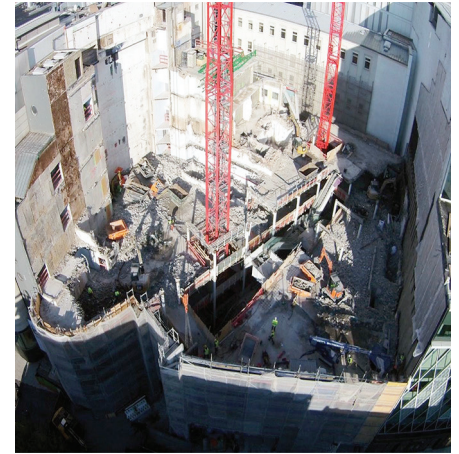
Die Entkernung war nicht wegen der Materialtrennung, sondern wegen schwieriger vertikaler Entsorgungswege im Inneren problematisch: Rolltreppen konnten zur Entsorgung nicht genutzt werden, Lastenaufzüge waren nur beschränkt tragfähig. Während der Entkernung wurden die ausgebauten Materialien deshalb mit Schubkarren, Loren etc.



A 6.44



A 6.45



A 6.46

über die vorhandenen Aufzüge in das zweite Untergeschoss verbracht und dort in Containern gesammelt. Die Container mussten über Schwerlastrollen manuell in einen Lieferantenaufzug verschoben und von dort ins Erdgeschoss hochgefahren werden, da der Aufzug nicht auf LKWs mit derartigen Lasten ausgelegt war. Außerdem mussten die Container manuell befüllt werden, da die Deckenhöhe im 2. UG für eine maschinelle Befüllung nicht ausreichend war.

An der Außenwand des Kinos im oberen Geschoss führten die zahlreichen Schichten (Abb. A 6.45) mit brandschutzbedingter Bromatbekleidung zu einer relativ aufwendigen Materialtrennung.

Auch die komplexe Leitungsführung bedeutete einen relativ hohen Rückbauaufwand: Alle kaschierten Dämmungen mussten vor dem Rückbau ausgebaut werden (Abb. A 6.44). Leichte Trennwände, abgehangte Decken und Hohlraumböden aus Gipsbaustoffen ließen sich hingegen relativ einfach zurückbauen.

### Abbruch

Das Gebäude war in Stahl- und Stahlbetonbauweise erstellt worden. Stahl-Beton-Verbundträger und -Stützen in der Galerie konnten nicht in Betonbrechanlagen getrennt werden, stattdessen war ein sehr arbeitsintensives Aufbrennen mit Propangas und Sauerstoff erforderlich. Ebenso wurden die Stahlträger des Kino-Tragwerks im thermischen Verfahren zurückgebaut. Der entkernte Rohbau wurde dann geschossweise mittels Kleinbagger und im Schneideverfahren abgebrochen (Abb. A 6.46).

Das Praxisbeispiel zeigt, dass die Baustellenbedingungen wie Platzverhältnisse, angrenzende Bauwerke, Abbruchhöhen, Medienversorgung, etc. den Rückbauaufwand erheblich beeinflussen können.

Das Abbruchunternehmen schätzte den Anteil für Logistik- und Sicherheitsmaßnahmen bei diesem Projekt auf rund 20% der gesamten Rückbau- und Entsorgungskosten. Dieser Aufwand kann in der Neubauplanung nur bedingt beeinflusst werden, z. B. durch Optimierung der vertikalen Erschließung und konsequente Schadstoffvermeidung. Das untersuchte Projekt ist jedoch auch sehr einzigartig. Im folgenden Beispiel wird ein Rückbauprojekt untersucht, das sich eher auf andere Objekte übertragen lässt.

- A 6.41 „Zeilalerie“ in der Frankfurter Innenstadt
- A 6.42 Fehlplanungen des Entwurfskonzeptes führten zum Abbruch: Rolltreppen beförderten den Kunden nach oben und Rampen führten an jedem Shop vorbei nach unten. Höhenversetzte Decken ließen keine Umnutzung zu.
- A 6.43 Rückbau Kinosaal in der Zeilalerie: große Höhen erforderten besondere Sicherheitsmaßnahmen
- A 6.44 Rückbau technische Leitungen
- A 6.45 Wandaufbau im Kinosaal mit diversen Schichten
- A 6.46 geschossweiser Rückbau des Rohbaus [163]





A 6.47



A 6.48



A 6.49

### Bürogebäude in Frankfurt Niederrad

Das Rückbauprojekt zeigt den Einfluss des Städtebaus und der Architekturqualität auf die Nutzungsdauer von Gebäuden. Entstanden Mitte der 80er Jahre in der Frankfurter Bürostadt Niederrad, wurde das dreigeschossige Objekt in Stahlbetonskelettbauweise nach einer Nutzungsdauer von nur 30 Jahren im Jahr 2015 komplett zurückgebaut. Nach der Finanzkrise des Jahres 2008 und der Digitalisierung des Bankgeschäfts herrschte in Frankfurt großer Leerstand auf Büroflächen. Aufgrund fehlender städtebaulicher Durchmischung und einer „autogerechten“ Verkehrsplanung in Niederrad ist eine Umnutzung von Bürogebäuden, z. B. in dringend benötigten Wohnraum unattraktiv; dies führt in vielen Fällen zu vorzeitigem Abbruch. Bei dem untersuchten Objekt war außerdem die Architektur (s. Abb. A 6.47) nicht erhaltenswert.

#### *Fassade*

Das Objekt war mit einer hochwertigen Fassade aus Natursteinplatten bekleidet. Wie bei vielen Natursteinfassaden der 80er Jahre wurde ein polierter Hartstein aus Indien („Multicolor red“) verarbeitet. Da der Stein mittlerweile unmodern ist, existiert kein Markt für eine Wiederverwendung. Die Fassade wurde deshalb mit dem Greifer abgebrochen und als mineralischer Bauschutt der Verwertung zugeführt (Downcycling zu rezyklierter Gesteinskörnung).

Für die Bewertung der Neubauplanung lässt sich schließen, dass die Auswahl regionaltypischer Natursteine die Chancen auf Wiederverwendung nach der Nutzung erhöht.

Im Sockelbereich waren die Betonaußenwände mit extrudiertem Polystyrol (XPS) gedämmt, das in Heißbitumen verklebt wurde (s. Abb. A 6.48). Die Dämmplatten und der Beton wiesen nach dem Rückbau Anhaftungen von Bitumen auf. Während die Bitumenreste auf dem EPS bei dessen heute üblicher energetischer Verwertung nicht stören, wäre ein zukünftig angestrebtes stoffliches Recycling des EPS aufgrund der Verschmutzung nicht möglich. Vom Beton müssen die Bitumenmassen für die Annahme beim Recyclingbetrieb bereits heute abgefräst werden. Für die Bewertung der Neubauplanung lässt sich ableiten, dass Verklebungen mit Bitumen zu verschmutzten, nicht sortenreinen Wertstoffen führen.





A 6.50



A 6.51



A 6.52

### Dach

Die Dachabdichtung war mit einer Kiesauflage beschwert. Eine Trennlage aus Polyethylenfolie musste beim Abbaggern des Kieses aufwendig manuell entfernt werden (Abb. A 6.49).

Die Bewertung der Neubauplanung muss deshalb im Einzelfall berücksichtigen, dass auch lose Trennlagen den Rückbau behindern können und deshalb nur verwendet werden sollten, wenn sie eine sinnvolle Funktion erfüllen. PE-Folien unter Kiesauflagen schützen weder die Dachhaut noch haben sie eine abdichtende Funktion.

Die Mineralwolldämmplatten waren mit Heißbitumen an der Attika befestigt (Abb. A 6.50). Die Bitumenreste mussten für die Annahme des Betons beim Recyclingbetrieb nach Aussagen der Abbruchunternehmerin abgefräst werden (vgl. Sockelbereich).

Die Dachabdichtung aus Bitumenbahnen war nicht sortenrein von der Mineralwolldämmung trennbar (Abb. A 6.51). Auch wenn Bitumenbahnen nicht aufgeschweißt werden, verkleben sie durch die sommerliche Hitze von alleine mit der Dämmung.

Die nicht sortenreine Trennbarkeit von Bitumenbahnen auf Dämmung ohne Trennlage muss deshalb bei der Zuordnung der Materialien zu Wertstofffraktionen berücksichtigt werden.

### Decken

Auf dem Hohlraum-Systemboden (vermutlich aus Gipsfaserplatten) war ein Teppichboden verklebt, der beim Rückbau Anhaftungen von Teppichrücken und Kleber hinterließ (Abb. A 6.52). Der Hohlraumboden musste deshalb als Baumischabfall entsorgt werden.

Für die Bewertung der Neubauplanung lässt sich ableiten, dass Verklebungen von Bodenbelägen auf dem Untergrund zu verschmutzten, nicht sortenreinen Wertstoffen führen.

Die Beispiele zeigen, dass für die Einordnung von Baustoffen in Wertstofffraktionen Wissen erforderlich ist, das von den Anwendern des Urban Mining Index – insbesondere Planern – nicht ohne weiteres erwartet werden kann. Bei Verbreitung der Systematik (z. B. über eine Online-Anwendung) könnte dieses Wissen in einem Handbuch vermittelt werden.

