



Entwicklung einer Systematik  
zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz  
von Baukonstruktionen in der Neubauplanung

Anja Rosen  
Dissertation

Fraunhofer IRB  Verlag



Entwicklung einer Systematik  
zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz  
von Baukonstruktionen in der Neubauplanung

Anja Rosen  
Dissertation

Fraunhofer IRB  Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-7388-0605-2  
ISBN (E-Book): 978-3-7388-0606-9

Layout und Umschlaggestaltung: Anja Rosen M.A.  
Lektorat: Dr. Anette Nagel, Contexta  
Druck und Bindung: Kurt Reinartz, Wuppertal

Das für dieses Buch verwendete FSC-zertifizierte Papier (Umschlag: Favini Remake smoke; Innenteil: Fly extraweiß) ist erhältlich bei Papier Union.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, März 2021  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon +49 711 970-2500  
Telefax +49 711 970-2508  
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
URL [www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

In dieser Arbeit wird zugunsten der besseren Lesbarkeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen beziehen sich gleichwohl auf alle Geschlechter.



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

## **Urban Mining Index**

### **Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der Bergischen Universität Wuppertal genehmigten Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

**Anja Rosen M.A. Architektin**

#### **Gutachter:**

Prof. Dipl.- Ing. Annette Hillebrandt, Bergische Universität Wuppertal

Prof. Dirk E. Hebel, Karlsruher Institut für Technologie

Prof. Dr.- Ing. Klaus Sedlbauer, Technische Universität München

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.- Ing. Karsten Voss, Bergische Universität Wuppertal

Tag der Einreichung: 19.03.2020

Tag der Disputation: 17.09.2020

---

für Julia und Felix  
in Vertretung für nachfolgende Generationen

---

## Dank

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Lehrbeauftragte an der Bergischen Universität Wuppertal und parallel zu meiner Arbeit als Architektin in der agn-Gruppe. Ein wesentlicher Impuls zur Entstehung dieser Arbeit ging von meiner ehrenamtlichen Mitarbeit als Expertin in der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. aus. Die Kombination von Wissenschaft, Praxis und ehrenamtlicher Tätigkeit hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ohne die Hilfe zahlreicher Unterstützer wäre dieses Engagement und auch der interdisziplinäre Ansatz dieser Arbeit nicht möglich gewesen, wofür ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte.

Meiner Doktormutter Frau Prof. Annette Hillebrandt gilt mein herzlicher Dank für die hervorragende Betreuung. Ihre Haltung zur Nachhaltigkeit in der Architektur hat meine wissenschaftliche Laufbahn und berufliche Entwicklung geprägt. Mit großer Diskussionsfreude und konstruktiver Kritik hat sie mich immer wieder herausgefordert und meine Arbeit bereichert.

Herrn Prof. Dirk E. Hebel und Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer danke ich besonders für ihr Interesse an dieser Doktorarbeit, den wissenschaftlichen Austausch und die Übernahme der beiden Korreferate. Ebenso danke ich den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der Universität Wuppertal, insbesondere Petra Riegler-Floors für ihre stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion und Dr. Tjado Voss für die Unterstützung bei der Programmierung der Excel-Anwendung. Auch den Studierenden der Universität Wuppertal, die sich tatkräftig in Rückbauversuchsständen bewiesen oder die Excel-Anwendung getestet haben, gilt ein großes Dankeschön.

Dr. Anna Braune und Ihren Kolleginnen und Kollegen von der DGNB danke ich herzlich für die Gelegenheit zur Mitarbeit in der Expertengruppe Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit und für die bereichernden Gespräche.

Viele Unternehmen aus der Wirtschaft und Handwerkerbildungszentren haben die Durchführung der Versuche zum Rückbauaufwand und die Recherche auf Rückbaustellen ermöglicht, wofür ich mich bei allen Beteiligten bedanken möchte. Stellvertretend erwähnt seien hier Christina Antal, Antal Abbruch und Baumanagement GmbH Frankfurt und Loredana Pacello, PL Bagger- und Fuhrbetrieb Waldkraiburg. Durch die Zusammenarbeit mit der Firma Schüco entwickelte sich letztendlich die Gründung der re!source Stiftung e.V.; vielen Dank hierfür an Rolf Brunkhorst und Thomas Lauritzen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen der energum danke ich für den steten Zuspruch und die Aufmunterung in anstrengenden Zeiten. Ein besonderer Dank gilt Carina Brand, die mich während des Verfassens der Dissertation einige Monate vertreten hat. Außerdem danke ich Marc Matzken von heimspiel architekten, Christian Thoman von agn und Harald Kurkowski von Bimolab sowie den Vertretern der Stadt Korbach für die gute Zusammenarbeit beim Urban-Mining-Modellprojekt Rathaus Korbach. Auch der agn-Geschäftsführung möchte ich herzlich für die Unterstützung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit und das Vertrauen in meine Person danken.

Nicht genug danken kann ich meiner Familie, die mir über Jahre den nötigen Halt gegeben hat. Meinem Sohn Felix, cand. M.Sc. Maschinenbau, danke ich außerdem für den fachlichen Austausch zur Arbeit von Baumaschinen. Und meiner Tochter Julia, Promovendin der Medizin, danke ich für die Diskussion zum physikalischen Arbeitsaufwand von Personen sowie für ihre Unterstützung bei der Übersetzung der Kurzbeschreibung. Meinem Mann Michael danke ich für seine unaufhörliche Geduld und Unterstützung während dieser arbeitsreichen Zeit.

Warendorf, im Oktober 2020  
Anja Rosen



---

## Kurzbeschreibung

Das Bauwesen ist national wie international die Branche mit dem höchsten Ressourcenverbrauch und Abfallaufkommen. Aufgrund der zunehmenden Ressourcenverknappung und Umweltbelastung ist es geboten, Baustoffe in möglichst geschlossenen, mit der Umwelt verträglichen (konsistenten) Kreisläufen zu führen. Diesen Ansatz verfolgt das Urban Mining Design, indem das anthropogene Rohstofflager als „urbane Mine“ gestaltet und bewirtschaftet wird. Hierfür muss die Kreislaufkonsistenz von Bauwerken als Entwurfsparameter begriffen werden. Um die Konstruktionsprinzipien des Urban-Mining-gerechten Bauens berücksichtigen zu können, benötigen Planer neue, quantitative Bewertungsmaßstäbe.

In dieser Arbeit wird deshalb eine Systematik entwickelt, mit der die Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen und Gebäuden in der Neubauplanung gemessen und bewertet werden kann: **der Urban Mining Index (UMI)**. Hierfür werden Parameter definiert, die die Materialität und die Konstruktion, aber auch die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus abbilden, der Voraussetzung für die Rückgewinnung sortenreiner Wertstoffe ist.

**Die zirkulär zu führenden Baustoffe beziffern mit ihrem Anteil an der Masse aller im Lebenszyklus des Bauwerks verbauten Materialien das Gesamtergebnis: den Urban Mining Indicator.**

Um diesen zu berechnen, werden die Zirkularitätsraten von Baumaterialien anhand spezifischer Kennwerte ermittelt: des Anteils an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen und des zukünftigen Recyclingpotenzials. Dabei werden verschiedene Qualitätsstufen der zirkulären Materialnutzung Pre-Use und Post-Use (vor und nach der geplanten Nutzung) unterschieden und differenziert gewichtet: Materialien, die auf gleichbleibendem Qualitätsniveau in geschlossenen Kreisläufen geführt werden können (Wiederverwendung und Recycling), fließen in das „Closed-Loop-Potenzial“ ein. Dagegen fließen Materialien, die nur unter Qualitätsverlust in offenen Kreisläufen geführt werden können (Weiterverwendung und Downcycling), in das „Loop-Potenzial“ ein. Auf konstruktiver Ebene wird die Demontierbarkeit von Bauteilen und -produkten sowie die Möglichkeit der sortenreinen Trennung von Wertstoffen als Grundvoraussetzung für die Kreislauffähigkeit der Materialien beurteilt. Die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus, gemessen am Restwert der Materialien und dem Arbeitsaufwand für deren sortenreine Rückgewinnung am Ende der Nutzungsdauer, bestimmt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Material ein hochwertiges oder nachrangiges End-of-Life-Szenario erreicht.

Mit dieser Arbeit werden die wissenschaftlichen Grundlagen für eine Bewertung des zukünftigen Rückbauaufwands in der Neubauplanung geschaffen: In Versuchsständen und auf Rückbaustellen wurde der Arbeitsaufwand von Personen und Maschinen für den selektiven Rückbau verschiedener beispielhafter Konstruktionen empirisch ermittelt. Zusätzlich wurden Daten anderer Studien ausgewertet, die die eigenen Recherchen ergänzen. Die Ergebnisse werden in einem Bauteilkatalog dokumentiert, der mehr als 130 Bauteile umfasst. Um den Materialwert der zurückzugewinnenden Stoffe zu bewerten, wurde eine empirische Erhebung von Verwertungserlösen und Entsorgungskosten von Bau- und Abbruchabfällen durchgeführt.

Aus den Ergebnissen der empirischen Erhebungen und Analysen werden Benchmarks abgeleitet, anhand derer sich der Rückbauaufwand und der Materialrestwert eines Baustoffs auf Skalen einordnen lassen. Mithilfe dieser Skalen werden Faktoren für die Parameter „Arbeit“ und „Wert“ festgelegt, die als Koeffizienten in eine neu entwickelte Formel zur Berechnung des Closed-Loop- und des Loop-Potenzials eingehen. Zur systematischen Erfassung von Baukonstruktionen wird eine Matrix entwickelt, mit der die Kreislaufpotenziale auf Bauteil- und Gebäudeebene berechnet und bewertet werden können.

Die Methodik wird an zwei (fiktiven) Modellprojekten angewandt, wobei die wesentlichen Bauteile jeweils zweier Konstruktionsvarianten (konventionell und Urban Mining Design) gegenübergestellt werden. Da die Ressourceninanspruchnahme mit dem anthropogen verursachten Klimawandel zusammenhängt, wird die Auswirkung des Urban-Mining-gerechten Bauens auf den Kohlenstoffkreislauf durch Berechnung des Treibhauspotenzials der Konstruktionen überprüft.

An einem Praxisbeispiel wird schließlich die Bewertung und Optimierung einer konkreten Planung mit dem Urban Mining Index aufgezeigt.



---

## Abstract

The building industry is responsible for the highest consumption of resources and quantity of waste of all industries on a national and international level. Due to the increasing scarcity of resources and environmental burden it is demanded to keep construction materials in closed, environmentally compatible (consistent) cycles as much as possible. The Urban Mining Design takes up this approach by managing the anthropogenic raw materials storage as an "urban mine". Therefore, the circuit consistency of buildings needs to be understood as a design parameter. In order to incorporate the principles of Urban Mining Design in construction, planners require new, quantitative evaluation criteria. Accordingly, in this work a methodology to measure and assess the circuit consistency of building structures in new construction design is developed: **The Urban Mining Index (UMI)**.

For this, certain parameters which reflect the materiality and the construction but also the economic viability of the selective dismantling, which is required for the recovery of mono-fraction materials, are defined.

**The circular materials' share in the entirety of materials used in a building's life cycle constitute the overall result: The Urban Mining Indicator.**

To calculate this, the circularity rates of construction materials are determined by specific values: the portion of secondary or renewable resources and the future recycling potential. Different quality levels of the circular material utilisation pre-use and post-use are differentiated and individually assessed: materials whose quality level can be maintained in closed cycles (reutilisation and recycling) flow into the "closed-loop potential". In contrast, materials whose quality diminishes in open cycles (further use and downcycling) flow into the "loop potential".

On a constructive level the applicability to disassemble construction components and products as well as the possibility to isolate mono-fraction resources are rated as basic requirements for the circularity potential of materials. The economic viability of the selective deconstruction measured on the materials' residual value and the effort to re-extract them in mono-fractions at the end of the useful life, determines the probability for a material to reach a high-grade or low-grade end-of-life-scenario.

By this work the scientific fundamentals to assess the future effort of dismantling in the process of planning new buildings are created: In test stands and dismantling sites the effort of persons and machines for the selective dismantling of several exemplary constructions was empirically determined. Additionally, to complement the own research, data from other studies were analysed. The results are documented in a component catalogue which includes more than 130 components. To evaluate the material value of the regained substances utilisation proceeds and disposal costs of construction and demolition waste were empirically compiled.

From the results of the empirical surveys and analyses benchmarks are deduced which enable the classification of a resource's dismantling effort and residual value in a scale. Using these scales factors for the parameters "work" and "value" are defined which then enter as coefficients into a newly developed formula to calculate the closed-loop and loop potential. For the systematic acquisition of building constructions, a matrix is designed to calculate and rate the circularity potentials on the component and building level.

The method is applied on two (fictitious) model projects where the essential building components of two construction variants (conventional and Urban Mining Design) are compared.

As the consumption of resources is related to the anthropogenically caused climate change, the effect of Urban Mining compatible construction on the carbon cycle is reviewed by calculating the global warming potential of the constructions.

A practical example eventually demonstrates the assessment and optimization of a concrete planning with the Urban Mining Index.



# Inhalt

<b>1.</b>	<b>Motivation, Fragestellung und Ziele der Arbeit</b>	<b>3</b>
1.1.	Motivation	4
1.1.1.	Ressourcenverbrauch	4
1.1.2.	Urban Mining	5
1.2.	Übergeordnete Ziele	6
1.2.1.	Die Agenda 2030 der Vereinten Nationen	6
1.2.2.	Umsetzung der Agenda 2030 auf deutscher und europäischer Ebene	7
1.3.	Fragestellung	10
1.4.	Ziele dieser Arbeit	12
1.4.1.	Die Verbindung der Lebenszyklen: Pre-Use-, Use- und Post-Use-Phase	12
1.4.2.	Definition von quantitativ messbaren Parametern	12
1.4.3.	Identifikation, Analyse und Definition geeigneter Bewertungsebenen	13
1.4.4.	Analyse und Bewertung des Rückbaus	13
1.4.5.	Abbildung der Kreislaufpotenziale nach Qualitäten	14
1.4.6.	Einfache Anwendbarkeit und gut ablesbare Darstellung	14
1.4.7.	Anwendung an Modellprojekten	15
1.4.8.	Eignung für Zertifizierungssysteme	15
<b>2.</b>	<b>Strategie und wissenschaftliches Vorgehen</b>	<b>17</b>
2.1.	Strategien für eine nachhaltige Entwicklung	18
2.1.1.	Suffizienz	18
2.1.2.	Effizienz	18
2.1.3.	Konsistenz	18
2.1.4.	Produktivität der Strategien	19
2.2.	Ableitung der eigenen Strategie: konsistente Kreisläufe	21
2.2.1.	Einfluss des Menschen auf die natürlichen Kreisläufe	21
2.2.2.	Voraussetzungen für konsistente Kreisläufe	22
2.2.3.	Nachnutzungsmöglichkeiten von Baustoffen	23
2.2.4.	Definition des Kreislaufpotenzials von Baustoffen	24
2.2.5.	Differenzierung von Closed-Loop- und Loop-Potenzial	25
2.3.	Instrumente zur Verfolgung der Strategien für eine nachhaltige Entwicklung	26
2.3.1.	Der utilitaristische Nutzen des zirkulären Bauens	26
2.3.2.	Die Ökobilanz ist keine Bilanz	27
2.3.3.	Die Ökobilanz als Instrument zur Prognose der Wirkungen	27
2.4.	Systemgrenzen	33
2.4.1.	Lebenszyklusphasen	33
2.4.2.	Differenzierung von Materialien nach Ursprung und Verfügbarkeit	33
2.4.3.	Abschneideregeln	34
2.4.4.	Zusätzliche Betrachtung: CO <sub>2</sub> -Footprint	34
2.5.	Wissenschaftliches Vorgehen	35

<b>3.</b>	<b>Status quo: Rückbau und Entsorgung im Bauwesen</b>	<b>39</b>
3.1.	Rechtliche Hintergründe	40
3.1.1.	Bauproduktenverordnung	40
3.1.2.	Abfallrecht	40
3.1.3.	Rückbaurecht	45
3.2.	Abfallaufkommen und Verwertungsquoten	46
3.2.1.	Eine statistische Betrachtung	46
3.2.2.	Voraussichtliche Entwicklung der mineralischen Abfallströme	48
3.3.	Rückbau- und Abbruchverfahren	50
3.3.1.	Nach dem Umfang	50
3.3.2.	Nach der Separierung	50
3.3.3.	Nach der Verfahrensweise/Verfahrenstechnik	51
3.4.	Aufwand für Rückbau und Abbruch	54
3.4.1.	Kostenaufwand	54
3.4.2.	Zeitaufwand	55
3.5.	Entwicklung des anthropogenen Rohstofflagers	56
3.6.	Zwischenfazit	57
<b>4.</b>	<b>Bewertungsmethoden: Stand von Forschung und Technik</b>	<b>59</b>
4.1.	Recycling in der Gebäudezertifizierung	60
4.1.1.	Recyclingaspekte im BNB-System	62
4.1.2.	Recyclingaspekte im DGNB-System	63
4.1.3.	Recyclingaspekte im BREEAM-System	65
4.1.4.	Recyclingaspekte im LEED-System	66
4.1.5.	Anwendbarkeit der Zertifizierungssysteme zur Bewertung des kreislaufgerechten Bauens	67
4.2.	Recycling in der Produktzertifizierung	68
4.2.1.	Umweltkennzeichnungen und -deklarationen	68
4.2.2.	Der Kreislaufgedanke im Cradle-to-Cradle-System	70
4.3.	Bewertungsmethoden anderer Wissenschaftler – Stand der Forschung	72
4.3.1.	Empirisch-experimentelle Forschung zum Rückbauaufwand	72
4.3.2.	Angewandte Forschung	76
4.4.	Zwischenfazit	86
<b>5.</b>	<b>Parameter zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen</b>	<b>89</b>
5.1.	Materielle Ebene	90
5.1.1.	Umfang der materiellen Ebene	90
5.1.2.	Parameter zur Qualifizierung	90
5.1.3.	Parameter zur Quantifizierung	93

5.2.	<b>Konstruktive Ebene</b>	<b>96</b>
5.2.1.	Zerstörungsfreie Lösbarkeit	96
5.2.2.	Sortenreinheit	97
5.3.	<b>Wirtschaftliche Ebene</b>	<b>98</b>
5.3.1.	Rückbauaufwand – Faktor Arbeit	98
5.3.2.	Entsorgungskosten und Verwertungserlöse – Faktor Wert	105
<b>6.</b>	<b>Recherchen und Untersuchungen zur Entwicklung von Benchmarks für die Einordnung der ökonomischen Kriterien</b>	<b>109</b>
6.1.	<b>Empirische Erhebung von Entsorgungskosten und -erlösen nach Wertstofffraktionen</b>	<b>110</b>
6.1.1.	Preisabfrage	110
6.1.2.	Auswertung und Ergebnisse	112
6.1.3.	Benchmarks für den Faktor Wert	114
6.2.	<b>Untersuchungen zum Rückbauaufwand am Beispiel von Fassaden- und Dachbekleidungen in Versuchsständen</b>	<b>116</b>
6.2.1.	Fassaden	116
6.2.2.	Dachbekleidungen	123
6.2.3.	Auswertung	127
6.3.	<b>Recherchen zum Rückbauaufwand auf Baustellen</b>	<b>133</b>
6.3.1.	Problematiken beim selektiven Abbruch	133
6.3.2.	Erhebungen zum Aufwand des selektiven Rückbaus	138
6.4.	<b>Auswertung von Daten anderer Wissenschaftler zum Rückbauaufwand</b>	<b>142</b>
6.4.1.	Auswertung der Daten von Schultmann et al.	142
6.4.2.	Auswertung der Daten von Graubner et al.	145
6.5.	<b>Tabellarischer Bauteilkatalog</b>	<b>146</b>
6.5.1.	Inhalt und Gliederung	146
6.5.2.	Ableitung von Benchmarks für den Rückbauaufwand	146
6.5.3.	Plausibilitätsprüfung und Korrekturen	147
<b>7.</b>	<b>Berechnungsmethode zur systematischen Bewertung und Darstellung der Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen</b>	<b>155</b>
7.1.	<b>Ebenen und Basis der Berechnung</b>	<b>156</b>
7.1.1.	Ebenen der Berechnung innerhalb der Gebäudestruktur	156
7.1.2.	Die Masse als Basis der Berechnungen	158
7.2.	<b>Abbildung der Qualitätsstufen als Variable</b>	<b>160</b>
7.2.1.	Die Loops	160
7.2.2.	Differenzierung zwischen Loop- und Closed-Loop-Potenzial	160
7.2.3.	Quellen für die Zuordnung der Qualitätsstufen	161
7.3.	<b>Koeffizienten zur Berechnung der Kreislaufpotenziale</b>	<b>162</b>
7.3.1.	Faktoren für den Parameter Wert	162
7.3.2.	Faktoren für den Parameter Arbeit	163

7.3.3.	Beispiel zur Anwendung der Koeffizienten für die Post-Use-Phase	163
<b>7.4.</b>	<b>Überprüfung der Methodik und Verifizierung</b>	<b>166</b>
7.4.1.	Beschreibung des Entwurfs und der Berechnungsergebnisse	166
7.4.2.	Identifizierte Problematiken	168
7.4.3.	Verifizierung	170
<b>7.5.</b>	<b>Formeln zur Berechnung der Kreislaufpotenziale</b>	<b>172</b>
7.5.1.	Closed-Loop-Potenzial (CLP)	172
7.5.2.	Loop-Potenzial (LP)	174
<b>7.6.</b>	<b>Entwicklung eines Tabellenwerkzeugs zur systematischen Berechnung und Bewertung der Kreislaufpotenziale</b>	<b>175</b>
7.6.1.	Mengenermittlung	176
7.6.2.	Qualitätsstufen Pre-Use	176
7.6.3.	Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus	178
7.6.4.	Wiederverwendbarkeit und Verwertbarkeit	178
7.6.5.	Berechnung der Massenanteile für die EoL-Szenarien	181
7.6.6.	Qualitätsstufen Post-Use	181
7.6.7.	Kreislaufpotenziale	181
7.6.8.	Treibhauspotenzial	182
<b>8.</b>	<b>Kreislaufpotenziale beispielhafter Konstruktionen im Vergleich</b>	<b>185</b>
<b>8.1.</b>	<b>Modellprojekt 1</b>	<b>186</b>
8.1.1.	Vergleichsanalyse Boden/Gründung	189
8.1.2.	Vergleichsanalyse Außenwand	195
8.1.3.	Vergleichsanalyse Decke	199
8.1.4.	Vergleichsanalyse Dach	203
<b>8.2.</b>	<b>Modellprojekt 2</b>	<b>206</b>
8.2.1.	Vergleichsanalyse Boden/Gründung	209
8.2.2.	Vergleichsanalyse Außenwand	213
8.2.3.	Vergleichsanalyse Decke	217
8.2.4.	Vergleichsanalyse Dach	221
<b>8.3.</b>	<b>Zwischenfazit</b>	<b>224</b>
<b>9.</b>	<b>Anwendung der Forschungsergebnisse auf Gebäudeebene in der Neubauplanung für das Modellprojekt „Rathaus Korbach“</b>	<b>229</b>
<b>9.1.</b>	<b>Beschreibung des Projekts</b>	<b>231</b>
9.1.1.	Projektziele und Beteiligte	231
9.1.2.	Herangehensweise im Projekt	233
9.1.3.	Die Neubauplanung	234
9.1.4.	Stand des Projekts	235
<b>9.2.</b>	<b>Leitdetails für den Neubau – Variantenvergleich mit dem Urban Mining Index</b>	<b>236</b>
9.2.1.	Gründung	236
9.2.2.	Erdberührte Außenwand	243

9.2.3.	Außenwand/Fassade	247
9.2.4.	Fenster	253
9.2.5.	Innenwände und -stützen	258
9.2.6.	Geschossdecken	269
9.2.7.	Dach	272
<b>9.3.</b>	<b>Bewertung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene – der Urban Mining Indicator</b>	<b>278</b>
9.3.1.	Ermittlung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene	278
9.3.2.	Bewertung mit dem Urban Mining Indicator	281
9.3.3.	Treibhauspotenzial der Varianten auf Gebäudeebene	283
<b>9.4.</b>	<b>Zwischenfazit</b>	<b>284</b>
<b>10.</b>	<b>Fazit und Ausblick auf weitere Forschung</b>	<b>291</b>
10.1.	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	292
10.1.1.	Zusammenfassung	292
10.1.2.	Interpretation der Ergebnisse – Objektivität der Bewertung	292
10.2.	Beitrag des Urban Mining Index im Forschungskontext zirkuläres Bauen	300
10.3.	Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse in verwandten Forschungsfeldern	302
10.3.1.	Verwendbarkeit in der Forschung zur Ökobilanzierung	302
10.3.2.	Verwendbarkeit in der Forschung zu Lebenszykluskosten	305
10.4.	Schlusswort	306
<b>Anhang</b>		
	Anlage 1 zu Kapitel 6.1: Aufstellung der Preiserhebung nach Wertstoffgruppen	308
	Anlage 2 zu Kapitel 6.4: Auswertung der Forschungsergebnisse von Graubner et al.	310
	Anlage 3 zu Kapitel 9.1.3: Pläne Rathaus Korbach	314
	Literatur- und Quellenverzeichnis	316
	Abbildungsverzeichnis	324
	Glossar	328
	Erklärung der Verfasserin	330



---

# 1. Motivation, Fragestellung und Ziele der Arbeit

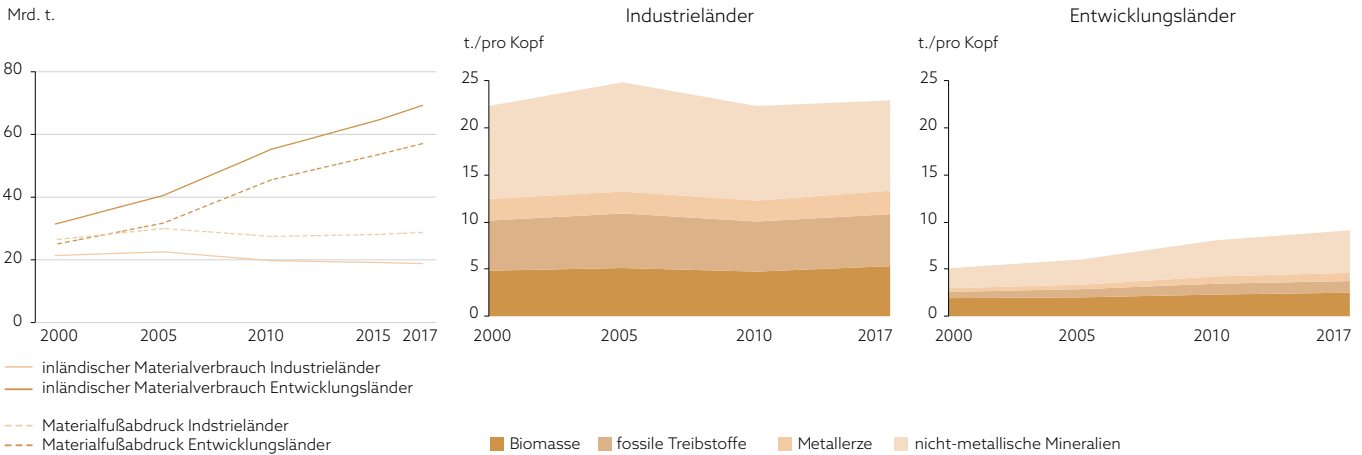
Die Weltwirtschaft steht vor einem gravierenden Wandel. Globale Probleme wie die zunehmend spürbar werdenden Auswirkungen des anthropogen verursachten Klimawandels, schwindende Ressourcen, soziale Ungleichheiten und damit einhergehende Flüchtlingsströme bestimmen die Nachrichten und stellen Politik und Wirtschaft vor immense Herausforderungen.

Unsere gebaute Umwelt trägt zu einem Großteil der klimaschädlichen Emissionen bei: Die Bauwirtschaft verursacht den größten Ressourcenverbrauch und das höchste Abfallaufkommen aller Wirtschaftszweige.

Unter Experten ist das Bewusstsein längst da: Unser lineares Wirtschaftssystem, in dem der Erde Ressourcen entnommen, genutzt und verbrannt oder entsorgt werden, muss einem System weichen, in dem wir verträglich mit unserer Umwelt und den begrenzten planetaren Ressourcen leben können. Begriffe wie Circular Economy, zirkuläre Wertschöpfung und nicht zuletzt Urban Mining stehen für verträgliche Wirtschaftskreisläufe.

Dieses Eingangskapitel geht zunächst auf das Thema Ressourcenverbrauch näher ein und beleuchtet die globalen und nationalen Ziele nachhaltigen Wirtschaftens, um dann zur konkreten Fragestellung zu kommen, wie ein „Urban Mining Index“ (UMI) einen Wandel in der Baubranche unterstützen kann.

1.1.	Motivation	4
1.2.	Übergeordnete Ziele	6
1.3.	Fragestellung	10
1.4.	Ziele dieser Arbeit	12



A 1.2

A 1.3

## 1.1. Motivation

### 1.1.1. Ressourcenverbrauch

Entgegen der Weisheit von Hans Carl von Carlowitz [2], wonach dem Wald nicht mehr Holz entnommen werden darf, als nachwachsen kann, verbraucht die Menschheit heute mehr biotische Ressourcen, als die Erde durch natürliche Prozesse erneuern kann (s. „Earth Overshoot Day“ in Kapitel 2, Abb. A 2.7). Noch gravierender ist der Verbrauch biotisch-fossiler Ressourcen wie Kohle, Öl und Gas, die über Jahrtausende entstanden sind und innerhalb relativ kurzer Zeit verbraucht werden – mit weitreichenden negativen Folgen wie Klimawandel und Artensterben. Ebenso gravierend ist der Verbrauch abiotischer Ressourcen wie metallische und mineralische Materialien, da diese – im Gegensatz zu biotischen Ressourcen – im stofflich geschlossenen System Erde nicht erneuerbar sind.

Den größten Ressourcenverbrauch pro Kopf haben gemäß Statistiken der Vereinten Nationen (UN) die Industriestaaten, wobei der überwiegende Teil des Ressourcenverbrauchs sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern auf nicht metallische Mineralien entfällt (s. Abb. A 1.3). In den Entwicklungsländern hat deren Verbrauch in den letzten zwei Jahrzehnten stark zugenommen, was die Berichterstatter der UN [4] auf den Ausbau der Infrastruktur und den Bau von Gebäuden zurückführen. Noch stärker ist in den Entwicklungsländern aufgrund der wachsenden Bevölkerung der inländische Materialverbrauch gestiegen (Domestic Material Consumption – DMC; s. Abb. A 1.2).

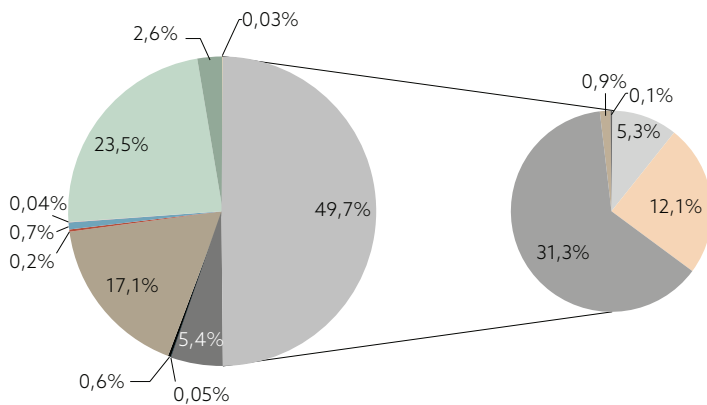
Unter der Annahme, dass die wachsende Bevölkerung vieler Entwicklungsländer den hohen Lebensstandard der industrialisierten Länder anstrebt, ist davon auszugehen, dass die derzeitigen Wirtschaftsmodelle mit ihrem hohen Ressourcenverbrauch nicht mehr funktionieren können. Hinzu kommt, dass die Industriestaaten derzeit auf Kosten der ärmeren Länder wirtschaften, was die Graphen in Abb. A 1.2 erkennen lassen: Der inländische Materialverbrauch der Entwicklungsländer ist höher als der Materialfußabdruck, was bedeutet, dass Rohstoffe exportiert werden. Der inländische Materialverbrauch der Industriestaaten ist dagegen niedriger als ihr Materialfußabdruck, was darauf hindeutet, dass diese Länder Materialien importieren. [3] Durch Weiterverarbeitung und Export von Produkten haben sie eine hohe Wertschöpfung und ein hohes Einkommen.

A 1.2 Inländischer Materialverbrauch (Domestic Material Consumption – DMC) und Materialfußabdruck in Industrie- und Entwicklungsländern, Jahre 2000-2017 [3]

A 1.3 Materialfußabdruck pro Kopf (Raw Material Consumption – RMC) nach Rohstoffart in Industrie- und Entwicklungsländern, Jahre 2000-2017 [4]

„Der materielle Fußabdruck einer Volkswirtschaft bezieht sich auf die Gesamtmenge an Rohstoffen, die weltweit - über die gesamte Lieferkette - gefördert wird, um den Endverbrauch dieser Volkswirtschaft zu decken.“ [4]

A 1.4 Genutzte Inländische Rohstoffentnahme in Deutschland 2015, nach Rohstoffgruppen [5]



	[Mio. t]	[%]
Baumineralien	517,3	49,7
davon		
Natursteine, nicht gebrochen	1,3	0,1
Kalk-, Gipsstein, Anhydrit, Kreide, Dolomit, Schiefer	54,8	5,3
Bausande u.a. natürliche Sande	126,4	12,1
Feldsteine, Kiese, gebroch. Natursteine	325,9	31,3
Tone, Baumineralien a.n.g.	8,9	0,9
Erze	0,5	0,05
Industriemineralien	56,6	5,4
Steinkohle	6,2	0,6
Braunkohle	178,2	17,1
Erdöl	2,4	0,2
Erdgas, Grubengas und Erdölgas	7,6	0,7
sonstige Energieträger	0,5	0,04
Pflanzl. Biomasse, Landwirtschaft	244,2	23,5
Pflanzl. Biomasse, Forstwirtschaft	27,0	2,6
Biomasse von Tieren	0,3	0,03
<b>Gesamt</b>	<b>1.040,8</b>	<b>100,0</b>

A 1.4

Bei Betrachtung der nationalen Rohstoffentnahmen in Deutschland (Abb. A 1.4), ist erkennbar, dass auch hier rund die Hälfte aller Entnahmen auf Baumineralien entfällt. Der Bedarf des Bauwesens insgesamt dürfte noch höher sein, da z.B. Metalle (aus Erzen) vorwiegend importiert werden.

Vor dem Hintergrund einer weiterhin steigenden Weltbevölkerung ist somit ein (Preis-)Kampf um Rohstoffe absehbar, wenn das bisherige Wirtschaftsmodell fortgeführt wird.

Ressourcenschonendes Bauen ist damit eine Notwendigkeit. Alle Akteure der Baubranche stehen in der Verantwortung, den Ressourcenverbrauch im Bauwesen zu minimieren.

Hierzu werden in der öffentlichen Debatte drei Strategien diskutiert:

- Suffizienz (Verzicht),
- Effizienz (Verbesserung) und
- Konsistenz (etwas beständig/verträglich machen).

In Kapitel 2 wird erläutert, dass die Konsistenz zu den wirksamsten Wegen nachhaltigen Handelns gehört. Dies wird auch als „Ökoeffektivität“ bezeichnet: eine Wirtschaftsweise, in der es keine Abfälle gibt. Aus Produkten werden durch Wiederverwendung und -verwertung neue Produkte. Da unser Planet – die Erde – ein zwar energetisch offenes, aber materiell geschlossenes System ist, ist eine zirkuläre Wirtschaft die einzige, die in diesem geschlossenen System, in dem der Mensch immer mehr Raum einnimmt, langfristig funktionieren kann.

### 1.1.2. Urban Mining

Bezogen auf das Bauen bildet der Begriff „Urban Mining“<sup>1</sup> eine zirkuläre Wirtschaftsweise bildhaft ab. Urban Mining beschreibt unsere Städte und Siedlungen sowie alle darin enthaltenen Gebäude und Güter als riesiges anthropogenes Rohstofflager. Laut Umweltbundesamt [6] sind darin allein in Deutschland rund 28 Mrd. Tonnen mineralische Materialien, Metalle, Kunststoffe, etc. gebunden. Dieses Lager gilt es, wieder aufzuschließen und als Rohstoffquelle zu verwenden. Damit dies künftigen Generationen möglich ist, muss es anders als bisher gestaltet sein.

Für das Urban-Mining-gerechte Bauen hat Hillebrandt [7] den Begriff „Urban Mining Design“ geprägt. Nur wenn die Kreislauffähigkeit von Bau-

1 Englisch, frei übersetzt: Abbau/Bergbau im städtischen Kontext

---

werken als Entwurfsparameter verstanden wird, kann der enorme Ressourcenverbrauch im Bauwesen auf ein nachhaltiges Maß reduziert werden. Um die Konstruktionsprinzipien des Urban-Mining-gerechten Bauens berücksichtigen zu können, sind auch neue, quantitative Bewertungsmaßstäbe nötig, an denen die Kreislauffähigkeit von Gebäuden und Baukonstruktionen gemessen werden kann. **Das zirkuläre, Urban-Mining-gerechte Bauen muss messbar gemacht werden.**

## 1.2. Übergeordnete Ziele

Der nachhaltige Umgang mit materiellen Ressourcen ist ein wesentliches Ziel der Vereinten Nationen in ihren Bemühungen um eine gerechtere Welt. Nach Auffassung der Verfasserin ist die nachhaltige Ressourcenverwendung sogar ein Basiskriterium, um die übrigen hohen Ziele wie Bekämpfung von Armut, Hunger und Ungleichheiten, Erhaltung von Frieden, Gesundheit und Wohlergehen sowie den Schutz des Klimas zu erreichen. **Nichts Geringeres als die Ziele der UN können deshalb als übergeordnete Ziele und Motivation für die Wahl des Themas dieser Arbeit bezeichnet werden – zumal sie messbar sind.**

### 1.2.1. Die Agenda 2030 der Vereinten Nationen

Im September 2015 hat die Generalversammlung der Vereinten Nationen die „Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“ verabschiedet. Damit strebt die UN eine „Transformation der Welt zum Besseren“ [9] im Sinne einer nachhaltigen Umgestaltung von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt bis zum Jahr 2030 an.

Auf europäischer Ebene hat die EU-Kommission Strategien und Maßnahmen zur Verwirklichung der Ziele für eine nachhaltige Entwicklung erarbeitet. Konzeptionell setzt die EU die Agenda 2030 gemeinsam mit ihren Mitgliedsstaaten um. Die Bundesregierung hat sich mit der Neuauflage der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie im Januar 2017 zur Umsetzung der Agenda 2030 verpflichtet [10].

#### *Die Sustainable Development Goals*

Die Agenda 2030 umfasst 17 globale Ziele, die sogenannten SDGs (Sustainable Development Goals), auf Deutsch: Ziele für nachhaltige Entwicklung, s. Abb. A 1, die in 169 Unterziele unterteilt sind.

Der Umgang mit den begrenzten materiellen Ressourcen unseres Planeten wird vorwiegend in zwei eng miteinander verknüpften Nachhaltigkeitszielen thematisiert:

- *Ziel 8: Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum*  
SDG 8 zielt auf „dauerhaftes, breitenwirksames und nachhaltiges Wirtschaftswachstum, produktive Vollbeschäftigung und menschenwürdige Arbeit für alle“. [11]

Um das angestrebte Wirtschaftswachstum in Einklang mit dem nachfolgenden Ziel 12 zu bringen, wurde in einem Unterziel formuliert, bis 2030 die weltweite Ressourceneffizienz in Konsum und Produktion Schritt für Schritt zu verbessern und die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung voranzutreiben.

Nr.	Ziel	Indikatoren der UN	Indikatoren der EU	Deutsche Indikatoren
8	Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum			
8.4	Bis 2030 die weltweite Ressourceneffizienz in Konsum und Produktion Schritt für Schritt verbessern und die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung anstreben, im Einklang mit dem Zehnjahres-Programm für nachhaltigen Konsum und Produktion (Ziel 12), wobei die entwickelten Länder die Führung übernehmen	8.4.1 Materialfußabdruck, (absolut, pro Kopf, und pro BIP) 8.4.2 Inlandsmaterialverbrauch (absolut, pro Kopf, und pro BIP)		8.1 Gesamtrohstoffproduktivität  (Wert aller an die letzte Verwendung abgegebenen Güter (in Euro) in Relation zur Masse der für ihre Produktion im In- und Ausland eingesetzten Rohstoffe (in Tonnen))
12	Nachhaltiger Konsum und Produktion			
12.2	Bis 2030 die nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen erreichen	12.2.1 Materialfußabdruck (absolut, pro Kopf, und pro BIP) 12.2.2 Inlandsmaterialverbrauch (absolut, pro Kopf, und pro BIP)	12.20 Ressourcenproduktivität und Inlandsmaterialverbrauch	
12.5	Bis 2030 das Abfallaufkommen durch Vermeidung, Verminderung, Wiederverwertung und Wiederverwendung deutlich verringern	12.5.1 Nationale Recyclingquote, tonnenweise recyceltes Material	<b>12.41 Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe</b> 12.50 Abfallaufkommen ohne dominante mineralische Abfälle 12.60 Verwertungsquote von Abfällen ohne dominante mineralische Abfälle	

A 1.5

- Ziel 12: Nachhaltiger Konsum und Produktion*  
SDG 12 zielt in Anbetracht der begrenzten Ressourcen der Erde explizit auf die zuvor beschriebene notwendige Veränderung unserer Wirtschaftsweise. In Unterzielen wurde formuliert, bis 2030 die nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen zu erreichen und das Abfallaufkommen durch Vermeidung, Wiederverwendung und Wiederverwertung deutlich zu verringern.

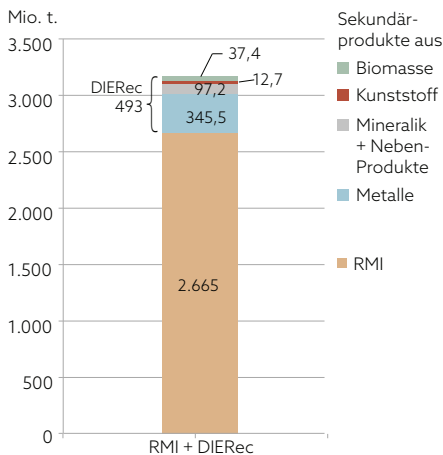
A 1.5 Sustainable Development Goals mit besonderer Relevanz für den Verbrauch stofflicher Ressourcen und Zuordnung relevanter Indikatoren auf den verschiedenen politischen Ebenen

Um die Erreichung der SDGs überprüfen zu können, wurden die Unterziele mit messbaren globalen Indikatoren hinterlegt. Konkrete Ziele für SDG 8 und 12, beispielsweise ein maximaler Primärressourcenverbrauch pro Kopf, wurden jedoch nicht definiert.<sup>2</sup>

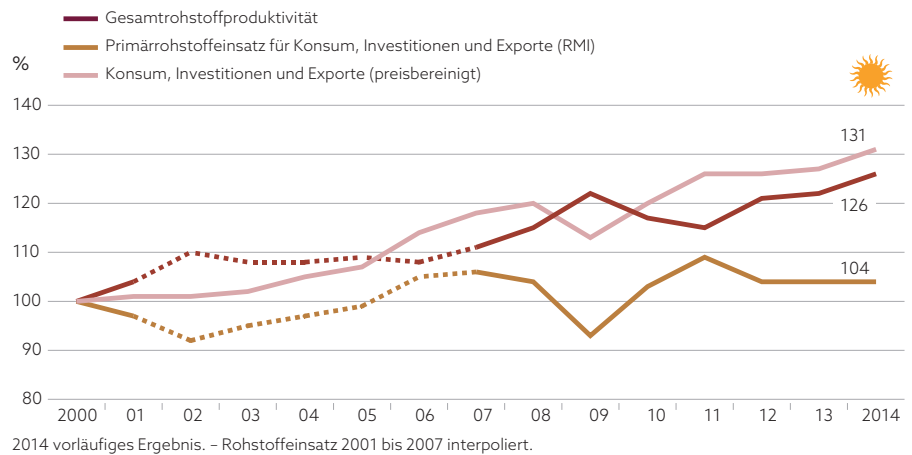
### 1.2.2. Umsetzung der Agenda 2030 auf deutscher und europäischer Ebene

Auf nationaler Ebene hat Deutschland in seiner Nachhaltigkeitsstrategie 63 relevante Indikatoren definiert. Darüber hinaus wurde von der Europäischen Kommission [12] eine Reihe von Indikatoren zur Überwachung der SDGs (durch Eurostat) auf EU-Ebene veröffentlicht. Abb. A 1.5 zeigt die Zuordnung der Indikatoren zu den Unterzielen der SDGs mit besonderer Relevanz für den Verbrauch stofflicher Ressourcen auf den verschiedenen politischen Ebenen.

<sup>2</sup> Die Entwicklung der Indikatoren erfolgte durch die Statistische Kommission der Vereinten Nationen in Zusammenarbeit mit Statistischen Ämtern einiger UN-Mitgliedsstaaten (darunter Deutschland), die auch gemeinsam ein Monitoring zur Überprüfung der Fortschritte bei der Umsetzung der SDGs durchführen.



A 1.6



2014 vorläufiges Ergebnis. – Rohstoffeinsatz 2001 bis 2007 interpoliert.

A 1.7

### Bewertung der Ziele zum Rohstoffverbrauch auf nationaler Ebene

Deutschland plant, mit dem Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) [13] die Gesamtrohstoffproduktivität zu steigern, um das Wirtschaftswachstum vom Rohstoffverbrauch zu entkoppeln (vgl. Kapitel 3.1).

Abb. A 1.7 zeigt die Entwicklung des Indikators „Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland“. Mit dem Symbol der Sonne deutet das Statistische Bundesamt an, inwiefern das Ziel, die Gesamtrohstoffproduktivität jährlich um 1,5% zu steigern, erreicht wird.

Bei Betrachtung der Entwicklung des Indikators fällt jedoch auf, dass die Erfüllung der angestrebten Ziele bisher hauptsächlich auf die Erhöhung des Konsums (Bruttoinlandsprodukt + Exporte = Zähler der Gleichung) zurückzuführen ist. Der Rohstoffverbrauch, hier abgegrenzt als Primärrohstoffeinsatz (Raw Material Input –RMI<sup>3</sup>), ist in den letzten Jahren weitgehend gleich geblieben, befindet sich also nach wie vor auf hohem Niveau. Ein „Weiter so“ beim Rohstoffverbrauch ist aber angesichts der begrenzten Ressourcen der Erde nicht möglich. Um es mit Hans Carl von Carlowitz zu sagen: Der Indikator Gesamtrohstoffproduktivität impliziert, dass dem Wald auf Dauer ruhig mehr Holz entnommen werden dürfe, als nachwachsen kann, wenn dadurch die Wirtschaftsleistung und der Wohlstand steigt. Wie aber lässt sich noch Wohlstand erzielen, wenn der Wald gerodet ist und kein zweiter Wald zur Verfügung steht?

Der Rohstoffverbrauch muss deshalb in den Industrieländern stark gesenkt werden, um die Lebensgrundlagen nachfolgender Generationen nicht einzuschränken.

### Bewertung der Ziele zum Rohstoffverbrauch durch die EU

Der Indikator 12.41 der EU-Kommission „Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe“ [14] (Circular Material Use Rate – CMU) bildet eine nachhaltige Ressourcenverwendung innerhalb der Grenzen des Wachstums am besten ab. Er bestimmt das Verhältnis zurückgewonnener und wieder in die Wirtschaft eingespeister Materialien (zirkuläre Verwendung<sup>4</sup>) zur gesamten Materialverwendung (inländische Entnahme plus zirkuläre Verwendung). Die Abbildungen A 1.8 und A 1.9 zeigen die CMU-Raten der

A 1.6 Reduzierung des theoretischen Rohstoffbedarfs durch die Sekundärrohstoffwirtschaft – DERec und DERec im Verhältnis zu DMI und RMI für das Jahr 2013, eigene Darstellung, Datenbasis UBA [19]

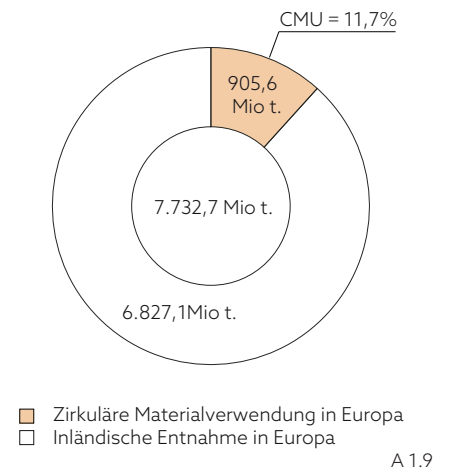
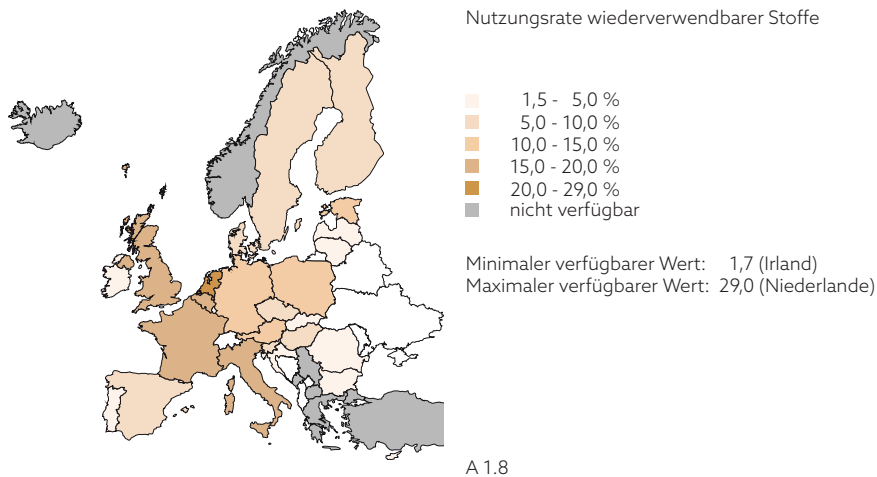
A 1.7 Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland, 2000 = 100% [15]

A 1.8 Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (Circular Material Use Rate – CMU) in % der inländischen Materialverwendung, Europa nach Ländern, 2016 [16]

A 1.9 Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (Circular Material Use Rate – CMU) der 28 EU-Mitgliedsstaaten (gesamt), 2016 [17]

3 Der RMI ist definiert als die Gesamtmasse der im Inland gewonnenen Primärrohstoffe und der – in Rohstoffäquivalente umgerechneten – importierten Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren. Vgl. UBA 2012: Glossar zum Ressourcenschutz.

4 Die zirkuläre Verwendung umfasst dabei die Verwertungsverfahren R2 bis R11 nach Anhang II der Abfallrahmenrichtlinie (s. „Abfallrecht“, Seite 40), d. h. ohne energetische Verwertung und Verfüllung, aber inkl. Kompostierung.



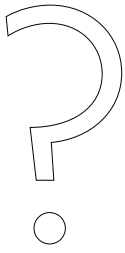
EU-Mitgliedsstaaten im Jahr 2016. Je höher die CMU-Rate, desto mehr werden primäre Rohstoffe durch Sekundärmaterialien ersetzt. Die Rate bildet jedoch noch keine geschlossenen Kreisläufe ab, da das Qualitätsniveau des Recyclings nicht berücksichtigt wird (inkl. Downcycling, vgl. Kapitel 7.2.2).

Ähnliche Effekte zeigen die im Auftrag des Umweltbundesamtes [18] entwickelten Sekundärrohstoffindikatoren „Direct Effects of Recovery“ (DERec) und „Direct and Indirect Effects of Recovery“ (DIERec). Beide Indikatoren stellen die Effekte der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe und Nebenprodukte dar, wobei der DERec nur die Effekte innerhalb der eigenen Volkswirtschaft abbildet, der DIERec aber die globalen Effekte berücksichtigt, d.h. auch die Vorketten von aus dem Ausland importierten Gütern einbezieht (z.B. Aufbereitung von Erzen im Ausland).

Während der Entstehung der hier vorliegenden Arbeit hat ein Forschungskonsortium unter der Leitung von Steger [19] anhand von 30 untersuchten masserelevanten Materialien aus den Bereichen Metalle, Mineralik, Kunststoffe und Biomasse den Beitrag von Sekundärrohstoffen zur Schonung von Primärrohstoffen für die deutsche Volkswirtschaft quantifiziert. Die in Abb. A 1.6 zusammengefassten Ergebnisse zum Verhältnis DIERec/RMI verdeutlichen, dass durch die inländische Verwertung im Jahr 2013 laut Steger et al. unter Beachtung der ausländischen Vorketten 15,6% Material eingespart werden konnte. Anders formuliert: Ohne die Sekundärrohstoffwirtschaft wäre der Primärrohstoffeinsatz um ca. 18% höher. Sekundärrohstoffe haben damit einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtrohstoffproduktivität.

Die Indikatoren bilden ebenfalls keine geschlossenen Kreisläufe ab, da neben einem Downcycling auch Sekundärprodukte zur energetischen Verwertung sowie Nebenprodukte (z.B. REA-Gips) einbezogen werden.

Die beschriebenen Indikatoren und das Monitoring der Nachhaltigkeitsziele können immer nur die Vergangenheit und den Status quo abbilden. Sie dienen sozusagen dem Nachhalten der Nachhaltigkeit. Für eine Transformation der Wirtschaftsweise werden jedoch Indikatoren benötigt, die auch die zukünftigen Potenziale abbilden. Nur wenn diese als Parameter bereits in der Planung berücksichtigt werden, kann die Transformation von der linearen zur zirkulären Bauwirtschaft gelingen.



### 1.3. Fragestellung

Die zentrale Frage (Leitfrage) dieser Arbeit lautet:

**Wie kann das zirkuläre Bauen objektiv messbar gemacht werden?**

Das Bauen ist heute sehr komplex. Hohe Ansprüche an die funktionale und technische Qualität von Bauwerken, wie Anforderungen an die Statik und die Dichtigkeit sowie an den Brand-, Wärme- und Schallschutz, haben zu hoch technisierten Baustoffen geführt. Auf der materiellen Ebene wurde die Erfüllung möglichst vieler Anforderungen (in einem Produkt) von der Baustoffindustrie mit der Entwicklung von Verbundwerkstoffen beantwortet, deren Recyclingfähigkeit oft eingeschränkt, wenn nicht gar unmöglich ist.

Termin- und Kostendruck mit Fokus auf die Fertigstellung erfordern einen schnellen Bauablauf. Gestalterische Ansprüche dulden oftmals keine sichtbaren konstruktiven Elemente wie Fugen und Verbindungstechniken. Dies hat zu Konstruktionsweisen mit Verklebungen und Verspachtelungen geführt, die nur schwer wieder lösbar sind.

Dementsprechend ist auch der Rückbau in den letzten Jahrzehnten immer komplexer geworden.

Die Beantwortung der Frage nach der Messbarkeit des zirkulären, Urban-Mining-gerechten Bauens muss deshalb nicht nur die Recyclingfähigkeit sondern auch den Rückbau mit einbeziehen. Die deutschen Zertifizierungssysteme für Nachhaltiges Bauen haben dies in den letzten Jahren versucht. In eigener Praxiserfahrung und in Diskussionen mit den Zertifizierern und anderen Anwendern hat die Verfasserin dieser Arbeit immer wieder festgestellt, dass die Bewertung weitgehend subjektiv durchgeführt wird und zudem wenig anwenderfreundlich ist. Deshalb muss zunächst analysiert werden, welche Instrumente bereits existieren und auf welche Weise die Rückbau- und Recyclingfähigkeit dort bewertet wird (Kapitel 4). Handelt es sich um quantitative oder qualitative Methoden? Qualitative Bewertungsmethoden, z.B. in Form von Checklisten sind zwar einfacher durchzuführen und benötigen keine Datenbasis zur Entwicklung von Maßstäben, doch mit Blick auf die Objektivität sind quantitativ messbare Bewertungen zu bevorzugen.

Weiterhin muss untersucht werden, ob Ergebnisse anderer Forschungsarbeiten aufgegriffen werden können, um diese weiterzuentwickeln oder Teilergebnisse zu nutzen. Aufgrund der Relevanz des Themas für die Bauwirtschaft ist die Entwicklung und Weiterentwicklung von Bewertungssystemen ein laufender Prozess (Kapitel 4.3).

Mit Blick auf die Motivation, messbare Indikatoren für zirkuläres Bauen zu entwickeln, um stoffliche Ressourcen zu schonen, stellen sich folgende untergeordnete Fragen:

- **Wie kann der gesamte Lebenszyklus einbezogen werden?**

Stoffkreisläufe können und sollen über den gesamten Lebenszyklus geschlossen werden, d. h. sowohl in der Herstellungsphase (z. B. durch Einsatz von Sekundärrohstoffen) und in der Nutzungsphase durch austauschbare, möglichst wiederverwendbare Bauelemente

(Re-Use) als auch beim späteren Rückbau durch sortenrein trennbare und wiederverwertbare Baustoffe (Recycling).

- **Was zeichnet ein kreislauffähiges Bauwerk aus und welche quantitativen Parameter gehören dazu?**  
Welche Parameter sind geeignet, um Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen zu berechnen, und in welcher Einheit können sie gemessen werden?
- **Auf welcher Ebene können Kreislaufpotenziale gemessen werden?**  
Ein Bauwerk setzt sich aus mehreren Bauteilen, Bauelementen, Baustoffen und Materialien zusammen. Deshalb muss untersucht und festgelegt werden, auf welcher Ebene Parameter zur Berechnung von Kreislaufpotenzialen gemessen werden können.
- **Welche Rolle spielt der Rückbau und wie kann er angemessen einbezogen werden?**  
Die Rückbaufähigkeit wurde in der Nachhaltigkeitsbewertung bisher eher stiefmütterlich behandelt. Sie ist aber wichtig für die Rückgewinnung sortenreiner Wertstoffe. Für die Bewertung der Rückbaufähigkeit fehlen Grundlagen, mit denen der Einfluss der konstruktiven Ebene auf die Rückgewinnung von Baustoffen in der End-of-Life-Phase beurteilt werden kann.
- **Wie kann die Qualität der Kreislaufpotenziale definiert und abgebildet werden?**  
Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der quantitativen Bewertung zur Steigerung des Bauens in geschlossenen Kreisläufen. Es muss deshalb definiert werden, was unter geschlossenen (und offenen) Kreisläufen zu verstehen ist und welche unterschiedlichen Qualitäten der Nachnutzung quantitativ abgebildet werden.
- **Was muss ein Bewertungsinstrument erfüllen, um eine breite Akzeptanz zu erfahren?**  
Eine praxistaugliche und anwenderfreundliche Systematik ist Voraussetzung für die Akzeptanz unter Planern. Diese sind die Hauptzielgruppe für den Transfer der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit in die Praxis.
- **Und schließlich: Welchen Beitrag kann der Urban Mining Index für die weitere Forschung zum Ressourcen- und Umweltschutz leisten?**  
Mit dem Ressourcenverbrauch sind diverse Umweltwirkungen verbunden, z. B. Emissionen, die bei der Herstellung von Baustoffen in die Umwelt gelangen. Da neben dem Ressourcenschutz die Reduzierung von Emissionen, insbesondere von Treibhausgasen, angesichts des anthropogen verursachten Klimawandels höchste Priorität haben sollte, stellt sich die Frage, welchen Beitrag der Urban Mining Index leisten kann, um die Umweltwirkungen des zirkulären Bauens zu messen. Wünschenswert wäre, wenn die Ergebnisse dieser Arbeit dazu beitragen können, die End-of-Life-Phase in der Ökobilanzierung besser abbilden zu können. Hierfür muss der Stand der Forschung zur Ökobilanzierung überprüft und analysiert werden, wie die Promotionsergebnisse in weitere Forschungsarbeiten transferiert werden können.

---

## 1.4. Ziele dieser Arbeit

Hauptziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Methodik für die objektive Bewertung der zirkulären Eigenschaften von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Aus der Fragestellung ergeben sich folgende Teilziele:

### 1.4.1. Die Verbindung der Lebenszyklen: Pre-Use-, Use- und Post-Use-Phase

Das Bauen muss in Kreisläufen gedacht werden. In den Baukreislauf kann an jeder Stelle bzw. zu jeder Lebenszyklusphase eingestiegen werden. In dicht besiedelten Gebieten beginnt das Bauen mangels freier Flächen oft mit einem Um- oder Rückbau. Der Bestand kann dann entweder weitergenutzt werden (ggf. nach Sanierung) oder das bestehende Bauwerk wird als urbane Mine genutzt und selektiv zurückbaut, sodass die Baustoffe oder Bauteile für das neue oder andere (regionale) Bauvorhaben nach Aufbereitung wieder eingesetzt werden können.

Die Nutzungszyklen von Bauwerken und ihren Teilen werden aufgrund verschiedener externer Einflüsse immer kürzer. Beispielsweise müssen sich in Großstädten mit hohen Grundstückspreisen Investitionen schnell bezahlt machen. Der Flächendruck führt zu frühzeitigem Abbruch, um Flächen noch effizienter nutzen zu können. Unsere schnelllebige Zeit mit übertriebenen Ansprüchen auf etwas Neues tut ihr Übriges. Je kürzer die Nutzungszeit, desto wichtiger ist es, die Materialien im Kreislauf zu halten.

Bereits in der Planung muss der gesamte Kreislauf gedacht werden. Die Auswahl der Baustoffe und die Art und Weise, wie die einzelnen Komponenten miteinander verbunden werden, spielen eine entscheidende Rolle für den Aufwand mit dem sie am Ende der Nutzungsdauer wieder getrennt werden können.

Die Bewertungsmethode muss somit folgende Aspekte berücksichtigen und damit den aktuell geplanten Lebenszyklus mit dem vorigen und dem anschließenden Lebenszyklus verbinden:

- Pre-Use-Phase  
Kreisläufe bereits *vor* der geplanten Nutzung mit der Weiternutzung, Wiederverwendung oder dem Recycling vorhandener, bereits dem Naturkreislauf entnommener Materialien schließen  
→ Bewertung des Einsatzes von Sekundär- und Primärmaterial
- Use-Phase  
Nutzungsdauer des Bauwerks und seiner Bauteile einbeziehen  
→ Austauschhäufigkeiten berücksichtigen
- Post-Use-Phase  
Das Schließen von Kreisläufen *nach* der geplanten Nutzung vorausdenken  
→ Bewertung der Nachnutzbarkeit von Bauteilen und Baustoffen aus Konstruktionen

### 1.4.2. Definition von quantitativ messbaren Parametern

Die Grundprinzipien für kreislauffähiges Bauen wurden in den gängigen Instrumenten zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden und in der

praxisnahen Literatur, wie dem Atlas Recycling [20], bereits hinreichend beschrieben. Im Wesentlichen zeichnen sich kreislauffähige Bauwerke durch wiederverwendbare Bauteile oder recyclingfähige Baumaterialien sowie leicht demontierbare Konstruktionen und Verbindungstechniken aus.

Für eine objektive Bewertung dieser grundsätzlichen Anforderungen müssen messbare Parameter definiert werden. Dies betrifft sowohl die stoffliche als auch die konstruktive Ebene. Hierfür muss zunächst analysiert werden, wie z.B. Recyclingraten und Recyclingpotenziale von Baustoffen sowie das Rückbaupotenzial von Konstruktionen und Verbindungstechniken abgebildet werden kann. Ziel ist es, messbare Kenngrößen zu definieren, die sich an der Praxis orientieren. Durch empirische Forschung sollen Benchmarks<sup>5</sup> aus der Rückbau- und Verwertungspraxis erhoben werden, aus denen Indizes entwickelt werden können.

#### **1.4.3. Identifikation, Analyse und Definition geeigneter Bewertungsebenen**

*„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“* Dieser Satz von Aristoteles trifft seit jeher auch auf Bauwerke zu.

Die Fügung einzelner Komponenten zu einem großen Ganzen kann nicht durch einfache Addition ausgedrückt werden. Einzelne Bauprodukte lassen sich beschreiben, z. B. anhand ihrer Inhaltsstoffe. Hersteller können Sekundärrohstoffanteile angeben und die Recyclingfähigkeit nachweisen. Auf Gebäudeebene haben die Planer und Bauausführenden jedoch aus einzelnen Materialien, Baustoffen, Produkten und Systemen ein Gesamtwerk erstellt. In Kapitel 7.1 wird deshalb analysiert, auf welcher Ebene welche Bewertungen durchgeführt werden können.

#### **1.4.4. Analyse und Bewertung des Rückbaus**

Die Bewertung der Rückbaufähigkeit ist ein Kernthema dieser Arbeit. Der Rückbau hat wesentlichen Einfluss auf die Sortenreinheit der zurückzugewinnenden Stoffe. Deshalb sollen unter anderem Rückbauverfahren und -techniken untersucht werden (s. Kapitel 3.3). Bei der Auswahl der Verfahren spielt die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus eine entscheidende Rolle. In einer Marktwirtschaft, in der Unternehmen zueinander im Wettbewerb stehen und in der das wirtschaftlichste Angebot in der Regel den Zuschlag erhält, ist die Wirtschaftlichkeit entscheidend für die Durchsetzung des selektiven Rückbaus. Rechtliche Regelungen, die den selektiven Rückbau wirtschaftlich machen könnten, greifen bisher zu kurz. So setzt die Gewerbeabfallverordnung (s. Kapitel 3, Seite 44) an der Stelle der Entsorgung an, und nicht schon beim Rückbau. Da die Verordnung außerdem Ausnahmeregelungen zulässt, wenn die Trennung der Abfälle technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unzumutbar ist, wird sich der selektive Rückbau auf Basis dieser Verordnung nur durchsetzen, wenn er

- a) technisch möglich und
- b) wirtschaftlich ist.

<sup>5</sup> Ein Benchmark (engl.) ist ein Maßstab für den Vergleich von Leistungen, (Quelle: Duden)



A 1.10 Beispiel einer modernen Ruine: seit Jahren leerstehende Tankstelle im Münsterland

Im Extremfall kann ein hoher Rückbau- und Entsorgungsaufwand sogar zu modernen Ruinen führen – sozusagen ungenehmigten Abfalllagern. Gerade in Gebieten mit niedrigen Grundstückspreisen können bei rückläufiger Bautätigkeit (vgl. Kapitel 3.5) solche Problemfälle entstehen, vor allem wenn die Entsorgung aufgrund von Altlasten besonders teuer ist oder die Nutzung vom Flächennutzungsplan eingeschränkt wird (s. Abb. A 1.10).

Der Rückbauaufwand und die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus müssen für eine objektive Bewertung der Kreislaufkonsistenz genauso messbar gemacht werden wie die Recyclingfähigkeit und etwaige Qualitätsverluste.

**Folgende Kernthesen lassen sich festhalten, die bei der Einbeziehung des Rückbauaufwands in die Bewertung zu beachten sind:**

- Die sortenreine Trennung ist eine Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling.
- Die Wirtschaftlichkeit ist ein entscheidender Faktor für die Durchführung der sortenreinen Trennung.
- Der Wert der zurückzugewinnenden Stoffe spielt eine entscheidende Rolle bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit.
- Je höher der Aufwand für den Rückbau und die sortenreine Trennung, desto unwirtschaftlicher ist der Rückbau.
- Je wirtschaftlicher der Rückbau und die sortenreine Trennung, desto wahrscheinlicher ist ein hochwertiges Recycling.

Die Parameter zur Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus werden in Kapitel 5.3 definiert. Kapitel 6 beschäftigt sich mit Recherchen und Untersuchungen zur Entwicklung von Benchmarks für die Einordnung der ökonomischen Kriterien.

#### **1.4.5. Abbildung der Kreislaufpotenziale nach Qualitäten**

Im Bauwesen ist eine Verwertung von Abbruchmaterialien derzeit meist mit Qualitätseinbußen verbunden. Beispielsweise werden hochwertige mineralische Baustoffe, die den größten Anteil der Abfälle ausmachen (siehe Kapitel 3.2), nach dem Abbruch in Recyclinganlagen gebrochen und vorwiegend als Unterbaumaterial im Straßenbau eingesetzt. Hochwertige Bindemittel wie Ton oder Zement können nicht zurückgewonnen werden, sodass ein Qualitätsverlust eintritt. Der Verwertungsprozess wird dann als Downcycling bezeichnet. Auch Kunststoffe und Holzfasern erleiden bei der stofflichen Verwertung in der Regel Qualitätsverluste. Sortenreine Metalle können dagegen nahezu endlos auf gleicher Qualitätsstufe recycelt werden, und naturbelassene biotische Materialien können seit jeher durch Verrotten im natürlichen Kreislauf zirkulieren. Ziel ist es, die unterschiedlichen Qualitätsstufen in der Bewertungsmethodik abzubilden (s. Kapitel 2.2.3 und 2.2.5). In Kapitel 7 wird die Berechnung der Kreislaufpotenziale nach Qualitätsstufen beschrieben.

#### **1.4.6. Einfache Anwendbarkeit und gut ablesbare Darstellung**

Für die Anwendung in der Praxis werden leicht handhabbare Instrumente benötigt. Der Urban Mining Index soll ein Werkzeug werden, das Archi-

tekten und Ingenieuren als praktikables Planungsinstrument zur Bewertung der Kreislauffähigkeit konkreter Gebäudeplanungen dienen kann, z. B. für die Erstellung von Urban-Mining-Konzepten in der Planungsphase.

Die Ergebnisse müssen klar ablesbar sein. Die Gesamtbewertung soll als aussagekräftiges, quantitatives Ergebnis mit grafischer Darstellung ausgegeben werden. Angestrebt wird die Angabe des Anteils an zirkulären Materialien in % der Gesamtmenge aller Materialien.

Das Tool soll auf allen gängigen Betriebssystemen mit einfacher Software anwendbar sein.

#### **1.4.7. Anwendung an Modellprojekten**

Anhand von fiktiven Modellprojekten bzw. konstruktiven Entwürfen soll die Anwendbarkeit und die Eignung als Planungsinstrument getestet und verifiziert werden. Anschließend soll an einem realen Bauprojekt die Praxistauglichkeit der Bewertungsmethodik untersucht werden.

#### **1.4.8. Eignung für Zertifizierungssysteme**

Letztlich soll der Urban Mining Index von jedem Planer, aber im Besonderen von den Anwendern der deutschen Zertifizierungssysteme für die Bewertung der Kriterien zur Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit genutzt werden können.

Zu diesem Zweck werden die Zertifizierungssysteme in Kapitel 4.1 näher untersucht und deren Anforderungen berücksichtigt. Die Ergebnisse sollen beispielsweise leicht auf das 100-Punkte-Bewertungsschema der deutschen Zertifizierungssysteme übertragbar sein.

Recyclinghof  
Friedhof



---

## 2. Strategie und wissenschaftliches Vorgehen

In diesem Kapitel werden bekannte Strategien für eine nachhaltige Entwicklung erörtert und auf ihre Wirksamkeit untersucht, um daraus die eigene Strategie abzuleiten.

Es wird geprüft, welche Instrumente zur Verfolgung der Ziele, die hinter diesen Strategien stehen, existieren. In diesem Rahmen wird die Methodik der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment – LCA) analysiert, um deren Möglichkeiten und Grenzen zur Bewertung des zirkulären Bauens aufzuzeigen.

Hierdurch wird deutlich, dass neue und ergänzende Instrumente zur Verfolgung wirksamer Strategien für das ressourcenschonende Bauen benötigt werden.

Zur Entwicklung des Urban Mining Index werden im Anschluss die Systemgrenzen (der Bewertungsumfang) festgelegt.

Schließlich wird die wissenschaftliche Vorgehensweise beschrieben: Welche Vorarbeiten/Recherchen sind notwendig? Welche Inhalte müssen erarbeitet werden? Welche Untersuchungen sind hierfür erforderlich? Welche Schritte sind für die Entwicklung eines Bewertungstools notwendig?

2.1.	Strategien für eine nachhaltige Entwicklung	18
2.2.	Ableitung der eigenen Strategie: konsistente Kreisläufe	21
2.3.	Instrumente zur Verfolgung der Strategien für eine nachhaltige Entwicklung	26
2.4.	Systemgrenzen	33
2.5.	Wissenschaftliches Vorgehen	35

---

## 2.1. Strategien für eine nachhaltige Entwicklung

Wie in Kapitel 1.1 bereits erwähnt, werden in der Debatte um nachhaltige Entwicklung drei grundlegende Strategien diskutiert: Suffizienz, Effizienz und Konsistenz. Über die Bedeutung dieser Strategien für die notwendige Veränderung unserer Wirtschaftsweise wird unter den Akteuren in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft leidenschaftlich gestritten. Welche Strategie in dieser Arbeit verfolgt wird und warum, soll durch die folgende Analyse der drei Strategien deutlich werden.

### 2.1.1. Suffizienz

Die Suffizienz-Strategie fordert nach Hauff/Kleine [21] eine Minderung des Ressourcen- und Umweltverbrauchs auf ein Maß, das für ein zufriedenstellendes („suffizientes“) Leben genügt. Dem liegt meist die menschliche Überzeugung und eine veränderte Lebensführung zugrunde, wonach sich die Menschheit mit *weniger* zufrieden geben muss.

Das Prinzip der Suffizienz gilt im Allgemeinen als unbeliebt, weil damit ein Verzicht verbunden ist. In einer Marktwirtschaft funktioniert dieser Weg nur auf freiwilliger Basis. Er ist schwer durchsetzbar, vor allem wenn der freiwillige Verzicht für den Einzelnen eine große Einschränkung bedeutet, aber der Effekt der Handlung des Einzelnen für die Allgemeinheit kaum spürbar ist (Beispiel: Verzicht eines Einzelnen auf das Autofahren).

### 2.1.2. Effizienz

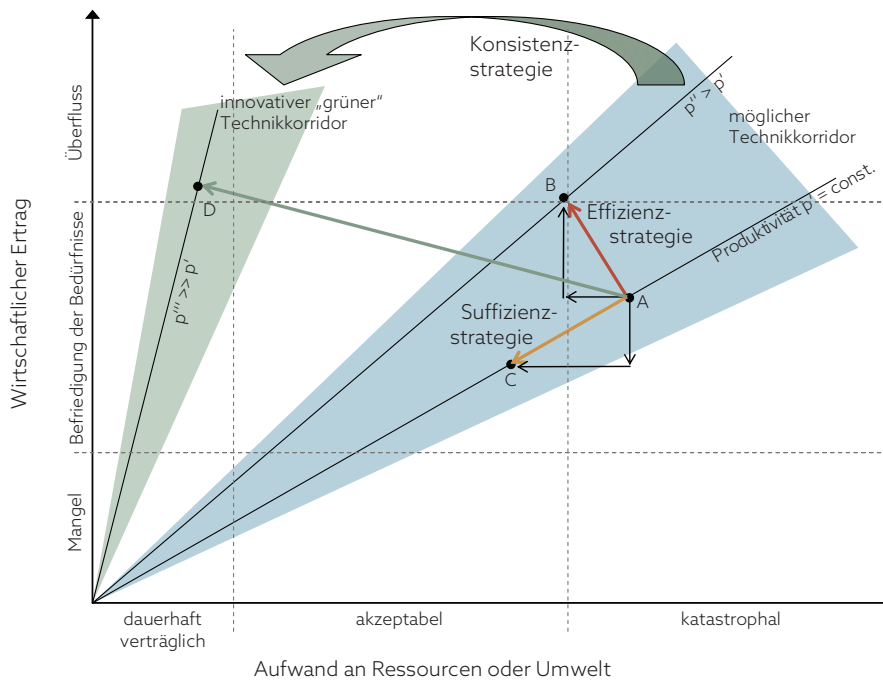
Die Effizienz-Strategie zielt auf eine Erhöhung der Ressourcenproduktivität und ist nach Hauff/Kleine [22] von allen drei Leitstrategien am weitesten operationalisiert<sup>6</sup>. Konkret bedeutet dies, etwas zu *verbessern*. Von der Bundesregierung wird die Effizienz-Strategie mit dem Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) verfolgt, um die Gesamtrohstoffproduktivität zu steigern (s. Kapitel 1, Abb. A 1.7). In der Wirtschaft ist die Effizienz beliebt, da sie mit höheren Erträgen einhergeht und dem Konsumenten die Möglichkeit suggeriert, den Wohlstand unter Entlastung der Umwelt beibehalten zu können. Die Strategie stößt jedoch an ihre Grenzen, wenn die technischen Möglichkeiten ausgeschöpft sind. Außerdem werden durch Effizienz erzielte Fortschritte oftmals durch Rebound-Effekte kompensiert. Bei steigendem Bevölkerungswachstum kann die Effizienzstrategie trotz individueller Einsparungen einen absoluten höheren Verbrauch kaum verhindern. Im Grunde ignoriert sie damit das Erreichen der Grenzen des Wachstums.

### 2.1.3. Konsistenz

Die Konsistenz-Strategie besagt nach Hauff/Kleine [23], dass die aus menschlichen Aktivitäten resultierenden Stoff- und Energieströme mit den Naturkreisläufen verträglich sein müssen. Hierzu sind Produktions- und Konsummuster langfristig umzustellen. Konkret geht es darum, etwas *anders* zu machen.

Der Ökonom und Sozialwissenschaftler Joseph Huber [24] beschrieb

<sup>6</sup> von lateinisch *operatio* = Verrichtung



A 2.2 Produktivitätsraten der Nachhaltigkeitsstrategien Konsistenz, Effizienz und Suffizienz im Aufwands- und Ertragsdiagramm nach Schmidt [27]

A 2.2

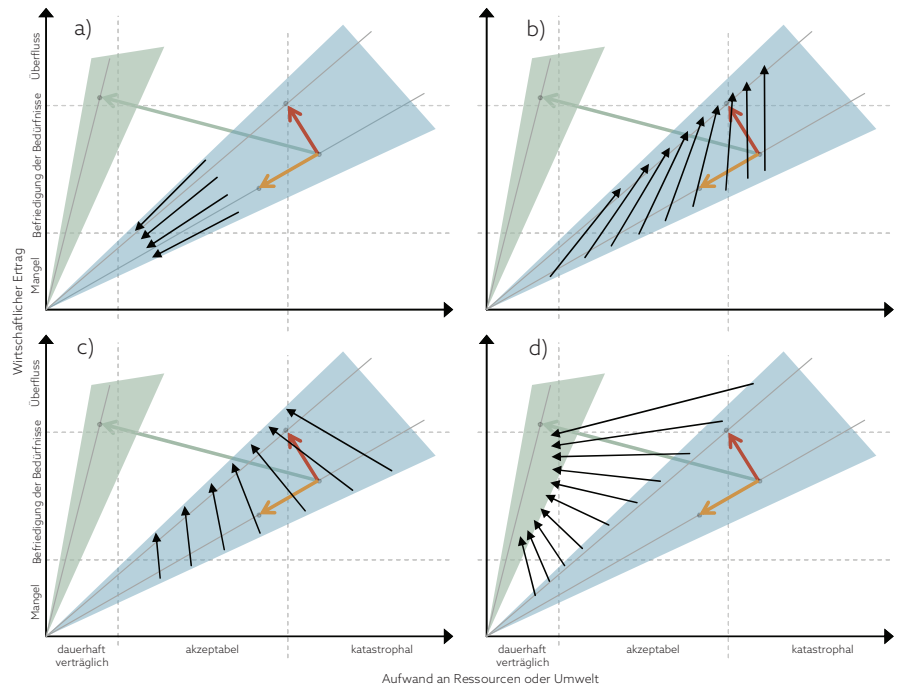
1995 die Konsistenz als Königsweg für nachhaltiges Wirtschaften. Demnach ist nicht die Menge des Konsums entscheidend, sondern die Verträglichkeit (Konsistenz) der Produktionskreisläufe mit den natürlichen Stoffkreisläufen. Braungart und McDonough [25] haben diesen Ansatz mit dem Begriff „Ökoeffektivität“ umschrieben und das Cradle-to-Cradle-System entwickelt (s. Kapitel 4.2.2). Danach ist es egal, wie viele Rohstoffe eingesetzt werden, solange diese nicht verbraucht, sondern nur gebraucht werden und ohne Verlust in endlosen Kreisläufen geführt werden können. Die Strategie der Konsistenz bedeutet eine vollkommene Transformation unserer Wirtschaftsweise von einem linearen zu einem zirkulären System.

#### 2.1.4. Produktivität der Strategien

Der Physiker und Umweltwissenschaftler Mario Schmidt [26] hat die Bedeutung dieser Transformation 2008 in einem Aufwands- und Ertragsdiagramm dargestellt, in dem alle drei Strategien abgebildet sind (s. Abb. A 2.2). Er beschreibt die Transformation so: „Effizienzstrategien bewegen sich in einem vorgegebenen Technikkorridor. Konsistenzstrategien unterscheiden sich davon, dass sie neue Technikkorridore anstreben, die vom Aufwand her dauerhaft verträglich sind.“

Doch auch die Strategie der Konsistenz oder der „Ökoeffektivität“ ist nicht unumstritten. So ist es z. B. nicht richtig, „intelligent zu verschwenden“, wie Braungart [28] propagiert, denn selbst wenn wir es schaffen, alle Materialien aus erneuerbaren, kompostierbaren oder recycelten und

- A 2.3 „Kraftfelder“ suffizienter Strategien (a), effizienter Strategien ohne Kostenkomponente für Ressourcen- und Umweltaufwand (b), mit Kosten für Ressourcen- und Umweltaufwand (c) und notwendiges Kraftfeld zum Erreichen des nachhaltigen Zielgebiets (d) nach Schmidt [30]
- A 2.4 Natürlicher Kreislauf und gestörter Kreislauf nach Schlichting [31]
- A 2.5 Eingriff des Technischen Kreislaufs in die von Schlichting beschriebenen Naturkreisläufe, eigene Darstellung



A 2.3

recyclingfähigen Stoffen herzustellen, so ist dafür vor allem eine begrenzte Ressource erforderlich: Fläche. Fläche für die Herstellung von (Bau-)Stoffen steht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, zur Siedlungsfläche, zum (möglichst ungestörten) Lebensraum für andere Lebewesen – erst recht bei weiterhin steigender Weltbevölkerung.<sup>7</sup> Auch für Recyclingprozesse wird diese Fläche benötigt, solange die dafür notwendige erneuerbare Energie nicht verlustfrei aus Gegenden transportiert werden kann, die biologisch kaum Bedeutung haben (z. B. Wüsten). Taghizadegan [29] begründet seine Kritik am Cradle-to-Cradle-System deshalb mit einem physikalischen Grundsatz: „die Gesetze der Thermodynamik verbieten ewige Kreisläufe ohne Verluste.“

Schmidt kommt in seinen Studien zu dem Schluss, dass keine der Strategien den alleinigen Königsweg darstellt, und sieht die Effizienz „als Mittelweg und als Brücke zur Konsistenz“. Durch Steuerung der Rahmenbedingungen, z.B. über Kosten für Umweltwirkungen, würde „der Qualitätssprung zur Konsistenz nicht nur möglich, sondern auch wirtschaftlich erstrebenswert“, so sein Ansatz, der in Abb. A 2.3 grafisch dargestellt ist.

<sup>7</sup> So sprechen sich selbst Holzexperten für eine effiziente Holzskelettbauweise statt für Massivholzbauweise aus, um bei der derzeitigen Bautätigkeit möglichst viele Bauten aus Holz erstellen zu können, ohne dass der Waldbestand dauerhaft abnimmt (persönliches Gespräch mit Dr. Jan Wenker, ehemals Thünen Institut für Holzforschung).

## 2.2. Ableitung der eigenen Strategie: konsistente Kreisläufe

Diese Arbeit greift die Strategie der konsistenten Kreisläufe auf. Der Urban Mining Index soll ein Instrument zur Verfolgung der Ziele konsistenter Kreisläufe sein – nämlich Ressourcen- und Umweltschutz zur Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen und des Wohlstands. Basierend auf den zuvor dargestellten Erkenntnissen soll die Strategie der konsistenten Kreisläufe von der Strategie der Effizienz und Suffizienz begleitet werden. Hierzu soll ein bestehendes Instrument genutzt werden, das in Kapitel 2.3 vorgestellt und analysiert wird, um den Nutzen des zirkulären Bauens zu überprüfen: die Ökobilanz. Doch zunächst wird genauer beleuchtet, was unter konsistenten Kreisläufen zu verstehen ist. Kreisläufe sind konsistent, wenn sie verträglich mit den Naturkreisläufen sind. Was bedeutet das genau?

### 2.2.1. Einfluss des Menschen auf die natürlichen Kreisläufe

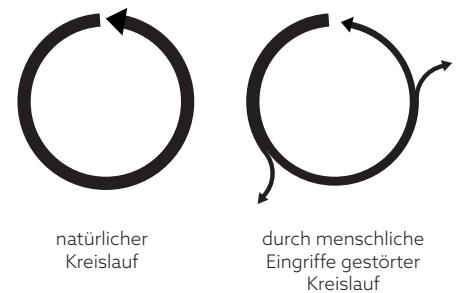
Der technische und der natürliche Kreislauf, wie von Braungart und McDonough im Cradle-to-Cradle-System (s. Kapitel 4.2.2) beschrieben, existieren nicht parallel, sondern der technische wird durch den natürlichen erst möglich. Alles, was wir dieser Erde entnehmen, ist den Naturkreisläufen entnommen. Wir können aus natürlichen Materialien technische Materialien herstellen, z. B. aus Erzen Metalle gewinnen oder aus Erdöl Kunststoff. Da die Erde ein geschlossenes System ist, können technische Materialien nur „verloren“ gehen, wenn sie so verändert werden, dass sie nicht mehr oder nur mit erheblichem Aufwand nutzbar sind, z.B. durch chemische Veränderung oder Verschmutzung oder wenn sie in den gasförmigen Zustand wechseln und in die Atmosphäre emittieren. **Diese Veränderungsprozesse sind mit erheblichen Einflüssen auf die natürlichen Kreisläufe verbunden.**

Der Physiker Schlichting [31] spricht in diesem Zusammenhang von gestörten Kreisläufen (s. Abb. A 2.4). Die komplexen Zusammenhänge in der Natur laufen nach seinen Ausführungen im Wesentlichen in drei übergeordneten Kreisläufen ab:

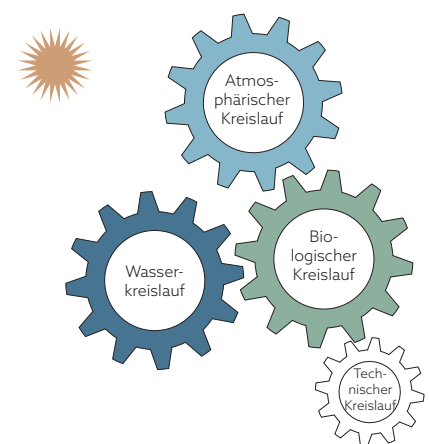
- Atmosphärischer Kreislauf
- Wasserkreislauf
- Biologischer Kreislauf

Diese Kreisläufe sind eng miteinander verzahnt und werden wiederum durch einen höheren Kreislauf in Gang gehalten: den Kreislauf des Sonnensystems.

Die drei Naturkreisläufe gliedern sich in zahlreiche Teilkreisläufe. Zum biologischen Kreislauf gehören unter anderem der Sauerstoff- und der Kohlenstoffkreislauf, die sowohl untereinander als auch mit dem Wasser- und dem atmosphärischen Kreislauf in engem Zusammenhang stehen. Auf dieses gigantische Getriebe, das seit Ewigkeiten konstant nach den physikalischen Gesetzen abläuft, nimmt der Mensch zunehmend einen störenden Einfluss. So wie die Sonne mit ihrer Energie die natürlichen Kreisläufe in Gang hält, treibt der Mensch mit der tief in der Erde gespeicherten Energie, den fossilen Brennstoffen, die technischen Kreisläufe an



A 2.4



A 2.5

---

und greift damit in die natürlichen Kreisläufe ein (s. Abb. A 2.5). Durch die Verbrennung der über Jahrtausende gespeicherten Energie innerhalb kürzester Zeit werden der Kohlenstoffkreislauf und der atmosphärische Kreislauf spürbar gestört: Die Atmosphäre erwärmt sich durch eine hohe Kohlenstoffdioxidkonzentration.

Aber auch mit dem Abbau von stofflichen Ressourcen greift der Mensch massiv in die natürlichen Kreisläufe ein. Die nicht nachhaltige Nutzung von Wäldern (z. B. durch Kahlschlag) und der großflächige Tagebau (z. B. zur Entnahme von Sand und Kies) oder der Bergbau mit immer größeren Abraumhalden zur Gewinnung von Erzen zerstört Lebensräume und beeinflusst den natürlichen Wasserkreislauf. Der Ressourcenverbrauch geht einher mit hohem Abfallaufkommen. Schädliche Stoffe gelangen über Deponien oder Rauchgase in den Wasserkreislauf und in die Atmosphäre. Artensterben, Bodenerosion und Luftverschmutzung sind einige der Folgen, die gestörte Kreisläufe kennzeichnen und zur Gefahr für die menschliche Existenz werden können.

**Die technischen Kreisläufe müssen deshalb dringend geschlossen und so betrieben werden, dass sie mit den natürlichen Kreisläufen verträglich – konsistent – sind.**

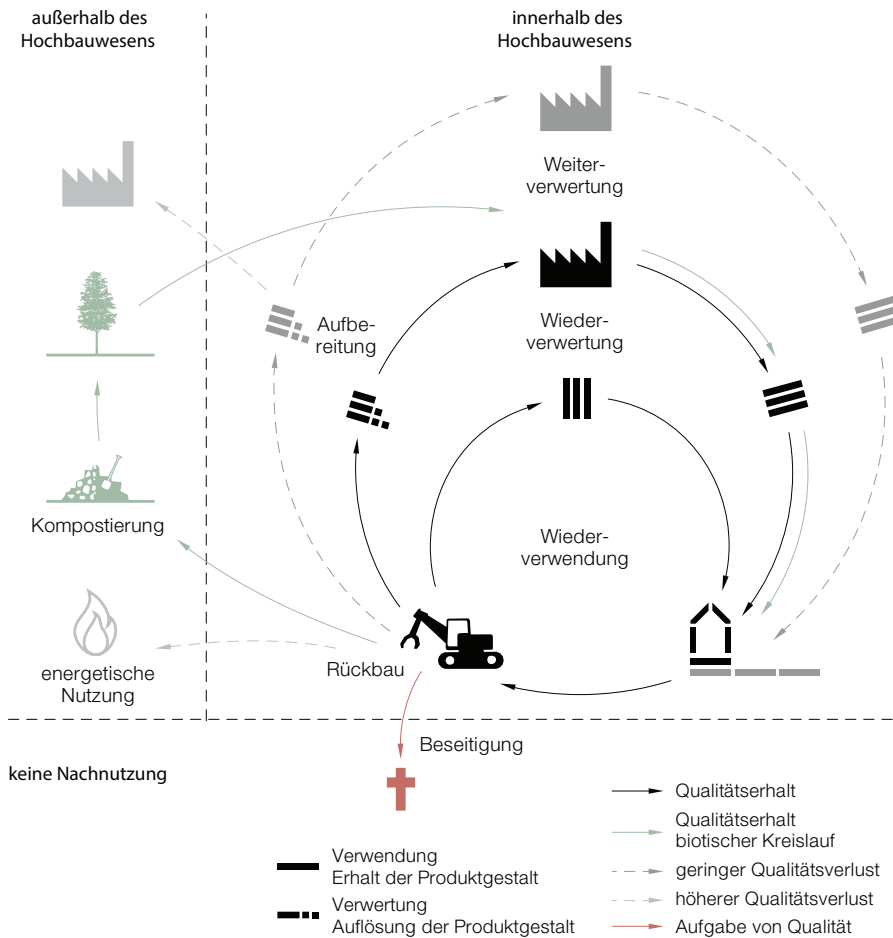
### **2.2.2. Voraussetzungen für konsistente Kreisläufe**

Materialien, die dem natürlichen Kreislauf entnommen werden, müssen entweder so verarbeitet und genutzt werden, dass sie ohne Störstoffe in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden können (z. B. durch Kompostierung), oder sie müssen dauerhaft in geschlossenen technischen Kreisläufen geführt werden. Das bedeutet, dass sie nach ihrer Nutzung nicht entsorgt, sondern zurückgewonnen und wiederverwendet oder nach Aufbereitung wiederverwertet, d. h. ohne Qualitätsverlust in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden.

Dadurch sollen alle Aufwendungen der Primärherstellung ersetzt werden, möglichst inkl. des Energieaufwands, sodass der minimierte, für den Antrieb des Kreislaufs verbleibende Energieaufwand ebenfalls aus zirkulären, erneuerbaren Quellen gedeckt werden kann.

Wenn bei der Aufbereitung ein Qualitätsverlust eintritt, wird der Kreislauf bereits gestört, da die Materialien den Produktionskreislauf verlassen, um in nachgeordneten Produktionskreisläufen (entweder im oder außerhalb des Bauwesens) eingesetzt zu werden. Durch den Qualitätsverlust müssen die Materialien in der Regel nach einem oder mehreren Nachnutzungszyklen beseitigt werden, ggf. unter Nutzung der im Material gebundenen Energie. Solch eine **Kaskadennutzung** ist nur für biotische Rohstoffe eine Option, da der Kreislauf durch natürliches Nachwachsen geschlossen werden kann. Abb. A 2.6 zeigt die Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen nach Hillebrandt [32] mit den im Folgenden beschriebenen Begriffen.

A 2.6 Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen nach Hillebrandt [32]



A 2.6

### 2.2.3. Nachnutzungsmöglichkeiten von Baustoffen

Hillebrandt und Seggewies [33] haben im Atlas Recycling verschiedene Strategien zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung beschrieben, die hier als End-of-Life-Szenarien aufgegriffen werden: <sup>8</sup>

#### Wiederverwendung

Von Wiederverwendung wird gesprochen, wenn ein Produkt erneut unter Beibehaltung seiner Produktgestalt entsprechend seinem ursprünglichen Zweck eingesetzt wird (engl.: Re-Use). Die Qualität bleibt dabei weitgehend erhalten oder wird durch einfache Aufbereitung (z. B. Reparatur, Reinigung oder Oberflächenbehandlung) wiederhergestellt.

#### Wiederverwertung

Bei der Wiederverwertung werden gebrauchte (Bau-)Stoffe oder Produkte in einem Aufbereitungsprozess unter Auflösung ihrer Gestalt, aber unter Beibehaltung ihrer inhärenten<sup>9</sup> Eigenschaften zu „Ausgangsstoffen für Werkstoffe derselben Qualitätsstufe“ [33] verarbeitet. Durch vollständige Wiederverwertung entstehen nahezu geschlossene Materialkreis-

<sup>8</sup> Der Verzicht wird hier nicht aufgeführt, da er nicht bemessen werden kann.