- A 6.47 Bürogebäude in Frankfurt Niederrad
- A 6.48 Fassade mit Dämmstoffen und Bekleidung
- A 6.49 Rückbau des Dachbelags: Kies auf PE-Trennlage
- A 6.50 Rückbau der Attika
- A 6.51 Rückbau der Dachabdichtung [164]
- A 6.52 Hohlraumboden mit Teppichrückständen



A 6.53



a

b

c

A 6.54

### 6.3.2. Erhebungen zum Aufwand des selektiven Rückbaus

Ein konsequenter selektiver Rückbau wird in Deutschland noch selten praktiziert. Über den Urban Mining e. V. in Essen wurden Kontakte zum Abbruchunternehmen PL Bagger und Fuhrbetrieb in Waldkraiburg/Bayern aufgenommen. Auf der Rückbaustelle eines dreigeschossigen Mehrfamilienwohnhauses in Waldkraiburg (Abb. A 6.53) konnten daraufhin Daten für verschiedene Entkernungs- und Abbrucharbeiten mit hohem Selektierungsgrad erhoben werden. Die Abfälle wurden konsequent getrennt gesammelt und der Verwertung zugeführt (Abb. A 6.54). Nach Angaben der Abbruchunternehmerin Pacello können durch den selektiven Rückbau z. B. Störstoffanteile in mineralischen Abbruchabfällen von unter 1% erreicht werden, indem Fremdstoffe im Mauerwerk nicht wie üblich bei der Aufbereitung maschinell getrennt werden, sondern bereits vor dem Abbruch selektiv ausgebaut werden. So wurden beispielsweise Installationen (Lichtschalter, Steckdosen, Verteilerdosen etc.) manuell herausgebrochen (s. Abb. A 3.13 auf Seite 51). In der Folge lag der Preis für die Annahme der mineralischen Abbruchabfälle mit rund 3,90 € brutto pro Tonne weit unter dem bundesdeutschen Durchschnitt von 23,40 € pro Tonne (Stand 2016).

Die Recherchen auf der Rückbaustelle in Waldkraiburg wurden im Juli 2016 durchgeführt. In einer einwöchigen Hospitation wurde der zeitliche Arbeitsaufwand des Rückbaupersonals für verschiedene Tätigkeiten auf einer jeweils größeren Fläche gemessen und der Energieverbrauch der



a



b



c



Material	Verbindungs- mittel	Rückbau- tätigkeit	Hilfsmittel	Fläche <sup>1</sup> [m <sup>2</sup> ]	Personen [n]	Arbeitszeit [Min./P.]	Arbeit (W) [MJ/m <sup>2</sup> ]	Maschine	Kraftstoff- verbrauch [l]	Heizwert [MJ/l]	Arbeit (W)		
											Maschinen		
Linoleum	reversibler Kleber	Linoleum entfernen	Stoß- scharre	26	1	15	0,57	0,19	-	-			
Zementestrich	gegossen	Estrich aufschneiden		238	1	128	0,54	0,18	Trenn- schleifer <sup>2</sup>	4,0	0,017	31,7	0,54
Dämmung: Mineralwolle und EPS	lose verlegt	Estrich aufhebeln und Dämmung entfernen	Stemm- eisen	16	3	39	4,5	1,51	-	-	-	-	
							5,61	1,88				0,54	

1 Die Rückbauarbeiten wurden in verschiedenen Räumen gemessen, da nicht raum- sondern etagenweise vorgegangen wurde  
 2 mit Benzingemisch (Gerätebenzin) betrieben: 98% Ottokraftstoff Super, 2% Zweitakt-Motoröl

A 6.55

eingesetzten Maschinen dokumentiert. Die Daten wurden anschließend in Kennwerte pro m<sup>2</sup> Fläche umgerechnet. Abb. A 6.55 zeigt die erhobenen Daten am Beispiel des selektiven Rückbaus des Fußbodenaufbaus aus Abb. A 6.56.

Die Berechnung der Personenarbeit wurde bereits auf Seite 128 beispielhaft beschrieben, deshalb wird hier nur noch einmal die Berechnung der Maschinenarbeit beispielhaft erläutert:

Im Gegensatz zu der Versuchsreihe (Kapitel 6.2) wurde nicht die Zeit des Maschineneinsatzes und deren Leistung (bzw. durchschnittlicher Energieverbrauch), sondern der während des Einsatzes verbrauchte Energieträger (Kraftstoff als chemisch gebundene Energie) in Litern gemessen. Der Kraftstoffverbrauch wurde durch Multiplikation mit dem kraftstoffspezifischen Heizwert (vgl. Kapitel 5, Seite 103) in die physikalische Größe Arbeit mit der Einheit Joule bzw. dessen Vielfachem Megajoule umgerechnet. Für den in Abb. A 6.55 beispielhaft dokumentierten Maschineneinsatz berechnet sich die Arbeit wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Arbeit (W)} &= 0,017 \text{ l/m}^2 \times 31,7 \text{ MJ/l}^{50} \\ &= 0,54 \text{ MJ/m}^2 \end{aligned}$$

- A 6.53 Rückbauprojekt Wohnhaus in Waldkri-  
burg/Bayern
- A 6.54 Abfalltrennung  
a Kunststoff  
b Holz  
c Metall
- A 6.55 Dokumentation des Rückbauaufwands am  
Beispiel des Bodenbelags aus Abb. A 6.56
- A 6.56 selektiver Rückbau eines Bodenbelags  
a Entfernen Oberboden  
b, c Einschneiden Estrich  
e Rückbau Trittschalldämmung  
f sortenreine Entsorgung

50 Der volumetrische Heizwert von Ottokraftstoff beträgt nach Pischinger [165] 31,7 MJ/l.



d



e



f

A 6.56

---

Bei der Vor-Ort-Recherche wurden folgende Tätigkeiten dokumentiert:

- Holztür mit Zarge ausbauen
- Installationen aus Mauerwerk brechen
- Oberputz aus Kunstharz auf Innenwand entfernen
- PVC-Oberboden entfernen, stark verklebt
- Linoleum-Oberboden entfernen, reversibel verklebt
- Estrich mit Trittschalldämmung ausbauen
- Steildach mit Ziegeldeckung (ungedämmt) abdecken
- Dachstuhl abbrechen
- Fensterflügel ausbauen und entglasen

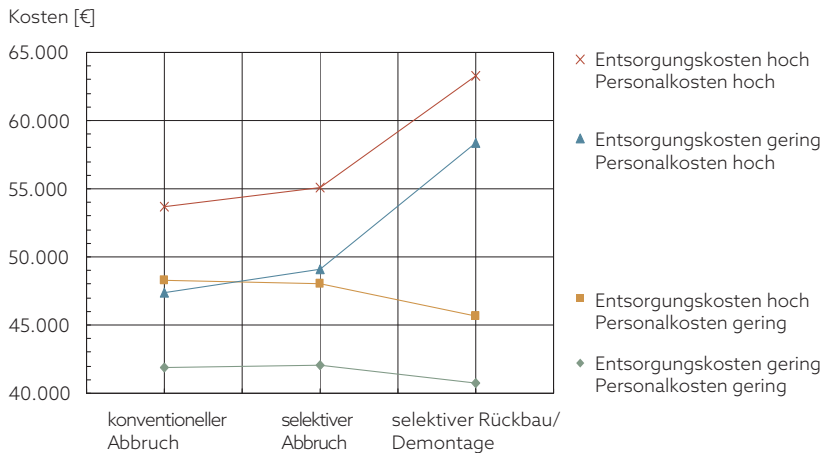
Die Aufstellung beinhaltet zwar nur beispielhafte selektive Rückbauarbeiten, dennoch kann anhand der Dokumentation gezeigt werden, dass der in Kapitel 5.3.1 definierte Faktor Arbeit in der Praxis messbar ist.

Die Arbeiten erforderten im Vergleich zum konventionellen Abbruch viel Handarbeit. Der Personalaufwand war dementsprechend hoch. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ist zu berücksichtigen, dass auf der Rückbaustelle vorwiegend ausländische Mitarbeiter aus Südosteuropa beschäftigt wurden, die in der Regel zum Mindestlohn arbeiten. Es stellt sich deshalb die Frage, ob sich der selektive Rückbau nur rentiert, wenn die Personalkosten niedrig sind. Diese Frage kann durch Untersuchungen auf Rückbaustellen nur schwer beantwortet werden, da das Verhältnis von Entsorgungskosten und Arbeitsaufwand für zwei baugleiche Gebäude mit unterschiedlicher Demontagetiefe und Selektionsgrad untersucht werden müsste. Ein separates Forschungsprojekt könnte hierzu wichtige Erkenntnisse liefern.

Müller [166] hat in der Auswertung eines Modellprojekts auf Datenbasis von Schultmann den Einfluss der Personal- und Entsorgungskosten auf die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus dargestellt (Abb. A 6.57). Betrachtet man das Verhältnis der Rückbau- zu den Entsorgungskosten differenziert nach konventionellem Abbruch und selektivem Rückbau, wird deutlich, dass vor allem die Ausgaben für Personal eine höhere Relevanz für die Gesamtkosten haben als die Ausgaben für die Entsorgung. Dies erklärt, warum der verwertungsorientierte, aber personalintensive selektive Rückbau nicht durchgehend angewendet wird. Die Gegenüberstellung zeigt weiterhin, dass der selektive Rückbau vor allem bei geringen Personalkosten wirtschaftlich ist. Für die Zukunft sind steigende Entsorgungskosten anzunehmen, sodass der selektive Rückbau zunehmend wirtschaftlich wird.