<sup>9</sup> Nach der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9000 ist die Qualität als ein Grad definiert, „in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“. Ein Qualitätsmerkmal ist ein „inhärentes Merkmal eines Objekts, das sich auf eine Anforderung bezieht“. „Inhärent bedeutet ‚einer Einheit innewohnend‘, insbesondere als ständiges Merkmal“ (z. B. die Zugfestigkeit von Stahl als physikalische Eigenschaft). [34]

---

läufe<sup>10</sup>. Die Wiederverwertung kann als Recycling (im engeren Sinn) bezeichnet werden.

#### *Weiterverwendung*

Wird ein gebrauchtes Bauteil oder Produkt unter weitgehender Beibehaltung seiner Gestalt für einen anderen Zweck als den ursprünglichen eingesetzt, wird dies als Weiterverwendung (engl.: Further Use) bezeichnet. Die Weiterverwendung ist in der Regel mit einem Qualitätsverlust verbunden, weil die qualitativen Anforderungen dem ursprünglichen Zweck nicht mehr entsprechen bzw. die Leistung des Produkts nicht mehr dem ursprünglichen Zweck genügt.

#### *Weiterverwertung*

Bei der Weiterverwertung ist der Aufbereitungsprozess mit einer qualitätsmindernden Veränderung der inhärenten Eigenschaften verbunden. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird dies als Downcycling bezeichnet. Die Nutzung von Materialien in mehreren hintereinander geschalteten Zyklen, die von einem zum anderen Lebenszyklus mit Qualitätsverlust verbunden ist, wird auch Kaskadennutzung genannt. Der Kreislauf ist offen, da die Sekundärmaterialien den Produktkreislauf verlassen.

#### *Energetische Verwertung*

Die Nutzung von Abfällen als Brennstoff zur Energiegewinnung wird als energetische Verwertung bezeichnet. Sie zählt nach Abfallrahmenrichtlinie und Kreislaufwirtschaftsgesetz (s. Kapitel 3.1.2) zur „sonstigen Verwertung“ und ist gegenüber dem Recycling nachrangig eingestuft.

Die vorgenannten End-of-Life-Szenarien können nach ihren Qualitätsstufen im Kreislaufpotenzial differenziert abgebildet werden.

Weitere Entsorgungswege, wie die Verfüllung oder Beseitigung auf Deponien, bieten kein Kreislaufpotenzial.

### **2.2.4. Definition des Kreislaufpotenzials von Baustoffen**

Der Begriff „Kreislaufpotenzial“ wird von einzelnen Experten, die sich mit der Kreislaufwirtschaft beschäftigen, bereits verwendet, ohne dass hierfür eine offizielle Definition (z. B. im Duden) existiert. „Potenzial“ ist gemäß Duden von dem spätlateinischen *potentialis* abgeleitet, was bedeutet „nach Vermögen“. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird unter Potenzial eine Möglichkeit oder Fähigkeit verstanden.

#### *Kreislaufpotenzial*<sup>11</sup>

Das Kreislaufpotenzial prognostiziert den Anteil an Materialien und Baustoffen einer Konstruktion, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien in mehr oder weniger geschlossenen Materialkreisläufen geführt werden können. Ein Materialkreislauf ist geschlossen, wenn durch Wiederverwendung oder Wiederverwertung kein Qualitätsverlust

---

10 Die Definition lehnt sich an die technische Beschreibung von Produktsystemen und Allokationsverfahren für das Recycling in der DIN EN ISO 14044 [35] an.

11 Die Eigendefinitionen der Verfasserin zum Kreislaufpotenzial sowie zum Closed-Loop-Potenzial und zum Loop-Potenzial wurden bereits im Atlas Recycling [36] veröffentlicht.

entsteht. Ein offener Kreislauf hingegen ist durch Weiterverwendung oder Weiterverwertung gekennzeichnet, womit in der Regel ein Qualitätsverlust einhergeht.

Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit ist die differenzierte Abbildung der Kreislaufpotenziale nach Qualitäten (s. Kapitel 1.4.5). Übergeordnetes Ziel einer nachhaltigen Entwicklung muss die Generierung möglichst geschlossener Kreisläufe sein. Das Kreislaufpotenzial wird deshalb danach differenziert, ob es geschlossene oder offene Kreisläufe abbildet.

### **2.2.5. Differenzierung von Closed-Loop- und Loop-Potenzial**

#### *Closed-Loop-Potenzial*

Das Closed-Loop-Potenzial ist der prozentuale Anteil an Materialien und Baustoffen einer Konstruktion, der unter Berücksichtigung definierter Kriterien ohne Qualitätsverlust in geschlossenen Kreisläufen geführt werden kann. Die Wiederverwendung und Wiederverwertung gehören zu den Nachnutzungsstrategien, bei denen kein Qualitätsverlust eintritt.

#### *Loop-Potenzial*

Zum Loop-Potenzial einer Konstruktion zählen über den prozentualen Closed-Loop-Anteil hinaus auch Anteile an Materialien und Baustoffen, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien eine stoffliche Verwertung mit Qualitätsverlust (Weiterverwertung/Downcycling) ermöglichen. Das Loop-Potenzial bildet damit über die geschlossenen Kreisläufe hinaus auch offene Kreisläufe ab. Das Closed-Loop-Potenzial ist somit Teil des Loop-Potenzials.

Die Berechnung des Closed-Loop- und Loop-Potenzials wird in Kapitel 7 dargestellt.

---

## 2.3. Instrumente zur Verfolgung der Strategien für eine nachhaltige Entwicklung

Die Strategie der konsistenten Kreisläufe unterstellt, dass das zirkuläre Bauen grundsätzlich nachhaltiger ist als das Bauen nach dem linearen Prinzip. Dies muss jedoch überprüft werden, da z. B. auch Recyclingprozesse mit Aufwendungen verbunden sind.

### 2.3.1. Der utilitaristische Nutzen des zirkulären Bauens

„Die Richtigkeit menschlicher Handlungen bestimmt sich nach deren Folgen. Maßstab für die Beurteilung der Folgen ist der Nutzen (Utilität). Es kommt aber nicht auf den Nutzen für den Handelnden allein an. Ausschlaggebend ist das Wohlergehen aller von der Handlung Betroffenen.“ [37]

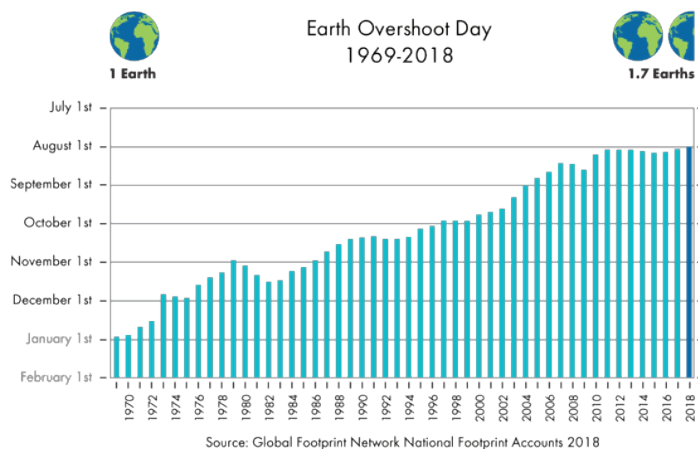
Ausgehend von dieser Definition des Utilitarismus<sup>12</sup> stellt sich bei jeder strategischen Handlung folgende übergeordnete Frage: **Welche Folgen und welchen Nutzen hat die Handlung für die Gesellschaft und für die Umwelt, ohne die eine Gesellschaft nicht existieren kann? Bezogen auf die Inhalte dieser Arbeit lautet die Frage: Welche Folgen und welchen Nutzen hat das zirkuläre Bauen?** Oder im Detail: Welche Folgen hat der einzelne Kreislaufprozess? Es kommt also auf die Wirkungen des Recyclings an.

Ein bewährtes Instrument zur Analyse der Auswirkungen von Produkten und Prozessen auf die Umwelt ist die Ökobilanzierung.

**Ihr wird oft nachgesagt, sie sei ein Instrument der Ökoeffizienzstrategie, da sie auf die Minimierung der negativen Auswirkungen auf die Umwelt abziele.** Doch liegt das nicht nur an unserer bisherigen Sicht- und Wirtschaftsweise? Wir haben erkannt, dass unser bisheriges Handeln eine Belastung für die Umwelt ist, also negative Auswirkungen hervorruft. Diese wollen wir minimieren. Dagegen sollen mit der Ökoeffektivitätsstrategie möglichst positive Effekte erzielt werden (s. Abb. A 2.8). Vorbild hierfür ist die Natur, in der alle organischen Stoffe – lebend oder post mortem – als Nahrung zur Erhaltung und Weiterentwicklung des Ökosystems dienen.

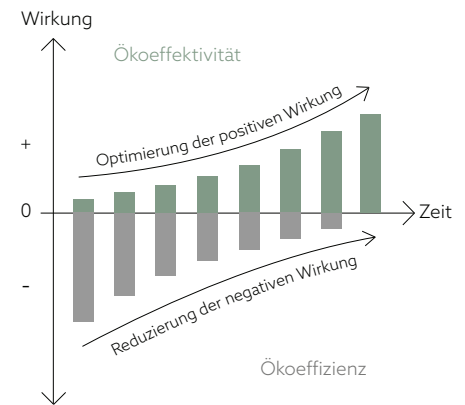
---

12 Der Utilitarismus ist eine von Jeremy Bentham (1748–1832) begründete Denkrichtung der Ethik, die das menschliche Handeln nicht aus sich selbst heraus als richtig oder falsch beurteilt, sondern nach ihrem Nutzen für die Allgemeinheit. [37]



A 2.7

Ist die Ökobilanz deshalb obsolet oder gar hinderlich, weil mit ihr eine „falsche“ Strategie verfolgt wird?



A 2.8

A 2.7 Earth Overshoot Day 1969-2018 [38]

A 2.8 Wirkungsrichtungen der Ökoeffizienz und der Ökoeffektivität nach Braungart/EPEA [39]

### 2.3.2. Die Ökobilanz ist keine Bilanz

Der Begriff „Bilanz“ ist im Grunde nicht passend. „Bilanz“ bedeutet im ursprünglichen Sinn „Gleichgewicht“<sup>13</sup>. In der Betriebswirtschaft, mit der der Begriff im Allgemeinen verbunden wird, ist die Bilanz immer ausgeglichen. Je nachdem, ob im Bilanzjahr ein Gewinn oder Verlust erwirtschaftet wurde, mehrt oder mindert dieser die Rücklagen auf der Passivseite der Bilanz (oder wird als Verlustvortrag auf der Aktivseite eingestellt, sofern keine Rücklagen mehr vorhanden sind) und gleicht so die Bilanz aus. Im übertragenen Sinn stellen die Ressourcen dieser Erde die Rücklagen dar, die auf der Passivseite (Habenseite) der Bilanz stehen (= Mittelherkunft), während die daraus hergestellten Güter (Gebäude, Infrastruktur, Technische Anlagen, langlebige Konsumgüter) auf der Aktivseite stehen müssten (= Mittelverwendung). Momentan mindern wir die Rücklagen dieser Erde, da wir ihr mehr Ressourcen entnehmen, als sie aus sich selbst heraus und mit der einzigen externen Quelle, der durch die Sonne gelieferten Energie, produzieren kann. Dies ist anschaulich ablesbar am Earth Overshoot Day, dem Erdüberlastungstag, den das Global Footprint Network jährlich ermittelt (s. Abb. A 2.7).

Mit der Öko-„Bilanz“ kann eher eine Einnahmen-/Überschussrechnung oder eine Gewinn- und Verlustrechnung als eine Bilanz aufgestellt werden, wie im Folgenden deutlich wird.

### 2.3.3. Die Ökobilanz als Instrument zur Prognose der Wirkungen

Die Ökobilanzierung ist eine etablierte Berechnungsmethode zur Bewertung der Auswirkungen von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen auf die Umwelt.

#### Systematik

Nach DIN EN ISO 14044 [41] umfasst eine Ökobilanz vier Phasen:

- die Phase der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen,
- die Sachbilanz-Phase,
- die Phase der Wirkungsabschätzung und
- die Phase der Auswertung.

<sup>13</sup> „Bilanz (lateinisch bilancia ‚(Balken-)Waage‘; aus lateinisch bi ‚doppelt‘ und lanx ‚Schale)“.[40]

---

In der Sachbilanz werden die Input- und Outputflüsse über den gesamten Lebenszyklus innerhalb definierter Systemgrenzen nach Massen berechnet. Zum Input gehören die einfließenden Ressourcen, zum Output die Abfälle und Abgabeströme (siehe Abb. A 2.10).

Die „Sachbilanz“ ist also eigentlich keine Bilanz, sondern eine Eingangs-/Ausgangsrechnung.

Die anschließende Wirkungsabschätzung stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Stoffströmen und den Auswirkungen auf die Umwelt dar.

#### *Die Gebäude-Ökobilanz*

Ökobilanzen für Gebäude sind in der DIN 15978 [42] geregelt. Die Berechnung schließt „sämtliche verwendeten Bauprodukte, -prozesse und -dienstleistungen im Verlauf des gesamten Lebenszyklus des betreffenden Gebäudes mit ein.“ Die Informationen zur Gebäudebeurteilung sind nach Modulen gegliedert (s. Abb. A 2.9).

Grundlage für die Bilanzierung der Baukonstruktion eines Gebäudes sind die Ökobilanzdaten der verwendeten Baustoffe und -produkte. Produktspezifische Daten werden von den Herstellern in Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations, EPDs) bereitgestellt (s. Kapitel 4.2.1, Typ III). Weitere, generische Daten werden in Deutschland in der ÖkobaDat vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) veröffentlicht. Die Grundlagen für die Bilanzierung von Bauprodukten sind in DIN 15804 [43] geregelt.

#### *Indikatoren*

Die Umweltinformationen werden mithilfe verschiedener messbarer Indikatoren bewertet. Abbildung A 2.10 zeigt die Indikatoren nach den Tabellen 2–5 der DIN 15978 [44] mit der jeweiligen Messgröße.

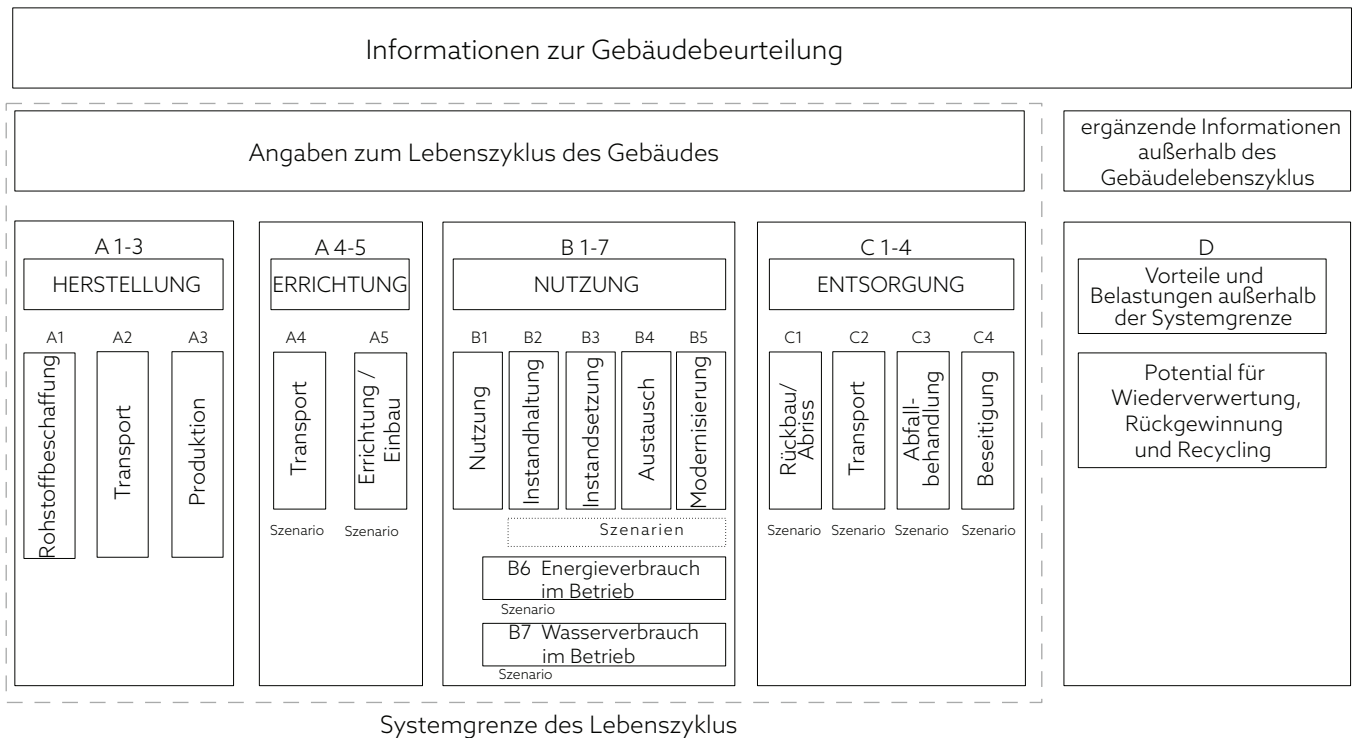
In der Aufstellung ist gekennzeichnet, welche Indikatoren aktuell in den beiden deutschen Gebäudezertifizierungssystemen (s. Kapitel 4.1.1 und 4.1.2) im Rahmen der Ökobilanzierung bewertet werden.

Dabei fällt auf, dass weder der Einsatz von Sekundärmaterialien (SM) noch die Abgabe von Materialien zur Wiederverwendung (CRU) oder zum Recycling (MFR) in der Sachbilanz (In- und Output) direkt bewertet werden, obwohl dies wichtige Indikatoren für den Ressourcenschutz sind, da sie zirkuläre Eigenschaften von Baustoffen abbilden.

Nur ausgewählte Umweltauswirkungen, die aus der Sachbilanz resultieren, werden bewertet. Es fehlen jedoch aussagekräftige Informationen zum Verbrauch stofflicher Ressourcen. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass der Ressourceneinsatz oftmals sehr vielfältig ist (verschiedene Metalle, Kies, Sand etc.) und nur schwer in einem einzigen Indikator abgebildet werden kann. Bei Abbildung mehrerer Indikatoren wird die Informationsfülle dagegen so hoch, dass der Adressat mit der Abwägung der Indikatoren überfordert sein könnte, vor allem, wenn die Bedeutung der einzelnen Rohstoffe für die Gesellschaft bzw. Wirtschaft nicht erkennbar ist.

#### *Der Indikator Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für Elemente*

Zur Abbildung von Knappheit dient der Indikator Abiotisches Ressour-



A 2.9

Umweltinformation	Indikator	internationale Abkürzung	Einheit/Messgröße	Bewertung in DGNB und BNB
Ressourcenverwendung (Input)	erneuerbare Primärenergie als Energieträger	PERE	MJ, Heizwert	✓
	erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	PERM	MJ, Heizwert	✓
	nicht erneuerbare Primärenergie als Energieträger	PENRE	MJ, Heizwert	✓
	nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	PENRM	MJ, Heizwert	✓
	<b>Sekundärmaterialien</b>	<b>SM</b>	<b>kg</b>	
	erneuerbare Sekundärbrennstoffe	RSF	MJ	
	nicht erneuerbaren Sekundärbrennstoffe	NRSF	MJ	
Frischwasser	FW	m <sup>3</sup>		
Abfallkategorien (Output)	Entsorgter gefährlicher Abfall	HWD	kg	
	Entsorgter ungefährlicher Abfall	NHWD	kg	
	Entsorgter radioaktiver Abfall	RWD	kg	
Abgabeströme (Output)	<b>Komponenten für die Wiederverwertung</b>	<b>CRU</b>	<b>kg</b>	
	<b>Materialien für das Recycling</b>	<b>MFR</b>	<b>kg</b>	
	Materialien für die Energierückgewinnung (keine Abfallverbrennung)	MER	kg	
	Exportierte Energie	EEE	MJ je Energieträger	
Umweltauswirkungen	Treibhauspotenzial	GWP	kg CO <sub>2</sub> äquiv	✓
	Potenzial in Bezug auf die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	kg FCKW 11 äquiv	✓
	Potenzial in Bezug auf die Versauerung von Wasser- und Boden	AP	kg SO <sub>2</sub> - äquiv	✓
	Eutrophierungspotenzial (Überdüngung)	EP	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> - äquiv	✓
	Potenzial zur Bildung von bodennahem Ozon	POCP	Kg Ethen äquiv	✓
	Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für Elemente	ADPE	kg Sb äquiv	
	Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für fossile Brennstoffe	ADPF	MJ, Heizwert	

A 2.10

A 2.9 Ökobilanzmodule A - D in Anlehnung an DIN EN 15 978 [42]

A 2.10 Umweltinformationen und zugeordnete Indikatoren in Anlehnung an DIN EN 15 978 [44]

cenabbaupotenzial für Elemente (engl.: abiotic depletion potential for elements, ADPE). Er findet in der Anwendung der Ökobilanzierung jedoch wenig Beachtung. Für eine Gebäudezertifizierung nach DGNB wird er zwar berechnet und ausgewiesen, aber (derzeit) nicht bewertet. In der Zertifizierung nach BNB wird der Indikator gar nicht berücksichtigt. Das ADPE umfasst nach DGNB [45] den Verbrauch und die Knappheit nicht erneuerbarer (abiotischer) Ressourcen, wie z. B. Erze. Dabei wird die Menge der jeweils in der Erdkruste vorkommenden Ressource (ultimative Reserve<sup>14</sup>) und ihre jährliche Extraktionsrate berücksichtigt. Grundsätzlich sind für die Bewertung von Ökobilanzindikatoren Referenzwerte erforderlich, an denen sich ein Ergebnis messen lässt. Solche Referenzwerte wurden in den vergangenen Jahren von den Gebäudezertifizierungssystemen ermittelt. Da der Indikator ADPE erst seit 2015 für DGNB-Zertifizierungen ermittelt wird, liegt die Vernachlässigung der Bewertung an mangelnden Referenzwerten.

Darüber hinaus ist die Messgröße für Anwender, die das Instrument der Ökobilanzierung als Planungsinstrument nutzen sollen, nur schwer nachvollziehbar: Das ADPE wird gemessen in Äquivalenten von Antimon (Sb), womit ein seltenes chemisches Element gewählt wurde, um Knappheit zu repräsentieren. Bilanziert man z.B. 1 kg blankes Kupferrohr in der Herstellung (Modul A1-3), entspricht die Knappheit 0,0000154 Sb-Äquivalenten [46]. Auch in der Maßeinheit auf Gebäudeebene liegen die Ergebnisse für das ADPE nach eigenen Praxiserfahrungen im Nachkommabereich<sup>15</sup>. Während der Indikator Treibhauspotenzial mit der Äquivalenz CO<sub>2</sub> und vorstellbaren Größen noch gut nachvollzogen werden kann, ist die Vergleichszahl für knappe abiotische Ressourcen (ADPE) unpraktikabel.

#### *Abbildung der Recyclingeffekte in der Ökobilanz*

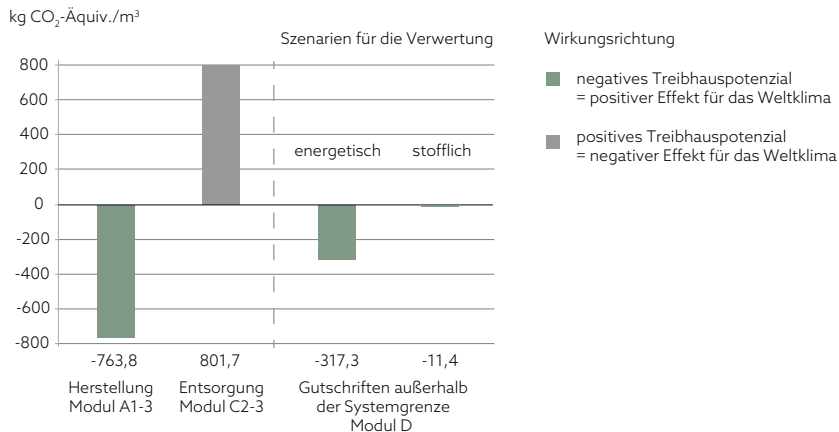
Nach den Normen DIN EN 15978 und 15804 liegen die Vorteile und Belastungen durch das Recycling außerhalb des Lebenszyklus und werden über das Modul D sozusagen in den nächsten Lebenszyklus exportiert (s. Abb. A 2.9 auf Seite 29).

Ausgangspunkt zur Quantifizierung im Modul D ist die Frage: Was wird durch das Rezyklat substituiert? Dabei fließt nicht nur eine Wiederverwertung, sondern auch eine Weiterverwertung und eine energetische Verwertung in die Deklaration der Umweltwirkungen ein, basierend auf der gegenwärtig angewendeten Praxis.

Die große Schwierigkeit ist dabei die Abschätzung der Substitutionsmöglichkeiten über relativ lange Zeiträume. So kann z. B. Altholz derzeit fossile Brennstoffe ersetzen. Beim Rückbau heutiger Neubauten werden jedoch durch die klimapolitisch geplante Umstellung der Energieerzeugung auf 100% erneuerbare Energien in Zukunft keine fossilen Brennstoffe mehr zu ersetzen sein. Trotzdem sind für heute verbaute Holzprodukte im Modul D Vorteile für die Einsparmöglichkeit fossiler Energien und die damit verbundene Vermeidung von Emissionen beziffert (s. Abb. A 2.11).

14 Die ultimative Reserve berücksichtigt nicht die technisch und ökonomisch sinnvolle Verfügbarkeit.

15 Für ein Krankenhaus wurden z.B. 0,046 Sb-Äquiv./m<sup>2</sup> NGF für die Herstellung ermittelt. [47]

A 2.11 Treibhauspotenzial von 1m<sup>3</sup> Nadelnschnitt-holz – frisch, Durchschnitt DE [48]

A 2.11

Die Vorteile einer mehrstufigen Kaskadennutzung, wie die verzögerte Freisetzung des in Holzprodukten gespeicherten Kohlenstoffs oder die Schonung von Waldflächen durch die stoffliche Verwertung, bildet die Ökobilanz hingegen nicht ab.

Ein anderer, in der Ökobilanzierung bisher vernachlässigter Aspekt betrifft die Entscheidungen des End-of-Life-Szenarios auf Gebäudeebene. So gehen derzeit rein statistische Verwertungsquoten in die Bilanzierung ein; die Einbausituation im Gebäude und die sortenreine Trennbarkeit bleiben dagegen unberücksichtigt.

**Die Ökobilanz kann die Recyclingpotenziale von Baukonstruktionen deshalb nur sehr eingeschränkt abbilden.**

#### *Positive und negative Wirkungen*

Welche Ergebnisse liefert die Ökobilanz nun? Sind es negative oder positive Wirkungen?

Das hängt in erster Linie von den verwendeten Baustoffen, den im Lebenszyklus eingesetzten Energieträgern und den betrachteten Indikatoren ab. Zum Beispiel kann die Ökobilanz bei einem Plusenergiehaus, also einem Gebäude, das mehr Energie erzeugt, als es selbst verbraucht, und den Überschuss anderen Abnehmern zur Verfügung stellt, diesen positiven Effekt abbilden.

Das Bauen mit Holz z.B. kann einen positiven Effekt auf das Weltklima haben, der ebenfalls durch die Ökobilanz dargestellt werden kann. Abbildung A 2.11 zeigt die Ökobilanz von 1 m<sup>3</sup> Nadelnschnittholz. Da Holz im Wachstumsprozess der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzieht und in Form von Kohlenstoff in der Biomasse speichert, ist das Treibhauspotenzial in der Herstellungsphase (Modul A) negativ – was einen positiven Effekt darstellt.

Für einige Datensätze in EPDs oder der Ökobaudat existieren bereits Szenarien für die energetische oder stoffliche Verwertung. Allerdings sehen die Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe gemäß DIN EN 16485 [49] vor, dass die im Produkt gespeicherte Menge an biogenem Kohlenstoff in Modul C „das System“ verlässt. Das heißt, auch wenn der Kohlenstoff bei der stofflichen Verwertung weiterhin gebunden bleibt, wird er in den nächsten Lebenszyklus exportiert. In einem Datensatz mit

---

Einsatz von Sekundärrohstoffen (z. B. Spanplatten) würde er im Modul A entsprechend importiert. Auf diese Weise ist die Kohlenstoffbilanz innerhalb eines Lebenszyklus immer ausgeglichen.

Dennoch kann die Ökobilanz positive und negative Effekte wiedergeben (und nicht nur die Minimierung negativer Wirkungen). **Da sie Ergebnisse in absoluten Zahlen liefert, kann sie auch einen Suffizienzeffekt abbilden.**

Sie ist ein wichtiges Instrument, mit dem die Folgen der Gebäudeplanung und -umsetzung für verschiedene Umweltaspekte prognostiziert werden können. Mithilfe der Ökobilanzierung kann überprüft werden, wie sich eine kreislaufgerechte Planung auf bestimmte Umweltaspekte auswirkt. Das soll in dieser Arbeit für den Indikator Treibhauspotenzial – über dessen Wichtigkeit in der Gesellschaft sicherlich Konsens herrscht – genutzt werden.

**Zur Verfolgung der Konsistenz-Strategie im Bauwesen sind jedoch neue Instrumente erforderlich, die sowohl die materielle als auch die konstruktive Ebene einbeziehen, die zirkulären Eigenschaften über den Lebenszyklus messen und die Ergebnisse in einem aussagekräftigen Indikator abbilden.**

**Mit dem Urban Mining Index soll ein Instrument zur Verfolgung der Konsistenz-Strategie im Bauwesen geschaffen werden.**

## 2.4. Systemgrenzen

In Kapitel 1.4 wurde das Ziel formuliert, den gesamten Lebenszyklus von Baukonstruktionen in den Urban Mining Index einzubeziehen und sowohl die Vornutzung als auch die Nachnutzbarkeit der Baustoffe zu berücksichtigen. Da die Übergänge im zirkulären Bauen fließend sind, müssen im Folgenden die Systemgrenzen (der Betrachtungsumfang) festgelegt werden.

### 2.4.1. Lebenszyklusphasen

- Pre-Use-Phase

In der Herstellungsphase werden die im Gebäude zu verbauenden Materialien berücksichtigt. Die im Produktionsprozess entstandene, nicht verwendete Entnahme, Nebenprodukte, Hilfsstoffe oder Abfälle liegen außerhalb der Systemgrenze. Diese können zwar zum Teil erheblich sein (z. B. Abraum bei der Gewinnung von Metallen aus Erzen), eine Systemraumerweiterung würde jedoch in andere Kreisläufe eingreifen und ist deshalb nicht vorgesehen. Systemgrenze ist also das fertig eingebaute Produkt oder Material. Verschnitt wird aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt.

- Use-Phase

In der Nutzungsphase wird der Austauschbedarf von Bauteilen berücksichtigt. Die technische Nutzungsdauer richtet sich nach der Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) [51]. Die Nutzungsdauer eines Bauwerks hängt von der Nutzungstypologie ab und entspricht derjenigen, die auch in den deutschen Gebäudezertifizierungssystemen angewandt wird. Entsprechend der Austauschhäufigkeit wird sowohl der Materialeinsatz (Systemgrenze wie Pre-Use-Phase) als auch das Wertstoff- oder Abfallaufkommen (Systemgrenze wie Post-Use-Phase) berechnet.

Der Energiebedarf für den Gebäudebetrieb spielt eine große Rolle in Bezug auf den Ressourcenaufwand und den Kohlenstoffkreislauf. Es ist jedoch nicht Aufgabe dieser Arbeit, den Gebäudebetrieb zu optimieren. Er liegt deshalb außerhalb der Systemgrenze. Da die Baukonstruktion den Betriebsenergiebedarf hauptsächlich über den Wärmedurchgang beeinflusst, werden in Variantenvergleichen immer Bauteile mit gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) gegenübergestellt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

- Post-Use-Phase

In der Post-Use-Phase werden die direkt das Objekt verlassenden Materialien berücksichtigt und den zu definierenden End-of-Life-Szenarien zugeordnet. Abfälle, die durch den End-of-Life-Prozess zusätzlich entstehen, werden aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt.

### 2.4.2. Differenzierung von Materialien nach Ursprung und Verfügbarkeit

Im Bauwesen werden Materialien gemäß Hillebrandt und Seggewies [50] nach ihrem Ursprung und ihrer Verfügbarkeit wie folgt in vier Gruppen eingeteilt:

Materialgruppe	Verfügbarkeit
biotisch	erneuerbar/nachwachsend
fossil	endlich (in menschlichen Zeiträumen)
mineralisch	endlich ( " )
metallisch	endlich ( " )

Folgende Festlegungen werden getroffen:

- Da sich nachwachsende Rohstoffe in menschlichen Zeiträumen in den Naturkreisläufen selbst erneuern können, werden die Kreislaufpotenziale für erneuerbare und für endliche Rohstoffe getrennt ausgewiesen. Dabei wird unterschieden zwischen zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen und nicht zertifiziert nachwachsenden Rohstoffen.
- Endliche Rohstoffe werden in Qualitätsstufen nach den Möglichkeiten der Nachnutzung unterschieden (s. Kapitel 2.2.3).

In Abbildung A 2.12 sind die Systemgrenzen grafisch veranschaulicht. Die Systematik des Urban Mining Index wird in Kapitel 7 noch differenzierter dargestellt (s. Abb. A 7.10 auf Seite 175).

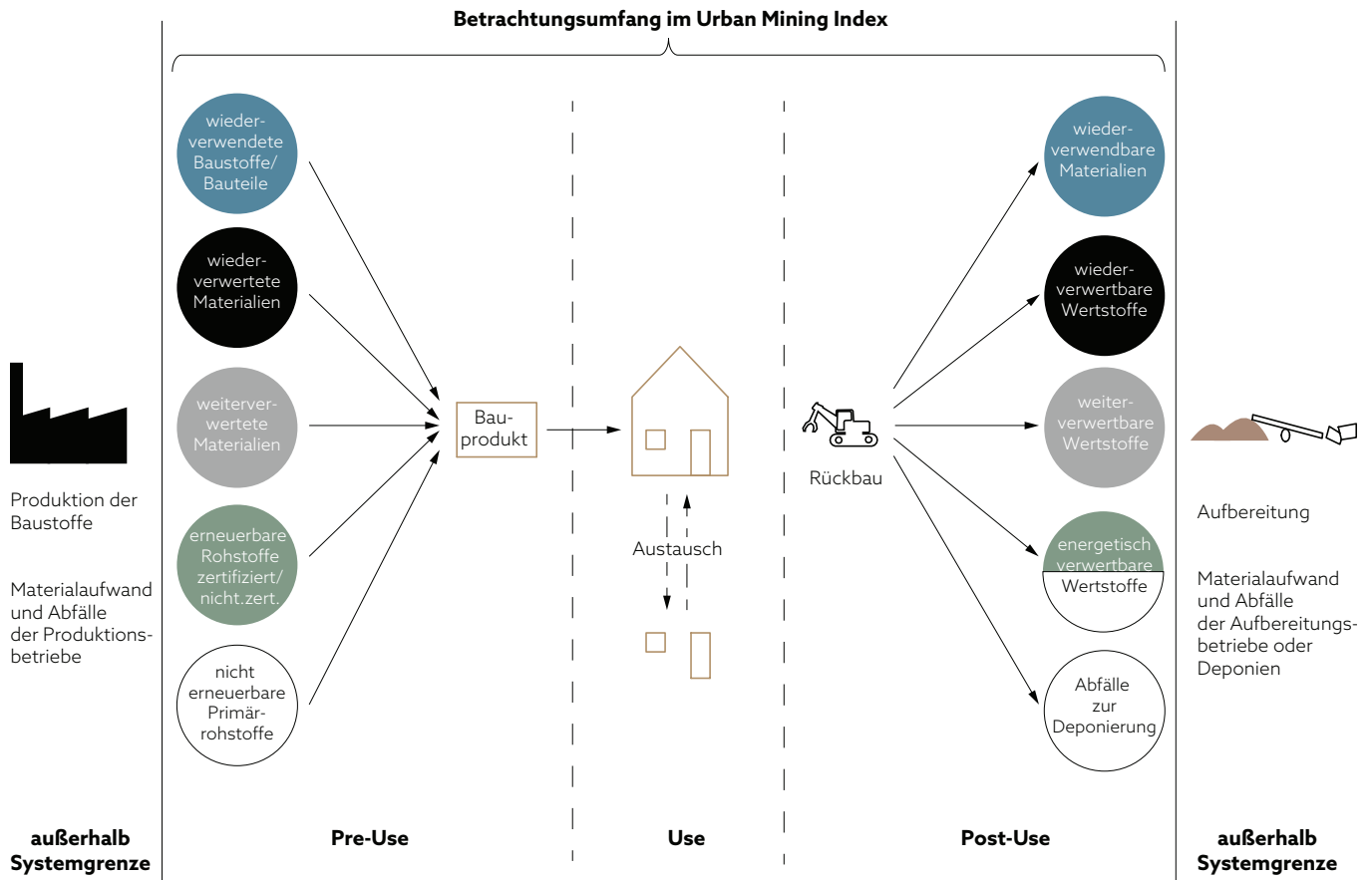
#### 2.4.3. Abschneideregeln

- In der Materialaufstellung werden alle Schichten eines Bauteils erfasst. Geringfügige Massen (<1% der Gesamtmasse eines Bauteils) wie Befestigungsmittel oder Fugenmaterialien können vernachlässigt werden (nicht jedoch die Befestigungsart, da sie einen wesentlichen Einfluss auf die Trennbarkeit der Materialien und damit auf die sortenreine Rückgewinnung hat).
- Der Wert der Materialien, der die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus und damit die Kreislaufpotenziale beeinflusst, wird mit dem Annahmepreis beim Verwerter/Entsorger kalkuliert (nicht mit dem Verkaufspreis des Verwerters/Entsorgers), s. Kapitel 5.3.2 und 6.1.
- Der Arbeitsaufwand, der ebenfalls die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus und damit die Kreislaufpotenziale beeinflusst, umfasst den direkten Personenaufwand und den direkten Betrieb von Maschinen (s. Kapitel 5.3.1). Der Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Maschinen wird vernachlässigt.

#### 2.4.4. Zusätzliche Betrachtung: CO<sub>2</sub>-Footprint

Da in allen vier der oben genannten Materialgruppen entweder direkt im Materialkreislauf (biotisch und fossil) oder indirekt in den Prozessen (mineralisch und metallisch) der Kohlenstoffkreislauf eine große Rolle spielt, wird der CO<sub>2</sub>-Footprint (Indikator Treibhauspotenzial der Ökobilanz) parallel zu den Kreislaufpotenzialen berechnet. Auf diese Weise kann überprüft werden, ob sich eine Steigerung des Kreislaufpotenzials auch positiv auf den Kohlenstoffkreislauf auswirkt.

Die Systemgrenzen zur Berechnung des Treibhauspotenzials entsprechen den Modulen A-D nach DIN 15978 (s. Abb. A 2.9 auf Seite 29), sofern die Daten verfügbar sind.



## 2.5. Wissenschaftliches Vorgehen

A 2.12 Systemgrenzen des Urban Mining Index

Die Vorgehensweise wird anhand eines Ablaufplans auf Seite 36 dargestellt und im Folgenden erläutert.

### *Status quo*

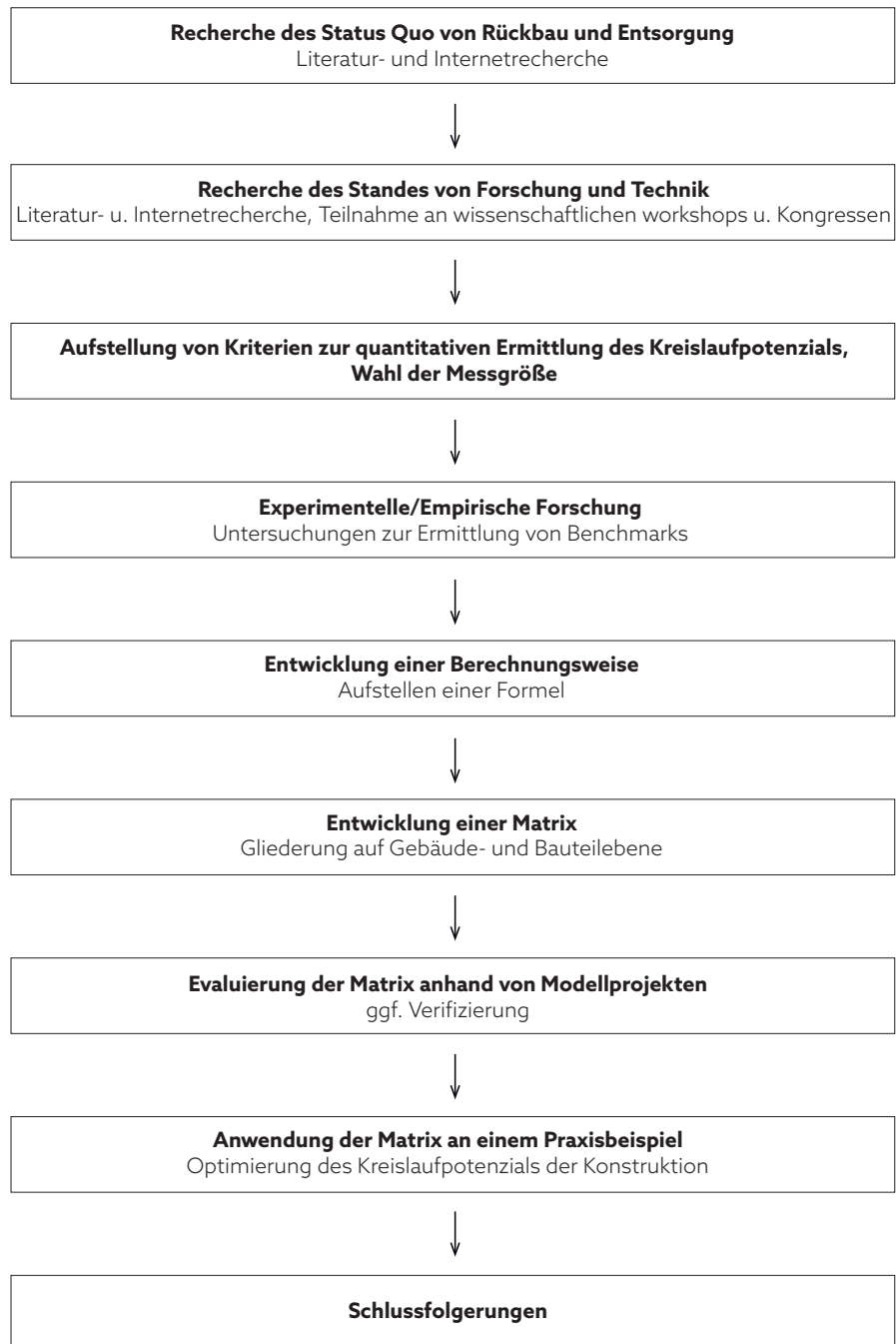
Um den Handlungsbedarf aufzuzeigen, wird zunächst der Status quo zu Rückbau und Entsorgung im Bauwesen recherchiert. Hierzu gehören die rechtlichen Grundlagen, statistische Daten zur Kreislaufwirtschaft und eine Analyse der Rückbaupraxis.

### *Stand von Forschung und Technik*

Durch eine weiterführende Recherche zu angewandten Bewertungsmethoden werden bestehende Lücken aufgezeigt. Hierzu werden die bedeutenden internationalen und die deutschen Gebäudezertifizierungssysteme in Bezug auf die Berücksichtigung von Rückbau- und Recyclingaspekten beleuchtet. Weiterhin wird der recherchierte Stand der Forschung dargestellt, um zu prüfen, welche Ergebnisse anderer Forscher aufgegriffen und weiterentwickelt werden können, aber auch, um die eigene Forschung abzugrenzen.

### *Aufstellen von Kriterien*

Aus den Erkenntnissen der Recherche werden im nächsten Schritt messbare Kriterien für die Entwicklung des Urban Mining Index abgeleitet. Die Parameter sollen sich an dem Ziel orientieren, durch eine differenzierte



und quantitative Abbildung der Kreislaufpotenziale das Bauen in geschlossenen Kreisläufen zu fördern (s. Kapitel 5).

#### *Experimentelle/empirische Forschung*

Um die Erfüllung der Kriterien an praxisnahen Skalen messen zu können, werden Benchmarks aufgestellt. Falls notwendige Daten nicht aus bestehenden Quellen recherchiert werden konnten, wie Aufwände für die Demontage verschiedener beispielhafter Konstruktionen, wurden sie durch experimentelle und empirische Forschung in Versuchsständen und in Kooperation mit Herstellern erhoben.

Auf Rückbaustellen wurden in Zusammenarbeit mit Abbruchunternehmern praxisnahe Daten für den Rückbau von Konstruktionen, die in der

Neubauplanung auch heute noch aktuell sind, erhoben. Diese Erhebungen wurden von der Verfasserin selbst durchgeführt.

#### *Entwicklung einer Berechnungsweise/Formel*

Für die quantitative Bewertung wird eine Berechnungsweise definiert, indem die aufgestellten Kriterien in einer Formel zusammengeführt werden.

#### *Entwicklung einer Matrix*

Kernstück der Arbeit ist die Entwicklung einer Matrix, die zur Erfassung der Neubauplanung dient und mit der das Kreislaufpotenzial anhand der hinterlegten Daten und Formeln berechnet und ausgewiesen wird. Die Matrix wird in Form eines Exceltools erstellt. Eine spätere Weiterentwicklung als Online-Anwendung oder Implementierung in das Building Information Modelling (BIM) ist denkbar, aber nicht Inhalt dieser Arbeit. In die Matrix wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für die zu untersuchenden Bauteile integriert, um die Optimierungen des Kreislaufpotenzials mit den Auswirkungen auf den Kohlenstoffkreislauf abgleichen zu können.

#### *Evaluierung*

Anhand von studentischen Modellprojekten wird die Matrix evaluiert und verifiziert. Anschließend werden die wesentlichen Bauteile zweier Modellprojekte, die als Beispiele für Urban Mining Design von Hillebrandt und Riegler-Floors [52] für den Atlas Recycling entworfen und konstruiert worden sind, hinsichtlich ihres Kreislaufpotenzials mit der neu entwickelten Methodik bewertet.

#### *Anwendung an einem Praxisbeispiel*

Auf Gebäudeebene wird die Matrix schließlich an einem realen Praxisbeispiel angewandt. Dabei handelt es sich um das Bauvorhaben „Rathaus Korbach“, das als Modellprojekt für ressourcenschonendes Bauen vom Land Hessen gefördert wird (s. Kapitel 9.1). Das Bewertungstool wird in der Entwurfs- und Ausführungsplanung als Planungsinstrument eingesetzt, um das Kreislaufpotenzial der Gebäudekonstruktion zu optimieren. Anhand des Praxisbeispiels wird außerdem die Anwendbarkeit des Bewertungstools für die Gebäudezertifizierung nach DGNB dargestellt (s. Kapitel 9.3.2 und Kapitel 10, Seite 299).

#### *Schlussfolgerungen*

Anhand der Modellprojekte werden die Ergebnisse der Arbeit mit der ursprünglichen Fragestellung abgeglichen. Es wird überprüft, inwiefern die Ziele der Arbeit mit der entwickelten Bewertungsmethodik erreicht werden. Bleiben Aspekte offen, werden Hinweise auf weitergehenden Forschungsbedarf gegeben.



---

Das folgende Kapitel wurde auszugsweise vorveröffentlicht in: Hillebrandt/Riegler-Floors/Rosen/Seggewies, Atlas Recycling, Edition Detail, München 2018 und seitdem überarbeitet und ergänzt.

### 3. Status quo: Rückbau und Entsorgung<sup>16</sup> im Bauwesen

Eine echte zirkuläre Wertschöpfung im Bauwesen ist allgemeines Ziel der Akteure in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft. Oftmals kursieren Meldungen, wonach die Kreislaufwirtschaft im Bausektor bereits gängige Praxis sei. Dabei werden wichtige Begriffe häufig pauschal und ungenau verwendet. Trotz bestehender rechtlicher Regelungen findet ein Recycling auf hohem Qualitätsniveau bislang nicht statt. In diesem Kapitel wird die aktuelle Rechtsgrundlage dargestellt und derzeitige Verwertungsquoten beleuchtet.

Zusammenhänge zwischen Recyclingpraxis und angewandten Rückbauverfahren werden hergestellt, um daraus Kriterien für eine Berechnung von Kreislaufpotenzialen abzuleiten.

Anschließend wird die voraussichtliche Entwicklung des Gebäudebestands und der Recyclingquoten dargestellt, um den Handlungsbedarf zu identifizieren.

3.1.	Rechtliche Hintergründe	40
3.2.	Abfallaufkommen und Verwertungsquoten	46
3.3.	Rückbau- und Abbruchverfahren	50
3.4.	Aufwand für Rückbau und Abbruch	54
3.5.	Entwicklung des anthropogenen Rohstofflagers	56
3.6.	Zwischenfazit	57

A 3.1 Konventioneller Abbruch in Brochterbeck/Münsterland (2018): sortenreine Trennung von Ziegeln, Beton, Holz, Metall, Dämm- und Kunststoffen? Fehlanzeige!

<sup>16</sup> Unter Entsorgung wird im allgemeinen Sprachgebrauch die Beseitigung von Abfällen verstanden. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff gemäß seiner Definition in § 3, Abs. 22 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) angewandt, wonach zur Entsorgung sowohl die Beseitigung als auch die Verwertung gehört.

---

### 3.1. Rechtliche Hintergründe

In dem 2016 vom Bundestag beschlossenen Ressourceneffizienzprogramm ProgRes II ist das Ziel definiert, die Gesamtrohstoffproduktivität Deutschlands bis 2030 im Vergleich zu 2010 um 30% zu steigern. Hierzu wurde die Bundesregierung vom Bundestag aufgefordert, eine Reihe von Maßnahmen zu ergreifen, zu denen auch die Förderung der Kreislaufwirtschaft auf Basis gesetzlicher Regelungen gehört (BMUB, 2016 [54])

#### 3.1.1. Bauproduktenverordnung

In der EU-Bauproduktenverordnung (EUBauPVO [55]) vom März 2011 sind Grundanforderungen an Bauwerke und wesentliche Merkmale von Bauprodukten festgelegt. Demnach muss ein Bauwerk „derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden.“ Insbesondere muss „das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können“ und „für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.“ Anforderungen an die Qualität oder Quantität des Recyclings stellt die Bauproduktenverordnung aktuell jedoch nicht.

#### 3.1.2. Abfallrecht

Das Abfallrecht ist in Deutschland auf verschiedenen Ebenen in diversen Gesetzen, Richtlinien und Verordnungen geregelt. Die in Bezug auf das Bauwesen relevantesten zeigt Abbildung A 3.2.

##### *Abfallrahmenrichtlinie*

Übergeordnet gilt in den EU-Mitgliedsstaaten seit 2008 die europäische Abfallrahmenrichtlinie (AbfRR [56]). Darin sind wichtige Begriffe definiert, z. B. die Abgrenzung zwischen Abfall und Nebenprodukten sowie das Ende der Abfalleigenschaft. Letzteres wird erreicht durch ein Verwertungsverfahren, mit dem der Abfall wieder zum nachgefragten und zweckbestimmten Produkt wird.

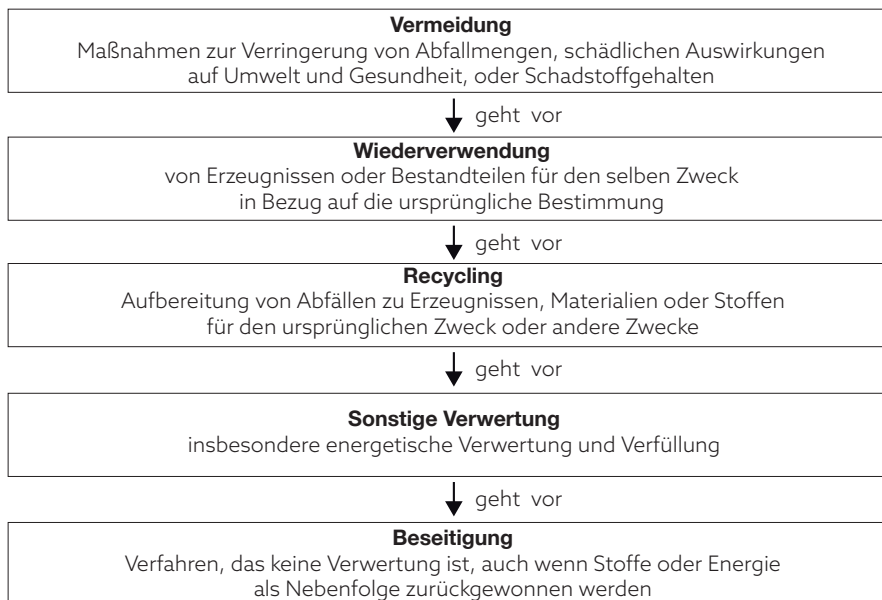
Die AbfRR legt außerdem eine fünfstufige Hierarchie für den Umgang mit Abfällen fest (s. Abb. A 3.3). Die Mitgliedsstaaten sollen dabei „Maßnahmen zur Förderung derjenigen Optionen [ergreifen], die insgesamt das beste Ergebnis unter dem Aspekt des Umweltschutzes erbringen“. Weiterhin enthält die AbfRR Zielvorgaben für die Verwertung bestimmter Abfallarten. Für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle wurde 2008 bereits eine Verwertungsquote von 70 Masseprozent bis zum Jahr 2020 gefordert, die von Deutschland – rein statistisch betrachtet – erfüllt wird (s. Kapitel 3.2).

2018 wurde die AbfRR umfassend novelliert [57], um die Kreislaufwirtschaft zu fördern und den Ressourcenschutz zu verbessern. Zu den wesentlichen Änderungen mit Relevanz für das Bauwesen gehören:

- **die Stärkung der Herstellerverantwortung**  
Nach dem „Regime der erweiterten Herstellerverantwortung“ [58] sollen die EU-Mitgliedsstaaten Maßnahmen ergreifen, die eine finanzielle und organisatorische Verantwortung der Hersteller für die Sammlung und Verwertung ihrer Produkte am Nutzungsende sicherstellen.



A 3.2



A 3.3

- Hinweise auf wirtschaftliche Instrumente**  
 In einem Anhang werden beispielhafte wirtschaftliche Instrumente zur Schaffung von Anreizen für die Anwendung der Abfallhierarchie genannt (z.B. steuerliche Anreize, Pfandsysteme oder ein nachhaltiges öffentliches Beschaffungswesen).
- Förderung des selektiven Abbruchs**  
 Die EU-Mitgliedsstaaten sind aufgerufen, Maßnahmen zur Förderung des selektiven Abbruchs zu ergreifen, um eine Entsorgung von gefährlichen Stoffen zu sichern und ein „hochwertiges Recycling“ zu ermöglichen. Hierzu sollen Bau- und Abbruchabfälle zukünftig in allen Mitgliedsstaaten in „Holz, mineralische Fraktionen (Beton, Back-

A 3.2 Ebenen des Abfallrechts mit Relevanz für Rückbau und Recycling im Bauwesen  
 A 3.3 Abfallhierarchie nach Abfallrahmenrichtlinie [56]

---

und Ziegelstein, Fliesen, Keramik und Steine), Metall, Glas, Kunststoffe und Gips“ getrennt werden.

Nach Ansicht der Verfasserin geht diese Forderung nicht weit genug. Zum einen ist das hochwertige Recycling nicht definiert, zum anderen ist ein höherer Selektierungsgrad erforderlich (s. „selektiver Rückbau“ auf Seite 51). In Deutschland gehen die Anforderungen der Gewerbeabfallverordnung bereits seit 2017 über die Trennung der genannten Stoffe hinaus (s. Seite 44).

- **Aussicht auf Anpassung der Verwertungsquoten**

Die Novellierung berücksichtigt zwar eine schrittweise Erhöhung der Verwertungsquoten für Siedlungsabfälle bis 2035, für Bau- und Abbruchabfälle ist jedoch weder eine Erhöhung noch eine Differenzierung nach Art der Bau- und Abbruchabfälle gefordert. In der Novelle wird aber zumindest festgehalten, dass die EU-Kommission bis Ende 2024 „Zielvorgaben für die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling für Bau- und Abbruchabfälle und ihre materialspezifischen Fraktionen [...] in Betracht“ zieht.

#### *Kreislaufwirtschaftsgesetz*

Auf nationaler Ebene wird die EU-Richtlinie im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG [59]) umgesetzt. Die Novellierung der AbfRR muss bis Juli 2020 umgesetzt werden. Zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Dissertation (März 2020) liegt nur ein vorläufiger Entwurf des BMU [60] vor. Dieser enthält über die Vorgaben der neuen AbfRR hinaus flankierende Regelungen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz und des Ressourcenmanagements in Deutschland. Relevanz für das Bauwesen haben vor allem:

- **eine Ermächtigung zur Förderung des Rezyklateinsatzes**

Die Bundesregierung soll ermächtigt werden, durch Rechtsverordnung den Einsatz von Rezyklaten in bestimmten Produkten fördern zu können. Dies zielt zwar vorwiegend auf Kunststoffe (insbesondere Einwegverpackungen), ist aber ein erster Schritt zur Förderung geschlossener Stoffkreisläufe. **Die Anwendung einer solchen Ermächtigung auf Baustoffe könnte die dringend notwendige Ressourcenwende voranbringen.**

- **Stärkung der nachhaltigen öffentlichen Beschaffung**

Die Pflichten der öffentlichen Hand nach § 45 KrWG sollen gestärkt werden, indem die bisherige Prüfpflicht der Behörden zu einer Bevorzugungspflicht für kreislaufgerechte Produkte werden soll. Dieser Pflicht sollen jedoch zugleich Grenzen gesetzt werden, da sie nur für Erzeugnisse gelten soll, die keine „unzumutbaren“ Mehrkosten verursachen. **Die Berücksichtigung der Lebenszykluskosten (inkl. Entsorgungskosten) wird in dem Entwurf für die Novellierung des KrWG nach Ansicht der Verfasserin versäumt.**

Die aus dem KrWG abzuleitenden Maßnahmen werden in den Abfallwirtschaftsplänen der Länder und im Abfallvermeidungsprogramm des Bundes festgelegt.

In Bezug auf das Bauwesen gehen die Bemühungen der Länder bisher

Schlüssel	Abfallbezeichnung nach Abfallverzeichnis
17	Bau- und Abbruchabfälle (inkl. Aushub von verunreinigten Standorten)
1701	Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik
17 01 01	Beton
17 01 02	Ziegel
17 01 03	Fliesen und Keramik
17 01 06*	Gemische oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen u. Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten
17 01 07	Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06 fallen
17 02	Holz, Glas und Kunststoff
17 02 01	Holz
...	
17 03	Bitumengemische, Kohlenteer und teerhaltige Produkte
17 04	Metalle (einschließlich Legierungen)
17 05	Boden (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten), Steine und Baggergut
17 06	Dämmmaterial und asbesthaltige Baustoffe
17 08	Baustoffe auf Gipsbasis
17 09	Sonstige Bau- und Abbruchabfälle

A 3.4 Einordnung von Bau- und Abbruchabfällen nach Abfallverzeichnis (beispielhafter Auszug) [64]

\* gefährliche Abfälle sind in dritter Ebene des Schlüssels mit einem Stern gekennzeichnet

über die Erstellung von Leitfäden zur Verwendung von RC-Baustoffen im Straßen- und Erdbau kaum hinaus (z. B. in NRW [61]). Das Abfallvermeidungsprogramm des Bundes [62] beschränkt sich auf eine Empfehlung der Anwendung des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB, s. Kapitel 4.1.1).

**Die Vorschläge des BMU zur Novellierung des KrWG könnten die rechtlichen Rahmenbedingungen für das zirkuläre Bauen verbessern.** Ob sich das BMU durchsetzen kann, ist jedoch fraglich. Den größten Hebel für die Kreislaufwirtschaft hätte nach Ansicht der Verfasserin die Stärkung der Herstellerverantwortung. Gerade hier soll im Rahmen der noch bevorstehenden Abstimmung unter den Ministerien „insbesondere den spezifischen Anforderungen des Baubereichs angemessen Rechnung getragen“ werden [63]. Dies könnte aufgrund der langen Nutzungszeiten auf eine Ausnahmeregelung für Bauprodukte hinauslaufen.

#### *Abfallverzeichnisverordnung*

Die Einordnung von Abfällen nach Herkunft und Gefährlichkeit ist in der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) [64] geregelt. Ein für jede Abfallart im Abfallverzeichnis definierter sechsstelliger Schlüssel bildet die Grundlage für deren Entsorgungsweg, nach dem auch die jährlichen Abfallstatistiken erstellt werden (siehe Seite 46). Abbildung A 3.4 zeigt beispielhaft die Gliederung des Abfallverzeichnisses.

### *Altholzverordnung*

Altholz ist Industrierestholz und Gebrauchtholz, soweit es sich um Abfall im Sinne des KrWG handelt. Unter Gebrauchtholz sind Erzeugnisse aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit überwiegender Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent) zu verstehen. Deren stoffliche oder energetische Verwertung sowie Beseitigung ist in der Altholzverordnung (AltholzV [65]) geregelt. Die Verordnung unterscheidet diesbezüglich vier Kategorien von Altholz (s. Abb. A 3.5), die bei einem Rückbau ab 1 m<sup>3</sup> loses Schüttgut oder 0,3 Tonnen pro Tag getrennt zu sammeln und zu lagern sind. Nach § 4 AltholzV werden die stoffliche und die energetische Verwertung gleichermaßen als hochwertig eingestuft. Eine Kaskadennutzung, d. h. eine mehrfache, hintereinandergeschaltete stoffliche und abschließende energetische Verwertung, sieht die AltholzV bisher nicht vor. Es existieren deshalb Forderungen nach einer Novellierung der AltholzV. So könnte nach Ludwig, Gawel und Pannicke vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung „die AltholzV etwa vorsehen, dass Altholz der Kategorie A1 nur stofflich für Holzwerkstoffe verwertet werden darf“ [66].

### *Bioabfallverordnung*

Bioabfälle im Sinne der Bioabfallverordnung (BioAbfV [67]) sind Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft, die kompostiert werden können. Im vorindustriellen Zeitalter war es üblich, mit Materialien zu bauen, die der Natur entnommen wurden und die nach erfolgter Nutzung durch Verrotten oder Sedimentation in den Naturkreislauf zurückgeführt werden konnten (z.B. Dämmstoffe aus Stroh oder Hanf). In der heutigen Zeit finden diese Baustoffe nur noch bei ökologisch orientierten Bauweisen Anwendung. Mit zunehmender Ressourcenknappheit könnten die nachwachsenden Materialien wieder an Bedeutung gewinnen und einen Umfang annehmen, auf den das Abfallrecht und die Abfallwirtschaft bisher nicht vorbereitet sind. So gilt die BioAbfV nicht für „für Stoffe, die nach anderen Rechtsvorschriften entsorgt werden müssen“, z.B. Bau- und Abbruchabfälle, die in der Gewerbeabfallverordnung geregelt sind. Kompostierungsanlagen und Entsorgungsbetriebe sind deshalb auch nicht auf größere Mengen biologisch verwertbarer Bau- und Abbruchabfälle eingestellt (siehe Kapitel 6.1.2).

### *Gewerbeabfallverordnung*

Zu den wichtigsten bundesweiten Regelwerken mit Bezug zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen gehört die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV). Seit einer Novellierung in 2017 sind Bau- und Abbruchabfälle in folgende wesentliche Fraktionen zu trennen und „nach Maßgabe des § 8 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen“ [68]:

- Glas
- Kunststoff
- Metalle, einschließlich Legierungen
- Holz
- Dämmmaterial
- Bitumengemische
- Baustoffe auf Gipsbasis

Altholzkategorie	Potenzial für höherwertige, stoffliche Verwertung zu Holzwerkstoffprodukten	A 3.5 Potenziale von Althölzern für die höherwertige stoffliche Verwertung nach AltholzV [65]
A I naturbelassenes oder nur mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde	ja	
A II verleimtes oder behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung, ohne Holzschutzmittel	ja	
A III Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel	Verwertung nur möglich, wenn Beschichtungen durch Vorbehandlung oder im Rahmen des Aufbereitungsprozesses entfernt werden	
A IV mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz sowie Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Kategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz	nein	

- Beton
- Ziegel
- Fliesen und Keramik

Die Verordnung beinhaltet sowohl Dokumentationspflichten als auch Ausnahmeregelungen, z. B. wegen fehlender technischer Möglichkeit der Abfalltrennung (z. B. Platzmangel auf der Baustelle) oder wirtschaftlicher Unzumutbarkeit (z. B. hoher Verschmutzungsgrad, kleine Mengen). Bei Anwendung der zu begründenden Ausnahmeregelungen sind die anfallenden Gemische je nach Zusammensetzung einer Vorbehandlungs- oder einer Aufbereitungsanlage zuzuführen.

Nach einer Umfrage der Deutschen Umwelthilfe (DUH [69]) unter den zuständigen Bundesländern wurde die Änderung der GewAbfV knapp ein Jahr nach Inkrafttreten kaum vollzogen. Durch die Ausnahmeregelungen ist eine gemischte Sammlung mit anschließender Vorbehandlung oder Aufbereitung, die die GewAbfV eigentlich vermeiden will, weiterhin möglich – mit fatalen Folgen für den Wettbewerb: Sind Recyclingprodukte aufgrund eines aufwendigen Aufbereitungsprozesses zu teuer, werden in der Praxis weiterhin Primärbaustoffe verwendet.

### 3.1.3. Rückbaurecht

Im allgemeinen Baurecht, insbesondere im Bauordnungsrecht der Länder (Landesbauordnungen) sowie in der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB), ist nicht nur das Bauen, sondern auch das Rückbauen geregelt. Daneben existieren Normen und Richtlinien, die speziell für den Rückbau bzw. Abbruch von Gebäuden verfasst sind. Hierzu gehören:

- DIN 18007 Abbrucharbeiten [70]
- ATV DIN 18459 Abbruch- und Rückbauarbeiten [71]
- VDI-Richtlinie 6210 Abbruch von baulichen und technischen Anlagen

Die rechtlichen Anforderungen an den Rückbau beziehen sich in diesen Normen hinsichtlich der Separierung von Abbruchmaterialien zur weiteren Verwertung auf das Abfallrecht. Solange dort allerdings keine erhöhten Anforderungen an die Qualität der Verwertbarkeit gestellt sind, wird auch der Abbruch den hohen Ansprüchen im Sinne des selektiven Rückbaus (siehe Seite 51) nur vereinzelt gerecht werden.

---

## 3.2. Abfallaufkommen und Verwertungsquoten

Deutschland gilt allgemein als Recycling-Weltmeister.<sup>17</sup> Bei genauer Betrachtung trägt der Schein jedoch – auch im Bauwesen.

### 3.2.1. Eine statistische Betrachtung

Rund 54% aller Abfälle in Deutschland sind dem Bausektor zuzuordnen. Im Jahr 2016 betrug das Gesamtabfallaufkommen nach Angaben des Statistischen Bundesamtes [72] 411,5 Mio. Tonnen. Davon entfielen rund 223 Mio. Tonnen auf Bau- und Abbruchabfälle (Abb. A 3.6).

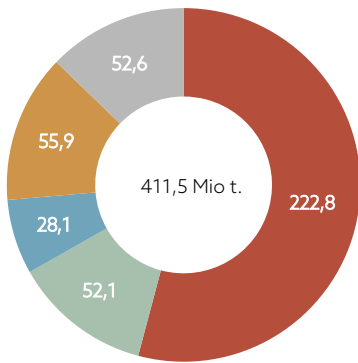
Der größte Anteil der Abfälle aus dem Bauwesen entfällt auf die schweren mineralischen Baustoffe: Böden, Steine und Baggergut, die z. B. beim Aushub von Baugruben oder bei der Ausbaggerung von Wasserstraßen anfallen, trugen mit 127,6 Mio. Tonnen zu ca. 57% der Bau- und Abbruchabfälle bei, während 59,2 Mio. Tonnen bzw. ca. 27% auf die allgemein als „Bauschutt“ bezeichneten Materialien Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik entfielen (siehe Abb. A 3.7).

Die laut Gesetz für Bau- und Abbruchabfälle geforderte Verwertungsquote von 70% (siehe AbfRR Seite 40) wird in Deutschland – rein statistisch betrachtet – erfüllt. Von 214,6 Mio. Tonnen nicht gefährlicher Bau- und Abbruchabfälle wurden gemäß Abfallstatistik 2016 insgesamt 89,7% verwertet [73]. Diese Quote beinhaltet jedoch laut Gesetz auch die nachrangige „sonstige stoffliche Verwertung“, worunter insbesondere die Verfüllung z. B. von Bodenabfällen und Bauschutt in Gruben des Tagebaus zählt (Abb. A 3.8). Nur die energetische Verwertung wird in der Quote nicht angerechnet.

Die Initiative Kreislaufwirtschaft Bau [74] veröffentlicht seit 2006 Statistiken über Verwertungsquoten mineralischer Bauabfälle. Im Jahr 2016 lag die Recyclingquote des Bauschutts, der den weitaus größten Anteil der Abbruchabfälle aus dem Hochbau (ohne Boden und Steine) ausmacht, bei 77,8%. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um echtes Recycling, sondern um sogenanntes Downcycling, also um eine Verwertung mit einem geringeren Leistungsspektrum gegenüber dem Ausgangsmaterial: Der Bauschutt wird gebrochen, zu Recycling-Gesteinskörnung aufbereitet und vorwiegend im Straßenbau verwendet (Abb. A 3.9). Die RC-Gesteinskörnung ersetzt dabei zwar Primärmaterialien wie Kies und Splitt, hat aber als ungebundene Körnung nicht mehr die gleiche Performance wie die Ausgangsprodukte Beton, Ziegel, Fliesen oder Keramik.

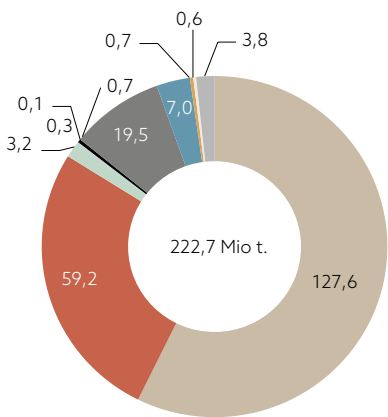
Doch selbst bei dem sehr geringen in der Betonherstellung verwendeten Anteil der RC-Baustoffe ist der Stoffkreislauf nicht geschlossen, da aus gebrochenem Beton ohne erneuten Zusatz von Zement und Wasser kein neuer Beton hergestellt werden kann. In der Zementproduktion liegt aber das wesentliche Problem, weil diese maßgeblich zu den Umweltbelastungen durch Beton beiträgt. Studien des Schweizer Instituts für Bau und Umwelt (HSR) unter Leitung von Prof. Dr. Kytzia im Auftrag der Holcim (Schweiz) AG ([76]) zu Ökobilanzen von Beton zeigen, dass sich mit recycelten Gesteinskörnungen abiotische Rohstoffe (Kies, Sand) einsparen lassen, Energieverbrauch und Treibhausgase aber möglicherweise

17 z.B. „Die Welt“, 06.06.2019



- Bau- und Abbruchabfälle
- Siedlungsabfälle
- Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen
- Übrige Abfälle (insbesondere aus Produktion und Gewerbe)
- Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen

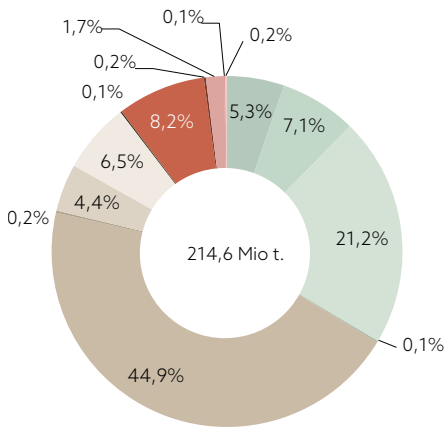
A 3.6



- Boden, Steine und Baggergut
- Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik
- Holz<sup>1</sup>
- Glas<sup>1</sup>
- Kunststoff<sup>1</sup>
- Glas, Kunststoff und Holz, als gefährliche Abfälle<sup>1</sup>
- Bitumengemische, Kohlenteeer und teerhaltige Produkte
- Metalle, einschließlich Legierungen und Kabel<sup>1</sup>
- Dämmmaterial und asbesthaltige Baustoffe<sup>1</sup>
- Baustoffe auf Gipsbasis<sup>1</sup>
- Sonstige, einschließlich gemischte Bau- und Abbruchabfälle<sup>1</sup>

1 ohne Verbringung ins Ausland, da nicht statistisch erfasst

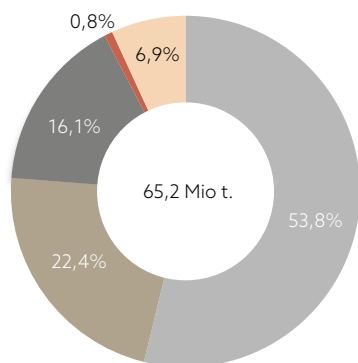
A 3.7



[Mio. t.]

Verfahren	Kategorie	Menge (Mio. t)
Recycling inkl. Downcycling 33,7%	Boden und Steine	11,3
	Straßenaufbruch	15,2
	Bauschutt	45,5
	Baustellenabfälle	0,2
	Bauabfälle auf Gipsbasis	0,0
Sonstige Verwertung 56,1%	Boden und Steine	96,4
	Straßenaufbruch	0,4
	Bauschutt	9,4
	Baustellenabfälle	13,9
	Bauabfälle auf Gipsbasis	0,3
Beseitigung 10,3%	Boden und Steine	17,5
	Straßenaufbruch	0,4
	Bauschutt	3,4
	Baustellenabfälle	0,2
	Bauabfälle auf Gipsbasis	0,4

A 3.8



- Straßenbau
- Erdbau
- Asphalt
- Gesteinskörnung für Beton
- Sonstige Zwecke

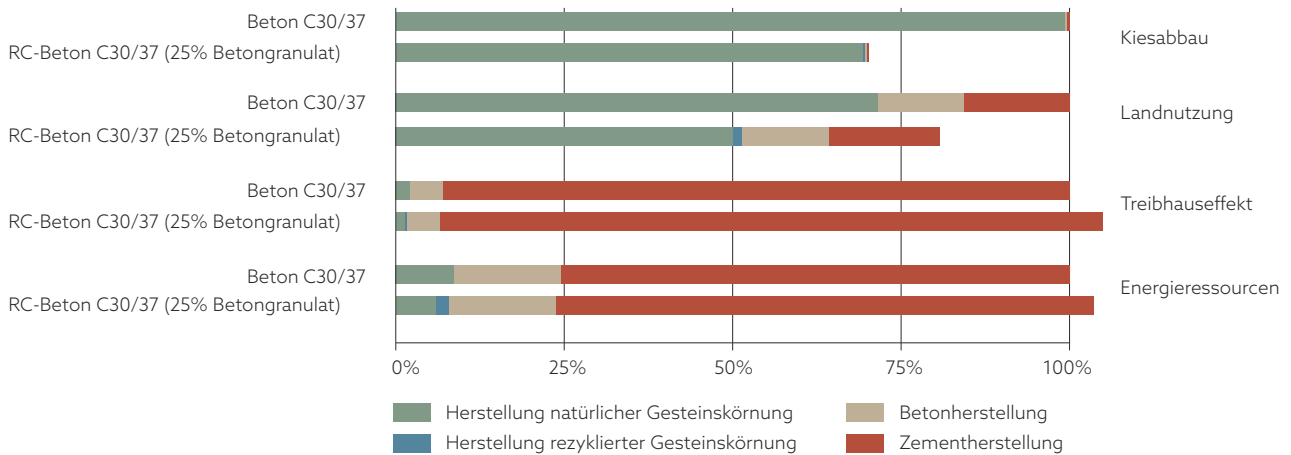
A 3.6 Abfallaufkommen gesamt in Deutschland 2016 in Mio. t [72]

A 3.7 Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland 2016 in Mio. t [73]

A 3.8 Verbleib der ungefährlichen Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland 2016 in Mio. t [74]

A 3.9 RC-Baustoffverwendung in Deutschland 2010 in Mio. t [75]

A 3.9



A 3.10

steigen können, wenn aufgrund eines höheren Hohlraumgehalts (bedingt durch den Einsatz von gebrochenem Korn) mehr Zement für die Herstellung des Betons eingesetzt wird (s. Abb. A 3.10).

Bau- und Abbruchabfälle aus Holz, Glas, Kunststoff und Metall sowie Dämmstoffe und Baumischabfälle sind im Monitoring der Kreislaufwirtschaft Bau zu den sogenannten Baustellenabfällen zusammengefasst. Das Recycling dieser Fraktionen wird jedoch amtlich bisher nicht erfasst. Hillebrandt und Seggewies haben für diese Abfallfraktionen die Verwertungsquoten und -potenziale auf Basis weiterer Quellen recherchiert und im Atlas Recycling [77] veröffentlicht. Darauf wird in Kapitel 5.1 zurückgegriffen.

### 3.2.2. Voraussichtliche Entwicklung der mineralischen Abfallströme

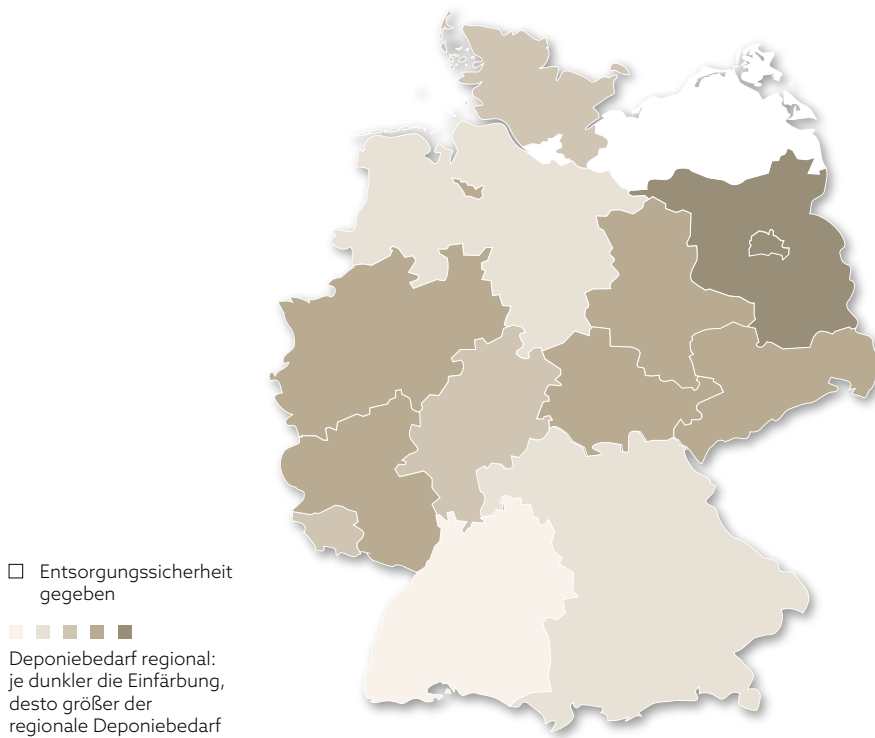
Aufgrund der Gewichtung der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle und der diesbezüglich geplanten rechtlichen Änderungen wird im Folgenden die voraussichtliche Entwicklung der Stoffströme näher untersucht.

Auf Basis des vom Umweltbundesamt (UBA) in Auftrag gegebenen Forschungsprojekts „Planspiel Mantelverordnung“ wird in der Folgenabschätzung zum Entwurf der MantelV (2017, [78]) mit einer Stoffstromverschiebung von Bauschutt und Boden gerechnet. Demnach wird erwartet, dass von jährlich 5,4 Mio. Tonnen Bauschutt, die bisher für Verfüllungen verwertet wurden (Stand 2014), zukünftig rund 3 Mio. Tonnen auf Deponien landen, zuzüglich 7–10 Mio. Tonnen belastete Bodenmassen. Angesichts der im Jahr 2014 deponierten Massen von 20,3 Mio. Tonnen würde dies eine Steigerung um mehr als 50% bedeuten, bei alleiniger Betrachtung der Bauschutfraktion sogar nahezu eine Verdoppelung. Die Studie geht dabei von einer Erhöhung der bundesweiten Recyclingquote für Bauschutt (siehe Seite 49) von 77,8% auf nur 80% aus und bezieht somit die angestrebte Recyclingoptimierung nur sehr konservativ in die Betrachtung mit ein.

Der Deutsche Abbruchverband (DA, [79]) schätzt die Menge zusätzlich zu deponierender Abfälle sogar auf 50 Mio. Tonnen jährlich ein und warnt vor einem Entsorgungsnotstand.

Nach Angaben von Haeming (2017, [80]) ist die Entsorgungssituation für die Ablagerung mineralischer Abfälle in vielen Bundesländern bereits jetzt angespannt. Abb. A 3.11 zeigt, in welchen Ländern zumindest regio-

- A 3.10 Wirkungsabschätzung für Konstruktionsbetone, RC-Beton mit erhöhtem Zementanteil, Relation in % [76]
- A 3.11 Entsorgungssicherheit über Deponiekapazitäten in Deutschland nach Haeming, Hartmut, 2018



A 3.11

naler Deponiebedarf besteht, um die sogenannte 10-jährige Entsorgungssicherheit zu gewährleisten. Die Entwicklungen innerhalb dieses Zeitraums haben die Länder nach § 30 KrWG bei der Erstellung der Abfallwirtschaftspläne zu berücksichtigen. Bei der Abschätzung des zukünftigen Bedarfs besteht jedoch erhebliche Datenunsicherheit, da unklar ist, ob und wann die MantelV Gültigkeit erlangen wird. Die Auswirkungen sind deshalb in Abb. A 3.11 nicht einmal enthalten.

Hinzu kommt: In den nächsten Jahren steht zunehmend der Gebäudebestand aus den 60er und 70er Jahren zur Sanierung an bzw. wird rückgebaut und durch Neubauten ersetzt werden. Dies erfolgt vor allem in den Ballungsräumen im Rahmen der Nachverdichtung und wird zu einem steigenden Bauschutttaufkommen führen. Für Rheinland-Pfalz wird beispielsweise eine Zunahme von 25% angenommen (ifeu Institut, 2016 [81]).

**Es ist somit dringend erforderlich, die Recyclingquote mineralischer Bau- und Abbruchabfälle zu erhöhen.** Der Hochbau, insbesondere der Einsatz von RC-Gesteinskörnung in Beton, bietet hier enormes Potenzial, wie am Projektbeispiel „Rathaus Korbach“ in Kapitel 9 gezeigt werden wird.

---

### 3.3. Rückbau- und Abbruchverfahren

Dem Rückbau bzw. Abbruch kommt hinsichtlich der Verwertungsmöglichkeiten eine Schlüsselfunktion zu, denn je selektiver der Rückbau bzw. Abbruch erfolgt, desto sortenreiner lassen sich die verbauten Materialien zurückgewinnen und desto einfacher die Qualitätsanforderungen an die Rezyklate erfüllen. Die Verfahren und die eingesetzten Techniken spielen dabei eine große Rolle. Folgende Abbruchverfahren werden nach Angaben des Deutschen Abbruchverbands (DA [82]) unterschieden.

#### 3.3.1. Nach dem Umfang

Je nachdem, ob ein Bauwerk vollständig oder nur teilweise abgebrochen oder zurückgebaut werden soll, entstehen unterschiedliche Anforderungen und Aufwendungen.

##### *Teil- und Komplettabbruch*

Werden Bauwerksabschnitte, -anlagen oder deren Teile unter Erhaltung der Standsicherheit der verbleibenden Bauwerksteile abgebrochen, handelt es sich um einen Teilabbruch. Die restlose Beseitigung einer baulichen Anlage wird als Komplet- oder Totalabbruch bezeichnet.

##### *Entkernung*

Unter Entkernung wird der Rückbau bis auf den Rohbau verstanden. Dabei werden Bauteile ausgebaut, die keinen Einfluss auf die Standsicherheit haben (z. B. leichte Trennwände, Fenster, Türen oder technische Anlagen). Die Entkernung findet entweder vor dem Abbruch oder vor einer umfassenden Sanierung statt, bei der das Tragwerk erhalten bleibt und weitergenutzt wird.

#### 3.3.2. Nach der Separierung

Die Separierung von Wertstoffen bereits auf der Rückbaustelle ist der erste Schritt zum Recycling. In der Reihenfolge des Arbeitsaufwands lassen sich von gering bis hoch folgende Verfahren unterscheiden.

##### *Konventioneller Abbruch*

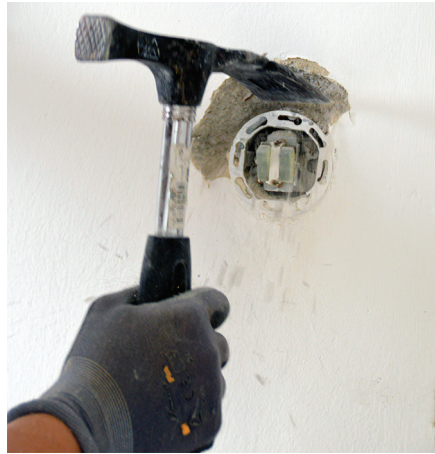
Der konventionelle Abbruch ist die größte Art der Beseitigung von Bauwerken. Dabei wird das Gebäude ohne vorherige Entkernung oder begleitende Separierung abgebrochen, wodurch es zwangsläufig zu einer Vermischung der Abbruchmaterialien kommt (s. Titelbild zu Kapitel 3, Abb. A 3.1). Diese werden entweder nachträglich getrennt (manuell oder maschinell) oder komplett als Baumischabfall entsorgt. Aufgrund der damit verbundenen hohen Entsorgungskosten findet der konventionelle Abbruch heute meist nur noch bei kleinen Objekten mit wenig unterschiedlichen Materialien Anwendung.

##### *Selektiver Abbruch*

Der selektive Abbruch ist nach Informationen des DA derzeit das häufigste Verfahren für den Komplettabbruch von Bauwerken. Die anfallenden Materialien werden dabei vor, während oder nach dem Abbruch selektiert (siehe Abb. A 3.12).



A 3.12



A 3.13

A 3.12 selektiver Abbruch mittels Abbruchzange  
A 3.13 Selektiver Rückbau von Installationen aus einer Mauerwerkswand

### Selektiver Rückbau

Der Begriff „selektiver Rückbau“ kommt ursprünglich aus der Schadstoffentfrachtung, wird aber inzwischen allgemein für einen hohen Selektierungsgrad verwendet. Beim selektiven Rückbau werden die unterschiedlichen Materialien vor dem Abbruch der Tragkonstruktion hochgradig sortenrein zurück- bzw. ausgebaut. Abb. A 3.13 zeigt den selektiven Rückbau am Beispiel des manuellen Ausbaus von Installationen aus einem Mauerwerk. Neben der Demontage bietet dieses Verfahren die besten Voraussetzungen für eine optimale Verwertung der Abbruchabfälle.

### Demontage

Das zerstörungsfreie Herauslösen eines Bauteils aus einem Bauwerk durch Lösen von Verbindungsmitteln wird als Demontage bezeichnet. Das Verfahren kommt unter anderem bei Stahlkonstruktionen zum Einsatz, die mittels Lösen von Schraubverbindungen oder Auftrennen von Schweißnähten demontiert und anschließend zum Zweck der Wiederverwendung oder Verschrottung zerlegt werden.

Die Demontage zur Wiederverwendung ist vorwiegend bei historischen Bauteilen oder -materialien üblich und mit Blick auf den Ressourcenschutz konkurrenzlos, da alle ehemals zur Herstellung eingesetzten Rohstoffe, einschließlich der Energie, erhalten bleiben. Die Bauteile werden in umgekehrter Montagereihenfolge sorgfältig demontiert, um sie unbeschädigt an anderer Stelle wiederzuverwenden.

### 3.3.3. Nach der Verfahrensweise/Verfahrenstechnik

Noch bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts erfolgte der Rückbau, genau wie der Hochbau, vorwiegend in Handarbeit mit relativ einfachen mechanischen Werkzeugen. Der Zweck des Rückbaus war meist die Wiederverwendung oder -verwertung der Materialien. Heute hingegen ist der Abbruch ein hochtechnisiertes und energieintensives Gewerk. Dabei wird das Bauwerk in erster Linie beseitigt, um die Fläche wieder zu nutzen.

DIN 18007 [83] definiert und erläutert verschiedene Verfahrensweisen. In Anlehnung an Anhang A der Norm vergleicht Abb. A 3.14 diese nach ihrer Eignung für den selektiven Rückbau hinsichtlich Konstruktion, vorhandener Bauteile und Materialität. Die aufgeführten Verfahren können

---

dabei einzeln oder kombiniert erfolgen und sowohl manuell als auch maschinell durchgeführt werden.

#### *Manuelle Verfahren*

Manuelle Tätigkeiten kommen heute hauptsächlich bei der Entkernung zur Anwendung. Der personalintensive Handabbruch beschränkt sich meist auf ein begleitendes Verfahren in Bereichen, in denen Bauwerkteile erschütterungsarm zu entfernen sind oder maschinelle Technik z. B. aufgrund der Deckentragfähigkeit nicht einsetzbar ist. In Bezug auf die Verwertung lassen sich bei manuellen Verfahren Wertstoffe am besten selektieren.

#### *Maschinelle Verfahren*

Die Abbruchtechnik hat sich in den letzten 30 Jahren mit zunehmender Komplexität der Abbruchaufgaben kontinuierlich verändert und an die gestiegenen Anforderungen hinsichtlich Gebäudehöhen, Massen und geforderter Schnelligkeit angepasst. Die Gerätetechnik des Gewerks Abbruch ist arbeitstechnisch sehr effizient, gehört aber auch zu den investitions- und energieintensivsten des Bausektors.

In Abb. A 3.15 haben Schultmann et al. verschiedenen Verfahren die häufigsten Abbruchtechniken zugeordnet [84]. Der Abbruch mit Hydraulikbagger und entsprechenden Anbaugeräten (siehe Abb. A 3.12 auf Seite 51) ist nach Weimann et al. und DA mit 83% die am meisten angewandte Technik beim Abbruch von Gebäuden [85].

Vor allem im Gebäudeinneren kommen zunehmend Abbruchroboter zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ferngesteuerte Abbruchmaschinen, die den Vorteil größerer Arbeitssicherheit bieten und emissionsfrei mit Strom funktionieren.

Die Wahl der Abbruchverfahren und -techniken ist in der Regel dem Abbruchunternehmer überlassen (mit Ausnahme von genehmigungspflichtigen Aspekten wie z. B. Sprengungen). Damit nimmt er großen Einfluss auf die Separierbarkeit und die Verwertbarkeit der Abfälle. Der Bauherr hat meist kein großes Interesse am Verbleib der Abfälle. Er haftet als deren Erstbesitzer und -erzeuger lediglich für die ordnungsgemäße Entsorgung, nicht aber für die Qualität der Verwertung.

DIN 18007 weist jedoch darauf hin, dass es im Einzelfall auch aufgrund umwelttechnischer Aspekte unter Berücksichtigung von Folgewerken erforderlich sein kann, ein Verfahren vorzugeben. Macht weder der Bauherr noch die Genehmigungsbehörde davon Gebrauch, wird der Abbruchunternehmer stets das Verfahren mit dem geringsten (wirtschaftlichen) Aufwand wählen. **Daraus lässt sich folgern, dass der Aufwand für den Rückbau von Baukonstruktionen und die Trennbarkeit der Wertstoffe entscheidend für ein hochwertiges Recycling ist. Um Konstruktionen hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit zu bewerten, ist es deshalb notwendig, den Aufwand für den Rückbau zu schätzen.**

Eignung von Abbruchverfahren für den selektiven Rückbau	Konstruktion	Bauteil	Baustoff
	Flach- und Hallenbauten mehrgeschossige Skelettkonstruktion mehrgeschossige Wandkonstruktionen turmartige Bauwerke	Decken/Sohlen Dächer Unterzüge/Binder Stützen Wände Fundamente/Gründungskörper	Holz Mauerwerk unbewehrter Beton bewehrter Beton Stahl hochlegierter Stahl und Guß Nichteisenmetalle Dämm- und Ausbaumaterial Kunststoffe
<b>Verfahren</b>			
Abgreifen	■ □ ■ □	□ □ ■	■ ■ □ □ □ ■ ■
Einschlagen	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ □	■ ■ □ □ □ □ □
Eindrücken	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ □ □ □ □ □
Einziehen	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ □ ■ ■
Reißen	□ □ □	■ □ □ □ □ □	■ ■ ■ □ □ □ □
Stemmen	■ ■ ■ ■ ■	□ □ ■ ■ ■ ■ ■	□ ■ ■ ■ ■ □
Pressschneiden	■ ■ ■ ■ ■	□ □ ■ ■ ■ □	□ ■ ■ ■ ■ □
Scherschneiden	■ □ □ □	□ □ □ □ □	■ □ □ □ □ □ □
Demontieren	■ □ □ □	□ □ □ □ □	■ □ □ □ □ □ □
Sprengen	■ ■ ■	bauteilunabhängig	
Bohren	Bestandteil anderer Verfahren / vorbereitende Maßnahmen		
Sägen	Bestandteil anderer Verfahren / vorbereitende Maßnahmen		
Fräsen	konstruktions- unabhängig	■ □ □ □ □ □	■ ■ □
Schleifen		■ □ □ □ □ □	■ ■ □ □ □ □ □
Schneiden, thermisch		□ □ □ □	□ ■ ■ ■ ■

□ = geeignet  
■ = besonders geeignet  
■ = geeignet nach Entkernung

A 3.14

Verfahren	Maschinen	
	Trägergerät	Anbaugerät
Abgreifen	Hydraulikbagger	Abbruch-/Sortiergreifer
Einschlagen	Seilbagger	Stahlmasse
Eindrücken	Hydraulikbagger	Abbruchstiel/ Tieflöffel
Einziehen	Hydraulikbagger	Stahlseil
Reißen	Hydraulikbagger	Abbruchstiel/ Aufbruchgerät
Stemmen	Hydraulikbagger	Hydraulikhammer
Pressschneiden	Hydraulikbagger	Abbruchzange
Scherschneiden	Hydraulikbagger	Stahl-/Schrottschere
Handabbruch mit Handwerkzeug	Handwerkzeug (Elektrohammer, Metalltrennsäge)	
Materialzerkleinerung	Hydraulikbagger	Hydraulikhammer/ Pulverisierer
Materialsortierung	Hydraulikbagger	Abbruch-/Sortiergreifer

A 3.15

A 3.14 Eignung von Abbruchverfahren mit Fokus auf den selektiven Rückbau von Gebäuden in Anlehnung an DIN 18007  
A 3.15 Abbruchtechniken [84]

---

### 3.4. Aufwand für Rückbau und Abbruch

In der Praxis richtet sich die Wahl des angewandten Verfahrens neben objektiven Bedingungen wie dem Abbruchobjekt selbst (Konstruktion, Bauweise, Materialien, Abbruchhöhen etc.) und den Baustellenbedingungen (angrenzende Bauwerke, Medienversorgung etc.) vor allem nach wirtschaftlichen Aspekten. Hierbei sind Kosten und Zeit die entscheidenden Faktoren.

#### 3.4.1. Kostenaufwand

Die Kalkulation im Rückbau und Abbruch basiert meist auf Erfahrungswerten des Unternehmers. Im Gegensatz zur Kostenermittlung im Hochbau existieren bisher keine öffentlich verfügbaren Daten über Rückbaukosten (z. B. dem BKI Baukostenindex<sup>18</sup> vergleichbar). Die Kostenschätzung ist mit relativ großen Unsicherheiten belegt, weil viele Parameter vorher nicht oder nur schwer erkennbar sind (z. B. verkleidete Bauteile). Fehlende Informationen über verbaute Materialien führen oft zu sehr groben Schätzungen der Rückbaukosten anhand des Bruttorauminhalts und/oder auf Basis eines durchschnittlich errechneten Zeitaufwands nach Flächengrößen.

Im Wesentlichen setzen sich die Kosten zusammen aus

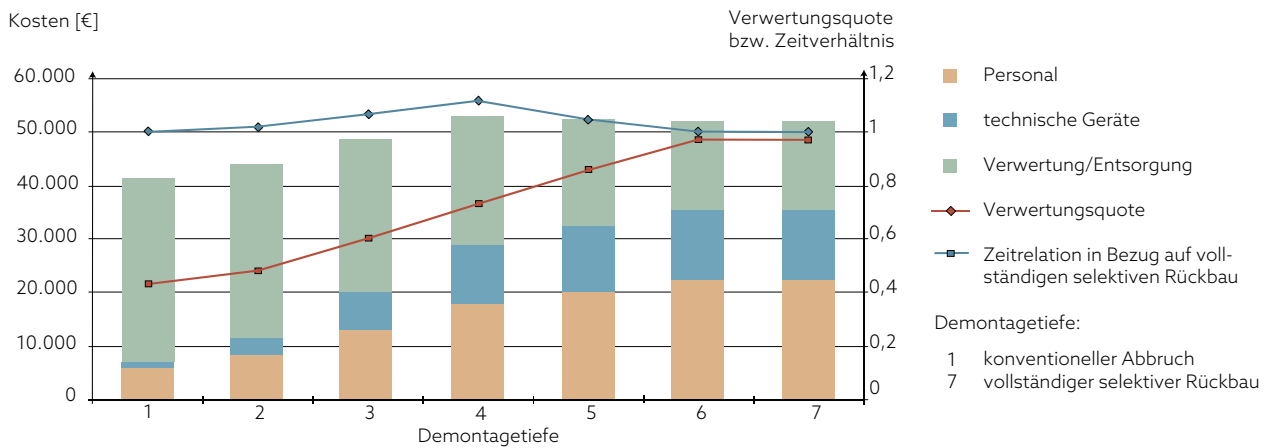
- Rückbau-/Demontagekosten
  - Personalaufwand (Anzahl und Qualifikation)
  - Geräte-/Maschineneinsatz (Art und Menge, Betriebsstoffe)
  - Material (Sicherungsmaßnahmen, Schutzausrüstung)
- Entsorgungskosten/-erlösen

Schultmann hat 2003 in Modellrechnungen Kosten, Zeitbedarf und Verwertungsquoten für unterschiedliche Demontagetiefen (Separierung) gegenübergestellt (Abb. A 3.16 [86]). Basis der Berechnungen sind Rückbauprojekte, die in der Praxis in Form von Pilotbaustellen durchgeführt und wissenschaftlich ausgewertet wurden. Bei Betrachtung des Verhältnisses der Rückbaukosten in Form von Personal- und Gerätekosten zu den Verwertungs-/Entsorgungskosten wird deutlich, dass mit zunehmender Demontagetiefe die Rückbaukosten zwar steigen, aber gleichzeitig die Entsorgungskosten sinken, da mit zunehmender Demontagetiefe eine höhere Sortenreinheit der beim Rückbau gewonnenen Materialien zu verzeichnen ist, wodurch die Verwertungsquote steigt. Bis zu einer mittleren Demontagetiefe steigen dabei die Gesamtkosten, d. h. die Rückbaukosten haben eine höhere Relevanz auf die Gesamtkosten als die Entsorgungskosten.

Während Entsorgungskosten mit überschaubarem Aufwand statistisch ermittelt und bewertet werden können, fehlt für eine Bewertung des Rückbauaufwands (Personal-/Maschineneinsatz) nach dem Maßstab der Kosten zum einen eine breite Datenbasis, zum anderen hängt eine Bewertung nach Kosten sehr vom regionalen und temporären Lohnni-

---

18 Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, diverse Bände zur Neubaukostenplanung



A 3.16

veau ab. Der Zeitfaktor ist jedoch eine relativ konstante und messbare Größe, die für eine Bewertung in der hier vorliegenden Arbeit herangezogen werden kann.

### 3.4.2. Zeitaufwand

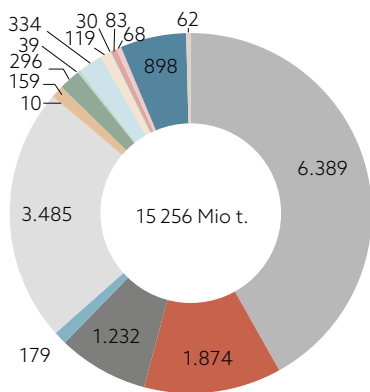
Bei der Betrachtung des Zeitaufwands für den Rückbau ist stets die Bezugsgröße zu berücksichtigen. So kann der Zeitaufwand z. B. mit Blick auf die Kosten in Personen- und Maschinenstunden pro Rückbauvorhaben betrachtet werden. Mit Blick auf einen Fertigstellungstermin kann aber auch die Gesamtzeit in Tagen die entscheidende Bezugsgröße sein, an die der Ressourceneinsatz anzupassen ist.

In den Modellrechnungen von Schultmann, dargestellt in Abb. A 3.16, liegt den Modellen mit hoher Demontagetiefe (Nr. 5–7) eine unterschiedliche Ressourcenkapazität (Maschinen/Arbeitskräfte) zugrunde, sodass sich die Demontagetiefe nicht signifikant auf die Gesamtdauer des Rückbauprojektes auswirkt. Die Zeitrelation (blaue Kurve in Abb. A 3.16) bezieht sich also auf die Gesamtdauer des Rückbaus ohne Berücksichtigung des Mehreinsatzes von Arbeitskräften und Maschinen.

### Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus ist, abgesehen von externen terminlichen Zwängen, die Anzahl der Personen- und Maschinenstunden die entscheidende Bezugsgröße.

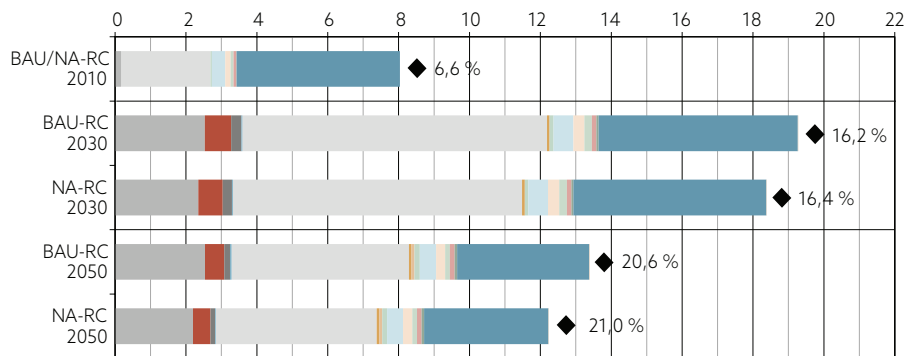
Der Deutsche Abbruchverband hat Daten zum zeitlichen Aufwand für verschiedene Abbruchverfahren auf Basis diverser Quellen veröffentlicht. Ein Großteil der Daten basiert auf Untersuchungen von Schultmann. Die Zeitaufwandswerte können für eine Bewertung des Rückbauaufwands in der hier vorliegenden Arbeit herangezogen werden. Im Kapitel 4.3.1 werden die Forschungsergebnisse von Schultmann näher beschrieben.

A 3.16 Kosten, Zeitbedarf und Verwertungsquoten beim Rückbau für unterschiedliche Demontagetiefen (Ergebnisse von Optimierungsberechnungen) [86]



A 3.17

Rezyklatbeimengungen in Mio. t und Recyclingquoten in %



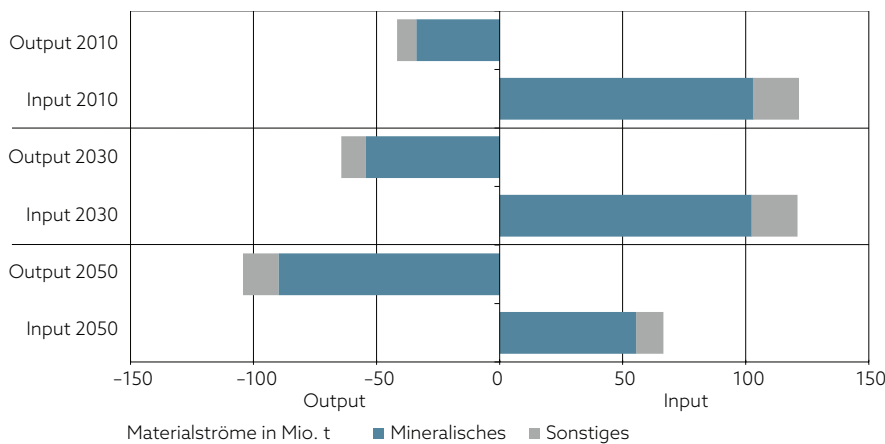
A 3.18

- Beton
- Ziegel
- Kalksandstein
- Porenbeton
- sonstige Mineralik (inkl. Bodenbelägen)
- Gipskarton, Gipswandbauplatten
- Sonstige Gipsprodukte
- Bau-/Konstruktionsholz
- Sonstiges Holz (inkl. Bodenbelägen)
- Mineralische Dämmstoffe
- Kunststoff-Dämmstoffe
- Kunststoff-Fenster/-Türen
- Sonstige Kunststoffe (inkl. Belägen, Leitungen)
- Metalle (inkl. Leitungen)
- Sonstige Materialien (inkl. Leitungen, Belägen)

- BAU Business As Usual
- NA Nachhaltiges Bauen
- RC optimistische Recyclingquoten
- ◆ RC-Quote in % am Ges.-Hochbau-Materialfluss

### 3.5. Entwicklung des anthropogenen Rohstofflagers

Der Gebäudebestand in Deutschland wächst seit dem Ende des zweiten Weltkriegs kontinuierlich und stellt mit geschätzten 15 Mrd. Tonnen ein enormes anthropogenes Rohstofflager/Abfalllager dar (Abb. A 3.17). Um das Recyclingpotenzial aus dem Gesamtgebäudebestand sowie für einzelne Baustoffgruppen zu ermitteln, haben Deilmann et al. [87] auf Basis der Bau- und Abbruchaktivitäten im Jahr 2010 Hochrechnungen und Sensitivitätsstudien für die Massenströme der Jahre 2030 und 2050 durchgeführt. Nach dem Massenstrommodell waren die Input-Ströme für Neubau und Sanierung in 2010 mit 121 Mio. Tonnen dreimal so groß wie die rückbaubedingten Output-Ströme. Aufgrund der prognostizierten Bevölkerungsentwicklung wird vermutlich ab dem Jahr 2030 eine Trendwende einsetzen: Demnach könnten im Jahr 2050 die Massen des Rückbaus diejenigen des Neubaus und der Sanierung um das 1,5-Fache übersteigen, wenn die Zunahme leer stehender Gebäudebrachen moderat bleiben soll (Abb. A 3.19). Auf Basis der prognostizierten Bautätigkeit wurden unter Einbeziehung von Fachverbänden und Experten die Möglichkeiten und Grenzen der Kreislaufführung – auch unter Berücksichtigung theoretischer technischer Obergrenzen – analysiert. Zu den Kernaussagen der Sensitivitätsstudie gehört, dass der Rezyklateinsatz bei Baumaterialien im Hochbau unter optimistischen Annahmen veränderter Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft von derzeit durchschnittlich ca. 7% auf knapp 21% in 2050 steigen könnte (Abb. A 3.18). Dabei würden neben den Metallen vor allem die mineralischen Schüttungen (z. B. RC-Gesteinskörnung als Schotterschicht unter Bodenplatten) einen hohen Massebeitrag zur Gesamtrate leisten. Ohne Zweifel ist es richtig, hierfür Rezyklate statt Primärmaterial einzusetzen. Da es sich jedoch nicht um ein echtes Recycling, sondern um ein Downcycling handelt, wäre eine Steigerung auf insgesamt nur 21% in Anbetracht der Ressourcenverknappung gering. Durch nachhaltiges Bauen mit Zunahme der Holzbauweise im Wohnungsbau, Verlagerung der Bautätigkeit von Ein- zu Mehrfamilienhäusern sowie einer erhöhten Effizienz beim Bauen mit Beton, könnte der Rezyklatanteil nach Annahmen der Wissenschaftler noch geringfügig erhöht, vor allem aber der Ressourceneinsatz insgesamt gemindert werden.



- A 3.17 Materiallager des Gebäudebestands in Deutschland 2010 in Mio. t nach Materialgruppen [87]  
 A 3.18 Zukunftsszenarien für den Rezyklateinsatz nach Sensitivitätsstudien von Deilmann et al. [87]  
 A 3.19 Hochrechnungen zu Materialströmen im Hochbau (Wohnen und Nichtwohnen) [87]

A 3.19

### 3.6. Zwischenfazit

Der Bausektor kann die in der Gesetzgebung geforderten Verwertungsquoten derzeit nur auf niedrigem Qualitätsniveau erfüllen und ist von einer echten Kreislaufwirtschaft mit geschlossenen Kreisläufen weit entfernt. Die Prognosen für die Zukunft sprechen für einen geringen Fortschritt: Selbst in ca. 30 Jahren wird sich mit den bisherigen Ansätzen keine Circular Economy im Bauwesen etabliert haben.

Angesichts knapper werdender Ressourcen und zunehmender Abbruchtätigkeiten bei gleichzeitig knapper werdenden Deponiekapazitäten sowie erhöhten Anforderungen an Sekundärrohstoffe im Tiefbau besteht dringender Handlungsbedarf, geschlossene Stoffkreisläufe im Hochbau zu generieren. Dies stellt insbesondere die Hersteller mineralischer Baustoffe vor eine große Herausforderung. In der Forschung gibt es bereits erste Lösungsansätze. So könnte in naher Zukunft z. B. Beton mittels „elektrodynamischer Fragmentierung“ in Gesteinskörnung und Zementstein zerlegt werden: Mithilfe von ultrakurzen Hochspannungsimpulsen (Blitzen) wird unter Wasser eine Druckwelle im Beton erzeugt, die alle Bestandteile sortenrein voneinander trennt. [88] Es bleibt jedoch vorerst ungelöst, wie sich aus dem Zementstein wieder reaktiver Zement gewinnen ließe. Solange kein echtes Recycling von Beton und anderen mineralischen Baustoffen praktikabel ist, besteht bei diesen ressourcen- und emissionsintensiven Materialien nur die Möglichkeit, die Nachhaltigkeitsprinzipien der Effizienz und Suffizienz zu verfolgen.

Die heutigen Abbruchtechniken sind aus wirtschaftlichen Gründen in erster Linie auf Schnelligkeit und geringen Personaleinsatz ausgerichtet. Die strengeren Trennvorschriften der novellierten GewAbfV und tendenziell steigende Entsorgungskosten werden jedoch dazu führen, dass sich der selektive Rückbau weiter durchsetzt. Für heutige Neubauvorhaben bedeutet dies, dass eine leichte Trennbarkeit durch lösbare Verbindungstechniken und der Einsatz recyclingfähiger Baustoffe zukunftsweisend ist.

Doch wie können Architekten und Ingenieure bei der Planung unterstützt werden, um wirklich kreislaufgerechte Konstruktionen von einer „Verlängerung der Sackgasse“ (Downcycling) zu unterscheiden? Bereits existierende Bewertungsmethoden werden im Folgenden vorgestellt.



---

Das folgende Kapitel wurde auszugsweise vorveröffentlicht in: Hillebrandt/Riegler-Floors/Rosen/Seggewies, Atlas Recycling, Edition Detail, München 2018 und seitdem überarbeitet und ergänzt.

## 4. Bewertungsmethoden: Stand von Forschung und Technik

Mit der Entwicklung und Verbreitung von Zertifizierungssystemen, die die Nachhaltigkeit von Bauwerken messbar machen sollen, hat auch die Bewertung der Rückbau- und Recyclingfähigkeit von Baukonstruktionen einen festen Platz in der Nachhaltigkeitsbewertung gefunden. Daneben existieren Zertifikate, die Analysen zum Lebenszyklus auf Produktebene beinhalten.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über derzeit angewandte Methoden zur Bewertung des kreislaufgerechten Bauens. Darüber hinaus wird der Stand der Forschung zu bestehenden und neuen Bewertungsmethoden untersucht.

Ziel ist es, hierauf (wenn möglich) aufzubauen, um einen Urban Mining Index als quantitative Methode zur Ermittlung und objektiven Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen zu entwickeln.

4.1.	Recycling in der Gebäudezertifizierung	60
4.2.	Recycling in der Produktzertifizierung	68
4.3.	Bewertungsmethoden anderer Wissenschaftler – Stand der Forschung	72
4.4.	Zwischenfazit	86

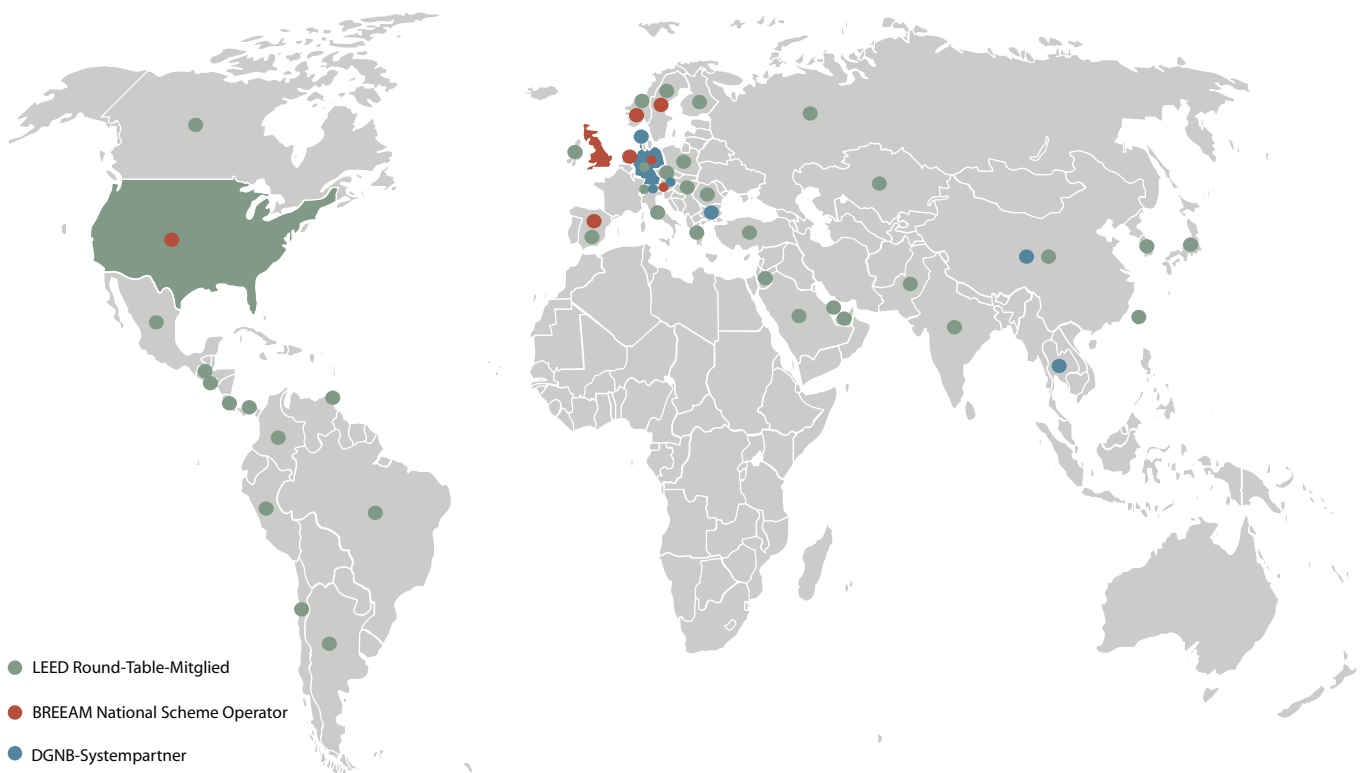
## 4.1. Recycling in der Gebäudezertifizierung

Nachhaltigkeitszertifikate für Gebäude haben sich in den letzten Jahren fest am Markt etabliert. Abb. A 4.2 zeigt die Ursprungsländer und die Verbreitung der weltweit am häufigsten angewendeten Zertifizierungssysteme.

Obwohl in der internationalen Norm ISO 15 392 seit 2008 die allgemeinen Prinzipien des nachhaltigen Bauens nach dem Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie, Soziales) festgeschrieben sind, gibt es nach wie vor große Unterschiede in der Nachhaltigkeitsbewertung. Während sich die internationalen Systeme auf das ökologische Bauen – auch „Green Building“ genannt – konzentrieren, betrachten die deutschen Zertifizierungssysteme die Nachhaltigkeit eines Bauwerks ganzheitlich und bilden in der Bewertung alle drei Säulen der Nachhaltigkeit gleichwertig ab.

Wie das zirkuläre Bauen derzeit in den Systemen verankert ist, wird im Folgenden dargestellt. Abb. A 4.3 gibt einen Überblick über recyclingbezogene Kriterien in den relevantesten Zertifizierungssystemen.

A 4.2 weltweit angewendete Zertifizierungssysteme für Gebäude, 2017  
A 4.3 recyclingbezogene Kriterien in den etablierten Zertifizierungssystemen



A 4.2

Phase	Zertifizierungssystem	BNB Büro und Verwaltung Neubau 2015	DGNB Gebäude Neubau 2018	BREAM International New Construction 2016	LEED v4 Building Design & Construction 2016
Planung und Herstellung	Flächenrecycling (Grund und Boden)	1.2.4 Flächeninanspruchnahme	ENV 2.3 Flächeninanspruchnahme	LE 01 Standortwahl	LT C3 Standortwahl SS C2 Standortentwicklung
	Berücksichtigung von Um- und Rückbaubarkeit sowie Recyclingfreundlichkeit in der Planung	5.1.3 Komplexität und Opti- mierung der Planung	TEC 1.6 Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit	-	-
	Offenlegung und Optimierung der Baustoffe hinsichtlich Umweltwirkung und Ressourcenschonung	1.1.1 - 1.1.5 + 1.2.1 Ökobilanz - Emissionen und Primärenergiebedarf 5.2.2 Qualitätssicherung der Bauausführung	ENV 1.1 Ökobilanz des Gebäudes	MAT 01 Umweltwirkungen im Lebenszyklus MAT 06 Materialeffizienz	MR C2 Transparenz und Opti- mierung der Baustoffe - Umweltproduktdeklaration
	Weiter-/Wiederverwendung Altsubstanz	nur indirekt über Ökobilanz	ENV 1.3 Verantwortungsbewusste Ressourcenverwendung ECO 1.1 Lebenszykluskosten (Circular Economy Bonus)	MAT 03 Verantwortungsbewusste Beschaffung von Bau- produkten	MR C1 Reduzierung der Ökobilanz
	Vermeidung und Verwertung von Bau- und Abbruchab- fällen (Baustellenabfälle)	5.2.1 Baustelle/Bauprozess	PRO 2.1 Baustelle/Bauprozess	MAN 03 Verantwortungsbewusste Baupraktiken WST 01 Baubabfallmanagement	MR PR 1 Planung Abfallmanagement für Bau- und Abbruchabfälle MR C5 Abfallmanagement für Bau- und Abbruchabfälle
	Sekundärrohstoff- verwendung	-	ENV 1.3 Verantwortungsbewusste Ressourcenverwendung	WST 02 Rezyklierte Zuschlagstoffe MAT 06 Materialeffizienz	MR C3 Transparenz und Opti- mierung der Baustoffe, Bezug von Rohstoffen
	Verwendung nachwachsen- der Rohstoffe (NaWaRo's)	nur indirekt über Ökobilanz und Zertifikate für nachhal- tige Materialgewinnung	nur indirekt über Ökobilanz und Zertifikate für nachhal- tige Materialgewinnung	-	-
	Schadstofffreiheit	1.1.6 Risiken für die lokale Umwelt	ENV 1.2 Risiken für die lokale Umwelt	HEA 02 Indoor Air Quality	MR C4 Transparenz & Optimierung der Baustoffe - inhaltsstoffe
	Wasserkreislauf	1.2.3 Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen	ENV 2.2 Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen	WAT 01 Wasserverbrauch	WE Wassereffizienz
	Nutzung	erneuerbare Energien	1.2.1 Primärenergiebedarf / Anteile erneuerbarer Primärenergie	ENV 1.1 Ökobilanz des Gebäudes / Anteile erneuerbarer Primär- energie TEC 1.4 Einsatz und Integration von Gebäudetechnik	ENE 01 Reduzierung des Energie- verbrauchs und der CO <sub>2</sub> Emissionen ENE 04 Low carbon design
Leasing-Modelle für Bauteile (‘Product as a Service’)		-	ECO 1.1 Lebenszykluskosten (Circular Economy Bonus)	-	-
Umnutzungsfähigkeit		2.2.2 Anpassungsfähigkeit	ECO 2.1 Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit	WST 05 / 06 Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel / Funktionale Anpassungsfähigkeit	-
Demontageaufwand, Sortenreinheit Recyclingfähigkeit		4.1.4 Rückbau, Trennung und Verwertung	TEC 1.6 Rückbau- und Recycling- freundlichkeit	-	-
End of Life	Ökobilanzierung des Recyclingpotenzials (Modul D)	ausgewiesen, aber nicht bewertet	ENV 1.1 Ökobilanz des Gebäudes	-	-
	Kosten und Erlöse für Rückbau, Verwertung und Entsorgung	-	-	-	-

Abkürzungen:

C Credit (Kriterium) EA Energy and Atmosphere (Energie und Atmosphäre) ECO Economics (Ökonomie) ENE Energy (Energie) ENV Environment (Umwelt) HEA Health and wellbeing (Gesundheit und Wohlbefinden) LE Land use and ecology (Bodennutzung und Ökologie) LT Location and Transportation (Standort und Transport) MAT Materials (Materialien) MAN Management (Management) MR Material and Resources (Material und Rohstoffe) PR Prerequisite (Grundanforderung) PRO Process Quality (Prozessqualität) SS Sustainable Site (nachhaltiger Standort) TEC Technical Quality (Technische Qualität) WAT Water (Wasser) WE Water Efficiency (Wassereffizienz) WST Waste (Abfall)

---

#### **4.1.1. Recyclingaspekte im BNB-System**

Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) wurde 2007/2008 vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) in Kooperation mit der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB, s. Kapitel 4.1.2) entwickelt. In den sechs abgebildeten Themenfeldern Ökologie, Ökonomie, soziokulturelle und funktionale Aspekte, Technik, Prozesse und Standort werden je nach Systemversion rund 45 Nachhaltigkeitskriterien bewertet. Abhängig vom Erfüllungsgrad der Kriterien erhält ein Projekt im BNB-System eine Auszeichnung in Bronze, Silber oder Gold.

##### *Ökobilanz*

Beide deutschen Systeme – das BNB- und DGNB-System – verfolgen den Grundsatz, keine bestimmten Maßnahmen zu fördern, sondern die Gebäudeperformance, d. h. die Leistungsfähigkeit eines Gebäudes über die Abbildung der Wirkungen im Lebenszyklus, zu verbessern.

Demnach sind die wesentlichen Umweltwirkungen wie Emissionen und Primärenergiebedarf eines zu zertifizierenden Gebäudes in einer Ökobilanz nach DIN EN 15 978 abzubilden (siehe Kapitel 2.3.3).

Während das Modul D, das die Recyclingeffekte außerhalb des Lebenszyklus des Gebäudes abbildet, im DGNB-System mitbewertet wird, ist es im BNB-System derzeit ausgesetzt – es wird zwar berechnet und informativ ausgewiesen, geht aber nicht in die Bewertung ein. Als Grund hierfür wird die mangelnde Datengrundlage zum Modul D in den Umweltproduktdeklarationen der Hersteller genannt (siehe Kapitel 4.2.1 „Typ III“ Seite 69). Die Referenzwerte der Ökobilanz im BNB-System wurden entsprechend angepasst.

##### *Abfälle im Bauprozess*

Das BNB-System stellt im Kriterium „Baustelle/Bauprozess“ unter dem Indikator „Wertstoffoptimierte Baustelle“ Anforderungen an die Einhaltung der gesetzlichen Mindestvorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sowie an die sortenreine Trennung der Abfälle bei der Bauausführung.

##### *Rückbau, Trennung und Verwertung*

Im Kriterium 4.1.4 des BNB-Systems wird eine recyclingfreundliche Neubauplanung mithilfe der drei Indikatoren Rückbau, Trennung (Sortenreinheit) und Verwertung bewertet. Ein tabellarischer Bauteilkatalog

BNB_4.1.4		Gründung, Außenwände, Dächer, Innenwände, Decken	
Rückbau	1. Bewertung Schichtaufbau		<b>Punkte</b>
Sortenreinheit			
Verwertung	-- sehr ungünstig		0
	- ungünstig		2,5
	∅ durchschnittlich		6
	+ günstig		7,5
	++ sehr günstig		10
	2. Ermittlung Recyclingfaktor R		
	R= 0,3 * Punkte Rückbau		
	+ 0,3 * Punkte Sortenreinheit		
	+ 0,4 * Punkte Verwertung		
	3. Gewichtung nach Masse [kg]		

A 4.4 Bewertung der Indikatoren Rückbau, Sortenreinheit und Verwertung im Kriterium 4.1.4 des BNB-Systems

erfasst dabei die Bauelemente mit ihren wesentlichen Schichten und bewertet sie in Bezug auf die drei Indikatoren mit fünf verschiedenen Abstufungen von „sehr ungünstig“ bis „sehr günstig“ (Abb. A 4.4). Diese Abstufungen sind nicht näher definiert; bei ihrer Einschätzung kann der Nutzer sich an vorbewerteten Beispielkonstruktionen orientieren, für die aber auch keine wissenschaftlichen Grundlagen bestehen. Für jedes Bauelement wird zur Ermittlung der Bewertungspunkte aus den Punkten für Rückbau, Sortenreinheit und Verwertung im Verhältnis 3:3:4 der bauteilbezogene Recyclingfaktor R errechnet. Das Produkt aus R und dem prozentualen Masseanteil des Bauelements am gesamten Gebäude bildet die Punktzahl für das jeweilige Bauelement. Die Summe der Punktzahlen aller Bauelemente ergibt die Bewertungspunkte für das Kriterium 4.1.4, das mit 4,5% in das Gesamtergebnis des Gebäudes eingeht. Da die Voraussetzungen zur Kreislauffähigkeit bereits in der Planung geschaffen werden müssen, fließt die Erstellung eines Umbaubarkeits-, Rückbau- und Recyclingkonzepts in die Prozessqualität ein [89].

#### 4.1.2. Recyclingaspekte im DGNB-System

Die DGNB hat ihr Zertifizierungssystem in den letzten Jahren für eine Vielzahl von Gebäudetypologien und Anwendungsbereiche weiterentwickelt und fördert seit der Systemversion 2018 explizit das zirkuläre Bauen mit Circular-Economy-Boni. Zehn der insgesamt 37 Kriterien beinhalten im weiteren Sinn Aspekte des Recyclings (Abb. A 4.3). Die Auszeichnung reicht von Bronze (nur für Bestandsgebäude) über Silber und Gold bis Platin.

2018 wurde der Blick auf die Ressourcenverwendung im DGNB-System wesentlich erweitert. Eine Wiederverwendung von Bauteilen oder der Einsatz von Sekundärrohstoffen wird im Kriterium „Verantwortungsbewusste Ressourcenverwendung“ als Alternative zu nachweislich verantwortungsbewusst gewonnenen Primärrohstoffen gewertet. Damit punktet beispielsweise eine Dämmung aus Altpapier-Zellulose prinzipiell genauso wie eine Holzfaserdämmung mit Primärmaterial aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft (z. B. mit FSC oder PEFC-Label).

#### Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit am Ende des Lebenszyklus

Mit einer Gewichtung von 3 bis 3,5% an der Gesamtbewertung (je nach Nutzungsart) berücksichtigt die DGNB die Recyclingfähigkeit der Kompo-

	DGNB_TEC 1.6	Primärkonstruktion/ Tragwerk	Hüllfläche	Innenausbau	Punkte max.
	Gewichtung	einfach	doppelt	fünffach	
	Bauteilgruppe	Tragwerk Gründung	Außenwände Dächer	Innenwände Decken	
A 4.5	Bewertung der Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit im Kriterium TEC 1.6 der DGNB	recycling-freundliche Baustoffauswahl	CE 2 Vermeidung (z.B. durch Verzicht auf Bekleidungen) CE 1 Wiederverwendung/werkstoffliche Verwertung zu vergleichb. Produkt		10 20
A 4.6	Kriterien mit Bezug zum Recycling von Baumaterialien im BREEAM-System International New Construction, 2016 Hinweis: Das Kriterium „Abfall“ enthält Bewertungskriterien, mit denen die Auswirkungen langer Lebensdauern durch Anpassungsfähigkeit unterstützt werden soll.		QS 2 stoffliche Verwertung QS 1 Verfüllung/energetische Verwertung QS 0 Entsorgung (als gefährlicher Abfall)/Deponierung		45
	rückbaufreundliche Baukonstruktion		QS 2 recyclinggerecht (zerstörungsfreie Entnahme/sortenreine Trennung) QS 1 Standard (nicht explizit recyclinggerecht)		45
A 4.7	BREEAM-System International New Construction, 2016: Kriteriengruppen und deren Gewichtung für Nichtwohngebäude [92]	Planungsprozess	Rückbau, Umbau und Recyclingfreundlichkeit in frühen Planungsphasen Rückbau, Umbau und Recyclingfreundlichkeit in der Ausführungsplanung		5 5
		CE (Circular Economy Bonus), QS (Qualitätsstufe)			

A 4.5

zenten eines Gebäudes zum Ende der Nutzungsdauer. In den beiden Indikatoren „Recyclingfreundliche Baustoffauswahl“ und „Rückbaufreundliche Baukonstruktion“ erfolgt eine systematische Betrachtung der Regelbauteile des Bauwerks bis in die dritte Ebene der Kostengruppe 300 nach DIN 276 [90] sowohl aus stofflicher als auch aus konstruktiver Sicht. Die verwendeten Baustoffe werden Verwertungswegen zugeordnet, die sich an die Hierarchie der Abfallrahmenrichtlinie anlehnen (siehe Kapitel 3, Seite 40). Diesen Verwertungswegen wiederum entsprechen Qualitätsstufen mit bestimmten Punktbewertungen (Abb. A 4.5).

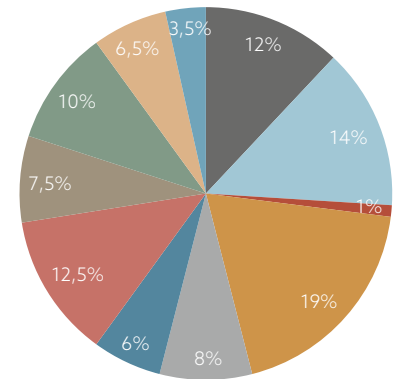
Eine Vermeidung (z. B. durch Verzicht auf Bekleidungen) oder Wiederverwendung von Bauteilen oder eine werkstoffliche Verwertbarkeit zu einem gleichwertigen Produkt werden über Circular-Economy-Boni belohnt. Die Rückbaufreundlichkeit der Konstruktion wird positiv eingestuft, wenn die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Entnahme der Bauteile oder eine sortenreine Trennbarkeit der Bauteilschichten gegeben ist. Für die Bewertung stellt die DGNB ein Exceltool mit einem vorbewerteten Bauelementekatalog zur Verfügung, an dem die Promovendin und die Betreuerin dieser Arbeit maßgeblich mitgewirkt haben. Entsprechend ihrer Austauschhäufigkeit und ihrer Flächenrelevanz werden die Bauteilgruppen bei der Bewertung unterschiedlich gewichtet. Über einen „Innovationsraum“, mit dem die DGNB generell seit 2018 zukunftsweisende und/oder projektspezifische Lösungen fördert, lassen sich Bauteile außerhalb des Betrachtungsrahmens (z. B. Gebäudetechnik) zusätzlich abbilden. In einem dritten Indikator wird die Berücksichtigung der Rückbaubarkeit, Umbaubarkeit und Recyclingfähigkeit in der Planung positiv bewertet.

### Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus

Um der ökonomischen Relevanz des zirkulären Bauens Rechnung zu tragen, wird die Wiederverwendung von Bauteilen oder der Einsatz von Systemen, die der Idee der Circular Economy entsprechen, von der DGNB mit Bonuspunkten im Kriterium „Lebenszykluskosten“ belohnt. Damit sollen Geschäftsmodelle gefördert werden, die eine Kreislauffähigkeit sicherstellen oder maßgeblich unterstützen, wie z. B. ein Performance Contracting (produktbegleitende Dienstleistungen/Leasingmodelle) mit Verwertungs- oder Wiederverwendungsstrategie [91].

BREEAM INC 2016	Kriterium	Punkte max.
Materialien	Mat 01 Umweltwirkungen im Lebenszyklus (Ökobilanz)	6
	Mat 03 verantwortungsbewusste Beschaffung von Bauprodukten	4
	Mat 06 Materialeffizienz	1
Abfall	Wst 01 Bauabfallmanagement	4
	Wst 02 rezyklierte Zuschlagstoffe	1
	Wst 05 Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel (zwecks Weiternutzung)	1
	Wst 06 funktionale Anpassungsfähigkeit (zwecks Weiternutzung)	1

A 4.6



A 4.7

- Planung <sup>2)</sup>
  - Gesundheit und Komfort <sup>2)</sup>
  - Gefahren
  - Energie <sup>2)</sup>
  - Transport
  - Wasser <sup>2)</sup>
  - Materialien <sup>1)</sup>
  - Abfall <sup>1)</sup>
  - Standortökologie <sup>2)</sup>
  - Umweltverschmutzung
  - Oberflächenentwässerung
- +10 % für Innovationen

- 1) mit Recyclingaspekten (im engeren Sinn)
- 2) mit Kreislaufaspekten (im weiteren Sinn)

### 4.1.3. Recyclingaspekte im BREEAM-System

Das Zertifizierungssystem Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) ist das weltweit erste Bewertungssystem für umweltschonendes Bauen. Es wurde 1990 vom britischen Building Research Establishment (BRE) [92] entwickelt und wird vom UK Green Building Council betrieben. BREEAM International New Construction ist der BREEAM-Standard für die Nachhaltigkeitsbeurteilung neuer Wohn- und Nichtwohngebäude in Ländern auf der ganzen Welt mit Ausnahme Großbritanniens und anderer Länder mit einem adaptierten nationalen BREEAM-System. Die Auszeichnungen reichen von classified über good, very good und excellent bis hin zu outstanding. Je nach erreichter Qualitätsstufe werden Neubauten und Modernisierungsprojekte mit 1 bis 5 Sternen ausgezeichnet.

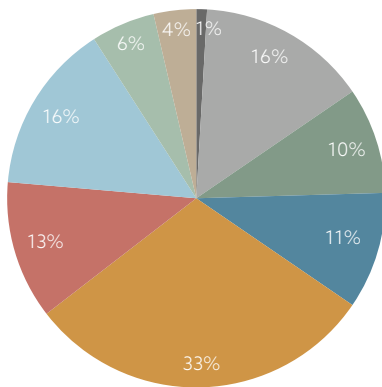
Das internationale BREEAM-System für Neubauten, dessen elf Kategorien Abb. A 4.7 zeigt, ist stark auf den Planungsprozess ausgerichtet. Das zeigt sich zum einen darin, dass das Zertifikat in zwei Entwicklungsstadien vergeben wird: in der Design Stage (Planung) und Post-Construction Stage (nach Fertigstellung). Zum anderen werden in mehreren Kategorien keine konkreten Ergebnisse, sondern die Umsetzung von Konzepten und Managementsystemen bewertet.

Recyclingaspekte in Bezug auf Baumaterialien sind in den Kategorien „Materialien“ und „Abfall“ enthalten (Abb. A 4.6).

Eine Ökobilanz ist ansatzweise in die Kategorie „Materialien“ integriert. Die Berechnung der Umweltwirkungen der Baukonstruktion im gesamten Lebenszyklus (Module A – C nach DIN EN 15 978) wird hier positiv bewertet, jedoch ohne die Ergebnisse an Referenzwerte zu knüpfen. Die Datenerhebung soll vielmehr dazu beitragen, internationale Benchmarks (Referenzwerte) zu entwickeln.

Im Kriterium „verantwortungsbewusste Beschaffung von Bauprodukten“ werden neben Bauprodukten, die mit BREEAM-anerkannten Zertifizierungssystemen wie z. B. BES 6001, FSC, EMAS ausgezeichnet sind, auch direkt wiederverwendete Bauprodukte positiv bewertet.

Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz, beispielsweise durch den Einsatz von Recyclingmaterialien oder Strategien zur Materialeinsparung, sind im Kriterium „Materialeffizienz“ abgebildet, während Verfahren



A 4.8

- Integrale Planung <sup>2)</sup>
- Lage und Verkehr <sup>2)</sup>
- nachhaltiger Standort <sup>2)</sup>
- Wassereffizienz <sup>2)</sup>
- Energie und Atmosphäre <sup>2)</sup>
- Materialien und Rohstoffe <sup>1)</sup>
- Innenraumqualität und Komfort
- Innovation
- regionale Prioritäten

- 1) mit Recyclingaspekten (im engeren Sinn)  
 2) mit Kreislaufaspekten (im weiteren Sinn)

LEED v4 BD+C	Materialien und Rohstoffe	Punkte max.
Mindestanforderungen	Lagerung und Sammlung von Wertstoffen	erforderlich
	Planung Abfallmanagement für Bau- und Abbruchabfälle	erforderlich
Credits	1 Reduzierung der Ökobilanz: Gebäude	5
	2 Transparenz und Optimierung der Baustoffe – Umweltproduktdeklaration	2
	3 Transparenz und Optimierung der Baustoffe – Bezug von Rohstoffen	2
	4 Transparenz und Optimierung der Baustoffe – Inhaltsstoffe	2
	5 Abfallmanagement für Bau- und Abbruchabfälle	2

A 4.9

zur Vermeidung oder hochwertigen On-Site-Verwertung von Abbruchabfällen sowie die Verwendung von Sekundärzuschlagstoffen in der Kategorie „Abfall“ bewertet werden.

#### 4.1.4. Recyclingaspekte im LEED-System

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) ist ein Zertifizierungssystem, das 1998 vom U.S. Green Building Council [93] entwickelt wurde. Am bekanntesten ist die Systemversion Building Design and Construction (BD+C), die sowohl bei Neubauten als auch bei umfangreichen Sanierungen Anwendung findet.

Je nach Anzahl der erreichten Nachhaltigkeitspunkte erhält ein Projekt eines von vier LEED-Rating-Levels: Certified, Silver, Gold oder Platinum. Die Kriterien und deren Gewichtung sind in Abb. A 4.8 dargestellt.

Ein Schwerpunkt im LEED-System ist seit der Systemversion v4 (2016) die Transparenz und Optimierung der Baustoffe. Innerhalb der Kategorie „Materialien und Rohstoffe“ (Abb. A 4.9) wird die Offenlegung der Umweltwirkungen durch Verwendung von Bauprodukten mit Umweltproduktdeklaration positiv bewertet. In Bezug auf eine nachhaltige Beschaffung ist die Wiederverwendung und der Einsatz von Recyclingmaterialien der Verwendung von Produkten mit Zertifikaten oder mit herstellereitigen Nachhaltigkeitsberichten gleichgesetzt. Das Sammeln weiterer Pluspunkte ist mit einer von Dritten geprüften Deklaration der Materialinhaltsstoffe möglich.

Die Ökobilanz kann entweder qualitativ oder quantitativ bewertet werden (Credit 1). Eine qualitative Bewertung ist möglich bei der Sanierung eines denkmalgeschützten oder mit Schadstoffen belasteten Bauwerks oder bei Wiederverwendung von Baumaterialien. Alternativ ist eine quantitative Ökobilanzierung der Baustoffe unter Optimierung der Umweltwirkungen (Module A bis C nach DIN EN 15 978) möglich.

A 4.8 LEED-System Building Design and Construction (BD+C) v4: Kriteriengruppen und deren Gewichtung

A 4.9 Kriterien der Gruppe „Materialien & Rohstoffe“ im LEED-System Building Design and Construction (BD+C) v4 [93]

A 4.10 etablierte Umweltzeichen Typ I für Bauprodukte [97]

#### 4.1.5. Anwendbarkeit der Zertifizierungssysteme zur Bewertung des kreislaufgerechten Bauens

In allen Gebäudezertifizierungssystemen werden Recyclingaspekte bisher weitgehend qualitativ bewertet. In den beiden internationalen Systemen BREEAM und LEED wird – im Gegensatz zu den beiden deutschen Systemen – die End-of-Life-Phase bisher gar nicht berücksichtigt, wie die Übersicht in Abb. A 4.3 gezeigt hat.

Eine quantitative Ermittlung der Kreislaufpotenziale erfolgt in der Nachhaltigkeitszertifizierung somit aktuell nicht. Sie ist jedoch für eine objektive Bewertung unerlässlich.

Die Ökobilanzierung ist zwar eine quantitative Methode, die die Effekte des Recyclings von der Systematik her abbilden kann, in der praktischen Anwendung können die Recyclingpotenziale auf Gebäudeebene jedoch nur unzureichend abgebildet werden.

Dies liegt zum einen an der mangelnden Datengrundlage für das Modul D, das die Vorteile und eventuelle Belastungen durch Recycling für den nächsten Lebenszyklus abbildet. Trotz der lückenhaften Daten (und damit verbundener Ungenauigkeiten) hält die DGNB – im Gegensatz zum BNB-System – an der Bewertung des Moduls D fest, um damit einen Anreiz zu setzen, die Industrie zu einer vollständigen Deklaration der Daten zu bewegen.

Noch förderlicher für die Kreislaufwirtschaft wäre es, wenn zukünftig alle Module der Ökobilanz in einer Umweltproduktdeklaration verpflichtend deklariert werden müssten. Hierfür liegt ein Normenentwurf bereits vor (s. Punkt 4.2.1, Seite 69).

Die unzureichende Abbildung der Recyclingeffekte in der Ökobilanz liegt aber auch daran, dass sich die Datenbasis auf die Produktebene und nicht auf die Gebäudeebene bezieht. So wird die Trennbarkeit von Materialverbänden bisher in der Ökobilanzierung nicht berücksichtigt.

**Erst mit einer quantitativen Ermittlung der Kreislaufpotenziale, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wird, und einer vollständigen Deklaration der Ökobilanz können die Umweltwirkungen (Einsparungen) durch Recycling berechnet werden** (s. Kapitel 10.3.1).

Insgesamt bildet das DGNB-System von allen Zertifizierungssystemen die Aspekte des zirkulären Bauens derzeit am besten ab. Die Verfasserin und die Betreuerin dieser Arbeit haben an der Entwicklung des DGNB-Kriteriums „Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit“ mitgewirkt. Dabei wurde deutlich, dass für eine objektive Bewertung der zirkulären Eigenschaften eines Bauwerks eine quantitative Methodik erforderlich ist, die nur im Rahmen einer wissenschaftlichen Forschung erarbeitet werden kann. Die rein qualitative Bewertung in den Zertifizierungssystemen durch eine quantitative Bewertungsmethodik zu ersetzen, war deshalb zusätzliche Motivation für die Entstehung dieser Arbeit.



A 4.10

## 4.2. Recycling in der Produktzertifizierung

Während Bewertungssysteme auf Bauwerksebene die Gebäudequalität umfassend betrachten, konzentrieren sich die Produktbewertungen auf ökologische und soziale Kriterien des Herstellungsprozesses, der Nutzung und der End-of-Life-Phase des einzelnen Bauprodukts.

### 4.2.1. Umweltkennzeichnungen und -deklarationen

Die internationale Normenreihe ISO 14 020 [94] gibt Herstellern und Zertifizierern eine Anleitung, produktbezogene Umweltinformationen auf freiwilliger Basis zu nutzen und bereitzustellen. Dabei werden verschiedene Deklarationstypen unterschieden.

#### *Typ I und II*

Umweltbezogene Anbietererklärungen nach ISO 14 021 (Umweltkennzeichnungen Typ II) [95] liegen als freiwillige Selbsterklärung in alleiniger Verantwortung des Herstellers und können z. B. Angaben über Rezyklatgehalte eines Produkts enthalten. Dagegen erfordern Umweltkennzeichnungen nach ISO 14 024 (Typ I) [96] eine Drittzertifizierung. Sie haben einen bewertenden Charakter und weisen die besondere Umweltqualität eines Produkts (im Branchenvergleich) aus, womit es sich von anderen Produkten mit gleichem Anwendungszweck abhebt.

Das bekannteste Umweltzeichen Typ I für Produkte und Dienstleistungen aller Art ist der „Blaue Engel“ (Abb. A 3.10 oben links). Schutzziele des auch RAL UZ genannten Labels sind Umwelt und Gesundheit, Klima, Wasser und Ressourcen. Allerdings konzentrieren sich die Vergabegrundlagen in der Produktkategorie Bauen vorwiegend auf die Minimierung von Schadstoffen und Innenraumemissionen [98].

Das baubranchenspezifische Natureplus-Zertifikat stellt unter anderem Anforderungen an den Ressourcenschutz. So hat der Anteil nachwachsender und mineralischer Rohstoffe der mit diesem Siegel ausgezeichneten Produkte in der Regel mindestens einen Massenanteil von 85%. Kunststoffe dürfen zwar als Zusatzstoffe zum Einsatz kommen, aber nicht Basis des Produkts sein. Beschränkt verfügbare bzw. nur aufwendig zu gewinnende Rohstoffe sind nach Verfügbarkeit durch umweltverträgliche Sekundärrohstoffe zu ersetzen.

Die Grundregeln eines recyclinggerechten Materialdesigns stellen leider nur eine Soll-Vorschrift dar: Die geforderte Eignung der Baustoffe für eine Aufbereitung zu gleichwertigen Recyclingprodukten wird durch die Mindestanforderung der thermischen Verwertbarkeit oder gefahrlosen Deponierung wieder geschwächt [99]. Auffällig ist, dass keine Bauprodukte aus metallischen Rohstoffen Natureplus-zertifiziert sind, obwohl sich diese praktisch endlos im Kreislauf halten lassen.

Die Natureplus-Zertifikate enthalten zwar keine direkten Angaben über die Inhaltsstoffe (z.B. den Gehalt an nachwachsenden Rohstoffen), doch die Online-Datenbank des Natureplus e.V. [www.natureplus.org](http://www.natureplus.org) nennt in den dort einsehbaren produktgruppenspezifischen Vergaberichtlinien immerhin z.B. den Mindestgehalt an nachwachsenden Rohstoffen und gibt Auskunft zur Einhaltung von Grenzwerten für gesundheits- und umweltgefährdende Stoffe. Die Daten können als Informationsquelle für

die Bewertung des Einsatzes erneuerbarer Rohstoffe bei der Bemessung der Kreislaufpotenziale dienen (siehe Kapitel 5.1.3).

Weitere relevante Umweltzeichen Typ I sind die Label des in Kanada gegründeten FSC<sup>19</sup> und des aus Europa stammenden PEFC<sup>20</sup>, die Holzprodukte aus nachhaltiger Forstwirtschaft auszeichnen. Hölzer mit dieser Auszeichnung erfüllen den forstwirtschaftlichen Nachhaltigkeitsgrundsatz von Hans Carl von Carlowitz [2], wonach dem Wald nicht mehr Holz entnommen werden darf, als nachwachsen kann, um den Wald nachhaltig zu erhalten. So wird mit der Verwendung zertifiziert nachhaltiger Hölzer und Holzprodukte sichergestellt, dass der natürliche Kreislauf geschlossen wird. Der Anteil zertifizierter Hölzer kann damit eine Größe zur Bemessung der Kreislaufpotenziale sein.

Der FSC führt drei Kennzeichen-Kategorien [100]:

1. „FSC Recycling“ für Produkte, die ausschließlich Recyclingmaterial beinhalten, das mindestens 85% Post-Consumer-Material sein muss.
2. „FSC Mix“ mit mindestens 70% FSC-zertifiziertem oder Post-Consumer-Recyclingmaterial
3. „FSC 100%“ für Produkte, die zu 100% Material aus FSC-zertifizierten Wäldern enthalten.

Das PEFC-Label darf nur dann in Verbindung mit einem Produkt verwendet werden, wenn der Zertifizierungsprozentsatz 70% überschreitet [101].

### Typ III

Umweltdeklarationen Typ III nach ISO 14 025 (Environmental Product Declaration – EPD) [102] liefern komplexe quantitative und verifizierte Informationen, die auf einer Ökobilanz beruhen und z. B. den Beitrag eines Produkts zum Klimawandel beziffern. Die produktspezifischen Daten bieten neben generischen Daten die Grundlage für Ökobilanzen von Gebäuden und ermöglichen somit eine vergleichende Bewertung anhand von Referenzwerten.

Die Grundregeln von Umweltproduktdeklarationen für die Produktkategorie Bauprodukte werden in der DIN EN 15804 [103] geregelt. Die Norm unterscheidet drei Arten von EPDs:

- von der Wiege bis zum Werkstor (nur Herstellungsphase)
- Wiege bis Werkstor mit Optionen (ausgewählte Lebenszyklusphasen)
- von der Wiege bis zu Bahre (Lebenszyklus wie in Abb. A 2.9 gezeigt)

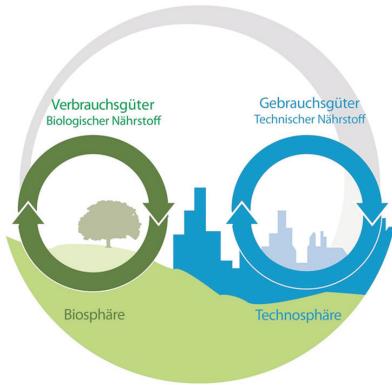
In den beiden letztgenannten Arten können die Vorteile und ggf. Belastungen außerhalb der Systemgrenze (Modul D) optional abgebildet werden.<sup>21</sup>

In der Regel enthalten EPDs auch Angaben zu verwendeten Rohstoffen und Rezyklatgehalten sowie zur Verwertung oder Entsorgung. Sie können damit als Informationsquelle für die Bewertung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen bei der Bemessung der Kreislaufpotenziale dienen (siehe Kapitel 5.1.3).

19 Forest Stewardship Council (deutsch: Rat für verantwortungsvolle Forstwirtschaft).

20 Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (deutsch: Programm zur Anerkennung von Forstzertifizierungssystemen).

21 Die Norm befindet sich derzeit in Überarbeitung. Der Entwurf zur DIN EN 15804/A2 vom April 2018 sieht eine verpflichtende Ausweisung der Module C und D bereits vor.



A 4.11

C2C-Kriterium: Materialrecycling		Basic	Bronze	Silber	Gold	Platin
Für das Produkt wurde der geeignete (technische/biologische) Kreislauf definiert, ein Plan für die Rückgewinnung und Verwertung wurde entwickelt.		•	•	•	•	•
entworfen und hergestellt für den technischen oder biologischen Kreislauf	Recycling $\geq$ 35%		•	•	•	•
	Recycling $\geq$ 35%			•	•	•
	Recycling $\geq$ 65%				•	•
Stoffstrom-Management-Strategie zur Entwicklung der Logistik- und Verwertungssysteme vorhanden (inkl. Umfang, Zeitplan und Budget)					•	•
entworfen und hergestellt für den technischen oder biologischen Kreislauf	Recycling 100 %					•
Das Produkt wird aktiv im technischen oder biologischen Kreislauf gehalten						•

A 4.12

#### 4.2.2. Der Kreislaufgedanke im Cradle-to-Cradle-System

Die Cradle-to-Cradle-Zertifizierung begleitet eine Produktionsweise „von der Wiege zur Wiege“ (Cradle to Cradle – C2C), die im Gegensatz zu dem Modell „von der Wiege zur Bahre“ (Cradle to Grave) steht. Das 2005 von dem deutschen Chemiker Michael Braungart und dem US-amerikanischen Architekten und Designer William McDonough entwickelte Zertifizierungsprogramm ist für jegliche Art von Produkten anwendbar, die nach den Prinzipien des Cradle-to-Cradle-Designkonzepts gestaltet sind. Bisher wurden insgesamt rund 500 Produkte weltweit mit dem C2C-Zertifikat ausgezeichnet, wovon mehr als 350 den Gruppen Bauprodukte und Ausstattung zuzuordnen sind [104].

„Die Natur kennt keinen Abfall. Alles ist Nahrung für andere Organismen oder Systeme.“<sup>22</sup> Nach diesem – dem Grundsatz der Ökoeffektivität folgenden Prinzip – werden alle Materialien eines Produkts als Nährstoffe definiert und entweder dem biologischen oder dem technischen Kreislauf zugeordnet (Abb. A 4.11).

##### Bewertungsmethode und -prozess

Die Produktbewertung der Cradle-to-Cradle-Zertifizierung erfolgt anhand von fünf Kategorien: Bronze, Silber, Gold und Platin; deren Erfüllungsgrad wird in einer sogenannten Scorecard festgehalten. In Abb. A 4.12 sind die Anforderungen des Cradle to Cradle Certified Product Standard (V 3.1) [106] für das Kriterium „Materialrecycling“ den fünf möglichen Kategorien zugeordnet.

In gleicher Weise werden die vier weiteren Kriterien bewertet: „Gesunde Inhaltsstoffe“, „Erneuerbare Energien und CO<sub>2</sub>-Management“, „Wassermanagement“ und „soziale Gerechtigkeit“.

##### Inhaltsstoffe und Materialrecycling

Grundlage des C2C-Zertifizierungsprozesses ist die Ermittlung und Definition der Inhaltsstoffe des zu zertifizierenden Produkts. Giftige Substanzen, die auf der „Cradle to Cradle Banned List of Chemicals“ (Liste verbotener Chemikalien) stehen, sind ausgeschlossen, um die Gesundheit der Nutzer zu schützen und eine Anreicherung von Schadstoffen in der Biosphäre beim Recycling zu verhindern.

Das Materialrecycling ist eine Schlüsselkomponente im C2C-System.

A 4.11 Cradle-to-Cradle-System: Materialkreisläufe der Bio- und Technosphäre, EPEA GmbH  
 A 4.12 Bewertung des Materialrecyclings im Cradle-to-Cradle System [106]

22 Originalzitat Braungart/McDonough: „In nature, there is no concept of waste. Everything is effectively food for another organism or system.“ [105]

Neben strategischen Aspekten zur Umsetzung des Stoffstrommanagements zählt bei der Bewertung vorwiegend die Recyclingrate des Produkts. Diese wird anhand des Anteils rezyklier- oder kompostierbarer Materialien und des Anteils bereits rezyklierter oder schnell nachwachsender Rohstoffe im Verhältnis 2:1 wie folgt ermittelt:

$$\frac{2 \times \text{\% - Anteil rezyklier- oder kompostierbare Rohstoffe} + \text{\% - Anteil rezyklierter oder schnell nachwachsender Rohstoffe}}{3} \times 100$$

Das C2C-Zertifikat kann somit Hinweise für die Messbarkeit des Kreislaufpotenzials auf Produktebene liefern. Da die genauen Anteile im Kreislauf zu führender Rohstoffe jedoch nicht im jedermann zugänglichen Zertifikat ausgewiesen werden, müssen sie weitergehenden Produktinformationen der Herstellern entnommen werden.

### 4.3. Bewertungsmethoden anderer Wissenschaftler – Stand der Forschung

Der Schutz natürlicher Ressourcen ist ein drängendes Thema unserer Zeit. Die Kreislaufwirtschaft stellt hierfür einen wichtigen Lösungsansatz dar. Daher existieren bereits zahlreiche nationale und internationale Forschungsarbeiten zur Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen. Neben produktgruppenspezifischen Arbeiten (industrielle Forschung) gibt es auch übergeordnete Bewertungen der Rückbau- und Recyclingfähigkeit von Baukonstruktionen. Im Folgenden wird zwischen empirisch-experimenteller und angewandter Forschung unterschieden.<sup>23</sup> Ziel ist es, zu untersuchen, auf welchen Forschungsergebnissen aufgebaut werden kann und zu welchen Arbeiten anderer Wissenschaftler eine eindeutige Abgrenzung herzustellen ist.

#### 4.3.1. Empirisch-experimentelle Forschung zum Rückbauaufwand

##### Forschung von Schultmann et al.

Schultmann hat sich bereits 1998 in seiner Dissertation [107] mit der Kreislaufführung von Baustoffen beschäftigt. Seine Forschung zielte auf die Entwicklung von Methoden zur operativen Demontage- und Recyclingplanung damaliger Rückbauvorhaben. Auch in späteren Forschungsprojekten stand die jeweils aktuelle Rückbauplanung im Fokus.

2016 haben Schultmann et al. [108] für ein Forschungsprojekt zum Thema „Immissionsschutz beim Abbruch“ volumenbezogene Dauerkennwerte für verschiedene Abbruchverfahren nach (Rohbau-)Materialarten tabellarisch zusammengestellt (siehe Abb. A 4.13).

Die Tabelle zeigt den Zeitaufwand für Verfahren mit Maschineneinsatz und für den Abbruch mit Handwerkzeug, wobei immer zwei Arbeitskräfte zugrunde gelegt werden. Wie zu erwarten, dauert der Abbruch mit Handwerkzeug bei allen Bauweisen bzw. Materialarten wesentlich länger. Dies liegt ohne Zweifel an der unterschiedlichen Kraft von Maschine und Mensch. Im modernen Rückbau ersetzt die Maschinenkraft die Arbeitskraft des Menschen, da Letztere für den Rückbau heutiger Bauweisen nicht mehr ausreicht bzw. nur mit unverhältnismäßigem Zeitaufwand zu bewerkstelligen wäre. Zur Aktivierung der Kraft benötigt die Maschine jedoch einen entsprechend hohen Energieeinsatz. Anders formuliert: Der Energieeinsatz für einen 40-Tonnen-Bagger (der den Dauerkennwerten für den maschinellen Abbruch in Abb. A 4.13 zugrunde liegt) unterscheidet sich erheblich vom Energieeinsatz eines Menschen.

**Die Faktoren Zeit und Energie sind also zwei entscheidende Kennwerte, die für die Bestimmung des Rückbauaufwands miteinander verknüpft werden müssen.** Dies wird in Kapitel 5, Punkt 5.3.1 verfolgt.

##### Anwendbarkeit

Die Forschung von Schultmann bezieht sich zwar auf heutige Rückbauvorhaben, Teilergebnisse sind aber durchaus auf zukünftige Rückbauvorhaben übertragbar und können zumindest für eine Abschätzung des Rückbauaufwands heutiger Neubauvorhaben dienen.

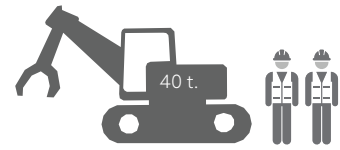
A 4.13 Volumenbezogene, materialabhängige Dauerkennwerte von Abbruchtechniken in h/m<sup>3</sup> für einen 40-Tonnen-Bagger und zwei Arbeitskräfte [108]

<sup>23</sup> Begrifflichkeiten in Anlehnung an das Frascati Handbuch der OECD [109].

Abbruchverfahren	Dauerkennwerte [h/m <sup>2</sup> ]									
	Mauerwerk					Beton			Sonstiges	
	Naturstein	Ziegel	Kalksandstein	Porenbeton	Betonstein	unbewehrt	Ortbeton	Fertigteil	Holz	Stahl 7,6 t/m <sup>3</sup>
Abgreifen	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	x	x	0,03	x
Einschlagen	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	x	x
Eindrücken	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	x	x	0,08	0,07	x
Einziehen	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	x	x	0,07	0,07	0,94
Reißen	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,08	0,08	0,08	x	x
Stemmen	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	x	x
Pressschneiden	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	x	x
Scherschneiden	x	x	x	x	x	x	x	x	0,08	1,56
Abbruch mit Handwerkzeug	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	2,00	2,00	1,15	19,5
Zerkleinern	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,08	0,98
Sortieren	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,04	0,98

x: nicht/schlecht geeignet oder nicht relevant für das Material

Quelle: Experteneinschätzungen, ergänzt durch Weimann et al. (2013); ABW (2012); DA (2015); Seemann (2003); Rentz et al. (2002); Schultmann (1998); Rentz (1993); Willkomm (1990)



A 4.13

**Die Kennwerte von Schultmann et al. aus der Tabelle in Abb. A 4.13 werden unter Berücksichtigung der Eignung der Abbruchverfahren (s. Kapitel 3.3, Abb. A 3.14) für eine Bewertung des Rückbauaufwands von tragenden Bauteilen herangezogen. Für den Rückbau von Bekleidungen (Fassade/Dach/Innenausbau) fehlen solche Kennwerte und müssen ermittelt werden (siehe Kapitel 6.2).**

#### Forschung von Graubner et al.

Graubner und Ritter [110] haben 2010 in einer Versuchsreihe die Verbindungen von Materialschichten in Verbundbauteilen im Innenbereich untersucht. Die Untersuchungen umfassten sieben Innenwandkonstruktionen mit vier verschiedenen Bekleidungen und vier Fußbodenaufbauten mit vier verschiedenen Belägen, so wie sie typischerweise in Büro- und Wohngebäuden vorkommen.

2012 ergänzten Graubner und Clanget-Hulin [111] die Untersuchungen und Dokumentationen um Verbundbauteile im Außenbereich. Analysiert wurden neun verschiedene Wärmedämmverbundsysteme auf vier unterschiedlichen tragenden Wänden (wobei nicht alle Kombinationen untersucht wurden) und 14 Flachdachbeläge auf Stahlbeton- oder Trapezblechdecken.

In beiden Versuchsreihen wurden keine besonders rückbaufreundlichen Konstruktionen mit recyclingfähigen Baustoffen untersucht, sondern hybride Bauteile, die der damaligen (und heute noch aktuellen) Baupraxis entsprachen.

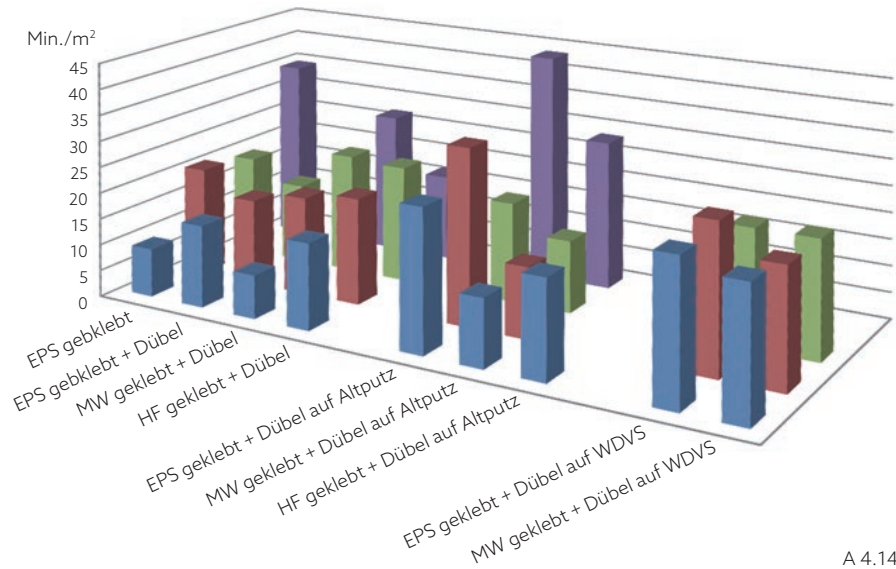
Ziel der Forschung war es, die Umweltwirkungen von Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen im Hinblick auf den Energie- und Materialverbrauch zu analysieren und eine Methode zur Bewertung der Trennbarkeit unterschiedlicher Materialien bei hybriden Bauteilen zu entwickeln.

#### Systematik

Nach dem Aufbau der Bauteile in Versuchsständen wurden die material-spezifischen Schichten selektiv bis auf die tragende Konstruktion zurückgebaut, wobei der Zeitaufwand (in h/m<sup>2</sup>) und der Energieverbrauch (in Wh/m<sup>2</sup>) sowie die Materialverluste (mit Verunreinigungen) dokumentiert wurden. Abb. A 4.14 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Untersuchungen zum Rückbauaufwand.

In der Auswertung wurden die Umweltwirkungen mithilfe einer Ökobi-

- Stahlbeton
- KS-Wand
- Poroton-Wand
- Porenbeton-Wand



A 4.14

Wert aus der Untersuchung	Definition	Bewertungspunkte	Bewertung	Gesamtbewertung
Minimalwert	Zielwert	10	sehr gut	200 - 260
		7,5*	gut	150 - 200
Median	Referenzwert	5,0	mittel	100 - 150
		2,5*	schlecht	50 - 100
Maximalwert	Grenzwert	0	sehr schlecht	0 - 50

\* Zwischenwerte ergeben sich durch Interpolation

A 4.15

lanz für die Sanierungsphase ermittelt. Dabei wurden die Belastungen und Gutschriften für die Stoffströme sowie die Energieaufwendungen für den Rückbau und durchschnittliche Transporte einbezogen (Module B2-5 und C1-4, siehe Kapitel 2, Abb. A 2.9).

Während der Rückbauaufwand in der ersten Studie für die Innenbauteile (2010) noch anhand einer numerischen Skala eingestuft wurde, wurden die ökonomischen Auswirkungen der Rückbaueigenschaften der Außenbauteile (2011/12) durch eine Berechnung der Rückbau- und Entsorgungskosten analysiert. Hierfür wurde der in den Versuchsständen ermittelte Arbeitsaufwand mithilfe eines durchschnittlichen Stundenlohns monetär bewertet und als Rückbaukosten ausgewiesen. Zusätzlich wurden die Entsorgungskosten anhand von recherchierten Kostenkennwerten berechnet. Beide Kostenarten wurden in Euro/m<sup>2</sup> Fläche für jedes Musterbauteil umgerechnet.

Die gemeinsame Bewertung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen orientiert sich an den beiden deutschen Bewertungssystemen für Nachhaltiges Bauen DGNB und BNB. Da sowohl die Ökobilanz als auch die Lebenszykluskosten mit der gleichen (inzwischen leicht veränderten) Gewichtung in die Nachhaltigkeitsbewertung eingehen, werden in den beiden Forschungsprojekten von Graubner et al. die Umweltwirkungen und der Rückbauaufwand ebenfalls gleich gewichtet bewertet. In der neueren Studie wurden für die beiden Kriterien analog zur Bewertung nach DGNB und BNB die Minimalwerte aus der Versuchsreihe als Zielwerte, die Mediane als Referenzwerte und die Maximalwerte als

A 4.14 Vergleich der Arbeitsaufwände zum Rückbau von WDVS an unterschiedlichen Untergründen [111]

A 4.15 Bewertung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Rückbaueigenschaften nach Graubner und Clanget-Hulin in Anlehnung an DGNB und BNB

Grenzwerte definiert. Daraus wurden die Punktbewertungen nach Abb. A 4.15 abgeleitet.

#### *Anwendbarkeit*

Die Analysemethoden von Graubner et al. zielen auf die Bemessung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Rückbau- und Entsorgungseigenschaften von Baukonstruktionen. Dieser Ansatz ist im Prinzip hilfreich für die Planung nachhaltiger Bauwerke, insbesondere vor dem Hintergrund einer DGNB- oder BNB-Zertifizierung.

In der Planungspraxis sowie in den zuvor beschriebenen Zertifizierungssystemen haben die Auswertungen von Graubner et al. jedoch kaum Beachtung gefunden. Dies mag daran liegen, dass nur ausgewählte Konstruktionen untersucht wurden, aber auch daran, dass die Ergebnisse nur begrenzt hilfreich sind, da nicht der gesamte Lebenszyklus betrachtet wurde. Die Herstellung (Pre-Use-Phase) wurde gar nicht einbezogen. Außerdem wurden die Rückbaukosten nur eingeschränkt berücksichtigt. So wurden zwar Arbeitszeitkosten, nicht aber Maschinenkosten berechnet.

Weiterhin sind die Auswertungen wenig anschaulich und nicht praxisgerecht aufbereitet worden. Ein Planungstool wurde nicht entwickelt.

Für eine kreislaufgerechte Planung lassen sich die Ergebnisse nicht verwenden, da die untersuchten Konstruktionen nicht auf eine stoffliche Verwertbarkeit oder gar Wiederverwendbarkeit ausgerichtet sind.

Obwohl z. B. Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) mit verklebtem Polystyrol (EPS) oder verklebten und verdübelten Holzfaserplatten in der Regel eher schwer lösbar und nicht recyclingfähig sind, werden sie in der Studie von 2012 insgesamt mit „gut“ bewertet und schneiden im Vergleich am besten ab, wobei keines der untersuchten WDVS ökologische und ökonomische Anforderungen gleichermaßen erfüllt. Dies liegt daran, dass keine kreislaufgerechten Konstruktionen, so wie wir sie heute verstehen, untersucht wurden.

Die Daten, auf denen die Ergebnisse beruhen, sind inzwischen veraltet. Die Datensätze der verwendeten Datenbank Ökobaudat wurden 2013 an die neue DIN EN 15978 angepasst. Darüber hinaus dürfen nach BNB die Gutschriften für energetische Verwertung (abgebildet im Modul D der Ökobilanz) heute nicht mehr verrechnet werden.

Insgesamt kann die Ökobilanzierung, wie bereits mehrfach erwähnt, die Effekte des Recyclings nur eingeschränkt abbilden, da die Datengrundlage für die End-of-Life-Phase, insbesondere im Hinblick auf stoffliche Verwertung, nicht ausreichend ist.

Die Zwischenergebnisse der Versuchsreihe lassen sich dennoch gut für andere Bewertungsmethoden verwenden. **Die Messungen Graubners zum Rückbauaufwand von Verbundbauteilen in Form von Arbeitszeit und Energie sind dokumentiert, unterliegen keinen großen Veränderungen und können in einen Bauteilkatalog für den Urban Mining Index überführt werden** (s. Kapitel 6.4.2). **Sie müssen jedoch um weitere Konstruktionen, insbesondere rückbau- und recyclingfähige Bauteilaufbauten, ergänzt werden, um eine breitere Spanne abzubilden.**

ENTSORGUNGSWEG	1	2	3	4	5
<b>RECYCLING</b>	Wiederverwendung bzw. -verwertung zu technisch gleichwertigem Sekundärprodukt oder -rohstoff	Recyclingmaterial wird mit geringem Aufwand sortenrein gewonnen und kann hochwertig verwertet werden.	Recyclingmaterial ist verunreinigt, kann mit höherem Aufwand rückgebaut und nach Aufbereitung verwertet werden	Downcycling	Kein Recycling möglich
<b>VERBRENNUNG</b>	Hoher Heizwert (> 2.000 MJ/m <sup>3</sup> ; natürliche Metall- und Halogengehalte im ppm-Bereich, sortenreines Material	Wie 1, jedoch nicht sortenrein; Anteil an nicht-organischen Fremdstoffen beträgt < 3 M-%	Wie 1 oder 2, jedoch mittlerer Heizwert (500- 2.000 MJ/m <sup>3</sup> ) oder geringfügige Metall- o. Halogengehalte (< 3 M-%)	Hoher Stickstoffgehalt, hoher Anteil mineralischer Bestandteile oder erhöhter Metall- oder Halogengehalt (3-10 M-%)	Hoher Metall- oder Halogengehalt
<b>DEPONIERUNG</b>	Zur Ablagerung auf Inertabfalldeponie geeignete Abfälle	Zur Ablagerung auf Baurestmassen geeignete Abfälle ohne Verunreinigungen	Materialien mit geringem Anteil nichtmineralischer Bestandteile, z.B. mineralische Baurestmassen mit organischen Verunreinigungen	Gipshaltige, faserförmige oder mineralisierte organische Materialien sowie Materialien mit erhöhtem Anteil nichtmineralischer Verunreinigungen.	Organisch-mineralischer Verbund; Metalle als Verunreinigungen von Baurestmassen

A 4.16

### 4.3.2. Angewandte Forschung

#### Der Entsorgungsindikator des IBO

Zur Darstellung von Entsorgungseigenschaften hat das Österreichische Institut für Bauen und Ökologie (IBO) unter Leitung von Figl (ehemals Mötzl) „eine semiquantitative Bewertungsmethode entwickelt, die sich aus einer Einstufung der Entsorgungseigenschaften der Baustoffe und der daraus zusammengesetzten Baukonstruktionen eines Gebäudes (unter Berücksichtigung der Verbindungen der Baustoffschichten und Bauteilkonstruktionen untereinander) zusammensetzt“. Die Methode wurde im Jahr 2003 erstpubliziert [112] und unter Beteiligung des Österreichischen Ökologie Instituts (OOI) [113] weiterentwickelt. 2012 wurde der Entsorgungsindikator V1.0 [114] vom IBO eingeführt und 2018 von der aktuellen, ergänzten Version, dem Entsorgungsindikator EI10 [115], abgelöst. Der Indikator ist unter anderem Bestandteil des Bewertungssystems Total Quality Building (TQB), des Gütesiegels der Österreichischen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (ÖGNB).

#### Systematik

Beurteilt werden im EI 10

1. der aktuelle Entsorgungsweg der Baustoffe, der zum jetzigen Zeitpunkt überwiegend (d. h. zumindest zu 80%) beschriftet wird, und
2. das Verwertungspotenzial, das „bei Verbesserung der Rahmenbedingungen bis zum angenommenen Zeitpunkt der Entsorgung des Bauprodukts aus wirtschaftlicher und technischer Sicht möglich wäre“ [116].

Abb. A 4.16 zeigt die Einstufung der Baustoffe in den drei definierten Entsorgungswegen Recycling, Verbrennung und Deponierung auf einer fünfstufigen Skala.

Die Quantifizierung im EI10 erfolgt nach Volumen.

Die Entsorgungseinstufung eines Materials ist der Faktor, mit dem das Volumen multipliziert wird, d. h., für einen Baustoff mit der Entsorgungseinstufung 3 wird das dreifache Abfallvolumen berechnet.

Im zweiten Schritt wird das Verwertungspotenzial der Baustoffe betrachtet: Es reduziert (oder erhöht) die zu beseitigende Abfallmenge auf einer fünfstufigen Skala gemäß der Zuordnung in Abb. A 4.17.

Die Tabelle muss wie folgt interpretiert werden: Von einem Baustoff mit

dem Verwertungspotenzial 1 fallen nur 25% als Abfall an, während 75% recycelt werden.

Die Nutzungsdauern werden berücksichtigt, indem für jedes im Bauteil eingesetzte Material das zur Entsorgung anfallende Volumen inkl. Austausch und Erneuerung im Betrachtungszeitraum (je nach Bewertungssystem) berechnet wird. Wenn funktionsrelevante Bauteilschichten (z. B. Abdichtungen) unter Bauteilschichten mit längerer technischer Nutzungsdauer liegen, so wird ein Austausch aller tangierten und nicht zerstörungsfrei aus- und wiedereinbaubaren Schichten einkalkuliert.

Das Ergebnis des Entsorgungsindikators einer Bauteilschicht ist also das Produkt aus dem Volumen des Materials pro m<sup>2</sup>, der Entsorgungseinstufung und dem Prozentsatz der Abfallreduktion/-erhöhung:

$$V/m^2 \times \text{Entsorgungsfaktor} \times \text{Abfallreduktion/-erhöhung} = EI/m^2$$

Der Berechnungsleitfaden des IBO [115] enthält eine Aufstellung beispielhafter Baustoffe mit jeweiliger Zuordnung der Entsorgungseinstufung und des Verwertungspotenzials (Abb. A 4.18).

Demnach ergibt sich für eine 20 cm starke Betonplatte (ohne Austauschbedarf), die mit einer Bitumenabdichtung verunreinigt wird, eine Entsorgungskennzahl bzw. ein bewertetes Volumen von:

$$0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times 2 \times 75\% = 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Würde die Betonplatte nicht verunreinigt, ergäbe sich ein bewertetes Volumen von 0,2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (0,2 x 2 x 50% = 0,2).

Verwertungspotenzial	Abfallreduktion oder -erhöhung
1	25 %
2	50 %
3	75 %
4	100 %
5	125 % *

\* Für die Beseitigung eines Baustoffs mit Verwertungspotenzial 5 wird zusätzliches Material zur Aufbereitung benötigt, daher wird die Abfallmenge um 25 % erhöht (125 %)

A 4.17

Baustoff	Entsorgungseinstufung	Verwertungspotenzial
Stahlbeton und Normalbeton	2	2
• in Kombination mit bituminöser Abdichtung	2	3
• in Kombination mit zementgeb. EPS-Schüttung	2	3
Estrichbeton	3	4
• in Kombination mit Bodenbelag schwimmend verlegt	2	3
Armierungsstahl	2	1
Holz (Brettschichtholz, Schnittholz)	1	1
Glas-, Stein-, und Mineralwolle		
• als Fassadendämmplatte	4	3
• als Trittschalldämmplatte	4	3
• zwischen Holzkonstruktionen oder Gipsständerwand	3	3
Schaumglasplatte	3	3
• mit Bitumen vergossen	3	4
EPS-Dämmung (Standard)	5	4
EPS-Dämmung (HBCD-frei)	4	3
Wärme- oder Sonnenschutzverglasung	2	2
Fensterrahmen		
• Holz-Alu	2	2
• PVC	4	3
• Alu (wärmegeklämmt*)	3	2
• Holz *	3	3

\* keine weitere Angaben (zum Dämmstoff oder zur Beschichtung)

A 4.16 Entsorgungseinstufung der Baustoffe im Entsorgungsindikator EI10 des IBO [117]  
 A 4.17 Einstufung des Verwertungspotenzials mit Zuordnung der (fiktiven) Reduktion/Erhöhung der betrachteten Abfallmengen im Entsorgungsindikator EI10 des IBO [118]  
 A 4.18 Beispielhafte Baustoffe/Bauteilschichten mit Zuordnung der Entsorgungseinstufung und des Verwertungspotenzials im Entsorgungsindikator EI 10 des IBO [119]

A 4.18

---

Das Ergebnis des Entsorgungsindikators einer Konstruktion (EI KON) ist die Summe der gewichteten Volumen der Bauteilschichten. Aus den EI KON aller Konstruktionen wird durch flächengewichtete Mittelung der Entsorgungsindikator des Gebäudes errechnet. Seit 2018 werden die Ergebnisse auf Gebäudeebene um den Faktor 10 erhöht, woraus sich auch der neue Name EI10 ableitet. Auf einer Skala von 10 bis 45 werden Gebäude wie folgt bewertet:

- Mindestanforderung: EI10  $\leq$  45,0
- Bestbewertung: EI10  $\leq$  20,0

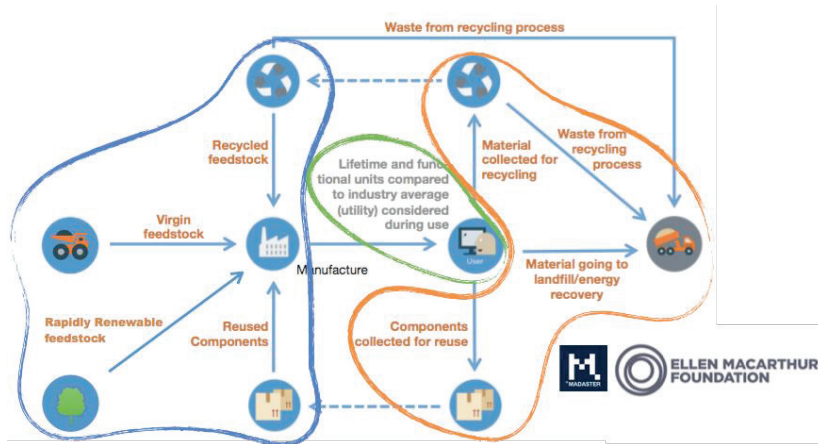
#### *Anwendbarkeit*

Mit Blick auf die beschriebene Systematik stellen sich folgende Fragen: Was bedeuten diese Zahlen nun? Im Grunde ist das Ergebnis ein bewertetes Volumen, aber was kann der Anwender mit dem bewerteten Volumen anfangen? In welche Beziehung kann er es setzen, außer auf der vorgenannten Skala einzuordnen? Das Ergebnis scheint insgesamt wenig aussagekräftig.

Außerdem bleiben Fragen zur Bewertung der Baustoffe/Konstruktionen offen: Warum wird z. B. Stahlbeton, auch wenn er nicht verunreinigt ist, als „hochwertiges Recycling“ eingestuft, obwohl es sich um ein Downcycling handelt? Warum kann mit Deponierung und Verbrennung überhaupt eine positive Bewertung erzielt werden, obwohl die Materialien dabei verloren gehen und diese Entsorgungswege nach Abfallrahmenrichtlinie (s. Kapitel 3.1.2, Abb. A 3.3) am unteren Ende der Hierarchie stehen? Auf welche Erkenntnisse stützt sich die Einordnung der Verwertungspotenziale?

Diese Fragen bleiben nach der Analyse der Bewertungsmethodik des IBO offen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts [113] hat das IBO zwar über eine Literaturrecherche und Befragung von Herstellern sowie von Entsorgungsunternehmen und -verbänden Daten zur Entsorgung der Baumaterialien erhoben, aber die Rückbauprozesse wurden nach Recherche der Verfasserin dieser Arbeit vernachlässigt. Es fanden weder empirische Untersuchungen zum Rückbau statt, noch waren Experten aus der Abbruchbranche involviert. Infolgedessen wird der Aufwand für den Rückbau bei der Bewertung nicht berücksichtigt. Weiterhin wird der ökonomische Wert der Materialien nicht berücksichtigt, obwohl dies ein wichtiger Faktor bei der Rückgewinnung von Wertstoffen ist, wie der Name schon sagt.

Insgesamt ist das Bewertungssystem des IBO zu sehr auf die herkömmliche Entsorgung ausgerichtet. Das Kreislaufpotenzial der Konstruktionen wird nicht abgebildet. Die Verwendung von Sekundärrohstoffen schon bei der Herstellung der Baustoffe geht nicht in die Bewertung ein. Das Schließen von Kreisläufen in der Pre-Use-Phase wird somit ebenfalls nicht abgebildet.



A 4.19 Systemgrenzen der Messmethodik im Madaster Circularity Indicator: Bauphase (blau) Nutzungsphase (grün) End-of-Life Phase (orange) [124]

### Madaster Circularity Indicator

Madaster ist ein webbasiertes Kataster (Register), in dem Identität und Einsatzort von Materialien in Gebäuden mithilfe eines Materialpasses registriert werden können. Es wurde 2017 von der Betriebswirtin Sabine Oberhuber und dem Architekten Thomas Rau [123] in den Niederlanden initiiert und von der Madaster Foundation entwickelt. Rau betrachtet Abfall als „Material ohne Identität“, das aufgrund seiner Anonymität keinen Wert besitzt. Deshalb soll jedes Material registriert werden und mit einem „Pass“ eine Identität (Zusammensetzung, Menge, Herkunft etc.) erhalten.

Der Madaster-Zirkularitätsindikator (Circularity Indicator – CI) wurde von der Madaster Services B.V. [124] parallel zu der hier vorliegenden Arbeit entwickelt und im April 2018 veröffentlicht. Er soll nach Oberhuber und Rau andeuten, „in welchem Maß der Entwurf und die Verarbeitung der Materialien ihre Wiederverwertbarkeit garantieren“. Ziel ist es, die zirkulär orientierte Gebäudeplanung zu verbessern und den zirkulären Wert von Gebäuden zu erhöhen. Dieses Ziel deckt sich insofern mit der hier vorliegenden Arbeit. Um den Unterschied der Bewertungsmethoden herauszuarbeiten, wird die Systematik des Madaster CI im Folgenden detailliert beschrieben.

#### Systematik

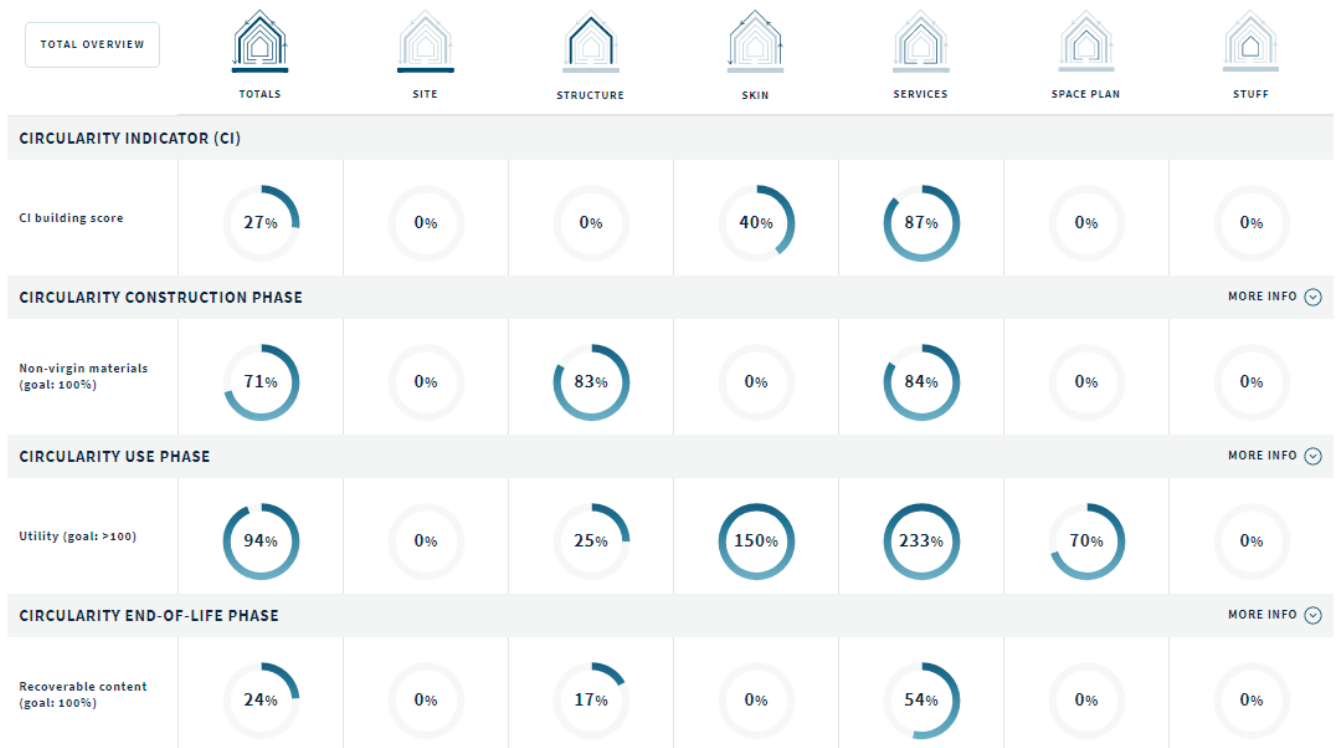
Der Madaster CI basiert auf dem von der Ellen MacArthur Foundation entwickelten „Material Circularity Indicator“ [125]. Er wird für das Gesamtgebäude auf einer Skala von 0 bis 100% abgebildet und bezieht sich auf die im „Materialpassport“ bzw. in der Madaster-Datenbank erfassten Daten. Dem Madaster CI geht eine Masterarbeit von Verbene [128] voraus, in welcher der Absolvent der TU Eindhoven 2016 einen Ansatz zum Messen der Zirkularität eines Gebäudes entwickelt hat.<sup>24</sup>

In die Berechnung des Madaster CI gehen die in Abb. A 4.19 dargestellten Lebenszyklusphasen Bau, Nutzung und End of Life ein.

Grundprinzipien hierbei sind:

1. Verwendung von so vielen recycelten und/oder wiederverwendeten und/oder schnell erneuerbaren Materialien wie möglich

<sup>24</sup> Verbene ist für Copper8 tätig, eine niederländische Unternehmensberatung, die an der Entwicklung des Madaster CI mitgewirkt hat. Auf die Masterarbeit von Verbene wird hier nicht weiter eingegangen, da die darin vorgestellte Systematik (Building Circularity Indicator) dem Madaster CI sehr ähnlich ist und offensichtlich weiterentwickelt wurde.



A 4.20

2. Verlängerung der Nutzungsdauer durch Verwendung von Produkten mit überdurchschnittlicher Nutzungsdauer (im Branchenvergleich)
3. Sammeln von so vielen Materialien und Produkten zum Recycling und zur Wiederverwendung wie möglich

Der Madaster CI Score wird nach der Gebäudelaye-Theorie von Brand [126] getrennt für die sechs Elemente Grundstück, Tragwerk, Gebäudehülle, Technische Ausrüstung, Innenausbau und Ausstattung ermittelt. Der nach Massen gewichtete Durchschnittswert wird in einer Gesamtbewertung des Gebäudes dargestellt (s. Abb. A 4.20).