Für die Auswertung der hier durchgeführten Datenerhebung sind die Personalkosten nicht relevant, da der Faktor Arbeit nicht monetär bewertet, sondern anhand der physikalischen Größe Arbeit gemessen wird.

Der zeitliche Aufwand für den Personaleinsatz war genauso messbar wie in der Versuchsreihe für die Fassaden- und Dachbekleidungen (Kapitel 6.2). Ein Unterschied bestand darin, dass in der Praxis nicht schichtenweise pro Bauteil oder Raum vorgegangen wird, sondern dass in der



A 6.57 Einfluss von Entsorgungskosten und Personalkosten auf die Abbruch- bzw. Rückbaukosten anhand von vier Modellrechnungen für ein Wohngebäude in Massivbauweise (Baujahr 1856) mit 4.200 cbm Bruttorauminhalt (BRI) [166]

Regel eine bestimmte Tätigkeit am effizientesten durchgeführt werden kann, wenn jeweils eine große Fläche bearbeitet wird. So wurde beispielsweise der Rückbau des Fußbodenaufbaus in verschiedenen Etagen dokumentiert, da Arbeiter in einer Etage noch mit dem Lösen des Oberbodens beschäftigt waren, während weitere Arbeitskräfte in anderen Etagen bereits den Estrich ausbauten. Letzterer konnte außerdem nur zusammen mit der Trittschalldämmung dokumentiert werden, da er stückweise in ca. 1 m<sup>2</sup> großen, geschnittenen Platten herausgeholt wird. Um beim Herausnehmen der nächsten Platte nicht auf der Dämmung zu stehen, entfernten die Arbeiter schrittweise das Dämmmaterial. Dies hat zur Folge, dass bei der Bewertung des Faktors Arbeit für einen Fußbodenaufbau entweder Estrich und Trittschalldämmung gemeinsam bewertet werden müssen oder sinnvolle Annahmen zur Verteilung des Zeitaufwands auf den Rückbau der Schichten getroffen werden müssen.

Die Ergebnisse der auf der Baustelle erhobenen und ausgewerteten Daten wurden mit den Daten der Versuchsreihe (Kapitel 6.2) und den Auswertungen der Daten anderer Wissenschaftler (Kapitel 6.4) in einem tabellarischen Bauteilkatalog zusammengefasst (Kapitel 6.5).

## 6.4. Auswertung von Daten anderer Wissenschaftler zum Rückbauaufwand

In der Literaturrecherche wurden quantitative Daten zum Rückbauaufwand bei Schultmann et al. und bei Graubner et al. gefunden (s. Kapitel 4.3.1). Dieses Unterkapitel widmet sich der Auswertung dieser Daten.

### 6.4.1. Auswertung der Daten von Schultmann et al.

Die von Schultmann et al. dokumentierten Dauerkennwerte (Zeitaufwandswerte) für den Abbruch typischer Rohbau-Materialien beziehen sich auf ein Bauteilvolumen von jeweils 1 m<sup>3</sup> und sind nach Abbruchverfahren gegliedert (s. Abb. A 4.13 auf Seite 73). Für die hier vorliegende Arbeit werden jedoch flächenbezogene Daten benötigt. Es ist deshalb zunächst erforderlich, typische Rohbauteile zu definieren und zu dimensionieren, die mit den dokumentierten Daten abgebildet werden können. Da in der Planungspraxis Bauteile nach DIN 276 [167] gegliedert werden, wird hier ebenso vorgegangen. Die Tabelle in Abb. A 6.59 enthält beispielhafte Bauteile des Rohbaus, denen typische Materialien und gängige Dimensionierungen zugewiesen wurden. Linienförmige Bauteile (z. B. Stützen) werden wie schmale Wandstücke behandelt und in m<sup>2</sup> Fläche umgerechnet. Für Stahlprofile wird der Rückbauaufwand pro m Länge anhand der Querschnittfläche berechnet

#### Ermittlung des zeitlichen Rückbauaufwands nach Abbruchverfahren

Um den Arbeitsaufwand für den Rückbau zu ermitteln, wird den definierten Bauteilen je nach Materialart ein geeignetes Abbruchverfahren zugeordnet. Für die Bestimmung des Abbruchverfahrens wird die Matrix aus Kapitel 3.3, Abb. A 3.14 auf Seite 53 genutzt.

Durch Multiplikation der volumenbezogenen Dauerkennwerte für die jeweiligen Abbruchverfahren mit der Bauteilstärke wird die Dauer des Abbruchs für 1 m<sup>2</sup> Bauteilfläche berechnet. Kommen mehrere Abbruchverfahren gleichermaßen in Betracht, wird der Mittelwert der Dauerkennwerte für die Berechnung des zeitlichen Rückbauaufwands herangezogen. Die Formel lautet wie folgt:

$$t_R \text{ [h/m}^2\text{]} = d \text{ [m]} \times t_K \text{ [h/m}^3\text{]}$$

$t_R$	Dauer Rückbau
$d$	Stärke/Schichtdicke
$t_K$	Dauerkennwert
[h/m <sup>2</sup> ]	Stunden pro Quadratmeter
[m]	Meter
[h/m <sup>3</sup> ]	Stunden pro Kubikmeter

Für den Rückbau eines Quadratmeters einer 20 cm starken Stahlbeton-Bodenplatte im Stemmverfahren ergibt sich nach der Tabelle in Abb. A 6.59 eine Dauer von:

$$t_R = 0,2 \text{ m} \times 0,06 \text{ h/m}^3 \\ = 0,012 \text{ h/m}^2$$

$$\underline{\underline{= 43,2 \text{ s/m}^2}} \quad (0,012 \text{ h/m}^2 \times 3.600 \text{ s/h})$$

Bauteilgruppe	Bauteil	Material	Stärke bzw. Länge	Fläche	Abbruchverfahren	Dauer- kennwert	Dauer	Arbeit Personen (brutto)	Kraft- stoff- bedarf (Diesel)	Arbeit Maschine (brutto)
(KGR DIN 276)			[m]	[m <sup>2</sup> ]		[h/m <sup>3</sup> ]	[h]	[MJ]	[l/h]	[MJ]
320_Gründung	Streifenfundament	Beton, unbewehrt	0,60	0,80	Stemmen	0,040	0,019	0,0129	29,0	19,8
	Bodenplatte	Stahlbeton	0,20	1,00	Stemmen	0,060	0,012	0,0080	29,0	12,4
	Bodenplatte, lastabtragend	Stahlbeton	0,50	1,00	Stemmen	0,060	0,030	0,0201	29,0	31,0
330_Außenwände	Außenwand, tragend	Stahlbeton	0,20	1,00	Pressschneiden	0,060	0,012	0,0080	27,0	11,5
	Außenwand, tragend	Ziegel-Mauerwerk	0,24	1,00	diverse (Mittelwert)	0,042	0,010	0,0067	22,0	7,8
	Außenwand, tragend	Porenbeton	0,24	1,00	diverse (Mittelwert)	0,040	0,010	0,0064	22,0	7,5
	Außenwand, tragend	Holz (massiv)	0,20	1,00	diverse (Mittelwert)	0,060	0,012	0,0080	25,0	10,7
	Kelleraußenwand, tragend	WU-Stahlbeton	0,25	1,00	Pressschneiden	0,060	0,015	0,0101	27,0	14,4
	Außenstützen	Stahlbeton	0,25	0,25	Pressschneiden	0,060	0,004	0,0025	27,0	3,6
	Außenstützen	Holz	0,25	0,25	Abgreifen	0,030	0,002	0,0013	21,0	1,4
	Außenwandbekleidung	Stahlbetonfertigteile	0,10	1,00	Pressschneiden	0,060	0,006	0,0040	27,0	5,8
	340_Innenwände	Innenwand, tragend	Kalksandstein	0,24	1,00	diverse (Mittelwert)	0,045	0,011	0,0072	22,0
Innenwand, tragend		Holz (massiv)	0,16	1,00	diverse (Mittelwert)	0,060	0,010	0,0064	25,0	8,5
Innenwand, nicht tragend		Ziegel-Mauerwerk	0,12	1,00	diverse (Mittelwert)	0,042	0,005	0,0032	22,0	3,8
Innenwand, nicht tragend		Holz (massiv)	0,12	1,00	diverse (Mittelwert)	0,060	0,007	0,0048	25,0	6,4
Innenstützen		Stahlbeton	0,40	0,40	Pressschneiden	0,060	0,010	0,0064	27,0	9,2
Innenstützen		Holz	0,20	0,20	Abgreifen	0,030	0,001	0,0008	21,0	0,9
Innenstützen		Stahlhohlprofil, Ø 150 mm	1,00	0,00216*	Scherschneiden	1,560	0,003	0,0023	29,0	3,5
350_Decken	Ortbetondecke	Stahlbeton	0,20	1,00	Pressschneiden	0,060	0,012	0,0080	27,0	11,5
	Holzdecke	Holz (massiv)	0,24	1,00	diverse (Mittelwert)	0,060	0,014	0,0096	25,0	12,8
	Deckenträger	Stahlprofil, HEB 200	1,00	0,00781*	Scherschneiden	1,560	0,012	0,0082	29,0	12,6
360_Dächer	Ortbetondecke	Stahlbeton	0,16	1,00	Pressschneiden	0,060	0,010	0,0064	27,0	9,2
	Fertigteildecke	Stahlbeton	0,16	1,00	Pressschneiden	0,060	0,010	0,0064	27,0	9,2
	Holzdecke	Holz (massiv)	0,22	1,00	diverse (Mittelwert)	0,060	0,013	0,0088	25,0	11,7

\* Querschnitte der Stahlprofile nach Krauss/Führer/Jürges [168]

A 6.59

Für den Rückbau eines linienförmigen Streifenfundaments aus unbewehrtem Beton im Stemmverfahren ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 t_R &= 0,6 \text{ m} \times 0,04 \text{ h/m}^3 \\
 &= 0,024 \text{ h/m}^2 \\
 &\underline{\underline{\leq 86,4 \text{ s/m}^2}} \quad (0,024 \text{ h/m}^2 \times 3.600 \text{ s/h})
 \end{aligned}$$

Bei einer Fundamentbreite von 0,8 m ergibt sich eine Dauer von  $0,024 \text{ h/m}^2 \times 0,8 \text{ m} = 0,019 \text{ h/m}$ . Dies entspricht 68,4 Sekunden pro Meter Streifenfundament.

Der ermittelte zeitliche Rückbauaufwand erscheint zunächst sehr gering. In der Praxis sind massive Konstruktionen mit den heutigen hochtechnisierten Abbruchmaschinen tatsächlich relativ schnell abzurechnen – allerdings nur mit entsprechend hohem Energieaufwand, wie die folgenden Auswertungen zeigen.

Die Dauerkennwerte von Schultmann et al. beziehen sich auf den Einsatz von zwei Arbeitskräften und einen 40-Tonnen-Bagger. Im Folgenden wird der Arbeitsaufwand für Personen und Maschinen ermittelt.

- A 6.59 flächenbezogene Zeitaufwandswerte und Energiebedarfe für den Abbruch beispielhafter Rohbauteile  
Grundlagen der Berechnung:
- Matrix für Abbruchverfahren aus Kapitel 3.3, Abb. A 3.14
  - Dauerkennwerte von Schultmann et al. aus Kapitel 4, Abb. A 4.13
  - Heizwert Dieselmotorkraftstoff 35,6 MJ/l nach Pischinger [169]

### Arbeitsaufwand für Personen

Durch Multiplikation der ermittelten Rückbaudauer mit der in Kapitel 5.3.1 definierten Bruttoleistung pro Arbeiter wird die Arbeit von Personen pro m<sup>2</sup> Bauteilfläche ermittelt:

$$W_p \text{ [MJ/m}^2\text{]} = P_p \text{ [MJ/h]} \times t_R \text{ [h/m}^2\text{]}$$

$W_p$  Arbeit Personen (brutto)  
 $P_p$  Leistung Personen (brutto)  
 $n$  Anzahl Arbeitskräfte  
[MJ/h] Megajoule pro Stunde  
[MJ/m<sup>2</sup>] Megajoule pro Quadratmeter

Für den Personeneinsatz beim Rückbau der beispielhaft genannten 20 cm starken Stahlbeton-Bodenplatte beträgt die Größe Arbeit bei zwei Arbeitskräften:

$$\begin{aligned} W_p &= 0,335 \text{ MJ/h} \times 2 \times 0,012 \text{ h/m}^2 \\ &= 0,008 \text{ MJ/m}^2 \end{aligned}$$

Aufgrund des geringen Anteils der Personenarbeit an der Gesamtgröße Arbeit (für den Rückbau der hier auszuwertenden Rohbaumaterialien) wird vernachlässigt, dass der Maschinenführer einen geringeren Leistungsumsatz hat als eine Person mit schwerer körperlicher Tätigkeit.

### Arbeitsaufwand für Maschinen

Ebenso wird anhand der Rückbaudauer und des durchschnittlichen Kraftstoffbedarfs mit der in Kapitel 5.3.1 auf Seite 103 genannten Formel die Größe Arbeit für Maschinen ermittelt.

Der durchschnittliche Kraftstoffbedarf wird der Tabelle aus Kapitel 5, Abb. A 5.10, entnommen. Abbruchbagger werden in der Regel mit Dieselmotoren betrieben. Durch Multiplikation des Kraftstoffbedarfs mit dem volumetrischen Heizwert für Diesel<sup>51</sup> und der Dauer des Maschineneinsatzes wird die Arbeit in der Einheit Joule bzw. dessen Vielfachem Megajoule ermittelt.

Für den Rückbau der zuvor beispielhaft genannten 20 cm starken Stahlbeton-Bodenplatte im Stemmverfahren beträgt die Größe Arbeit für Maschinen demnach:

$$\begin{aligned} W_M &= 29,0 \text{ l/h} \times 35,6 \text{ MJ/l} \times 0,012 \text{ h/m}^2 \\ &= 12,4 \text{ MJ/m}^2 \end{aligned}$$

Die ausgewerteten Daten von Schultmann et al. werden in den tabellari-schen Bauteilkatalog in Kapitel 6.5 überführt.

51 Dieselkraftstoff hat nach Pischinger [169] einen volumetrischen Heizwert von 35,6 MJ/l.



### 6.4.2. Auswertung der Daten von Graubner et al.

Graubner et al. haben den Rückbauaufwand für verschiedene hybride Innen- und Außenbauteile untersucht. Dabei wurde der Zeitaufwand in Personenstunden und der Energieaufwand für den Einsatz von Maschinen in Kilowattstunden festgehalten. Da es sich um Verbundbauteile handelte, waren die Materialien nicht sortenrein rückbaubar. Die Masseverluste und Restanhaftungen wurden nur für die Außenbauteile dokumentiert. Abb. A 6.58 zeigt eine beispielhafte Dokumentation des Rückbauaufwands für ein WDVS mit EPS auf einer Betonwand. Die Bauteilschichten in grauer Schrift wurden nicht für jedes Bauteil untersucht, sondern von einem Bauteil mit gleicher Bekleidung aber unterschiedlicher Tragkonstruktion übernommen.

Die Untersuchungsergebnisse von Graubner et al. sind in Anlage 2 tabellarisch zusammengestellt.

Von den Wissenschaftlern der TU Darmstadt wurden Entsorgungswege festgelegt, um die daraus resultierenden Umweltwirkungen und Entsorgungskosten zu berechnen. Die Festlegungen liefern Informationen für die Einstufung der Wertstoffe bzw. Abfälle von hybriden Bauteilen in die Qualitätsstufen nach Kapitel 5.1.2.

Für fast alle untersuchten Bauteile war eine stoffliche Verwertung aufgrund von Restanhaftungen nicht möglich oder mangels Rücknahmelogistik nicht praktikabel. Die einzigen Baustoffe mit Kreislaufpotenzial sind die Kunststoffabdichtungsbahnen der Flachdächer und die unbehandelten Holzbekleidungen der Innenwände sowie die verwendeten nachwachsenden Rohstoffe (Holzfaserdämmstoffe). Bei Letzteren ist aufgrund der Verunreinigungen (Fremdstoffanteile, z. B. durch anhaftenden Mörtel) jedoch keine stoffliche, sondern nur eine energetische Verwertung möglich.

Auch wenn die meisten von Graubner et al. untersuchten Bauteile kein Kreislaufpotenzial aufweisen, können die dokumentierten Rückbaudauern und Energieaufwendungen dennoch zur Ermittlung von Benchmarks verwendet werden, da alle Materialien selektiv zurückgebaut wurden.

Die ausgewerteten Daten werden in den tabellarischen Bauteilkatalog in Kapitel 6.5 überführt.

W 01 Außenwand Beton WDVS EPS geklebt								
S.-Nr.	Herstellung			S.-Nr.	Rückbau			
	Schichtname/Produkt	Schichtdicke in [mm]	Masse in [kg]		Schichtname	Arbeitszeitaufwand in [h]	Energie in [kWh]	Masse in [kg]
2.7	Silikonharzputz, Heck SHP KC 3	3	3,98	2.4-2.7	Putzschicht	0,015		6,530
2.6	Grundierung Heck UG		0,24					
2.5	Armierungsmörtel Heck K+A	5	4,26					
2.4	Armierungsgewebe Heck AGG fine		0,18	2.2.3	Baumisch-Rest (EPS+Klebem.)	0,037		0,620
2.2	EPS, Heck Dämmplatte 035	100	1,53	2.2.2	EPS	0,05	0	1,53
				2.2.1	Baumisch-Rest (EPS+Klebem.)	0,02	0	
2.1	Klebemörtel, Heck K+A	5	4,60	2.1	Klebemörtel	0,03	0	4,52
	<b>Summe</b>	<b>113</b>	<b>14,66</b>		<b>Summe</b>	<b>0,152</b>	<b>0</b>	<b>13,2</b>

A 6.58 Beispielhafte Dokumentation der Untersuchungsergebnisse von Graubner et al. [170]

## 6.5. Tabellarischer Bauteilkatalog

Auf den Folgeseiten werden alle ausgewerteten Konstruktionen in einem tabellarischen Bauteilkatalog zusammengeführt, aus dem dann die Benchmarks für den Rückbauaufwand abgeleitet werden.