Die relevanten Gebäudedaten können mithilfe einer IFC- (BIM) oder Excel-Datei auf die Madaster Plattform hochgeladen werden. Die Elemente müssen nach dem NL-SfB-Standard<sup>25</sup> [127], einer niederländischen Klassifizierung von Bauelementen, basierend auf der schwedischen SfB-Codierung, strukturiert sein. Die Codes setzen sich aus Inhalten von fünf umfangreichen Tabellen zusammen, womit unter anderem Konstruktionsmethoden und (Bau-)Materialien nach Art und Eigenschaften verschlüsselt werden (s. Beispiel in Abb. A 4.21).

Da in den NL-SfB-Tabellen keine Zirkularitätsdaten verschlüsselt sind, werden die hochgeladenen Gebäudedaten mit Daten aus der vorhandenen Madaster-Datenbank<sup>26</sup> automatisch verknüpft. Vom Anwender (z. B. Architekten) können aber auch Zirkularitätsdaten manuell eingegeben werden. Anschließend werden die im Folgenden dargestellten Komponenten auf Material- und Produktebene errechnet [124]<sup>27</sup>.

A 4.20 Darstellung der Komponenten des Madaster Circularity Indicators auf der Madaster-Plattform [131]

A 4.21 Beispiel für eine Codierung von Gebäudedaten nach den Tabellen des NL-SfB Standard [127]

A 4.22 Beurteilung der Demontagefähigkeit von Bauprodukten und -materialien im Madaster Circularity Indicator [124]

25 NL/SfB wird z. B. verwendet, um Layer und Objekte in BIM- und CAD-Systemen zu kodieren und Informationen von Anbietern von Bauprodukten zu organisieren.

26 Es ist nicht transparent, woher die in der Datenbank hinterlegten Zirkularitätsdaten kommen (siehe „Anwendbarkeit“ auf Seite 84)

27 Die Formeln sind der Beschreibung zum Madaster Circularity Indicator entnommen;

### 1. Bauphase (Konstruktion)

$$CI_{Konstruktion} = F_R + F_{RR} + F_U$$

- $F_R$  Anteil (Fraction) an Recyclingmaterial (in % der Produktmasse)
- $F_{RR}$  Anteil an schnell nachwachsenden Rohstoffen (rapidly renewable materials, in % der Produktmasse)
- $F_U$  Anteil wiederverwendeter Produkte und/oder Komponenten (Re-Use, in % der Produktmasse)

### 2. Nutzungsphase

Um den Zirkularitätsindikator der Nutzungsphase zu ermitteln, wird die potenzielle Nutzungsdauer mit der branchenüblichen Nutzungsdauer nach der Buildinglayer-Theorie von Brand ins Verhältnis gesetzt.

$$CI_{Nutzung} = L / L_{av}$$

- $L$  Mögliche Nutzungsdauer eines Produkts in Jahren
- $L_{av}$  Branchenübliche Nutzungsdauer eines Gebäudelayers (Element nach Brand) in Jahren

### 3. End-of-Life-Phase

Um den Zirkularitätsindikator für die End-of-Life-Phase zu generieren, muss der Anwender das potenzielle Nachnutzungsszenario für jedes Material und/oder Produkt angeben. Recycling und Wiederverwendung gehen in den CI ein, während Verbrennung und Deponierung als nicht-zirkuläre Szenarien außen vor bleiben.

$$CI_{End-of-Life} = C_R \cdot E_C + C_U$$

- $C_R$  Anteil von Materialien, die am Ende ihrer Nutzungsdauer potenziell recycelt werden können (in % der Produktmasse)
- $E_C$  Effizienz<sup>28</sup> des Recyclingprozesses in der End-of-Life-Phase (%)
- $C_U$  Anteil von Komponenten und/oder Produkten, die am Ende ihrer Nutzungsdauer potenziell wiederverwendet werden können (in % der Produktmasse)

Um die Demontierbarkeit in die Bewertung einzubeziehen, müssen die zu erfassenden Produkte die in Abb. A 4.22 dargestellten Bedingungen hinsichtlich der Demontagefähigkeit erfüllen. Eine genauere, quantitative Bewertung des Rückbauaufwands erfolgt offensichtlich nicht.

Auf Gebäudeebene wird der Zirkularitätsindikator genau andersherum berechnet, nämlich unter Berücksichtigung des linearen (nicht zirkulären) Teils der Materialflüsse (Linear Flow Index – LFI) und des Nutzungsfaktors:

$$CI = 1 - LFI \cdot F(X)$$

Der LFI ist der Quotient aus der Summe der für die Herstellung verwendeten nicht erneuerbaren Primärrohstoffe zuzüglich der Summe aller

NL/SfB	32	(22)	R o1	(G5/6)
Tabelle 0 Gebäude/Raum: <b>Büro</b>				
Tabelle 1 Bauelement: <b>Innenwand</b>				
Tabelle 2 Konstruktion: <b>R starre Platten</b>				
Tabelle 3 Material: <b>o1 transparentes Glas</b>				
Tabelle 4 Eigenschaften G5 Farbe = <b>grün</b> G6 Transparenz = <b>50%</b>				

A 4.21

#### Beurteilung der Demontagefähigkeit von Produkten

Die Montagepunkte sind leicht zugänglich und das Produkt kann leicht entfernt werden, ohne dass andere Gebäudeteile beschädigt werden

Ja / Nein

Das Produkt kann mit Standardwerkzeugen leicht abgenommen und demontiert werden, ohne das Produkt oder die Produkte, an denen es befestigt ist, zu beschädigen

Ja / Nein

Das Produkt wird mit vorgefertigten Klammern und Klemmen mit standardisierten Montagemethoden installiert

Ja / Nein

A 4.22

die Erläuterungen dazu sind hier ins Deutsche übersetzt worden.

28 Der Effizienzfaktor bestimmt den Anteil an Materialien, der wieder in den Kreislauf zurückgeführt wird. So können beispielsweise die Feinanteile (< 2 mm) beim Betonrecycling derzeit noch nicht verwertet werden und landen in der Regel auf der Deponie.

Abfälle, die nach der Nutzungsdauer der Produkte auf einer Deponie oder in einer Verbrennungsanlage landen, und der doppelten Masse aller eingesetzten Baumaterialien zuzüglich der Abfälle, die durch die Recyclingprozesse erzeugt werden. Die Formel für den LFI lautet wie folgt:

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$$

Sie besteht aus folgenden Unterformeln:

$$V = M(1 - F_R - F_{RR} - F_U)$$

V Masse der bei der Produktherstellung verwendeten Primärrohstoffe (kg)

M Produktmasse (kg)

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2}$$

W Abfallmasse (kg)

$W_0$  Abfallmasse (kg), die nach der Nutzungsdauer eines Produkts (direkt) auf einer Deponie oder in einer Verbrennungsanlage landet

$W_F$  Abfallmasse (kg), die durch den Recyclingprozess erzeugt wird, der die zur Herstellung eines Produkts verwendeten Materialien liefert (d. h. der Anteil, der nicht verwertet werden konnte)

$W_C$  Abfallmasse (kg), die durch den Recyclingprozess nach der Nutzungsdauer des Produkts entsteht (d. h. der Anteil, der nicht verwertet werden kann)

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U)$$

$C_R$  Anteil von Materialien mit einem Abfall-Recycling-Szenario (in % der Produktmasse)

$C_U$  Anteil von Materialien mit einem Szenario zur Wiederverwendung von Abfällen (in % der Produktmasse)

$$W_F = M \frac{(1 - E_F) F_R}{E_F}$$

E Effizienz des Recyclingprozesses, der die Materialien liefert, um ein Produkt herzustellen (%). Es wird ein Standardwert von 75% angesetzt (der manuell geändert werden kann), solange die erforderlichen Daten nicht verfügbar sind.

$$W_C = M(1 - E_C) * C_R$$

$E_C$  Effizienz des Recyclingprozesses (%) für ein Produkt mit einem Abfall-recycling-Szenario. Es wird ein Standardwert von 75% angesetzt (der manuell geändert werden kann), solange die erforderlichen Daten nicht verfügbar sind.

Der Nutzungsfaktor  $F(X)$  berechnet den Einfluss der Nutzungsdauer eines Produkts. Die Formel lautet:

$$F(X) = \frac{0,9}{X} \quad \text{mit } X = \frac{L}{L_{av}}$$

- 0,9      Gebrauchskonstante  
 L        Potenzielle Nutzungsdauer des Produkts (in Jahren)  
 $L_{av}$     Branchenübliche Nutzungsdauer des Produkts (in Jahren)

Die Gebrauchskonstante stellt sicher, dass vollständig lineare Produkte mit einer potenziellen Nutzungsdauer, die der durchschnittlichen Nutzungsdauer der Branche entspricht, eine Bewertung von 0,1 erhalten. Ein Gebäude, das also zu 100% aus nicht-zirkulären Materialien besteht, die aber zumindest der durchschnittlichen Lebensdauer entsprechen, hat demnach einen Zirkularitätsindikator von 10%.

Dagegen hätte ein Bauwerk, das zu 100% aus Sekundärmaterialien oder nachwachsenden Rohstoffen besteht, die nach der Nutzungsdauer vollständig (zu 100%) recycelt oder wiederverwendet werden können, ohne dass durch diese Prozesse weitere Abfälle entstehen, hätte einen Zirkularitätsindikator von 100%, und zwar unabhängig von der potenziellen Nutzungsdauer der Materialien: Denn wenn der lineare Teil der Materialflüsse (LFI) gleich Null ist, wirkt sich die Multiplikation mit dem Nutzungsfaktor nicht aus.

Für ein Betonbauteil von 1.000 kg mit 390 kg<sup>29</sup> rezyklierter Gesteinskörnung, das zu 100% recycelbar ist (sortenrein), wobei die Effizienz des Recyclingprozesses 50%<sup>30</sup> beträgt, und bei dem davon ausgegangen werden kann, dass die potenzielle Lebensdauer der branchenüblichen entspricht, ergibt sich folgender Circularity Indicator:

$$\begin{aligned} CI &= 1 - \frac{610 \text{ kg} + 0 \text{ kg} + \frac{390 \text{ kg} + 500 \text{ kg}}{2}}{2.000 \text{ kg} + \frac{390 \text{ kg} - 500 \text{ kg}}{2}} \times \frac{0,9}{1} \\ &= 0,51 \text{ oder } 51\% \end{aligned}$$

Um die (Un-)Vollständigkeit des Datensatzes in der Madaster-Datenbank zu berücksichtigen, wird der CI-Wert für Gebäude um zwei Korrekturfaktoren angepasst. Hierfür wird das Ergebnis zunächst mit dem Prozentsatz der Massen, für den die Materialien bekannt sind, und anschließend mit dem Prozentsatz der Massen, für den eine NL-SfB-Codierung verfügbar ist, multipliziert. Wäre kein einziges Material bekannt (hätte also keine „Identität“), würde der CI 0,0 bzw. 0% betragen.

Der Anwender kann die Madaster-Datenbank „anreichern“, indem er selbst ein Produkt in der Datenbank anlegt und mit Material- oder Zirkularitätsdaten hinterlegt. Inwieweit diese Daten von Madaster geprüft werden, ist nicht bekannt.

29 Nach Hillebrandt/Seggewies [129] beträgt das Material-Loop-Potenzial (MLP) von Konstruktionsbeton (durch Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung) 39%.

30 Beim Betonrecycling beträgt der nicht verwertbare Feinanteil ca. 50% [130].

---

Um die Plattform weiterzuentwickeln, wollen die Betreiber Verknüpfungen zu externen Datenbanken mit Herstellerdaten herstellen. Nach Auffassung der Verfasserin dieser Arbeit kann dies nur mit wissenschaftlicher Überprüfung oder unabhängiger Drittzertifizierung, z. B. nach ISO 14020 Typ I und III (s. Kapitel 4.2.1), erfolgen.

#### *Anwendbarkeit*

Der Madaster CI ist eine quantitative Methode, mit der die Zirkularität von Gebäuden messbar gemacht wird. Die Ergebnisse sind gut ablesbar in Kreisdiagrammen dargestellt. Die Systematik berücksichtigt die Effizienz von Recyclingprozessen, indem dabei entstehende, nicht verwertbare Abfälle einkalkuliert werden.

Ein großer Pluspunkt ist die Registrierung des Gebäudes und seiner Materialien in einer zentralen Datenbank, wodurch die Bewertung während der Nutzungsphase des Gebäudes überwacht und angepasst werden kann. So besteht die Möglichkeit, die Daten nach Instandhaltungs- und Umbaumaßnahmen zu aktualisieren. Technische Innovationen in Recyclingprozessen oder Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen, die einen Einfluss auf die End-of-Life-Szenarien von Materialien haben, können eingepflegt werden und zu angepassten Bewertungen führen.

Die Bewertung von Materialien in der Madaster-Datenbank ist allerdings nicht transparent. So sind weder Zirkularitätsdaten von vorbewerteten Produkten oder Materialien (wie Sekundärrohstoffanteile oder Effizienzdaten zu Recyclingprozessen) noch typische Materialzuordnungen zu den End-of-Life-Szenarien ersichtlich. Der Release-Beschreibung zum Madaster CI [131] ist lediglich in einem Bildschirmauszug (Screenshot aus der Software) zu entnehmen, dass Materialzusammensetzungen auf Produktebene nach %-Anteilen von

- Stein (mineralisch),
- Holz,
- Glas,
- Metall,
- Kunststoff,
- Organischem und
- Unbekanntem

aufgeschlüsselt werden.

Die Recyclingfähigkeit kann anhand dieser groben Einteilung keinesfalls beurteilt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen oder Datenerhebungen wurden bisher nicht beschrieben.

Bei der Zuordnung der End-of-Life-Szenarien wird das Recycling (stoffliche Verwertung) außerdem nicht weiter differenziert. Eine Verwertung unter Qualitätsverlust (Downcycling) wird bisher gleichgesetzt mit einer Verwertung zu vergleichbaren Produkten [134].

Der Rückbauaufwand wird auch bei dieser Bewertungsmethodik vernachlässigt. Die qualitative Beurteilung der Demontagefähigkeit nach Abb. A 4.22 ist nicht aussagekräftig und gibt keine quantitative Berücksichtigung des Rückbauaufwands vor, sodass auch im Madaster CI dessen Einfluss auf die Wiedergewinnung von Material nicht ersichtlich wird.

Der reine Materialwert eines Gebäudes kann aktuell über die Madaster-Datenbank ermittelt werden. Das ist durchaus ein Vorteil für Immobilienbesitzer, Abbruchunternehmer und andere. Jedoch ist bisher nicht transparent, auf welcher Datenbasis der Wert ermittelt wird. Bei Metallen ist dies relativ einfach, da Schrotte an Sekundärrohstoffbörsen gehandelt werden. Aber wie wird z.B. der Wert der mineralischen Abbruchmaterialien gemessen? Zurzeit ist dieser Wert negativ, da in der Regel Entsorgungsgebühren anfallen. Statistiken über Entsorgungsgebühren werden jedoch bisher nicht geführt.

Außerdem erweckt der reine Materialwert einen falschen Eindruck, da zum einen der Rückbauaufwand nicht berücksichtigt wird; zum anderen können auch Materialien, die nicht den Demontagerkriterien des Madaster CI entsprechen (z.B. Kupferheizrohre in Gussasphaltestrich vergossen) einen hohen Wert haben, der beim Rückbau (z.B. durch Einschmelzen) realisiert werden kann.

Der Madaster CI wurde mit verschiedenen Institutionen entwickelt [134], darunter

- Copper8, Unternehmensberatung für Circular-Economy-Strategien, NL
- EPEA GmbH<sup>31</sup>
- TNO<sup>32</sup>, Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung

Universitäre Forschung wurde – abgesehen von der vorausgegangenen Masterarbeit von Verbene – nach Recherchen der Verfasserin dieser Arbeit nicht betrieben.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Methodik eingeschränkt geeignet ist, Kreislaufpotenziale von Gebäuden quantitativ abzubilden. Sie ist sehr praxisorientiert; jedoch fehlen die wissenschaftlichen Grundlagen oder sind nicht transparent dargestellt. So ist die Bewertungsgrundlage undurchsichtig und unvollständig und muss weiterentwickelt werden.

### Weitere Arbeiten

Neben den Wissenschaftlern vom IBO und der Madaster Foundation haben sich außerdem Durmisevic [136] und Schwede/Störl [137] mit der Bewertung der Rückbau- und Recyclingfähigkeit von Baukonstruktionen befasst. Durmisevic hat einen Transformationskapazitätsindex (Transformation Capacity Index – TC-Index) entwickelt. Da die Bewertung jedoch nicht quantitativ sondern qualitativ erfolgt, wird die Arbeit hier nicht weiter dargestellt.

Schwede/Störl haben einen „Recycling-Graph“ entwickelt, eine wissenschaftliche Methode zur Analyse der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Verbindungstechniken. Eine Zusammenfassung der qualitativen Bewertungsmethode wurde von der Verfasserin der hier vorliegenden Arbeit im Atlas Recycling [138] veröffentlicht.

31 Environmental Protection Encouragement Agency, ehemals Internationale Umweltforschung GmbH, seit 01/2019 Teil des deutschen Projektmanagers Drees & Sommer

32 Niederländisch: Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek; die TNO ist eine Körperschaft öffentlichen Rechts und bezieht ihren Erlös zu etwa einem Drittel aus der öffentlichen Hand. [135]

#### 4.4. Zwischenfazit

In den Gebäudezertifizierungssystemen werden die zirkulären Eigenschaften von Baukonstruktionen bisher unzureichend und ungenau abgebildet. Die deutschen Systeme berücksichtigen zwar die Rückbau- und Recyclingfähigkeit am Ende der Nutzungsdauer, die Bewertung erfolgt jedoch rein qualitativ und führt bisher nicht zum Ziel. Die Bewertungsinstrumente werden von den Anwendern bisher kaum zur Optimierung genutzt, da sie schwer handhabbar sind.

Ziel der Zertifizierungssysteme ist es, die Nachhaltigkeit von Bauwerken zu messen. Deshalb sollte der Bewertung des kreislaufgerechten Bauens auch eine quantitativ messbare Methodik zugrunde gelegt werden. Die Ökobilanzierung ist zwar eine quantitative Methode, sie bildet aber die Recyclingaspekte – vor allem in der praktischen Anwendung auf Gebäudeebene – nur unzureichend ab.

Ebenso findet die ökonomische Relevanz des Recyclings in den Zertifizierungssystemen bisher keine Beachtung. Die Kosten für Rückbau und Entsorgung bleiben in der Berechnung der Lebenszykluskosten (LCC) außen vor. Die Begründung für deren Nichtbeachtung lautet oft, dass die End-of-Life-Kosten aufgrund des geringen Anteils an den Gesamtlebenszykluskosten zu vernachlässigen seien – mit Blick auf knapper werdende Ressourcen und steigende Entsorgungskosten ein falsches Signal. Vielmehr fallen diese Kosten aufgrund der angewandten Barwertmethode<sup>33</sup> in der Berechnung der Lebenszykluskosten nicht ausreichend ins Gewicht.

Der eigentliche Grund für die Nichtbeachtung ist auch hier die mangelnde Datengrundlage für die Kosten der End-of-Life-Phase, vor allem, wenn diese nicht pauschal auf Basis von Flächenkennwerten oder Rauminhalten berechnet werden sollen, sondern unter Berücksichtigung der zirkulären Eigenschaften, insbesondere der Kreislaufpotenziale.

Riegler-Floors und Hillebrandt [132] haben im Atlas Recycling für drei Modellprojekte die Lebenszykluskosten kreislaufoptimierter Konstruktionen mit denen konventioneller Konstruktionen unter Berücksichtigung der Rückbau- und Entsorgungskosten verglichen. Im Ergebnis schnitten die kreislaufgerechten Konstruktionen in der Gegenüberstellung besser ab, wobei sich höhere Herstellungskosten durch geringere Instandhaltungskosten und niedrigere End-of-Life-Kosten im Laufe des Lebenszyklus bezahlt machen. Bei dem Vergleich handelt es sich jedoch um Einzelfallbetrachtungen. **Um die End-of-Life-Phase generell bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten berücksichtigen zu können, bedarf es weiterer Forschung, die jedoch über die Ziele dieser Arbeit hinausgeht.**

Die bestehenden Produktzertifizierungssysteme wie FSC/PEFC oder Umweltproduktdeklarationen bieten gute Grundlagen, auf denen eine Gebäudebewertung aufbauen kann. Besonders die Ausweisung von

<sup>33</sup> Ein oberhalb der Preissteigerungsrate liegender Diskontierungszinssatz bewirkt im Zusammenspiel mit den langen Zeiträumen bis zum Rückbau einen geringen Gegenwartswert der späteren Rückbau- und Entsorgungskosten. Dies führt zu einem verfälschten Bild der tatsächlichen Kosten.

Sekundärrohstoffanteilen oder Angaben zu (nachhaltig) nachwachsenden Rohstoffen bis hin zu Informationen zur Verwertung können Daten für die Berechnung der Kreislaufpotenziale liefern.

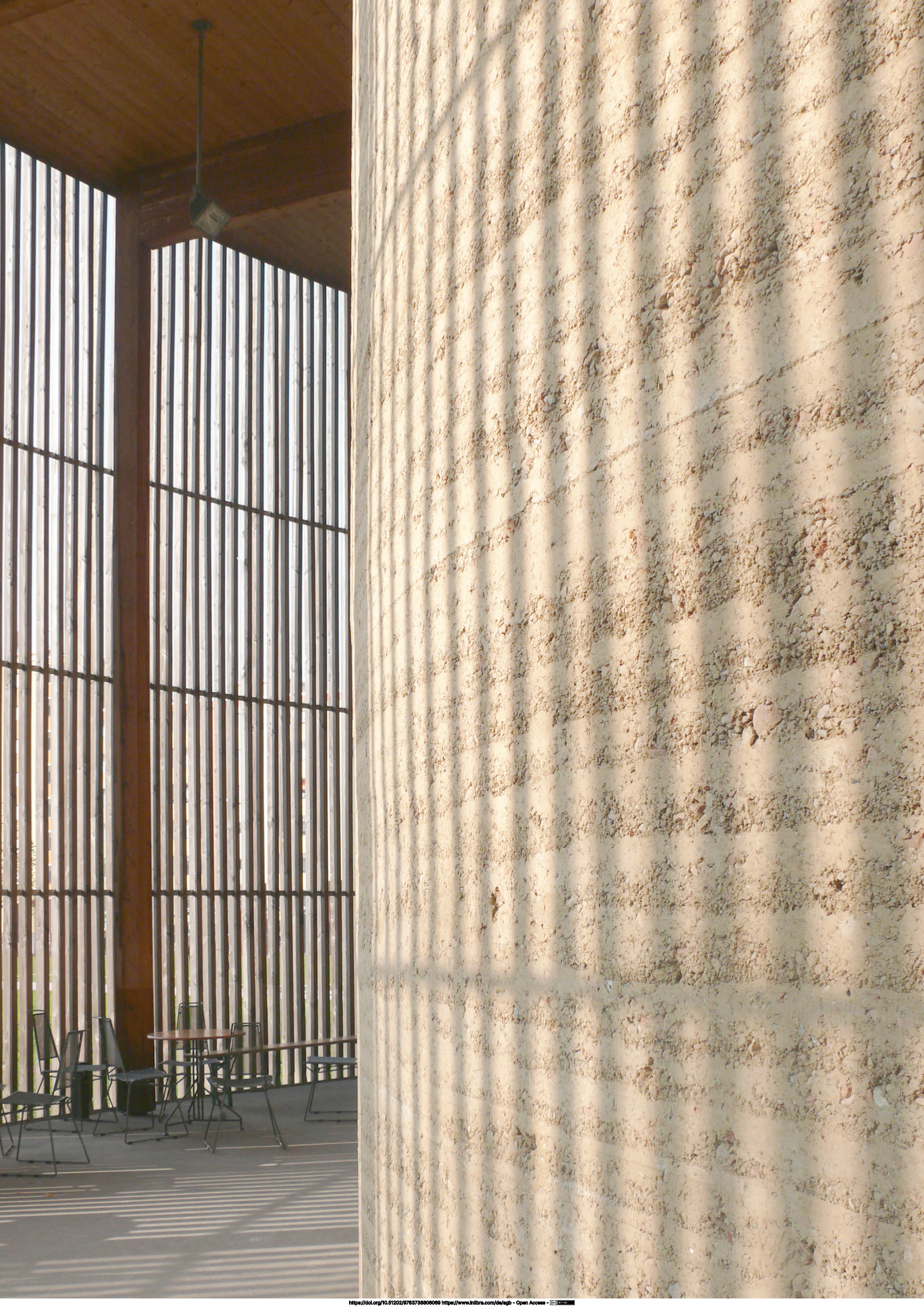
Hillebrandt und Seggewies [133] haben diese Informationsquellen durch Recherche bei Bauproduktherstellern und Verbänden ergänzt und im Atlas Recycling übersichtlich zusammengestellt. Hierauf wird im Kapitel 5.1 „Materielle Ebene“ zurückgegriffen.

Von den Forschungsarbeiten und Entwicklungen der letzten Jahre bildet der parallel zu dieser Arbeit entstandene Madaster Circularity Indicator die zirkulären Eigenschaften eines Bauwerks am besten ab. Er berücksichtigt im Gegensatz zum Entsorgungsindikator des IBO den vollständigen Lebenszyklus – von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Verwertung. Die Systemgrenzen entsprechen damit denjenigen, die in dieser Arbeit zugrunde gelegt werden.

Die Recyclingfähigkeit wird zudem quantitativ bewertet, indem die recycelten und recyclingfähigen Massenanteile ermittelt werden – allerdings bisher ohne Berücksichtigung der Qualität des Recyclings. Die Effizienz der Recyclingprozesse soll durch die Berechnung der prozessbedingten Abfälle berücksichtigt werden, wird aber pauschalisiert, solange keine Daten hierfür vorliegen.

**Zusammenfassend lassen sich aus der Recherche zum Stand von Forschung und Technik folgende Schlüsse ziehen:**

- Keine der Forschungsarbeiten oder angewandten Systeme bildet den Rückbauaufwand und die damit zusammenhängende Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus angemessen ab. Dies ist jedoch eine wichtige Voraussetzung für die Rückgewinnung von Wertstoffen.
- Keine der existierenden Methoden berücksichtigt die Grenzen der Einsetzbarkeit von Sekundärrohstoffen in Neuprodukten (Material-Loop-Potenzial).
- Eine Differenzierung zwischen Re- und Downcycling findet in keiner der Methoden statt. Einzig im DGNB-System werden Bonuspunkte gewährt, wenn die eingesetzten Baustoffe auf gleichem Qualitätsniveau werkstofflich verwertbar sind.
- In den angewandten Systemen fehlen wissenschaftliche Grundlagen zur quantitativen Bewertung der Recyclingfähigkeit und des Rückbauaufwands.
- Eine praxisorientierte Systematik zur Bewertung der zirkulären Eigenschaften von Bauwerken ist parallel zu dieser Arbeit entstanden, bedarf aber der Weiterentwicklung, um eine objektive, transparente und wissenschaftlich fundierte Bewertung inkl. des Rückbauaufwands zu ermöglichen.
- Die Arbeiten von Graubner et al. und die Produktzertifizierungssysteme bieten Grundlagen für die Entwicklung von messbaren Parametern zur quantitativen und objektiven Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen.



---

## 5. Parameter zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen

Welche Parameter bestimmen nun die zirkulären Eigenschaften von Baukonstruktionen?

Aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel lässt sich ableiten: Die Parameter müssen sich am Lebenszyklusansatz orientieren, sowohl die materielle als auch die konstruktive Ebene berücksichtigen sowie die wirtschaftlichen Aspekte einbeziehen.

Dabei werden sowohl qualitative als auch quantitative Parameter benötigt: Messbare Kennzahlen ermöglichen eine Quantifizierung, qualitative Parameter hingegen erst eine differenzierte Bewertung.

Im folgenden Kapitel werden deshalb qualitative und quantitative Parameter auf materieller und konstruktiver Ebene definiert, mit der sich das Kreislaufpotenzial über den Lebenszyklus berechnen und die Kreislaufkonsistenz bewerten lässt.

5.1.	Materielle Ebene	90
5.2.	Konstruktive Ebene	96
5.3.	Wirtschaftliche Ebene	98

## 5.1. Materielle Ebene

### 5.1.1. Umfang der materiellen Ebene

Abbildung A 5.2 zeigt die Bewertungsparameter im Lebenszyklus, gegliedert nach materieller, konstruktiver und wirtschaftlicher Ebene.

Auf materieller Ebene sind sowohl der Materialeinsatz in der Herstellung als auch der mögliche Materialverbleib nach der Nutzung zu betrachten. Unter Berücksichtigung der Nutzungsphase sind der Materialeinsatz und der Materialverbleib ggf. mehrfach zu berücksichtigen, wenn aufgrund der technischen Nutzungsdauer von Materialien im Lebenszyklus ein Austausch erforderlich ist:

Lebensphase	Materialeinsatz	Materialverbleib
Herstellung (Pre-Use)	x	
Nutzung/Austausch (Use)	x	x
Nachnutzung (Post-Use)		x

### 5.1.2. Parameter zur Qualifizierung

Für die qualitative Bewertung der Kreislaufkonsistenz auf materieller Ebene sind zwei Kriterien entscheidend: die Schadstofffreiheit und die Qualitätsstufen der End-of-Life-Szenarien.

#### *Schadstofffreiheit*

Schadstoffe, die gefährlich für Menschen und Umwelt sind, dürfen sich weder im Naturkreislauf noch im technischen Kreislauf anreichern. Bereits geringfügige Zusätze an Gefahrstoffen können die Recyclingfähigkeit einschränken. Deshalb sind schadstofffreie Baumaterialien eine Grundvoraussetzung für konsistente Kreisläufe. Braungart und McDonough haben sich ausführlich mit der Thematik befasst und eine „Banned List of Chemicals“ (Liste verbotener Chemikalien) für das Cradle-to-Cradle-System (s. Kapitel 4.2.2) erstellt. Bei C2C-zertifizierten Produkten kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Schadstofffreiheit gegeben ist. Eine Prüfung nicht zertifizierter Produkte anhand der „Banned List“ ist jedoch nicht möglich, da die Hersteller ihre genauen Rezepturen in der Regel nicht offenlegen.

Die deutschen Gebäudezertifizierungssysteme enthalten nach Bauteilen gegliederte Tabellen mit baustoffrelevanten Schadstoffen. Die DGNB gibt in ihrer Kriterienmatrix auch Hinweise zur Vermeidung von Risiko- und Störstoffen für den Recyclingprozess. Diese sind in Abb. A 5.3 zusammengefasst und können über Produktinformationen oder Sicherheitsdatenblätter der Hersteller geprüft werden.

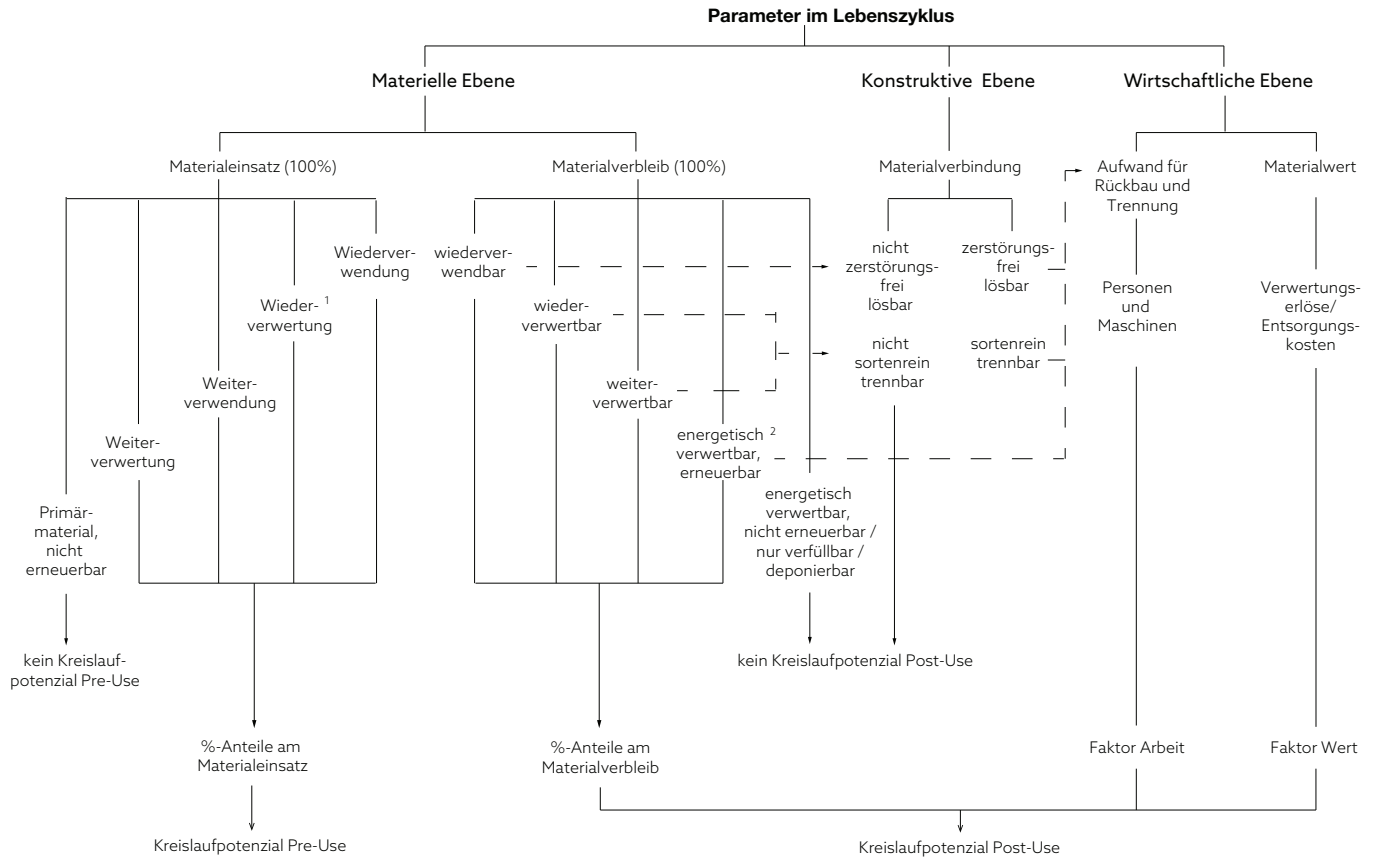
**Die Schadstofffreiheit ist im Urban Mining Index ein Ausschlusskriterium, d. h., enthält ein Bauprodukt einen Stoff, der die Grenzwerte nach Abb. A 5.3 nicht einhält, besitzt das Material kein Kreislaufpotenzial.**

#### *Qualitätsstufen*

Eine differenzierte Bewertung des Materialeinsatzes und des möglichen Materialverbleibs erfolgt anhand der bereits in Kapitel 2.2.3 erwähnten und in Abb. A 5.2 benannten Nachnutzungsmöglichkeiten in Qualitätsstufen. Diese unterscheiden sich von der Hierarchie der Abfallrahmen-

A 5.2 Parameter zur Bewertung der Kreislaufpotenziale im Lebenszyklus

A 5.3 Schad- und Risikostoffe, die aus dem Kreislauf auszuschließen sind



1 inklusive im Naturkreislauf wiederverwertete Materialien (nachgewachsene Rohstoffe)

2 die Weiterverwertbarkeit und energetische Verwertbarkeit erneuerbarer Materialien wird im Closed-Loop- und Loop-Potenzial weiter differenziert (s. Kapitel 7)

A 5.2

relevante Bauteile/Baumaterialien	betrachteter Stoff	Anforderung
Bodenbeläge, textil	besonders Besorgnis erregende Stoffe (substances of very high concern – SVHC*)	GUT-Gütesiegel o. Umweltzeichen DE UZ 128 (Blauer Engel für textile Bodenbeläge)
Bodenbeläge, elastisch	SVHC	Gehalt an Chlorparaffinen und reproduktionstoxischen Phthalaten < 0,1%
Holzbauteile	Holzschutzmittel und Biozide	keine chemischen Holzschutzmittel (Produktart 8 nach 528/2012/EG) keine Biozide (Produktart 7 nach 528/2012/EG: Schutzmittel für Baumaterialien)
Beschichtungsstoffe für Metallbauteile	Schwermetalle Halogene	keine Blei-, Cadmium- und Chrom-VI-Verbindungen keine halogenierten Brandschutzbeschichtungen
Aluminium- und Edelstahlbauteile der Gebäudehülle	Passivierungsmittel	Chrom-VI-freie Passivierungsmittel
Erzeugnisse aus Kunststoffen	SVHC	SVHC < 0,1%
Kunststoffe zur Belegung von Oberflächen und an der Gebäudehülle	Blei- und zinnorganische Verbindungen	Gehalt an Blei < 0,1% und Zinn < 0,1%
Flammhemmend ausgerüstete Bauprodukte	Chlorparaffine (CP), Polybromierte Biphenyle (PBB), Diphenylether (PBDE) und SVHC	Gehalt an CPs < 0,1 %, PBB < 0,1 %, PBDE < 0,1 % und SVHC ≤ 0,1 %
Biozid- und flammhemmend ausgerüstete Bauprodukte	Borverbindungen	Gehalt an Borverbindungen < 0,1%

\* gemäß REACH (= Europäische Chemikalienverordnung 1907/2006/EG)

A 5.3

■ hochwertigstes End-of-Life-Szenario: nur Baustoffe, für die ein etablierter Gebrauchsmarkt existiert oder absehbar ist (z.B. hochwertige Klinker, großformatige Natursteine, wertvolle Hölzer wie Eichenbalken), Demontage erforderlich

■ hochwertiges End-of-Life-Szenario, selektiver Rückbau erforderlich

□ übliches End-of-Life-Szenario, selektiver Abbruch

Reuse: Wiederverwendung  
 Recycling: stoffliche Wiederverwertung  
 Downcycling: stoffliche Weiterverwertung oder Weiterverwendung  
 Energy Recovery: energetische Verwertung  
 \* renewable: aus nachwachsenden Rohstoffen  
 † fossil: aus fossilen Rohstoffen = außerhalb der Kreislaufkonsistenz

Wertstoff	End-of-Life-Szenarien			
	Reuse	Recycling	Downcycling	Energy Recovery renewable * † fossil †
Beton		■	□	
Ziegel/Mauersteine	■	■	□	
Fliesen und Keramik			■□	
Naturstein	■		■□	
Boden/Lehmabbaustoffe		■	□	
Holz A1 und A2 nach AltholzV	■		■	□
biologische Faserstoffe (Kompost)		■		□
Glas		■	□	
Kunststoff, nach Kunststoffart			■	□ □
Bitumengemische		■		□
Schrott, nach Metallart	■	■□		
Hersteller-/Verbandsrücknahme (z. B. Mineralwolle, Gipsbaustoffe)		■		

A 5.4

richtlinie (s. Kapitel 3, Abb. A 3.3) wie folgt:

- Eine Vermeidung wird nicht abgebildet. Die Vermeidung ist Teil der Strategie der Suffizienz. Sie kann zur Ressourcenschonung beitragen, aber zum einen sind die Möglichkeiten der Suffizienz begrenzt (s. Kapitel 2.1.1), zum anderen ist eine Vermeidung nicht quantifizierbar.
- Bei der Verwertung wird im Gegensatz zur Abfallrahmenrichtlinie zwischen Wiederverwertung (Recycling) und Weiterverwertung (Downcycling) unterschieden.
- Die sonstige Verwertung fließt nur in die Berechnung der Kreislaufpotenziale ein, wenn damit Kreisläufe geschlossen werden können. Die Verfüllung ist insofern ausgeschlossen. Eine energetische Verwertung ist nur eine Option für nachwachsende Rohstoffe.

Die Baumaterialien müssen also zunächst hinsichtlich ihrer Kreislaufkonsistenz qualifiziert werden. Abb. A 5.4 zeigt eine Übersicht von Baustoffen, gegliedert nach Wertstoffen in Anlehnung an die Gewerbeabfallverordnung (s. Kapitel 3.1.2 Seite 44). Die Wertstofffraktionen, die in die Zukunft gerichtet über den aktuellen Stand nach GewAbfV hinausgehen und keine Abfälle zur Deponierung enthalten, lassen sich nach Art des Rückbaus und der dadurch erzielten Sortenreinheit den dargestellten End-of-Life-Szenarien zuordnen.

Die Qualifizierung entscheidet darüber, ob ein Material in geschlossenen oder offenen Kreisläufen geführt werden kann, also zum Closed-Loop-Potenzial oder nur zum Loop-Potenzial einer Konstruktion gezählt wird. Verbundwerkstoffe, für die keine Rücknahmeerklärung des Herstellers oder eines Verbands mit entsprechender Logistik existiert und die keinem der genannten End-of-Life-Szenarien zugeordnet werden können, sind disqualifiziert, d. h., sie fließen weder in das Closed-Loop- noch in das Loop-Potenzial ein.

#### Abbildung der Qualitätsstufen im Lebenszyklus

In der Pre-Use-Phase werden die Wieder- und Weiterverwendung von Bauprodukten sowie die Wieder- und Weiterverwertung technischer und natürlicher Rohstoffe zum Kreislaufpotenzial gezählt. Die energetische Verwertung spielt in der Pre-Use-Phase keine Rolle, da sie nicht stofflich in ein Bauwerk eingehen kann und die Prozessenergie nach Kapitel 2.4 außerhalb der festgelegten Systemgrenzen liegt.

Nach der Nutzung wiederverwendbare sowie wieder- und weiterver-

wertbare Materialien fließen in das Kreislaufpotenzial Post-Use ein. Die energetische Verwertbarkeit von Baustoffen wird in der Post-Use-Phase materialabhängig berücksichtigt: Sind Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen zwar nicht stofflich, aber energetisch verwertbar, gehen sie in das Kreislaufpotenzial ein, da sie sich in Zeiträumen, die dem Lebenszyklus von Gebäuden entsprechen, im Naturkreislauf erneuern können. Für Materialien aus fossilen Rohstoffen, die nur energetisch verwertbar sind, wird dagegen kein Kreislaufpotenzial ausgewiesen, da die Rohstoffe durch die Verbrennung unwiederbringlich verloren gehen. Die weitere Differenzierung der Qualitätsstufen erfolgt in Kapitel 7.

### 5.1.3. Parameter zur Quantifizierung

In Anlehnung an den Indikator „Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe“ der europäischen Nachhaltigkeitsstrategie (s. Kapitel 1, Seite 8) werden die Kreislaufpotenziale im Urban Mining Index als prozentuale Zirkularitätsraten quantifiziert. Im Gegensatz zum Indikator der EU<sup>34</sup> wird allerdings nicht nur der Materialeinsatz (Pre-Use) betrachtet, sondern auch der Materialverbleib (Post-Use).

- Zur Quantifizierung des Kreislaufpotenzials Pre-Use wird der Massenanteil zirkulär geführter Materialien ins Verhältnis zum Gesamtmaterialeinsatz gesetzt (Angabe in %).
- Zur Quantifizierung des Kreislaufpotenzials Post-Use wird der Massenanteil der am Ende der Nutzungsdauer zirkulär führbaren Materialien ins Verhältnis zum Gesamtmaterialverbleib (Abfall- bzw. Wertstoffaufkommen) gesetzt.

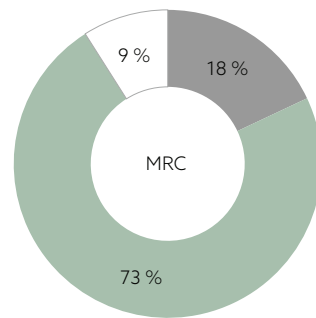
Für die Quantifizierung des Materialeinsatzes und des Materialverbleibs spielen zwei Kennwerte eine entscheidende Rolle, die von Hillebrandt und Seggewies im Atlas Recycling definiert wurden und **die in dieser Arbeit Verwendung finden: der Material Recycling Content und das Material-Loop-Potenzial.**

#### *Material Recycling Content (MRC) – Pre-Use*

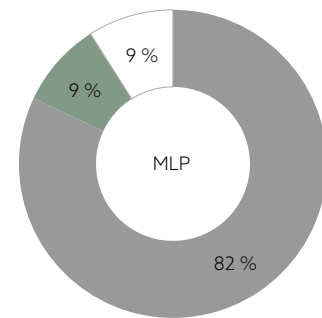
Der Material Recycling Content (dt.: Anteil) beziffert den aktuellen Anteil an Recyclingmaterialien und/oder Neumaterial auf Basis nachwachsender Rohstoffe in einem Produkt oder Baustoff.

Kreislaufkonsistente Konstruktionen sollen ein Maximum an sekundären oder erneuerbaren (nachwachsenden) Rohstoffen enthalten, während nicht erneuerbare Primärrohstoffe möglichst zu minimieren sind. Zum Kreislaufpotenzial Pre-Use zählen deshalb der Anteil rezyklierter Materialien und der Anteil nachwachsender Rohstoffe, die zusammen als Material Recycling Content (MRC) bezeichnet werden. Als Datenquelle dienen die im Atlas Recycling veröffentlichten und nach Anwendung und Materialart gegliederten Daten zahlreicher Baustoffe. Zusätzlich können weitere geprüfte Herstellerdaten (z.B. Umweltdeklarationen Typ I und III, s. Kapitel 4.2.1) genutzt werden.

34 Der EU-Indikator ist etwas missverständlich formuliert, denn er drückt nicht die (am Ende der Nutzungsdauer) wiederverwendbaren Stoffe aus, sondern meint die wieder (und weiter) verwendeten bzw. verwerteten Stoffe.



■ Sekundärrohstoff-Weiterverwertung  
 ■ nachgewachsene Rohstoffe  
 □ nicht erneuerbare Primärrohstoffe  
 A 5.5



■ maximal möglicher Sekundärrohstoffanteil  
 ■ nachhaltig nachwachsende Primärrohstoffe  
 □ Bedarf nicht erneuerbare Primärrohstoffe  
 A 5.6

Abb. A 5.5 zeigt beispielhaft die Materialzusammensetzung einer Spanplatte: Die Platte enthält 18% Altholz, 73% Holz aus primären Quellen und 9% nicht erneuerbare Rohstoffe aus primären Quellen (z.B. erdölbasierter Leim). Im Gegensatz zum Atlas Recycling wird in dieser Arbeit nach einer Verifizierung der Methodik (siehe Kapitel 7.4) auch beim Materialeinsatz zwischen Wieder- und Weiterverwertung der Sekundärrohstoffe unterschieden. So wird im Beispiel der Spanplatte die Verwertung von 18% Altholz als praktizierte Weiterverwertung dargestellt, da die Holzfasern bei jedem Recyclingprozess eine Qualitätsminderung erfahren.

#### Material-Loop-Potenzial (MLP) – Post-Use

Das Material-Loop-Potenzial beziffert den nach heutigem Stand der Forschung „möglichen zukünftigen Anteil von Recyclingmaterialien in einem Produkt bei einer maximalen Optimierung der Produktion hinsichtlich ihres Sekundärrohstoffanteils.“ [141]

Es gibt einerseits an, wie hoch der Anteil an Recyclingmaterialien – abgesehen vom derzeitigen Material Recycling Content (MRC) – idealerweise sein könnte und zeigt andererseits die nach heutigem Stand der Forschung bestehenden Grenzen des Einsatzes von Sekundärrohstoffen in einem Produkt. Für die Schaffung geschlossener Kreisläufe ist der Faktor deshalb entscheidend.

Die Differenz zwischen Gesamtmaterial (100%) und dem maximal möglichen Sekundärrohstoffanteil (MLP) in einem Produkt kann prinzipiell nur durch Primärmaterial gedeckt werden. So können aktuell im Beispiel der Spanplatte maximal 82% des Rohstoffbedarfs durch Altholz gedeckt werden, während (für die äußeren Lagen) noch 9% Holz aus erneuerbaren primären Quellen – im Idealfall aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft – sowie weitere 9% Bindemittel aus nicht erneuerbaren primären Quellen benötigt werden (s. Abb. A 5.6).

Das MLP ist für die Post-Use-Phase bedeutend, da bei zunehmender Abbruchtätigkeit (s. Kapitel 3.1) vermehrt Sekundärrohstoffe anfallen werden. Übersteigt das Aufkommen eines Sekundärrohstoffs den durch das MLP begrenzten Bedarf, fallen die Überschüsse als Abfall zur nachrangigen Verwertung oder Deponierung an, und für den nicht durch Sekundärrohstoffe deckbaren Anteil werden weiterhin Primärrohstoffe abgebaut. So können z. B. in Porenbeton-Mauersteinen nach den

A 5.5 Material Recycling Content (MRC) am Beispiel einer Spanplatte [142]

A 5.6 Material-Loop-Potenzial (MLP) der gleichen Spanplatte [142]

Recherchen von Hillebrandt und Seggewies nur maximal 15% der Rohstoffe durch gemahlene Alt-Porenbeton ersetzt werden. Fällt mehr Alt-Porenbeton an, wäre bestenfalls eine Weiterverwertung (z. B. als Pflanzsubstrat oder Katzenstreu) möglich.

**Das MLP ist damit ein wichtiger Koeffizient<sup>35</sup> zur Berechnung des Closed-Loop-Potenzials (CLP). Für das Loop-Potenzial (inkl. Weiterverwertung) spielt das MLP jedoch keine Rolle, da die Möglichkeiten der Weiterverwertung vielfältig und schwer absehbar sind.**

Generell ist das MLP nur für das End-of-Life-Szenario Wiederverwertung (Recycling) eine relevante Kenngröße. Für wiederverwendbare Bauteile oder (im Ganzen) wiederverwendbare Bauprodukte spielt der maximal mögliche Recyclingcontent genauso wenig eine Rolle wie für die energetische Verwertung.

Die Besonderheiten von zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen und nicht zertifiziert/nicht nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen spiegeln sich in den Qualitätsstufen und damit im Closed-Loop-Potenzial und im Loop-Potenzial wider (s. Kapitel 7).

35 Ein Koeffizient (von lat. *coefficiente* ‚mitwirken‘), „auch Beizahl oder Vorzahl genannt, ist eine zu einem anderen rechnerischen Ausdruck als Faktor hinzugefügte Zahl oder Variable. Der Koeffizient kann ein Parameter oder eine Kennzahl (Physik, Ökonomie) sein.“ Quelle: Wikipedia

---

## 5.2. Konstruktive Ebene

Die konstruktive Ebene bestimmt entscheidend die Nachnutzung von Baumaterialien mit. Lösbare Verbindungstechniken und sortenreine Trennbarkeit sind Voraussetzungen für die hochwertige Rückgewinnung von Materialien.

In der Kabinettsvorlage zur novellierten GewAbfV heißt es hierzu: „Die Praxis zeigt, dass es aufwendig und kostenintensiv ist, möglichst sortenreine wertstoffhaltige Abfälle für einen Recyclingprozess zu generieren, wenn diese in Gemischen anfallen. Die getrennte Erfassung von Abfällen dagegen führt genau zu solchen weitgehend sortenreinen Abfallfraktionen und ist daher gegenüber der Erfassung von Abfallgemischen mit nachträglicher Sortierung die bevorzugte Handlungsoption.“ [143]

Um die getrennte Erfassung von Wertstoffen im Um- oder Rückbaufall zu ermöglichen, müssen „sowohl die Bauteile als auch die einzelnen Materialien lösbar gefügt sein“, wie Riegler-Floors und Hillebrandt [144] im Atlas Recycling erläutern. Lösbare Verbindungstechniken müssen bereits in der Planung berücksichtigt werden.

Wodurch zeichnen sich nun lösbare Verbindungstechniken aus?

### 5.2.1. Zerstörungsfreie Lösbarkeit

Für die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen oder -produkten ist eine zerstörungsfreie Demontage das entscheidende Kriterium.

Die Norm aus der Fertigungstechnik DIN 8593 „Fertigungsverfahren Fügen“ definiert eine lösbare Verbindung als „eine durch Fügen hergestellte Verbindung, die ohne Beschädigung der gefügten Teile wieder gelöst werden kann.“ [122] In Tabelle 2 der Norm sind verschiedene Fügetechniken hinsichtlich ihrer Lösbarkeit nach Schädigung oder Zerstörung der Fügeteile charakterisiert (s. Abb. A 5.7).

Die Norm kann als Orientierung für die Beurteilung der zerstörungsfreien Lösbarkeit dienen. Da die Charakterisierungen jedoch für das Bauwesen nicht immer zutreffen (z. B. ist das Gießen von Beton als Technik des Urformens nicht ohne Zerstörung lösbar) und die Definitionen nicht eindeutig sind und von äußeren Faktoren wie Witterungseinflüssen abhängen können, muss die zerstörungsfreie Lösbarkeit im Einzelfall beurteilt werden.

**Die zerstörungsfreie Lösbarkeit ist kein quantifizierbarer Parameter, sondern ein qualifizierendes Kriterium für wiederverwendbare Baumaterialien und -produkte (re-usables).**

Für wieder- und weiterverwertbare Materialien ist die Lösbarkeit ohne Zerstörung nicht relevant, da die Produktgestalt im Verwertungsprozess per Definition (s. Kapitel 2.2.3) sowieso aufgelöst wird. Ebenso spielt die Lösbarkeit ohne Zerstörung für energetisch verwertbare Materialien keine Rolle.

Fügetechnik	Art des Zusammenhaltens	Lösbarkeit
Zusammensetzen	Schwerkraft (Reiben), Formschluss oder Federkraft	ohne Schädigung der Fügeteile lösbar
Füllen	Einschluss	ohne Schädigung der Fügeteile lösbar
Anpressen, Einpressen	Kraftschluss	im Allgemeinen ohne Schädigung der Fügeteile lösbar
Fügen durch Urformen (z.B. Gießen)	Formschluss, hervorgerufen durch Urformen	im Allgemeinen ohne Schädigung der Fügeteile lösbar
Fügen durch Umformen	Formschluss, hervorgerufen durch Umformen	im Allgemeinen nur mit Schädigung oder Zerstörung lösbar
Fügen durch Schweißen	Stoffverbindung	nur durch Schädigung der Fügeteile lösbar
Fügen durch Löten	Stoffverbindung	im Allgemeinen nur mit, teils jedoch auch ohne Schädigung lösbar
Kleben	Adhäsion	im Allgemeinen nur mit Schädigung oder Zerstörung der Fügeteile lösbar, in Sonderfällen ohne Schädigung lösbar
Textiles Fügen	Formschluss und/oder Kraftschluss bei textilen Faserstoffen	ohne Schädigung der Fügeteile lösbar, sofern keine Fasern miteinander verklebt sind

A 5.7

### 5.2.2. Sortenreinheit

Für die stoffliche Verwertung ist in erster Linie der Grad der Sortenreinheit maßgeblich. Verunreinigungen behindern den Recyclingprozess und sollten deshalb vermieden werden. Idealerweise lassen sich Materialien mit einer lösbaren Verbindung rückstandsfrei trennen. Sind Rückstände unvermeidbar, bestimmt der Grad der Verunreinigung die Verwertbarkeit. So sind z. B. in rezykliertem Gesteinskörnung für Beton nach DIN 1045-2 gemäß DIN 4226-101 max. 1% bitumenhaltige Materialien wie Asphalt zugelassen.

**Der Grad der Sortenreinheit ist kein Koeffizient, sondern ein Ausschlusskriterium.** Ist der erforderliche Reinheitsgrad für den Recyclingprozess nicht erfüllbar, weil keine Mechanismen zur Trennung bestehen, kann das Material nach der Nutzung nicht recycelt werden, sondern wird je nach Möglichkeit anderweitig verwertet oder beseitigt.

### 5.3. Wirtschaftliche Ebene

Die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus ist, wie in Kapitel 1.4.4 bereits erwähnt, mitentscheidend für die Rückgewinnung von Baustoffen auf hohem Qualitätsniveau. Wie kann die Wirtschaftlichkeit nun gemessen werden?

Grundsätzlich wird die Wirtschaftlichkeit einer Handlung bestimmt, indem der Ertrag ins Verhältnis zum Aufwand gesetzt wird. Absolut gesehen ist eine Handlung wirtschaftlich, wenn der Ertrag größer ist als der Aufwand. Relativ gesehen, kann eine Handlung auch in Beziehung zu einer alternativen Handlung wirtschaftlich sein, unabhängig davon, ob ein Ertrag erzielt wird (wenn z.B. ein Verlust minimiert werden soll).<sup>36</sup> Der Aufwand kann prinzipiell in Geldeinheiten, in Arbeitsstunden, Materialeinsatz etc. gemessen werden, während der Ertrag in der Regel in Geldeinheiten gemessen wird.

In Kapitel 3.4 wurde bereits erläutert, dass die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus in erster Linie vom Rückbau-/Demontageaufwand und den Entsorgungskosten bzw. Verwertungserlösen<sup>37</sup> abhängt. Letztere können in Geldeinheiten gemessen und bewertet werden. Um den Rückbauaufwand in Geldeinheiten zu quantifizieren, müssten jedoch nicht nur durchschnittliche Lohnkosten für Rückbaupersonal, sondern auch Nutzungskosten für diverse Arten von Maschinen vorliegen. Im Grunde braucht es hierfür einen „Abbruchkosten-Index“, ähnlich dem BKI Baukostenindex<sup>38</sup>, der sowohl für konventionelle als auch für kreislaufgerechte Konstruktionen Abbruchkosten bereitstellt. Derlei Inhalte gehen jedoch über den Umfang dieser Forschungsarbeit hinaus. **Der Urban Mining Index setzt deshalb an der Basis an: Der Rückbauaufwand wird nicht in Geld umgerechnet, sondern der reine Arbeitsaufwand für Personen und Maschinen wird ermittelt und als Faktor Arbeit bewertet.**

#### 5.3.1. Rückbauaufwand – Faktor Arbeit

Der Duden beschreibt den Begriff „Arbeit“ als „eine Tätigkeit mit einzelnen Verrichtungen“ [147]. Menschliche Arbeit kann in geistige und körperliche Arbeit unterschieden werden. Eine Bau- oder Rückbautätigkeit auf der Baustelle ist in erster Linie eine körperliche Arbeit. Dabei wirken Kräfte auf einen Körper (Bauteil oder Material) und setzen diesen in Bewegung, um eine konstruktive oder stoffliche Verbindung zu lösen.

#### *Die physikalische Größe Arbeit*

In der Physik ist Arbeit die Energie, die durch Kräfte auf einen Körper übertragen wird. Das Formelzeichen für Arbeit ist  $W$  (von engl. Work). Die internationale Standardeinheit (SI-Einheit) für Arbeit ist identisch mit der für Energie: das Joule mit dem Einheitszeichen J [148].

36 Für ein Rückbauunternehmen ist die absolute Wirtschaftlichkeit entscheidend, da es Gewinne erzielen muss. Für einen Bauherrn/Investor oder Grundstückseigentümer steht die relative Wirtschaftlichkeit im Vordergrund, da der Rückbau aktuell (auch monetär) mit Verlust verbunden ist, den es zu minimieren gilt.

37 Wären die Verwertungserlöse höher als Entsorgungskosten und Rückbauaufwand zusammen, wäre der Rückbau absolut wirtschaftlich. Aktuell ist der Rückbau nur wirtschaftlich, wenn mit einer anderweitigen Nutzung der Fläche Erlöse erzielt werden.

38 Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, diverse Bände zur Neubaukostenplanung.

Die Einheit leitet sich aus folgender Formel ab:

$$W [J] = F [N] \times s [m]$$

$$1 J = 1 N \times m$$

$W$	Arbeit
$F$	Kraft
$s$	Weg (Strecke)
[J]	Joule
[N]	Newton
[m]	Meter

Die zeitbezogene Verrichtung einer Arbeit wird als Leistung bezeichnet. Das Formelzeichen für Leistung ist  $P$  (von engl. Power). Die SI-Einheit für Leistung ist das Watt mit dem Einheitszeichen  $W$  (nicht zu verwechseln mit dem Formelzeichen  $W$  für Arbeit).

Die Leistung ( $P$ ) ist der Quotient aus verrichteter Arbeit ( $W$ ) und der dazu benötigten Zeit ( $t$ ). Die Formel lautet:

$$P [W] = \frac{W [J]}{t [s]}$$

$$1 W = \frac{1 J}{s}$$

$P$	Leistung
$t$	Zeit
[s]	Sekunde
[W]	Watt

Physikalisch betrachtet ist es dabei unerheblich, ob die Arbeit von Maschinen oder Personen durchgeführt wird.

Die Energie, die ein Mensch für das Verrichten von Arbeit in einer bestimmten Zeit benötigt, wird als „Leistungsumsatz“ bezeichnet – im Gegensatz zu der Energie, die ihn am Leben erhält, die „Grundumsatz“ oder auch „Ruheumsatz“ genannt wird.

### **Damit kann das Joule als Maßeinheit für menschliche und maschinelle Arbeit verwendet werden.**

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Leistungsfähigkeit oder Kraft brauchen Personen und Maschinen für dieselbe Arbeit eine unterschiedliche Zeit. Die an einem Körper oder Bauteil verrichtete Arbeit, in der Einheit Joule gemessen, ist jedoch dieselbe.

Selbstverständlich lässt sich der Mensch nicht auf eine Maschine reduzieren und natürlich hat Arbeit auch einen sozialen Aspekt, aber für die Berechnung des Faktors Arbeit ist die physikalische Größe Arbeit mit der Einheit Joule eine neutrale Größe zur Ermittlung des Rückbauaufwands. Gegenüber einem Kostenansatz (Lohn- und Maschinenkosten) hat sie den Vorteil, dass sie relativ konstant und unabhängig von regionalen Faktoren ist. Außerdem ist die Größe Arbeit unabhängig von fehlender Forschung zu Rückbaukosten.



A 5.8

A 5.8 schwere körperliche Tätigkeit bei der Entkernung eines Mehrfamilienwohnhauses in Handarbeit

---

Die Leistung für den Rückbau setzt sich somit aus der Leistung der Personen und der Leistung der Maschinen zusammen und wird anhand folgender Formel ermittelt:

$$P_R \text{ [W]} = P_P \text{ [W]} + P_M \text{ [W]}$$

$P_R$  Leistung Rückbau  
 $P_P$  Leistung Personen  
 $P_M$  Leistung Maschinen

mit den Unterformeln:

$$P_P \text{ [W]} = \frac{W_P \text{ [J]}}{t \text{ [s]}}$$

$$P_M \text{ [W]} = \frac{W_M \text{ [J]}}{t \text{ [s]}}$$

$W_P$  Leistungsumsatz Personen  
 $W_M$  Energieumsatz Maschinen

### *Wirkungsgrad*

Grundsätzlich muss bei der Betrachtung der physikalischen Größe Arbeit zwischen aufgenommener Arbeit (Energie) und verrichteter Arbeit (Energie) unterschieden werden. Das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Energie wird als Wirkungsgrad ( $\eta$ ) bezeichnet. Wird chemisch gebundene Energie, z. B. in Form von Kraftstoff oder Nahrung, verbrannt, kann nur ein Teil in mechanische Energie umgewandelt werden, ein weiterer Teil wird in Abwärme umgewandelt. Für den Rückbau von Gebäuden ist die abgegebene Wärmeenergie nicht nutzbar, d. h., sie geht verloren.

Deshalb stellt sich die Frage, ob die von Mensch oder Maschine aufgenommene oder aber die verrichtete Arbeit/Energie für die Ermittlung des Rückbauaufwands zugrunde gelegt werden soll.

Für die verrichtete Arbeit (Nettoarbeit) spricht, dass diese Größe einen fixen Wert darstellt, der auf eine Materialverbindung einwirken muss, um sie zu lösen. Die real aufzuwendende Energie (Bruttoarbeit) ist dagegen veränderlich und abhängig von der Effizienz des angewendeten Verfahrens sowie der technischen Entwicklung. Für die Bruttoarbeit spricht, dass die unvermeidbaren Verluste ebenfalls einen Aufwand darstellen, der einen erheblichen Anteil am Gesamtaufwand ausmachen kann. Im Folgenden muss der Wirkungsgrad weiter untersucht werden, bevor eine Festlegung getroffen werden kann.

### *Arbeit von Personen*

Der durchschnittliche Grundumsatz eines Menschen wird vom Institut für Ernährungsinformation [149] mit 1 kcal pro Kilogramm Körpergewicht pro Stunde angegeben. 1 kcal entspricht 4.187 Joule.

Der Gesamtumsatz ist abhängig von der körperlichen Aktivität und kann anhand des PAL (physical activity level) annähernd ermittelt werden (Abb. A 5.9).

Bei körperlich anstrengender Arbeit benötigt ein Mensch demnach gut das Doppelte seines Grundumsatzes an Energie.

Arbeitsschwere und Freizeitverhalten	PAL	Beispiele
ausschließlich sitzende oder liegende Lebensweise	1,2 - 1,3	immobile, bettlägerige, gebrechliche Menschen
ausschließlich sitzende Tätigkeit mit wenig oder keiner anstrengenden Freizeitaktivität	1,4 - 1,5	Büroangestellte, Feinmechaniker
sitzende Tätigkeit, zeitweilig auch gehend oder stehend, wenig oder keine Freizeitaktivität	1,6 - 1,7	Laboranten, Studierende, Fließbandarbeiter
überwiegend gehende und stehende Arbeit, aktive Freizeitaktivität	1,8 - 1,9	Verkäufer, Kellner, Mechaniker, Handwerker
körperlich anstrengende berufliche Arbeit oder sehr aktive Freizeitaktivität	2,0 - 2,4	Bauarbeiter, Landwirte, Waldarbeiter, Bergarbeiter, Leistungssportler

A 5.9 Physikal Activity Level (PAL) zur Bestimmung des Leistungsumsatzes [149]

Der Energiebedarf eines 80 kg schweren Bauarbeiters – angenommen als Referenzgröße – beträgt demnach:

$$\begin{aligned} \text{Grundumsatz:} & \quad 4.187 \text{ J/h} \times 80 = 334.960 \text{ J/h} \\ \text{Leistungsumsatz:} & \quad \underline{\quad \quad \quad} = 334.960 \text{ J/h} \\ \text{Gesamtumsatz:} & \quad \quad \quad = 669.920 \text{ J/h} \end{aligned}$$

Da der Mensch auch unabhängig von seiner Tätigkeit Energie benötigt, fließt in den Faktor Arbeit nur der Leistungsumsatz ein.

Nimmt man das Gewicht von 80 kg als Durchschnittsgewicht für einen Bauarbeiter an, beträgt die durchschnittliche Leistung nach der Formel von Seite 99:

$$P_p [\text{W}] = \frac{334.960 \text{ J}}{\text{h}} = \frac{334.960 \text{ J}}{3.600 \text{ s}} = 93 \text{ W}$$

Hierbei handelt es sich um eine Bruttoleistung. Der Mensch kommt bei Bewegung ins Schwitzen. Das heißt, ein Teil der Energie wird in Abwärme umgewandelt (die nicht nutzbar ist) und ein weiterer Teil in mechanische Arbeit. In der Sportphysiologie wird das Verhältnis von Muskelarbeit (Leistung) zu Leistungsumsatz (Gesamtumsatz – Ruheumsatz) als Nettowirkungsgrad bezeichnet. Nach Böning, Maassen und Steinach [150] beträgt der intramuskuläre Nettowirkungsgrad (also der Nettowirkungsgrad des isolierten Muskels) ca. 30%. „Bei Ganzkörperbetrachtung ist er für einfache Drehbewegungen frequenzabhängig und erreicht maximal etwa 26%“. Kurzfristige „Speicherung potenzieller, kinetischer und elastischer Energie“ (z. B. in Sehnen oder Bändern) erhöht jedoch den Wirkungsgrad. Das bedeutet: Der Nettowirkungsgrad ist abhängig von der Art der Tätigkeit bzw. Bewegung.

Böning, Maassen und Steinach haben in ihrem Aufsatz die Nettowirkungsgrade verschiedener Sportarten, die mittels Ergometrie<sup>39</sup> und indirekter Kalorimetrie<sup>40</sup> (Messung von Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidabgabe) ermittelt wurden, wie folgt zusammengestellt:

39 Ergometrie kommt vom griechischen *ἔργον* (érgon, deutsch: Arbeit) und *μέτρον* (métron, deutsch: Maß, Maßstab) und bedeutet Arbeitsmessung. Quelle: Wikipedia

40 Die Kalorimetrie bezeichnet die Messung von Wärmemengen, die an biologische, chemische oder physikalische Vorgänge gekoppelt sind. Quelle: Wikipedia.

- Fahrrad (Ausdauer-)fahren 26%
- Treppensteigen 25%
- Gehen 40%
- Laufen 50%
- Rudern 19%

Für körperliche Arbeit am Bau liegen keine Nettowirkungsgrade vor und können mit standardisierten Methoden auch nicht ermittelt werden. Orientiert man sich an den genannten Werten aus dem Sport, kann der Nettowirkungsgrad für die Arbeit von Personen mit rund 30% angenommen werden. Die Nutzleistung von Personen wird wie folgt berechnet:

$$P_{NP} [W] = P_p \times \eta$$

$P_{NP}$  Nutzleistung Personen  
 $\eta$  Wirkungsgrad

Für körperliche Arbeit von als Bauarbeiter referenzierten Personen kann somit folgende Nutzleistung angenommen werden:

$$\begin{aligned} P_{NP} &= 93 \text{ W} \times 30\% \\ &= 27,9 \text{ W} \\ &\underline{\underline{= 27,9 \text{ J/s}}} \end{aligned}$$

#### Arbeit von Maschinen

Die Leistung von Maschinen ist in technischen Datenblättern der Hersteller angegeben. Während bei elektrischen Handgeräten wie Bohrmaschinen und Hand-Elektrohämmern davon ausgegangen werden kann, dass sie in der Regel unter Volllast betrieben werden, verrichtet ein Abbruchbagger unterschiedliche Arbeiten wie z. B. Pulverisieren, Stemmen, Abgreifen oder Schneiden, die jeweils unterschiedliche Auslastungen bewirken.

Für Maschinen kann die Arbeit durch Multiplikation der Leistung mit der benötigten Zeit berechnet werden, wobei die Arbeit für Maschinen üblicherweise in Wattstunden oder Kilowattstunden (statt in Joule) angegeben wird.<sup>41</sup> Die Formel lautet:

$$W_{brutto} [Wh] = P_M [W] \times t [h]$$

$W$  Arbeit  
 $P_M$  Leistung Maschine (brutto = Leistungsaufnahme)  
 $t$  Zeit  
 $[Wh]$  Wattstunde  
 $[h]$  Stunden

Bei elektrischen Handgeräten gibt der Hersteller in der Regel die Leistungsaufnahme in Watt an. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades  $\eta$  ergibt sich die abgegebene Arbeit (netto) wie folgt:

$$W_{netto} [Wh] = P_{NM} [W] \times \eta \times t [h]$$

41 Nach dem internationalen Einheitensystem (SI) ist die offizielle Maßeinheit für Arbeit oder Energie das Joule. In der Praxis, vor allem im Stromsektor, wird aber immer noch die aus der Leistung abgeleitete Einheit Wattstunde oder Kilowattstunde verwendet.

Arbeitsgerät	Abbruchverfahren	Beispielbauteile	Verbrauch [l Diesel]	A 5.10 Kraftstoffbedarf für verschiedene Abbruchverfahren mit entsprechenden Anbaugeräten für einen 40-65 t. Abbruchbagger [152]
Meißel	Stemmen	Fundamente, Bodenplatten aus Stahlbeton	28-30	
Abbruchscherer	Pressschneiden/ Scherschneiden	Wände, Decken und Stützen aus Stahlbeton Wände und Decken aus Massivholz	25-27	
Sortiergreifer oder Tieföffel	Abgreifen, Einreißen/Eindrücken	Holzrahmenbau, Holzfachwerk Mauerwerk aus Ziegel, Kalksandstein, etc.	21-22	
Schrottscherer	Scherschneiden	Stahlbauteile > 20cm Durchmesser	30-32	

Für Maschinen, die nicht ständig in Vollast betrieben werden, z. B. Abbruchbagger, kann ein Durchschnittswert für die Größe Arbeit (brutto) über den durchschnittlichen Kraftstoffbedarf mit folgender Formel annähernd berechnet werden:

$$W_{brutto} [J]^{42} = E_M [l/h] \times H_i [J/l] \times t [h]$$

$E_M$  Kraftstoffbedarf Maschine (chemisch gebundene Energie)

$H_i$  Heizwert

[l/h] Liter pro Stunde

[J/l] Joule pro Liter

Der Kraftstoffbedarf von Abbruchbaggern (Diesel) ist abhängig von der zu verrichtenden Arbeit. Die Fa. Liebherr [151] führt eine kontinuierliche Datenerhebung in Kooperation mit mehreren Abbruchunternehmern durch. Von sechs angefragten Unternehmen war nur ein Unternehmen bereit, der Verfasserin genauere Auskünfte zu erteilen. Die Fa. Reithels-höfer bildet jedoch mit einer Betriebsleistung von insgesamt 3.465 Stunden zumindest einen längerfristig ermittelten Durchschnittsverbrauch gut ab. Der Kraftstoffverbrauch wird digital gemessen und an die Fa. Liebherr übertragen. Zugleich kann über eine Anzeige im Cockpit der aktuelle Kraftstoffverbrauch abgelesen werden. So konnte durch Befragung der Kraftstoffbedarf für verschiedene Abbruchverfahren ermittelt werden (Abb. A 5.10).

Der Gesamtwirkungsgrad von heutigen Abbruchbaggern liegt nach Leifeld [153] in Abhängigkeit vom Lastzyklus ungefähr zwischen 5 und maximal 12%; somit wird nur ein Bruchteil der im Brennstoff enthaltenen Energie tatsächlich in mechanische Leistung umgewandelt. Der niedrige Wirkungsgrad wird hauptsächlich durch den ineffizienten Betrieb des Verbrennungsmotors und die Drosselverluste im Hydrauliksystem verursacht.

Je höher die Maschinenauslastung, desto höher ist der Wirkungsgrad. Beim Stemmen von Stahlbeton beispielsweise erbringt ein Abbruchbagger durch den enormen Krafteinsatz der Hydraulik Höchstleistungen. Der Wirkungsgrad ist hier relativ hoch, da der Dieselmotor unter Vollast noch

42 Die Arbeit ( $W$ ) wird hier in der Einheit Joule (nicht Wattstunden) berechnet, da der Heizwert für Kraftstoff in Joule angegeben wird.

vergleichsweise effektiv arbeiten kann. Bei Arbeit mit relativ geringem Kraftaufwand, z.B. Abgreifen von Bauteilen aus Holz, arbeitet das Gesamtsystem in Teillast. Wegen des ineffizienten Betriebs des Dieselmotors ist der Wirkungsgrad hier entsprechend gering. Da die Leistung von Abbruchmaschinen während der Arbeitsprozesse stark schwankt, können durchschnittliche Wirkungsgrade nur mithilfe von Lastzyklen ermittelt werden. Solche Lastzyklen liegen nicht vor und können im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht erstellt werden. Daher wird Folgendes festgelegt:

Für die Ermittlung von Benchmarks für den Parameter Arbeit wird die Brutto-Arbeit zugrunde gelegt, da sie den effektiven verfahrensspezifischen Aufwand und damit die für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung interessantere Zielgröße darstellt und die Netto-Arbeit für verschiedenste Abbruchmaschinen (oder manuelle Tätigkeiten) nur mithilfe des Wirkungsgrades bestimmt werden könnte, der aber über den Arbeitsprozess stark schwankt. Dies hat zur Konsequenz, dass die Benchmarks im Laufe der Zeit verifiziert werden müssen, da sich die Effizienz von Maschinen in Zukunft voraussichtlich verbessern wird.

Um den Faktor Arbeit bewerten zu können, muss der Zeitaufwand für Personen und Maschinen für diverse Rückbautätigkeiten zusammengestellt werden. Hierfür müssen die bisherigen Recherchen (Forschungsergebnisse von Schultmann und Graubner) ausgewertet und weitere Zeitaufwände empirisch ermittelt werden. Dabei muss die Bruttoleistung der jeweils eingesetzten Maschinen dokumentiert werden, während für die Leistung von Personen die auf Seite 101 genannte durchschnittliche Bruttoleistung zugrunde gelegt werden kann.

Um die Einheiten der Arbeit von Personen und Maschinen zu vereinheitlichen, werden die Einheiten wie folgt umgerechnet:

$$1 \text{ Joule [J]} = 1 \text{ Wattsekunde [Ws]} \\ = 0,0002778 \text{ Wattstunden [Wh]}$$

$$1 \text{ Wattstunde [Wh]} = 3.600 \text{ Wattsekunden [Ws]} \\ = 3.600 \text{ Joule [J]} \\ = 3,6 \text{ Kilojoule [kJ]} \\ = 0,0036 \text{ Megajoule [MJ]}$$

$$1 \text{ Megajoule [MJ]} = 1.000.000 \text{ Joule} \\ = 1.000.000 \text{ Wattsekunden [Ws]} \\ = 277,778 \text{ Wattstunden [Wh]}$$

Die Bruttoleistung von Personen kann demnach wie folgt umgerechnet werden:

$$\emptyset \text{ Leistung Personen } [P_p] = 334.960 \text{ J/h} \\ = 335 \text{ kJ/h} \\ = 0,335 \text{ MJ/h}$$

In Kapitel 6 wird die Arbeit von Personen und Maschinen einheitlich in der SI-Einheit Joule bzw. deren Vielfachem Megajoule [MJ] dargestellt.

Kapitel 6.2 bis 6.4 widmen sich den Ermittlungen des Rückbauaufwands, um daraus Benchmarks für eine Bewertung abzuleiten.

### 5.3.2. Entsorgungskosten und Verwertungserlöse – Faktor Wert

Neben dem Rückbauaufwand bestimmen die Entsorgungskosten bzw. Verwertungserlöse die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus.

Ein Aufwand für die sortenreine Trennung von Materialien ist nur wirtschaftlich, wenn die zurückzugewinnenden Materialien auch einen entsprechenden Wert besitzen. Welcher Wert ist nun entscheidend?

**Der monetäre Materialwert beim Neubau kann nicht herangezogen werden, da ein Bauteil oder Produkt durch Abnutzung an Wert verlieren kann.**

Die Knappheit von Ressourcen spiegelt zwar einen gewissen Wert für ein daraus hergestelltes Material wider, dieser ist jedoch zum einen schwer nachvollziehbar zu messen (s. Ausführungen zum Indikator „Abiotisches Ressourcenpotenzial“ auf Seite 28), zum anderen bestimmen nicht nur die Knappheit, sondern auch weitere Faktoren den Wert eines Materials, z. B. die Verfügbarkeit. Letztere lässt sich nicht immer anhand der Reserven (der wirtschaftlich abbaubaren Ressourcen) messen. So ist z. B. Naturstein prinzipiell kein knappes Gut, jedoch sind die Flächen zum Natursteinabbau begrenzt, da auch der Naturraum geschont werden muss. Anhand der Knappheit lässt sich also der Wert schlecht messen.

Entscheidend ist der Wert der zurückzugewinnenden Stoffe nach dem Rückbau. Dieser kann positiv sein, wenn es sich um Materialien handelt, für die eine **Nachfrage und ein Markt** existiert. So ist auch nach § 6 Abfallrahmenrichtlinie (s. Seite 40) die Nachfrage nach einem Stoff oder Gegenstand oder die Existenz eines Marktes ein Kennzeichen dafür, dass dieser das Ende der Abfalleigenschaft erreicht hat. Für das Material kann dann der Marktwert<sup>43</sup> ermittelt werden (z. B. Schrottpreise für Metalle). Der Wert kann aber auch negativ sein, wenn keine Nachfrage vorhanden ist oder der Aufbereitungsprozess erst zu einem positiven Wert führt. In diesem Fall ist eine Gebühr für die Annahme von Abfällen zu zahlen.

Ökonomisch betrachtet ist ein Wert ein Preis, der den aktuellen Tauschwert in einer monetären Einheit (Währung) ausdrückt. Wenn die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus berücksichtigt werden soll, ist der Tauschwert bei der Übergabe vom Rückbauunternehmen zum Verwerter/Entsorger maßgeblich.

**Es ist zwar nicht absehbar, wie sich die Preise für Entsorgung und Verwertung von der Neubauplanung bis zum Rückbau entwickeln, dennoch ist der Preis für Wertstoffe zum Zeitpunkt der Neubauplanung zumindest ein Anhaltspunkt, der für eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus genutzt werden kann.**

43 Marktwert ist der Wert, der einem Wirtschaftsobjekt auf einem Markt durch den Marktpreis von den Marktteilnehmern beigemessen wird. Quelle: Wikipedia.

A 5.11 Bewertungsparameter mit Maßstäben und Eigenschaften nach Lebenszyklusphasen

Lebenszyklusphase	Parameter	Maßstab/Einheit	Eigenschaft
Pre-Use	Wiederverwendung	Masseanteil in %	Variable
	Material-Recycling Content (MRC) nach Qualitätsstufen	Masseanteil in %	Variable
Post-Use	EoL-Qualitätsstufen	Masseanteile in %	Variable
	Schadstofffreiheit	Grenzwert in %	Ausschlusskriterium
	Sortenreinheit	Störstoffe in %	Ausschlusskriterium
	zerstörungsfreie Lösbarkeit	-	qualifizierendes Kriterium (für Wiederverwendbarkeit)
	Material-Loop Potenzial (MLP)	Masseanteil in %	Koeffizient
	Arbeit	Megajoule [MJ]	Koeffizient
	Wert	Euro [€]	Koeffizient

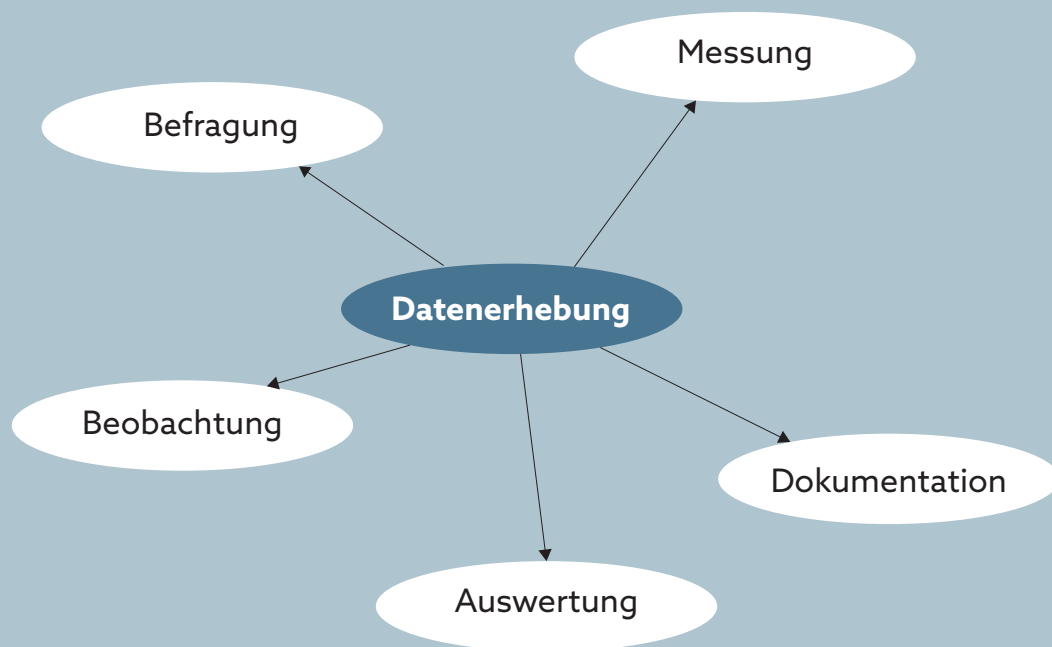
Bisher existieren für Entsorgungspreise von Baureststoffen keine Statistiken. **Die Preise verschiedener Wert- und Abfallstoffe müssen deshalb empirisch ermittelt werden.**

In Kapitel 6.1 wird die Ermittlung von Preisen für Bau- und Abbruchabfälle dargestellt und erläutert.

**Schließlich soll aus den Benchmarks von Arbeit und Wert die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit der die Wertstoffe das jeweils hochwertigste End-of-Life-Szenario erreichen (siehe Kapitel 7.3).**

**In Abb. A 5.11 sind die definierten Parameter noch einmal mit ihren jeweiligen Maßstäben und Einheiten zusammengefasst und nach Lebenszyklusphasen geordnet. Die Eigenschaften bestimmen darüber, wie die Parameter in die Berechnung eingehen (siehe Kapitel 7).**





---

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 Lehbaustoffe <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

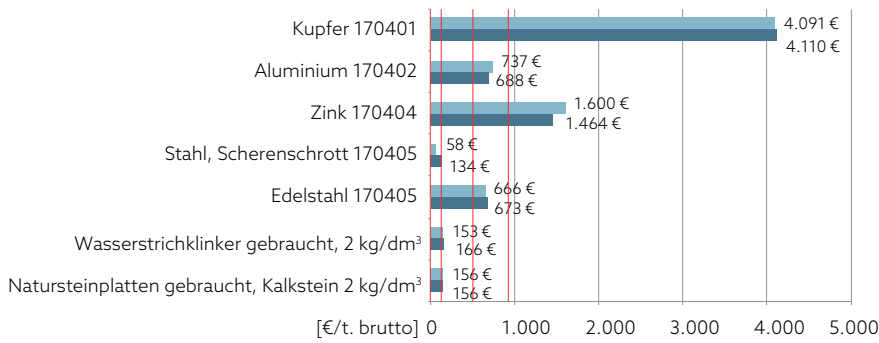
Die Ergebnisse beider Umfragen sind in Abb. A 6.4 grafisch dargestellt. Eine ausführliche tabellarische Aufstellung der Erhebung von 2019 befindet sich in Anlage 1. Extremwerte („Ausreißer“) in einzelnen Wertstoffgruppen blieben bei der Ermittlung des jeweiligen Durchschnittspreises unberücksichtigt.

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].

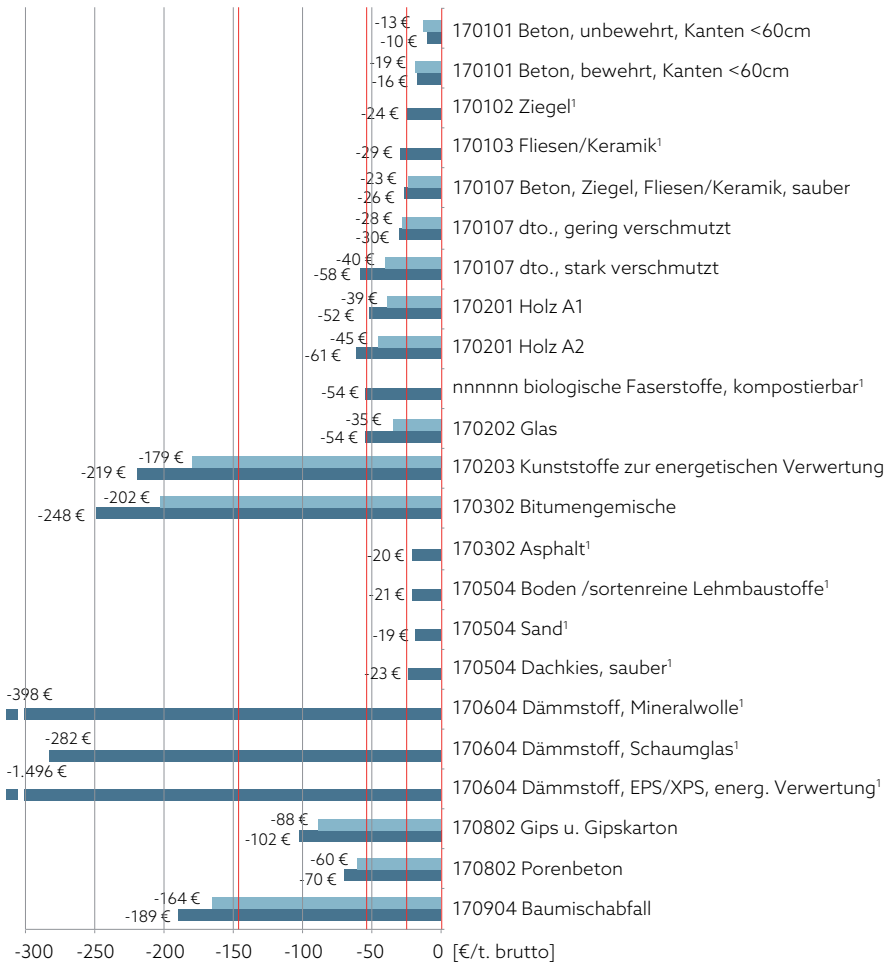


A 6.4 Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-) für Bau- und Abbruchabfälle, bundesweiter Durchschnitt

■ 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				[MJ/m <sup>2</sup> ]
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

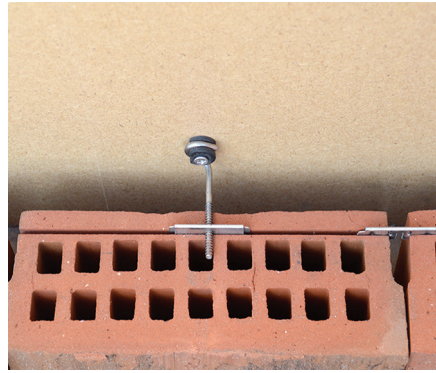
\* aus der Arbeitszeit und der Leistung der Personen gemäß Kapitel 5.3.1 wird erst in der Auswertung auf Seite 129 die Arbeit der Personen in MJ/m<sup>2</sup> berechnet. (s. Abb. A 6.36 und Tabelle in Abb. A 6.38)

\*\* 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-Verschalung (2)  
 A 6.9 leicht demontierbar: Ziegel mit Edelstahlankern befestigt  
 A 6.10 Dokumentation Rückbau und Wert: Ziegel an Dämmebene mit MDF-Verschalung (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 Füge-teilen 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.	<1% 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.	<1% 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.	<1% Kunststoff	-0,01	
	Fest- und Gleitpunktschwert		0,17				n.r.	Edelstahl	0,07	
							n.r.	Aluminium	0,05	
	Alu-Tragprofile	Kunststoffclip- und -Kupplung	0,01	1,4	-	-	n.r.	ja	Kunststoff	<0,00
			1,04		Bohr-		n.r.	-	Aluminium	0,77
	Nieten, Aluminium	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.	<1% Kunststoff	-0,01	
	Fest- und Gleitpunktschwert		0,17				n.r.	Edelstahl	0,07	
							n.r.	Aluminium	0,05	
	Alu-Tragprofile	Kunststoffclip- und -Kupplung	0,01	1,4	-	-	n.r.	ja	Kunststoff	<0,00
			1,04		Bohr-		n.r.	-	Aluminium	0,77
	Nieten, Aluminium	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.	<1% 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	
		Dübel	0,07	4,2	Akkuschr.	0,11	n.r.	<1% Kunststoff	-0,01	
	Rasterklickschiene		1,46		Bohr-		n.r.	Aluminium	1,07	
		Nieten, Aluminium	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				[MJ/m <sup>2</sup> ]
Dämmung	Mineralfaserplatte		11,50		Gabel-	n.r.	-	Porenbeton	-0,69
		miner. Leichtmörtel	3,85	0,06	stapler	0,06	-	Porenbeton	-0,23
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

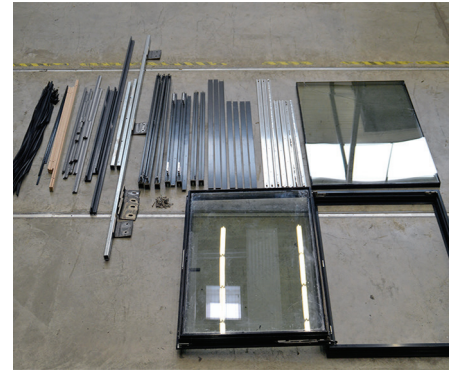
A 6.19

- 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	-	-	-	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 Aluminiumeinlage.

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> ]				
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
Dämmung	Holzweichfaser, 2-lagig mit Gefälle	lose verlegt	35,20	0,6	-	-	ja	-	Holz A2	-1,58
Dampfsperre	Bitumenbahn mit Aluminiumeinlage	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).

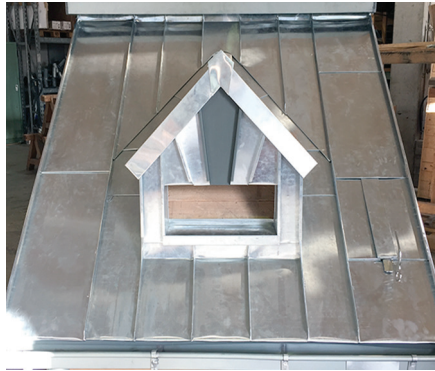
Bauteilschicht	Material	Verbindungsmittel	Masse	Arbeitszeit	Maschinenaufwand		Zerstörung	Rest-anhaftung	Wertstoff	Wert
			[kg/m <sup>2</sup> ]	[Min./m <sup>2</sup> ]	Maschine	[MJ/m <sup>2</sup> ]				
Dachdeckung	Schieferplatten		54,05				25%	-	Wiederverwendung	-0,32*
		Nägeln	0,26	6,8	-	-	n.r.	-	Edelstahl	0,17
Unterdeckbahn	PP-Vlies mit PEEE-Membran	geklammert	0,19	0,3	-	-	ja	-	Kunststoffgemisch	-0,44
Bepunktung	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, Scherenschra.	>0,00
			77,74	11,0		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: Stahlfalzdeckung 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> ]
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.

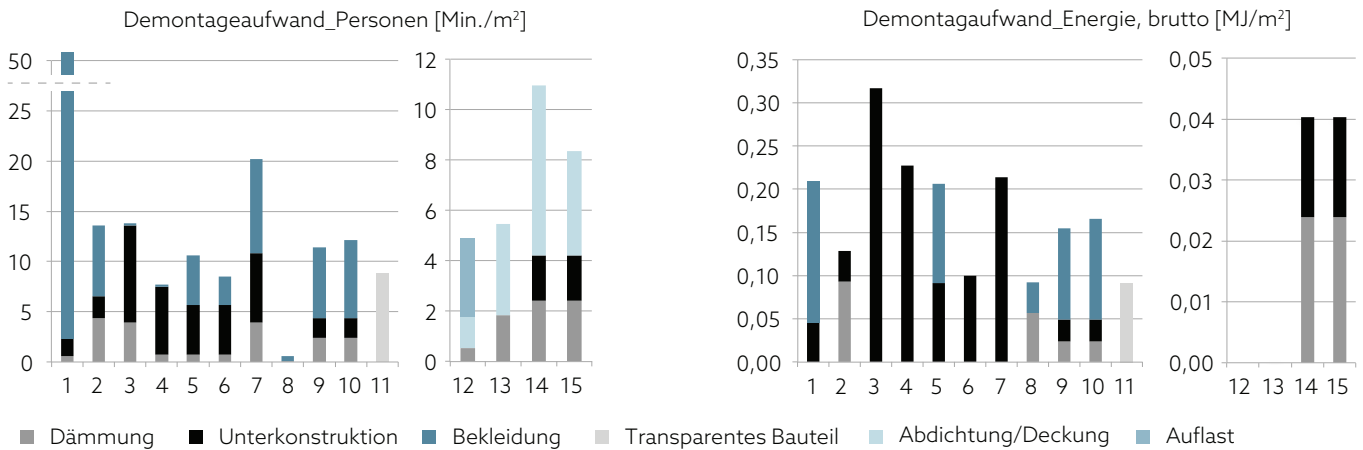
#### Wirtschaftliche Ebene

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.

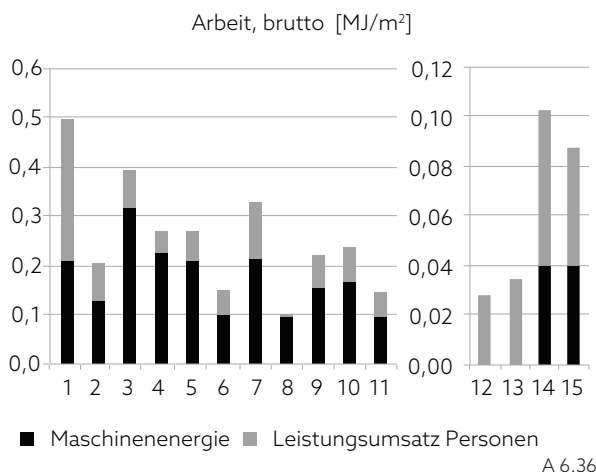
Beispiel: Für die Demontage der Klinkerfassade mit Mineralwolle (Nr. 1) ergibt sich gemäß Dokumentation aus Abb. A 6.7 folgende Arbeit:

Arbeitszeit	=	50,6 Min./m²	△	0,85h/m²
Ø Leistung Personen [P <sub>p</sub> ]	=	0,335 MJ/h		
Arbeit Personen [W <sub>p</sub> ]	=	0,335 MJ/h × 0,85h/m²		
	=	0,285 MJ/m²		
zzgl. Arbeit Maschinen [W <sub>M</sub> ]	+	0,210 MJ/m²		
Gesamt Arbeit [W]	=	0,495 MJ/m²		

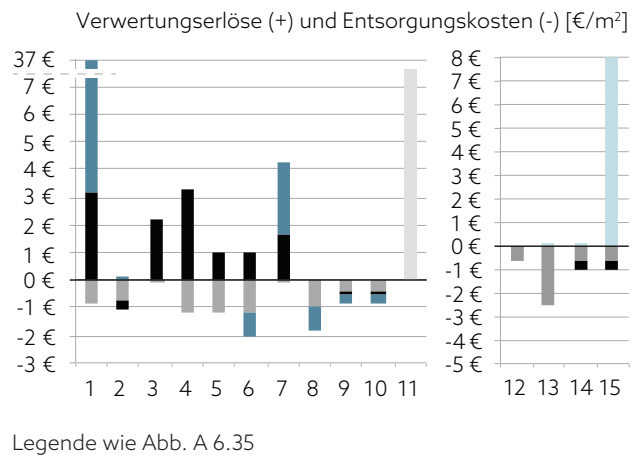
Abb. A 6.36 zeigt den Parameter Arbeit für Personen und Maschinen zur Demontage der untersuchten Fassaden- und Dachbekleidungen bezogen auf 1 m² Bauteilfläche.

*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

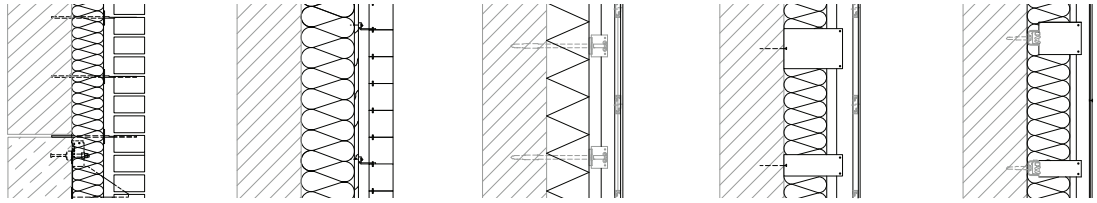
#### Fassaden:

- 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

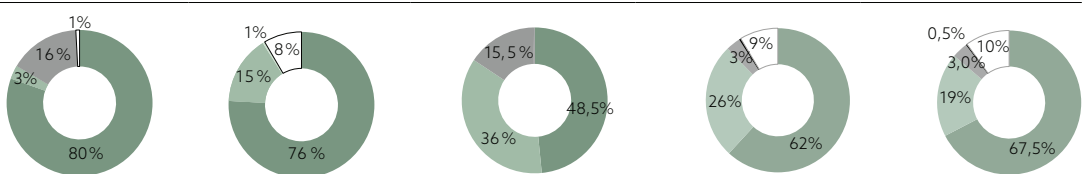
## Fassaden



Nr.	1	2	3	4	5
<b>Aufbau</b>	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.

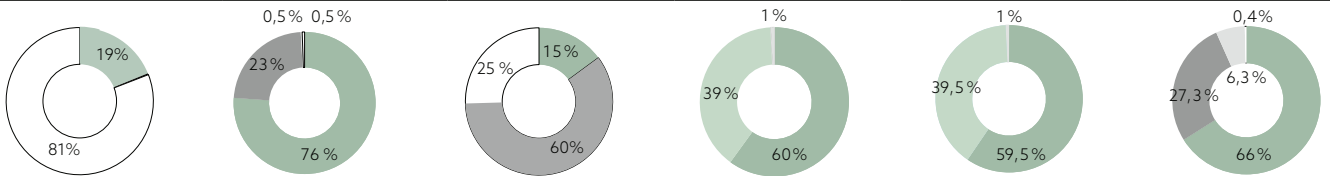
### Qualitätsstufen des Recyclings

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

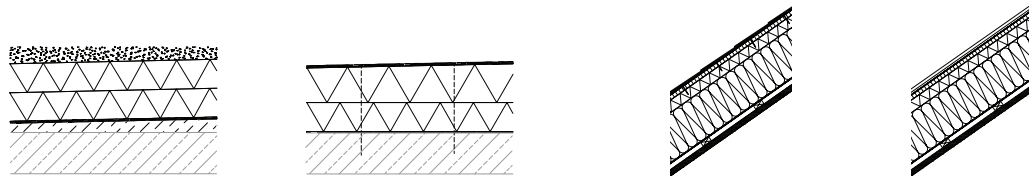
\* Die tragenden Elemente sind in Zeichnung und Text nur grau dargestellt, da sie in den Daten nicht enthalten sind.

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 Mineralfaserplatte 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*

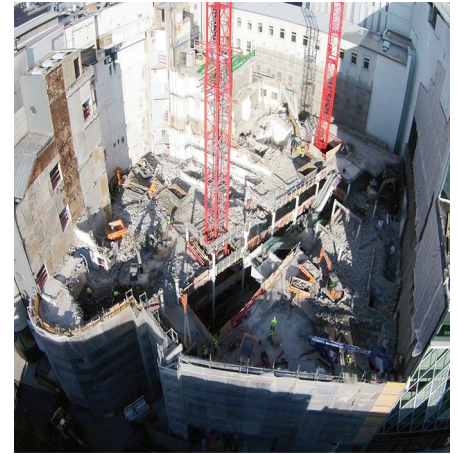
Die Entkernung war nicht wegen der Materialtrennung, sondern wegen schwieriger vertikaler Entsorgungswege im Inneren problematisch: Rolltreppen konnten zur Entsorgung nicht genutzt werden, Lastenaufzüge waren nur beschränkt tragfähig. Während der Entkernung wurden die ausgebauten Materialien deshalb 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, abgehängte 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 Schneidverfahren 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 „Zeilgalerie“ 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 Zeilgalerie: 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>	Personen	Arbeitszeit	Arbeit (W)	Maschine	Kraftstoff- verbrauch		Heizwert	Arbeit (W)	
				[m <sup>2</sup> ]	[n]	[Min./P.]	[Min./m <sup>2</sup> ]		[MJ/m <sup>2</sup> ]	[l]	[l/m <sup>2</sup> ]	[MJ/l]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
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 Waldkraiburg/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
  - d Rückbau 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

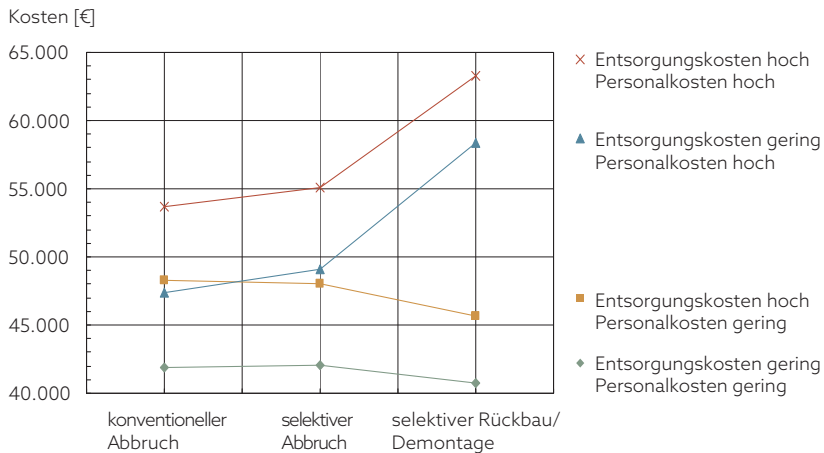
Die Aufstellung beinhaltet zwar nur beispielhafte selektive Rückbauarbeiten, dennoch kann anhand der Dokumentation gezeigt werden, dass der in Kapitel 5.3.1 definierte Faktor Arbeit in der Praxis messbar ist.

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:

$$\begin{aligned} t_R &= 0,2 \text{ m} \times 0,06 \text{ h/m}^3 \\ &= 0,012 \text{ h/m}^2 \\ &\underline{\underline{= 43,2 \text{ s/m}^2}} \quad (0,012 \text{ h/m}^2 \times 3.600 \text{ s/h}) \end{aligned}$$

Bauteilgruppe	Bauteil	Material	Stärke bzw. Länge	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Abbruchverfahren	Dauer-kennwert [h/m <sup>3</sup> ]	Dauer [h]	Arbeit Personen (brutto) [MJ]	Kraft-stoff-bedarf (Diesel) [l/h]	Arbeit Maschine (brutto) [MJ]
(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:

$$t_R = 0,6 \text{ m} \times 0,04 \text{ h/m}^3$$

$$= 0,024 \text{ h/m}^2$$

$$\underline{\underline{\leq 86,4 \text{ s/m}^2}} \quad (0,024 \text{ h/m}^2 \times 3.600 \text{ s/h})$$

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	Bruttoarbeit Personen
				[Min./m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>A Primär- und Sekundärkonstruktion, flächig</b>					
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	
				Arbeits- zeit	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]	Kraftstoff- bedarf [l/h]	Einsatzzeit [min/m²]	Kraftstoff Bedarf [l/m²]	Heizwert [MJ/l]	Arbeit Maschinen [MJ/m²]						
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/m²]	[l/m²]		[MJ/m²]	[MJ/m²]					
-						-	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 kaltselfstklebend 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 kaltselfstklebend 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, kaltselfstklebend 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:

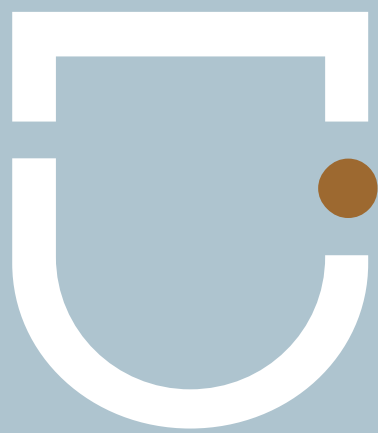
Auswertung von Daten anderer Wissenschaftler  
eigene Untersuchungen auf Rückbaustellen  
eigene Untersuchungen in Versuchsständen

A  
B  
V

Maschine	Maschinenaufwand Rückbau					Arbeit (W) gesamt	1. Quintil	2. Quintil	3. Quintil	4. Quintil	Einordnung Demontage- aufwand	ggf. Korrektur
	Leistung, brutto	Kraftstoff- bedarf	Einsatzzeit	Kraftstoff- bedarf	Arbeit Maschinen							
	[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 der Bauteile 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

---

## 7. Berechnungsmethode zur systematischen Bewertung und Darstellung der Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen

Dieses Kapitel beschreibt die „DNA“ des Urban Mining Index.

Zunächst werden Ebene und Basis der Berechnung erläutert.

Die in Kapitel 5 definierten Parameter werden als Variable und Koeffizienten beschrieben, mit denen das Loop-Potenzial und das Closed-Loop-Potenzial in einer Formel berechnet werden kann.

Anhand von studentischen Arbeiten wird die Methodik überprüft und verifiziert bzw. angepasst.

Schließlich wird die Berechnungsmethodik in ein Tabellenwerkzeug zur systematischen Berechnung und Bewertung der Kreislaufpotenziale auf Bauteil- und Gebäudeebene überführt. Die Ergebnisse werden grafisch dargestellt, damit sie leicht ablesbar und verständlich sind.

7.1.	Ebenen und Basis der Berechnung	156
7.2.	Abbildung der Qualitätsstufen als Variable	160
7.3.	Koeffizienten zur Berechnung der Kreislaufpotenziale	162
7.4.	Überprüfung der Methodik und Verifizierung	166
7.5.	Formeln zur Berechnung der Kreislaufpotenziale	172
7.6.	Entwicklung eines Tabellenwerkzeugs zur systematischen Berechnung und Bewertung der Kreislaufpotenziale	175

## 7.1. Ebenen und Basis der Berechnung

In Kapitel 2.4 wurden die grundsätzlichen Systemgrenzen definiert. Innerhalb dieser Systemgrenzen müssen nun die Ebenen zur Berechnung der Kreislaufpotenziale festgelegt werden. Außerdem muss eine Basis definiert werden, die als Größe für vergleichende Analysen dienen kann.

### 7.1.1. Ebenen der Berechnung innerhalb der Gebäudestruktur

Die Nachnutzung eines Bauwerks kann auf verschiedenen Ebenen bewertet werden. Abgesehen von der räumlichen Ebene, bei der die Architekturqualität und die Umnutzungsfähigkeit zur Weiternutzung eines Bauwerks im Fokus steht, lässt sich die Kreislauffähigkeit auf konstruktiver und materieller Ebene abbilden.

Abbildung A 7.2 zeigt die Struktur eines Bauwerks in verschiedenen Ebenen. Die Begriffe „Bauelement“ und „Bauteil“ sind in keiner Norm definiert und werden von den Akteuren in der Baubranche unterschiedlich genutzt und teilweise synonym verwendet. Während DGNB und BNB Bauteile nach Kostengruppen auf dritter Ebene gemäß DIN 276 gliedern, wird z. B. nach deutscher Energieeinsparverordnung (EnEV) unter „Bauteil“ der gesamte wärmeübertragende Schichtaufbau von Hüllflächenbauteilen wie Außenwänden und Dächern verstanden.

Im Folgenden werden die Begriffe für diese Arbeit definiert und es wird erläutert, welche Rollen die Ebenen in der Bewertung spielen.

#### *Rohstoff-Ebene*

Im Urban Mining Index ist die Rohstoff-Ebene die unterste Ebene der Betrachtung. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen sowie zwischen (in menschlichen Zeiträumen) erneuerbaren und nicht erneuerbaren Rohstoffen.

Im Sinne des zirkulären Bauens gehen in das Kreislaufpotenzial Pre-Use folgende Rohstoffe ein

- erneuerbare Primärrohstoffe
- Sekundärrohstoffe (erneuerbar/nicht erneuerbar)

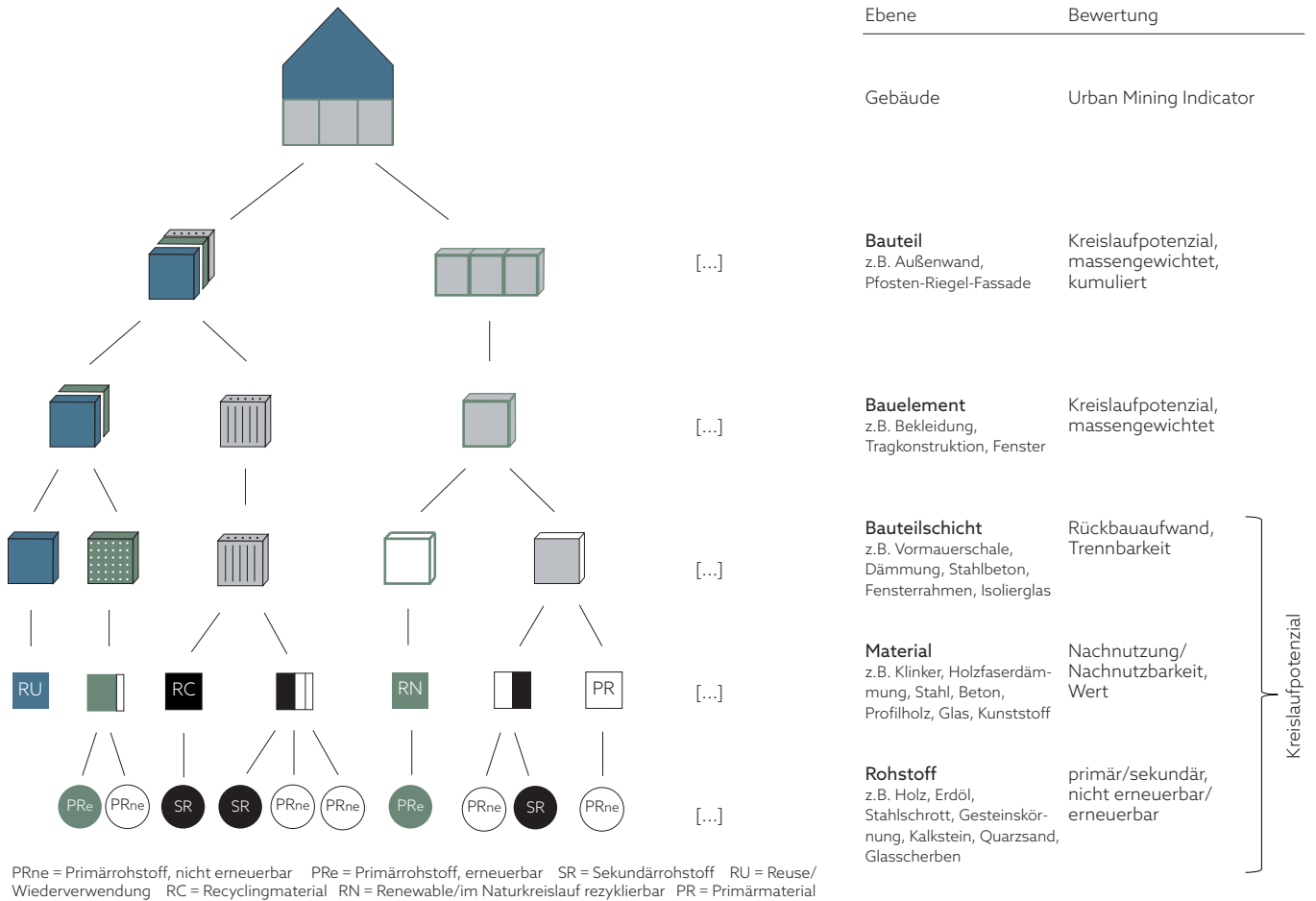
Der Einsatz nicht erneuerbarer Primärrohstoffe trägt dagegen nicht zum Schließen von Kreisläufen bei.

Für die Post-Use-Phase ist entscheidend, ob nicht erneuerbare Rohstoffe entweder im Ganzen wiederverwendet oder zu Sekundärrohstoffen verarbeitet werden können und ob erneuerbare Rohstoffe nachhaltig nachwachsen.

#### *Material-Ebene*

Materialien im Sinne dieser Arbeit sind Baumaterialien, die aus primären oder sekundären Rohstoffen hergestellt werden. Ein Material kann aus einem einzigen Rohstoff bestehen (z.B. Massivholz) oder aus mehreren Rohstoffen (z.B. Beton).

**Auf der Material-Ebene werden die Massen und der Anteil erneuerbarer oder sekundärer Rohstoffe berechnet und der Verbleib des Materials am Ende der Nutzungsdauer berücksichtigt.** Die Material-Ebene ist in



Kreislaufpotenzial

A 7.2

dieser Arbeit die wichtigste Ebene, da übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist, Materialien ressourcenschonend in möglichst geschlossenen Kreisläufen zu halten.

Auf der Materialebene sind folgende Parameter entscheidend für das Berechnungsergebnis (vgl. Abb. A 5.11, Seite 106):

- Pre-Use            Wiederverwendung  
                      Material-Recycling-Content (MRC) nach Qualitätsstufen
- Post-Use            End-of-Life Qualitätsstufen  
                      Schadstofffreiheit  
                      Material-Loop-Potenzial (MLP)  
                      Wert

*Ebene der Bauteilschicht*

Im Regelfall besteht eine Bauteilschicht aus einem Material, das aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften eine bestimmte Funktion erfüllt (z. B. Zinkblech als Witterungsschutz). Eine Bauteilschicht kann aber auch aus mehreren Materialien, sogenannten Verbundmaterialien bestehen (z. B. Stahlbeton). Entscheidend ist der Aufwand für den Rückbau und die sortenreine Trennung, berechnet mit dem Faktor Arbeit.

**Auf der Ebene der Bauteilschicht wird der Rückbauaufwand und die Trennbarkeit bewertet und das Kreislaufpotenzial ausgewiesen.** Sofern eine Bauteilschicht aus nur einem Material besteht, kann das Kreislaufpotenzial auch auf Materialebene ausgewiesen werden.

A 7.2 Ebenen der Gebäudestruktur mit Bewertungsgrundlagen – am Beispiel einer Außenwand aus Stahlbeton mit Holzfaserdämmung und wiederverwendeten Klinkern sowie einer Pfosten-Riegel-Fassade (schematische Darstellung ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

### *Bauelement-Ebene*

Als Bauelement werden in dieser Arbeit Baukonstruktionen gemäß dritter Ebene nach DIN 276 definiert.

Ein Bauelement besteht in der Regel aus mehreren Schichten, kann aber im Einzelfall auch nur aus einer Schicht oder einem Material bestehen (Monomaterialität). So besteht z.B. ein Deckenbelag oft aus den Schichten Trittschalldämmung, Trennlage, Estrich und Oberboden. Ein Gussasphaltestrich kann alle Funktionen in sich vereinen, sofern die Schallschutzanforderungen dies zulassen. Insofern sind in der Praxis die Grenzen für die Zuordnung des Rückbauaufwands und die sortenreine Trennung zwischen Bauteilschichten und Bauelement fließend.

**Auf Bauelement-Ebene können die Kreislaufpotenziale verschiedener Konstruktionen verglichen werden, während dies auf Ebene der Bauteilschicht nicht sinnvoll ist, weil der Aufbau der Schichten oft voneinander abhängt** (z.B. bei WDVS oder notwendiger Unterkonstruktion).

Für den Vergleich werden die Massen der Materialien, die jeweils in das Closed-Loop-Potenzial und das Loop-Potenzial der einzelnen Schichten eingehen, addiert und in Bezug zur gesamten Masse des Bauelements gesetzt.

### *Bauteil-Ebene*

Ein Bauteil ist ein raumbegrenzendes flächiges Bauteil mit allen dazugehörigen Schichten, wie z. B. eine einzelne Bodenplatte, eine Außenwand, eine Innenwand, eine Decke oder ein Dach. Transparente raumbegrenzende Bauteile wie Fenster oder Pfosten-Riegel-Fassaden bilden jeweils eigene Bauteile. Mehrere Bauteile mit gleicher Funktion aber unterschiedlichem Aufbau bilden eine Bauteilgruppe. So können in einem Gebäude – je nach Anforderung der jeweiligen Räume – Decken mit verschiedenem Aufbau vorkommen. **Auf Bauteil-Ebene können also verschiedene Bauteile hinsichtlich ihres Kreislaufpotenzials verglichen werden.**

Für Bauteile wird das Kreislaufpotenzial kumuliert ausgewiesen, also aufaddiert nach Massen gewichtet (siehe Beispiele in Kapitel 8 und 9.2).

### *Gebäude-Ebene*

Die Gebäude-Ebene ist die höchste Ebene der Berechnung. Um die Bewertung in ein 100-Punkte-System zu überführen (vgl. Zielformulierung in Kapitel 1.4.8), werden das Closed-Loop-Potenzial und das Loop-Potenzial sowie die Pre- und Post-Use-Phase gewichtet. Das Ergebnis ist der Urban Mining Indicator des Bauwerks (s. Kapitel 9.3).

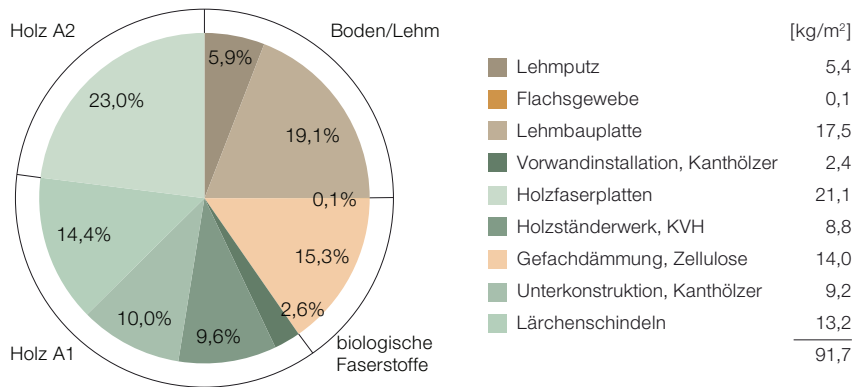
## **7.1.2. Die Masse als Basis der Berechnungen**

Die Basis zur Berechnung der Kreislaufpotenziale ist die Masse der eingesetzten Materialien und der daraus entstehenden Abfälle.

### *Pre-Use Phase*

Für die Pre-Use-Phase ist die Masse der im Lebenszyklus eingesetzten Materialien maßgeblich. Auf der Ebene der Bauteilschicht werden die Massen für einen Quadratmeter Bauteilfläche ermittelt.

**Die Einheit der Berechnung ist damit Masse/m<sup>2</sup>. Diese Einheit ermög-**



A 7.3 Wertstoffe einer beispielhaften Außenwandkonstruktion (= Bauteilebene; Anteile nach Massen in %)

**licht es, in frühen Planungsstadien verschiedene Konstruktionen auf einfache Weise miteinander zu vergleichen, ohne die Gesamtflächen berechnen zu müssen.** Nicht flächige Materialien werden auf einen Quadratmeter Bauteilfläche umgerechnet. So wird z.B. für eine Unterkonstruktion aus Aluminium- oder Holzprofilen die Masse der Unterkonstruktion für die gesamte Fläche einer durchschnittlich großen Wand berechnet und dann durch die Größe der Wandfläche geteilt.

#### Use-Phase

**Sofern unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Nutzungsdauer ein Austausch im Lebenszyklus erforderlich ist, werden die Massen entsprechend der Austauschhäufigkeit multipliziert.**

#### Post-Use Phase

Für die Post-Use-Phase ist die Masse der im Lebenszyklus anfallenden Abfälle und der daraus zu gewinnenden Wertstoffe maßgeblich. Auf Basis der Massenermittlung für den Materialeinsatz werden die beim Rückbau zu erwartenden Wertstoffe ermittelt (s. Beispiel in Abb. A 7.3). Hierfür wird jedem Material einer Bauteilschicht mithilfe der in Kapitel 5.1, Abb. A 5.4 dargestellten Tabelle eine Wertstofffraktion zugeordnet. In die Wertstoffermittlung fließen nur Abfälle ein, die die Ausschlusskriterien „Schadstofffreiheit“ und „Sortenreinheit“ erfüllen (siehe Kapitel 5.1.2 und 5.2.2). Materialien, die keiner Wertstofffraktion zugeordnet werden können oder die die Ausschlusskriterien nicht erfüllen, sind Abfälle, die zu beseitigen sind und damit kein Kreislaufpotenzial aufweisen.

Auf Basis der ermittelten Massen an Materialien und Wertstoffen werden die Kreislaufpotenziale unter Anwendung der in Kapitel 5 definierten Variablen und Koeffizienten berechnet, um die Qualitätsstufen und den Einfluss des Rückbaus abzubilden. Wie dies geschieht, wird in den folgenden Kapiteln 7.2 und 7.3 erläutert.

## 7.2. Abbildung der Qualitätsstufen als Variable

Ziel dieser Arbeit ist die Abbildung der Kreislaufpotenziale nach Qualitätsstufen. Hier werden die Qualitätsstufen nun als Variable (unbekannte Größe) definiert. Sie werden in zwei Kreisdiagrammen – den Loops – farblich dargestellt und für die Berechnung der jeweiligen Massenanteile mit Formelzeichen hinterlegt (s. schematische Darstellung in Abb. A 7.4).

### 7.2.1. Die Loops

Der linke Loop verdeutlicht den Grad der Schließung von Kreisläufen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen/Rezyklaten oder nachwachsenden Rohstoffen in der Herstellung der Konstruktion, also vor der Nutzung (Pre-Use).

Der rechte Loop gibt Auskunft über den prognostizierten Grad der Schließung von Kreisläufen am Ende der Nutzungsdauer (Post-Use).

**Der Post-Use-Anteil wird ermittelt unter Berücksichtigung der Fügung bzw. der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus sowie des materialspezifischen Recyclingpotenzials. Hierfür werden die Wertstoffe mit dem Aufwand für ihre Rückgewinnung, ihrem monetären Wert und ihrem Material-Loop-Potenzial in Beziehung gesetzt** (s. Kapitel 7.3).

### 7.2.2. Differenzierung zwischen Loop- und Closed-Loop-Potenzial

Loop- und Closed-Loop-Potenzial unterscheiden sich hinsichtlich der abgebildeten Qualitätsstufen. Diese wurden bereits in Kapitel 5.1 auf Seite 90 als Parameter definiert und werden nun differenzierter betrachtet.

#### *Closed-Loop-Potenzial*

In das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use fließen alle Massenanteile sekundärer Rohstoffe und alle Massenanteile erneuerbarer Rohstoffe ein.

In das Closed-Loop-Potenzial Post-Use fließen alle Massenanteile von Bauprodukten oder Materialien ein, die nach dem Rückbau wiederverwendbar oder wiederverwertbar und damit qualitativ auf Ausgangsniveau nachnutzbar sind.

#### *Loop-Potenzial*

In das Loop-Potenzial Post-Use fließen über den Closed-Loop-Anteil hinaus auch alle Massenanteile von Materialien ein, die nach dem Rückbau stofflich weiterverwertbar sind und somit den geschlossenen Produktionskreislauf verlassen, um in qualitativ niedrigeren Produktionskreisläufen eingesetzt zu werden, sowie energetisch verwertbare Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen.

Nicht erneuerbare Primärrohstoffe und Abfälle zur Beseitigung sowie nur energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen fließen nicht in die Kreislaufpotenziale ein, da sie dem linearen Wirtschaftssystem zugeordnet werden. Die Massenanteile werden deshalb in den grafischen Loops als weiße Fläche dargestellt.

Qualitätsstufen/Variable	Formelzeichen	Kreislaufpotenzial	Loops
<b>Pre-Use</b> <input checked="" type="checkbox"/> Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials) <input checked="" type="checkbox"/> nachwachsende Rohstoffe (renewable materials) <input type="checkbox"/> (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Ressources, not renewable))	MRC-T MRC-R (PR)	CLP CLP -	
<b>Post-Use</b> <input checked="" type="checkbox"/> wiederverwendbare Bauelemente/Bauprodukte (reusables) <input checked="" type="checkbox"/> wiederverwertbare Baustoffe (recyclables) <input checked="" type="checkbox"/> weiterverwertbare Materialien (downcyclables) <input checked="" type="checkbox"/> energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (energetically usables, renewable) <input type="checkbox"/> energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil) <input type="checkbox"/> Abfälle zur Beseitigung/Deponierung (disposal)	ru rc dc enr  enf d	CLP CLP LP LP  - -	

A 7.4 Qualitätsstufen als Variable zur Bewertung der Kreislaufpotenziale (vor der Verifizierung), schematische Darstellung

### 7.2.3. Quellen für die Zuordnung der Qualitätsstufen

Für die Pre-Use-Phase kann der Anteil an rezyklierten oder nachwachsenden Rohstoffen als „Material-Recycling-Content – MRC“ für diverse Baumaterialien dem Atlas Recycling entnommen werden (s. Kapitel 5.1.3). Für die Post-Use-Phase wird jedem Wertstoff anhand der in Kapitel 5.1, Abb. A 5.4 dargestellten Tabelle ein hochwertiges und ein übliches End-of-Life-Szenario (zwei Qualitätsstufen) zugewiesen. Ob ein Material das hochwertige EoL-Szenario erreicht, ist abhängig vom Rückbauverfahren bzw. von der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus. Hier kommen nun die Faktoren für die Koeffizienten Wert und Arbeit ins Spiel.

### 7.3. Koeffizienten zur Berechnung der Kreislaufpotenziale

**Die Koeffizienten dienen zur Prognose der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Wertstoff nach dem Rückbau das jeweils hochwertigste End-of-Life-Szenario erreicht. Sie sind Faktoren, mit denen die Variablen in einer Gleichung (Formel) multipliziert werden.**

Zu den Koeffizienten gehören die Parameter Wert, Arbeit und Material-Loop-Potenzial. Letzteres ist ein materialspezifischer Faktor, der in Kapitel 5.1.3 auf Seite 94 beschrieben ist und aus dem Atlas Recycling für diverse Baumaterialien übernommen wird. Für die Parameter Wert und Arbeit müssen die Faktoren festgelegt werden.

#### 7.3.1. Faktoren für den Parameter Wert

Für den Parameter Wert wurde in Kapitel 6.1.3 anhand von Benchmarks eine Skala aufgestellt. Theoretisch könnte der Faktor für jeden Wertstoff spezifisch durch Interpolation des jeweiligen Preises zwischen den Werten auf der Skala ermittelt werden. Dies täuscht jedoch eine Genauigkeit vor, die nicht vorhanden und auch nicht beabsichtigt ist. Die Faktoren für den Parameter Wert dienen lediglich der Prognose der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Material aufgrund seiner Werthaltigkeit nach der Nutzung zurückgewonnen wird.

Materialien mit einem Nullwert und leicht positiven Wert erhalten den Faktor 1,0. Es kann davon ausgegangen werden, dass solche Materialien vollständig in den Kreislauf zurückfließen, da für ihre Entsorgung keine Kosten entstehen. Ist ein Material besonders wertvoll, ist die Wahrscheinlichkeit der Nachnutzung ohne Qualitätsverlust entsprechend hoch, weshalb der Faktor in Zehnteln auf bis zu 1,3 ansteigt. Ein Faktor > 1,0 kann somit einen ggf. erhöhten Rückbauaufwand ausgleichen. Dies entspricht der Praxis, da Abbruchunternehmer für Wertstoffe, mit denen ein hoher Erlös erzielt werden kann (z. B. Kupfer), einen höheren Rückbauaufwand in Kauf nehmen. Je höher dagegen die Kosten für die Entsorgung, desto geringer ist der Faktor für den Parameter Wert, da die Wahrscheinlichkeit eines hochwertigen Recyclings mit zunehmenden Kosten abnimmt. Die Faktoren für den Parameter Wert ( $f_v$ ) werden wie folgt festgelegt:

	Preis	Bewertung	Faktor ( $f_v$ )
Erlöse	880 €/t.	äußerst positiv	1,3
	420 €/t.	sehr hoch positiv	1,2
	150 €/t.	hoch positiv	1,1
	0 €/t.	leicht positiv	1,0
Kosten	-23 €/t.	leicht negativ	0,9
	-54 €/t.	hoch negativ	0,8
	-146 €/t.	sehr hoch negativ	0,7
		äußerst negativ	0,6

Das Produkt aus den Faktoren Wert und Arbeit bildet den Faktor für die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus. Das Produkt kann maximal 1,0 betragen, da nicht mehr als 100% Material zurückgewonnen werden kann.

**7.3.2. Faktoren für den Parameter Arbeit**

Für den Parameter Arbeit wurden in Kapitel 6 anhand des Bauteilkatalogs (Kapitel 6.5.2) mehrere Skalen nach Funktion der Bauteile/Bauelemente aufgestellt. Der Arbeitsaufwand für den selektiven Rückbau wurde jeweils pro m<sup>2</sup> Bauteilfläche auf einer fünfstufigen Skala eingeordnet. Ist der Aufwand für den Rückbau einer Bauteilschicht und die sortenreine Trennung der Materialien sehr gering, so wird die Nachnutzung dadurch nicht eingeschränkt. Der geringe Arbeitsaufwand erhält deshalb den Faktor 1,0. Mit steigendem Arbeitsaufwand sinkt die Wahrscheinlichkeit einer sortenreinen Rückgewinnung, weshalb der Faktor in Zehntelschritten bis auf 0,6 fällt.

Die Faktoren für den Parameter Arbeit ( $f_w$ ) werden wie folgt festgelegt:

Arbeit [MJ/m <sup>2</sup> ]	Bewertung	Faktor ( $f_w$ )
≤ 1. Quintil	sehr gering	1,0
≤ 2. Quintil	gering	0,9
≤ 3. Quintil	mittel	0,8
≤ 4. Quintil	hoch	0,7
> 4. Quintil	sehr hoch	0,6

**7.3.3. Beispiel zur Anwendung der Koeffizienten für die Post-Use-Phase**

Anhand eines Beispiels soll zunächst nur die Anwendung der Koeffizienten erläutert werden. (Die ausführlichen Formeln folgen in Kapitel 7.5.) Als Beispiel dient die 50-cm-Bodenplatte aus wasserundurchlässigem Stahlbeton aus dem Bauteilkatalog in Kapitel 6.5.

*1. Schritt: Massenberechnung*

Der Materialeinsatz für 1 m<sup>2</sup> Bodenplatte beträgt:

- 1.232 kg Beton
- 115 kg Stahl
- 1.347 kg gesamt

*2. Schritt: Zuweisung EoL-Szenarien*

Ist die Bodenplatte nicht mit einer verklebten Abdichtung oder sonstigen Fremdstoffen verunreinigt, können die Materialien sortenrein zurückgewonnen werden. Anhand der in Kapitel 5.1, Abb. A 5.4 dargestellten Tabelle werden den Wertstoffen folgende EoL-Szenarien zugewiesen:

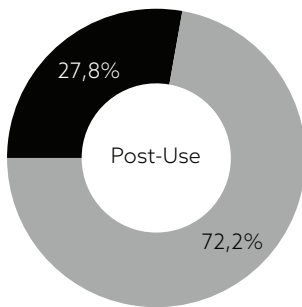
	hochwertiges EoL-Szenario selektiver Rückbau (sd)	übliches EoL-Szenario selektiver Abbruch (ud)
• Beton	Recycling	Downcycling
• Stahl	Recycling	Recycling

*3. Schritt: Zuweisung der Faktoren für den Parameter Wert*

- Beton (mit Bewehrungsresten): -16,45 €/t leicht negativ, Faktor 0,9
- Stahl (Scherenschrott): +134,08 €/t leicht positiv, Faktor 1,0

*4. Schritt: Zuweisung des Faktors für den Parameter Arbeit*

Der Arbeitsaufwand für den Rückbau der Bauteilschicht wird laut Bauteilkatalog als sehr hoch eingeschätzt -> Faktor 0,6.



■ wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)  
 ■ weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)

A 7.5 Qualitätsstufen Post-Use der WU-Beton-Bodenplatte aus der beispielhaften Berechnung Kapitel 7.3.3

### 5. Schritt: Material-Loop-Potenzial

Das Material-Loop-Potenzial der Materialien beträgt laut Atlas Recycling:

Beton: 39%  
 Konstruktionsstahl: 100%

### 6. Schritt: Quantifizierung der Qualitätsstufen Post-Use

• Beton:	Masse/m <sup>2</sup>	Faktor Wert	Faktor Arbeit	MLP
rc (recyclables)	= 1.232 kg	* 0,9	* 0,6	* 0,39
	= 259,5 kg			
	Δ 21,1%	(259,5 kg / 1.232 kg * 100)		

Die Wahrscheinlichkeit, mit der das Material Beton das hochwertige EoL-Szenario Recycling erreicht, beträgt rund 21%. Dies erscheint zunächst wenig. Wenn man jedoch bedenkt, dass derzeit nur ca. 1% der Abbruchmaterialien aus Beton hochwertig (in neuem Beton) wiederverwertet werden (siehe Kapitel 3.2, Abb. A 3.9), erscheint die Prognose für die Zukunft realistisch. Eine Steigerung der Zirkularitätsrate wäre vor allem durch eine Änderung der DAfStb.-Richtlinie zum maximalen Anteil rezyklierter Gesteinskörnungen bzw. durch neue Verwendungsgebiete der beim Rückbau entstehenden Feianteile (>2 mm) möglich.

Was geschieht nun mit dem übrigen Beton? Hierfür wurde dem Material im zweiten Schritt das heute übliche EoL-Szenario Downcycling zugewiesen. Die weiterverwertbaren Materialien ergeben sich wie folgt:

	Masse/m <sup>2</sup>	Anteil rc
dc (downcyclables)	= 1.232 kg - 259,5 kg	
	= 972,5 kg	
	Δ 78,9%	

#### • Stahl:

Für den Stahl erübrigt sich die Anwendung der Koeffizienten, da das übliche EoL-Szenario dem hochwertigen EoL-Szenario entspricht. Bereits im heute üblichen selektiven Abbruch wird Betonstahl in Recyclinganlagen zurückgewonnen und in nahezu geschlossenen Kreisläufen geführt. Um die Qualitätsstufen Post-Use der Bauteilschicht Stahlbetonbodenplatte zu ermitteln, werden die Massen der jeweiligen Qualitätsstufen addiert und durch die Gesamtmasse der Bauteilschicht geteilt:

	Beton	Stahl	Gesamt
rc gesamt	= (259,5 kg/m <sup>2</sup> + 115 kg/m <sup>2</sup> ) / 1.347 kg/m <sup>2</sup>		
	= 0,278		
	Δ 27,8%		
dc gesamt	= 972,5 kg / 1.347 kg		
	= 0,722		
	Δ 72,2%		

Abbildung A 7.5 zeigt die Ergebnisse des Beispiels anhand des Loops für die Post-Use-Phase.



## 7.4. Überprüfung der Methodik und Verifizierung

Die entwickelte Methodik wurde mithilfe von neun studentischen Arbeiten im Wintersemester 2017/18 auf Anwendbarkeit und Plausibilität der Ergebnisse überprüft. Hierfür wurde das in Kapitel 7.6 beschriebene Tabellenwerkzeug in einem Beta-Stadium entwickelt.

Die Studierenden haben für eine übersichtliche Entwurfsaufgabe (größtenteils Arbeiten für den Urban Mining Student Award 2017/18) die Bauteile Boden, Außenwand, ggf. Decken und Dach mit dem Tool erfasst und die Kreislaufpotenziale berechnet.

Anhand einer der Arbeiten und eines beispielhaft durchgerechneten Bauteils wird eine Überprüfung dargestellt, die eine Verifizierung hinsichtlich der Qualitätsstufen erforderlich machte.

### 7.4.1. Beschreibung des Entwurfs und der Berechnungsergebnisse

#### *Konstruktion und Material*

In dem Entwurf von Leona Heidrich (Abb. A 7.6c) besteht die Konstruktion nahezu vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen, da sowohl das Tragwerk als auch Dämmung und innere sowie äußere Bekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen bestehen. Abb. A 7.6a zeigt die Berechnung der Massen für das Bauteil Außenwand und die Zuordnung der material-spezifischen sowie konstruktionsbedingten Parameter. Der Material-Recycling-Content (MRC) setzt sich aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (MRC-C) und aus nicht zertifizierten nachwachsenden Rohstoffen (MRC-R) zusammen. Alle verwendeten Hölzer und Holzwerkstoffe sind schadstofffrei (unbehandelt) und lassen sich am Ende der Nutzungsdauer sortenrein trennen.

#### *Wertstoffe*

Die zu erwartenden Wertstoffe sind mit Ausnahme der kompostierbaren Winddichtungsbahn ausschließlich Altholz der Kategorien A1 und A2 (s. Abb. A 7.6b). Alle Wertstoffe sind somit grundsätzlich stofflich wiederverwertbar (recyclable). Anhand dieses Beispiels lässt sich die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des hochwertigen Recyclings ablesen: Altholz der Kategorie A1 – das sich besser stofflich verwerten lässt – hat einen geringeren durchschnittlichen Entsorgungspreis als Altholz A2. Der Faktor Wert ist deshalb höher ( $f_v$  Altholz A1 = 0,8;  $f_v$  Altholz A2 = 0,7).

Demnach wäre es vorteilhaft, die Wertstoffe auf der Baustelle zu trennen. Dem steht aber ein höherer Aufwand (Faktor Arbeit) entgegen. Für die sortenreine Trennung der Massivholzplatte aus Abb. A 7.6a z. B. beträgt der Faktor  $f_w$  0,9. Würden die Bekleidungen zusammen mit der Tragkonstruktion von einem Abbruchbagger am Stück abgebrochen, wäre der Aufwand geringer ( $f_w = 1,0$ ). Für den selektiven Rückbau der Massivholzplatte ergibt sich unter Berücksichtigung beider Wirtschaftlichkeitsfaktoren insgesamt eine um 2% höhere Wahrscheinlichkeit für die stoffliche Verwertung, wie die Multiplikation der Faktoren zeigt:

selektiver Rückbau, sortenreines Altholz A1:  $f_v 0,8 \times f_w 0,9 = 0,72 \underline{\underline{72\%}}$   
selektiver Abbruch, gemischt mit Altholz A2:  $f_v 0,7 \times f_w 1,0 = 0,70 \underline{\underline{70\%}}$

A 7.6 Berechnung der Kreislaufpotenziale am Beispiel einer studentischen Arbeit, Leona Heidrich, Bergische Universität Wuppertal, Korrektur Rosen

- a Berechnung für das Bauteil Außenwand
- b Wertstoffe
- c Konstruktionsschnitt M 1:20
- d Closed-Loop-Potenzial
- e Loop-Potenzial

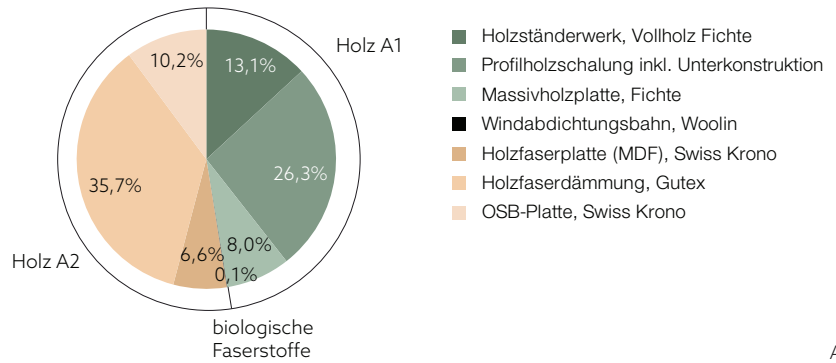
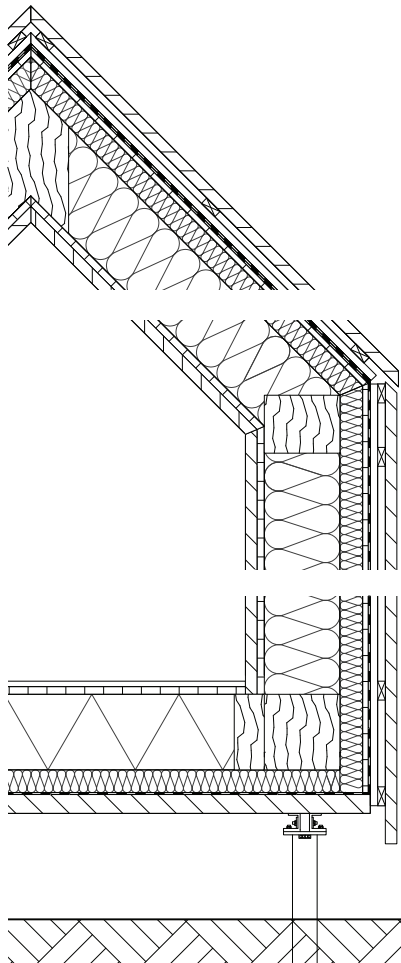
Schichtaufbau Außenwand (von außen nach innen)	Masse * [kg/m <sup>2</sup> ]	MRC-T [%]	MRC-C [%] [kg/m <sup>2</sup> ]	MRC-R [%] [kg/m <sup>2</sup> ]	EoL-Szenarien sd ud	f <sub>v</sub>	f <sub>w</sub>	MLP	rc [kg/m <sup>2</sup> ]	en <sub>r</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]
20 mm Massivholzplatte, Fichte	9,63	0%	100% 9,63	0% 0,00	rc en <sub>r</sub>	0,8	0,9	0%	0,00	9,63
20 mm OSB-Platte, Swiss Krono	12,20	0%	45% 5,49	44% 5,37	rc en <sub>r</sub>	0,7	0,8	71%	4,85	6,01
200 mm Holzständerwerk, Vollholz Fichte	15,77	0%	100% 15,77	0% 0,00	rc en <sub>r</sub>	0,8	1,0	0%	0,00	15,77
200 Zwischendämmung Holzfaser, Gutex	33,00	0%	0% 0,00	93% 30,69	rc en <sub>r</sub>	0,7	0,9	0%	0,00	30,69
60 mm Holzfaserdämmplatte, Gutex	9,90	0%	0% 0,00	93% 9,21	rc en <sub>r</sub>	0,7	0,9	0%	0,00	9,21
15 mm Holzfaserplatte (MDF), Swiss Krono	7,95	0%	47% 3,74	47% 3,74	rc en <sub>r</sub>	0,7	0,9	85%	4,26	3,22
2 mm Windabdichtungsbahn, Woolin	0,07	0%	0% 0,00	95% 0,07	rc en <sub>r</sub>	0,7	1,0	0%	0,00	0,07
2 x 20/50 mm Unterkonstruktion, Lattung Fichte	1,97	0%	100% 1,97	0% 0,00	rc en <sub>r</sub>	0,8	0,9	0%	0,00	1,97
30 mm Profilholzschalung, Fichte	29,56	0%	100% 29,56	0% 0,00	rc en <sub>r</sub>	0,8	0,9	0%	0,00	29,56
	120,05		66,16	49,07					9,11	106,12

\* inkl. Austausch im Lebenszyklus

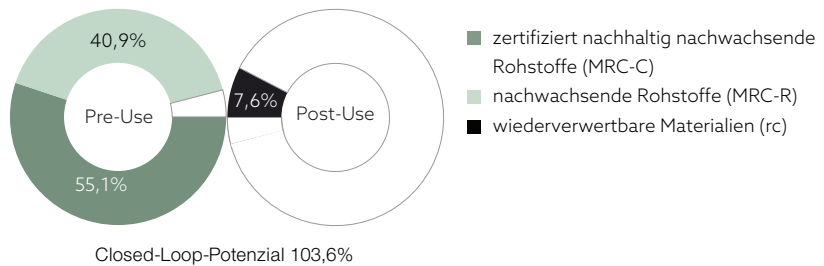
Abkürzungen

- MRC-T Material Recycling Content, technische Materialien
- MRC-C Material Recycling Content, zertifiziert nachhaltig nachwachsende Rohstoffe (certified)
- MRC-R Material Recycling Content, nachwachsende Rohstoffe (renewable)
- sd EoL-Szenario selektiver Rückbau/hochwertig (selective dismantling)
- ud EoL-Szenario selektiver Abbruch/üblich (usual demolition)
- f<sub>v</sub> Faktor Wert
- f<sub>w</sub> Faktor Arbeit
- rc wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)
- en<sub>r</sub> energetisch verwertbare Wertstoffe (energetically usable)

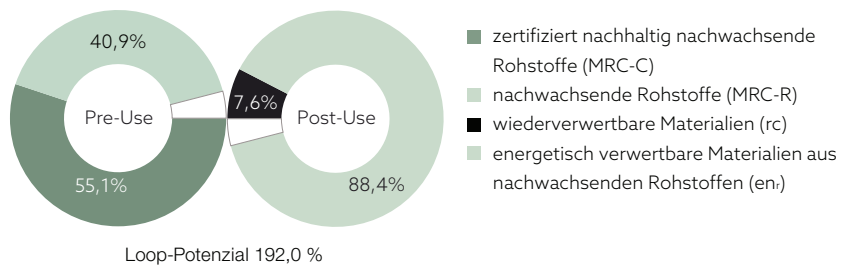
A 7.6 a



A 7.6 b



A 7.6 d

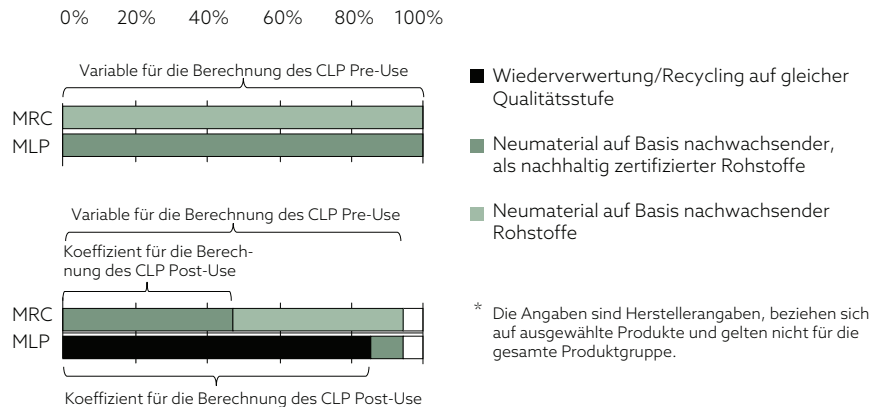


A 7.6 c

A 7.6 e

Konstruktionsvollholz (KVH)  
konventionelle Forstwirtschaft

Holzfaserverplatte\*  
anteilig nachhaltige Forstwirtschaft  
für außenseitige Beplankungen, E1



A 7.7

### Kreislaufpotenziale

Die nachwachsenden Rohstoffe fließen gemäß Kapitel 7.2.2 in das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use ein, die wiederverwertbaren Baustoffe hingegen in das Closed-Loop-Potenzial Post-Use (Abb. A 7.6d). Im Loop-Potenzial werden darüber hinaus die energetisch verwertbaren Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen abgebildet (Abb. A 7.6e). Im Loop-Potenzial ist ablesbar, dass nur ein kleiner Anteil ohne jegliches Kreislaufpotenzial verbleibt (weiße Flächen): Dies sind die Bindemittel in den Holzwerkstoffplatten und der Holzfaserdämmung, die aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen (Kunstharze auf Erdölbasis) bestehen und am Ende der Nutzungsdauer nur energetisch verwertet werden können. Durch die energetische Verwertung gehen diese nicht erneuerbaren Primärrohstoffe unwiederbringlich verloren (während der Anteil erneuerbarer Primärrohstoffe in menschlichen Zeiträumen von der Erde im Naturkreislauf wiederhergestellt werden kann). Die wiederverwertbaren Baustoffe (recyclables) ergeben sich durch Multiplikation der verwertbaren Masse mit den Koeffizienten Wert, Arbeit und Material-Loop-Potenzial. Bezüglich des MLP zeigte sich eine Problematik, die im Folgenden beschrieben wird.

### 7.4.2. Identifizierte Problematiken

Das Material-Loop-Potenzial eines Baustoffs beziffert gemäß Definition in Kapitel 5 auf Seite 94 den „möglichen zukünftigen Anteil von Recyclingmaterialien in einem Produkt bei einer maximalen Optimierung der Produktion hinsichtlich ihres Sekundärrohstoffanteils“. Es bildet damit den Anteil an Materialien ab, der nach heutigem Stand der Forschung zukünftig langfristig im geschlossenen Kreislauf gehalten werden kann. In diesem Sinn wird das MLP in dieser Arbeit als begrenzender Koeffizient für die Qualitätsstufe Wiederverwertung in der Post-Use-Phase angewandt.

Nach Hillebrandt/Seggewies zählt zum MLP jedoch auch der maximal mögliche Anteil nachwachsender Rohstoffe. Abb. A 7.7 zeigt den derzeitigen Material-Recycling-Content und das Material-Loop-Potenzial der in dem Entwurf von Heidrich verwendeten Konstruktionshölzer und der gewählten Holzfaserverplatte (MDF-Platte Swiss Krono).

**In den studentischen Arbeiten wurde nur das MLP für die Wiederverwertung/Recycling angesetzt (schwarzer Balken in Abb. A 7.7 = 85%), nicht aber das MLP für nachwachsende Rohstoffe, da die Post-Use-Phase die**

A 7.7 MRC und MLP von Konstruktionsvollholz und einer beispielhaften Holzfaserverplatte, nach Hillebrandt/Seggewies, Atlas Recycling [171]

In dem Beispiel stammt das Konstruktionsvollholz aus konventioneller Forstwirtschaft (MRC 100%). Nach Hillebrandt/Seggewies könnte es nach „Optimierung der Produktion“ zukünftig aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammen (MLP 100%), d.h. wenn der Wald auf nachhaltige Forstwirtschaft umgestellt und z.B. vom FSC oder PEFC zertifiziert würde. Der Holzanteil der beispielhaften Holzfaserverplatte (MRC insgesamt 94%) stammt dagegen bereits zur Hälfte aus nachhaltiger Forstwirtschaft. Bei einer maximalen Optimierung der Produktion könnte die Platte nach heutigem Stand der Forschung zukünftig zu 85% aus Altholz und zu 9% aus nachhaltig zertifiziertem Primärholz kommen (MLP insgesamt 94%).

Nachnutzung und nicht die Materialherkunft abbildet. So kam es dazu, dass für alle massiven Hölzer kein Closed-Loop-Potenzial Post-Use ausgewiesen werden konnte, was unlogisch erscheint. Eine Rückführung nachwachsender Rohstoffe in den biologischen Kreislauf durch Verrottung ist theoretisch möglich, wird aber de facto nicht praktiziert. In der Praxis werden nachwachsende Rohstoffe energetisch verwertet und gehen damit stofflich verloren. **Der Kreislauf kann jedoch geschlossen werden, wenn die energetisch verwertbaren nachwachsenden Rohstoffe aus zertifiziert nachhaltiger Bewirtschaftung stammen und damit sichergestellt ist, dass sie nachwachsen und die Anbaufläche (z.B. der Wald) nachhaltig erhalten bleibt.**

Die energetische Verwertbarkeit nachwachsender Rohstoffe geht deshalb in das Closed-Loop-Potenzial Post-Use ein, sofern es sich um zertifiziert nachhaltig nachwachsende Rohstoffe handelt.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die Zertifizierung für nachhaltig nachwachsende Rohstoffe auf den Einbaupunkt bezieht, obwohl sie sich auf die Post-Use-Phase des Kreislaufpotenzials auswirkt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Flächen, von denen die Rohstoffe stammen, auch nachhaltig erhalten bleiben.<sup>52</sup>

**Der MRC für Neumaterial auf Basis nachwachsender, als nachhaltig zertifizierter Rohstoffe ist somit ein Koeffizient für die Berechnung des Closed-Loop-Potenzials Post-Use.**

Das MLP nach Hillebrandt/Seggewies für den *möglichen zukünftigen* Anteil zertifiziert nachwachsender Rohstoffe in einem Produkt spielt im Urban Mining Index jedoch keine Rolle, da hiermit keinerlei Aussicht oder Verpflichtung des Produzenten für eine nachhaltige Bewirtschaftung einhergeht.

In Abb. A 7.7 ist die Verwendung der Kennwerte MRC und MLP als Variable oder Koeffizienten für die Berechnung des Closed-Loop-Potenzials gekennzeichnet. Das Beispiel zeigt, dass der Stoffkreislauf holzbasierter Materialien auf zweierlei Weise geschlossen werden kann:

- a) durch die stoffliche Verwertung des Altholzes;
- b) durch das natürliche Nachwachsen, was durch zertifiziert nachhaltige Forstwirtschaft gewährleistet wird.

Dabei kann beides zutreffen: **Wird das nachhaltig nachwachsende Material am Ende der Nutzungsdauer stofflich verwertet, wird der Kreislauf quasi doppelt geschlossen** – mit dem Effekt, dass der Atmosphäre bilanziell betrachtet Kohlenstoff entzogen wird.

Die studentische Arbeit zeigt zwei weitere erforderliche Verifizierungen: Bei der stofflichen Verwertung von Altholz handelt es sich nicht um ein echtes Recycling. Denn die Holzfasern werden bei jedem Verwertungsprozess kürzer und verlieren somit an Qualität. Die stoffliche Verwertung von Altholz muss deshalb sowohl beim Materialeinsatz (Pre-Use) als auch bei der Nachnutzung (Post-Use) der Qualitätsstufe „Weiterverwer-

52 Bei FSC-zertifizierten Hölzern muss sich der Forstbetrieb z. B. verpflichten, seinen Wald langfristig nach den FSC-Prinzipien und -Kriterien [172] zu bewirtschaften. Dazu gehört z. B. auch das Unterlassen von Kahlschlägen, die Verjüngung mit standortgerechten Arten und der Verzicht auf Einsatz von Bioziden.

tung“ (Downcycling – DC) bzw. „weiterverwertbar“ (downcyclable – dc) zugeordnet werden. **Die Weiterverwertbarkeit nachwachsender Rohstoffe geht wiederum in das Closed-Loop-Potenzial Post-Use ein, sofern es sich um zertifiziert nachhaltige Rohstoffe handelt.**

Anhand einer weiteren studentischen Arbeit, in der wiederverwendete Bauelemente geplant wurden, zeigte sich das Erfordernis, auch in der Pre-Use-Phase die Qualitätsstufe „Wiederverwendung“ einzuführen.

#### **7.4.3. Verifizierung**

Aufgrund der aufgezeigten Problematiken wurden die Qualitätsstufen und deren Abbildung in den Kreislaufpotenzialen verifiziert. Abb. A 7.8 zeigt die Qualitätsstufen als Variable nach der Verifizierung.

Der Begriff „Material-Recycling-Content“ wird differenzierter abgebildet. Sowohl in der Pre-Use- als auch in der Post-Use-Phase wird zwischen Wieder- und Weiterverwertung unterschieden. Prinzipiell sind folgende Sekundärrohstoffe als weiterverwertete Materialien einzustufen, da sie mit jedem Recyclingprozess an Qualität verlieren:

- Holzfasern aus Altholz (z. B. in Spanplatten)
- Kunststoffrezyklate

**In der Post-Use-Phase fließen weiterverwertbare und energetisch verwertbare Rohstoffe in das Closed-Loop-Potenzial nur ein, sofern die Rohstoffe nachhaltig nachwachsend/zertifiziert sind. Ansonsten fließen sie nur in das Loop-Potenzial ein.**

**In der Pre-Use-Phase fließen dagegen alle Materialien aus nachwachsenden (bzw. nachgewachsenen) Rohstoffen in das Closed-Loop-Potenzial ein (auch nicht zertifizierte), da sie bereits im Naturkreislauf rezykliert wurden.**

Abb. A 7.9 zeigt die Kreislaufpotenziale der studentischen Arbeit nach der Verifizierung. Der Kreislauf Pre-Use ist aufgrund des Einsatzes erneuerbarer Rohstoffe nahezu geschlossen. Bedingt durch die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus – ausgedrückt durch Multiplikation der verwertbaren Stoffe mit den jeweiligen Faktoren Wert und Arbeit – ergibt die Berechnung für rund 65% der Materialien eine Nachnutzbarkeit mit Qualitätsverlust. Davon fließt nur der Anteil zertifiziert nachhaltig nachwachsender Hölzer und Holzwerkstoffe in das Closed-Loop-Potenzial ein (39,7%), während in das Loop-Potenzial zusätzlich der Anteil aus konventioneller Forstwirtschaft einfließt (25,4%).

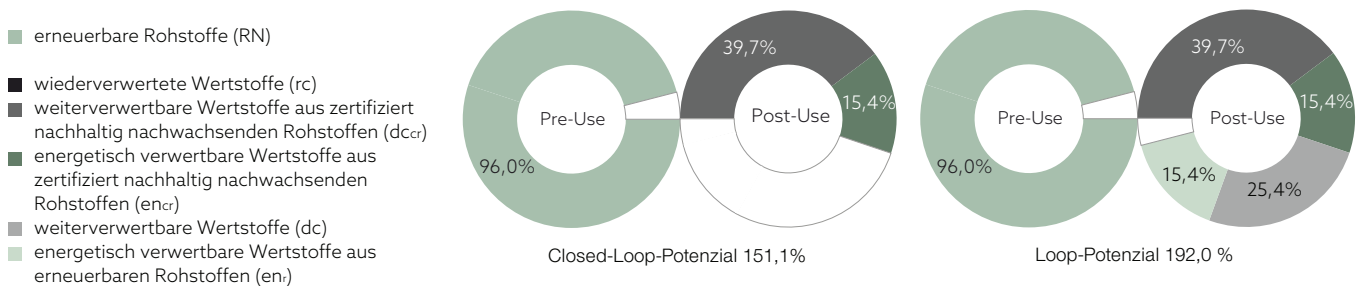
Für 30,8% der Materialien wird eine energetische Verwertung prognostiziert. Davon wird für die Hälfte (15,4%) sichergestellt, dass sie nachwachsend (da sie zertifiziert sind), sodass sie zum Closed-Loop-Potenzial der Konstruktion beitragen.

Phase	Qualitätsstufen/Variable	Formelzeichen	Kreislaufpotenzial	Loops
Pre-Use	■ wiederverwendete Materialien (Reuse)	RU	CLP	
	■ wiederverwertete Materialien (Recycling)	RC	CLP	
	■ erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	RN	CLP	
	■ weiterverwertete Materialien (Downcycling)	DC	LP	
	□ (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Ressources, not renewable))	(PR)	-	
Post-Use	■ wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	ru	CLP	
	■ wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	rc	CLP	
	■ weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)	d <sub>cr</sub>	CLP	
	■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usable, certified renewable)	en <sub>cr</sub>	CLP	
	■ weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)	dc	LP	
	■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usable, renewable)	en <sub>r</sub>	LP	
	□ energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)	enf	-	
	□ Abfälle zur Beseitigung/Deponierung (disposal)	d	-	

A 7.8

Schichtaufbau Außenwand (von außen nach innen)	Masse <sup>1</sup> [kg/m <sup>2</sup> ]	RN <sub>c</sub> <sup>2</sup> [%] [kg/m <sup>2</sup> ]	RN <sup>3</sup> [%] [kg/m <sup>2</sup> ]	EoL-Szenarien sd <sup>4</sup> ud <sup>5</sup>	f <sub>v</sub>	f <sub>w</sub>	rc [kg/m <sup>2</sup> ]	d <sub>cr</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	en <sub>cr</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	dc [kg/m <sup>2</sup> ]	en <sub>r</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]				
20 mm Massivholzplatte, Fichte	9,63	100%	9,63	0%	0,00	d <sub>cr</sub>	en <sub>r</sub>	0,8	0,9	0,00	6,94	2,70	0,00	0,00	
20 mm OSB-Platte, Swiss Krono	12,20	45%	5,49	44%	5,37	d <sub>cr</sub> /dc	en <sub>r</sub>	0,7	0,8	0,00	3,07	2,42	3,01	2,36	
200 mm Holzständerwerk, Vollholz Fichte	15,77	100%	15,77	0%	0,00	d <sub>cr</sub>	en <sub>r</sub>	0,8	1,0	0,00	12,61	3,15	0,00	0,00	
200 mm Zwischendämmung Holzfaser, Gutex	33,00	0%	0,00	93%	30,69	dc	en <sub>r</sub>	0,7	0,9	0,00	0,00	0,00	19,33	11,36	
60 mm Holzfaserdämmplatte, Gutex	9,90	0%	0,00	93%	9,21	dc	en <sub>r</sub>	0,7	0,9	0,00	0,00	0,00	5,80	3,41	
15 mm Holzfaserplatte (MDF), Swiss Krono	7,95	47%	3,74	47%	3,74	d <sub>cr</sub> /dc	en <sub>r</sub>	0,7	0,9	0,00	2,35	1,38	2,35	1,38	
2 mm Windabdichtungsbahn, Woolin	0,07	0%	0,00	95%	0,07	rc	en <sub>r</sub>	0,7	1,0	0,05	0,00	0,00	0,00	0,02	
20/50 mm Unterkonstruktion, Lattung Fichte	1,97	100%	1,97	0%	0,00	d <sub>cr</sub>	en <sub>r</sub>	0,8	0,9	0,00	1,42	0,55	0,00	0,00	
30 mm Profilholzschalung, Fichte	29,56	100%	29,56	0%	0,00	d <sub>cr</sub>	en <sub>r</sub>	0,8	0,9	0,00	21,29	8,28	0,00	0,00	
	120,05	55%	66,16	41%	49,07						0,05	47,68	18,48	30,50	18,52

<sup>1</sup> inkl. Austausch im Lebenszyklus  
<sup>2</sup> erneuerbare Rohstoffe, zertifiziert (Renewable Material, certified)  
<sup>3</sup> erneuerbare Rohstoffe (Renewable Material)  
<sup>4</sup> EoL-Szenario selektiver Rückbau (selective dismantling)  
<sup>5</sup> EoL-Szenario selektiver Abbruch (usual demolition)



A 7.9

A 7.8 Qualitätsstufen als Variable zur Bewertung der Kreislaufpotenziale (nach der Verifizierung), schematische Darstellung

A 7.9 Berechnung der Kreislaufpotenziale am Beispiel der studentischen Arbeit aus Kapitel 7.4.1 nach der Verifizierung

## 7.5. Formeln zur Berechnung der Kreislaufpotenziale

Das Closed-Loop-Potenzial (CLP) und das Loop-Potenzial (LP) werden anhand der nachfolgenden Formeln und Unterformeln ermittelt.

### 7.5.1. Closed-Loop-Potenzial (CLP)

Der Materialkreislauf kann zu Beginn des Lebenszyklus vollständig geschlossen werden, indem zu 100% wiederverwendete Bauelemente, wiederverwertete Materialien oder nachgewachsene Rohstoffe eingesetzt werden. Zudem kann er am Ende des Lebenszyklus vollständig geschlossen werden, wenn die eingesetzten Materialien unter Anwendung der definierten Parameter der Post-Use-Phase zu 100% wiederverwendbar, rezyklierbar oder nachhaltig nachwachsend sind. Das theoretisch maximal mögliche Closed-Loop-Potenzial beträgt somit 200%. Die Formeln zur Berechnung des Closed-Loop-Potenzials lauten:

$$CLP = CLP_{pre-use} + CLP_{post-use}$$

$$CLP_{pre-use} = RU + RC + RN$$

RU Massenanteil der wiederverwendeten Bauteile, Bauelemente oder Bauprodukte (RU für engl. Reuse)

RC Massenanteil der wiederverwerteten Materialien (RC für engl. Recycling)

RN Massenanteil der erneuerbaren Rohstoffe (RN für engl. Renewable)

$$CLP_{post-use} = ru + rc + dccr + encr$$

ru Massenanteil der wiederverwendbaren Bauteile, Bauelemente oder Bauprodukte nach Demontage (ru für engl. reusable)

rc Massenanteil der wiederverwertbaren Wertstoffe nach Rückbau, inkl. Kompost (rc für engl. recyclable)

dccr Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen nach Rückbau (dccr für engl. downcyclable, certified renewable)

encr Massenanteil der energetisch verwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen nach Rückbau (en für engl. energetically usable, certified renewable)

Die Wieder- und Weiterverwertung können je nach Materialart sowohl hochwertige als auch übliche EoL-Szenarien sein (s. Abb. A 5.4, Seite 92). Metalle z.B. werden nicht nur im selektiven Rückbau, sondern auch im heute üblichen selektiven Abbruch bereits hochwertig recycelt. Die wieder- und weiterverwertbaren Wertstoffe setzen sich deshalb ggf. aus dem Anteil des EoL-Szenarios selektiver Rückbau und des EoL-Szenarios selektiver Abbruch zusammen und berechnen sich wie folgt:

$$rc = rc_{sd} + rc_{ud}$$

$$dccr = dccr_{sd} + dccr_{ud}$$

$rc_{sd}$  Massenanteil der wiederverwertbaren Wertstoffe im EoL-Szenario selektiver Rückbau (sd für engl. selective dismantling)

$rc_{ud}$	Massenanteil der wiederverwertbaren Wertstoffe im EoL-Szenario selektiver Abbruch (ud für engl. usual demolition)
$dc_{cr_{sd}}$	Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen im EoL-Szenario selektiver Rückbau
$dc_{cr_{ud}}$	Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen im EoL-Szenario selektiver Abbruch

Für die Wiederverwendung von Baustoffen ist immer eine Demontage erforderlich. **Da die Wiederverwendung von Baustoffen derzeit nicht üblich ist, kommt hier nur das hochwertige EoL-Szenario Wiederverwendung zum Tragen.** In der Formel muss nicht nach selektivem Rückbau und selektivem Abbruch unterschieden werden. Die Formel zur Berechnung des Masseanteils der wiederverwendbaren Baustoffe lautet demnach schlicht:

$$ru = ru_{sd}$$

Der Massenanteil der wiederverwendbaren Baustoffe, der nach der Prognose (siehe nächster Abschnitt) *nicht* in das hochwertige EoL-Szenario Wiederverwendung fließt, geht je nach Wertstoffart in das jeweils zugewiesene übliche EoL-Szenario ein.

Die energetische Verwertung nachwachsender Rohstoffe ist kein hochwertiges EoL-Szenario. **Da organische Abfälle nicht deponiert werden dürfen, ist die energetische Verwertung für diese Materialien das übliche EoL-Szenario. Ein selektiver Rückbau ist hierfür nicht erforderlich.** Insofern muss für nur energetisch verwertbare Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen weder die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus noch das Material-Loop-Potenzial berücksichtigt werden.

### Prognose

Um zu prognostizieren, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Materialien durch den selektiven Rückbau das jeweils *hochwertige* EoL-Szenario erreichen, werden den Variablen schließlich die Koeffizienten hinzugefügt:

$$ru = \frac{M_{ru} * f_w * f_v}{M} * 100$$

$$rc_{sd} = \frac{M_{rc} * f_w * f_v * MLP}{M} * 100$$

$$dc_{cr_{sd}} = \frac{M_{dcr} * f_w * f_v}{M} * 100$$

$M_{ru}$	Masse der wiederverwendbaren Baustoffe (ru für engl. reusables)
$M_{rc}$	Masse der wiederverwertbaren Wertstoffe (rc für engl. recyclables)
$M_{dcr}$	Masse der weiterverwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc für engl. downcyclables, certified renewable)
$f_w$	Faktor Arbeit (w für engl. work)
$f_v$	Faktor Wert (v für engl. value)
M	Masse des eingesetzten Materials
MLP	Material-Loop-Potenzial

### 7.5.2. Loop-Potenzial (LP)

Das Loop-Potenzial bildet über das Closed-Loop-Potenzial hinaus auch Materialien und Wertstoffe ab, die im offenen Kreislauf geführt werden. Das theoretisch maximal mögliche Loop-Potenzial beträgt ebenfalls 200%. Die Formeln zur Berechnung des Loop-Potenzials lauten:

$$LP = LP_{pre-use} + LP_{post-use}$$

$$LP_{pre-use} = CLP_{pre-use} + DC$$

DC Massenanteil der weiterverwerteten Materialien  
(DC für engl. Downcycling)

$$LP_{post-use} = CLP_{post-use} + dc + enr$$

dc Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe nach Rückbau  
(dc für engl. downcyclables)

enr Massenanteil der energetisch verwertbaren Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen nach Rückbau (enr für engl. energetically usable, renewable)

Auch eine Weiterverwertung ist heute noch nicht unbedingt üblich und kann einen selektiven Rückbau erfordern. Die Weiterverwertung kann je nach Materialart sowohl hochwertiges als auch übliches EoL-Szenario sein (s. Abb. A 5.4, Seite 92). Die weiterverwertbaren Wertstoffe setzen sich deshalb ggf. aus dem Anteil des EoL-Szenarios selektiver Rückbau und des EoL-Szenarios selektiver Abbruch zusammen und berechnen sich wie folgt:

$$dc = dc_{sd} + dc_{ud}$$

$dc_{sd}$  Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe im EoL-Szenario selektiver Rückbau

$dc_{ud}$  Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe im EoL-Szenario selektiver Abbruch

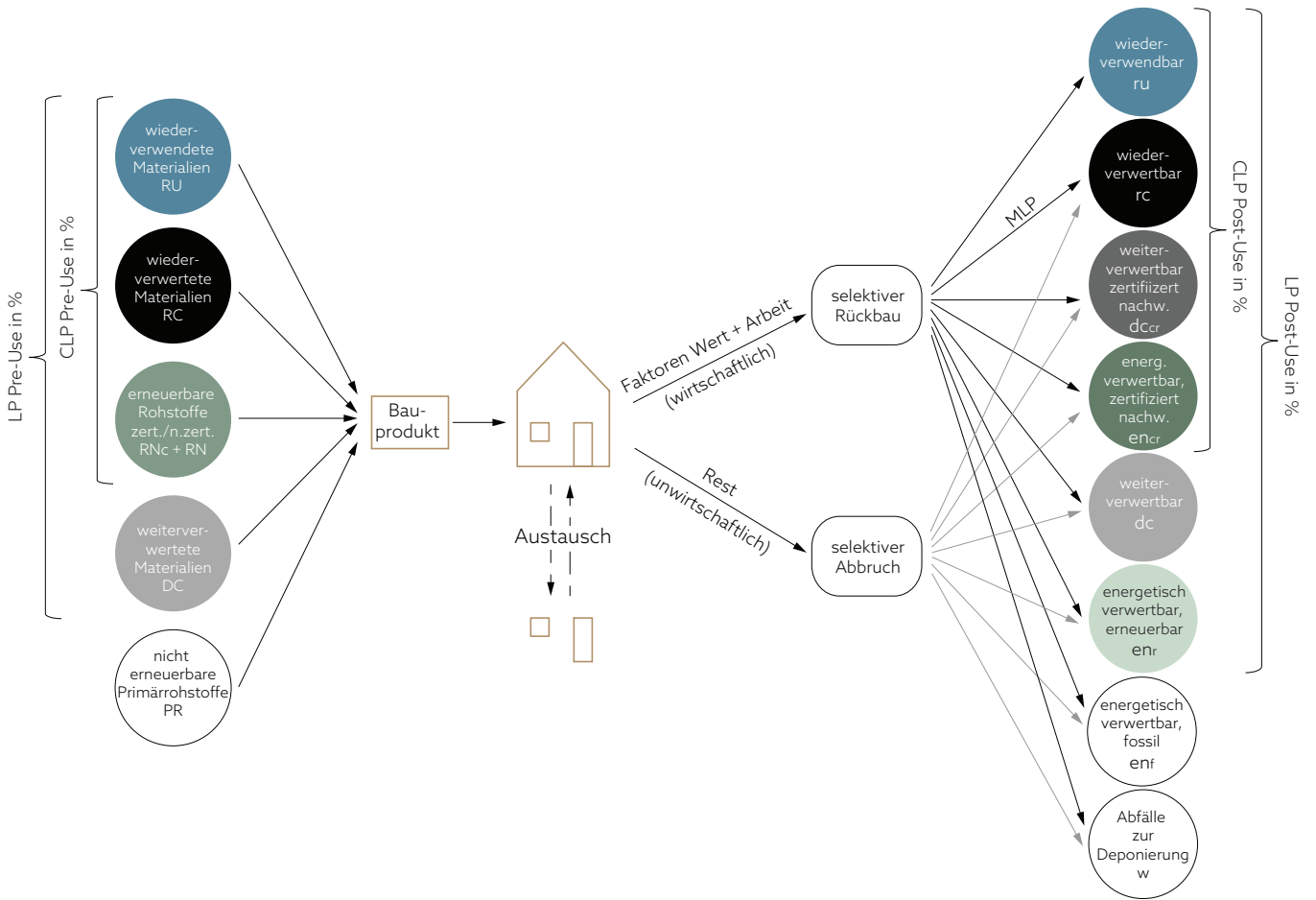
Zur Prognostizierung der Wahrscheinlichkeit, mit der die Materialien das jeweils hochwertige EoL-Szenario erreichen, werden den Variablen die Koeffizienten hinzugefügt:

$$dc_{sd} = \frac{M_{dc} * f_w * f_v}{M} * 100$$

$M_{dc}$  Masse der weiterverwertbaren Wertstoffe (downcyclables)

Um den Qualitätsverlust der in offenen Kreisläufen geführten Materialien abzubilden, geht deren Anteil auf Gebäudeebene gewichtet in die Bewertung ein (s. Kapitel 9.3.2).

Die Abbildung A 7.10 fasst die Systematik zur Berechnung der Kreislaufpotenziale im Urban Mining Index noch einmal grafisch zusammen.



A 7.10 Systematik zur Berechnung der Kreislaufpotenziale nach Qualitätsstufen

### 7.6. Entwicklung eines Tabellenwerkzeugs zur systematischen Berechnung und Bewertung der Kreislaufpotenziale

Für die praktische Anwendung der Bewertungsmethodik wurde ein Tabellenwerkzeug im Excelformat entwickelt. Eine Exceldatei hat den Vorteil, dass sie auf praktisch jedem Rechner anwendbar ist. Im Zuge der Evaluierung durch die Studierenden (s. Kapitel 7.4) haben sich einige typische, programmbedingte Schwierigkeiten gezeigt, die behoben werden konnten. So wurde das automatische Einfügen neuer Zeilen inklusive der entsprechenden Formeln mithilfe von Makros programmiert. Excel bietet außerdem den Vorteil, dass individuelle Anpassungen möglich sind, sofern die hierfür benötigten Zellen nicht für den Anwender gesperrt sind. Hier liegt jedoch auch ein Risiko, da individuelle Anpassungen die Fehleranfälligkeit erhöhen. Die Überführung in eine benutzerfreundliche Online-Anwendung ist deshalb geplant, aber nicht Gegenstand der Promotion.

Das Tabellenwerkzeug besteht aus mehreren Tabellenblättern. Im ersten Tabellenblatt findet der Anwender eine kurze Anleitung. Die darauffolgenden Tabellenblätter dienen der Erfassung der Bauteile. Jedes Bauteil wird in einem eigenen Tabellenblatt erfasst. Varianten von Bauteilen können in weiteren Tabellenblättern erfasst werden.

In den folgenden Abschnitten wird die Berechnung der Kreislaufpotenziale mit dem entwickelten Tabellenwerkzeug beschrieben.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Materialerfassung und Massenermittlung														
Bauteil	Bauelement	Bauteilschicht	Material		Dicke	Länge	Breite	Menge	Rohdichte	Masse /Stück	Masse	Lebensdauer	Austauschhäufigkeit	Masse im Lebenszyklus
(Gliederung nach DIN 276)			Bezeichnung	Verbindungsart	[m]	[lfm]	[m]	[n]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg]	[kg/m <sup>2</sup> ]		[n]	[kg/m <sup>2</sup> ]
360 Dach	363 Dachbelag	Zinkdach	Stehfalz-Zinkdeckung	auf Haften gefalzt	0,001	1	1,000	1	7.200,0		5,60	Deckunge	0	5,60
			Unterkonstruktion Spanplatte	verschraubt	0,025	1	1,000	1	633,3		15,83	nicht relev	0	15,83
			Lattung, Fichte/Tanne	verschraubt	0,040	1	0,060	2	481,6		2,31	Tragkonst	0	2,31
			Unterspannbahn, PE-HD	stoßüberlappend geklammert	0,001	1	1,100	1	333,0		0,33	nicht relev	0	0,33
			Aufsparrendämmung, Steinwolle	verschraubt	0,060	1	1,000	1	96,0		5,76	Zwischen-	0	5,76
	361 Dachkonstruktionen		Beplankung, Spanplatte	verschraubt	0,022	1	1,000	1	633,3		13,93	nicht relev	0	13,93
			Sparren, KVH	verschraubt	0,240	1	0,075	1	492,9		8,79	Tragkonst	0	8,79
	363 Dachbelag	Dämmung	Zwischensparrendämmung, Glaswolle	geklemt	0,240	1	0,930	1	20,0		4,46	Zwischen-	0	4,46
	364 Dachbekleidung	Dampfbremse	Dampfbremse, PE-LD	stoßüberlappend geklammert	0,000	1	1,100	1			0,09	nicht relev	0	0,09
			Lattung, Fichte/Tanne	verschraubt	0,025	1	0,100	3	481,6		1,81	nicht relev	0	1,81
			Gipskartonplatten	verschraubt	0,010	1	1,000	1	800,0		7,90	Gipskarton	0	7,90
<b>Summen</b>														<b>66,81</b>
<input type="button" value="neue Zeile einfügen"/>														

A.7.11a

- Spalten/Zellen ergeben sich automatisch, können aber auch überschrieben werden
- Spalten/Zellen müssen erfasst werden
- Spalten/Zellen können erfasst werden
- automatische Berechnung

### 7.6.1. Mengenermittlung

Die Bauteile werden auf Materialebene erfasst (s. Abb. A.7.11a).

Zur Gliederung steht dem Anwender ein Dropdown-Menü mit den Bauelementen der KGR 300 nach DIN 276 zur Verfügung.

Die Bezeichnung der Materialien legt der Anwender ohne Vorgabe individuell fest (z.B. analog zu den Beschriftungen in den Entwurfs- oder Ausführungsplänen). Die Angabe der Verbindungsart (Spalte E) dient nicht der Berechnung, sondern als Hilfestellung zur Einordnung des Rückbauaufwands. Die Massen pro Quadratmeter können entweder über die Berechnung des Volumens anhand der Maße und Angabe der Rohdichte automatisch berechnet werden, aber auch direkt für das jeweilige Material erfasst werden. Letzteres ist sinnvoll, wenn Herstellerangaben zu Flächengewichten vorliegen (z.B. für Teppichboden). Die Zellen der Spalte L sind deshalb mit einer Formel hinterlegt, die aber vom Anwender überschrieben werden kann.

Zur Berechnung der Austauschhäufigkeit kann in Spalte M ein Dropdown-Menü genutzt werden, in dem die BBSR-Tabelle mit Nutzungsdauern von Bauteilen hinterlegt ist. Die Masse im Lebenszyklus pro Quadratmeter (Spalte O) als Basis für alle folgenden Berechnungen ergibt sich automatisch durch Addition von Masse + Masse x Austauschhäufigkeit.

### 7.6.2. Qualitätsstufen Pre-Use

Der Massenermittlung folgt die Berechnung der Qualitätsstufen für den Materialeinsatz Pre-Use (Abb. A.7.11b). Die Massenanteile kann der Anwender anhand von Herstellerangaben oder anhand des Material-

P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Qualitätsstufen Pre-Use										
wieder- verwendete Materialien RU %	wieder- verwertete Materialien RC %	erneuerbare Primärrohstoffe, zert. nachhaltig RNc %	erneuerbare Primärrohstoffe RN %	weiter- verwertete Materialien DC %	Primärrohstoffe nicht erneuerbar PR %	wieder- verwendete Materialien RU [kg/m <sup>2</sup> ]	wieder- verwertete Materialien RC [kg/m <sup>2</sup> ]	erneuerbare Primärrohstoffe zert.nachhaltig RNc [kg/m <sup>2</sup> ]	erneuerbare Primärrohstoffe RN [kg/m <sup>2</sup> ]	weiter- verwertete Materialien DC [kg/m <sup>2</sup> ]
	30,0%				70,0%	0,00	1,68	0,00	0,00	0,00
			91,0%	18,0%	-9,0%	0,00	0,00	0,00	14,41	2,85
		100,0%		Kaskade	0,0%	0,00	0,00	2,31	0,00	0,00
					100,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
					100,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			91,0%	18,0%	-9,0%	0,00	0,00	0,00	12,68	2,51
		100,0%			0,0%	0,00	0,00	8,79	0,00	0,00
	40,0%				60,0%	0,00	1,79	0,00	0,00	0,00
					100,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		100,0%			0,0%	0,00	0,00	1,81	0,00	0,00
				2,0%	98,0%	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00
0,00%	5,2%	19,3%	40,5%	8,3%	26,7%	0,00	3,47	12,91	27,09	5,52
CLP Pre-Use					÷ Gesamtmasse 66,81 kg					
LP Pre-Use										

A 7.11b

Recycling-Content (MRC) nach dem Atlas Recycling in den Spalten P bis T erfassen. Der Anteil nicht erneuerbarer Primärrohstoffe wird anhand der Angaben automatisch berechnet.

Für jedes Material werden die Massen nach Qualitätsstufen anhand der Prozentangaben berechnet. Die Summen der jeweiligen Qualitätsstufen (Spalte V bis Z) werden dann durch die Gesamtmasse des Bauteils im Lebenszyklus geteilt, sodass sich automatisch die prozentualen Massenanteile der Qualitätsstufen für das Gesamtbauteil ergeben.

### Kaskadennutzung

Werden in einem Bauteil Sekundärrohstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen eingesetzt, handelt es sich um eine Kaskadennutzung (s. Seite 22).

Die in dem Anwendungsbeispiel erfassten Spanplatten bestehen zu 18% aus weiterverwertetem Altholz (Spalte T), 73% Primärholz und 9% Leimanteil aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen. Da das Altholz ebenfalls aus erneuerbaren Rohstoffen besteht, sind in der Spanplatte insgesamt 91% erneuerbare Rohstoffe eingesetzt (Spalte S). Addiert man die erneuerbaren Rohstoffe und die weiterverwerteten Rohstoffe, ergeben sich 109% Materialeinsatz. Da der Anteil nicht erneuerbarer Primärrohstoffe automatisch durch Bildung der Differenz zwischen 100% und der Summe der Spalten P bis T berechnet wird, ergibt sich für die Spanplatten ein negativer Prozentanteil nicht erneuerbarer Primärrohstoffe. Dies ist kein Fehler, sondern Absicht, um die Kaskadennutzung quantitativ abzubilden. In der Summenbildung (letzte Zeile) gleicht die Kaskadennutzung so einen Teil des Gesamt-Primärrohstoffeinsatzes aus.

A 7.11 Erfassung eines beispielhaften Dachaufbaus mit dem entwickelten Excel Tool

- a Materierefassung und Massenermittlung
- b Berechnung der Qualitätsstufen Pre-Use

Abkürzungen (engl.):

- RU Reuse
- RC Recycling
- RNc Renewable, certified
- RN Renewable (uncertified)
- DC Downcycling
- PR Primary Ressources (not renewable)

B	C	D
Bauelement	Bauteilschicht	Material
(Gliederung nach DIN 276)		Bezeichnung
363 Dachbelag	Zinkdach	Stehfalz-Zinkdeckung
		Unterkonstruktion Spanplatte
		Lattung, Fichte/Tanne
		Unterspannbahn, PE-HD
		Aufsparrendämmung, Steinwolle
361 Dachkonstruktion		Beplankung, Spanplatte
		Sparren, KVH
363 Dachbelag	Dämmung	Zwischensparrendämmung, Glaswolle
364 Dachbekleidung	Dampfbremse	Dampfbremse, PE-LD
		Lattung, Fichte/Tanne
		Gipskartonplatten

AJ	AK	AL	AM	AO	AP	AQ	AR
Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus							
Einordnung Rückbauaufwand	Faktor Arbeit $f_w$	Wertstofffraktion	Verwertungskosten/-erlöse		Bewertung Verwertungskosten/-erlöse	Faktor Wert $f_v$	Faktor Wirtschaftlichkeit (gesamt)
			[€/t]	[€/m <sup>2</sup> ]			
363.03_DA_Stehfalz	0,7	170402_Zink	1.464,00 €	8,20 €	äußerst positiv	1,3	0,91
336.02_AB_MDF-Pla	0,9	170102_Holz A2	-61,34 €	-0,97 €	sehr hoch negativ	0,7	0,63
335.01_AB_Profilholz	0,9	170102_Holz A1	-51,71 €	-0,12 €	hoch negativ	0,8	0,72
335.04_AB_Winddicke	1,0	170203_Kunststoffe zur energ. Verwertung	-218,83 €	-0,07 €	äußerst negativ	0,6	0,60
363.31_DA_Dämmung	1,0	Hersteller- oder Verbandsrücknahme	0,00 €	0,00 €	leicht positiv	1,0	1,00
336.02_AB_MDF-Pla	0,9	170102_Holz A2	-61,34 €	-0,85 €	sehr hoch negativ	0,7	0,63
361.03_DA_Steildach	1,0	170102_Holz A1	-51,71 €	-0,45 €	hoch negativ	0,8	0,80
335.39_AB_Dämmung	1,0	170604_Dämmstoff, Mineralwolle	-398,00 €	-1,78 €	äußerst negativ	0,6	0,60
335.04_AB_Winddicke	1,0	170203_Kunststoffe zur energ. Verwertung	-218,83 €	-0,02 €	äußerst negativ	0,6	0,60
335.01_AB_Profilholz	0,9	170102_Holz A1	-51,71 €	-0,09 €	hoch negativ	0,8	0,72
gering	0,9	170802_Gips und Gipskarton	-102,37 €	-0,81 €	sehr hoch negativ	0,7	0,63
			<b>3,03 €</b>				

A 7.11c

### 7.6.3. Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus

Um die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus zu berücksichtigen, muss der Anwender jedem Material den Rückbauaufwand und eine Wertstofffraktion zuordnen (s. Abb. A 7.11c).

Hierzu enthält die Spalte AJ ein Dropdown-Menü, in dem der Bauteilkatalog aus Kapitel 6 hinterlegt ist. Durch Verknüpfung des Dropdown-Menüs mit der Skala aus Kapitel 7.3.2 wird automatisch der Faktor Arbeit zugewiesen. Da der Bauteilkatalog bei weitem nicht alle existierenden Konstruktionen enthält, kann der Anwender den Rückbauaufwand auch durch Vergleich mit den beschriebenen Konstruktionen einschätzen und im Dropdown-Menü die Stufen des Rückbauaufwands (von sehr gering bis sehr hoch) selbst direkt auswählen.

Die Wertstofffraktionen gemäß Kapitel 6.1, Abb. A 6.4 werden ebenfalls anhand eines Dropdown-Menüs in Spalte AL zugeordnet. Nach der Zuordnung durch den Anwender werden automatisch für jedes Material sowie für das gesamte Bauteil anhand der im Exceltool hinterlegten Preisliste (Abb. A 6.4) die zu erwartenden Entsorgungskosten bzw. Verwertungserlöse berechnet. Durch Verknüpfung der Wertstofffraktionen mit der Skala aus Kapitel 7.3.1 wird automatisch der Faktor Wert zugewiesen. Der Gesamtfaktor Wirtschaftlichkeit (Spalte AR) ergibt sich durch Multiplikation des Faktors Arbeit mit dem Faktor Wert.