### 6.5.1. Inhalt und Gliederung

Die Bauteile werden nach folgenden Gruppen gegliedert:

- A Primär- und Sekundärkonstruktion, flächige Bauteile
- B Primär- und Sekundärkonstruktion, lineare Bauteile (Stützen)
- C Nichttragende Bauteile Fassade
- D Nichttragende Innenbauteile
- E Nichttragende Bauteile Dach

Die Gliederung ermöglicht eine differenzierte Ermittlung von Benchmarks für den Rückbauaufwand in Abhängigkeit von der Funktion der Bauteile.

Der Bauteilkatalog enthält für jedes Element die Bruttoarbeit pro m<sup>2</sup> Bauteilfläche oder pro m Bauteillänge, die sich aus der Summe des Personen- und Maschinenenergieaufwands ergibt (siehe Folgeseiten).

### 6.5.2. Ableitung von Benchmarks für den Rückbauaufwand

Für jede der oben genannten Gruppen A bis E werden eigene Benchmarks gebildet. Hierfür werden die Bruttoarbeitswerte der Bauteile in Quintile (Fünftel) eingeteilt, sodass sie auf einer fünfstufigen Skala abgebildet werden können. Im Gegensatz zu der Einteilung in Quartile (vgl. Punkt 6.1.3) ergibt sich bei einer Einteilung in Quintile eine mittlere Bandbreite. Die Bewertung wird für jedes Bauteil einer Gruppe nach folgendem Schema vorgenommen:

<u>Arbeit [MJ/m<sup>2</sup>]</u>	<u>Bewertung Rückbauaufwand</u>
≤ 1. Quintil	sehr gering
≤ 2. Quintil	gering
≤ 3. Quintil	mittel
≤ 4. Quintil	hoch
> 4. Quintil	sehr hoch

Das Vorgehen wird am Beispiel der Gruppe A (flächige Bauteile der Primär- und Sekundärkonstruktion) erläutert:

Den höchsten Rückbauaufwand hat die lastabtragende, 50 cm starke Stahlbetonbodenplatte (Bauteil Nr. 324.02) mit einem Gesamtarbeitswert von rund 31 MJ/m<sup>2</sup>. Den geringsten Rückbauaufwand weist in der Gruppe der flächigen tragenden Bauteile das Steildach in Holzkonstruktion (Bauteil Nr. 361.03) mit einem Gesamtarbeitswert von rund 0,1 MJ/m<sup>2</sup> auf. Die Spanne zwischen diesen Werten wird in Quintile geteilt. Das erste Quintil bilden die Werte zwischen 0,1 MJ und 7,1 MJ, d. h., ein Fünftel aller Bauteile hat einen Rückbauaufwand zwischen diesen beiden Werten, gemessen in MJ/m<sup>2</sup>. Das zweite Quintil bilden die Werte zwischen 7,1 MJ und 8,7 MJ usw.

Durch die Berechnung der Quintile ergibt sich für die Gruppe A folgende Skala:

Arbeit	Bewertung Rückbauaufwand
$\leq 7,1 \text{ MJ/m}^2$	sehr gering
$\leq 8,7 \text{ MJ/m}^2$	gering
$\leq 11,5 \text{ MJ/m}^2$	mittel
$\leq 12,6 \text{ MJ/m}^2$	hoch
$> 12,6 \text{ MJ/m}^2$	sehr hoch

Für die übrigen Gruppen B bis E wird ebenso verfahren. Die Quintile der jeweiligen Gruppe sind in dem nachfolgenden Bauteilkatalog dargestellt.

### 6.5.3. Plausibilitätsprüfung und Korrekturen

Ein Nachteil der Skalierung über Quantile ist eine Abhängigkeit von der Anzahl der Datensätze. Die Daten müssen ein möglichst großes Spektrum von Konstruktionen abbilden. Sehr ähnliche Bauteile mit nur geringfügigen Abweichungen untereinander dürfen nicht in großer Zahl in die Berechnung der Quantile einfließen, da deren Anzahl sonst das Ergebnis zu sehr beeinflusst.

Die Auswertungen der Forschungsergebnisse von Graubner et al. enthalten viele Daten über Wärmedämmverbundsysteme, die sich in ihrem Aufbau hinsichtlich Materialität und Fügung zwar unterscheiden, aber innerhalb der Gruppe C (nichttragende Bauteile Fassade) einen sehr ähnlichen Rückbauaufwand aufweisen. Um die Skala dadurch nicht zu verfälschen, wurde aus den WDVS-Putzen und WDVS-Dämmungen jeweils der Mittelwert gebildet (siehe Bauteil Nr. 335.14 und 335.15) und nur dieser Mittelwert in die Berechnung der Quintile einbezogen.

Die Auswertungen der Daten von Graubner et al. zum Rückbauaufwand von Dachabdichtungen wurden mit den selbst ermittelten Daten verglichen. Bereits in den Erhebungen von Graubner et al. wurden erhebliche Differenzen beim Rückbau von Bitumenbahnen mit gleicher Fügung und gleichem Untergrund ausgewiesen (z.B. Bauteil 363.11 und 363.21). Diese Differenzen führten Graubner et al. auf unterschiedliche Temperaturen beim Rückbau zurück.

Bei den eigenen Erhebungen für bituminöse Abdichtungen wurde trotz rückbaufreundlicher Konstruktion (lose Auflagen) ein leicht höherer Rückbauaufwand ggü. den Untersuchungen von Graubner et al. ermittelt. Die Bewertung der jeweiligen Bauteile wurde deshalb nach Plausibilität in Bezug auf den Bauteilaufbau korrigiert (siehe Begründungen im Bauteilkatalog auf Seite 153).

Weiterhin wurde die am Benchmark orientierte Bewertung des Rückbauaufwands der 20 cm starken Stahlbeton-Bodenplatte (Bauteil Nr. 324.01) von hoch auf sehr hoch geändert, da die Platte im Gegensatz zu der 50 cm starken Stahlbeton-Bodenplatte zusätzlich lastabtragende Fundamente erfordert, die nicht pauschal pro  $\text{m}^2$  berechnet werden können.

Hinweis: der Bauteilkatalog auf den Folgeseiten bildet beispielhafte Baukonstruktionen ab. Es wurde ein möglichst breites Spektrum an Konstruktionen recherchiert und untersucht. Der Katalog dient zunächst der Erarbeitung der Methodik für den Urban Mining Index. Nicht abgebildete Konstruktionen können vom Anwender durch Vergleich mit den vorhandenen Bauteilen/Bauteilschichten selbst eingeschätzt werden.

Bauteilgruppen nach Kostengruppen DIN 276	Bauteil-Nr.	Bauteil/Bauteilschicht	Datenquelle	Personenaufwand Rückbau	
				Arbeitszeit [Min./m <sup>2</sup> ]	Bruttoarbeit Personen [MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>A Primär- und Sekundärkonstruktion, flächig</b>				[Min./m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
324	Unterböden und Bodenplatten	324.01_BO_Stb.-Bodenplatte, 20cm (auf Streifenfundamenten)	A	1,44	0,0080
		324.02_BO_Stb.-Bodenplatte, lastabtragend 50cm	A	3,60	0,0201
331	Außenwände, tragend	331.01_AW_Stahlbetonwand, 20cm	A	1,44	0,0080
		331.02_AW_Stahlbetonwand, erdberührt, 20cm, mit Bitumenabdichtung	A	8,04	0,0449
		331.03_AW_WU-Stahlbetonwand, 25cm	A	1,80	0,0101
		331.04_AW_Ziegel-Mauerwerk, tragend, 24cm	A	1,20	0,0067
		331.05_AW_Porenbeton-Mauerwerk, tragend, 24cm	A	1,15	0,0064
		331.06_AW_Holz-Massivbauweise, tragend, 20cm	A	1,44	0,0080
		331.07_AW_Holzständerwerk, 18cm, inkl. aussteifender OSB-Platte, Demontage zur Wiederverwendung	V	7,31	0,0408
341	Innenwände, tragend	341.01_IW_Kalksandsteinmauerwerk, tragend, 24cm	A	1,19	0,0067
		341.02_IW_Holz-Massivbauweise, tragend, 16cm	A	1,15	0,0064
342	Innenwände, nichttragend	342.01_IW_Ziegelmauerwerk, nicht tragend, 11,5cm	A	0,57	0,0032
		342.02_IW_Holz massiv, 12cm	A	0,86	0,0048
351	Decken- konstruktionen	351.01_DE_Stahlbetondecke, 20cm	A	1,44	0,0080
		351.02_DE_Stahlbetondecke, 28cm	A	2,02	0,0113
		351.03_DE_Holzdecke, massiv, 24cm	A	1,73	0,0096
361	Dach- konstruktionen	361.01_DA_Flachdach, Stahlbeton, 16cm	A	1,15	0,0064
		361.02_DA_Flachdach, Holz massiv, 22cm	A	1,58	0,0088
		361.03_DA_Steildach (Kehlbalken/Sparren/Lattung)	B	0,75	0,0042
<b>B Primär- und Sekundärkonstruktion, linear</b>				[Min./m]	[MJ/m]
322	Flachgründungen	322.01_Streifenfundament, Stahlbeton, 60x80cm	A	2,30	0,0129
333	Außenstützen	333.01_Außenstütze, Stahlbeton, 25x25cm	A	0,45	0,0025
		333.02_Außenstütze, Holz, 25x25cm	A	0,23	0,0013
343	Innenstützen	343.01_Innenstütze, Stahlbeton, 40x40cm	A	1,15	0,0064
		343.02_Innenstütze, Holz, 20x20cm	A	0,14	0,0008
		343.03_Innenstütze, Stahlhohlprofil, 150 mm Ø	A	0,40	0,0023
351	Deckenkonstruktionen	351.04_Deckenträger, Stahlprofil HEB 200	A	1,46	0,0082
<b>C Nichttragende Bauteile, Fassade</b>				[Min./m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
334	Außentüren und - fenster	334.01_AF_Isolierverglasung, geklemmt	V	1,40	0,0078
		334.02_AF_Fensterprofile Aluminium, verschraubt	V	5,60	0,0313
335	Außenwand- bekleidungen außen	335.01_AB_Profilholzschalung 20mm, verschraubt, Abbruch zur stofflichen Verwertung	A	1,73	0,0096
		335.02_AB_Rhombus-Holzleisten, verschraubt, manuelle Demontage zur Wiederverwendung	V	7,45	0,0416
		335.03_AB_Holz-UK, verschraubt	V	1,72	0,0096
		335.04_AB_Winddichtungsbahn, getackert	V	0,23	0,0013
		335.05_AB_VHF-Fassade, Faserzement mit Hinterschnittankern, Demontage z. Weiterverwendung	V	0,20	0,0011
		335.06_AB_VHF-Fassade, Faserzement, genietet	V	4,90	0,0274
		335.07_AB_AlU-Unterkonstruktion für VHF-Fassade	V	5,86	0,0327
		335.08_AB_VHF-Fassade, Naturstein, inkl. UK, manuelle Demontage zur Wiederverwendung	V	25,40	0,1418
		335.09_AB_VHF-Fassade, Alublechkassette, geklemmt	V	9,34	0,0521
		335.10_AB_Stahlbetonfertigteile, 10cm	A	0,72	0,0040
		335.11_AB_Klinkerfassade, vermörtelt, manuelle Demontage zur Wiederverwendung	V	69,90	0,3903
		335.12_AB_Ziegelfassade im Trockenstapelsystem, manuelle Demontage zur Wiederverwendung	V	8,20	0,0458
		335.13_AB_WDVS-Putz: mineralischer Putz mit Glasfasergewebe auf Mineraldämmplatte	V	0,55	0,0031
		335.14_AB_WDVS-Putz: Mittelwert	A		
		335.15_AB_WDVS-Dämmung: Mittelwert	A		
		335.16_AB_WDVS-Putz: Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung auf EPS	A	0,90	0,0050
335.17_AB_WDVS-Putz: Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung auf Holzfaserdämmung	A	1,02	0,0057		
335.18_AB_WDVS-Putz: Silikatputz mit Glasfaserarmierung auf EPS oder Mineralwolle	A	0,78	0,0044		
335.19_AB_WDVS-Putz: Silikatputz mit Glasfaserarmierung auf Mineralwolle	A	0,90	0,0050		
335.20_AB_WDVS-Putz: Mineralischer Putz mit Glasfaserarmierung auf EPS oder Holzfaserdämm.	A	1,02	0,0057		
335.21_AB_WDVS-Putz: Mineralischer Putz mit Glasfaserarmierung auf Mineralwolle	A	0,78	0,0044		
335.22_AB_WDVS-Dämmung: Mineraldämmplatte auf Porenbeton (monolithisch)	V	0,06	0,0003		
335.23_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt auf Beton	A	8,22	0,0459		
335.24_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt auf Kalksandsteinmauerwerk	A	19,68	0,1099		



Maschine	Maschinenaufwand Rückbau				Arbeit (W)			1. Quintil	2. Quintil	3. Quintil	4. Quintil	Einordnung Demontageaufwand	ggf. Korrektur	
	Leistung, brutto	Kraftstoffbedarf	Einsatzzeit	Kraftstoff Bedarf	Heizwert	Arbeit Maschinen	gesamt							
	[W]	[l/h]	[min/m <sup>2</sup> ]	[l/m <sup>2</sup> ]	[MJ/l]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]							
Hydraulikbagger		29,0	0,72	0,348	35,6	12,39	12,40					hoch	sehr hoch	
Hydraulikbagger		29,0	1,80	0,870	35,6	30,97	30,99					sehr hoch		
Hydraulikbagger		27,0	0,72	0,324	35,6	11,53	11,54					mittel		
Hydraulikb. + Elektrohammer		Bauteile 331.01 + 363.11					11,60	11,64					hoch	
Hydraulikbagger		27,0	0,90	0,405	35,6	14,42	14,43					sehr hoch		
Hydraulikbagger		22,0	0,60	0,220	35,6	7,83	7,84					gering		
Hydraulikbagger		22,0	0,58	0,211	35,6	7,52	7,53					gering		
Hydraulikbagger		25,0	0,72	0,300	35,6	10,68	10,69					mittel		
Akkuschrauber + Bohrmaschine	550 780		1,20 1,40		-	0,11	0,15					sehr gering		
Hydraulikbagger		22,0	0,65	0,238	35,6	8,46	8,47	7,1	8,7	11,5	12,6	gering		
Hydraulikbagger		25,0	0,58	0,240	35,6	8,54	8,55					gering		
Hydraulikbagger		22,0	0,29	0,105	35,6	3,75	3,76					sehr gering		
Hydraulikbagger		25,0	0,43	0,180	35,6	6,41	6,41					sehr gering		
Hydraulikbagger		27,0	0,72	0,324	35,6	11,53	11,54					mittel		
Hydraulikbagger		27,0	1,01	0,454	35,6	16,15	16,16					sehr hoch		
Hydraulikbagger		25,0	0,86	0,360	35,6	12,82	12,83					sehr hoch		
Hydraulikbagger		27,0	0,58	0,259	35,6	9,23	9,23					mittel		
Hydraulikbagger		25,0	0,79	0,330	35,6	11,75	11,76					hoch		
Motorsäge				0,002	31,7	0,07	0,07					sehr gering		
			[min/m]	[l/m]		[MJ/m]	[MJ/m]							
Hydraulikbagger		29,0	1,15	0,557	35,6	19,82	19,83					sehr hoch		
Hydraulikbagger		27,0	0,23	0,101	35,6	3,60	3,61					mittel		
Hydraulikbagger		21,0	0,11	0,039	35,6	1,40	1,40	1,8	3,5	7,0	12,0	sehr gering		
Hydraulikbagger		27,0	0,58	0,259	35,6	9,23	9,23					hoch		
Hydraulikbagger		21,0	0,07	0,025	35,6	0,90	0,90					sehr gering		
Hydraulikbagger		29,0	0,20	0,098	35,6	3,48	3,48					gering		
Hydraulikbagger		29,0	0,73	0,353		12,70	12,71					sehr hoch		
			[min/m <sup>2</sup> ]	[l/m <sup>2</sup> ]		[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]							
Akkuschrauber	550		2,22	-	-	0,07	0,105					gering		
Hydraulikbagger		21,0	0,0012	0,000	35,6	0,01	0,025					gering		
Akkuschrauber	550		3,37	-	-	0,11	0,153					hoch		
Akkuschrauber	550		0,77	-	-	0,03	0,035					mittel		
-				-	-	-	0,001					sehr gering		
-				-	-	-	0,001					sehr gering		
Bohrmasch. + Akkuschr.				-	-	-	0,027					gering		
Akkuschrauber	550		4,6	-	-	0,15	0,185					sehr hoch		
Trennschleifer	1100		4,4	-	-	0,29	0,432					sehr hoch		
-				-	-	-	0,052					mittel		
Hydraulikbagger		26,0	0,36	0,156	35,6	5,55	5,558					sehr hoch		
Bohrhammer	850		3,2	-	-	0,16	0,553	0,01	0,03	0,06	0,18	sehr hoch		
Akkuschrauber	550		0,5	-	-	0,02	0,062					hoch		
Trennschleifer	1200		0,5	-	-	0,04	0,039					mittel		
							0,005					sehr gering		
							0,291					sehr hoch		
-							0,005					sehr gering		
-							0,006					gering		
-							0,004					sehr gering		
-							0,005					sehr gering		
-							0,006					gering		
-							0,004					sehr gering		
Gabelstapler (Ersatz f. Abbruchbagger)	2,5		0,038	0,002	35,6	0,06	0,057					mittel		
-							0,046					mittel		
Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,21	0,315					sehr hoch		