### 7.6.4. Wiederverwendbarkeit und Verwertbarkeit

Zur Beurteilung der grundsätzlichen Nachnutzbarkeit der geplanten Materialien dient der Tabellenabschnitt „Wiederverwendbarkeit und Verwertbarkeit“ (s. Abb. A 7.11d).

A 7.11 Erfassung eines beispielhaften Dachaufbaus mit dem entwickelten Excel Tool

- c Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus
- d Abfrage zur Wiederverwendbarkeit und Verwertbarkeit

Abkürzungen (engl.):

- sd selective dismantling
- ud usual demolition

AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE
Wiederverwendbarkeit		Verwertbarkeit										
rückbaubar ohne Zerstörung	Absatzmarkt vorhanden oder absehbar	Störstoffe					Schadstoffe	Wertstoff-Anteil [%]	Wertstoff-Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	End-of-Life Szenario selektiver Rückbau (hochwertig) sd	End-of-Life Szenario selektiver Abbruch (üblich) ud	Material-Loop-Potenzial nach Atlas Recycling
		Restanhaftungen	Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	Anteil homogen	Anteil fremd	max. zulässige Störstoffe für stoffliche Verwertung in %						
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	5,60	Recycling	Recycling	100%
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	15,83	Downcycling Altholz	Energetische Verw. NaWaRo	nicht relevant
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	2,31	Downcycling Altholz	Energetische Verw. NaWaRo	nicht relevant
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	0,33	Energetische Verw. fossile Rohstoffe	Energetische Verw. fossile Rohstoffe	nicht relevant
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	5,76	Recycling	Entsorgung/ Deponierung	80%
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	13,93	Downcycling Altholz	Energetische Verw. NaWaRo	nicht relevant
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	8,79	Downcycling Altholz	Energetische Verw. NaWaRo	nicht relevant
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	4,46	Recycling	Entsorgung/ Deponierung	80%
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	0,09	Energetische Verw. fossile Rohstoffe	Energetische Verw. fossile Rohstoffe	nicht relevant
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	1,81	Downcycling Altholz	Energetische Verw. NaWaRo	nicht relevant
nicht relevant	nicht relevant						- schadstofffrei	100,00%	7,90	Recycling	Entsorgung/ Deponierung	99%
								100,00%	66,8			

A.7.11d

Die Abfrage zu den Kriterien der Wiederverwendbarkeit (Spalten AS und AT) ist mit der Einordnung der Wertstofffraktion (Spalte AL) verknüpft. Sofern die Wertstofffraktion „Wiederverwendung, Sonstiges“ ausgewählt wird, muss der Anwender die Abfrage zur Rückbaubarkeit ohne Zerstörung und zur Existenz eines Absatzmarktes per Dropdown mit „ja“ oder „nein“ beantworten. Für alle anderen Wertstofffraktionen werden die Zellen automatisch gefüllt: Wurden in Spalte AL Bau- bzw. Wertstoffe ausgewählt, für die die zerstörungsfreie Lösbarkeit durch Versuche nachgewiesen wurde und für die ein Absatzmarkt sicher existiert, werden die Spalten AS und AT automatisch mit „ja“ hinterlegt. Für alle anderen Wertstofffraktionen werden die Kriterien zur Wiederverwendbarkeit automatisch mit „nicht relevant“ gekennzeichnet.

Zur Beurteilung der Verwertbarkeit muss der Anwender mögliche Störstoffe erfassen. Liegt der Störstoffanteil über dem recyclingverträglichen Maß, beträgt der Wertstoffanteil (Spalte BA) automatisch 0%. Ist der maximal zulässige Störstoffanteil nicht bekannt, kann vorerst 1% angenommen werden. Für eine genauere Bewertung sind Herstellerangaben erforderlich, die z.B. zukünftig in EPDs aufgenommen werden könnten. Das Ausschlusskriterium Schadstofffreiheit wird beurteilt, indem der Anwender über ein Dropdownmenü die in Abb. A 5.3 (Kapitel 5.1) benannten Schadstoffe angeben muss. Quellen hierfür sind Sicherheitsdatenblätter oder andere Herstellerangaben.

Die beiden End-of-Life-Szenarien (hochwertig und üblich) werden automatisch anhand der ausgewählten Wertstofffraktion gemäß Abb. A 5.4 zugewiesen. Für das End-of-Life-Szenario Recycling muss der Anwender schließlich noch das Material-Loop-Potenzial nach dem Atlas Recycling (oder Herstellerangabe) beziffern.

B	D	BB	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM
			<b>hochwertiges EoL-Szenario (selektiver Rückbau erforderlich) sd</b>							
Bauelement (Gliederung nach DIN 276)	Material Bezeichnung	Wertstoff-masse [kg/m <sup>2</sup> ]	wieder- verwendbar ru [kg/m <sup>2</sup> ]	wieder- verwertbar rc [kg/m <sup>2</sup> ]	weiterverwertbar zert. nachhaltig nachwachsend dc <sub>cr</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	energ. verwertbar zert.nachhaltig nachwachsend en <sub>cr</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	weiter- verwertbar dc [kg/m <sup>2</sup> ]	energetisch verwertbar nachwachsend en <sub>r</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	energetisch verwertbar, fossil en <sub>f</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	Entsorgung/ Deponierung d [kg/m <sup>2</sup> ]
363 Dachbelag	Stehfalz-Zinkdeckung	5,60	0,00	5,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Unterkonstruktion Spanplatte	15,83	$15,83 \times 0,9 \text{ (AK)} \times 0,7 \text{ (AQ)} = 9,97$				9,97	0,00	0,00	0,00
	Lattung, Fichte/Tanne	2,31	0,00	0,00	1,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Unterspannbahn, PE-HD	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
	Aufsparrendämmung, Steinwolle	5,76	0,00	4,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
361 Dach- konstruktion	Beplankung, Spanplatte	13,93	0,00	0,00	0,00	0,00	8,78	0,00	0,00	0,00
	Sparren, KVH	8,79	0,00	0,00	7,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
363 Dachbelag	Zwischensparren- dämmung, Glaswolle	4,46	0,00	2,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
364 Dach- bekleidung	Dampfbremse, PE-LD	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
	Lattung, Fichte/Tanne	1,81	0,00	0,00	1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Gipskartonplatten	7,90	0,00	4,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		66,81	0,00	16,77	10,00	0,00	18,75	0,00	0,25	0,00

A 7.11. e

B	D	BB	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	
			<b>übliches EoL-Szenario (selektiver Abruch) ud</b>								
Bauelement (Gliederung nach DIN 276)	Material Bezeichnung	Wertstoff-Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	wieder- verwendbar ru [kg/m <sup>2</sup> ]	wieder- verwertbar rc [kg/m <sup>2</sup> ]	weiterverwertbar zert. nachhaltig nachwachsend dc <sub>cr</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	energ. verwertbar zert.nachhaltig nachwachsend en <sub>cr</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	weiter- verwertbar dc [kg/m <sup>2</sup> ]	energetisch verwertbar nachwachsend en <sub>r</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	energetisch verwertbar, fossil en <sub>f</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	Entsorgung/ Deponierung d [kg/m <sup>2</sup> ]	
363 Dachbelag	Stehfalz-Zinkdeckung	5,60	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Unterkonstruktion Spanplatte	15,83	0,00	0,00	$(15,83 - 9,97 \text{ (BJ)}) \times 91\% \text{ (S)} = 5,33$		0,00	5,33	0,53	0,00	
	Lattung, Fichte/Tanne	2,31	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Unterspannbahn, PE-HD	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	
	Aufsparrendämmung, Steinwolle	5,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	
361 Dach- konstruktion	Beplankung, Spanplatte	13,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,69	0,46	0,00	
	Sparren, KVH	8,79	0,00	0,00	0,00	1,76	0,00	0,00	0,00	0,00	
363 Dachbelag	Zwischensparren- dämmung, Glaswolle	4,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,32	
364 Dach- bekleidung	Dampfbremse, PE-LD	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	
	Lattung, Fichte/Tanne	1,81	0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Gipskartonplatten	7,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,97	
		66,81	0,00	0,50	0,00	2,91	0,00	10,02	1,16	6,45	
			66,81	0,00	17,90	10,00	2,91	13,69	8,04	1,41	10,97

$\Delta 2,1\% \text{ (s. } \Sigma \text{ Spalte CC)}$

A 7.11f

BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ
Qualitätsstufen Post-Use								Kreislaufpotenziale					
wieder- verwendbar ru %	wieder- verwertbar rc %	weiterverwertbar zert. nachhaltig nachwachsend dc <sub>cr</sub> %	energ. verwertbar zert. nachhaltig nachwachsend en <sub>cr</sub> %	weiter- verwertbar dc %	energetisch verwertbar, nachwachsend en <sub>r</sub> %	energetisch verwertbar, fossil en <sub>f</sub> %	Deponierung d %	Closed Loop Potenzial (CLP)			Loop Potenzial (LP)		
								Pre-Use	Post-Use	gesamt	Pre-Use	Post-Use	gesamt
0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	30,0%	100,0%	130,0%	30,0%	100,0%	130,0%
0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	63,0%	33,7%	3,3%	0,0%	91,0%	0,0%	91,0%	109,0%	96,7%	205,7%
0,0%	0,0%	72,0%	28,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	200,0%	100,0%	100,0%	200,0%
0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
0,0%	80,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%	0,0%	80,0%	80,0%	0,0%	80,0%	80,0%
0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	63,0%	33,7%	3,3%	0,0%	91,0%	0,0%	91,0%	109,0%	96,7%	205,7%
0,0%	0,0%	80,0%	20,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	200,0%	100,0%	100,0%	200,0%
0,0%	48,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	52,0%	40,0%	48,0%	88,0%	40,0%	48,0%	88,0%
0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
0,0%	0,0%	72,0%	28,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	200,0%	100,0%	100,0%	200,0%
0,0%	62,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	37,6%	0,0%	62,4%	62,4%	2,0%	62,4%	64,4%
0,0%	25,9%	15,0%	4,4%	28,1%	15,0%	2,1%	9,6%	65,0%	45,3%	110,2%	73,3%	88,4%	161,7%

CLP Post-Use
LP Post-Use
A 7.11g
A 7.11h

### 7.6.5. Berechnung der Massenanteile für die EoL-Szenarien

In den folgenden Tabellenabschnitten (Abb. A 7.11e und f) werden auf Basis der zugewiesenen End-of-Life-Szenarien die Massen für die verschiedenen Nachnutzungsmöglichkeiten berechnet.

Die Massen, die durch selektiven Rückbau wahrscheinlich das jeweils hochwertige EoL-Szenario erreichen, werden in den Spalten BF bis BM berechnet. Hierfür werden die jeweiligen Wertstoffmassen (BB) mit dem Faktor Arbeit (AK), dem Faktor Wert (AQ) und ggf. dem MLP (BE) multipliziert. Sind nachhaltig nachwachsende Rohstoffe enthalten, ist deren Anteil ebenfalls ein Multiplikator, um sie den entsprechenden Qualitätsstufen zuzuordnen. Die restlichen Massen werden in den Spalten BN bis BU dem jeweils üblichen EoL-Szenario zugeordnet.

### 7.6.6. Qualitätsstufen Post-Use

Nachdem die Massen in beiden EoL-Szenarien den Qualitätsstufen Post-Use zugeordnet wurden, wird der Anteil der jeweiligen Qualitätsstufe an der Gesamtmasse des Materials im Lebenszyklus berechnet (Abb. A 7.11g). Hierfür werden die Massen der jeweiligen Qualitätsstufen in beiden EoL-Szenarien addiert (s. Seite 172 unten), durch die Masse des jeweiligen Materials im Lebenszyklus (Spalte O) geteilt und in Prozent ausgewiesen. Auf gleiche Weise ergeben sich die Qualitätsstufen für das Gesamtbau- teil durch Division der Gesamtmassen der jeweiligen Qualitätsstufen aus beiden Szenarien durch die Gesamtmasse des Bauteils im Lebenszyklus.

### 7.6.7. Kreislaufpotenziale

Im letzten Schritt werden durch Addition der Qualitätsstufen mithilfe der

A 7.11 Erfassung eines beispielhaften Dachaufbaus mit dem entwickelten Excel Tool

- e Berechnung der Massen für das hochwertige End-of-Life-Szenario
- f Berechnung der Massen für das übliche End-of-Life-Szenario
- g Berechnung der Qualitätsstufen Post-Use und Ermittlung der Kreislaufpotenziale
- h Berechnung des Closed-Loop und des Loop-Potenzials

Rundungsdifferenzen sind programmbedingt

Abkürzungen (engl.):

- ru reusable
- rc recyclable
- dc<sub>cr</sub> downcyclable, certified renewable
- en<sub>cr</sub> energetically usable, certified renewable
- dc downcyclable
- en<sub>r</sub> energetically usable, renewable
- en<sub>f</sub> energetically usable, fossil
- d disposal

B	D	F	G	H	I	J	L
<b>Materialerfassung und Massenermittlung</b>							
Bauelement		Höhe	Länge	Breite	Menge	Roh-dichte	Masse
(Gliederung nach DIN 276)	Bezeichnung						
		[m]	[lfm]	[m]	[n]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]
363 Dachbelag	Stehfalz-Zinkdeckung	0,001	1	1,000	1	7.200,00	5,60
	Unterkonstruktion Spanplatte	0,025	1	1,000	1	633,32	15,83
	Lattung, Fichte/Tanne	0,040	1	0,060	2	481,60	2,31
	Unterspannbahn, PE-HD	0,001	1	1,100	1		0,33
	Aufsparrendämmung, Steinwolle	0,006	1	1,000	1	96,00	5,76
361 Dach-konstruktionen	Beklankung, Spanplatte	0,022	1	1,000	1	633,32	13,93
	Sparren, KVH	0,240	1	0,075	1	492,90	8,79
363 Dachbelag	Zwischensparrendämmung, Glaswolle	0,240	1	0,930	1	20,00	4,46
364 Dachbekleidung	Dampfbremse, PE-LD	0,000	1	1,100	1		0,09
	Lattung, Fichte/Tanne	0,025	1	0,050	3	481,60	1,81
	Gipskartonplatten	0,010	1	1,000	1	800,00	7,90
<b>Summen</b>							

Formeln aus Kapitel 7.5 die Kreislaufpotenziale berechnet (s. Abb. A 7.11h). Für das Closed-Loop- und das Loop-Potenzial werden die Phasen Pre-Use und Post-Use jeweils getrennt ausgewiesen.

**Das CLP Pre-Use ergibt sich durch Addition der Spalten P bis S, das CLP Post-Use durch Addition der Spalten BW bis BZ.**

**Das Ergebnis des LP Pre-Use setzt sich aus den Spalten P bis T und das LP Post-Use aus den Spalten BW bis CB zusammen.**

In jeder Phase können die beiden Potenziale jeweils 100% erreichen, sodass sowohl für das CLP als auch für das LP eine Zirkularitätsrate von theoretisch 200% erzielt werden kann. Die Praxis ist von solchen Zirkularitätsraten jedoch weit entfernt.

In Kapitel 9.3 wird gezeigt, wie die Berechnungen der Kreislaufpotenziale der Bauteile durch Gewichtung zu einem Urban Mining Indicator für das Gesamtgebäude zusammengeführt werden.

### 7.6.8. Treibhauspotenzial

Zusätzlich zur Berechnung der Kreislaufpotenziale ist in das Tabellenwerkzeug die Berechnung der klimaschädlichen Emissionen integriert, welche die Konstruktion durch ihre Herstellung, Erneuerung, Entsorgung und Verwertung verursacht (s. Abb. A 7.11g).

Da das Treibhauspotenzial ebenfalls auf Materialebene mithilfe einer Massenermittlung berechnet wird, lässt sich die Kalkulation gut in das Tool integrieren. Hierfür wurde in den Tabellenblättern zur Bauteilerfassung ein weiterer Abschnitt angelegt, in dem der Anwender die Daten zum Treibhauspotenzial der Materialien erfassen kann.

Als Datengrundlage dient die deutsche Ökobaudat oder EPD-Daten der Hersteller. Der Betreiber der Ökobaudat, das Bundesministerium des

CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB
Treibhauspotenzial (GWP)																
Herstellung (A1-3)				Austausch (B4)		Entsorgung (C3-4)					Vorteile außerhalb Systemgrenze (D)				Gesamt (A-D)	
Referenzfluss (Einheit)	Quelle (UUID o. EPD-Nr.)	GWP Referenzfluss	GWP kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	n	GWP kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Referenzfluss (Einheit)	Quelle (UUID o. EPD-Nr.)	GWP Referenzfluss	n	GWP kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Referenzfluss (Einheit)	Quelle (UUID o. EPD-Nr.)	GWP Referenzfluss	n	GWP kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	GWP kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
kg	EPDRHE-2C	3,990	22,3	0	0	kg	EPDRHE-2C	0,002	1	0,0	kg	EPDRHE-2C	-2,690	1	-15,1	7,3
m3	EPD-VHL-2	-768,340	-19,2	0	0	m3	EPD-VHL-2	989,000	1	24,7	m3	EPD-VHL-2	-406,000	1	-10,2	-4,6
m3	3057d7c0-7	-694,100	-3,3	0	0	kg	553d7a7a-b	1,823	1	4,2	kg	553d7a7a-b	-0,683	1	-1,6	-0,7
m2	a92bd5a5-7	1,736	1,7	0	0	kg	0532424f-8	2,528	1	0,8	kg	0532424f-8	-1,400	1	-0,5	2,1
m3	EPD-DRW-0	121,790	7,3	0	0	m3	EPD-DRW-0	1,520	1	0,1	m3	EPD-DRW-0	-3,360	1	-0,2	7,2
m3	EPD-VHL-2	-768,340	-16,9	0	0	m3	EPD-VHL-2	989,000	1	21,8	m3	EPD-VHL-2	-406,000	1	-8,9	-4,1
kg	b6f81ab5-4	-1,439	-12,7	0	0	kg	b6f81ab5-4	1,643	1	14,5	kg	b6f81ab5-4	-0,738	1	-6,5	-4,7
m3	EPD-SGI-2C	37,100	8,3	0	0	m3	05e29752-f	0,756	1	3,4	-	-	-	1	0,0	11,7
m2	99792cbc-c	0,899	0,9	0	0	kg	0532424f-8	2,528	1	0,2	kg	0532424f-8	-1,400	1	-0,1	1,0
m3	3057d7c0-7	-694,100	-2,6	0	0	kg	553d7a7a-b	1,823	1	3,3	kg	553d7a7a-b	-0,683	1	-1,2	-0,5
m2	03bdc07f-2	1,027	1,0	0	0	m2	03bdc07f-2	0,607	1	0,6	-	-	-	0	0,0	1,6
			-13,1	0,0		73,6					-44,2				16,2	

A 7.11. i

Innern, für Bau und Heimat, stellt eine CSV-Datei zur Verfügung, die in das Tabellenwerkzeug als eigenes Tabellenblatt integriert werden könnte. Da die Daten jedoch sehr umfangreich und unübersichtlich sind, wurde auf eine Integration verzichtet. Stattdessen kann in der geplanten Online-Anwendung des Urban Mining Index eine Schnittstelle zur Ökobaudat geschaffen werden, die eine anwenderfreundliche Verknüpfung der Daten ermöglicht.

Bei der Verwendung des Tabellenwerkzeugs muss der Anwender für die vier Module der Ökobilanz A, B, C und D die Einheit des jeweiligen Referenzdatensatzes aus der Ökobaudat sowie den entsprechenden GWP<sup>53</sup>-Wert manuell erfassen (siehe Abb. A 7.11g und A 2.9 auf Seite 29).

Die Angabe der Datenquelle in Form einer EPD-Nr. oder UUID-Nr. (Identifikationsnummer aus der Ökobaudat) dient nicht der Berechnung des Treibhauspotenzials, sondern der Nachvollziehbarkeit der Daten.

Das Treibhauspotenzial der erfassten Materialien ergibt sich anhand einer Formel, die den GWP-Wert mit der Mengenermittlung (Volumen oder Masse) verknüpft oder direkt ausweist, sofern die Referenzeinheit 1 m<sup>2</sup> ist.

In den folgenden Kapiteln 8 und 9 wird das entwickelte Tabellenwerkzeug an zwei Modellprojekten und einer realen Gebäudeplanung angewandt.

A 7.11 Erfassung eines beispielhaften Dachaufbaus mit dem entwickelten Excel Tool

i Berechnung des Treibhauspotenzials über den Lebenszyklus

53 GWP = Global Warming Potential, deutsch: Treibhauspotenzial.



## 8. Kreislaufpotenziale beispielhafter Konstruktionen im Vergleich

In diesem Kapitel wird der Urban Mining Index für die Berechnung der Kreislaufpotenziale beispielhafter Konstruktionen angewandt.

Die Beispielkonstruktionen sind dem Atlas Recycling entnommen. Hillebrandt und Riegler-Floors haben für die Publikation mithilfe von Studierenden verschiedene recyclinggerechte Konstruktionen im Detail entwickelt.

Im Folgenden werden die Kreislaufpotenziale zweier Modellprojekte aus dem Atlas Recycling dargestellt.<sup>54</sup>

Um aufzuzeigen, wie sich die Ergebnisse kreislaufkonsistenter Konstruktionen von denen konventioneller Konstruktionen unterscheiden, wurden Variantenvergleiche auf Bauteilebene durchgeführt. Hierzu wurden zwei Modellprojekte ausgewählt, die Riegler-Floors und Hillebrandt bereits hinsichtlich der Lebenszykluskosten konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen verglichen haben.<sup>55</sup> Der folgende Vergleich der Kreislaufpotenziale bezieht sich jeweils auf die wesentlichen Bauteile Gründung/Boden, Außenwand, Decke und Dach.

Die Vergleichsanalyse beinhaltet außerdem eine Bilanzierung des CO<sub>2</sub>-Footprints, um zu prüfen, ob und wie sich die kreislaufkonsistenten Konstruktionen von den konventionellen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Klimawandel unterscheiden.

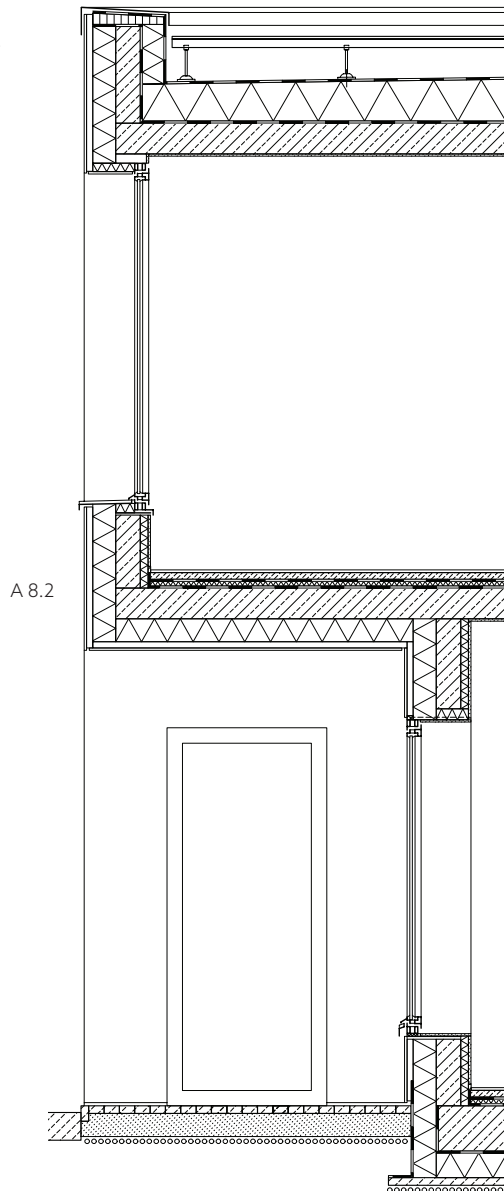
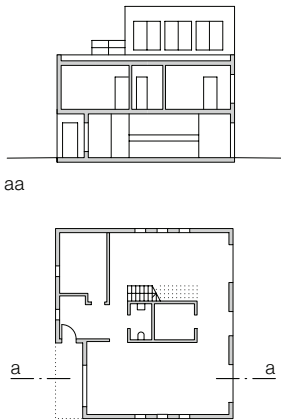
Schließlich wird reflektiert, in wieweit die kreislauforientierte Planung von Hillebrandt und Riegler-Floors durch die quantitative Bewertung mit dem Urban Mining Index bestätigt werden kann.

8.1.	Modellprojekt 1	186
8.2.	Modellprojekt 2	206
8.3.	Zwischenfazit	224

54 Die Kreislaufpotenziale dreier Beispielkonstruktionen wurden mit einer Betaversion des Urban Mining Index bewertet und im Atlas Recycling auszugsweise vorveröffentlicht. Seitdem wurde die Bewertungsmethodik überarbeitet. Die Erhebung von Preisen für Bau- und Abbruchabfälle wurde aktualisiert und der Bauteilkatalog wurde um die Auswertung der Daten anderer Wissenschaftler ergänzt (siehe Kapitel 6.4).

55 Die Lebenszykluskosten wurden für den Atlas Recycling von Riegler-Floors und Hillebrandt unter Mitwirkung von Rückbauunternehmer Dr. Paul Kamrath und Studierenden der Bergischen Universität Wuppertal für das jeweilige Gesamtgebäude berechnet. Die darin enthaltenen Rückbau- und Entsorgungskosten beziehen sich auf den Standort Dortmund und sind als Einzelfallberechnungen zu verstehen. Die im Folgenden dargestellten Entsorgungskosten und Verwertungserlöse beziehen sich auf die erhobenen bundesweiten Durchschnittspreise von 2019 (siehe Kapitel 6.1). Sie werden als Kosten bzw. Erlöse pro m<sup>2</sup> Bauteil dargestellt, da der Fokus der Bewertung in diesem Kapitel auf der Bauteilebene liegt.

**Gebäudetyp** Einfamilienhaus  
**Geschosse** 2 + Staffelgeschoss  
**BGF** 145 m<sup>2</sup>  
**BRI** 1.100 m<sup>3</sup>



### Konventionelle Konstruktion

EPS Schalungssteine mit Betonkern und Fassade aus HPL-Platten in Holzoptik

#### Dach mit Dachterrasse

Terrassendielen (PVC) auf Unterkonstruktion (PVC)<sup>54</sup>, Abdichtungsbahn (PVC, verklebt), Dämmung (EPS), Dampfsperre (PP-Verbundmaterial), Stahlbetondecke, Gipsputz

#### Decken

Vinyl-Belag (PVC) geklebt, Faserzementestrich, Trennlage (Kunststoffmixfolie), Trittschalldämmung (EPS), Stahlbetondecke, Gipsputz, Glasfasertapete

#### Außenwände

HPL-Platten auf Unterkonstruktion, Schalungssteine (EPS) mit Ortbetonkern, Gipskartonplatte geklebt, Glasfasertapete

#### Gründung/Bodenplatte

Vinyl-Belag (PVC) geklebt, Faserzementestrich, Trennlage (Kunststoffmixfolie), Trittschalldämmung (EPS), Bitumenabdichtung, Stahlbetonfundamentplatte, Trennlage (Kunststoffmixfolie), Perimeterdämmung (XPS), Magerbeton, Schotterkoffer aus heterogenem Material

54 Da Terrassendielen und deren Unterkonstruktion in der Regel nicht aus reinem PVC bestehen, wurde angenommen, dass ein PVC-haltiges Holz-Kunststoffkomposit (Wood Plastic Compounds - WPC) geplant ist.

A 8.3

## 8.1. Modellprojekt 1

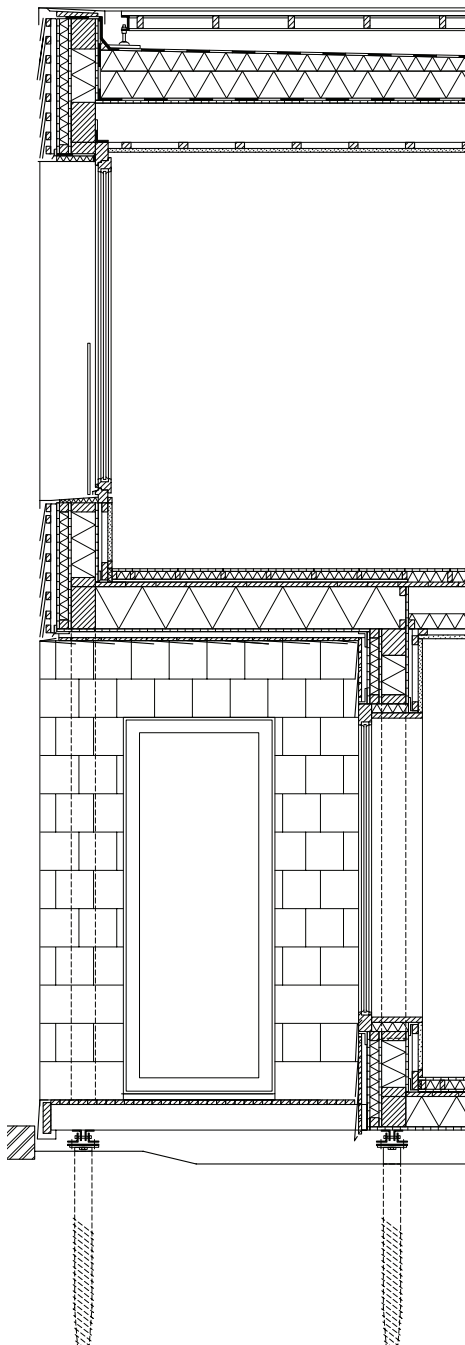
Im ersten Variantenvergleich werden die von Riegler-Floors und Hillebrandt entwickelten Konstruktionen für ein Einfamilienhaus untersucht (Abb. A 8.2). Die Konstruktionsschnitte (Abb. A 8.3 und A 8.4) zeigen den Aufbau der wesentlichen Bauteile in Varianten.

Bei genauer Betrachtung lässt sich erkennen, dass die beiden Wissenschaftlerinnen zwei Konstruktionen gegenübergestellt haben, die sich hinsichtlich der Kreislaufkonsistenz anscheinend extrem unterscheiden. Während die als konventionell beschriebene Konstruktion wie eine Do-it-yourself-Bauweise aus dem Baumarkt wirkt, überzeugt die recyclinggerechte Variante durch eine sorgfältige, kreislauforientierte Detailplanung. So wurden z. B. für Letztere authentische Materialien ausgewählt, für die konventionelle Konstruktion hingegen vermeintlich

A 8.2 Entwurfskonzept Modellprojekt 1: Schnitt und Grundriss EG nach Riegler-Floors/Hillebrandt [173], Maßstab 1:1000

A 8.3 Konventionelle Konstruktion nach Riegler-Floors/Hillebrandt [173], Vertikalschnitt Maßstab 1:50

A 8.4 Urban Mining Design nach Hillebrandt/Riegler-Floors [173], Vertikalschnitt Maßstab 1:50



**Recyclinggerechte Konstruktion**

Holztafelbau mit Fassade aus Lärchen- und Kupferschindeln

**Dach mit Dachterrasse**

Terrassendielen (Robinie), Stellfüße (Edelstahl), Bautenschutzmatte (Recycling-Gummigranulat), Dachabdichtungsbahn (bitumen- und halogenfrei, auf pflanzlicher Basis, mechanisch befestigt), Holzfaserdämmplatte, Dampfsperre (Aluminium-Grobkornfolie), OSB-Bauplatte (formaldehydfrei), Dachbalken (BSH), Lattung, Lehmbauplatte mit Lehmfeinputz

**Decken**

Korkbodenpaneele mit HDF-Trägerplatte (gekllickt), Lagerhölzer, Holzfaser-Trittschalldämmplatte, Schallentkopplung (Kork), massivholz-Diagonalplatte, Deckenbalken (BSH), Luftschalldämmung (Schafschurwolle), Lattung als Installationsebene, Lehmbauplatte mit Lehmfeinputz

**Außenwände**

Holzschindeln (Lärche) auf Lattung bzw. Recycling-Kupferschindeln auf Holzschalung, Konterlattung, MDF-Platte, Konterlattung, Gefachdämmung (Zellulosefaser aus Altpapier), Holzfaserplatte, Konterlattung, Lattung als Installationsebene, Lehmbauplatte mit Lehmputz und Spachtelung

**Gründung/Bodenplatte**

Korkbodenpaneele mit HDF-Trägerplatte, Lagerhölzer, Holzfaser-Trittschalldämmplatte, Schallentkopplung (Kork), Massivholz-Diagonalplatte, Deckenbalken (BSH) auf Stahl-L-Profilen (verzinkt), Gefachdämmung (Zellulosefasern aus Altpapier), Holzschalung, Schraubfundament (Stahl verzinkt)

A 8.4

günstige Kunststoff-Komposite mit Holzoptik. Trotz höherer Herstellungskosten sind die Gesamtkosten der kreislauforientierten Konstruktion in der Lebenszykluskostenanalyse von Riegler-Floors und Hillebrandt um 22% niedriger. Dies wird in der Prognose hauptsächlich auf höhere Instandsetzungs- sowie Rückbau- und Entsorgungskosten zurückgeführt.<sup>56</sup>

Im Folgenden wird untersucht, ob sich die Vorteile der ökologisch orientierten Bauweise auch in den Kreislauf- und Treibhauspotenzialen zeigen. Hierzu werden die Auswertungen der Berechnungen auf Bauteilebene gegenübergestellt und die jeweiligen besonderen Aspekte beschrieben. Aufgrund des Umfangs der Berechnungen wird der Rechenweg nur einmal beispielhaft am Bauteil Gründung erläutert.

<sup>56</sup> Die energetische Performance hinsichtlich der Wärmedurchgangskoeffizienten ist in beiden Konstruktionsvarianten identisch.

**Boden/Gründung**

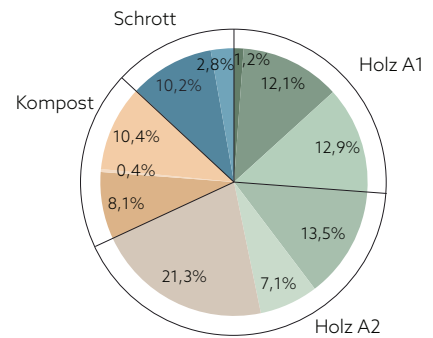
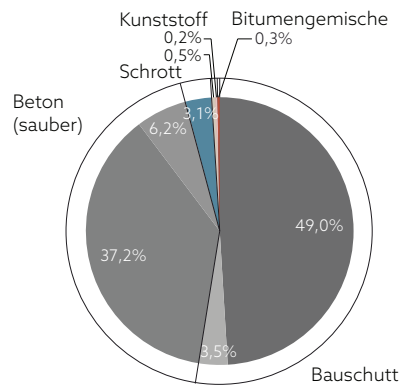
**Konventionelle Konstruktion**

**Recyclingorientierte Konstruktion**

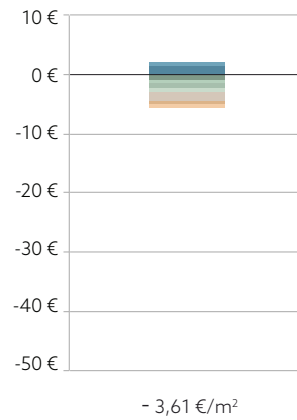
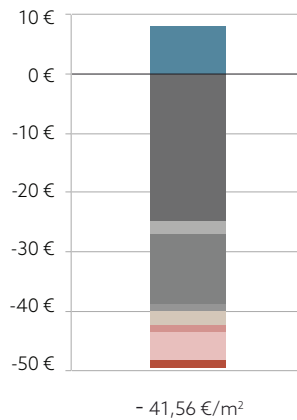
*Materialien und Massen im Lebenszyklus*

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
PVC-Belag, 2 mm	9,9	Kork-Paneele, 10,5 mm	24,0
Faserzementestrich, 45 mm	67,5	Lagerhölzer, Fichte, 30/60 mm	1,3
Trennlagen, Kunststoffgemisch	0,4	Holzfaserdämmplatte, 60 mm	9,2
Trittschalldämmung EPS, 30 mm	0,8	Korkunterlage, 2 mm	0,4
Abdichtung Bitumenbahnen, 5 mm	5,2	Holzfaserverplatte, 8 mm	8,0
Fundamentplatte Beton, 300 mm	720,0	Massivholzplatte, Weißtanne, 30 mm	13,7
Fundamentplatte Bewehrungsstahl	60,0	Brettschichtholzbalke, 140/200 mm	15,2
Wärmedämmung XPS, 100 mm	3,2	Gefachdämmung, Zellulose, 200 mm	11,7
Sauberkeitsschicht Magerbeton, 50 mm	120,0	Schalholz, Lärche, 22 mm	14,5
Tragschicht RC-Schotter, 500 mm	950,0	L-Profil, Stahl verzinkt, 70/70/7 mm	11,5
		Schraubfundamente, Stahl verzinkt, 1600 mm	3,2
	1.937,0		112,7

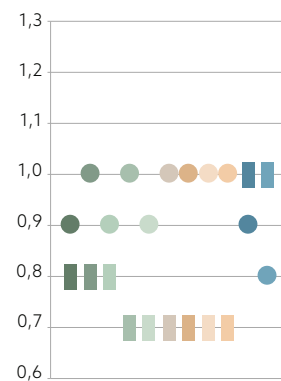
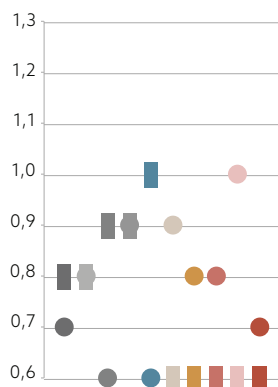
*Wertstoffe - Anteile nach Massen in %*



*Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)*



*Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □*



Hinweis: die Faktoren Arbeit und Wert können im Folgenden für jedes einzelne Material bzw. für jede Bauteilschicht den jeweiligen Grafiken „Faktor Arbeit und Faktor Wert“ entnommen werden. Aus Platzgründen werden im Text nur die durchschnittlichen Faktoren erwähnt oder einige wenige Faktoren erläutert.

### 8.1.1. Vergleichsanalyse Boden/Gründung

Die Aufstellung der Materialien und Massen zeigt, dass es sich bei der konventionellen Konstruktion um eine schwere Bauweise und bei der kreislaufkonsistenten Konstruktion um eine leichte Bauweise handelt. Wie erwähnt, werden in dieser Untersuchung die Kreislaufpotenziale und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Konstruktion bewertet, nicht aber die Auswirkungen der Konstruktionen auf weitere Nachhaltigkeitskriterien. So werden z. B. Speichereffekte der massiven Bauweise, die den Energiebedarf der Nutzungsphase reduzieren können, nicht berücksichtigt.

Bei Betrachtung der Anteile der im Lebenszyklus anfallenden Wertstoffe zeigt sich, dass bei der konventionellen Konstruktion mehr als 95% der Materialien der mineralischen Abfallfraktion zugeordnet werden, während diese bei der recyclinggerechten Variante gar nicht vorkommen. Stattdessen werden dort vorwiegend Materialien verwendet, die dem biologischen Kreislauf zugeordnet werden können.

Rund die Hälfte der mineralischen Baustoffe der konventionellen Gründung kann zudem aufgrund von Bitumen- oder Kleberresten voraussichtlich nicht sortenrein zurückgewonnen werden und wird den „Gemischen aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit geringer Verschmutzung“ zugeordnet (in der Grafik kurz als Bauschutt bezeichnet).

Dies macht sich in der Prognose der Entsorgungskosten bemerkbar, bei der sich die Varianten deutlich unterscheiden. Die höheren Entsorgungskosten der konventionellen Konstruktion entstehen nicht nur durch einen höheren Preis für verschmutzte mineralische Materialien – der bei zukünftig steigendem Anspruch auf sortenrein verwertbare Materialien überdurchschnittlich stark steigen kann –, sondern durch die großen Massen, die zur Entsorgung anfallen. Einzig die größeren Stahlmassen (Bewehrungsstähle) wirken sich in der konventionellen Konstruktion positiv auf zu erzielende Erlöse aus.

Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Konstruktion 0,7 und für die kreislaufgerechte 0,8. Dass die Differenz nicht höher ist, liegt daran, dass die Faktoren für den Parameter Wert vom Preis pro Tonne Wertstoff abgeleitet sind und nicht vom Preis pro m<sup>2</sup> Fläche (s. Skala Kapitel 6, Punkt 6.1.3 und Kapitel 7, Punkt 7.3.1).

Der niedrige Faktor Wert der Kunststoffgemische und der verunreinigten Kunststoffe hat jedoch keinen Einfluss auf deren Kreislaufpotenziale, da für diese Materialien keine Recyclingmethoden existieren und sie deshalb sowohl im hochwertigen als auch im üblichen EoL-Szenario den energetisch verwertbaren Materialien aus fossilen Rohstoffen zugeordnet werden.

Beim Vergleich der Werte für den Faktor Arbeit fällt auf, dass die Faktoren der demontabel geplanten Gründung tatsächlich größtenteils im oberen Bereich liegen (das Maximum beträgt 1,0). Für den Rückbau der Schraubfundamente wurde der Mittelwert angenommen (Faktor 0,8), da hierfür keine Daten erhoben wurden. Für die recyclingorientierte Gründung beträgt der Durchschnittswert 0,95 und für die konventionelle Gründung 0,78. Bei der letztgenannten Variante wirkt sich vor allem der sehr hohe Aufwand für den Rückbau der massiven Fundamentplatte und der verschweißten Abdichtung negativ auf den Faktor Arbeit aus.

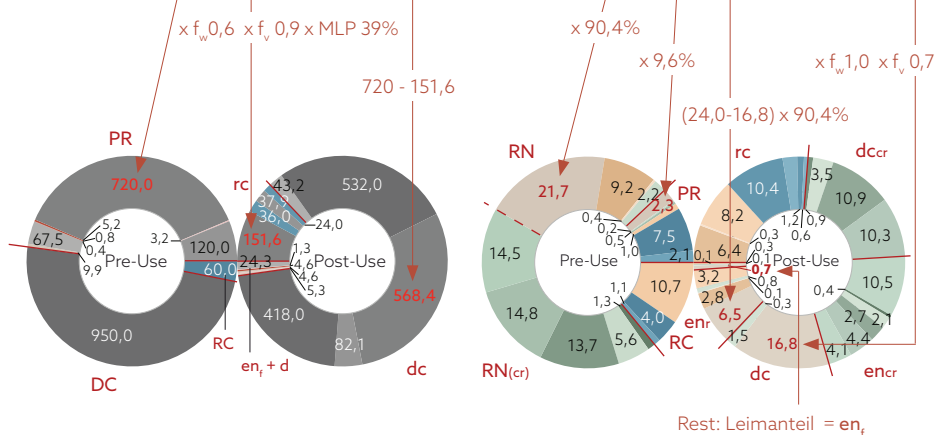
### Konventionelle Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
PVC-Belag	9,9	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
Faserzementestrich	67,5	PR	dc	d	
Trennlagen PE-Folie	0,4	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
EPS	0,8	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
Bitumenabdichtung	5,2	PR	rc 30	en <sub>f</sub>	
Beton	720,0	PR	rc 39	dc	
Bewehrungsstahl	66,0	RC 100	rc 100	rc	
XPS	3,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
Sauberkeitsschicht	120,0	PR	rc 39	dc	
RC-Schotter	950,0	DC 100	dc	dc	
<b>Gesamt</b>	<b>1.937,0</b>				

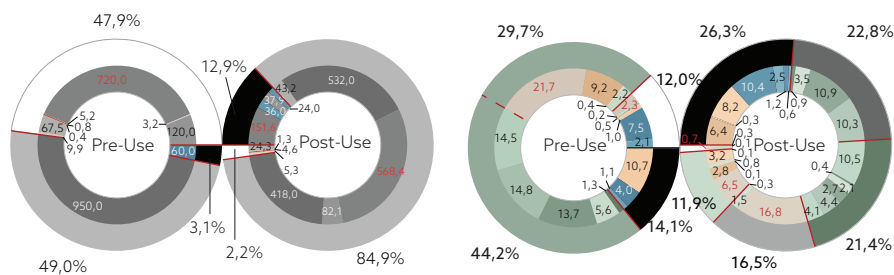
### Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Kork-Paneele	24,0	RN0	90,4 dc	en <sub>r</sub>	
Lagerhölzer, Fichte	1,3	RN100	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
Holzfaserdämmung	9,2	RN100	rc 100c	en <sub>r</sub>	
Korkunterlage	0,4	RN100	rc 100c	en <sub>r</sub>	
Holzfaserverplatte	8,0	RN70	27 dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
Massivholzplatte	13,7	RN100	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
Brettschichtholz	15,2	RN97/0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
Dämmung, Zellulose	11,7	RC91,6	rc 100c	en <sub>r</sub>	
Schalholz, Lärche	14,5	RC100	en <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
L-Profil, Stahl verzinkt	11,5	RC35	rc 100	rc	
Schraubfundamente, Stahl verzinkt	3,2	RC35	rc 100	rc	
<b>Gesamt</b>	<b>112,7</b>				

Berechnung der Kreislaufpotenziale nach Massen



Aufteilung der Kreislaufpotenziale auf die Loops nach Qualitätsstufen



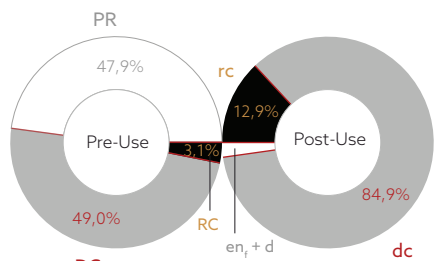
### Kreislaufpotenziale

#### Pre-Use

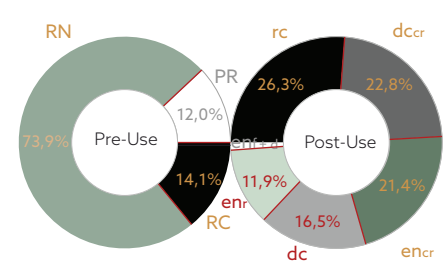
- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

#### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	3,1%	12,9%	16,0%
Loop-Potenzial	52,1%	97,8%	149,9%



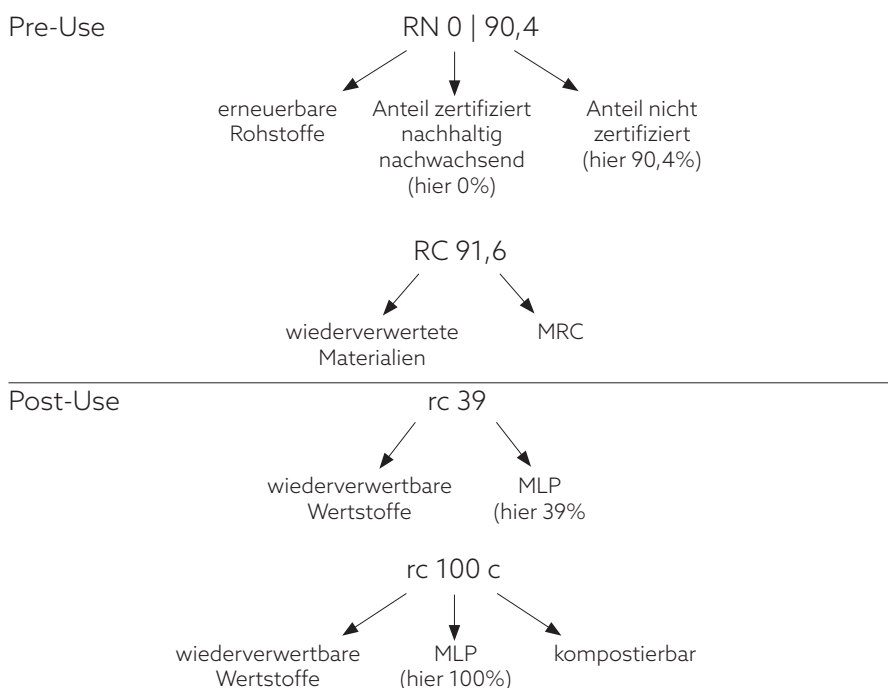
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	88,0%	70,5%	158,5%
Loop-Potenzial	88,0%	98,9%	186,9%

### Kreislaufpotenziale

Am Beispiel des Bauteils Gründung werden im Folgenden die Grafiken zu den Kreislaufpotenzialen („Loops“) erläutert. Bei den nachfolgenden Bauteilen wird zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit auf die detaillierte Darstellung der Berechnung und der Materialmassen in den Loops verzichtet.

In der nebenstehenden Aufstellung sind den eingesetzten Materialien und Massen die materialspezifischen Qualitätsstufen Pre-Use und Post-Use zugeordnet (s. Kapitel 7.2 und 7.6). Die Formelzeichen der Qualitätsstufen sind um den jeweiligen Material-Recycling-Content (MRC) und das Material-Loop-Potenzial (MLP) ergänzt.

Die Abkürzungen werden wie folgt beispielhaft erläutert:



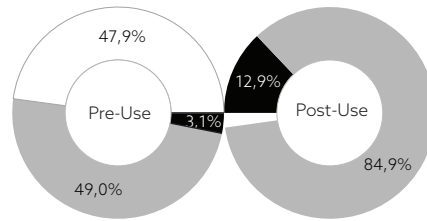
Anhand zweier Materialien wird die Verteilung der Massen auf die Loops erläutert:

Die Betonmassen der Bodenplatte der konventionellen Konstruktion bestehen zu 100% aus Primärmaterial (PR). Im Loop der Pre-Use-Phase sind deshalb unter „PR“ 720 kg/m<sup>2</sup> ausgewiesen (= 37,2% der Gesamtmassen der Konstruktion).

Post-Use wird der Beton mit einem Material-Loop-Potenzial von 39% den wiederverwertbaren Wertstoffen zugeordnet. Nach Multiplikation der Massen mit dem MLP und den Faktoren Arbeit und Wert (s. Grafik Seite 188) ergeben sich 151,6 kg/m<sup>2</sup>, die im Loop der Post-Use-Phase unter „rc“ ausgewiesen sind (720 kg/m<sup>2</sup> x f<sub>w</sub> 0,6 x f<sub>v</sub> 0,9 x MLP 39% = 151,6 kg/m<sup>2</sup>).

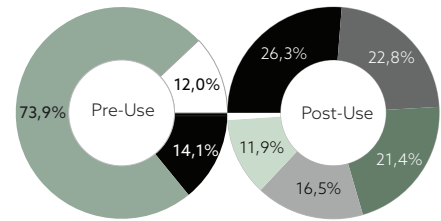
Die Korkpaneele der recyclingorientierten Konstruktion bestehen zu 90,4% aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen. Der Anteil wird im Loop der Pre-Use-Phase deshalb unter „RN“ ausgewiesen (24 kg/m<sup>2</sup> x 94% = 21,7 kg/m<sup>2</sup>). Dies entspricht 22,6% der Gesamtmasse der Konstruktion. Der Rest (9,6%) sind Leimanteile, die aus fossilen Primärrohstoffen (PR) hergestellt werden und deshalb im Loop unter „PR“ ausgewiesen werden.

### Konventionelle Konstruktion



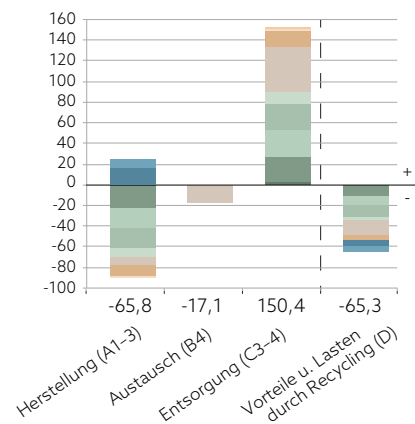
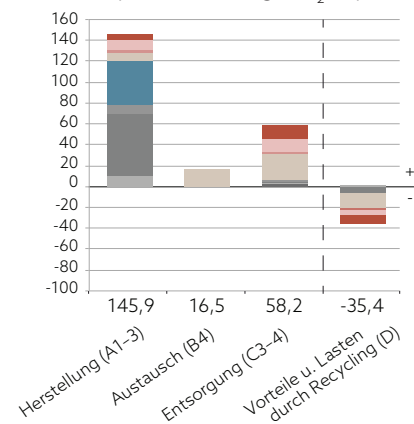
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	52,1%	97,8%	149,9%
Closed-Loop-Potenzial	3,1%	12,9%	16,0%

### Recyclingorientierte Konstruktion



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	88,0%	98,9%	186,9%
Closed-Loop-Potenzial	88,0%	70,5%	158,5%

### Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



Post-Use können die Korkpaneele nach selektivem Rückbau (sd) als Alt-holz A2 weiterverwertet werden. Unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert wird für 70% des Materials dieses EoL-Szenario angenommen, sodass 16,8 kg/m<sup>2</sup> im Loop der Pre-Use-Phase unter „downcyclable“ (dc) ausgewiesen werden ( $24 \text{ kg/m}^2 \times f_w 1,0 \times f_v 0,7 = 16,8 \text{ kg/m}^2$ ). Dies entspricht 14,9% der Gesamtmasse der Konstruktion. Zieht man die 16,8 kg von den 24 kg ab, verbleiben 7,2 kg, die auf die weiteren Qualitätsstufen aufgeteilt werden. Im üblichen selektiven Abbruch (ud) ist davon auszugehen, dass die Wertstoffe energetisch verwertet werden. Von den 7,2 kg/m<sup>2</sup>, die diesem EoL-Szenario zugeordnet werden, können sich 90,4% im natürlichen Kreislauf durch Nachwachsen erneuern, sodass 6,5 kg/m<sup>2</sup> im Loop der Post-Use-Phase unter „energetisch verwertbar aus nachwachsenden Rohstoffen“ (en)<sub>r</sub> ausgewiesen werden. Die restlichen 0,7 kg/m<sup>2</sup> sind der Qualitätsstufe „energetisch verwertbar, fossil“ (en)<sub>f</sub> zugewiesen; dies sind die Leimanteile, die durch die Verbrennung verloren gehen und deren Rohstoffe nicht erneuerbar sind.

Insgesamt ist das Closed-Loop-Potenzial der konventionellen Konstruktion mit 16% wesentlich geringer als das der Variante im Urban Mining Design mit 158,5%. Pre-Use trägt bei der konventionellen Variante nur Bewehrungsstahl aus 100% Sekundärstahl zu geschlossenen Kreisläufen bei (3,1%). Der Schotter geht aufgrund des Qualitätsverlustes (Downcycling) nur in das Loop-Potenzial Pre-Use ein, das somit 52,1% beträgt. Auch Post-Use tragen nur der Bewehrungsstahl und der Beton sowie in geringem Maß die Bitumenbahn mit ihren jeweiligen Material-Loop-

Potenzialen zu geschlossenen Kreisläufen bei. Der große Anteil mineralischer Baustoffe, die am Ende der Nutzungsdauer voraussichtlich nur mit Qualitätsverlust weiterverwertet werden, bewirkt zumindest ein hohes Loop-Potenzial Post-Use (97,8%).

Die recyclingorientierte Variante weist dagegen mit den wiederverwerteten Materialien (Zellulose-Dämmstoff aus Altpapier und Sekundäranteile im Stahl) sowie dem hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe bereits ein hohes Kreislaufpotenzial Pre-Use auf (88%). Die kompostierbaren Materialien Holzfaser-Trittschalldämmung, Kork und Zellulosedämmung (boratfrei) können am Ende der Nutzungsdauer in den biologischen Kreislauf zurückgeführt werden und gehen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeitsfaktoren in den Anteil wiederverwertbarer Wertstoffe ein (26,3%). Bei den massiven Hölzern wurde vorausgesetzt, dass diese bei einer kreislauforientierten Planung aus zertifizierter Forstwirtschaft stammen, somit nachwachsen und in das Closed-Loop-Potenzial Post-Use eingehen können (s. Kapitel 7.4.2 und 7.4.3). Die Konstruktionshölzer werden der Altholzklasse A1 zugeordnet und sind damit stofflich weiterverwertbar (Downcycling im Post-Use-Anteil des Kreislaufpotenzials), während für die bewitterte Schalung nur energetische Verwertung angenommen wird.

Die nicht zertifizierten Anteile der Holzwerkstoffe fließen dagegen in das Loop-Potenzial ein.

#### *Treibhauspotenzial*

Parallel zu den Kreislaufpotenzialen wurde für alle Bauteile dieses Variantenvergleichs das Treibhauspotenzial berechnet.<sup>57</sup>

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die Gründung fällt auf, dass sich die Herstellung der Baustoffe weitgehend gegensätzlich auswirkt: Während die konventionelle Konstruktion hohe Emissionen verursacht, speichern die Hölzer und Holzwerkstoffe der kreislaufgerechten Variante während der Wachstumsphase Kohlenstoff und entziehen der Atmosphäre dabei CO<sub>2</sub>. Allerdings wird dieses bei der energetischen Verwertung am Ende der Nutzungsdauer wieder emittiert, sodass die Bilanz (bis auf die Prozessenergie) ausgeglichen ist. Die frei werdende Energie wird in den nächsten Lebenszyklus exportiert und kann dort fossile Energieträger ersetzen, womit eine Gutschrift für vermiedene Emissionen erzielt wird (Modul D). Lässt man diese Gutschrift außen vor, verursacht die konventionelle Gründung immer noch mehr als das Dreifache an Treibhausgasen gegenüber der kreislaufgerechten Variante. Dabei macht der zweimal auszutauschende PVC-Bodenbelag mehr als 22% der Emissionen im Lebenszyklus aus.

Insgesamt betrachtet kann die Berechnung der Treibhauspotenziale nicht den Vorteil der Kaskadennutzung abbilden. Die Möglichkeit zur längeren Speicherung des Kohlenstoffs bei stofflicher Verwertbarkeit der Hölzer und Holzwerkstoffe bleibt unberücksichtigt.

<sup>57</sup> Zur Ermittlung des Treibhauspotenzials der Konstruktionen wurden herstellereinspezifische Umweltproduktdeklarationen oder generische Daten aus der Ökobaudat verwendet. Die Quellen werden aufgrund der Vielzahl nicht einzeln im Quellenverzeichnis aufgeführt, können aber anhand der Deklarationsnummern (EPD) oder Identifikationsnummern (Ökobaudat) im mitgelieferten Exceltool nachvollzogen werden.

**Außenwand**

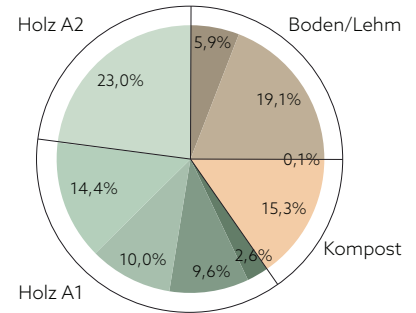
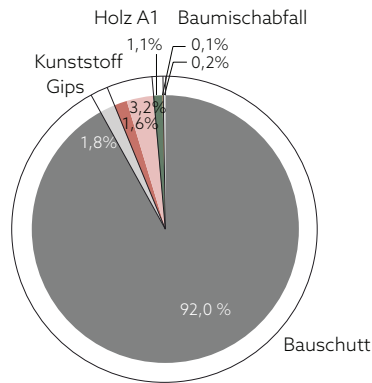
**Konventionelle Konstruktion**

**Recyclingorientierte Konstruktion**

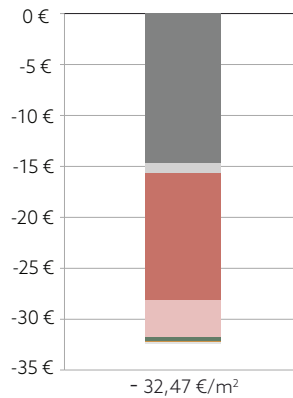
*Materialien und Massen im Lebenszyklus*

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
HPL-Platten, 6 mm	16,8	Lärchenschindeln, 20mm	13,2
Lattung, Fichte, 40/60 mm	6,0	Lattungen, Fichte, 2 x 40/60 mm + 60/60 mm	9,2
Betonfüllung, 200 mm	484,2	Dämmung, Zellulose (boratfrei), 60 + 160 mm	14,0
Schalungssystem, EPS, 220 mm	8,4	Holzständerwerk, KVH, 80/160 mm	8,8
Gipskartonplatte, 12,5 mm	9,3	Holzfaserplatten, 5, 8 und 15 mm	21,1
Glasfasertapete	0,5	Vorwandinstallation, Kanthölzer, 24 + 40/60 mm	2,4
Dispersionsfarbe	1,3	Lehmbauplatte, 25 mm	17,5
	<b>526,5</b>	Flachsgewebe	0,1
		Lehmputz, 3 mm	5,4
			<b>91,7</b>

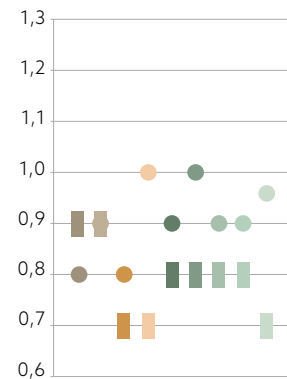
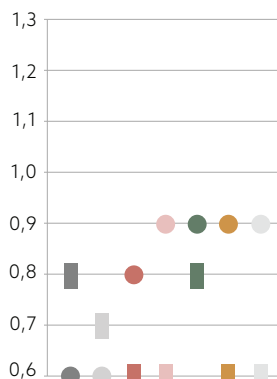
*Wertstoffe - Anteile nach Massen in %*



*Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)*



*Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □*



### 8.1.2. Vergleichsanalyse Außenwand

Die tragende Außenwand der konventionellen Variante besteht aus einem Schalungssystem aus Polystyrol (EPS), das mit Beton verfüllt wird und gleichzeitig als Dämmung dient. Eine solche Konstruktion wurde bisher nicht auf ihre Rückbau-Eignung untersucht. Nach Herstellerangaben [174] verbindet sich der Beton formschlüssig<sup>58</sup> und kleinteilig mit dem EPS. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass eine sortenreine Trennung nur mit sehr hohem Aufwand möglich ist. Der Beton wurde den Gemischen aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit geringer Verschmutzung (Bauschutt) zugeordnet.<sup>59</sup>

Die HPL-Fassadenplatten bestehen aus Kraftpapieren, die mit Kunstharz getränkt sind und unter hohem Druck verpresst werden (High Pressure Laminates – HPL). Aufgrund des hohen Kunstharzanteils (30–40%) wurden die Platten den Kunststoffabfällen zugeordnet. Eine stoffliche Verwertung des Komposits ist nicht möglich. Gemäß Nutzungsdauertabelle des BNB-Systems müssen die Platten einmal während des angenommenen Gebäude-Lebenszyklus von 50 Jahren ausgetauscht werden, somit gehen die Platten doppelt in die Material- und Wertstoffmassen ein. In den Gesamtmassen der konventionellen Außenwand überwiegt die mineralische Abfallfraktion.

Die Außenwand der kreislauforientierten Variante besteht dagegen vollständig aus natürlichen Materialien, größtenteils aus zertifizierter Forstwirtschaft bzw. Wiederverwertung (Zellulosedämmung).

Die resultierenden Wertstoffe führen auch für dieses Bauteil zu erheblich unterschiedlichen Entsorgungskosten der beiden Varianten. Bei der konventionellen Außenwand werden für die großen Mengen des verunreinigten Betons und das Polystyrol hohe Entsorgungskosten prognostiziert. Das EPS macht zwar nur 1,6% der Gesamtmassen, aber nahezu 40% der Entsorgungskosten aus.

Dagegen werden für die kreislauforientierte Außenwandkonstruktion aufgrund der geringen Massen und der sortenreinen Trennbarkeit geringe Entsorgungskosten anfallen.

Die nebenstehenden Grafiken für die Faktoren Arbeit und Wert zeigen die Zuordnung dieser beiden Parameter auf Materialebene.

Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Konstruktion 0,67 und für die kreislaufgerechte rund 0,8.

Der Aufwand für den Rückbau der konventionellen inneren Wandbekleidung aus Gipskarton wurde geschätzt. Aufgrund der Verklebung auf der inneren EPS-Schalung muss von aufwendig zu entfernenden EPS-Anhaftungen ausgegangen werden, sodass die Platten mit einem Faktor von 0,6 in die stoffliche Gipsverwertung eingehen.

Die Urban-Mining-gerechte Außenwandkonstruktion ist dagegen verklebungsfrei geplant, sodass ein sortenreiner Rückbau möglich ist. Für den Lehmputz, das Flachsgewebe und die Lehmbauplatten könnte eine gemeinsame Verwertung angenommen werden. Vorsichtshalber wurde

58 Schwalbenschwanzförmige Innenseite der „Schalungssteine“.

59 Eine Zuordnung zum Bauschutt mit hoher Verschmutzung erfolgte nicht, da Kunststoffe prinzipiell in Aufbereitungsanlagen über Windsichter abgetrennt werden können. Aufgrund der Verzahnung mit dem EPS ist jedoch davon auszugehen, dass Reste von EPS im gebrochenen Beton verbleiben.

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

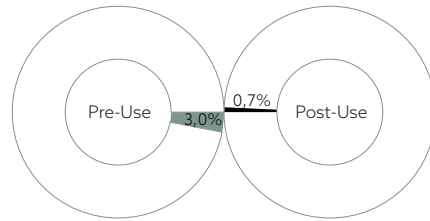
## Konventionelle Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
HPL-Platten	16,8	RN60	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>
Lattung, Fichte	6,0	RN100	dc	en <sub>r</sub>
Betonfüllung	484,2	PR	dc	d
Schalungssystem, EPS	8,4	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Gipskartonplatte	9,3	RN2	rc	99 d
Glasfasertapete	0,5	PR	d	d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	d	d
<b>Gesamt</b>	<b>526,5</b>			

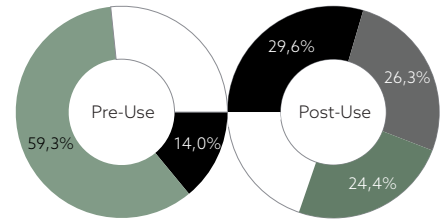
## Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Lärchenschindeln	13,2	RN100 0	en <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Lattungen, Fichte	9,2	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Dämmung, Zellulose	14,0	RC	91,6 rc	en <sub>r</sub>
Holzständerwerk	8,8	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Holzfaserverplatten	21,1	RN70 27	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Vorwand, Kanthölzer	2,4	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Lehmputzplatte	17,5	RN0 3	rc	100 dc
Flachsgewebe	0,1	RN0 100	rc	100 en <sub>r</sub>
Lehmputz	5,4	PR	rc	100 dc
<b>Gesamt</b>	<b>91,7</b>			

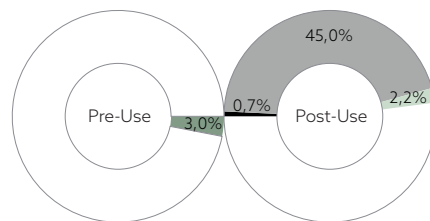
## Kreislaufpotenziale



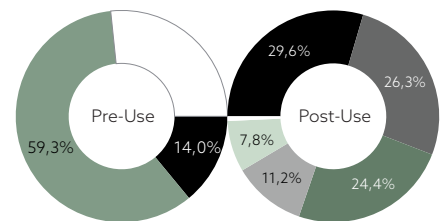
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	3,0%	0,7%	3,7%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	73,3%	80,3%	153,6%

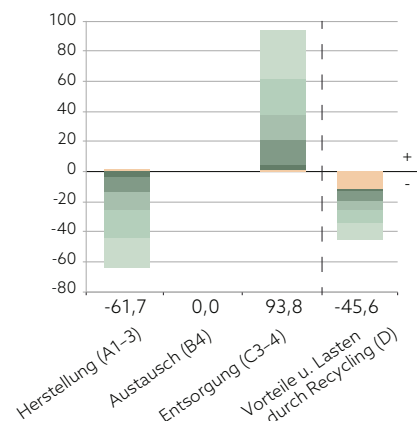
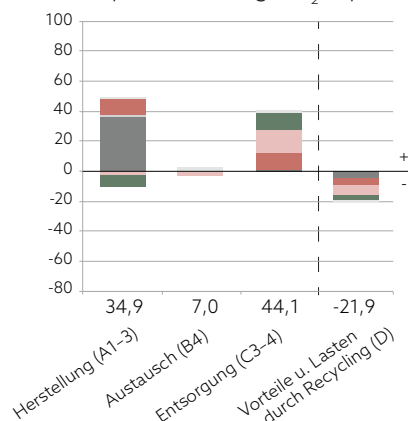


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	3,0%	47,9%	50,9%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	73,3%	99,3%	172,6%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



jedoch eine Trennung des Putzes und des Gewebes von den Platten mit mittlerem Arbeitsaufwand (Faktor 0,8) angenommen. Für die massiven Hölzer wurde keine zerstörungsfreie Demontage zwecks Wiederverwendung, sondern ein selektiver maschineller Rückbau zur stofflichen Verwertung angenommen, da die verwendeten Hölzer nicht als besonders wertvoll gelten (Faktor Arbeit 0,9 statt 0,8, vgl. Bauteilkatalog Kapitel 6.5 Bauteile 335.01 und 335.02 sowie Kapitel 5, Abb. A 5.4 auf Seite 92). Der geringere Rückbauaufwand der kreislaufgerechten Konstruktion zeigt sich in einem durchschnittlichen Faktor Arbeit von 0,9 gegenüber der konventionellen Konstruktion von 0,8. Gewichtet man den durchschnittlichen Faktor Arbeit nach Massen (so wie er in die Kreislaufpotenziale einfließt), beträgt das Verhältnis sogar 0,93 zu 0,62.

Für die Berechnung des Kreislaufpotenzials ist relevant, dass die konventionelle Außenwand fast vollständig aus nicht erneuerbaren Primärmaterialien besteht. Von allen untersuchten Bauteilen weist sie mit 3% das geringste Loop- und Closed-Loop-Potenzial Pre-Use auf. Auch am Ende der Nutzungsdauer (Post-Use) werden voraussichtlich nicht einmal 1% der Materialien im geschlossenen Kreislauf geführt. Einzig die Gipskartonplatten sind prinzipiell wiederverwertbar. Aufgrund der (Un-)Wirtschaftlichkeit der sortenreinen Trennung gehen jedoch nur rund 40% der Platten in das End-of-Life-Szenario stoffliche Verwertung ein, während für 60% des Gipsbaustoffs eine Deponierung angenommen wird.

Für knapp die Hälfte der Materialien wird eine Weiterverwertung Post-Use prognostiziert. Hierzu trägt hauptsächlich der mit hohem Rückbauaufwand sortenrein zu trennende Beton bei. Die Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen (HPL und EPS) sind zwar energetisch verwertbar, gehen bei der Verbrennung jedoch unwiederbringlich verloren (nicht erneuerbar); sie tragen somit nicht zum Kreislaufpotenzial bei.

Die recyclinggerechte Außenwand besticht dagegen durch sehr hohe Kreislaufpotenziale. Der „weiße Anteil“ in der Grafik der Pre-Use-Phase resultiert hauptsächlich aus den primären abiotischen Lehmbaustoffen der inneren Wandbekleidung. Lehm ist zwar aufgrund seiner Plastizität sehr gut recyclingfähig, aber derzeit als Sekundärrohstoff nicht erhältlich, da kaum noch Gebäude aus Lehm zurückgebaut werden. Post-Use tragen die Lehmbaustoffe und die lt. Atlas Recycling kompostierbare Zellulosedämmung knapp 30% zu geschlossenen Kreisläufen bei, während für den hohen Anteil zertifizierter Hölzer unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert zu fast gleichen Teilen eine stoffliche und eine energetische Kaskadennutzung prognostiziert wird.

Die Berechnungen der Treibhauspotenziale spiegeln ein ähnliches Bild wie bei der Bodenplatte wider. Auffällig ist der hohe CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der HPL-Platten bei der energetischen Verwertung. Da der generische Datensatz für HPL-Platten in der Ökobaudat nur ein Cradle-to-Gate-Datensatz ist (Modul A1-3), wurden die Emissionen in Modul C anhand des Datensatzes für Hausmüllverbrennung berechnet. Die Datensätze für die Verbrennung von Kunststoffen oder Holzwerkstoffen würden noch höhere Emissionswerte liefern. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Außenwand aus natürlichen Materialien ist wiederum relativ ausgeglichen.

Hinweis:

Die Masse des Materials wird immer mit den Faktoren Arbeit und Wert multipliziert, also bestimmen beide Faktoren nach Masse die Kreislaufpotenziale.

Addiert man alle Faktoren der Konstruktion für den Parameter Arbeit und teilt sie durch die Anzahl der Materialien, ergibt sich ein Durchschnittsfaktor, der - ohne Berücksichtigung der Massen - eine einfache Auskunft über den Rückbauaufwand der Konstruktion gibt.

Multipliziert man erst jeden einzelnen Faktor mit der jeweiligen Materialmasse und teilt dann das Ergebnis durch die Gesamtmasse ergibt sich ein massengewichteter Durchschnittsfaktor. Dieser deutet an, wie sich der Parameter Arbeit in den Kreislaufpotenzialen niederschlägt, da die Kreislaufpotenziale massengewichtet sind.

Decke

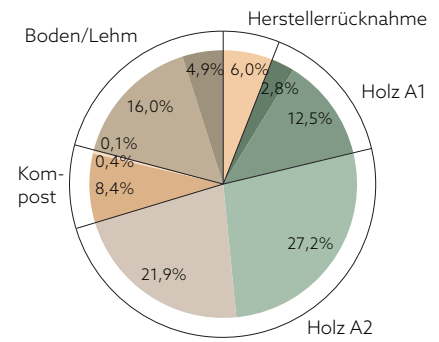
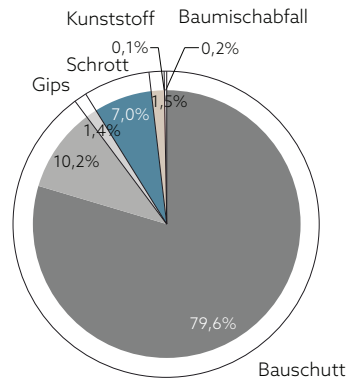
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

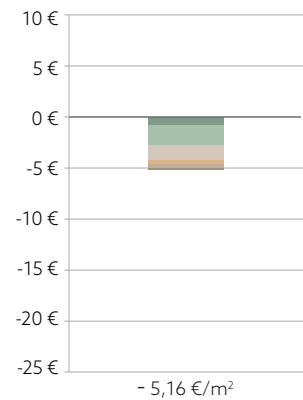
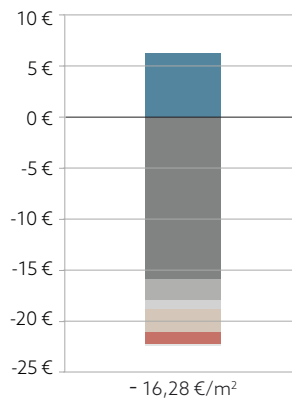
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
PVC-Belag, 2 mm	9,9	Kork-Paneele, 10,5 mm	24,0
Faserzementestrich, 45 mm	67,5	Lattungen, Fichte, 30/60 + 40/60 mm	1,3
Trennlage PE-Folie	0,2	Trittschalldämmung, Holzfaser, 60 mm	9,2
Trittschalldämmung EPS, 30 mm	0,8	Korkunterlage, 2 mm	0,4
Deckenplatte Beton, 220 mm	528,0	Massivholzplatte, Weißtanne, 30 mm	13,7
Deckenplatte Bewehrungsstahl	46,6	Brettschichtholzbalken, 140/280 mm	29,8
Gipsputz, 10 mm	9,0	Gefachdämmung, Schafwolle (biozid- und baratfrei), 100 mm	6,6
Dispersionsfarbe	1,3	Lehmbauplatte, 25mm	17,5
	<b>663,3</b>	Flachsgewebe	0,1
		Lehmputz, 3mm	5,4
			<b>109,6</b>

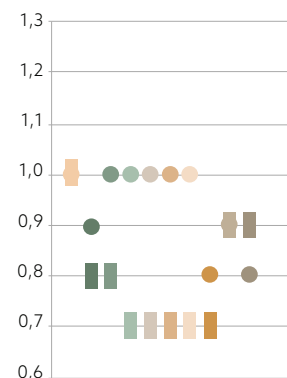
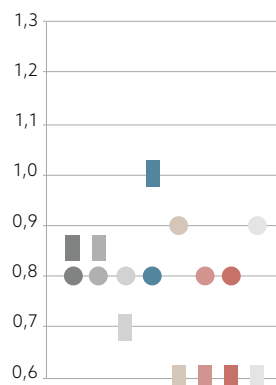
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



### 8.1.3. Vergleichsanalyse Decke

Die konventionelle Decke ist in schwerer Bauweise aus Stahlbeton mit schwimmendem Estrich geplant, während die kreislauforientierte Decke in Leichtbauweise aus natürlichen Materialien und ohne Estrich entworfen ist. Die leichte Decke ist für ein Einfamilienhaus durchaus umsetzbar, müsste aber sorgfältig (auch zu den flankierenden Bauteilen) schallentkoppelt werden.

In beiden Varianten werden die Oberbodenbeläge während der Gebäudenutzungsdauer voraussichtlich zweimal ausgetauscht, gehen also dreifach in die Material- und Wertstoffmassen ein. Der Anstrich (Nassabriebklasse 3) der konventionellen Deckenbekleidung wird nach BNB-Nutzungsdauerentabelle sogar neunmal im Lebenszyklus erneuert, dies macht sich aber aufgrund der geringen Massen kaum bemerkbar. Bei dem Lehmfeinputz der kreislaufgerechten Deckenbekleidung handelt es sich bereits um ein Oberflächenfinish. Beschädigungen können durch Plastifizieren (Aufweichen) und Reiben oder Spachteln repariert werden (siehe Kolumba-Museum von Peter Zumthor). Ein Austausch wurde deshalb nicht einkalkuliert.

Die Gefachdämmung aus Schafwolle wird von einem Hersteller zurückgenommen, um das Material zu recyceln. Alternativ ist aber auch eine Wiederverwendung des hochwertigen Dämmmaterials als Stopfwohle oder Fugenband sowie eine Kompostierung möglich [175].

Die Grafik zu den Wertstoffen der konventionellen Decke zeigt, dass rund 90% der Materialien den mineralischen Gemischen mit geringer Verschmutzung (Bauschutt) zugeordnet werden. Durch das Aufbringen von Gipsputz wird die Stahlbetondecke verunreinigt.<sup>60</sup> Der Estrich wird durch Kleberreste des PVC-Belags verunreinigt.

Die Verunreinigung spiegelt sich auch in den Kosten wider: Die Entsorgungskosten der konventionellen Decke sind um ein Drittel höher als die der leichten, recyclinggerechten Konstruktion. Dies liegt hauptsächlich an den großen Mengen Beton (und Faserzementestrich), die aufgrund von Restanhaftungen (Gips und Kleber) bzw. Beimischungen (Glasfasern) als verschmutzte mineralische Gemische recht teuer entsorgt werden müssen. Die zu erwartenden Erlöse für den Bewehrungsstahl gleichen dies nur zu einem kleinen Teil aus.

Damit in Zusammenhang steht der Faktor Wert: Der durchschnittliche Faktor für die konventionelle Decke beträgt 0,7, für die recyclinggerechte Deckenkonstruktion hingegen 0,8.

Die durchschnittlichen Faktoren für den Rückbauaufwand weisen eine leicht höhere Differenz auf: Während der durchschnittliche Faktor Arbeit für die konventionelle Decke bei 0,8 liegt, beträgt er für die kreislauforientierte Decke 0,94 (massengewichtet sogar 0,8 zu 0,97). Bei der letztgenannten wurde z.B. eine Verklebung des Deckenbelags vermieden,

<sup>60</sup> Gips ist sulfathaltig und darf nicht mit anderen mineralischen Baustoffen verwertet werden. In Recycling-Gesteinskörnung für Beton würde der Gips treibend wirken und den Beton im nächsten Lebenszyklus damit schädigen. Um eine Rezyklierfähigkeit von Beton zu gewährleisten, sollte das Aufbringen von Gipsputz deshalb unbedingt vermieden werden.

### Legende Kreislaufpotenziale

#### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

#### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

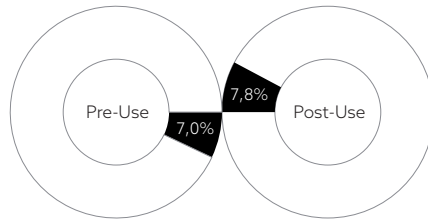
### Konventionelle Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
PVC-Belag	9,9	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Faserzementestrich	67,5	PR	dc	d
Trennlage PE-Folie	0,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Trittschalldäm. EPS	0,8	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Deckenplatte Beton	528,0	PR	dc	d
Bewehrungsstahl	46,6	RC100	rc100	rc
Gipsputz	9,0	PR	rc99	d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
<b>Gesamt</b>	<b>663,3</b>			

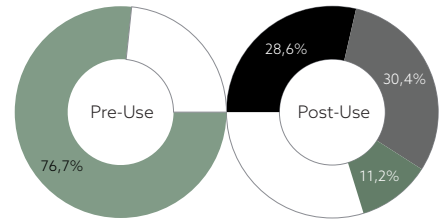
### Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Kork-Paneele	24,0	RN0 90,4	dc	en <sub>r</sub>
Lattungen, Fichte	1,3	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Holzfaserdämmung	9,2	RN0 100	rc100c	en <sub>r</sub>
Korkunterlage	0,4	RN0 100	rc100c	en <sub>r</sub>
Massivholzplatte	13,7	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Brettschichtholz	29,8	RN97 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Schafwolldämmung	6,6	RN0 100	rc100c	en <sub>r</sub>
Lehmbauplatte	17,5	RN0 3	rc100	dc
Flachsgewebe	0,1	RN0 100	rc100c	en <sub>r</sub>
Lehmputz	5,4	PR	rc100	dc
<b>Gesamt</b>	<b>109,6</b>			

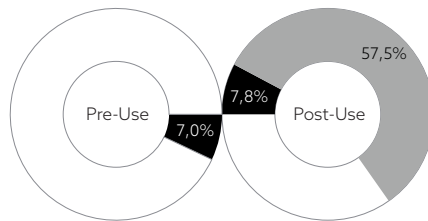
### Kreislaufpotenziale



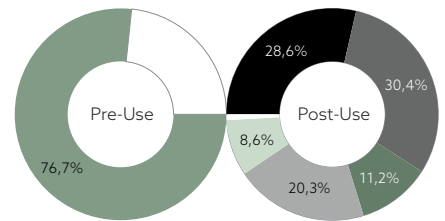
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	7,0%	7,8%	14,8%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	76,7%	70,2%	146,9%

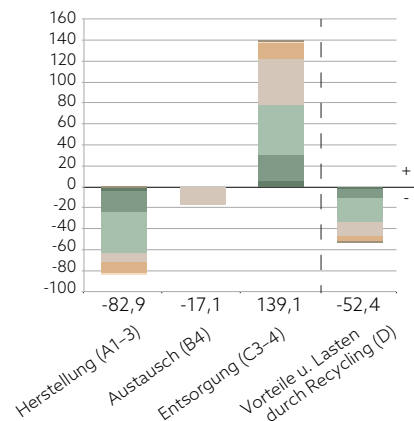
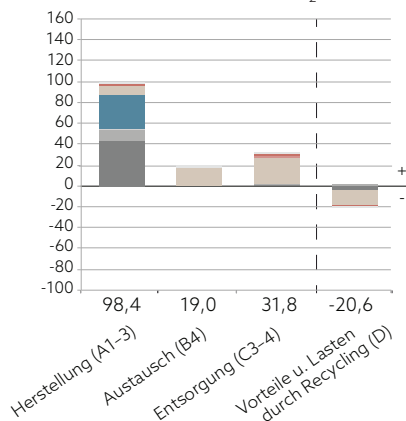


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	7,0%	65,2%	72,2%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	76,7%	99,1%	175,8%

### Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



indem Korkpaneele mit Clickverbindung verwendet werden. Der Kork ist zwar auf der Trägerplatte verklebt, aber da die beiden Materialien homogen sind, ist eine Trennung am Ende der Nutzungsdauer nicht notwendig. Die Korkpaneele werden der Altholzkategorie A2 zugeordnet. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit für den selektiven Rückbau (Faktor Arbeit 1,0 und Faktor Wert 0,7) werden die Paneele zu 70% der stofflichen Verwertung und zu 30% der energetischen Verwertung zugeordnet. Sie fließen in das Loop-Potenzial Post-Use ein. Da nach eigener Recherche kein Hersteller Kork-Paneele aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft führt, ist der geschlossene Kreislauf hier nicht gesichert.

Die Kreislaufpotenziale der Decke sind insgesamt denen der Außenwand ähnlich: Die konventionelle Decke weist in der Summe ein Closed-Loop-Potenzial von nur 14,8% aus, die recyclinggerechte Decke hingegen von 146,9%. In die Pre-Use-Phase der konventionellen Konstruktion geht nur der Bewehrungsstahl als Sekundärstahl ein. Post-Use ist der Anteil an weiterverwertbaren Materialien etwas höher als bei der Außenwand, da der Rückbauaufwand für die Decke geringer eingeordnet wird: Die Betonmassen der Decke werden mit einem Faktor Arbeit von 0,8 multipliziert, diejenigen der Außenwand mit nur 0,6. Dies bewirkt ein Loop-Potenzial der konventionellen Decke von 72,2%.

Bei der recyclingorientierten Decke unterscheiden sich Loop- und Closed-Loop Potenzial nur in der Post-Use-Phase. Da in der Pre-Use-Phase keine weiterverwerteten Materialien eingesetzt werden, liegen Loop- und Closed-Loop-Potenzial gleich hoch bei 76,7%. Hier gehen die nachwachsenden Massivhölzer und Holzwerkstoffe (Korkpaneele) ein.

In der Post-Use-Phase überwiegt der Anteil weiterverwertbarer Materialien, die zusätzlich nachwachsen. Die Brettschichtholzbalken z.B. können zersägen und zu Spanplatten weiterverarbeitet werden. Da die Zeit, die ein Baum braucht, um nachzuwachsen, in etwa der Lebensdauer eines Bauwerks entspricht, wird der Kreislauf damit geschlossen. Durch die stoffliche Kaskadennutzung bleibt der Kohlenstoff im neuen Holzwerkstoff gespeichert und das Klima wird auf diese Weise im kleinen Maßstab geschützt.

In der Ökobilanz kann diese Kaskadennutzung leider nicht abgebildet werden. Wie die Grafik zum Treibhauspotenzial der recyclinggerechten Variante zeigt, wird in der Entsorgungsphase die energetische Verwertung des Holzes angesetzt, was zu hohen Emissionen führt. Die Brettschichtholzbalken geben bei der Verbrennung pro m<sup>2</sup> Deckenfläche knapp 50 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente frei (hellgrüner Anteil im Modul D). Für die energetische Nutzung und die vermiedenen Emissionen aus fossilen Energieträgern erfolgt im Modul D eine Gutschrift von ca. 22 kg CO<sub>2</sub>. Der Datensatz für Brettschichtholz in der Ökobaudat [176] enthält auch ein alternatives End-of-Life-Szenario mit stofflicher Verwertung. Danach würde im Modul D weniger als 1 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> Deckenfläche gutgeschrieben. Dennoch muss in Modul C der Wert für die Verbrennung angesetzt werden, da davon ausgegangen wird, dass das Holz spätestens im nächsten Lebenszyklus verbrannt wird. Der Ansatz dieses Szenarios liefert deshalb ein schlechteres Ergebnis, obwohl das CO<sub>2</sub> länger gespeichert wird.

**Dach**

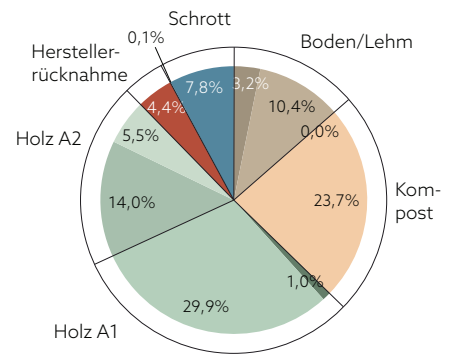
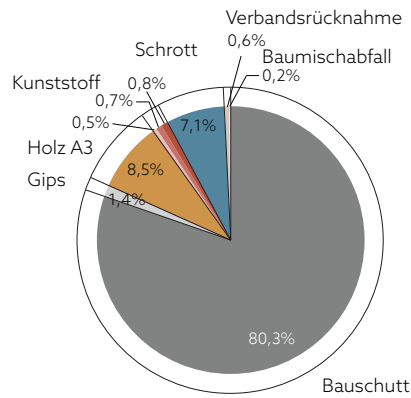
**Konventionelle Konstruktion**

**Recyclingorientierte Konstruktion**

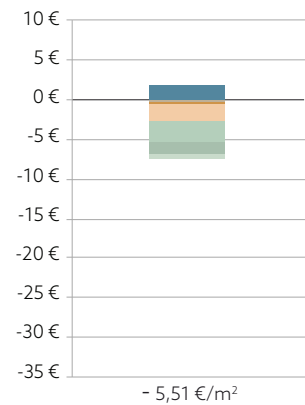
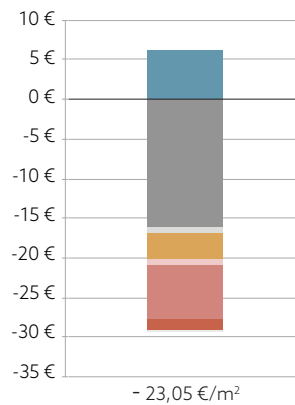
*Materialien und Massen im Lebenszyklus*

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
■ Terrassendielen, Holz-PVC-Komposit, 26 mm, inkl. Unterkonstruktion	56,1	■ Terrassenholz, Robinie, 30/50 + 40/90 mm	25,3
■ Stelzlager, PVC	3,0	■ Stahlprofile 100/55/4,1 mm	6,6
■ Abdichtung, PVC 1,5 mm	3,88	■ Dachabdichtung, pflanzliche Basis, 3 mm	3,7
■ Gefälledämmung, EPS, im Mittel 200 mm	4,5	■ Holzfaserdämmung, 180 + 70-140 mm	40,0
■ Dampfsperre, Bitumenbahn mit Aluminiumeinlage, 5 mm	5,2	■ Dampfsperre, Aluminium, 0,05 mm	0,1
■ Deckenplatte, Beton, 220 mm	528,0	■ OSB/3-Platte, 15 mm	9,3
■ Deckenplatte, Bewehrungsstahl	46,6	■ Brettschichtholz, Fichte, 120/260 mm	23,7
■ Gipsputz, 10mm	9,0	■ Lattung, Fichte, 40/60 mm	1,7
■ Dispersionsfarbe	1,3	■ Lehmbauplatte, 25 mm	17,5
	657,6	■ Flachsgewebe	0,1
		■ Lehmputz, 3 mm	5,4
			133,4

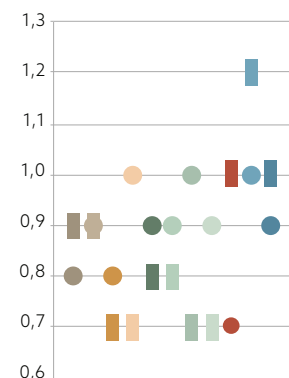
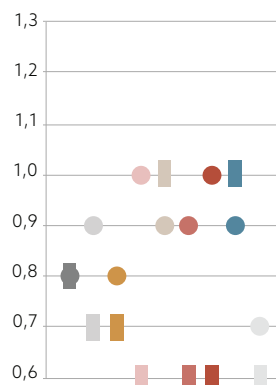
*Wertstoffe - Anteile nach Massen in %*



*Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)*



*Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □*



#### 8.1.4. Vergleichsanalyse Dach

Das Dach des Modellprojekts 1 ist ein Flachdach mit Dachterrasse. Bei der konventionellen Variante bestehen die Terrassendielen aus Holz-Kunststoff-Komposit (Wood Plastic Compounds – WPC). Das Kompositmaterial ist gemäß Verbands-EPD [177] zwar im selben Produktkreislauf recyclingfähig, aber da keine Rücknahmesysteme bestehen (und auch nicht absehbar sind), muss davon ausgegangen werden, dass es am Ende der Nutzungsdauer energetisch verwertet wird. WPC mit PVC-Anteil ist zudem in die Altholzkategorie A III einzustufen (wegen halogenorganischer Verbindungen im PVC-Anteil) und kann somit auch nicht von der Holzwerkstoffindustrie stofflich weiterverwertet werden (vgl. Kapitel 3, Abb. A 3.5). Der Belag der recyclinggerechten Variante soll aus massivem Robinienholz hergestellt werden.

Die Abdichtung des konventionellen Dachaufbaus besteht aus einer herkömmlichen PVC-Folie. Für saubere Kunststoffabdichtungen existiert in Europa das Rücknahmesystem „Roofcollect“. Wenn die PVC-Folie vlieskaschiert ist (was hier unterstellt wird), kann sie trotz vollflächiger Verklebung nach den ausgewerteten Untersuchungen von Graubner et al. (siehe Anlage 2) rückstandsfrei und mit geringem Aufwand entfernt werden. Deshalb wird die Bahn den wiederverwertbaren Wertstoffen zugeordnet.<sup>61</sup>

Für die recyclingfähige Konstruktion wurde eine innovative Abdichtungsbahn eines belgischen Herstellers gewählt, die bis zu 60% aus Pflanzenölen und Kiefernharzen (Reststoffe der Biopolymerherstellung und der Papierindustrie) besteht. Weitere Inhaltsstoffe sind Styrol-Butadien-Styrol (SBS), mineralische Füllstoffe, ein Polyester-/Glasvlies sowie eine weiße Acrylatbeschichtung auf der Oberfläche. Die Cradle-to-Cradle-zertifizierte Abdichtung wurde in einem Versuchsstand untersucht (siehe Kapitel 6.2, Seite 124). Laut Verarbeitungsrichtlinien des Herstellers muss sie vollflächig mit dem Untergrund verklebt werden. Eine mechanische Befestigung (wie in dieser Studie angenommen) liegt damit in der Verantwortung des Planers. Nach Herstellerangaben ist die Bahn recyclingfähig. Für Bitumenbahnen hat der Hersteller bereits (in Belgien) ein Rückholssystem aufgebaut. Das neue Produkt fällt noch nicht zum Rückbau an. Es wird angenommen, dass sich das Rückholssystem bei Verbreitung des Produkts ausweitet.

Die Terrassenbeläge und Abdichtungen müssen voraussichtlich einmal im Gebäudelebenszyklus ausgetauscht werden, somit gehen die Materialien doppelt in die Massenberechnungen ein.

Betrachtet man die Entsorgungskosten, schlagen bei der konventionellen Dachkonstruktion nicht nur die großen Betonmassen zu Buche, sondern auch die hohen Kosten für die EPS-Dämmung. Die WPC-Terrassendielen, die als Altholz A3 entsorgt werden müssen, wurden defensiv mit dem

<sup>61</sup> PVC-Abdichtungen sind zwar recyclingfähig, aber aus anderen Gründen nicht empfehlenswert: Bei der Herstellung von PVC entstehen giftige Emissionen, während der Nutzung treten Weichmacher aus und im Brandfall emittieren giftige Gase. Diese Aspekte sind aber keine Kriterien des Urban Mining Index. Das Kriterium Schadstoffe wurde geprüft: Die Produkte gängiger Hersteller halten die Kriterien auf Seite 325, Abb. A 5.3 ein. Es ist jedoch diskussionswürdig, ob PVC generell in die Liste der Schad- und Risikostoffe, die aus dem Kreislauf auszuschließen sind, aufgenommen werden sollte, wie es im Cradle-to-Cradle-System bereits der Fall ist. Hier von wurde zunächst abgesehen, da sich die Liste am Zertifizierungssystem der DGNB orientiert.

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

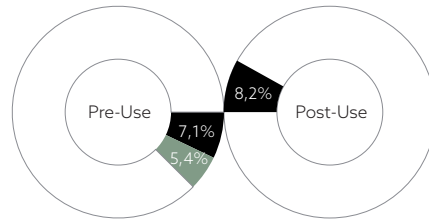
## Konventionelle Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
		sd	ud	
Holz-PVC-Dielen + UK	56,1	RN0 63	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Stelzlager, PVC	3,0	RP	dc	en <sub>f</sub>
Abdichtung, PVC	3,88	PR	rc 60	en <sub>f</sub>
EPS-Dämmung	4,5	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Bitumenbahn/Alueinl.	5,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Deckenplatte, Beton	528,0	PR	dc	d
Bewehrungsstahl	46,6	RC100	rc 100	rc
Gipsputz	9,0	PR	rc 99	d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
<b>Gesamt</b>	<b>657,6</b>			

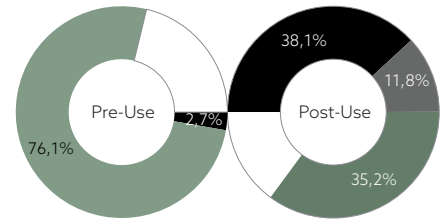
## Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
		sd	ud	
Robinienholz	25,3	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Stahlprofile	6,6	RC35	rc100	rc
Dachabdichtung	3,7	RN0 60	rc95	en <sub>r</sub>
Holzfaserdämmung	40,0	RN0 100	rc100c	en <sub>r</sub>
Dampfsperre, Alu	0,1	PR	rc100	rc
OSB/3-Platte	9,3	RN45 44	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Brettschichtholz	23,7	RN97 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Lattung, Fichte	1,7	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Lehmbauplatte	17,5	RN0 3	rc100	dc
Flachsgewebe	0,1	RN0 100	rc100c	en <sub>r</sub>
Lehmputz	5,4	PR	rc100	dc
<b>Gesamt</b>	<b>133,4</b>			

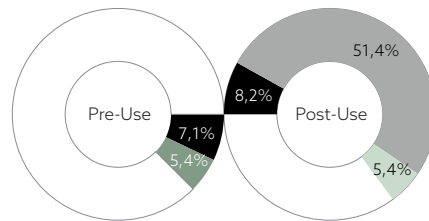
## Kreislaufpotenziale



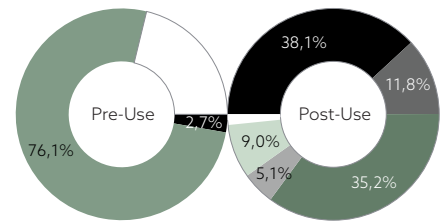
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	12,5%	8,2%	20,7%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	78,8%	85,1%	163,9%

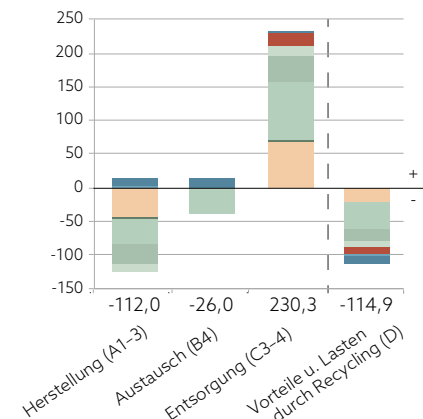
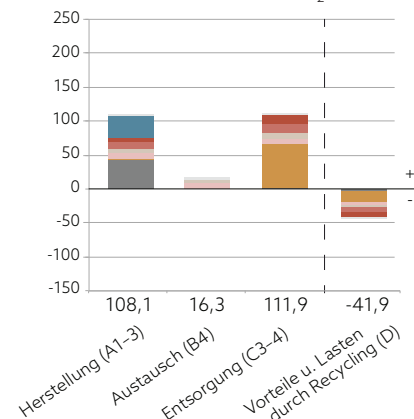


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	12,5%	65,0%	77,5%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	78,8%	99,2%	178,0%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



Preis für Altholz A2 kalkuliert, da für Altholz A3 kein Preis erhoben wurde. Nach den übermittelten Preislisten der Entsorger unterscheiden sich die Annahmepreise der beiden Kategorien jedoch in der Regel nicht.

Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Konstruktion 0,7, für die recyclingorientierte 0,8.

Der durchschnittliche Faktor Arbeit ist zwar nahezu gleich (0,87 zu 0,89), gewichtet man den Faktor jedoch nach Massen, liegen die Werte bei 0,81 für das konventionelle und 0,93 für das recyclingorientierte Dach.

Auffällig ist der geringere Rückbauaufwand der verklebten PVC-Dachbahn (Faktor 1,0) gegenüber der mechanisch befestigten (0,7). In der Tat war der Aufwand für die Entfernung der mechanischen Befestigung (Tellerdübel) im Versuchsstand recht mühsam (s. Seite 124). Vorteilhafter wäre deshalb eine Befestigung mittels Auflast. Ob die Terrassendielen inkl. Unterkonstruktion hierfür ausreichen, müsste vom Tragwerksplaner berechnet werden.

Die Grafiken der Kreislaufpotenziale zeigen ein ähnliches Bild wie die der übrigen Bauteile. Bei der konventionellen Konstruktion macht sich Pre-Use der Holzanteil in den WPC-Terrassendielen als nachgewachsener Rohstoff und die Bewehrung aus Sekundärstahl<sup>62</sup> bemerkbar. Post-Use zeigt sich wieder ein hoher Anteil weiterverwertbarer Wertstoffe (51,4%), was auf die Beton-Dachdecke zurückzuführen ist.

Im Gegensatz dazu zeichnet sich die recyclingorientierte Dachkonstruktion durch ein hohes Closed-Loop-Potenzial aus. Sie enthält Pre-Use nicht nur einen hohen Anteil (76,1%) nachwachsende Rohstoffe; auch Post-Use fließen voraussichtlich ca. 38% der Wertstoffe in den geschlossenen Kreislauf zurück. Den größten Anteil hieran haben die Stahlprofile, die kompostierbare (borat- und leimfreie) Holzfaserdämmung sowie die Lehmbaustoffe. Die PVC-Abdichtung trägt bei der konventionellen Konstruktion mit 0,2% zum CLP bei, während die innovative Abdichtung mit 3,2% in das CLP geht. Dies liegt jedoch nicht nur am Material-Loop-Potenzial, das für die PVC-Bahn mit 60%<sup>63</sup> angenommen wurde, während bei der innovativen Dachbahn lt. Atlas Recycling 95% angesetzt wurden, sondern auch an der Massengewichtung in der Gesamtkonstruktion.

Für das Terrassenholz wurde aufgrund der Bewitterung nur eine energetische Verwertbarkeit angenommen. Diese geht in das Closed-Loop-Potenzial ein, da angenommen wurde, dass das Holz aus zertifizierter Forstwirtschaft stammt.

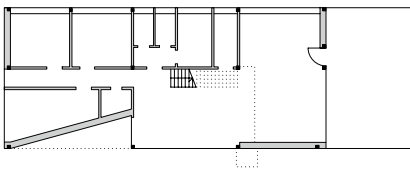
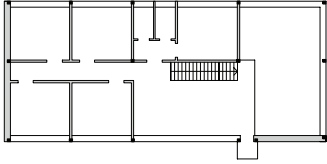
Im Vergleich des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks fällt auf, dass die WPC-Terrassendielen im Gegensatz zu den Massivholzdielen im Herstellungsprozess kein negatives Treibhauspotenzial aufweisen. Lt. Verbands-EPD beträgt der Anteil biogenes CO<sub>2</sub> im Modul A1-3 zwar -21,08 kg/m<sup>2</sup><sup>64</sup>; dieser Vorteil wird jedoch durch die übrigen Inhaltsstoffe wieder wettgemacht.

62 Bewehrungsstähle bestehen vollständig aus recyceltem Stahl. Aus diesem Grund erfolgt bei der Bilanzierung des Treibhauspotenzials nach den Regeln der Ökobilanzierung auch keine Gutschrift für den nächsten Lebenszyklus.

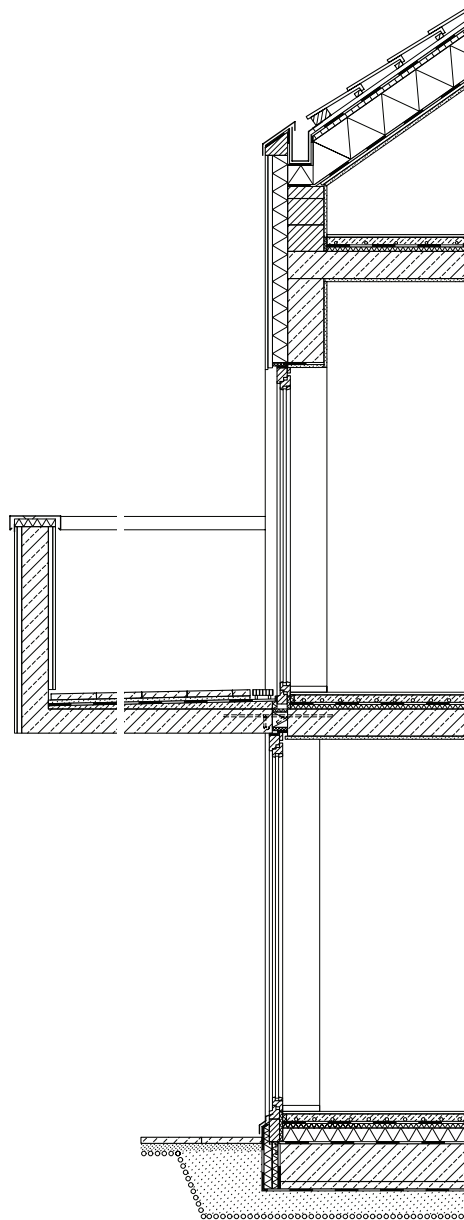
63 Lt. Wecobis [178] beträgt der Anteil an Weichmachern, die im Laufe der Zeit ausgasen, und des Trägermaterials, das stets erneuert werden muss, in PVC-Bahnen 39%.

64 Bezogen auf ein durchschnittliches Flächengewicht von 18,36 kg/m<sup>2</sup>.

**Gebäudetyp** Bürogebäude  
**Geschosse** 2 + Dachgeschoss  
**BGF** 491 m<sup>2</sup>  
**BRI** 1.842 m<sup>3</sup>



A 8.5



**Konventionelle Konstruktion**  
 Kalksandsteinmauerwerk mit Fassade aus faserverstärkten Harzkompositplatten

**Dach**  
 Dachsteine (Beton), Lattung, Konterlattung, Unterspannbahn (Kunststoffverbund), OSB-Platte, Dachsparren mit EPS-Zwischendämmung, OSB-Platte, Gipskartonplatten mit Dispersionsfarbe, Ringanker (Stahlbeton)

**Decken**  
 Laminat geklebt, Zementheizestrich mit Kunststoffrohren in FBH-Trägerplatte mit aufkaschierter EPS-Trittschalldämmung, Trennlage (Kunststoffmixfolie), Stahlbetonplatte, Gipsputz, Raufasertapete mit Dispersionsfarbe

**Außenwände**  
 faserverstärkte Harzkompositplatte, Unterkonstruktion (Aluminium), Winddichtung (Polyestervlies), Wärmedämmung (EPS), Mauerwerk (Kalksandstein), Gipsputz, Raufasertapete mit Dispersionsfarbe

**Gründung/Bodenplatte**  
 Laminat geklebt, Zementheizestrich mit Kunststoffrohren in FBH-Trägerplatte mit aufkaschierter EPS-Trittschalldämmung, Wärmedämmung (PUR), Abdichtung (kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung mit Gewebeeinlage), Stahlbetonplatte, Sauberkeitsschicht (Magerbeton), Trennlage (Kunststoffmixfolie), Tragschicht aus Schläcken, Streifenfundamente aus Stahlbeton (in der Zeichnung nicht dargestellt, aber in der Berechnung enthalten)

A 8.6

## 8.2. Modellprojekt 2

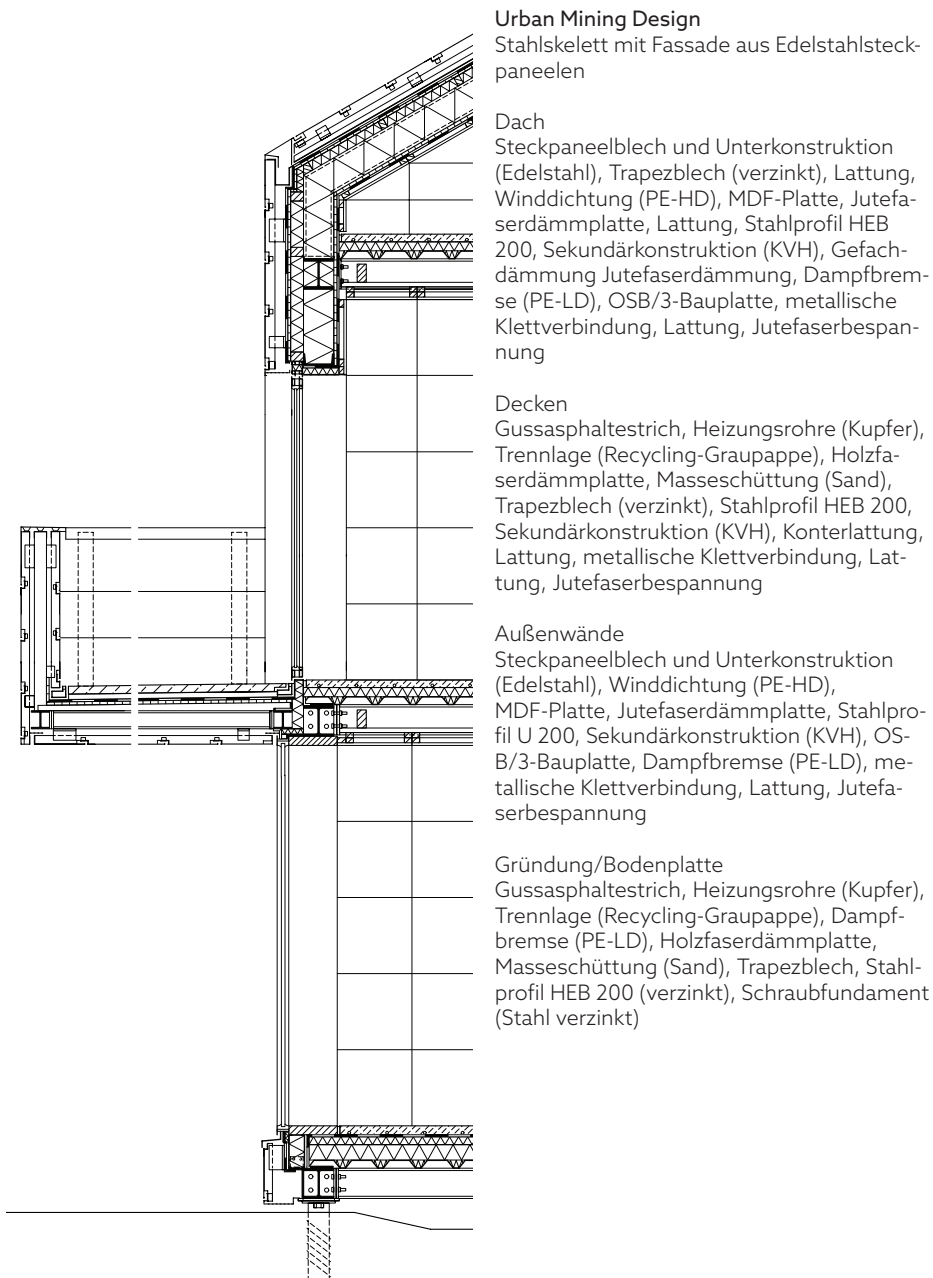
Im ersten Modellprojekt hat sich die recyclingorientierte Konstruktion in Holzbauweise gegenüber der konventionellen Massivbau-Variante sowohl hinsichtlich der Kreislaufpotenziale als auch hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks deutlich als vorteilhaft erwiesen. Im zweiten Variantenvergleich wird nun ein Modellprojekt mit dem Urban Mining Index untersucht, bei dem Riegler-Floors und Hillebrandt einer konventionellen Massivbaukonstruktion für ein Bürogebäude eine Konstruktion in Stahlbauweise gegenübergestellt haben.

Die Konstruktionsschnitte (Abb. A 8.6 und A 8.7) zeigen den Aufbau der wesentlichen Bauteile in Varianten. Das Tragwerk der konventionellen Variante besteht aus Kalksandsteinmauerwerk und Stahlbetondecken.

A 8.5 Entwurfskonzept Modellprojekt 2: Grundrisse EG und OG nach Riegler-Floors/Hillebrandt [179], Maßstab 1:1000

A 8.6 Konventionelle Konstruktion nach Riegler-Floors/Hillebrandt [179], Vertikalschnitt Maßstab 1:50

A 8.7 Urban Mining Design nach Hillebrandt/Riegler-Floors [179], Vertikalschnitt Maßstab 1:50



A 8.7

Bodenbeläge und Abdichtungen sind wie üblich verklebt.

Die recyclingorientierte Konstruktion wurde vollständig im Urban Mining Design geplant: Von den Fundamenten über das Tragwerk bis zur Hülle wurde das Closed-Loop-Material Stahl gewählt. Abklebungen wurden vermieden.

Mit dem zu erwartenden hohen Schrottwert erwies sich die „urbane Mine“ in der von Riegler-Floors und Hillebrandt durchgeführten Lebenszykluskostenanalyse als wahres Wertstofflager: Der Barwert über einen Lebenszyklus von 50 Jahren lag trotz 25% höherer Baukosten um 32% unter dem der konventionellen Konstruktion. Im Folgenden wird untersucht, ob sich die Vorteile des Urban Mining Designs mit dem Urban Mining Index bestätigen lassen.

## Boden/Gründung

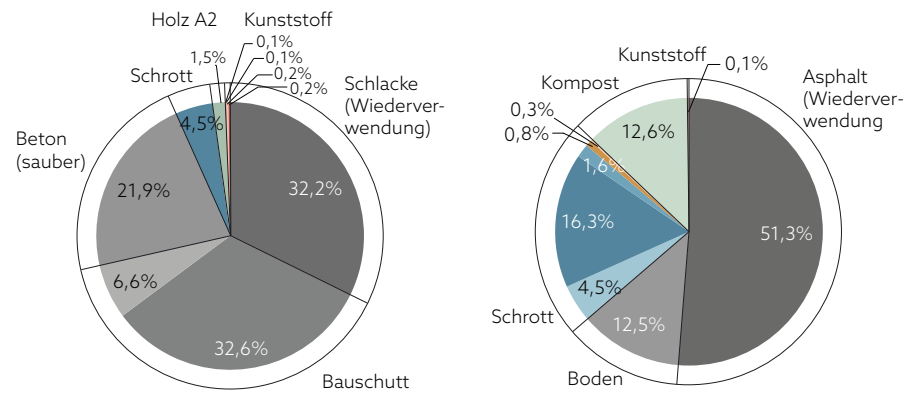
### Konventionelle Konstruktion

### Recyclingorientierte Konstruktion

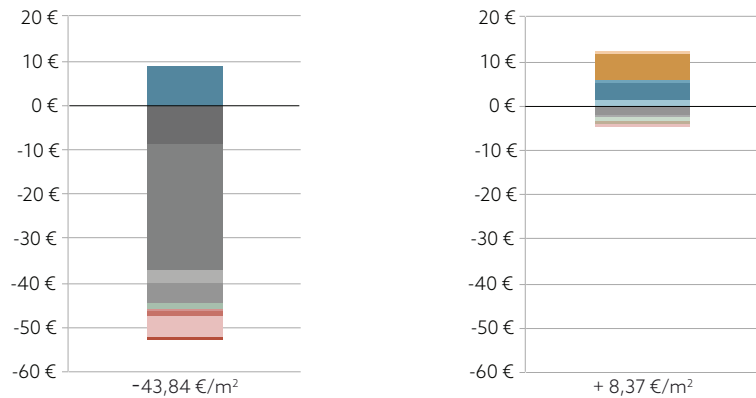
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
Laminat, 8 mm	22,2	Gussasphaltestrich, 50 mm	100,0
Zementestrich, 65 mm	97,5	Fußbodenheizrohre, Kupfer	1,5
Fußbodenheizrohre, PEX mit EPS-Trägerplatte	1,9	Heizrohrlamellen, Aluminium	0,5
Trennlagen PE-Folie	0,4	Graupappe, 0,34 mm	0,2
Trittschalldämmung EPS, 30 mm	0,8	Dampfbremse, PE-LD, 0,2 mm	0,2
Wärmedämmung PUR, 100 mm	3,3	Holzfaserdämmung, 60 mm + 100 mm	24,6
Abdichtung Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung, 4 mm	2,8	Masseschüttung Sand, in Sicken des Trapezblechs	24,3
Bodenplatte Beton, 200 mm	480,0	Trapezblech, Stahl verzinkt, 48,5/250 mm	8,8
Bodenplatte, Bewehrungsstahl	66,6	HEB-Profil, Stahl verzinkt, 200/200/9 mm	31,7
Fundamente/Sauberkeitsschicht, Beton	322,2	Schraubfundament, Stahl verzinkt, 1600 mm	3,1
Kapillarbrechende Schlacken, 250 mm	475,0		
	1.473,0		194,9

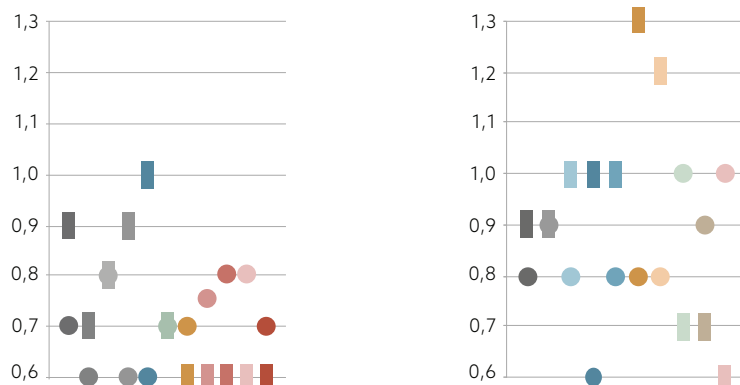
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



### 8.2.1. Vergleichsanalyse Boden/Gründung

Die Aufstellung der Materialien und Massen zeigt, dass es sich auch bei dem Modellprojekt 2 um den Vergleich einer schweren mit einer leichten Bauweise handelt. Der Boden und die Decke der recyclingorientierten Konstruktion sind durch den verwendeten Gussasphalt und die Sand-Masseschüttung in den Sicken der Trapezbleche jedoch schwerer als in der Leichtbauweise des Modellprojekts 1. Beide Materialien machen somit auch mehr als 60 Masse-% der anfallenden Wertstoffe aus.

Bei der konventionellen Gründung sind die im Lebenszyklus anfallenden Wertstoffe größtenteils mineralischen Ursprungs, wobei der Anteil gegenüber der leichten Bauweise noch wesentlich höher ist. Gleich große Anteile haben hier mit jeweils rund 32% die kapillARBrechenden Schlacken, die prinzipiell wiederverwendbar sind, sowie die Betonmassen der Bodenplatte. Letztere werden aufgrund zu erwartender Bitumenreste den mineralischen Gemischen mit starker Verschmutzung zugeordnet. Während eine Bahnenware (wie auf der konventionellen Gründung im Modellprojekt 1 verwendet) noch mit hohem Aufwand rückstandsfrei lösbar ist, sind bei einer kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtung Rückstände auf dem Beton zu erwarten<sup>65</sup>. Deshalb wird eine Deponierung des Betons der Bodenplatte angenommen.

Bei der recyclingorientierten Gründung kann aufgrund der Aufständigung auf eine Abdichtung komplett verzichtet werden. Die ligningebundene Holzfaserdämmung<sup>66</sup> kann im Rückbaufall kompostiert werden. Der Gussasphaltestrich ist komplett aus nicht erneuerbarem Primärmaterial, birgt aber einen wahren Schatz: Die Heizrohre aus Kupfer haben zwar nur einen relativ geringen Anteil an der Masse des Bauteils, ihr Schrottwert ist jedoch äußerst hoch. Der selektive Rückbau des Estrichs lohnt sich somit alleine aufgrund seines „inneren“ Werts. Beim Einschmelzen des Asphalts lässt sich der Kupferschrott leicht trennen und dem Recycling zuführen, während der Estrich selbst wieder ausgegossen werden kann.

Mit den verwendeten Wertstoffen der recyclingorientierten Gründung kann am Ende der Nutzungsdauer insgesamt ein Erlös von mehr als 8 € pro m<sup>2</sup> erzielt werden, während die großen Massen verschmutzten Betons bei der konventionellen Konstruktion zu sehr hohen Entsorgungskosten (ca. 44€/m<sup>2</sup>) führen. Da für die Annahme gebrauchter Schlacke kein Preis vorliegt, wurde hier ersatzweise der Preis für sortenreinen Sand angenommen.

Die großen Unterschiede im Wert der Materialien lassen sich auch an den entsprechenden Faktoren in den nebenstehenden Grafiken ablesen. Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Gründung 0,73 und für die recyclingorientierte 0,93.

Auch beim Faktor Arbeit sind deutliche Unterschiede zu erkennen: Während die Materialien bzw. Bauteilschichten bei der konventionellen Gründung zwischen 0,6 und 0,8 liegen, weisen diejenigen der recyclingorientierten Variante Arbeitsfaktoren zwischen 0,8 und 1,0 auf.

Eine Ausnahme bilden die HEB-Profile: Da sie der Witterung ausgesetzt

65 Analog der von Graubner et al. untersuchten Abdichtung aus Heißbitumen (siehe Anlage 2, Flachdach 05).

66 Udi Dämmsysteme GmbH, Chemnitz Deutschland, Produkt: Uditherm Sk.

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

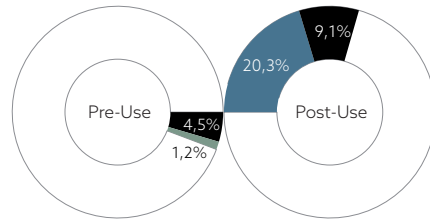
## Konventionelle Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use		
				sd	ud
Laminat	22,2 RN	0	79,7	dc	en <sub>r</sub>
Zementestrich	97,5 PR			dc	d
PEX-Heizrohre/EPS	1,9 PR			en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Trennlagen PE-Folie	0,4 PR			en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
EPS-Dämmung	0,8 PR			en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
PUR-Dämmung	3,3 PR			en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Bitumenabdichtung	2,8 PR			en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Bodenplatte Beton	480,0 PR			d	d
Bewehrungsstahl	66,6 RC	100		rc	rc
Betonfundamente u. Sauberkeitsschicht	322,2 PR			rc	39 dc
Schlacken	950,0 PR			ru	dc
		1.947,7			

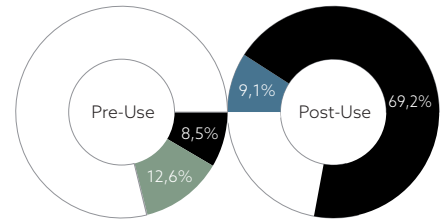
## Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use		
				sd	ud
Gussasphaltestrich	100,0 RP			rc	100 dc
Kupfer-Heizrohre	1,5 RC	65		rc	100 rc
Aluminium-Lamellen	0,5 RC	50		rc	98 rc
Graupappe	0,2 DC	100		dc	en <sub>r</sub>
Dampfbremse, PE-LD	0,2 PR			en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Holzfaserdämmung	24,6 RN	0	100	rc	100c en <sub>r</sub>
Masseschüttung Sand	24,3 PR			ru	dc
Trapezblech, Stahl	8,8 RC	35		rc	100 rc
HEB-Stahlprofil	31,7 RC	35		rc	100 rc
Schraubfundamente					
Stahl, verzinkt	3,1 RC	35		rc	100 rc
		194,9			

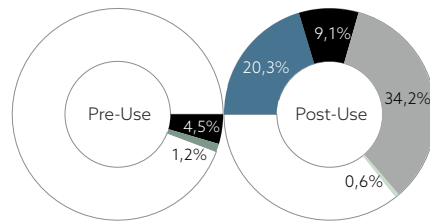
## Kreislaufpotenziale



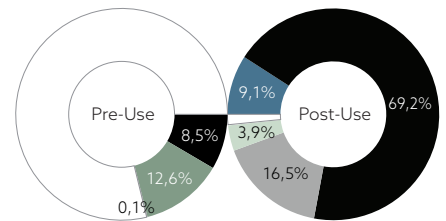
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,7%	29,41%	35,2%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	21,1%	78,3%	99,4%

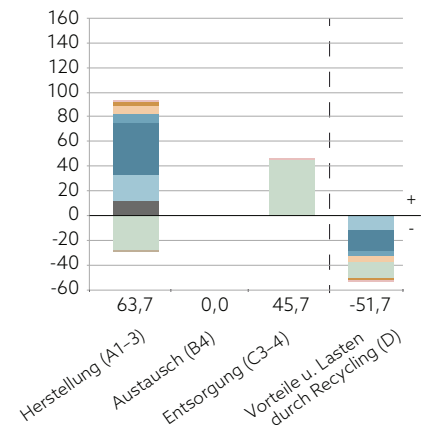
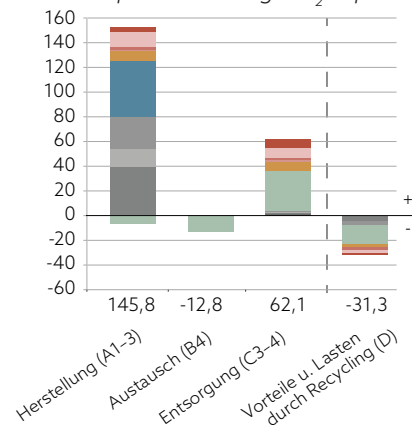


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	5,7%	64,2%	69,9%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	21,2%	98,7%	119,9%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



sind, ist davon auszugehen, dass die Schrauben nicht lösbar sind und die Profile deshalb entweder thermisch oder mittels Scherschneiden getrennt werden müssen. Bei den Metallen mindert der Faktor Arbeit für den selektiven Rückbau allerdings nicht deren Kreislaufpotenzial: Da Metalle nicht nur im selektiven Rückbau, sondern auch im derzeit üblichen selektiven Abbruch recycelt werden, wird das Material in beiden Szenarien (sd und ud) dem Recycling zugeordnet.

Die Ergebnisse der Kreislaufpotenziale bestätigen das Urban Mining Design: Pre-Use ist der Anteil recycelter und nachwachsender Rohstoffe zwar gering, da die großen Massen an Gussasphaltestrich und Sand aus primären Rohstoffquellen stammen; dafür können diese Post-Use jedoch im geschlossenen Kreislauf geführt werden. Der Sand ist direkt wiederverwendbar, der Estrich wiederverwertbar. Geringe Teile der beiden Materialien gehen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus in das Loop-Potenzial ein, da im üblichen EoL-Szenario von einer Weiterverwertung (z.B. im Straßenbau) ausgegangen wird. Die Stahlbauteile fließen mit einem Sekundärrohstoffanteil von 35% in die Pre-Use-Phase des Closed-Loop-Potenzials ein und zu 100% in die Post-Use-Phase. Insgesamt beträgt das Closed-Loop-Potenzial der recyclingorientierten Gründung 99,4%, das Loop-Potenzial ca. 120%. Dagegen weist die konventionelle (massive) Gründung mit 35,2% ein relativ geringes Potenzial zur Generierung geschlossener Kreisläufe auf. Es werden fast nur primäre Rohstoffe und Nebenprodukte aus der Stahlindustrie (Schlacken) eingesetzt. Letztere können (ggf. nach Aufbereitung) wiederverwendet werden und gehen deshalb unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert zu 63% in das Closed-Loop-Potenzial ein. Dagegen fließen 79% des Fundament- und Magerbetons aufgrund des geringen MLP und des hohen Rückbauaufwands nur in die Weiterverwertung (Downcycling), ebenso wie 65% des Zementestrichs, sodass das Loop-Potenzial insgesamt 69,9% beträgt. 36% des mit Kleberresten verunreinigten Zementestrichs werden aufgrund der (Un-)Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus einer Deponierung zugeordnet. Die stark verschmutzte Bodenplatte wird komplett der Deponierung zugeordnet.

Beim Blick auf die Treibhauspotenziale fällt auf, dass die verwendeten Metalle in der Herstellung hohe klimaschädliche Emissionen verursachen. So entsteht bei der Reduktion von Eisenerz, das vor allem aus Eisendioxiden besteht, im Hochofen unter Zusatz von Koks Roheisen und Kohlendioxid. Für das Recycling von Primärstahl werden in der Ökobilanz Gutschriften in den nächsten Lebenszyklus exportiert. Die Konstruktionsstähle der recyclingorientierten Variante mit einem Primärstahlanteil von 65% erhalten deshalb eine Gutschrift im Modul D. Für die Bewehrungsstähle der konventionellen Konstruktion hingegen erfolgt keine Gutschrift, da diese bereits aus 100% Sekundärstahl bestehen. Lässt man die Gutschriften außen vor, verursacht die konventionelle Gründung insgesamt immer noch das 1,8-Fache an Treibhausgasen der Urban-Mining-Design-Variante. Dies liegt hauptsächlich am hohen Treibhauspotenzial des Zements in den großen Betonmassen.

**Außenwand**

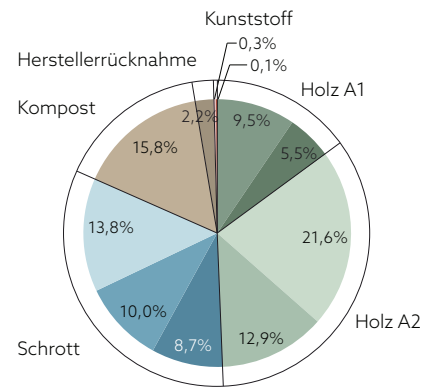
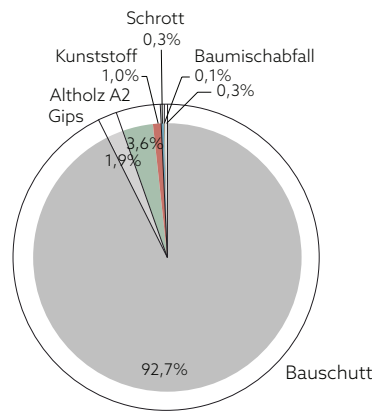
**Konventionelle Konstruktion**

**Recyclingorientierte Konstruktion**

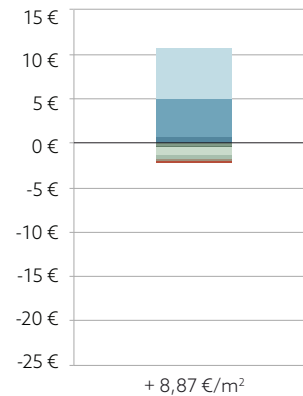
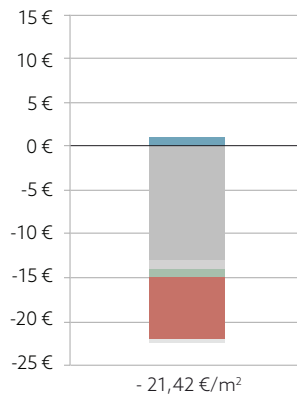
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
Faserverstärkte Harzkompositplatte, 6mm	16,8	Steckpaneelblech, Edelstahl, 1 mm	8,6
Unterkonstruktion Aluminium	1,4	U-Profile, Edelstahl, 2-3 mm	6,3
Winddichtung, Polyestervlies	0,1	Winddichtung PE-HD, 0,2 mm	0,1
Wärmedämmung EPS, 180 mm	9,3	MDF-Platte, 15 mm	8,1
Mauerwerk Kalksandstein mit Dünnbettmörtel, 240 mm	432,0	Konstruktionsholz/Lattungen, Fichte, 60/85 + 30/50 mm	3,5
Gipsputz, 10 mm	9,0	Jutefaserdämmung, 85 + 200 mm	10,0
Raufasertapete	0,7	U-Profil, Stahl verzinkt 200/75/8,5 mm	5,5
Dispersionsfarbe	1,3	Holzständer KVH Fichte, 120/200 mm	6,0
	<b>470,6</b>	OSB/3-Platte, 22 mm	13,6
		Dampfbremse, PE-LD 0,2 mm	0,2
		Wandbespannung, Jute recycelt, 2 mm	0,3
			<b>62,2</b>

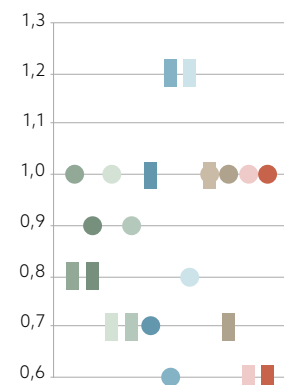
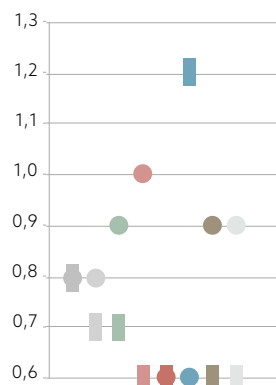
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



### 8.2.2. Vergleichsanalyse Außenwand

Die tragende Außenwand der konventionellen Konstruktion wird aus Kalksandsteinmauerwerk erstellt und macht im Rückbaufall mehr als 90% der anfallenden Wertstoffe aus. Das Mauerwerk wird innen mit Gips verputzt und somit verunreinigt. Die beiden Materialien können im Rückbaufall nur getrennt verwertet werden, da Gips sulfathaltig ist und nicht mit anderen mineralischen Materialien vermischt werden darf (s. Punkt 8.1.3). Die faserverstärkten Harzkompositplatten für die Fassadenbekleidung bestehen zu ca. 70% aus Nadelholzfasern, die ähnlich wie HPL-Platten mit Phenolharzen unter hohem Druck und Temperatur verpresst werden [180]. Nach aktueller Altholzverordnung zählen gebrauchte Verbundstoffe mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent) zum Gebrauchtholz und können in die Altholzkategorie A2 eingestuft werden, sofern sie keine halogenorganischen Verbindungen (in der Beschichtung) enthalten. Die stoffliche Verwertbarkeit erscheint zwar fragwürdig, lässt sich aber eventuell darauf zurückführen, dass die Platten mit anderen (weniger fremdstoffhaltigen) Holzwerkstoffen vermischt werden.

In der Außenwand der recyclingorientierten Variante besteht ca. ein Drittel der Materialien, gemessen an ihrem Gewicht, aus Stahl und Edelstahl. Der überwiegende Teil der Wertstoffe basiert jedoch auf nachwachsenden Rohstoffen. Die Jutefaserdämmung besteht zu 88% aus den weiterverwerteten Fasern gebrauchter Kaffeesäcke. Der Dämmstoff wird laut Hillebrandt/Seggewies [180] vom Hersteller zurückgenommen, wieder zerfasert und zu neuen Dämmmatten verarbeitet.

Die Eisenmetalle der recyclingorientierten Außenwand weisen am Ende der Nutzungsdauer der Bauteile einen hohen Schrottwert auf. Dementsprechend hoch sind die zu erzielenden Erlöse. Die konventionelle Außenwand führt dagegen zu relativ hohen Entsorgungskosten. Diese sind zum Großteil auf das verunreinigte Kalksandsteinmauerwerk (zu erwartende Restanhaftungen von Gips) und die teuer zu entsorgende EPS-Dämmung zurückzuführen.

Die unterschiedliche Werthaltigkeit ist am Faktor Wert ablesbar: Während die konventionelle Außenwand einen durchschnittlichen Faktor von 0,71 aufweist, kommt die recyclingorientierte Variante auf 0,85.

Beim Rückbauaufwand ist die Differenz leicht geringer: Die konventionelle Außenwand hat einen durchschnittlichen Faktor Arbeit von 0,81 und die Variante im Urban Mining Design von 0,91. Das Kalksandsteinmauerwerk wäre im Vergleich zu anderen tragenden Konstruktionen eigentlich mit geringem Aufwand rückbaubar, wenn es materialhomogen verputzt oder monolithisch verbaut würde (Faktor 0,9). Da aber der Gipsputz vor dem Abbruch entfernt werden muss, wird der Rückbauaufwand für Mauerwerk und Gipsputz zusammen um eine Stufe höher eingeschätzt (Faktor 0,8).

Der Rückbauaufwand der verklebten Harzkompositplatten lehnt sich an die Ergebnisse der Rückbauversuche mit verklebten Eternitplatten an (s. Kapitel 6.2, Seite 118) und wird als gering eingeschätzt (Faktor 0,9).

Die Holzbaustoffe und die innere Wandbekleidung der recyclingorientierten Außenwand sind mit geringem bis sehr geringem Aufwand rückbaubar. Die Bewertung des Rückbaus der U-Profile (Querschnittfläche 32,2 cm<sup>2</sup>) orientiert sich an den Auswertungen für Stahlbauteile (s. Kapitel 6, Abb. A 6.59 und Bauteile Nr. 343.03 und 351.04 im Bauteilkatalog).

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

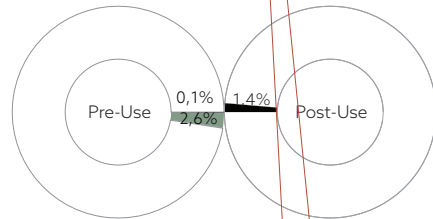
### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (d<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (d<sub>c</sub>)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

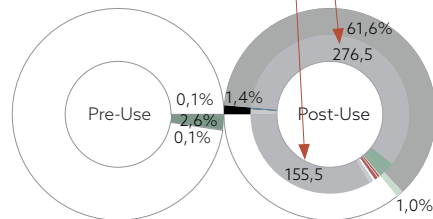
## Konventionelle Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Faserverstärkte					
Harzkompositplatte	16,8	RN0 70	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>	
U-Konstruktion, Alu	1,4	RC 50	rc 98	rc	
Winddichtung, PE	0,1	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
Dämmung, EPS	9,3	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
Kalksandstein mit Dünnbettmörtel	432,0	PR	dc	d	
Gipsputz	9,0	PR	rc 99	d	
Raufasertapete	0,7	DC 70 + RN27,5	en <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
Dispersionsfarbe	1,3		en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
<b>Gesamt</b>	<b>470,6</b>				

### Kreislaufpotenziale



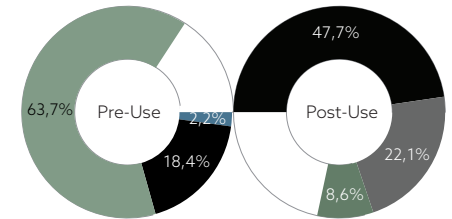
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	2,7%	1,4%	4,1%



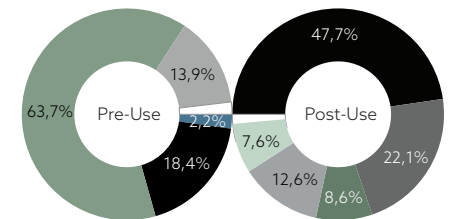
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	2,8%	64,0%	66,8%

## Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Edelstahlblech	8,6	RC 65,2	rc 100	rc	
U-Profile, Edelstahl	6,3	RC 65,2	rc 100	rc	
Winddichtung, PE-HD	0,1	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
MDF-Platte	8,1	RN 47 47	d <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
K-Holz/Lattungen	3,5	RN 100 0	d <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
Jutfaserdämmung	10,0	DC 88+ RN 0 97	rc 88	en <sub>r</sub>	
U-Profil, Stahl verzinkt	5,5	RC 35	rc 100	rc	
Holzständer KVH	6,0	RN 100 0	d <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
OSB/3-Platte	13,6	RN 45 44	d <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	
Dampfbremse, PE-LD	0,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
Jutebespannung	0,3	RU 100+ RN 100	rc 100c	en <sub>r</sub>	
<b>Gesamt</b>	<b>62,2</b>				



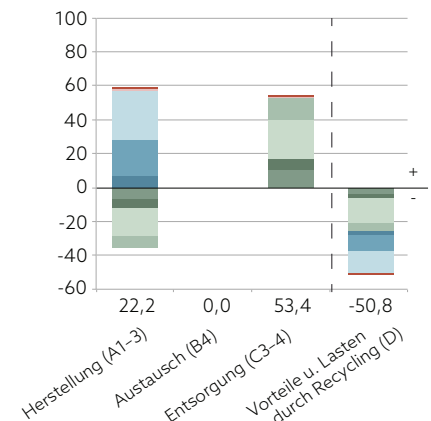
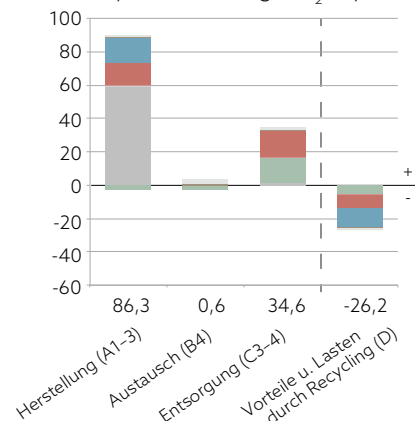
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	84,3%	78,4%	162,7%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	98,2%	98,6%	196,8%

Hinweis: Das Treibhauspotenzial wird in allen Berechnungen in dieser Arbeit nach DIN EN 15978 ermittelt. Für die Vorteile und Lasten außerhalb des Lebenszyklus (Modul D) werden die in der Okobau.dat oder in Umweltproduktdeklarationen (EPD's) der Hersteller ausgewiesenen Daten herangezogen, und zwar unabhängig von den EoL-Szenarien, die in der Berechnung der Kreislaufpotenziale ausgewiesen werden. Grund ist, dass die Vorteile und Lasten durch Recycling in der Okobaudat und den EPD's auf statistischen Verwertungsquoten beruhen und für die meisten Materialien und Produkte noch keine Daten für verschiedene EoL-Szenarien vorliegen. Der voraussichtliche Verwertungsweg in Abhängigkeit der Einbausituation kann in der Okobaudat und in EPD's nicht berücksichtigt werden. Dies hat zur Folge, dass z.B. für Holz und Holzwerkstoffe in den Modulen C und D immer die energetische Verwertung kalkuliert wird.

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



Hinsichtlich der Kreislaufpotenziale weisen die Varianten – wie zu erwarten war – große Unterschiede auf. Die konventionelle Außenwand verfügt über so gut wie kein Closed-Loop-Potenzial. Lediglich die Alu-Unterkonstruktion und rund die Hälfte des Gipsputzes wird den wiederverwertbaren Wertstoffen zugeschrieben. 64% des Kalksandsteinmauerwerks werden unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert (je 0,8) dem Loop-Potenzial zugewiesen. Für 36% wird aufgrund der Unwirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus eine Entsorgung auf der Deponie angesetzt (siehe Kennzeichnung in nebenstehender Grafik).

Die Außenwand im Urban Mining Design verfügt dagegen über ein Closed-Loop-Potenzial von insgesamt 162,7%. Pre-Use fließen die geplanten Edelstahlbleche mit einem Sekundärstahlanteil von 65,2%<sup>67</sup> sowie die nachgewachsenen Rohstoffe ein. Die im Lebenszyklus dreimal zu erneuernde Wandbespannung aus Jute und die Jutefaserdämmung gehen bereits aus einer Kaskadennutzung hervor und wirken sich deshalb mehrfach im Kreislaufpotenzial Pre-Use aus (s. Kapitel 7, Seite 177). Beide gehen mit ihrem Anteil nachwachsender Rohstoffe in das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use ein. Zusätzlich geht die aus gebrauchten Kaffeesäcken gefertigte Wandbespannung (siehe Atlas Recycling [183]) als Wiederverwendung in das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use ein, während die weiterverwerteten Fasern der Jutedämmung zusätzlich im Loop-Potenzial Pre-Use ausgewiesen werden.

Post-Use ist fast die Hälfte der Materialien wiederverwertbar. Hier zeichnen sich vor allem die verwendeten Metalle aus, die ohne Qualitätsverlust quasi endlos recycelt werden können. Aufgrund des etablierten Herstellerrücknahme- und Aufbereitungsverfahrens fließt die Jutefaserdämmung in die wiederverwertbaren Materialien ein. Der Dämmstoff könnte auch kompostiert werden, da die Stützfasern aus PLA (Polyacid = Polymilchsäure) bestehen und damit biologisch abbaubar sind. Auch die massiven Hölzer der Sekundärkonstruktion, von denen angenommen wird, dass sie aus zertifizierter Forstwirtschaft stammen und somit nachhaltig nachwachsen, sowie die Anteile zertifizierter Holzwerkstoffe fließen in das Closed-Loop-Potenzial Post-Use ein. Nur die nicht zertifizierten Anteile der Holzwerkstoffe werden im hochwertigen EoL-Szenario den weiterverwertbaren und im üblichen EoL-Szenario den energetisch verwertbaren Wertstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen zugeordnet und gehen somit ins Loop-Potenzial ein.

An den Grafiken der Treibhauspotenziale lässt sich erkennen, dass die konventionelle Außenwand im Herstellungsprozess nahezu viermal höhere Emissionen verursacht als die Urban-Mining-Design-Variante. Letztere emittiert zwar in der Entsorgungsphase durch die energetische Verwertung der Hölzer und Holzwerkstoffe mehr Treibhausgase, allerdings werden diese in der Herstellungsphase der Atmosphäre entzogen. Aufgrund des erforderlichen Austausches wurden die äußere und die inneren Bekleidungen der konventionellen Variante mehrfach bilanziert. Für den Dämmstoff und die Wandbespannung der recyclinggerechten Konstruktion liegen keine Ökobilanzdaten vor. Ersatzdaten (z. B. von Hanfdämmstoff) wurden absichtlich nicht angesetzt, da es sich um gebrauchte Jutefasern handelt, deren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck minimal sein dürfte.

<sup>67</sup> Der Sekundärrohstoffanteil bezieht sich auf herstellerspezifische Daten [182].

Decke

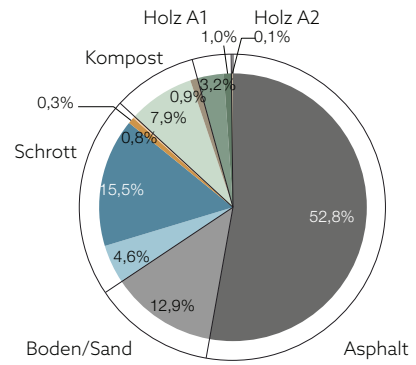
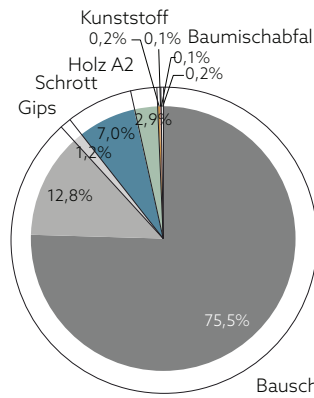
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

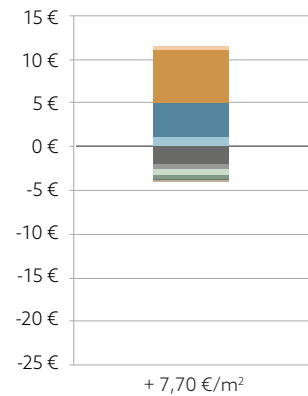
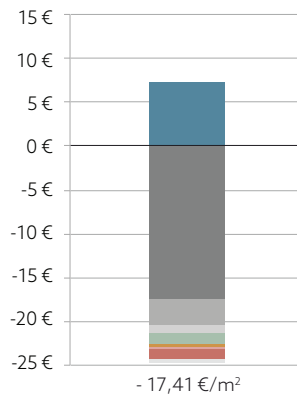
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
Laminat, 8 mm	22,2	Gussasphaltestrich, 50 mm	100,0
Zementestrich, 65 mm	97,5	Fußbodenheizrohre, Kupfer	1,5
Fußbodenheizrohre, PEX mit EPS-Trägerplatte	1,9	Heizrohrlamellen, Aluminium	0,5
Trennlagen PE-Folie	0,2	Graupappe, 0,34 mm	0,2
Trittschalldämmung EPS, 30 mm	0,8	Trittschalldämmung Holzfaser, 60 mm	15,0
Deckenplatte Beton, 240 mm	576,0	Masseschüttung Sand, in Sicken des Trapezblechs	24,3
Deckenplatte, Bewehrungsstahl	53,8	Trapezblech, Stahl verzinkt, 48,5/250 mm	8,8
Gipsputz, 10 mm	9,0	HEB-Profil, Stahl verzinkt, 200/200/9 mm	29,4
Raufasertapete	0,7	KVH Fichte 120/200 mm	6,0
Dispersionsfarbe	1,3	Lattungen, Fichte, 30/50 mm	1,8
	763,3	Wandbespannung, Jute recycelt, 2 mm	1,7
			189,2

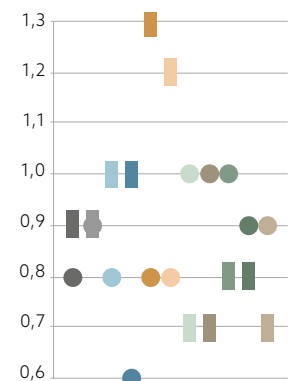
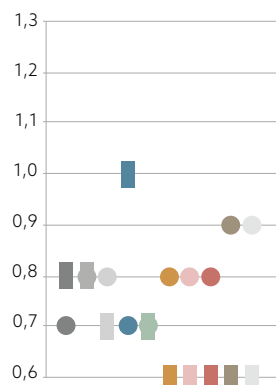
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



### 8.2.3. Vergleichsanalyse Decke

Die Massen der recyclingorientierten Decke machen insgesamt rund ein Viertel der konventionellen Decke aus. Bei dem untersuchten Modellprojekt handelt es sich um ein kleines Bürogebäude für einen einzelnen Nutzer. Es gibt deshalb keine fremden Arbeitsbereiche, gegen die ein besonderer Schallschutz einzuhalten wäre. Zur Schalldämmung werden die Sicken des Trapezblechs mit Sand gefüllt; dieser ist im Rückbaufall sehr leicht wieder zu entfernen. Außerdem dämpfen die Holzfaserdämmung und der Gussasphaltestrich den Trittschall. Gussasphalt weist aufgrund des Bitumenanteils eine gewisse Elastizität auf und verfügt damit – genau wie die Holzfaserdämmung – über eine relativ niedrige dynamische Steifigkeit. Beide federn damit den Trittschall besser ab als ein Zementestrich mit EPS-Dämmung. Die Holzfaserdämmplatten sind in einer Stärke bis 40 mm ohne Leimanteil erhältlich und können somit kompostiert werden. Um die hier geplante Stärke von 60 mm zu erhalten, werden drei Lagen à 20 mm übereinandergelegt. Auf einen Oberbodenbelag wird verzichtet; stattdessen wird der Gussasphalt als Sichtestrich nur geschliffen. Im Gegensatz dazu fällt der Laminatbelag der konventionellen Decke im angenommenen Lebenszyklus von 50 Jahren dreimal an.

In beiden Varianten sind die im Rückbaufall anfallenden Wertstoffe größtenteils mineralischen Ursprungs. Während der Gussasphalt und der Sand in der Urban-Mining-Design-Variante sortenrein rückbaubar sind, werden der Zementestrich und die Stahlbetondecke in der konventionellen Variante verunreinigt. Das verklebte Laminat hinterlässt Kleberreste auf dem Estrich, und der Gipsputz verunreinigt den Beton. Estrich und Beton werden deshalb den mineralischen Gemischen mit geringer Verschmutzung zugeordnet.

Die wertvollen Kupferheizrohre und die übrigen Metalle machen die Decke (ebenso wie die Gründung) zu einem wahren Wertstofflager. Am Ende der Nutzungsdauer kann so insgesamt ein Erlös von fast 8 € pro m<sup>2</sup> erzielt werden, während bei der konventionellen Konstruktion mit Entsorgungskosten gerechnet werden muss – vor allem aufgrund des verschmutzten Betons.

Der Wert der Materialien lässt sich auch an den entsprechenden Faktoren in den nebenstehenden Grafiken ablesen. Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Decke 0,70 und für die recyclingorientierte 0,91.

Auch die Faktoren zum Rückbauaufwand liegen um durchschnittlich 0,1 Punkte auseinander. Die Bauteilschichten der kreislauforientierten Decke sind rückbaufreundlich geplant, was sich in einem durchschnittlichen Faktor Arbeit von 0,86 zeigt. Bei der konventionellen Konstruktion verursachen das Lösen des verklebten Laminats, das notwendige Abschlagen des Gipsputzes und der Abbruch der massiven, 24 cm starken Betondecke einen mittleren bis hohen Rückbauaufwand (Faktor Arbeit 0,79).

Die zuvor beschriebenen Parameter bewirken auch bei der Decke des Modellprojekts 2 wieder große Unterschiede in der quantitativen Bewertung der Kreislaufpotenziale: Die konventionelle Decke weist ein sehr

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

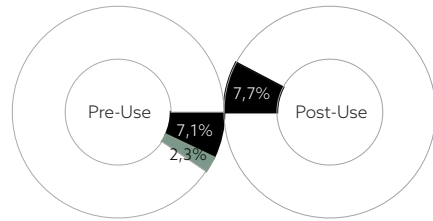
## Konventionelle Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Laminat	22,2	RN0	79,7	dc	en <sub>r</sub>
Zementestrich	97,5	PR		dc	d
PEX-Heizrohre/EPS		PR		en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Trennlagen PE-Folie	1,9	PR		en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
EPS-Dämmung	0,2	PR		en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Deckenplatte Beton	0,8	PR		dc	d
Bewehrungsstahl	576,0	RC100	rc100	rc	rc
Gipsputz	53,8	PR		rc99	d
Raufasertapete	9,0	DC70 +		en <sub>f</sub>	en <sub>r</sub>
Dispersionsfarbe	1,3	PR		en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
<b>Gesamt</b>	<b>763,3</b>				

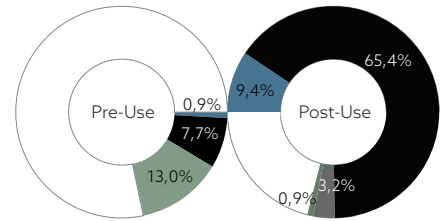
## Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Gussasphaltestrich	100,0	PR	rc100	dc	dc
Kupfer-Heizrohre	1,5	RC65	rc100	rc	rc
Alu-Lamellen	0,5	RC50	rc98	rc	rc
Graupappe	0,2	DC100		dc	en <sub>r</sub>
Holzfaserdämmung	15,0	RN0 100	rc100c	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>
Masseschüttung Sand	24,3	PR		ru	dc
Trapezblech, Stahl	8,8	RC35	rc100	rc	rc
HEB-Stahlprofil	29,4	RC35	rc100	rc	rc
KVH, Fichte	6,0	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Lattungen, Fichte	1,8	RN100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Jutebespannung	1,7	RU100+	rc100c	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>
<b>Gesamt</b>	<b>189,2</b>				

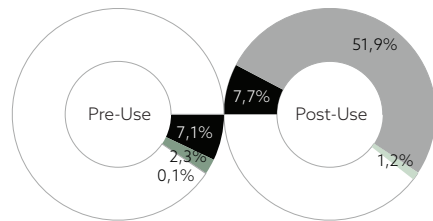
## Kreislaufpotenziale



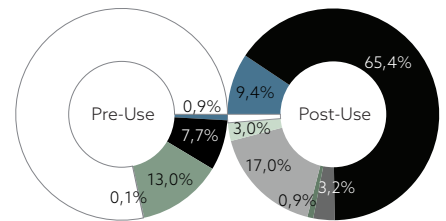
Closed-Loop-Potenzial 9,4% 7,7% 17,1%



Closed-Loop-Potenzial 21,6% 78,9% 100,5%

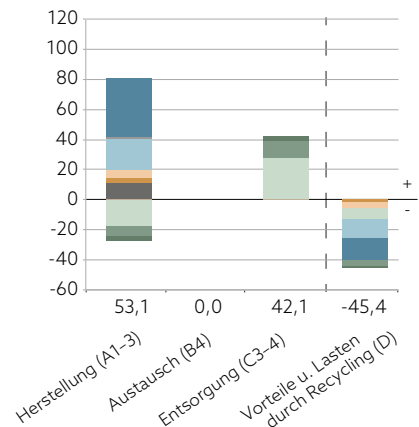
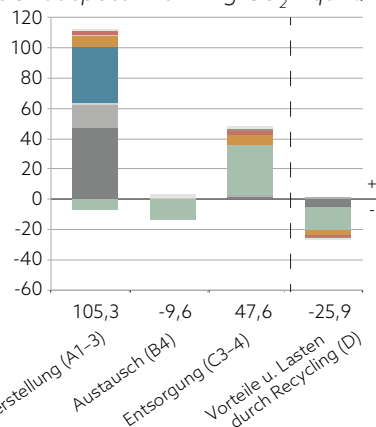


Loop-Potenzial 9,5% 60,8% 70,3%



Loop-Potenzial 21,7% 98,9% 120,6%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



Hinweis: Für den Gussasphaltestrich der recyclingorientierten Konstruktion liegen keine Ökobilanzdaten für ein hochwertiges Recycling vor, sodass hier nur die Bauschutttaufbereitung im Modul C angesetzt werden kann. Die Gutschriften für ein Closed-Loop-Recycling würden sicherlich höher ausfallen.

geringes Closed-Loop-Potenzial von 17% auf. Im Gegensatz dazu kommt die Decke im Urban Mining Design auf ca. 100%. Hierzu tragen vor allem die großen Massen des recyclingfähigen Gussasphaltestrichs und die tragenden Stahlbauteile bei.

**Allerdings zeigt sich am Beispiel der Decke eine Problematik, die auf die prozentuale Bewertungsmethodik zurückzuführen ist: Ein erforderlicher Austausch eines Baustoffs im Lebenszyklus kann sich positiv auswirken, wenn das Kreislaufpotenzial dieses Baustoffs hoch ist.** Bei der konventionellen Decke weist der Laminatbelag ein materialspezifisches Closed-Loop-Potenzial von 79,9% auf, bedingt durch den Anteil nachwachsender Rohstoffe in gleicher Höhe. Im Gesamtergebnis trägt der Laminatbelag 2,3% zum Closed-Loop-Potenzial bei. Da es sich innerhalb der konventionellen Decke um einen der wenigen Baustoffe handelt, die überhaupt ein Closed-Loop-Potenzial aufweisen, wirkt sich der erforderliche zweimalige Austausch im Lebenszyklus positiv auf das Ergebnis aus: Ohne Austausch würde das CLP der Gesamtkonstruktion Pre-Use statt 9,4% nur 8,0% betragen (da ca. zwei Drittel des o.g. CLP-Anteils wegfallen).

**Der Verzicht auf den Einsatz von Ressourcen, also die Anwendung des Suffizienzprinzips, das mit der hierarchisch höchsten Stufe der Abfallrahmenrichtlinie – der Vermeidung – eng verbunden ist, kann dagegen nicht abgebildet werden.** So wirkt sich der Verzicht auf einen Oberbodenbelag bei der recyclingorientierten Konstruktion nicht positiv aus. Würde ein Belag mit hohem, möglichst vollständigem Sekundärrohstoffanteil gewählt und hätte dieser zudem ein hohes Material-Loop-Potenzial mit Herstellerrücknahmeverfahren und sehr geringem Rückbauaufwand (z.B. recyclingfähige Teppichfliesen eines niederländischen Herstellers mit Cradle-to-Cradle-Zertifikat), würde das Closed-Loop-Potenzial der Gesamtkonstruktion sogar noch steigen, obwohl in absoluten Zahlen gemessen mehr Ressourcen gebraucht würden.

**Hier stößt der Urban Mining Index mit seiner prozentualen Auswertung an Grenzen bzw. grundlegende Strategiekonflikte, die in der Wissenschaft bereits länger diskutiert werden** (siehe Kapitel 2.1.3). Bewusst wurde im Beispiel der Teppichfliesen der Ausdruck „gebraucht“ und nicht „verbraucht“ gewählt. Denn wenn der Materialkreislauf geschlossen ist, werden weder Ressourcen verbraucht noch entstehen Abfälle. Wenn die Prozessenergien (und sonstigen Medien) für Herstellung, Transport, Recycling etc. ebenfalls aus erneuerbaren Quellen stammen, wäre die vollkommene Kreislaufkonsistenz gegeben.

Betrachtet man den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck fallen auch hier die Auswirkungen aus dem erforderlichen Austausch des Laminatbelags bei der konventionellen Decke ins Gewicht: Der Holzwerkstoff verursacht im Verhältnis zum Masseanteil relativ hohe Emissionen bei der energetischen Verwertung. Rechnet man die Speicherung von CO<sub>2</sub> im Herstellungsprozess (A1-3 und B4) und die Gutschriften für den Energieexport (D) dagegen, ist das Treibhauspotenzial des Laminatbelags insgesamt negativ (-2,1 kg pro m<sup>2</sup>). In einer Ökobilanz nach DGNB, bei der das Modul D gegenge-rechnet wird, würde sich der Austausch damit ebenfalls positiv auswirken.

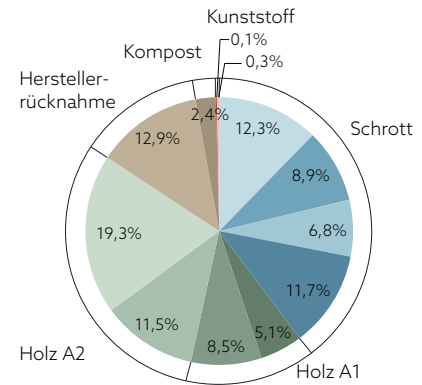
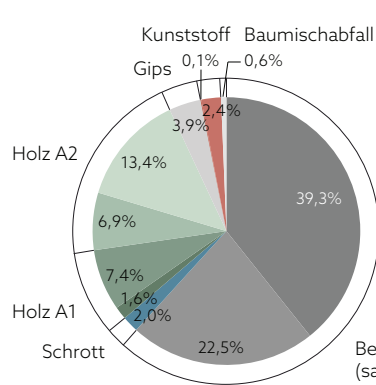
**Dach**

**Konventionelle Konstruktion**

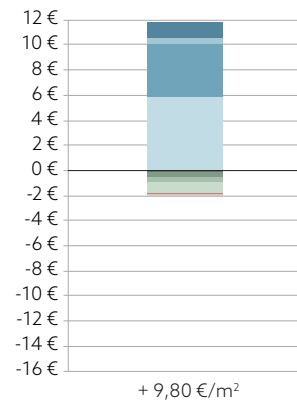
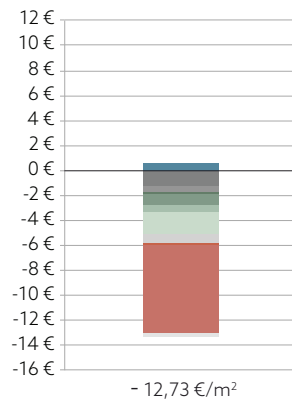
**Recyclingorientierte Konstruktion**

Materialien und Massen im Lebenszyklus

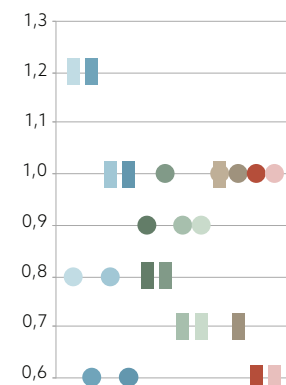
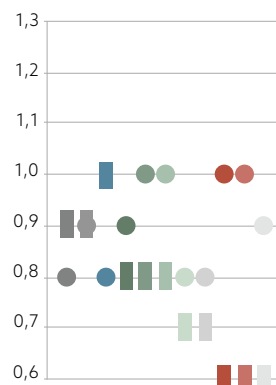
	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
■ Betondachsteine	45,6	■ Steckpaneelblech, Edelstahl, 1 mm	8,6
■ Lattung Fichte, 30/50 mm	3,2	■ U-Profile, Edelstahl, 2-3 mm	6,3
■ Unterspannbahn PUR auf PET-Vlies	0,2	■ Trapezblech, Stahl verzinkt, 35/207 mm	4,8
■ Zwischensparrendämmung EPS, 240 mm	4,8	■ Lattungen, Fichte, 24-40/40-60 mm	3,6
■ OSB/3-Platten (innere und äußere Beplankung, 22mm)	27,2	■ Winddichtung PE-HD, 0,2 mm	0,1
■ Sparren KVH Fichte, 120/240 mm	15,0	■ MDF-Platte, 15 mm	8,1
■ Brettschichtholzbinde	14,0	■ Jutefaserdämmplatten, 60 + 200 mm	9,1
■ Ringanker, Beton	79,6	■ HEB-Profil, Stahl verzinkt, 200/200/9 mm	8,2
■ Ringanker, Bewehrung	4,0	■ KVH Fichte, 120/200 mm	6,0
■ Gipskartonplatten, 12,5 mm	7,9	■ OSB/3-Platte, 22 mm	13,6
■ Dispersionsfarbe	1,3	■ Dampfbremse, PE-LD 0,2 mm	0,2
	202,8	■ Wandbespannung, Jute recycelt, 2 mm	1,7
			70,3



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



#### 8.2.4. Vergleichsanalyse Dach

Das konventionelle Dach ist ein Sparrendach mit üblicher Deckung aus Betondachsteinen. Zur Aussteifung ist ein Ringanker aus Beton vorgesehen, der den massenmäßig größten Anteil an den Materialien hat, gefolgt von den Dachsteinen. Zur äußeren und inneren Beplankung werden OSB-Platten eingesetzt, die innenseitig gleichzeitig als Dampfbremse dienen. Die aus den Materialien im Rückbau resultierenden Wertstoffe sind größtenteils Beton und Holz.

Das Dach der Urban-Mining-Design-Variante besteht gemessen am Gewicht zu mehr als einem Drittel aus Metallen. Die Primärtragkonstruktion wird aus Stahlprofilen hergestellt, die wasserführende Schicht ist ein Trapezblech, das mit Steckpaneelen aus Edelstahl bekleidet wird. Das Dach ist damit zwar recht teuer in der Herstellung und kostet nach Berechnungen von Riegler-Floors und Hillebrandt das 2,5-Fache des konventionellen Dachs, es ist dafür aber auch sehr wertvoll. Da die Metalle endlos recycelbar sind und nicht an Wert verlieren, sondern im Zuge der Rohstoffverknappung eher noch gewinnen, kann die Investition damit als wahre Geldanlage bezeichnet werden. Zusätzlich zu einer ggf. zu erzielenden Miete und Grundpreissteigerung kann mit dem reinen Verkauf des Materials beim Rückbau ein Erlös erzielt werden.

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Bauteilen kann der Beton des konventionellen Dachs sortenrein getrennt und als reiner Betonbruch verwertet werden. Die Entsorgungskosten sind deshalb weniger hoch als bei den zuvor beschriebenen massiven Bauteilen. Die EPS-Dämmung verursacht jedoch auch hier hohe Entsorgungskosten. Dagegen fallen für den Jutedämmstoff keine Entsorgungskosten an, da der Hersteller sortenreine Materialien zurücknimmt. Rechnet man statt Herstellerrücknahme (etwa weil die Transportkosten zu hoch wären) mit dem Preis für biologische Faserstoffe (Kompost), würden 0,45€/m<sup>2</sup> Dachfläche für die Verwertung des Dämmstoffs anfallen. Im schlimmsten Fall würde der Entsorger den Wertstoff als Baumischabfall annehmen; dann entstünden 1,71€/m<sup>2</sup>. Auch dann lägen die Entsorgungskosten noch weit unter den Kosten für die Entsorgung des Styropors des konventionellen Dachs (7,19€/m<sup>2</sup>).

Der Aufwand für den Rückbau unterscheidet sich bei den hier betrachteten Dachkonstruktionen nicht: Der durchschnittliche Faktor Arbeit beträgt 0,88. Während die holzbasierten Materialien in beiden Dächern einen ähnlichen Rückbauaufwand verursachen, sind die Betondachsteine etwas leichter zu entfernen als die gesteckten Edelstahlbleche (s. Bauteile 363.01 und 363.03 im Bauteilkatalog). Allerdings wirkt sich der höhere Rückbauaufwand nicht negativ auf das Kreislaufpotenzial aus, da Zinkblech aufgrund seines hohen Werts nicht nur im selektiven Rückbau, sondern auch im selektiven Abbruch dem Recycling zugeführt wird. Der Aufwand für den sortenreinen Rückbau der Gipskartonplatten wurde geschätzt, da keine Versuchsergebnisse oder Daten von Rückbaustellen vorliegen und auch nicht erhoben wurden. Es wird ein mittlerer Aufwand angenommen, da die Schrauben zur Befestigung verspachtelt werden und die Platten von den OSB-Platten abgebrochen werden müssen. Die textile Wandbespannung lässt sich dagegen sehr leicht zurückbauen.

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (d<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

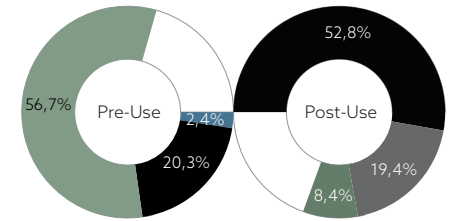
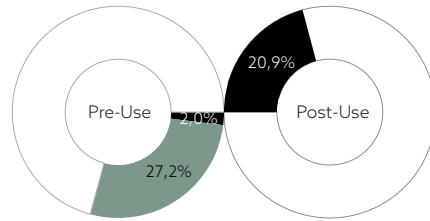
## Konventionelle Konstruktion

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Betondachsteine	45,6	PR	rc 39	dc
Lattung Fichte	3,2	RN 0 100	dc	en <sub>r</sub>
Unterspannbahn				
PUR auf PET-Vlies	0,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
EPS-Dämmung	4,8	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
OSB/3-Platten	27,2	RN 0 86	dc	en <sub>r</sub>
Sparren KVH Fichte	15,0	RN 0 100	dc	en <sub>r</sub>
Brettschichtholz	14,0	RN 0 97	dc	en <sub>r</sub>
Ringanker, Beton	79,6	PR	rc 39	dc
Bewehrungsstahl	4,0	RC 100	rc 100	rc
Gipskartonplatten	7,9	RC 2	rc 99	d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
<b>Gesamt</b>	<b>202,8</b>			

## Recyclingorientierte Konstruktion

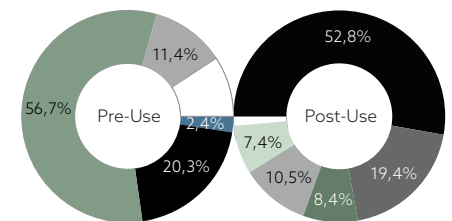
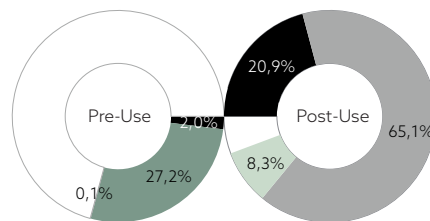
	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Edelstahlblech	8,6	RC 65,2	rc 100	rc
U-Profil, Edelstahl	6,3	RC 65,2	rc 100	rc
Stahltrapezblech	4,8	RC 35	rc 100	rc
Lattungen, Fichte	3,6	RN 100 0	d <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Winddichtung PE-HD	0,1	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
MDF-Platte	8,1	RN 47 47	dc	en <sub>r</sub>
Jutefaserdämmung	9,1	DC 88+ RN 0 97	rc 88	en <sub>r</sub>
HEB-Profil, Stahl	8,2	RC 35	rc 100	rc
KVH Fichte	6,0	RN 100 0	d <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
OSB/3-Platte	13,6	RN 45 44	d <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
Dampfbremse, PE-LD	0,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>r</sub>
Jutebespannung	1,7	RU 100+	rc 100c	en <sub>r</sub>
<b>Gesamt</b>	<b>70,3</b>			

## Kreislaufpotenziale



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	29,2%	20,9%	50,1%

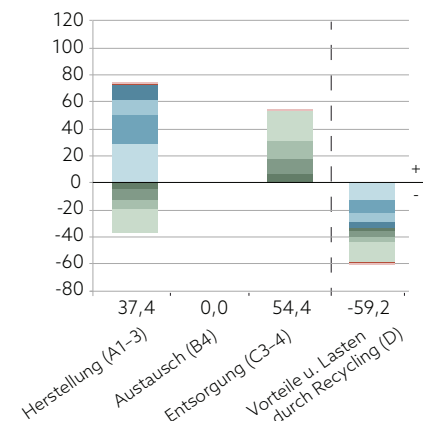
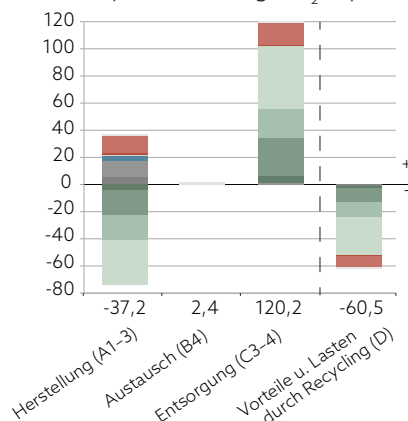
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	79,4%	80,6%	160,0%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	29,3%	94,3%	123,6%

	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	90,8%	98,5%	189,3%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



Das Dach weist von allen Bauteilen der konventionellen Konstruktion die höchsten Kreislaufpotenziale auf, kommt jedoch bei Weitem nicht an die recyclingorientierte Konstruktion heran.

In der Pre-Use-Phase wirken sich in beiden Varianten die Massivhölzer und die Holzwerkstoffplatten positiv aus. Der prozentuale Anteil an nachwachsenden Rohstoffen ist in der recyclingorientierten Variante aufgrund der höheren Materialdichte der Dämmungen höher. Außerdem kommen dort die Sekundärrohstoffanteile in den Metallen und das wiederverwendete Jutegewebe für die Wandbespannung hinzu, sodass das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use ca. doppelt so hoch wie in der konventionellen Variante ist. Wird darüber hinaus die Weiterverwertung von gebrauchten Jutefasern als Dämmstoff berücksichtigt, ergibt sich ein Loop-Potenzial für das Urban-Mining-Design-Dach von 79,4% Pre-Use, während die konventionelle Variante nur auf 29,2% kommt.

Post-Use wird beim konventionellen Dach der Anteil weiterverwertbarer Materialien am höchsten sein. Hierzu zählt ein Großteil des Betons, aber auch die holzbasierten Materialien. Aufgrund des relativ geringen Material-Loop-Potenzials des Baustoffs Beton (39%) und der Abschlüsse für die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus gehen nur 32% der Betondachsteine und 28% des Betonringankers in das Closed-Loop-Potenzial ein; der Rest wird dem Loop-Potenzial zugeordnet. Die Weiterverwertung des Altholzes wird ebenfalls dem offenen Kreislauf zugeordnet, weil davon ausgegangen wird, dass die Hölzer nicht zertifiziert sind und somit nicht gewährleistet ist, dass das Holz nachhaltig nachwächst.

Das Dach der recyclingorientierten Variante hat von allen Bauteilen das höchste Closed-Loop-Potenzial Post-Use (80,6%). Positiv wirken sich hier die Metalle mit ihrem hohen Material-Loop-Potenzial, aber auch die zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffe aus. Der Anteil von nicht zertifiziertem Holz in den Holzwerkstoffplatten geht darüber hinaus in das Loop-Potenzial ein. Nur 1,5% geht am Ende der Nutzungsdauer verloren. Hierzu zählen vor allem die nicht nachwachsenden Inhaltsstoffe der Holzwerkstoffplatten (Polyurethanleime) und die Kunststofffolien zur Wind- und Dampfdichtung. Solange sich für Letztere kein Weg zur stofflichen Verwertung etabliert, muss davon ausgegangen werden, dass die Wertstoffe energetisch verwertet werden und die fossilen Rohstoffe damit unwiederbringlich verloren gehen.

An den Grafiken zum Treibhauspotenzial ist ablesbar, dass das Dach der recyclingorientierten Variante im Lebenszyklus höhere Emissionen verursacht als die konventionelle Ausführung (rund 92 zu 85 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup> in den Modulen A–C). Dieser Nachteil lässt sich auch nicht ausgleichen, wenn man die Gutschriften für das Recycling am Ende der Nutzungsdauer (Modul D) berücksichtigt.

Beim Urban-Mining-Design-Dach verursacht vor allem die Herstellung der Bauteile aus Edelstahl relativ hohe klimaschädliche Emissionen. Im Modul D erhalten nur die Primärstahlanteile Gutschriften für das Recycling (die „Output-Nettoflüsse“). Nach DIN EN 15804 [184] ist „die Menge an Output von Sekundärstoff, die in der Lage ist, tatsächlich eins zu eins den Input an Sekundärmaterial als ‚closed loop‘ zu substituieren, [...] Teil des untersuchten Produktsystems und wird nicht dem Modul D zugeordnet.“

---

### 8.3. Zwischenfazit

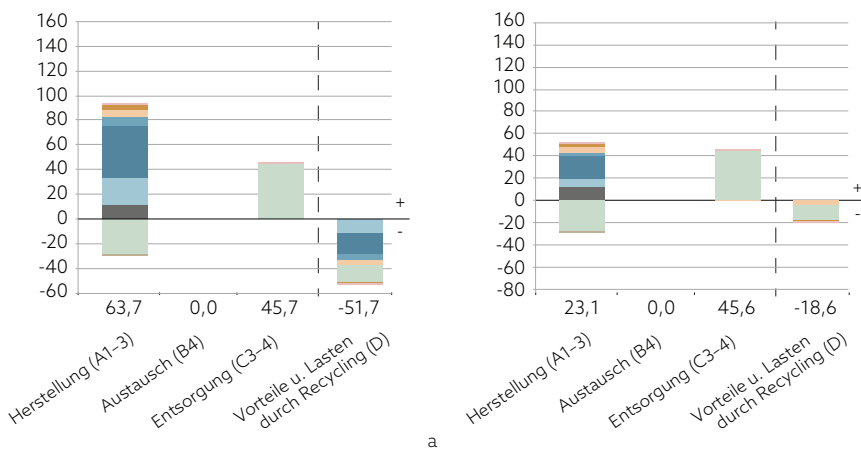
Die Vorteile der kreislaforientierten Planung konnten in beiden Modellprojekten durch die Berechnung der Kreislaufpotenziale mit dem Urban Mining Index bestätigt werden. Alle Bauteile der kreislaforientierten Konstruktionen weisen sehr hohe Closed-Loop-Potenziale auf und eignen sich damit für das Bauen in geschlossenen Stoffkreisläufen. Dabei spielt die Post-Use-Phase durchgehend eine größere Rolle als die Pre-Use-Phase. Das liegt daran, dass viele Baustoffe noch nicht einem bestehenden Kreislaufprozess entnommen werden können, also derzeit nicht als Sekundärrohstoffe erhältlich sind. So ist in vielen Stahlbauteilen immer noch ein hoher Primärstahlanteil enthalten, da der Bedarf das aktuell im Umlauf befindliche Angebot an Sekundärstahl übersteigt. Ebenso werden auch viele Holzwerkstoffe noch nicht mit 100% Holz aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft angeboten.

Auch das Loop-Potenzial ist in allen recyclingorientierten Bauteilen höher als bei den konventionellen. Die Weiterverwertbarkeit ist zwar auch bei der konventionellen Bauweise teilweise recht hoch, doch führen schwer lösbare Materialverbindungen, wie z.B. die Bitumendickbeschichtung der konventionellen Bodenplatte im Modellprojekt 2, zu Restanhaftungen, die selbst ein Downcycling verhindern können. Für solche Bauteile wird ein anteiliger Verlust durch Deponierung prognostiziert. Das deutet darauf hin, dass für das Loop-Potenzial der konstruktive Aspekt entscheidender ist als der materielle – zumindest bei einem hohen Anteil mineralischer Materialien.

#### *Resultate aus der Bauweise*

In beiden Modellprojekten wurde die recyclingorientierte Konstruktion jeweils als Leichtbauweise einer schweren Bauweise gegenübergestellt. Lässt sich daraus nun der Schluss ziehen, dass die Leichtbauweisen hinsichtlich des zirkulären Bauens generell Vorteile gegenüber massiven Bauweisen haben? Im Großen und Ganzen kann diese Frage bejaht werden. Leichte Konstruktionen werden in der Regel entweder in Holz- oder Stahlskelettbauweise erstellt. Sowohl Holz als auch Metall eignen sich gut für das Bauen in geschlossenen Stoffkreisläufen, da Holz in den natürlichen und Metall in den technischen Kreislauf zurückgeführt werden kann. Mineralische Materialien hingegen erfahren – sofern sie gebrannt werden – im Herstellungsprozess eine chemische Veränderung, die nach aktuellem Stand der Forschung unumkehrbar ist. Beton und Ziegel lassen sich nicht wieder plastifizieren und werden deshalb in gebrochener Form verwertet. Im Neumaterial kann nur ein Teil durch gebrochene oder gemahlene Körnung ersetzt werden, sodass der Großteil in andere Kreisläufe abwandert. Im Ergebnis werden die mineralischen Materialien der massiven Bauweisen größtenteils im Loop-Potenzial ausgewiesen.

Die hier gezeigten Modellprojekte eignen sich für eine Leichtbauweise. Diese ist jedoch nicht für alle Bauaufgaben geeignet. Bei Projekten mit hohen Anforderungen an den Brand- und Schallschutz wird die Massivbauweise kaum zu ersetzen sein. Im folgenden Kapitel 9 wird überprüft, wie das Kreislaufpotenzial einer Massivbauweise optimiert werden kann.



A 8.8 Treibhausgasemissionen der recyclingorientierten Gründung aus Modellprojekt 2 mit unterschiedlicher Datenbasis (Rechenex-  
emple)

a Bilanzierung mit den korrekten materialspezifischen Ökobilanzdatensätzen aus Umweltproduktdeklarationen oder Ökobaudat.

b Bilanzierung aller Stahlbauteile mit dem Ökobilanz-Datensatz für Bewehrungsstähle (100% Sekundärstahl) – Unterschiede durch verschiedene Verarbeitungsprozesse und Festigkeiten bleiben unberücksichtigt

### Resultate zum CO<sub>2</sub>-Footprint

Die recyclingorientierten Konstruktionen weisen fast durchgängig einen niedrigeren CO<sub>2</sub>-Footprint auf als die konventionellen Konstruktionen. Dabei bewirkt der Holztafelbau mit Holzfassade noch einen größeren Unterschied zur konventionellen Bauweise als der Stahlskelettbau mit Edelstahlfassade. Beim Holzbau erklärt sich dies durch die Speicherung von Kohlenstoff im Wachstumsprozess. Beim Stahlbau können die hohen Emissionen der Primärstahlherstellung zum Teil durch Recycling reduziert werden.

Die deutschen Treibhausgasemissionen betragen im Jahr 2017 nach Angaben des Klimasekretariats der Vereinten Nationen [185] insgesamt 906,6 Mio. Tonnen<sup>68</sup>. Im selben Jahr hat die deutsche Stahlindustrie nach Daten der Wirtschaftsvereinigung Stahl [186] nur für die Rohstahlproduktion ca. 57,8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert (inkl. Exporte<sup>69</sup>). Auf Baustahl entfallen ca. 35% der gesamten Stahlproduktion [188]. Damit waren die in Deutschland hergestellten Baustähle für ca. 2,23% der deutschen Klimagase verantwortlich.<sup>70</sup>

Der Anteil der Zementindustrie war nach Daten des Vereins deutscher Zementwerke e.V. [189] im Jahr 2017 mit 2,26% (inkl. Exporte<sup>71</sup>) nahezu gleich hoch.

Mit Blick auf diese Zahlen stellt sich die Frage, ob das Bauen mit Stahl genauso klimaschädlich ist wie das Bauen mit Beton bzw. Zement. Bei der Beantwortung dieser Frage spielt die Recyclingfähigkeit von Stahl eine wichtige Rolle. 2017 betrug der Anteil des Hochofenverfahrens in Deutschland gemäß Statistik der worldsteel association [191] 70% und der des Elektrostahlverfahrens (Schrottverwertung) 30%, weil derzeit wesentlich mehr Stahl nachgefragt wird, als durch Sekundärmaterial gedeckt werden kann. Aber einmal angenommen, es wäre so viel Stahl im Umlauf, dass man Stahlbauteile komplett aus Schrott im Elektrostahlverfahren herstellen könnte, also nur noch in geschlossenen Kreisläufen führen würde, wäre dann das Bauen mit Stahl klimafreundlich?

68 Die Angabe beinhaltet alle Treibhausgase ohne Landnutzungsänderungen.

69 Nach Statistischem Jahrbuch 2018 der worldsteel association [187] betrug die Rohstahlproduktion in Deutschland 2017 43,3 Mio. Tonnen. Davon wurden 26,4 Mio. Tonnen als Stahlhalbzeuge und Stahlfertigprodukte exportiert, während gleichzeitig 27,1 Mio. Tonnen importiert wurden.

70 Die Angabe bezieht sich auf die Rohstahlproduktion, d.h. ohne Formgebung, wie Walzen, Strangpressen, Gießen, etc.

71 Der Zementabsatz betrug 2017 nach Angaben des vdz [190] 33,5 Mio. Tonnen. Davon wurden 6,2 Mio. Tonnen exportiert, während gleichzeitig 1,6 Mio. Tonnen importiert wurden.

---

Um sich einer Antwort anzunähern, wurde ein Rechenexempel durchgeführt. Hierfür wurden die Stähle der recyclingorientierten Gründung aus Modellprojekt 2 (HEB-Profile, Trapezblech und Schraubfundamente) hilfsweise mit dem Ökobilanz-Datensatz für Bewehrungsstahl bilanziert, der zu 100% aus recyceltem Schrott hergestellt wird. In Abb. A 8.8 sind die Ergebnisse gegenübergestellt. Sie sind nicht ganz vergleichbar, da unterstellt wird, dass die Verarbeitung zu Profilen und Blechen nicht mehr Treibhausgase verursacht als die Verarbeitung zu Bewehrungsstählen. Würde diese Annahme aber annähernd zutreffen, wären die Klimagasemissionen der Gesamtkonstruktion in der Herstellungsphase (Modul A1-3) um ca. 60% geringer (23,1 statt 63,7 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv.).

Mit legierten Stählen wie z. B. Edelstahl, kann ein solches Rechenexempel nicht durchgeführt werden, da Legierungen einen signifikanten Einfluss auf den Ressourcenverbrauch und das Treibhauspotenzial haben. Nach Lemken et al. vom Wuppertal Institut [192] ist „Typischer Edelstahl [...] ca. 2 bis 3 mal so ressourcenintensiv wie unlegierter Stahl aus der Hochofenroute und ca. 5 bis 10 mal ressourcenintensiver gegenüber einem solchen Stahl aus der Elektrofenroute. Die Spannbreite ist abhängig von den gewählten Indikatoren: Gesamtmaterialaufwand (TMR), Wasser, kumulierter Energieverbrauch (KEA) [sic] und Treibhauspotenzial (GWP).“ Legierte Stähle sind deshalb nach Lemken et al. für eine großflächige Anwendung nicht zu empfehlen.

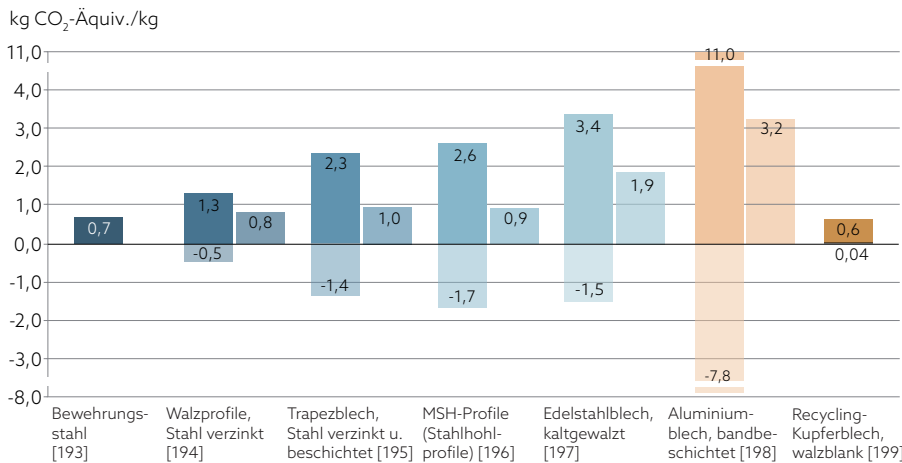
Eine Optimierung der Treibhausgasemissionen könnte sicherlich erzielt werden, wenn der Strom für das Elektrostahlverfahren zu 100% aus erneuerbaren Energien gewonnen würde. Aber auch damit könnte nur ein Teil des Edelstahls klimafreundlich produziert werden, da die Nachfrage das Schrottaufkommen derzeit noch übersteigt.

Abb. A 8.9 zeigt den CO<sub>2</sub>-Footprint verschiedener in Modellprojekt 2 verwendeter Metalle über den Lebenszyklus. Die Daten basieren auf Umweltproduktdeklarationen von Herstellern oder generischen Daten der Ökobaudat (siehe Abb. A 8.9 und Anhang).