Bauteilgruppen nach Kostengruppen DIN 276	Bauteil-Nr.	Bauteil/Bauteilschicht	Datenquelle	Personenaufwand Rückbau	
				Arbeitszeit	Bruttoarbeit Personen
<b>C Nichttragende Bauteile, Fassade (Fortsetzung)</b>				[Min./m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
336 Außenwand- bekleidungen außen	335.25_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt auf Ziegelmauerwerk	A	17,88	0,0998	
	335.26_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt auf Porenbeton	A	20,58	0,1149	
	335.27_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt + gedübelt auf Beton	A	14,58	0,0814	
	335.28_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt + gedübelt auf Kalksandsteinmauerwerk	A	15,06	0,0841	
	335.29_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt + gedübelt auf Ziegelmauerwerk (porosiert)	A	14,04	0,0784	
	335.30_AB_WDVS-Dämmung: Mineralwolle, geklebt + gedübelt auf Beton	A	8,28	0,0462	
	335.31_AB_WDVS-Dämmung: Mineralwolle, geklebt + gedübelt auf Kalksandsteinmauerwerk	A	17,64	0,0985	
	335.32_AB_WDVS-Dämmung: Mineralwolle, geklebt + gedübelt auf Ziegelmauerwerk (porosiert)	A	21,96	0,1226	
	335.33_AB_WDVS-Dämmung: Mineralwolle, geklebt + gedübelt auf Porenbeton	A	22,98	0,1283	
	335.34_AB_WDVS-Dämmung: Holzfaser, geklebt + gedübelt auf Beton	A	15,30	0,0854	
	335.35_AB_WDVS-Dämmung: Holzfaser, geklebt + gedübelt auf Kalksandsteinmauerwerk	A	19,62	0,1095	
	335.36_AB_WDVS-Dämmung: Holzfaser, geklebt + gedübelt auf Ziegelmauerwerk (porosiert)	A	21,30	0,1189	
	335.37_AB_WDVS-Dämmung: Holzfaser, geklebt + gedübelt auf Porenbeton	A	12,18	0,0680	
	335.38_AB_Dämmung Mineralwolle, mit Dämmstoffhalter auf Kalksandsteinmauerwerk befestigt	V	0,65	0,0036	
335.39_AB_Dämmung flexible Hanffaser, geklemmt zwischen Holzständerwerk	V	0,40	0,0022		
336 Außenwand- bekleidungen innen	336.01_AB_OSB-Platte, verschraubt, Fugen mit Luftdichtheitsband verklebt (mit Restanhaftungen)	V	2,64	0,0147	
	336.02_AB_MDF-Platte, verschraubt	V	1,10	0,0061	
337 Außenwände, elementiert	337.01_AE_Pfosten-Riegel-Fassade, Aluminium mit Isolierverglasung, Dichtungen EPDM, mit Anpressprofilen geklemmt	V	7,50	0,0419	
<b>D Nichttragende Innenbauteile</b>				[Min./m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
344 Innentüren und -fenster	344.01_IT_Holzzinnentür, einflügelig, mit Holzзарge, mechanisch befestigt	B	1,96	0,0109	
345 Innenwand- bekleidungen	345.01_IB_Kunstharz-Oberputz innen, ca. 2mm, auf haftgrundiertem Unterputz	B	0,30	0,0017	
	345.02_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Gipskartonwand	A	12,00	0,0670	
	345.03_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Ziegelmauerwerk mit Zementputz	A	12,00	0,0670	
	345.04_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Ziegelmauerwerk mit Gipsputz	A	7,80	0,0436	
	345.05_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Kalksandsteinmauerwerk mit Zementputz	A	7,20	0,0402	
	345.06_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Kalksandsteinmauerwerk mit Gipsputz	A	9,60	0,0536	
	345.07_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Stahlbetonwand mit Zementputz	A	8,40	0,0469	
	345.08_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Stahlbetonwand mit Gipsputz	A	7,80	0,0436	
	345.09_IB_Rauhfasertapete, verklebt mit Tapetenkleber (auf allen Untergründen)	A	2,40	0,0134	
	345.10_IB_Holzverschalung inkl. Holzlattung auf Mauerwerk mit Zement- oder Gipsputz	A	2,40	0,0134	
	345.11_IB_Holzverschalung inkl. Holzlattung auf Stahlbetonwand mit Zementputz	A	3,60	0,0201	
352 Deckenbeläge	352.01_DE_Zementestrich, 6cm, inkl. Trittschalldämmung	B	5,04	0,0281	
	352.02_DE_Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Zementestrich	A	22,50	0,1256	
	352.03_DE_Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Anhydritestrich	A	30,00	0,1675	
	352.04_DE_Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Gussasphalt	A	60,00	0,3350	
	352.05_DE_Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Trockenestrich	A	15,00	0,0838	
	352.06_DE_Natursteinplatten, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. Mörtel auf Zementestrich	A	12,00	0,0670	
	352.07_DE_Natursteinplatten, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. Mörtel auf Anhydritestrich	A	10,50	0,0586	
	352.08_DE_Natursteinplatten, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. Mörtel auf Gussasphalt	A	7,50	0,0419	
	352.10_DE_Natursteinplatten, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. Mörtel auf Trockenestrich	A	15,00	0,0838	
	352.11_DE_Laminat, verklebt auf Zementestrich	A	11,25	0,0628	
	352.12_DE_Laminat, verklebt auf Anhydrit- oder Gussasphaltestrich	A	15,00	0,0838	
	352.13_DE_Laminat, verklebt auf Trockenestrich	A	15,00	0,0838	
	352.14_DE_Textiler Bodenbelag, verklebt auf Zementestrich	A	4,50	0,0251	
	352.15_DE_Textiler Bodenbelag, verklebt auf Anhydritestrich	A	11,25	0,0628	
	352.16_DE_Textiler Bodenbelag, verklebt auf Gussasphaltestrich	A	10,50	0,0586	
	352.17_DE_Textiler Bodenbelag, verklebt auf Trockenestrich	A	4,50	0,0251	
	352.18_DE_Linoleum, mit reversiblen Kleber verklebt (nicht stuhlrolle geeignet) auf Zementestr.	B	0,57	0,0032	
	352.19_DE_Linoleum, verklebt (stuhlrolle geeignet) auf Zementestrich	B	6,00	0,0335	

Maschine	Maschinenaufwand Rückbau				Arbeit (W)		1. Quintil	2. Quintil	3. Quintil	4. Quintil	Einordnung Demontageaufwand	ggf. Korrektur
	Leistung, brutto [W]	Kraftstoffbedarf [l/h]	Einsatzzeit [min/m <sup>2</sup> ]	Kraftstoffbedarf [l/m <sup>2</sup> ]	Heizwert [MJ/l]	Arbeit Maschinen [MJ/m <sup>2</sup> ]						
Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,47	0,568					sehr hoch
Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,24	0,360					sehr hoch
Elektrofuchs, Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,05	0,135					hoch
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,21	0,293					sehr hoch
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,26	0,338					sehr hoch
Elektrofuchs, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,06	0,104					hoch
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,24	0,343					sehr hoch
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,33	0,457					sehr hoch
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,25	0,377					sehr hoch
Akkuschrauber + Elektrofuchs, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,22	0,301					sehr hoch
Akkuschrauber, Elektrofuchs, Elektrohammer, Energieaufw. n. Graubner et al.						0,29	0,401					sehr hoch
Akkuschrauber, Elektrofuchs, Elektrohammer, Energieaufw. n. Graubner et al.						0,33	0,454					sehr hoch
Akkuschrauber, Elektrofuchs, Elektrohammer, Energieaufw. n. Graubner et al.						0,10	0,165					hoch
-						-	0,004					sehr gering
-						-	0,002					sehr gering
Akkuschrauber	550		1,19			0,04	0,054					mittel
Akkuschrauber	550		0,5			0,02	0,023					gering
Akkuschrauber	550		2,78			0,09	0,13					hoch
			[min/m <sup>2</sup> ]	[l/m <sup>2</sup> ]		[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]					
-						-	0,011					sehr gering
-						-	0,002					sehr gering
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,29	0,355					mittel
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,58	0,643					mittel
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,19	0,238					gering
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,11	0,148					gering
Elektrohammer + Elektroschaber	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,76	0,810					mittel
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,18	0,227					gering
Elektrohammer + Elektroschaber	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,19	0,238					gering
-						-	0,013					sehr gering
-						-	0,013					sehr gering
-						-	0,020					sehr gering
Trennschleifer			0,017	31,7		0,53	0,561	0,02	0,24	0,83	1,14	mittel
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					1,17	1,296					sehr hoch
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					1,71	1,878					sehr hoch
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					3,60	3,935					sehr hoch
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					1,31	1,389					sehr hoch
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,94	1,003					hoch
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,81	0,869					hoch
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,36	0,402					mittel
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.					1,31	1,389					sehr hoch
Elektrostripper	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,90	0,963					hoch
Elektrostripper	Energieaufwand nach Graubner et al.					1,08	1,164					sehr hoch
Elektrostripper	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,95	1,029					hoch
-						-	0,025					gering
Elektrostripper	Energieaufwand nach Graubner et al.					0,90	0,963					hoch
Elektrostripper	Energieaufwand nach Graubner et al.					1,08	1,139					hoch
-						-	0,025					gering
-						-	0,003					sehr gering
-						-	0,034					gering

Bauteilgruppen nach Kostengruppen DIN 276	Bauteil-Nr.	Bauteil/Bauteilschicht	Datenquelle	Personenaufwand Rückbau	
				Arbeits- zeit	Bruttoarbeit Personen
E Nichttragende Bauteile, Dach				[Min./m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
363 Dachbeläge	363.01_DA_Dachdeckung, Tonpfannen, Rückbau unter Zerstörung	B		1,13	0,0063
	363.02_DA_Dachdeckung, Schiefer genagelt, Rückbau ohne Zerstörung	V		6,75	0,0377
	363.03_DA_Stehfalzdeckung Zink, inkl. Haften	V		4,15	0,0232
	363.04_DA_Unterdeckbahn, getackert	V		0,30	0,0017
	363.05_DA_Kiesauflage inkl. Trenn/Schutzvlies	V		3,10	0,0173
	363.06_DA_Abdichtung, PIB-Kunststoffbahn, lose verlegt auf Mineralwolle (mit Auflast befestigt)	A		1,20	0,0067
	363.07_DA_Dämmung, Mineralwolle lose verlegt auf Bitumendampfsperre (mit Auflast befestigt)	A		0,60	0,0034
	363.08_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn punktweise verschweißt auf Beton	A		0,03	0,0002
	363.09_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, obere Lage aufgeschweißt, untere Lage kaltselbstklebend auf EPS-Dämmung verklebt	A		9,00	0,0503
	363.10_DA_Dämmung, EPS verklebt auf Bitumendampfsperre	A		3,60	0,0201
	363.11_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn, vollflächig verschweißt auf Beton	A		6,60	0,0369
	363.12_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, obere Lage aufgeschweißt, untere Lage kaltselbstklebend auf Mineralwolle verklebt	A		3,60	0,0201
	363.13_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, vollflächig verschweißt auf Mineralwolle	A		4,20	0,0235
	363.14_DA_Dämmung, Mineralwolle verklebt mit PU-Kleber auf Bitumendampfsperre	A		1,50	0,0084
	363.15_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn, kaltselbstklebend auf Beton	A		3,60	0,0201
	363.16_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn, teilflächig verschweißt auf Beton	A		1,20	0,0067
	363.17_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, in Heißbitumen verklebt auf Schaumglasplatten	A		1,20	0,0067
	363.18_DA_Dämmung, Schaumglasplatten in Heißbitumen verlegt	A		10,80	0,0603
	363.19_DA_Dampfsperre, Heißbitumen auf Beton	A		3,00	0,0168
	363.20_DA_Dämmung, XPS lose verlegt auf Bitumendampfsperre (mit Auflast befestigt)	A		0,60	0,0034
	363.21_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, vollflächig verschweißt auf Beton (Umkehrdach)	A		1,20	0,0067
	363.22_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, vollflächig verschweißt auf Schaumglasplatten	A		0,60	0,0034
	363.23_DA_Dämmung, Schaumglasplatten auf Trapezblech verklebt	A		1,20	0,0067
	363.24_DA_Abdichtung, PIB-Kunststoffbahn mit Vliesrücken, verklebt mit PU-Kleber auf EPS oder Mineralwolle	A		0,60	0,0034
	363.25_DA_Abdichtung, PIB-Kunststoffbahn mit Klettstreifen und Schrauben auf EPS-Dämmung mechanisch befestigt	A		5,40	0,0302
	363.26_DA_Dämmung, EPS lose verlegt auf PE-Dampfsperre	A		0,60	0,0034
	363.27_DA_Dampfsperre, PE-Folie lose verlegt auf Trapezblech	A		0,60	0,0034
	363.28_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, lose verlegt (Nähte geschweißt, mit Auflast befestigt, Umkehrdach)	V		1,25	0,0070
	363.29_DA_Dämmung, Schaumglas auf Umkehrdach, 2 Lagen à 14cm lose verlegt	V		0,54	0,0030
	363.30_DA_Abdichtung, Dachbahn auf pflanzlicher Basis, 2-lagig, obere Lage verschweißt, untere Lage mechanisch befestigt auf Holzfaserdämmung	V		3,60	0,0201
	363.31_DA_Dämmung, Holzweichfaser, 2 Lagen à 16cm im Mittel, lose verlegt	V		0,60	0,0034
	363.32_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn, lose verlegt auf Holzschalung (Nähte geschweißt)	V		1,14	0,0064

Legende:

Auswertung von Daten anderer Wissenschaftler  
eigene Untersuchungen auf Rückbaustellen  
eigene Untersuchungen in Versuchsständen

A  
B  
V



Maschine	Maschinenaufwand Rückbau				Arbeit Maschinen	Arbeit (W) gesamt	1. Quintil	2. Quintil	3. Quintil	4. Quintil	Einordnung Demontage- aufwand	ggf. Korrektur
	Leistung, brutto	Kraftstoff- bedarf	Einsatzzeit	Kraftstoff- bedarf								
	[W]	[l/h]	[min/m <sup>2</sup> ]	[l/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]						
-				-	-	0,0063					gering	
-				-	-	0,0377					sehr hoch	
-				-	-	0,0232					hoch	
-				-	-	0,0017					sehr gering	
-				-	-	0,0173					hoch	
-				-	-	0,0067					gering	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0002					sehr gering	
-				-	-	0,0503					sehr hoch	hoch <sup>1</sup>
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.				0,06	0,0849					sehr hoch	
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.				0,06	0,0981					sehr hoch	hoch <sup>1</sup>
-				-	-	0,0201					hoch	
-				-	-	0,0235					sehr hoch	
-				-	-	0,0084					mittel	
-				-	-	0,0201					hoch	
-				-	-	0,0067					gering	mittel <sup>2</sup>
-				-	-	0,0067	0,0034	0,0067	0,0134	0,0234	gering	mittel <sup>2</sup>
-				-	-	0,0603					sehr hoch	
-				-	-	0,0168					hoch	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0067					gering	hoch <sup>3</sup>
-				-	-	0,0034					sehr gering	mittel <sup>4</sup>
-				-	-	0,0067					gering	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
Trennschleifer	Energieaufwand nach Graubner et al.				0,02	0,0492					sehr hoch	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0070					mittel	
-				-	-	0,0030					sehr gering	
-				-	-	0,0201					hoch	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0064					gering	

Korrekturen nach Plausibilitätsprüfung:

- Der Rückbau der Bitumenbahnen der Bauteile 363.09 und 363.11 wurde gemäß Dokumentation von Graubner et al. bei sehr hohen Temperaturen (29°C) durchgeführt. Aufgrund der temperaturbedingten Zähigkeit des Materials hat der Rückbau relativ lange gedauert. Die berechnete Arbeit war dementsprechend unverhältnismäßig hoch. Die am Benchmark orientierten Bewertungen wurden deshalb um eine Stufe von „sehr hoch“ auf „hoch“ korrigiert.
- Der von Graubner et al. gemessene zeitliche Rückbauaufwand für die teilflächig auf Beton verschweißten bzw. mit Heißbitumen verklebten Bitumenbahnen der Bauteile 363.16 und 363.17 ist geringer als der in eigenen Versuchsständen ermittelte Rückbauaufwand für lose verlegte Bitumenbahnen (Bauteil 363.28), was unplausibel ist.  
Da die berechnete Arbeit des Bauteils 363.16 und 363.17 außerdem an der oberen Grenze des 2. Quintils liegt, während die berechnete Arbeit des Bauteils 363.28 nur knapp darüber liegt, wird die am Quintil orientierte Bewertung der Bauteile 363.16 und 363.17 um eine Stufe von „gering“ auf „mittel“ korrigiert.
- Der von Graubner et al. gemessene zeitliche Rückbauaufwand für die vollflächig auf Beton verschweißten Bitumenbahnen des Bauteils 363.21 ist geringer als der in eigenen Versuchsständen ermittelte Rückbauaufwand für lose verlegte Bitumenbahnen (Bauteil 363.28), was unplausibel ist.  
Da die berechnete Arbeit des Bauteils 363.21 außerdem an der oberen Grenze des 2. Quintils liegt, die berechnete Arbeit des Bauteils 363.28 hingegen nur knapp oberhalb des 2. Quintils, wird die am Quintil orientierte Bewertung des Bauteils 363.21 um zwei Stufen von „gering“ auf „hoch“ korrigiert. Damit wird der Rückbauaufwand für die vollflächig verschweißten Bitumenbahnen plausibel höher eingestuft als für die lose verlegten Bitumenbahnen.
- Der von Graubner et al. gemessene zeitliche Rückbauaufwand für die vollflächig auf Schaumglas verschweißten Bitumenbahnen des Bauteils 363.22 ist wesentlich geringer als der in eigenen Versuchsständen ermittelte Rückbauaufwand für lose verlegte Bitumenbahnen (Bauteil 363.28), was unplausibel ist.  
Da die berechnete Arbeit des Bauteils 363.22 außerdem an der oberen Grenze des 1. Quintils liegt, die berechnete Arbeit des Bauteils 363.28 hingegen nur knapp oberhalb des 2. Quintils, wird die am Quintil orientierte Bewertung des Bauteils 363.22 um zwei Stufen von „sehr gering“ auf „mittel“ korrigiert.  
Somit wird der Rückbauaufwand für die vollflächig auf Schaumglas verschweißten Bitumenbahnen zumindest gleich hoch eingestuft wie die lose verlegten Bitumenbahnen.



# Urban Mining Index