Bei einem Vergleich des kumulierten Treibhauspotenzials fällt auf, dass die unlegierten Stähle in dieser Hinsicht recht nah beieinanderliegen. Das deutet darauf hin, dass das durchgeführte Rechenexempel plausibel ist. Weiterhin fällt das relativ hohe Treibhauspotenzial von Edelstahlblech in der Herstellung auf, was die Ausführungen von Lemke et al. bestätigt.

Aufgrund der hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Edelstahlherstellung ist zu überlegen, ob andere Metalle als ebenso kreislauffähige, aber klimaschonendere Bekleidung dienen können. In Abb. A 8.9 wurden deshalb dem Edelstahlblech zwei weitere Bleche gegenübergestellt: Aluminiumblech, das dem Edelstahlblech optisch ähnelt, verursacht in der Herstellung noch viel höhere Treibhausgasemissionen. Selbst unter Berücksichtigung der Gutschriften für das Recycling der Primäraluminiumanteile am Ende der Nutzungsdauer ist der kumulierte CO<sub>2</sub>-Footprint um 68% höher als der des Edelstahlblechs.

Wesentlich geringere Klimagasemissionen verursacht die Herstellung eines Kupferblechs aus 100% Recyclingmaterial, wie es z. B. von Hille-



A 8.9 Treibhausgasemissionen der in Modellprojekt 2 verwendeten Metalle in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. pro kg Metall

Pluswerte: Herstellung (Modul A1-3)  
 Minuswerte: Gutschriften für Recycling (Modul D)  
 rechte Säulen: kumuliert (Modul A1-3 + Modul D)

Die Entsorgungsphase (Modul C) ist wegen geringfügigkeit nicht dargestellt.

brandt und Riegler-Floors für ein anderes Modellprojekt im Atlas Recycling vorgeschlagen wird. Es handelt sich um ein Produkt eines deutschen Herstellers [199], weshalb die Werte nicht für alle Kupferbleche gelten. Der Abb. A 8.9 ist zu entnehmen, dass keine Gutschrift für den Export in den nächsten Lebenszyklus ausgewiesen wird, sondern eine geringfügige Belastung. In der Umweltproduktdeklaration wird angenommen, dass bei der Sammlung 1% des Materials verloren geht. Die Schrottverluste werden rechnerisch durch die Produktion von Primärkupfer am Lebensende ausgeglichen.

Durch den Einsatz von Kupfer an der Fassade würde sich jedoch zum einen das ästhetische Erscheinungsbild ändern. Zum anderen handelt es sich um ein Schwermetall: bei großflächiger Anwendung müssen deshalb Schwermetallfilter in die Regenentwässerung integriert werden.

Berücksichtigt werden sollte auch, dass Metalle zwar Closed-Loop-Materialien sind und den nachfolgenden Generationen leicht zur Verfügung stehen, wenn sie sortenrein und leicht trennbar verbaut werden. Allerdings können die Metalle, wenn sie im Boden verbleiben, von eben diesen nachfolgenden Generationen wahrscheinlich effizienter und umweltfreundlicher gewonnen werden als heute, da die Technologie zur Förderung und Verarbeitung stetig weiterentwickelt wird. Die Forschung arbeitet z. B. daran, Eisenoxid zur Eisen- und Stahlherstellung mit Wasserstoff statt mit Koks (aus Kohle) zu reduzieren. Dies würde den Herstellungsprozess wesentlich klimaschonender machen. Solange solche Technologien noch nicht zur Verfügung stehen, sollte mit Primärmetallen (vor allem Edelstählen) sparsam umgegangen werden. Im besten Fall werden sie so eingesetzt, dass sie durch ihren Wert auch den selektiven Rückbau anderer Materialien forcieren.

**Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die recyclingorientierte Planung mit dem Urban Mining Index quantitativ nachgewiesen werden kann.** Die Variantenvergleiche haben gezeigt, dass die kreislaufgerechten Bauteile in den meisten Fällen auch geringere Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus verursachen. Der CO<sub>2</sub>-Footprint (und andere, in dieser Arbeit nicht betrachtete Indikatoren der Ökobilanz) sollten jedoch möglichst zusätzlich berechnet werden, um die Auswirkungen des Urban Mining Design auf die Umwelt zu überprüfen.



RATHAUS KORBACH

---

## 9. Anwendung der Forschungsergebnisse auf Gebäudeebene in der Neubauplanung für das Modellprojekt „Rathaus Korbach“

Anhand eines realen Bauprojekts wird der Urban Mining Index nun auf Gebäudeebene angewandt. Ziel ist es zu prüfen, wie eine konkrete Planung mit dem entwickelten Tool bewertet und optimiert werden kann. Zum anderen wird die Bewertung der Kreislaufpotenziale von der Bauteilebene auf die Gebäudeebene übertragen.

Auf der Gebäudeebene werden die Ergebnisse für das Closed- Loop- und das Loop-Potenzial schließlich gewichtet und lebenszyklusphasenübergreifend im Urban Mining Indicator abgebildet.

Als Beispielprojekt wurde der neue Anbau für das Rathaus Korbach ausgewählt, das von der Stadt Korbach mit Unterstützung des Landes Hessen als Modellprojekt für ressourcenschonendes Bauen erstellt wird. Das Projekt scheint nicht nur wegen dieses Ansatzes gut geeignet, sondern soll auch zeigen, ob eine kreislaufgerechte Optimierung der geplanten Massivbauweise mit dem Urban Mining Index nachgewiesen werden kann.

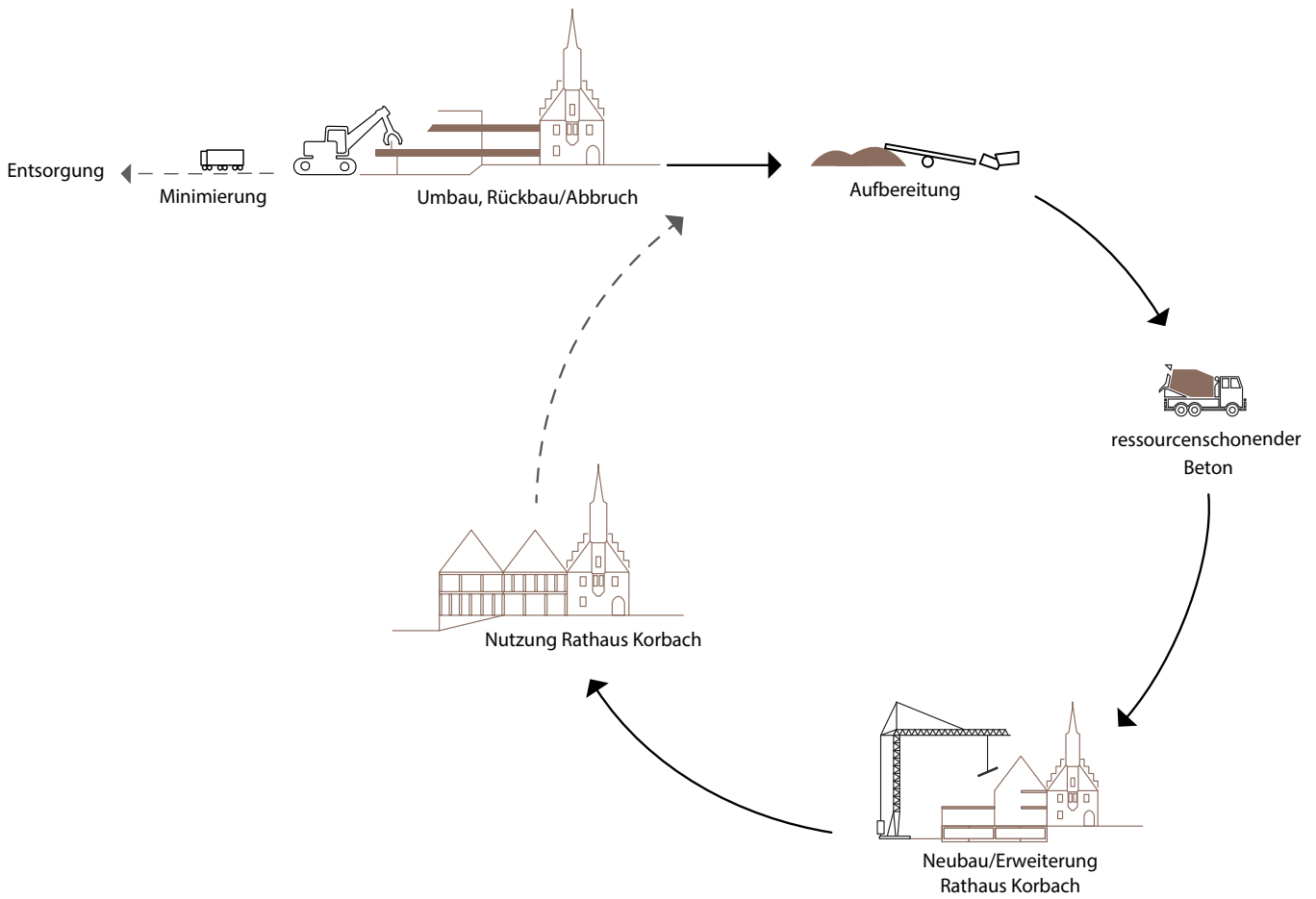
9.1.	Beschreibung des Projekts	231
9.2.	Leitdetails für den Neubau – Variantenvergleich mit dem Urban Mining Index	236
9.3.	Bewertung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene – der Urban Mining Indicator	278
9.4.	Zwischenfazit	284



A 9.2



A 9.3



A 9.4

## 9.1. Beschreibung des Projekts

Das Rathaus von Korbach liegt im historischen Innenstadtkern der nordhessischen Kreisstadt. Es besteht aus einem denkmalgeschützten Altbau gotischen Ursprungs und einem Anbau, der 1970 im Stil des Brutalismus in Betonbauweise errichtet wurde.

Die Stadt Korbach plant den Rückbau des Rathaus-Anbaus und die Errichtung eines Neubaus an derselben Stelle. Eine Sanierung und Weiternutzung wurde aufgrund großer, nicht wirtschaftlich zu sanierender Mängel ausgeschlossen. Auch aus städtebaulicher Sicht gilt der Anbau als nicht erhaltenswert (s. Abb. A 9.2 und A 9.3).

### 9.1.1. Projektziele und Beteiligte

Der Neubau des Rathauses Korbach ist ein Modellprojekt der Stadt Korbach und des Landes Hessen, unterstützt vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV). Bereits in der Projektentwicklung stand die Baumaßnahme im Fokus des ressourcenschonenden Bauens. Anhand des Modellprojekts sollen die Möglichkeiten eines selektiven Rückbaus mit anschließendem ortsnahem Recycling der mineralischen Abbruchmaterialien untersucht und aufgezeigt werden.

Nach einem offenen Planungswettbewerb wurde die ARGE agn heimspielarchitekten von der Stadt Korbach mit der Planung beauftragt. Die Promovendin hat als Mitarbeiterin der agn Gruppe das Urban Mining-Konzept für das Projekt entwickelt und erstellt im Auftrag des Landes Hessen projektbegleitend ein mehrstufiges Gutachten über die praktische Durchführung (Zwischenbericht 12/2018 [201]). Die Ergebnisse sollen nach Fertigstellung des Projekts im Jahr 2021 in einen „Leitfaden für ressourcenschonendes Bauen“ des Landes Hessen einfließen. Das Konzept ist in Abbildung A 9.4 grafisch dargestellt. Es beinhaltet über die Direktverwertung der mineralischen Abbruchmassen hinaus auch das Urban Mining Design für die Zukunft. Der Neubau soll somit nicht nur pre-use, sondern auch post-use ein hohes Kreislaufpotenzial aufweisen.

Das Projekt wird außerdem wissenschaftlich begleitet vom Center of Environmental Systems Research (CESR) der Universität Kassel. Im Forschungsprojekt „RückRat“ (12/2018–11/2020 [202]) untersucht ein Forschungsteam unter der Leitung von Clemens Mostert die tatsächlichen Stoffströme aus dem Rückbau und der Verwertung sowie die daraus resultierenden Rohstoffeinsparungen und Umweltwirkungen. Bereits 2017 wurde in einer Masterarbeit von Hofer [203] eine Bestandsaufnahme durchgeführt und das Verwertungspotenzial ermittelt. Während sich das Projekt RückRat auf die Verwertung der Abbruchabfälle aus dem Bestand konzentriert und die Umweltwirkungen anhand mehrerer noch festzulegender Indikatoren mittels Ökobilanzierung auswertet, steht in der vorliegenden Dissertation der Neubau im Fokus der Betrachtung. Dabei werden die Kreislaufpotenziale sowohl für die Pre-Use-Phase als auch für die Post-Use-Phase mit dem Urban Mining Index ermittelt. Die Rückbau- und Recyclingfähigkeit am Ende der Nutzungsdauer des Neubaus wird im Forschungsprojekt RückRat des CESR dagegen nicht betrachtet.

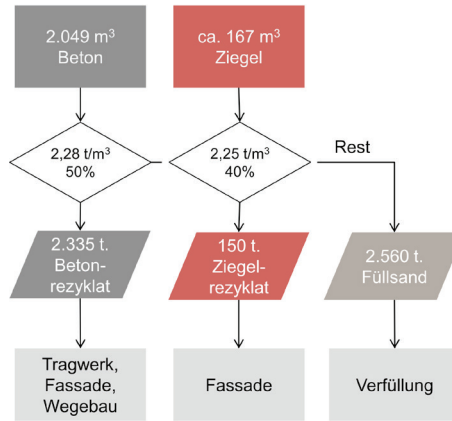
- A 9.2 Bestand Rathaus Korbach, Foto: Christian Thomann/ARGE agn heimspielarchitekten
- A 9.3 Luftbild historischer Innenstadtkern von Korbach [200] mit Kennzeichnung der relevanten Gebäude
- A 9.4 Urban Mining Konzept Rathaus Korbach, Anja Rosen für ARGE agn heimspielarchitekten

A Angebot

1. Mengenermittlung: mineralische Wertstoffe mit Eignung für den Einsatz im Beton des Neubaus

2. Mengenermittlung: Angebot an rezyklierter Gesteinskörnung  
Parameter: Dichte und Anteil 4/22mm

3. Festlegung Einsatz

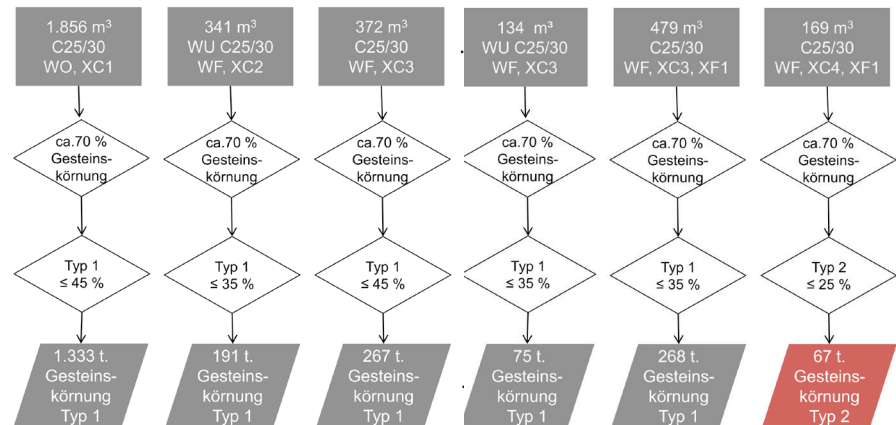


B Bedarf

4. Mengenermittlung: Betonbedarf nach Festigkeits-, Feuchtigkeits- u. Expositionsclassen

5. Massenermittlung des Bedarfs an Gesteinskörnung

6. Maximaler Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung nach DASTb.-Richtlinie, angenommene Dichte 2,28 t./m³



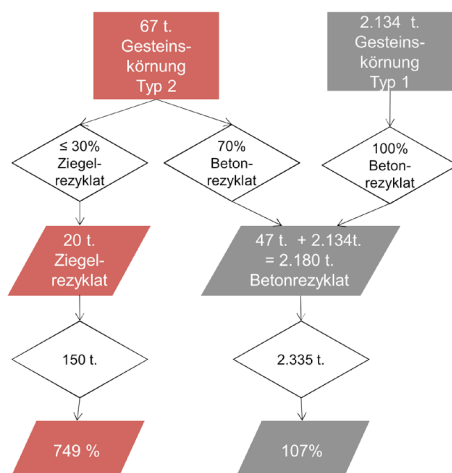
C Deckungsgrad Bedarf/Angebot

7. Summen des Bedarfs nach Gesteinskörnungstyp

8. Massenermittlung: Bedarf an Rezyklat nach Art des Rezyklats

9. Vergleich Angebot an Rezyklat aus dem Rückbau

10. Deckungsgrad Bedarf



### 9.1.2. Herangehensweise im Projekt

In der praktischen Umsetzung wird der größtmögliche Anteil der mineralischen Abbruchabfälle aus dem rückzubauenden Bestand so ortsnah wie möglich (unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit) aufbereitet und in den Betonbauteilen des Neubaus wiederverwertet. Diese direkte Wiederverwertung von Großteilen eines Bestandsgebäudes ist in Deutschland einmalig. In Österreich haben sich Romm und Kasper [204] bereits ausgiebig mit dem Thema „On-Site-Recycling“ beschäftigt.

Für das Projekt Rathaus Korbach wurden in der Entwurfsphase bereits umfangreiche Recherchen und Untersuchungen durchgeführt. Neben den üblichen Schadstoffprüfungen wurden die mineralischen Wertstoffe vor dem Abbruch anhand von Probenahmen vom Hessischen Institut für Baustoffprüfung (HIB) auf Eignung für die Wiederverwertung als rezyklierte Gesteinskörnung in Beton nach DIN 4226-101 [205] untersucht. In einem Rechenmodell wurden von der Promovendin die Mengen geeigneter mineralischer Abbruchabfälle ermittelt und dem Bedarf an rezyklierter Gesteinskörnung gegenübergestellt. Hierbei wurden die Maximalanteile rezyklierter Gesteinskörnung nach Feuchtigkeits-, Festigkeits- und Expositionsclassen gemäß Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [206] zugrunde gelegt.

**Nach dem Rechenmodell kann der Maximalanteil an rezyklierter Gesteinskörnung komplett aus dem Bestand gedeckt werden (s. Abb.**

A 9.5). Dabei wird nur ca. die Hälfte des Betonbruchs mit einer Körnung von 4 bis 22 mm wieder im neuen Beton eingesetzt. Die Feinanteile < 2 mm sind gemäß vorgenannter Richtlinie des DAfStb in rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2<sup>72</sup> nicht zugelassen und werden deshalb als Füllsand genutzt (nachrangige Verwertung gemäß KrWG), sofern die Güteüberwachung des Verwerters die Einhaltung der wasserrechtlichen Vorgaben bestätigt.

Neben der Wiederverwertung im Tragwerk des Neubaus sollen die Rezyklate auch in der Sichtbetonfassade eingesetzt werden. Um das Urban-Mining-Konzept sichtbar zu machen, ist eine Gesteinskörnung Typ 2 mit Ziegelbruch aus dem Nebengebäude (Stadtwache) geplant. Durch Oberflächenbehandlung wie Absäuern oder Strahlen soll die Körnung optisch hervorgehoben werden, sodass das rötliche Ziegelrezyklat deutlich sichtbar wird und das Recycling damit ablesbar ist. Abbildung A 9.6 zeigt ein Muster der Fassade.



A 9.6

A 9.5 Rechenmodell für die Direktverwertung der mineralischen Abbruchmaterialien aus dem Bestandsgebäude [201]

A 9.6 Sichtbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 unter Verwendung von Ziegelrezyklat an einer Musterfassadentafel

72 Rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 nach DIN 4226-101 enthält mindestens 90% Betonbruch und bis zu 10% Mauersteine und Ziegel, Typ 2 enthält mindestens 70% Betonbruch und bis zu 30% Mauersteine und Ziegel



#### 9.1.4. Stand des Projekts

Der Rathausanbau aus den 70er Jahren und das Nebengebäude „Stadtwache“ wurden von Mai bis Oktober 2019 hoch selektiv zurückgebaut. Zunächst wurde das Gebäude entrümpelt und entkernt. Dabei zeigten sich die typischen Probleme von Gebäuden, die nicht kreislaufgerecht geplant und gebaut wurden. Schadstoffe wie PCB-Altholz, künstliche Mineralfasern (KMF) und Asbest mussten sorgfältig ausgebaut und fachgerecht entsorgt werden. Dämmungen und Abdichtungen waren verschmutzt und wurden der energetischen Verwertung zugeführt (s. Abb. A 9.8). Andere nicht-mineralische Abbruchabfälle wie Metalle, Glas und Holz wurden auf etablierten Verwertungswegen vorrangig der Wieder- oder Weiterverwertung zugeführt. Mineralische Materialien wie Mauerwerk aus Porenbeton und Ziegeln, Gussasphaltestrich und Gips wurden ebenfalls vor dem Abbruch sorgfältig ausgebaut und sortenrein getrennt (s. Abb. A 9.9). Entrümpelung, Schadstoffausbau und Entkernung haben ca. drei Monate gedauert. Anschließend konnte das saubere Stahlbetonskelett mit Abbruchschere und Pulverisierer abgebrochen werden, wobei bereits ein Großteil des Stahls vom Beton getrennt wurde (s. Abb. A 9.10).

Allerdings stieß der selektive Rückbau hier auch an Grenzen: Die Stahlbetonrippendecke über dem Ratssaal mit verlorener Schalung aus Holzwoolplatten und EPS-Dämmung konnte auf der Baustelle nicht wirtschaftlich selektiv zurückgebaut werden. Der Rückbauunternehmer hat deshalb in Abstimmung mit der Bauleitung entschieden, die Rippendecke mit Schalung und Dämmung konventionell am Stück abzubrechen. Der separierte verunreinigte Betonbruch wurde im Recyclingbetrieb mit einem Windsichter nachsortiert. Die daraus entstandenen Rezyklate konnten jedoch nicht die für den Einsatz in Beton erforderliche Sortenreinheit erfüllen, sodass sie nur als Auffüllmaterial unterhalb der Bodenplatte verwendet werden konnten. **Dieses Vorgehen zeigt die Bedeutung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus für eine hochwertige Verwertung und bestätigt die Kernthesen aus Kapitel 1.4.4. Es zeigt außerdem, wie wichtig das kreislaufgerechte Konstruieren für eine zirkuläre Bauwirtschaft ist.**

Die mineralischen Abbruchabfälle wurden in einem Recyclingbetrieb in einer Entfernung von 27 km zur Baustelle mit einer mobilen Brechanlage aufbereitet (Abb. A 9.11). Die Aufbereitung unterlag einer Güteüberwachung mit werkseigener Produktionskontrolle und Fremdüberwachung. Für die rezyklierten Gesteinskörnungen wurde eine Leistungserklärung mit CE-Kennzeichnung erbracht. Damit gelten die Rezyklate nicht mehr als Abfall im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sondern als zugelassenes Bauprodukt nach der Bauproduktenverordnung.

Für die hochwertige Aufbereitung wurden nach Abfrage bei den regionalen Recyclingbetrieben in der Kostenberechnung 3% Mehrkosten in Bezug auf die Rückbau- und Entsorgungskosten kalkuliert. Diese haben sich jedoch durch die öffentliche Ausschreibung mit vier eingegangenen Angeboten relativiert.

Parallel zum Rückbau wurde die Ausführungsplanung erstellt. Diese basiert auf den folgenden, kreislaufoptimierten Leitdetails. Im November 2019 wurde mit dem Rohbau begonnen.



A 9.8



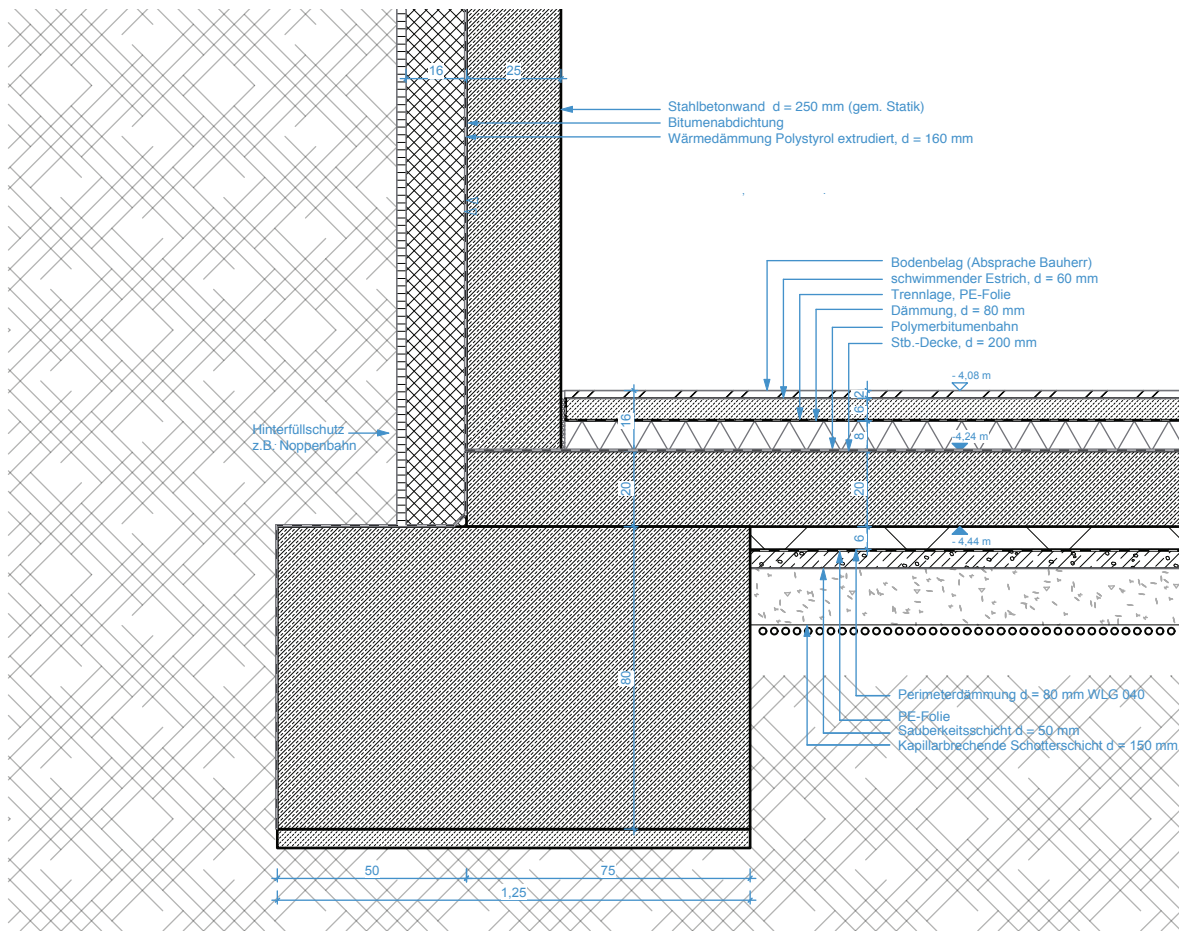
A 9.9



A 9.10



A 9.11



A 9.12

## 9.2. Leitdetails für den Neubau – Variantenvergleich mit dem Urban Mining Index

Die Leitdetails wurden von den Architekten der ARGE agn heimspielarchitekten entwickelt und von der Promovendin hinsichtlich der Kreislauffähigkeit der Konstruktionen optimiert. **Unter Berücksichtigung des Investitionskostenbudgets wurde nicht das absolute Optimum, sondern das wirtschaftlich Realisierbare vorgeschlagen.**

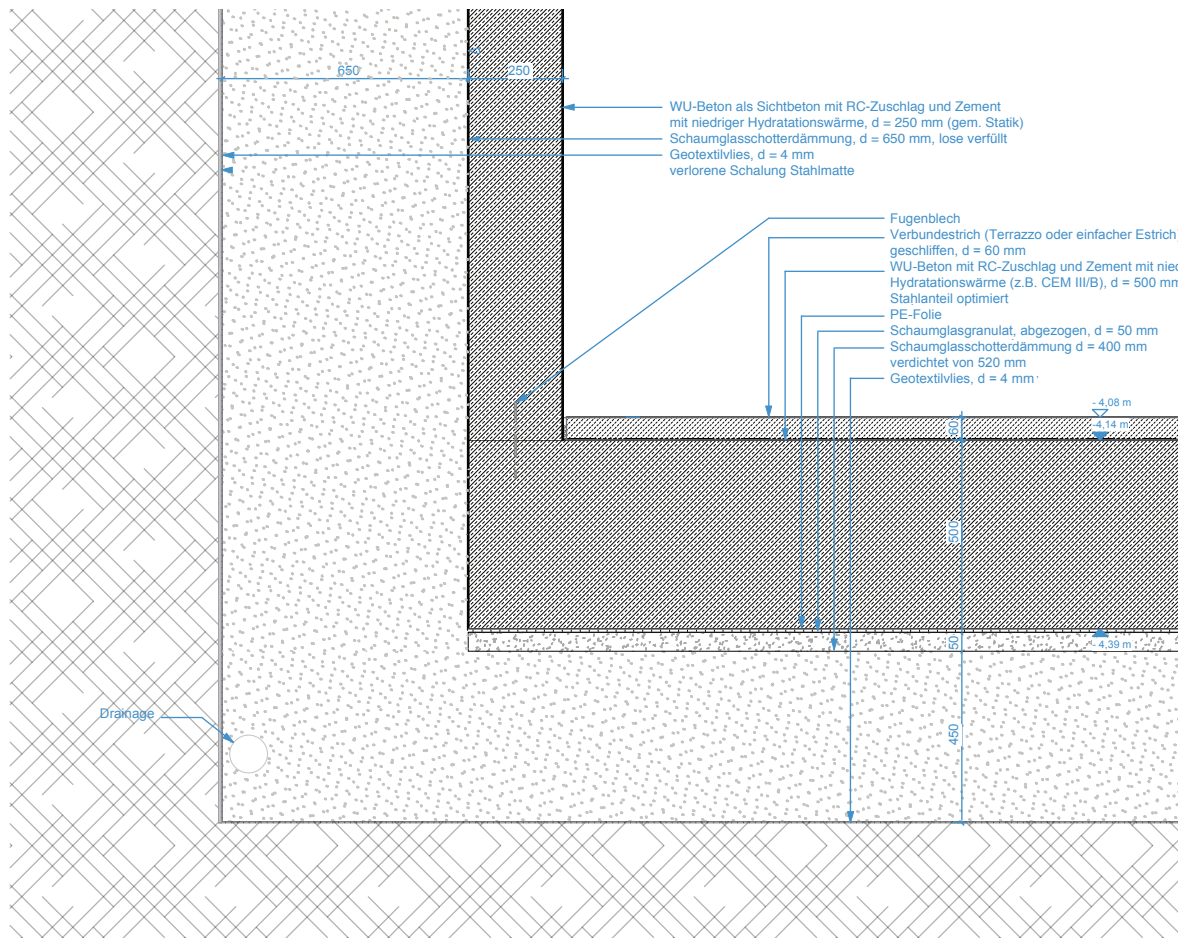
Aus den Leitdetails werden im Folgenden die Parameter zur Berechnung der Kreislaufpotenziale jeweils in der ursprünglichen Variante und in der optimierten Variante abgeleitet. In einer vergleichenden Analyse werden (aufgrund des Umfangs der Berechnungen) nur die Ergebnisse gegenübergestellt und einige besondere Aspekte beschrieben.

### 9.2.1. Gründung

Die erste Planung sah eine konventionelle Gründung vor. Wie Abbildung A 9.12 zeigt, setzt sich die Bodenplatte aus mehreren Schichten verschiedenster Materialien zusammen. Als Oberboden war ein Linoleumbelag, verklebt auf schwimmendem Estrich vorgesehen. Zur Abdichtung sollte eine konventionelle Bitumenbahn zweilagig auf die Stahlbetonbodenplatte aufgeschweißt werden. Für die Trittschall- und Wärmedämmung war Polystyrol vorgesehen. Die Sauberkeitsschicht sollte aus Magerbeton und die kapillarbrechende Tragschicht aus Hartsteinschotter hergestellt werden. Zur Lastabtragung waren Streifen- und Punktfundamente geplant.

A 9.12 Sockeldetail Rathaus Korbach – ursprüngliche Planung, M 1:20, ARGE agn-heimspielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken, Stand 12/2018

A 9.13 Sockeldetail Rathaus Korbach – Urban Mining Design, M 1:20, ARGE agn-heimspielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken/Anja Rosen, Stand 12/2018



A 9.13

Abbildung A 9.13 zeigt einen wesentlich vereinfachten Aufbau der Bodenplatte nach den Prinzipien des Urban Mining Designs. Bereits durch eine Reduktion der Materialvielfalt wird ein späterer Rückbau vereinfacht, da weniger Materialien nach verschiedenen Wertstofffraktionen getrennt werden müssen. Die Bodenplatte wird nun aus wasserundurchlässigem Beton (WU-Beton) hergestellt, um eine Verklebung mit materialfremden Stoffen zu vermeiden. Anstelle von Streifen- und Einzelfundamenten wird eine lastabtragende Fundamentplatte ausgeführt. Durch den Entfall der Einzel- und Streifenfundamente wird trotz stärkerer Platte weniger Beton benötigt, bei leicht erhöhtem Stahlanteil. Auf einen Oberbodenbelag wird verzichtet, stattdessen wird der Estrich in Büroflächen und Fluren als hochwertiger Terrazzo ausgebildet bzw. in Lager und Technikräumen einfach geschliffen. Als Oberflächenschutz wird lediglich Wasserglas aufgetragen: dieses stellt keine Beschichtung dar, sondern bewirkt durch Verkieselung eine Erhärtung der Oberfläche des Estrichs bzw. Terrazzos. Zur Dämmung wird eine lastabtragende, kapillarbrechende Schicht aus Schaumglasschotter eingesetzt. Gegebenenfalls muss in beiden Varianten die Tragfähigkeit des Bodens mit Hartsteinschotter hergestellt werden (dies stand zum Zeitpunkt der Leitdetailplanung noch nicht fest). Als Sauberkeitsschicht und Aufstellfläche für die Abstandshalter der Bewehrung kommt eine PE-Folie zum Einsatz. Für die WU-Betonsohle wird neben einer entsprechenden Dimensionierung des Stahlanteils Hüttensandzement verwendet, der durch eine langsamere Hydratation die Schwindrisse in der WU-Betonsohle begrenzt.

## Bodenplatte/Gründung

## Ursprüngliche Planung

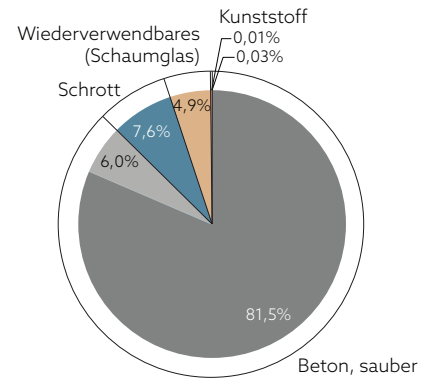
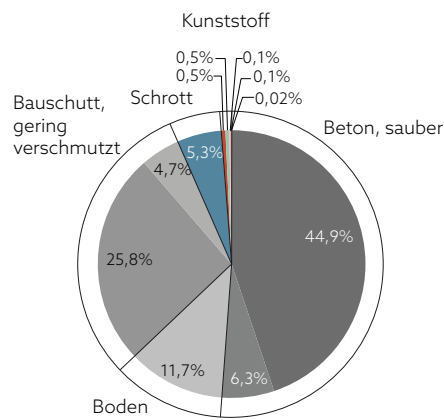
### Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m <sup>2</sup> ]
Linoleum, 2 mm	9,0
Zementestrich, 60 mm	90,0
Trennlagen, PE-Folien	0,4
Trittschalldämmung EPS, 80 mm	2,1
Abdichtung Bitumenbahnen, 2x5 mm	10,4
Bodenplatte, Beton C 25/30, 200 mm	493,2
Wärmedämmung XPS, 80 mm	2,8
Sauberkeitsschicht, Magerbeton, 50 mm	120,9
Hartsteinschotter, 150 mm	223,0
Fundamente, Beton C25/30	857,3
Bewehrungsstahl (gesamt)	102,0
<b>Gesamt</b>	<b>1.911,1</b>

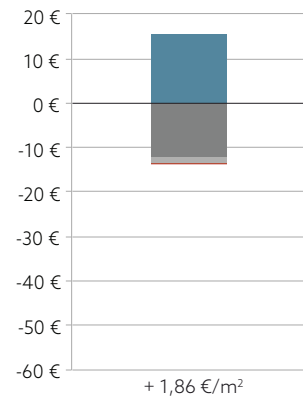
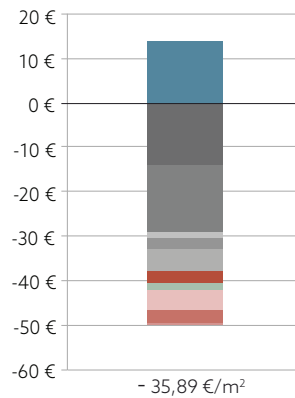
## Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ]
Terrazzo, 60 mm	90,0
Fundamentplatte, WU-Beton C 25/30 mit 35% RC-Anteil in der Gesteinskörnung, 500 mm	1.232,1
Bewehrungsstahl Bodenplatte	115,0
Sauberkeitsschicht, PE-Folie	0,2
Schaumglasgranulat, 50 mm und Schaumglaschotter, verdichtet von 520 mm auf 450 mm	67,6
Geo-Textilvlies, PET	0,5
<b>Gesamt</b>	<b>1.511,9</b>

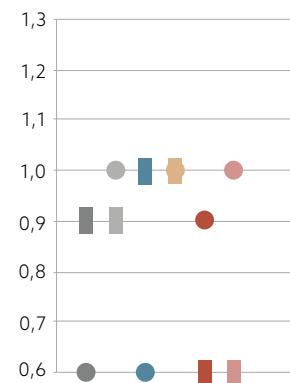
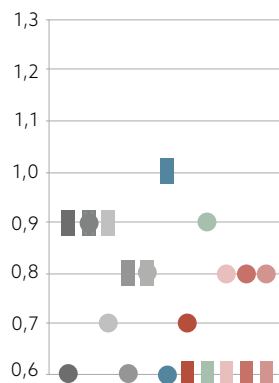
### Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



### Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



### Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



*Parameter der Kreislaufpotenziale der Gründungsvarianten*

Wie der nebenstehenden Mengenermittlung zu entnehmen ist, wird für die Gründung im Urban Mining Design insgesamt weniger Material – gemessen an der Anzahl und am Gewicht – benötigt. Die geringeren Massen sind vor allem auf den Verzicht auf die Schottertragschicht (sofern möglich) und auf die Ausführung der Sauberkeitsschicht zurückzuführen. Die Materialien der Urban-Mining-Design-Variante bleiben unverschmutzt, sodass die aus dem Rückbau resultierenden Wertstoffe sortenrein getrennt werden können.

Nach der ursprünglichen Planung würde sowohl der Beton als auch der Estrich durch die Verklebung mit Bitumen bzw. Linoleum als gering verschmutzter Bauschutt eingeordnet. Die verschmutzten Materialien und die verschiedenen Kunststoffe verursachen hohe Entsorgungskosten. Bei der kreislaufgerechten Konstruktion hingegen werden die geringen Entsorgungskosten durch die Verwertungserlöse für den Betonstahl ausgeglichen, sodass insgesamt sogar von einem geringen Ertrag ausgegangen werden kann – unter der Voraussetzung, dass für den Schaumglasschotter keine Entsorgungskosten anfallen, da es sich um einen Baustoff handelt, der sehr leicht sortenrein zurückgewonnen und wiederverwendet werden kann.

Die leichtere Rückbaubarkeit und die Werthaltigkeit der Urban-Mining-Design(UMD)-Variante zeigen sich auch in den Faktoren Arbeit und Wert. Die kreislaufgerechte Konstruktion erfordert nur für die 50 cm starke WU-Betonsohle einen sehr hohen Rückbauaufwand. Für den Estrich wurde ein sehr geringer Rückbauaufwand angesetzt, da dieser aufgrund des Verzichts auf Trittschalldämmung zusammen mit dem Beton abgebrochen und verwertet werden kann.<sup>73</sup> Die UMD-Variante weist somit insgesamt einen durchschnittlichen Faktor Arbeit von 0,85 auf, während die ursprüngliche Planung nur auf 0,75 kommt.

Der durchschnittliche Faktor Wert liegt bei der UMD-Variante mit 0,83 ebenfalls höher als bei der ursprünglichen Planung, die nur einen durchschnittlichen Faktor Wert von 0,75 erreicht.

*Kreislaufpotenziale der Gründungsvarianten*

Für die Berechnung der Kreislaufpotenziale und des CO<sub>2</sub>-Footprints spielt die Zusammensetzung des Betons in dem hier betrachteten Variantenvergleich eine entscheidende Rolle. Die Betonrezeptur wurde deshalb anhand einer einfachen Stoffraumrechnung<sup>74</sup> ermittelt (s. Abb. A 9.14).

**Die Gesteinskörnung für den WU-Beton enthält den maximal zulässigen Anteil rezyklierter Gesteinskörnung nach der DAfStb-Richtlinie [208] in Höhe von 35%.** Die rezyklierten Gesteinskörnungen machen sich im Ergebnis der Kreislaufpotenziale besonders bemerkbar: Während die ursprüngliche Planung in der Pre-Use-Phase nur ein Closed-Loop-Potenzial von 5,7% aufweist (resultierend hauptsächlich aus dem Bewehrungsstahl aus Sekundärstahl), kommt die Urban-Mining-Design-Variante durch die Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnung auf insgesamt 30,4%.

<sup>73</sup> Hierzu ist anzumerken, dass keine Anforderungen an den Trittschallschutz bestehen, da es keine fremden Arbeitsbereiche im Gebäude gibt.

<sup>74</sup> Für die Stoffraumrechnung wurde auf die Betontechnischen Daten der Fa. HeidelbergCement [207] zurückgegriffen. Die Rechnung wird hier aus Platzgründen nicht weiter ausgeführt, kann aber in der anliegenden Exceldatei nachvollzogen werden.

Zusammensetzung Beton Bodenplatte	Beton C 25/30 [kg/m <sup>3</sup> ]	WU-Beton C 25/30 [kg/m <sup>3</sup> ]
Kies	1.306,0	591,0
Sand	703,0	690,0
RC-Gesteinskörnung	-	690,0
Zement	282,3	318,0
Wasser	175,0	175,0
	2.466,3	2.464,0

A 9.14 Stoffraumrechnung für den Beton der Gründungvarianten

Für den WU-Beton wurde ein Wasser-/Zementwert (w/z) von 0,55 kalkuliert, während für normalen Beton ein w/z-Wert von 0,62 angesetzt wurde. Das bedeutet, dass der Zementanteil im Zementleim bei WU-Beton um 7% höher ist. Auf Zusatzstoffe wurde aus Vereinfachungsgründen in der Berechnung verzichtet.

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

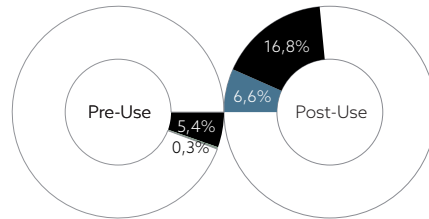
## Ursprüngliche Planung

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Linoleum	9,0	RC10 +		
Zementestrich	90,0	PR	dc	d
Trennlagen, PE	0,4	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
EPS-Dämmung	2,1	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Bitumenabdichtung	10,4	PR	rc30	en <sub>f</sub>
Gesteinskörnung	401,8	PR	dc	d
CEM II	56,4	PR	"	"
Wasser	35,0	PR	"	"
Transport Gesteinsk.	-	-	-	-
XPS-Dämmung	2,8	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Magerbeton	120,9	PR	rc39	dc
Hartsteinschotter	223,0	PR	ru	dc
Fundament-Beton	857,3	PR	rc39	dc
Bewehrungsstahl	102,0	RC100	rc100	rc
<b>Gesamt</b>	<b>1.911,1</b>			

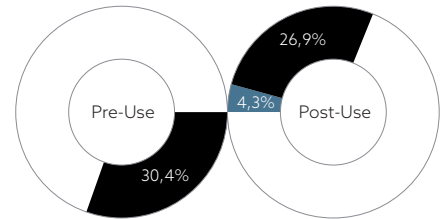
## Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Terrazzo	90,0	PR	rc39	dc
Gesteinskörnung	985,5	RC35	rc39	dc
CEM III	159,1	PR	"	"
Wasser	87,5	PR	"	"
Transport Gesteinsk.	-	-	-	-
Bewehrungsstahl	115,0	RC100	rc100	rc
PE-Folie	0,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Schaumglasgranulat und -schotter	6,5	DC98	ru90	dc
	67,6	DC98	ru86,5	dc
Geo-Textilvlies, PET	0,5	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
<b>Gesamt</b>	<b>1.511,9</b>			

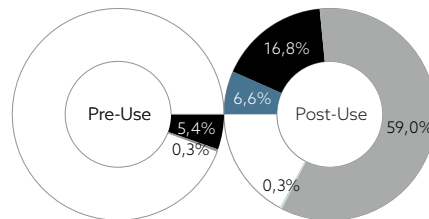
## Kreislaufpotenziale



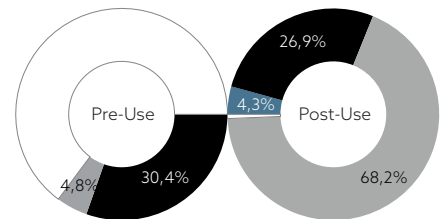
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,7%	23,4%	29,1%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	30,4%	31,2%	61,6%

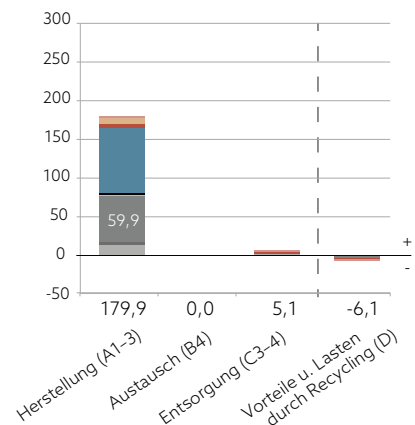
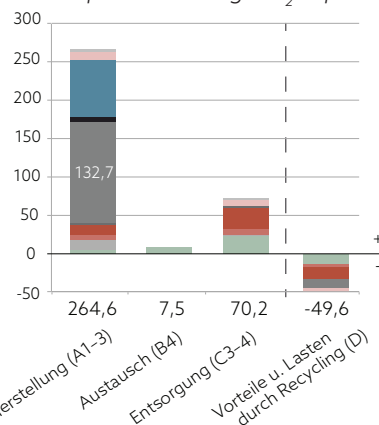


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	5,7%	82,7%	88,4%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	35,2%	99,3%	134,5%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



Hinweis: zur Ermittlung der Treibhauspotenziale der Konstruktionen wurden herstellerspezifische Umweltproduktdeklarationen oder generische Daten aus der ÖkobaDat verwendet. Die Quellen werden aufgrund der Vielzahl nicht einzeln im Quellenverzeichnis aufgeführt, können aber anhand der Deklarationsnummern (EPD) oder Identifikationsnummern/UUID (ÖkobaDat) in der mitgelieferten Exceldatei nachvollzogen werden.

In der Post-Use-Phase steigt das Closed-Loop-Potenzial durch das Urban Mining Design von 23,4% auf 31,2%. Die Steigerung ist hauptsächlich auf die bessere Verwertbarkeit des Betons und des Estrichs durch den Verzicht auf Verklebungen zurückzuführen. Unter Berücksichtigung des Material-Loop-Potenzials und der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus wird z.B. für den WU-Beton eine Wiederverwertung von 21,1% prognostiziert ( $\text{MLP } 39\% \times \text{Faktor Arbeit } 0,6 \times \text{Faktor Wert } 0,9 = 21,1\%$ ). Für die restlichen 78,9% wird eine Weiterverwertung (Downcycling) prognostiziert, die sich im Loop-Potenzial niederschlägt.

Dagegen gehen die Bodenplatte und der Estrich der Ursprungsvariante nur in das Loop-Potenzial ein. Aufgrund der Einstufung als gering verschmutzter Bauschutt werden die beiden Bauteilschichten im hochwertigen EoL-Szenario nur als weiterverwertbar eingeordnet. Durch Anwendung der Faktoren Arbeit und Wert wird eine Weiterverwertung nach dem Rückbau von 48% prognostiziert ( $100\% \times \text{Faktor Arbeit } 0,6 \times \text{Faktor Wert } 0,8 = 48\%$ ). Für die restlichen 52% wird eine Deponierung prognostiziert.

Das Loop-Potenzial der UMD-Variante ist in der Pre-Use-Phase noch um 4,8% höher als das Closed-Loop-Potenzial derselben Phase. Dies ist auf die Kaskadennutzung (Weiterverwertung) von Altglas zur Herstellung des Schaumglasschotters zurückzuführen.

In beiden Varianten sind die Baustoffe für die kapillarbrechende Schicht wiederverwendbar und werden in der Post-Use-Phase des Closed-Loop-Potenzials ausgewiesen. Obwohl für den Schaumglasschotter ein sehr geringer Rückbauaufwand (Faktor 1,0) und ein leicht positiver Wert (Faktor 1,0) angenommen wurde, geht er mit einem geringeren Anteil in das Closed-Loop-Potenzial ein als der Hartsteinschotter. Dies liegt zum einen an der höheren Dichte des Hartsteinschotters (sodass der Massenanteil größer ist); zum anderen wird für den Schaumglasschotter durch das Brechen des Korns bei der notwendigen Verdichtung von 52 cm Einbauhöhe auf 45 cm Fertighöhe ein Verlust von ca. 13,5% angenommen. Insgesamt kann das Closed-Loop-Potenzial der Gründung durch das Urban Mining Design von 29,1% auf 61,6% gesteigert werden. Das Loop-Potenzial steigt von 88,4% auf 134,5%.

#### *Treibhauspotenziale der Gründungsvarianten*

Durch die optimierte Planung sinkt der CO<sub>2</sub>-Footprint der Gründung in der Herstellungsphase um 32% von 264,6 kg auf 180 kg pro Quadratmeter Gründungsfläche. Die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung hat hieran jedoch nur einen kleinen Anteil. Für deren Herstellung wurde der Ökobaudat-Datensatz „Bauschutttaufbereitung“ (Modul C3) verwendet. Die aus der Aufbereitung resultierenden Treibhausgase sind pro Gewichtseinheit nahezu gleich hoch wie die der Gewinnung von Primäriesen- und -sand. Die rezyklierte Gesteinskörnung hat jedoch einen Transportvorteil von 31 km vom Ort der Herstellung zum Betonwerk und verursacht dadurch leicht geringere Emissionen.

Die niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen der UMD-Variante gehen hauptsächlich auf den Einsatz von Hüttensandzement (CEM III) zurück. Dieser ist zwar vor allem der Rissbreitenminimierung des WU-Betons geschuldet, bewirkt aber einen rechnerisch besseren CO<sub>2</sub>-Footprint.

#### Hinweis:

CEM III wird mit einem hohen Anteil an Hüttensand hergestellt, der als Nebenprodukt bei der Eisenverhüttung im Hochofen gewonnen wird (Hochofenschlacke). Die Treibhausgase des Hochofenprozesses werden nach dem Verursacherprinzip gemäß DIN EN 15804 der Eisenherstellung zugerechnet. Die gesamten, durch die Eisen- und Zementherstellung verursachten Emissionen sind jedoch nur geringer, solange der Hüttensand noch zum Teil andere Primärrohstoffe ersetzt, die weniger klimaschädlich sind als Zement (vgl. Thienel [209]).

Wenn für die WU-Bodenplatte der gleiche Zement verwendet würde, wie für die Bodenplatte und Fundamente der ursprünglichen Planung, so wäre der CO<sub>2</sub>-Footprint der Gesamtkonstruktion um 66,5 kg/m<sup>2</sup> höher. Er läge damit aber immer noch 7% unter dem der ursprünglichen Planung.

## Erdberührte Außenwand

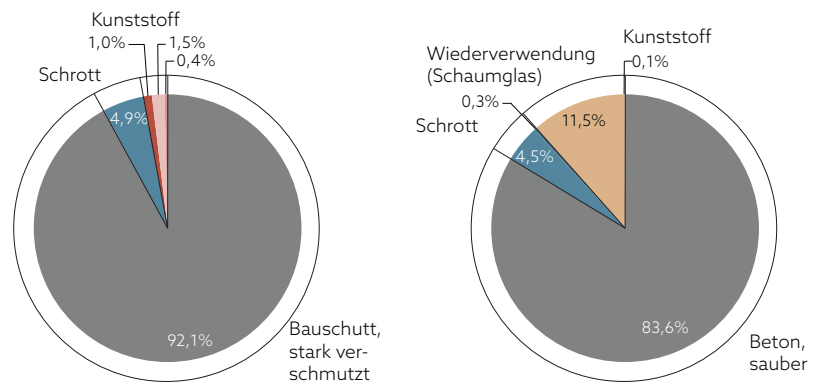
### Ursprüngliche Planung

### Urban Mining Design

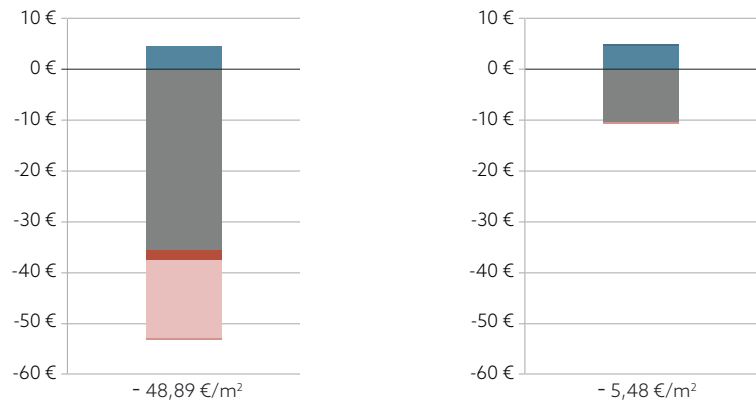
#### Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
■ Beton C 25/30, 250 mm	616,7	■ WU-Beton C 25/30, mit 35% RC-Anteil in der Gesteinskörnung, 250 mm	616,1
■ Bewehrungsstahl	33,1	■ Bewehrungsstahl	33,1
■ Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung, 5 mm	7,0	■ Schaumglasschotter, 650 mm	84,5
■ Wärmedämmung, XPS, 160 mm	10,2	■ Geo-Textilvlies, PET	0,5
■ Hinterfüllschutz, Noppenbahn PE-HD	2,4	■ verlorene Schalung	2,5
	<b>669,4</b>		<b>736,7</b>

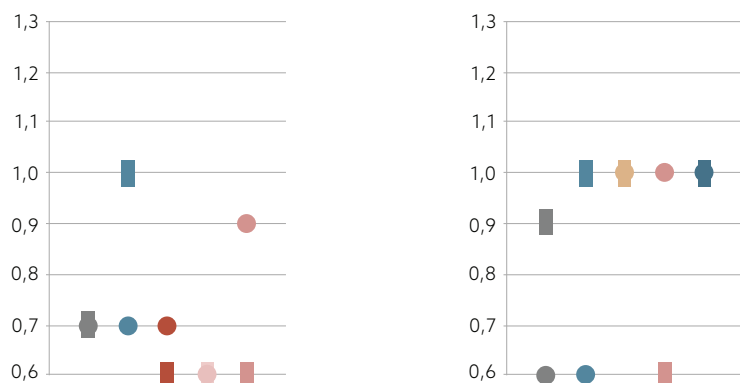
#### Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



#### Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



#### Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



### 9.2.2. Erdberührte Außenwand

Das Sockelgeschoss des Neubaus für das Rathaus Korbach fügt sich in den Hang ein, sodass die Außenwände zum Teil im Erdreich liegen (s. Abb. A 9.12 und A 9.13).

Während die Außenwand nach ursprünglicher Planung mit einer kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtung abgedichtet werden sollte, wobei das zähflüssige Bitumen gleichzeitig zur Verklebung einer Perimeterdämmung aus extrudiertem Polystyrol (XPS) dienen sollte, setzt die Urban-Mining-Design-Variante den Aufbau der Bodenplatte in logischer Weise fort: Statt einer Abdichtungsbeschichtung wird die erdberührte Außenwand nun aus WU-Beton hergestellt und mit lose gefügtem Schaumglasschotter gedämmt. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Wärmedämmung und der rechnerisch relativ hohen Wärmeleitfähigkeit des Schaumglasschotters ist eine Wärmedämmschicht von 65 cm erforderlich.<sup>75</sup> Da die üblicherweise verwendeten Wallbags in dieser Stärke nicht erhältlich sind, wurde eine verlorene Schalung aus Stahlmatten mit eingehängtem Geo-Textilvlies geplant. Das Schaumglas wird lose in die Schalung eingebaut und lagenweise verdichtet. Beim späteren Rückbau kann es ebenso einfach ausgebaut und (mit leichten Verlusten) wiederverwendet werden.

#### *Parameter der Kreislaufpotenziale der erdberührten Außenwände*

Wie die nebenstehende Mengenaufstellung zeigt, wird für die Urban-Mining-Design-Variante aufgrund des geplanten Schaumglasschotters mehr Material – gemessen am Gewicht – benötigt. Dafür bleiben sämtliche Materialien unverschmutzt und können sortenrein getrennt werden. Dagegen muss bei der ursprünglichen Planung davon ausgegangen werden, dass erhebliche Reste der Bitumendickbeschichtung am Beton verbleiben, sodass dieser als stark verschmutzter Bauschutt eingestuft wird.<sup>76</sup> Die Bitumenbeschichtung und die darauf aufbauenden Materialien gehen zweifach in die Massenermittlung ein, da die Abdichtung gemäß Nutzungsdauerntabelle des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) nur eine durchschnittliche technische Nutzungsdauer von 40 Jahren hat.

Entsprechend hoch werden die Entsorgungskosten für die ursprünglich geplanten Materialien prognostiziert. Nach heutigem Stand würde allein die Entsorgung des verschmutzten Betons durchschnittlich dreieinhalbmal so viel kosten wie die Verwertung des sauberen Betons der UMD-Variante. Hinzu kommen weitere hohe Entsorgungskosten für das XPS, während für das Schaumglas keine Entsorgungskosten aufgrund der Wiederverwertbarkeit des Materials angesetzt werden. Die Entsorgungskosten und der Rückbauaufwand schlagen sich wiederum in den nebenstehend dargestellten Faktoren Arbeit und Wert nieder. Während der Durchschnittswert für beide Faktoren nach ursprünglicher Planung jeweils 0,7 beträgt, kommt die UMD-Variante auf einen durchschnittlichen Faktor Arbeit von 0,8 und einen durchschnittlichen Faktor Wert von 0,9.

75 Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit beträgt laut bauaufsichtlicher Zulassung des Herstellers Misapor [210] 0,096 bei 1-5 Vol.-% Feuchte (z. B. durch Sickerwasser).

76 Vgl. Auswertung der Forschungsergebnisse von Graubner et al. Anlage 2, FD05; ein maschinelles Abfräsen der Beschichtung von einem vertikalen Bauteil ist zudem wesentlich aufwendiger als von einem horizontalen Bauteil.

### Legende Kreislaufpotenziale

#### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

#### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

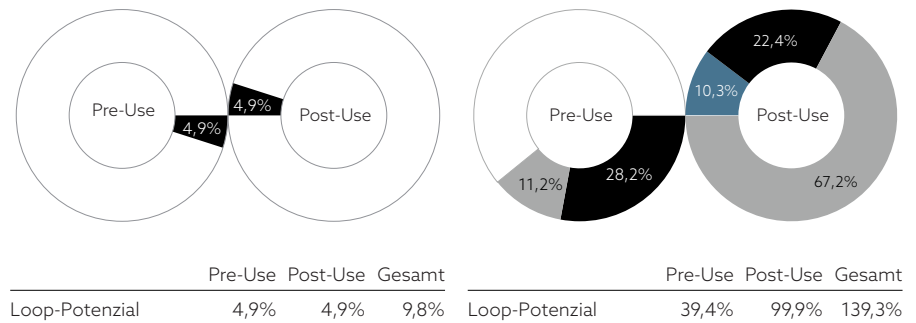
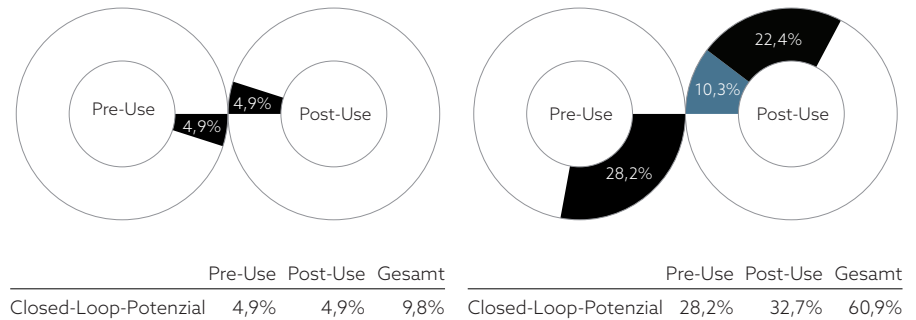
### Ursprüngliche Planung

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use		
			sd	ud	
■ Gesteinskörnung	500,1	PR	d	d	
■ CEM II	72,9	PR	"	"	
■ Wasser	43,7	PR	"	"	
■ Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-	
■ Bewehrungsstahl	33,1	RC100	rc100	rc	
■ Bitumendickbeschichtung	7,0	PR	rc30	en <sub>f</sub>	
■ XPS-Dämmung	10,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
■ Noppenbahn PE-HD	2,4	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
	<b>669,4</b>				

### Urban Mining Design

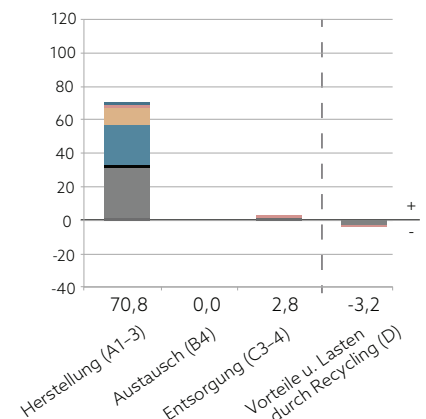
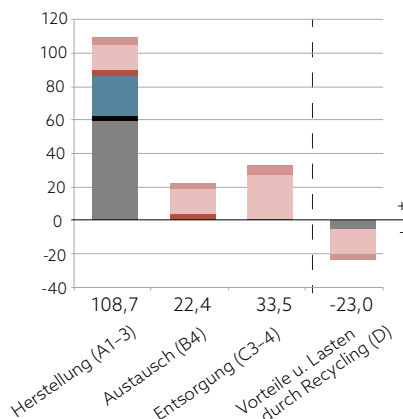
	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use		
			sd	ud	
■ Gesteinskörnung	492,8	RC35	rc39	d	
■ CEM III	79,6	PR	"	"	
■ Wasser	43,7	PR	"	"	
■ Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-	
■ Bewehrungsstahl	33,1	RC100	rc100	rc	
■ Schaumglasschotter	84,5	RC98	ru90	d	
■ Geo-Textilvlies, PET	0,5	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	
■ verlorene Schalung	2,5	RC100	rc100	rc	
	<b>736,7</b>				

### Kreislaufpotenziale



### Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>

■ Gesteinskörnung	1,37	1,34
■ Portlandkompositzement/Hüttensandzement	57,94	-
■ Wasser	0,02	29,96
■ Transporte Gesteinskörnung	2,40	1,81
■ Bewehrungsstahl	24,62	24,62
■ Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung	3,68	-
■ Wärmedämmung, XPS	14,82	-
■ Noppenbahn PE-HD	3,87	-
■ Schaumglasschotter	-	9,88
■ Geo-Textilvlies, PET	-	1,27
■ verlorene Schalung	-	1,86
	<b>108,72</b>	<b>70,76</b>



*Kreislaufpotenziale der erdberührten Außenwände*

Die ursprüngliche Variante der erdberührten Außenwand weist aufgrund der verwendeten Primärmaterialien sowie der im Rückbaufall schwer lösbaren Verklebungen und der deshalb zu erwartenden Restanhaftungen ein sehr geringes Kreislaufpotenzial von 4,9% auf. Das Loop-Potenzial und das Closed-Loop-Potenzial sind bei der ursprünglichen Variante gleich hoch. Aufgrund der starken Verschmutzung mit der Bitumendickbeschichtung ist selbst ein Downcycling (z.B. im Straßenbau) nicht realistisch. Deshalb wird von einer vollständigen Deponierung des beschichteten Betons ausgegangen.

Das einzige Closed-Loop-Material ist der Bewehrungsstahl. Dieser geht mit 4,9% sowohl in die Pre-Use-Phase als auch in die Post-Use-Phase ein, da er aus 100% Sekundärstahl hergestellt wird und zu 100% wiederverwertbar ist.

In der Urban-Mining-Design-Variante kann das Closed-Loop-Potenzial in der Pre-Use-Phase durch den Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnung von 4,9% auf 28,2% gesteigert werden.

In der Post-Use-Phase steigt das Closed-Loop-Potenzial durch eine mögliche Wiederverwendung des Schaumglasschotters und ein mögliches Recyclings des sauber rückbaubaren WU-Betons von 4,9% auf 32,7%.

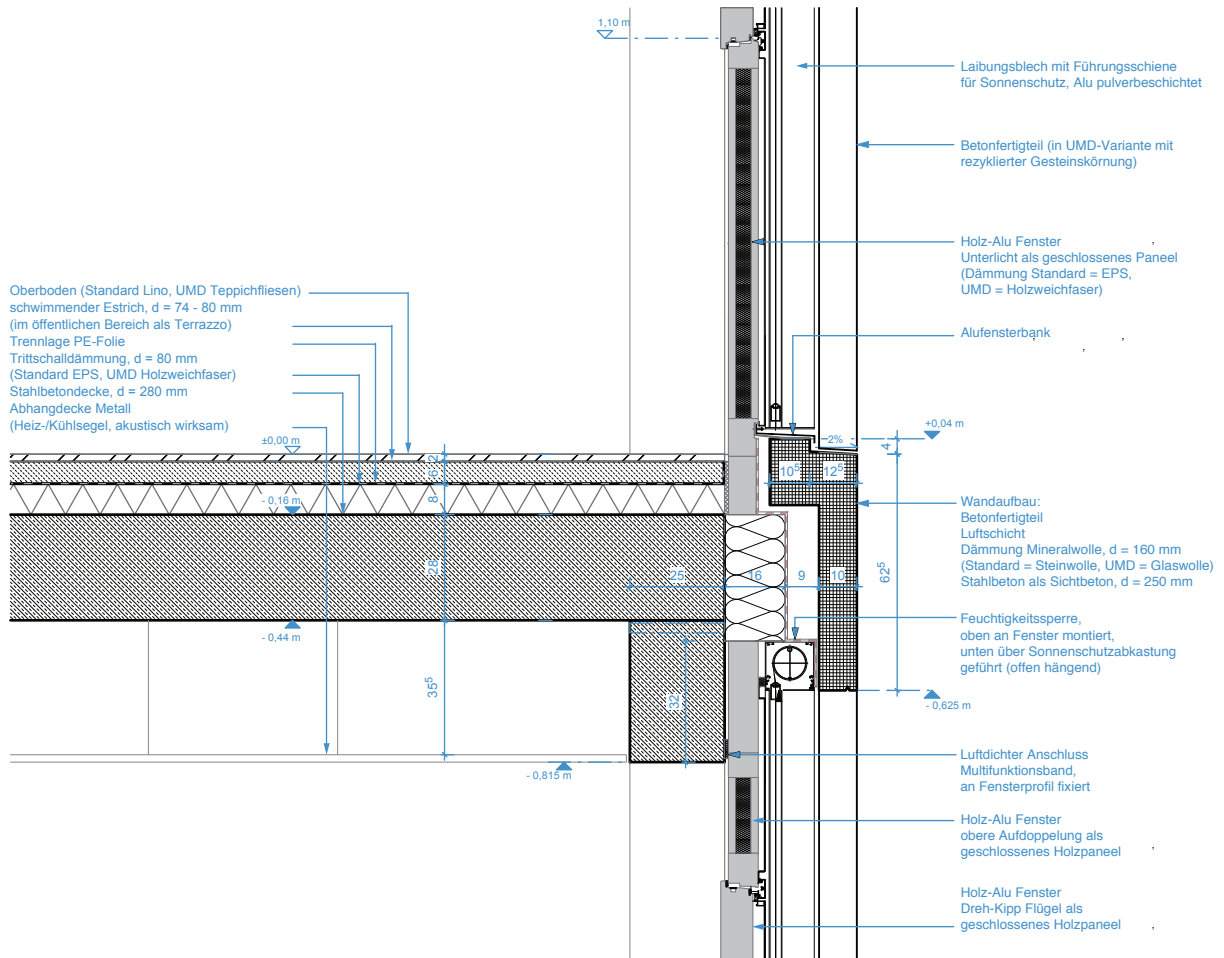
Dennoch ist aufgrund des eingeschränkten Material-Loop-Potenzials des Betons (39%) und unter Berücksichtigung des Aufwands für den selektiven Rückbau (Faktor 0,6) sowie des leicht negativen Werts (Faktor 0,9) für einen Großteil des Betons eine Verwertung im offenen Kreislauf (Downcycling) zu erwarten.

Das Loop-Potenzial der UMD-Variante ist mit 139,3% wesentlich höher als das Closed-Loop-Potenzial. Hier geht nicht nur der weiterverwertbare Beton ein, sondern auch die praktizierte Weiterverwertung von Altglas in der Pre-Use-Phase zur Herstellung des Schaumglasschotters.

*Treibhauspotenziale der erdberührten Außenwände*

Die ursprüngliche Konstruktion der erdberührten Außenwand verursacht über den Lebenszyklus mehr als das Doppelte an Treibhausgasemissionen der UMD-Variante (siehe Module A-C in nebenstehender Grafik). Die Wärmedämmung aus XPS trägt nach dem Zement den größten Anteil an den Emissionen. Wegen des rechnerisch angesetzten Austausches (Modul B) entstehen doppelt so viele Treibhausgase durch Herstellung und Entsorgung. Da durch die Verbrennung primäre Brennstoffe ersetzt werden, erfolgt eine Gutschrift im Modul D, die bezogen auf das XPS ca. 25% der Emissionen im Lebenszyklus ausgleicht. Auch für den Beton erfolgt eine (geringe) Gutschrift für CO<sub>2</sub>, das bei der Carbonatisierung gebunden wird.

Die Vorteile der Urban-Mining-Design-Variante hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Footprints sind wiederum hauptsächlich auf den Einsatz von Hüttensandzement zurückzuführen. Aber auch der Schaumglasschotter aus Altglas verursacht geringere Emissionen als die Wärmedämmung aus XPS.



A 9.15

Das Leitdetail für den Anschluss der Fassade an die Geschossdecke wird hier nur in einer einzigen Variante zeichnerisch dargestellt, da nur die Materialwahl und die Verbindungstechnik variiert wurde und nicht der gesamte Aufbau.

### 9.2.3. Außenwand/Fassade

Bereits im Wettbewerb wurde von den planenden Architekten eine Sichtbetonfassade vorgeschlagen. Trotz des relativ hohen Ressourcenverbrauchs und der eingeschränkten Recyclingfähigkeit von Beton wurde die Fassade im Urban-Mining-Design-Konzept beibehalten, um das architektonische Konzept nicht grundlegend zu verändern. Eine ressourceneffizientere Fassade aus Faserbetonplatten (mit Carbon- oder Glasfasern) kam aus gestalterischen Gründen – vor allem wegen des hohen Fugenanteils in den großen Giebelflächen – nicht in Frage.

Die Optimierung der opaken Außenwand hinsichtlich der Kreislauffähigkeit bezieht sich deshalb auf folgende Aspekte:

Sowohl die tragende Außenwand als auch die Betonfertigteile werden in der Urban-Mining-Design-Variante aus Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen hergestellt. Die tragende Wand wird unter Berücksichtigung der Expositionsklasse nach Angaben des Tragwerksplaners [211] und der DAFStb-Richtlinie mit maximal 45% rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 geplant. Die Sichtbetonfassade wird – wie auf Seite 233 bereits erläutert – mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 mit ca. 10–15% Ziegelsplitt und ca. 85–90% Betonbruch geplant, um das Urban-Mining-Konzept sichtbar zu machen. Da die Fassade dem Angriff durch Frost (ohne Taumittel) ausgesetzt ist, darf die Gesteinskörnung richtliniengemäß maximal 25% Rezyklat enthalten.

Die Dämmung der Außenwand muss aus brandschutzrechtlichen Gründen aus nicht brennbaren Dämmstoffen hergestellt werden. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten wurde Mineralwolle gewählt. In der ursprünglichen Variante wird im Folgenden mit Steinwolle gerechnet, in der Urban-Mining-Design-Variante mit Glaswolle, um die Auswirkung der beiden Mineralwollämmstoffe auf die Kreislaufpotenziale zu untersuchen. In beiden Fällen wird die Mineralwolle nicht verklebt, sondern mit Dämmstoffhaltern verdübelt.

Die Beschreibung der in Abbildung A 9.15 dargestellten Fenster folgt in Kapitel 9.2.4. Die Varianten der Geschosdecke werden in Kapitel 9.2.6 erläutert.

**Außenwand**

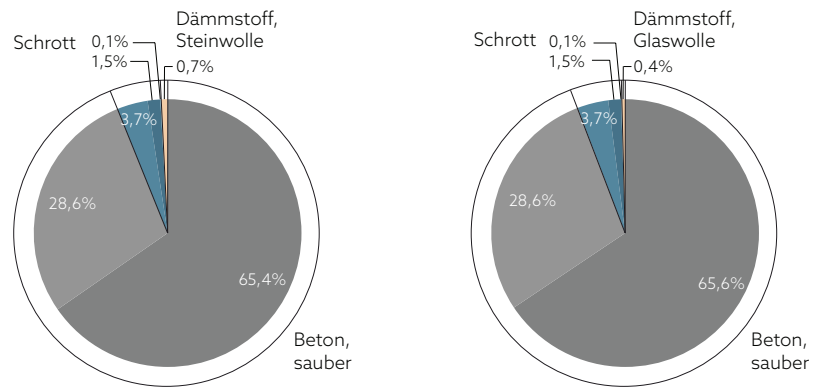
**Ursprüngliche Planung**

**Urban Mining Design**

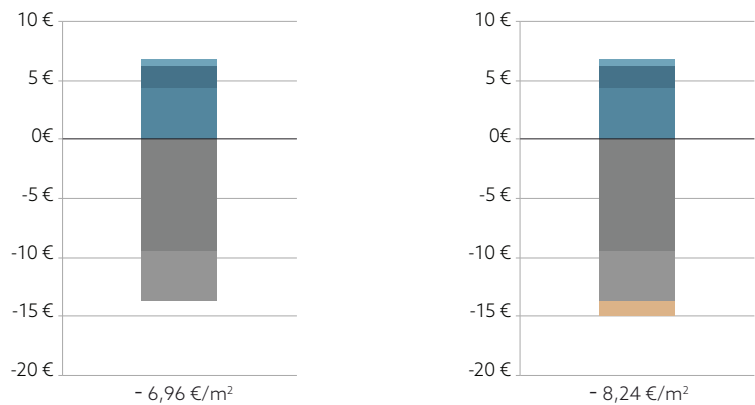
*Materialien und Massen im Lebenszyklus*

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
■ Betonfertigteile Fassade C 30/37, 100 mm	253,1	■ Betonfertigteile Fassade C 30/37 mit 25% RC-Anteil in der Gesteinskörnung, 100 mm	253,1
■ Bewehrungsstahl Fassade	13,6	■ Bewehrungsstahl Fassade	13,6
■ Fassadenplattenanker, Edelstahl	0,7	■ Fassadenplattenanker, Edelstahl	0,7
■ Dämmung, Steinwolle, 160 mm	6,2	■ Dämmung, Glaswolle, 160 mm	3,2
■ Beton C 25/30, 250 mm	580,0	■ Beton C 25/30, mit 45% RC-Anteil in der Gesteinskörnung, 250 mm	580,0
■ Bewehrungsstahl tragende Außenwand	33,1	■ Bewehrungsstahl tragende Außenwand	33,1
	<u>886,7</u>		<u>883,7</u>

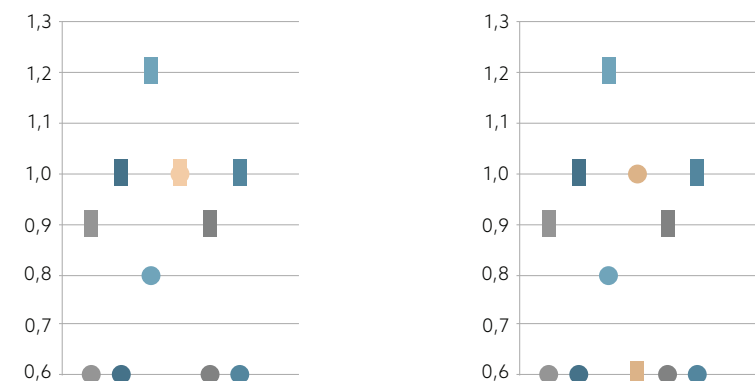
*Wertstoffe - Anteile nach Massen in %*



*Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)*



*Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □*



*Parameter der Kreislaufpotenziale der Außenwandvarianten*

Die Varianten der Außenwand unterscheiden sich hinsichtlich der eingesetzten Materialien und Massen nur wenig. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Bauteilen Gründung und erdberührte Außenwand unterscheidet sich die Zusammensetzung der Betone für Außenwand und Fassade nur in der Art der Gesteinskörnung. Die Zementarten und daraus resultierenden Massen sind dieselben: Da kein WU-Beton eingesetzt wird, wird auch kein Hüttensandzement verwendet.<sup>77</sup>

Die Massen der Varianten unterscheiden sich folglich nur hinsichtlich des geplanten Dämmstoffs. Da Glaswolle bei gleicher Wärmeleitfähigkeit aufgrund der geringeren Faserdichte eine geringere Gesamtdichte aufweist, sind die resultierenden Massen pro Quadratmeter Bauteil in der Urban-Mining-Design-Variante leicht geringer als bei der ursprünglichen Planung. In der Folge unterscheiden sich auch die Anteile der beim Rückbau entstehenden Wertstoffe nur geringfügig.

Steinwolle und Glaswolle sind prinzipiell wiederverwertbar, wenn auch durch den notwendigen Bindemittelzusatz nur eingeschränkt. Während die Rückführung von Baustellen-Verschmittresten in den Produktionsprozess durch Herstellerrücknahmeverfahren bereits etabliert ist, wird die Rücknahme nach dem Rückbau noch selten praktiziert. Ein Hersteller von Steinwolle nimmt saubere Post-Consumer-Abfälle zurück. Die notwendige Logistik besteht noch nicht, aber es ist absehbar, dass sich diese in den nächsten Jahren etablieren wird.<sup>78</sup> Für Glaswolle ist dies fraglich, da das Neuprodukt bereits aus dem etablierten Sekundärrohstoff Altglas hergestellt wird.

Aufgrund der Herstellerrücknahme werden für die Steinwolle weder Entsorgungskosten noch Verwertungserlöse angenommen, während für die Glaswolle Entsorgungskosten kalkuliert werden. Die nebenstehende Kostengrafik weist deshalb geringere Entsorgungskosten für die ursprüngliche Planung aus. Entsprechend günstiger ist auch der Faktor Wert für die Steinwolle. Die Herstellerrücknahme hat zur Folge, dass das Material mit einem Faktor Wert von 1,0 in die Berechnung der Kreislaufpotenziale eingeht, während für die Glaswolle der Faktor 0,6 angesetzt wird. Ansonsten unterscheiden sich die Faktoren Arbeit und Wert nicht. Der Rückbauaufwand ist in beiden Varianten gleich hoch; somit sind auch die Faktoren für den Parameter Arbeit gleich hoch. Für die Betonbauteile werden gleiche Entsorgungskosten angenommen, unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung.<sup>79</sup>

77 Theoretisch könnte man auch für Beton ohne besondere Anforderungen Hüttensandzement als Ersatz für Portlandzement (CEM I) verwenden. In Portlandkompositzement (CEM II) ist Hüttensand zu einem gewissen Anteil bereits enthalten. Da Beton mit Hüttensandzement (CEM III) zum einen langsamer erhärtet und zum anderen etwas teurer (und in Abhängigkeit von der Stahlproduktion nur begrenzt verfügbar) ist, wird er in erster Linie für Betonbauteile verwendet, bei denen eine langsame Hydratation erwünscht ist (massige Bauteile und WU-Betonbauteile).

78 Gespräche mit Markus Klein, Deutsche Rockwool GmbH & Co.KG im Rahmen der gemeinsamen Tätigkeit in einer Arbeitsgruppe der re!source Stiftung e.V.

79 Bisher liegen keine Erfahrungen zur Verwertung von Beton mit bereits rezyklierten Gesteinskörnungen vor. Aufgrund der nahezu gleichen Eigenschaften werden gleiche Verwertungskosten vorausgesetzt (vgl. Seite 261).

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

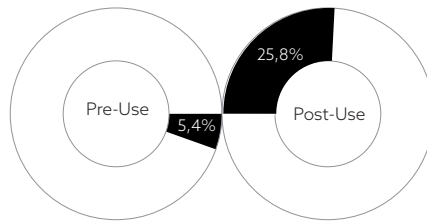
## Ursprüngliche Planung

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
<b>Beton</b>				
■ - Gesteinskörnung	661,0	PR	rc 39	dc
■ - CEM I Fassade und CEM II Außenwand	109,4	PR	"	"
■ - Wasser	62,7	PR	"	"
■ - Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-
■ Bewehrungsstahl	46,7	RC100	rc 100	rc
■ Edeldahlanker	0,7	PR	rc 100	rc
■ Steinwolle	6,2	RC24,6	rc 97	d
	<b>886,7</b>			

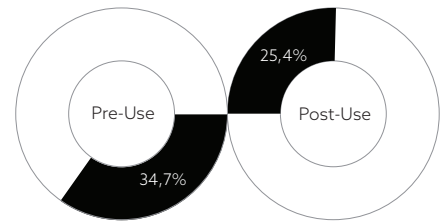
## Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
<b>Beton</b>				
■ - Gesteinsk.Tragwerk	463,2	RC 45	rc 39	d
■ Gesteinsk. Fassade	197,7	RC 25	"	"
■ - CEM I Fassade und CEM II Außenwand	109,4	PR	"	"
■ - Wasser	62,7	PR	"	"
■ - Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-
■ Bewehrungsstahl	46,6	RC 100	rc 100	rc
■ Edeldahlanker	0,7	PR	rc 100	rc
■ Glaswolle, mit biogenem Bindemittel	3,2	RC 80	rc 80	d
	<b>883,7</b>			

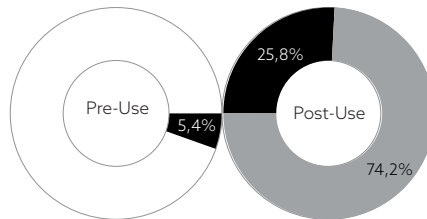
## Kreislaufpotenziale



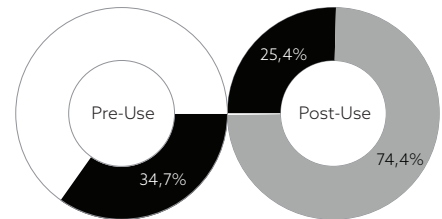
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,4%	25,8%	31,2%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	34,7%	25,4%	60,1%

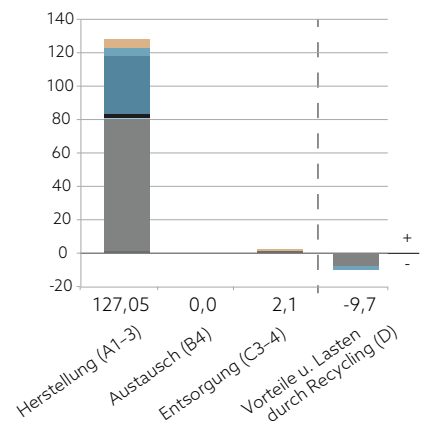
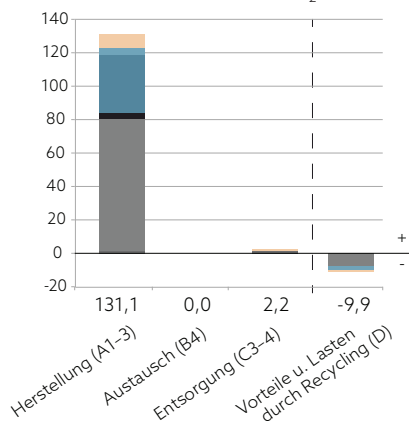


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	5,4%	100,0%	105,4%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	34,7%	99,8%	134,5%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



### Kreislaufpotenziale der Außenwandvarianten

Durch das Urban Mining Design kann das Closed-Loop-Potenzial der Außenwand von 31,2% auf 60,1% gesteigert werden. Wie sich an der folgenden Tabelle erkennen lässt, ist die Optimierung hauptsächlich auf die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung für die Betonbauteile in der Pre-Use-Phase zurückzuführen.

Materialien mit wieder- verwerteten und/oder wiederver- wertbaren Rohstoffen	Ursprüngliche Planung		Urban Mining Design	
	Pre-Use	Post-Use	Pre-Use	Post-Use
Beton*	0,00%	19,79%	29,18%	19,86%
Mineralwolle (Steinwolle/Glaswolle)	0,17%	0,68%	0,29%	0,17%
Bewehrungsstahl*	5,26%	5,26%	5,27%	5,27%
Fassadenanker	0,0%	0,08%	0,0%	0,08%
	<b>5,43%</b>	<b>25,81%</b>	<b>34,75%</b>	<b>25,39%</b>

\* Die absoluten Massen sind gleich hoch, aber aufgrund der geringeren Gesamtmasse des Bauteils ist der prozentuale Anteil des Betons und des Bewehrungsstahls in der UMD-Variante geringfügig höher.

Die Glaswolle wurde in der Urban-Mining-Design-Variante zur Optimierung des Kreislaufpotenzials gewählt, da sie nach Herstellerangaben<sup>80</sup> zu 80% aus Sekundärrohstoffen (Altglas) besteht, während Steinwolle nach Angaben des Marktführers<sup>81</sup> nur zu 24,6% aus Sekundärrohstoffen (zementgebundene Formsteine) besteht. Beide Dämmungen tragen jedoch aufgrund ihrer relativ geringen Masse nur einen geringen Anteil zum Kreislaufpotenzial der Gesamtkonstruktion bei.

Wie die Zahlen in der obigen Tabelle zeigen, erhöht die Glaswolle gegenüber der Steinwolle das Closed-Loop-Potenzial der Gesamtkonstruktion in der Pre-Use-Phase um 0,12% (0,29–0,17%). In der Post-Use-Phase mindert sie das CLP jedoch um 0,51% (0,68–0,17%). Aufgrund der Herstellerrücknahme und des höheren Material-Loop-Potenzials schneidet die Steinwolle in der Post-Use-Phase besser ab. Über den gesamten Lebenszyklus ist das Kreislaufpotenzial der Steinwolle entgegen der ersten Annahme höher als das der Glaswolle.

Das Loop-Potenzial der Post-Use-Phase ist in beiden Varianten nahezu gleich hoch. Obwohl auch die absoluten Massen weiterverwertbarer Materialien (Beton) gleich hoch sind, ist ihr prozentualer Anteil aufgrund der geringeren Gesamtmasse bei der UMD-Variante leicht höher.

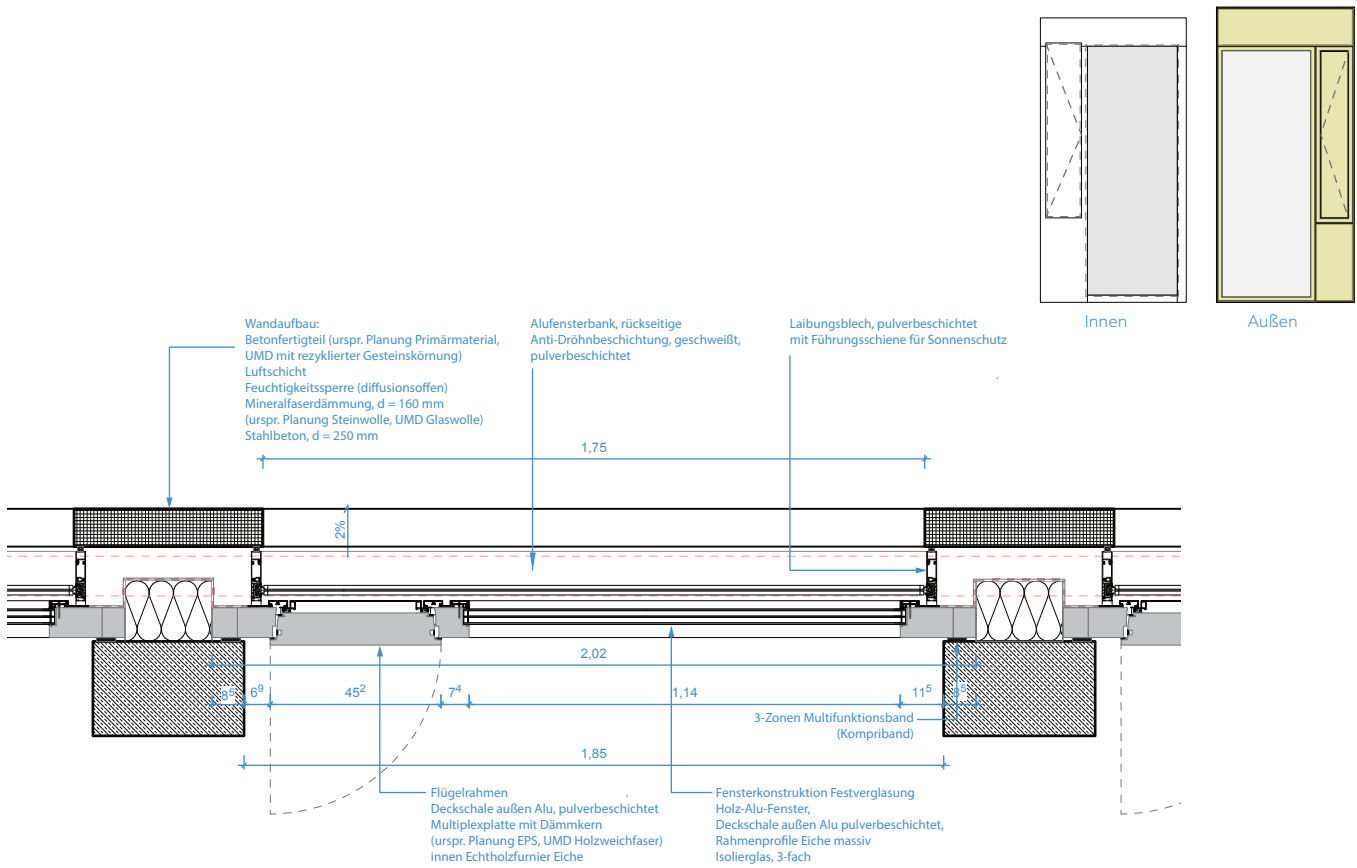
### Treibhauspotenziale der Außenwandvarianten

Das Treibhauspotenzial ist in beiden Varianten nahezu gleich hoch. Für den Transport der rezyklierten Gesteinskörnung für die Fassade wurde eine Entfernung von 125 km vom Verwerter zum Betonfertigteilwerk angesetzt, während für den Transport der primären Gesteinskörnung eine Entfernung von 20 km angenommen wurde. Die erhöhten Emissionen für den Transport der rezyklierten Gesteinskörnung werden jedoch durch den Transportvorteil der rezyklierten Gesteinskörnung für die tragende Außenwand ausgeglichen (vgl. Seite 241).

Die leicht geringeren Treibhausgasemissionen der Urban-Mining-Design-Variante lassen sich auf die Glaswolle und das darin eingesetzte Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen (Pflanzenstärke) zurückführen.

80 Umweltproduktdeklaration Knauf Ecosol[212].

81 Umweltproduktdeklaration Rockwool [213].



A 9.16

Das Leitdetail für die Fenster wird hier nur in einer einzigen Variante zeichnerisch dargestellt, da nur die Materialwahl und die Verbindungstechnik variiert wurde und nicht der gesamte Aufbau.

A 9.16 Fassade Rathaus Korbach, Horizontalschnitt Fenstertyp 1, M 1:20, mit maßstabloser Ansicht innen und außen, ARGE agn-heimspielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken, Stand 09/2019

Vertikalschnitt siehe Abb. A 9.15

### 9.2.4. Fenster

Die Fenster sind als Holz-Aluminium-Fenster geplant. Der Fensterrahmen wird aus massivem Eichenholz hergestellt und auf der Außenseite des Rahmens wird zum Schutz vor Witterungseinflüssen eine Aluminiumumdeckschale aufgeschraubt.

Es gibt insgesamt fünf Fenstertypen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Breite, der Öffnungsmöglichkeiten und des transparenten Anteils an der Fensterfläche. Am häufigsten kommt der in Abbildung A 9.16 dargestellte Fenstertyp 1 vor. Aus Vereinfachungsgründen wurden nur für diesen Typ, der ca. 80% der Fensterfläche repräsentiert, die Kreislaufpotenziale berechnet.

Der Fenstertyp 1 besteht aus einer transparenten Festverglasung, einem opaken Öffnungsflügel sowie opaken Paneelen. Die opaken Elemente setzen sich aus zwei maßhaltigen Furniersperrholzplatten (Multiplex) mit Dämmkern und einem außenseitigen Aluminiumblech zusammen, das in den Profilen verklemmt wird.

In der Regel wird als Dämmung EPS-Hartschaum verwendet, der mit den Holzwerkstoffen verklebt wird. Für den Feuchteschutz enthält das innenliegende Furniersperrholz üblicherweise eine Aluminiumeinlage als Dampfsperre.

Da dieser Aufbau der Paneele nicht sortenrein trennbar und recyclingfähig ist, wurde nach dem Urban Mining Design eine materialhomogene Dämmung aus Holzweichfasern vorgeschlagen, die unter leichtem Druck zwischen den Holzwerkstoffplatten verklemmt wird. Die höhere Dichte der Holzweichfaserplatten verbessert gleichzeitig den Schallschutz gegen Außenlärm. Der Wärmeschutz ist bei gleicher Wärmeleitfähigkeit ( $0,040 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) gleich hoch. Auf eine Aluminiumeinlage zwischen den Furnierschichten der innenliegenden Sperrholzplatte kann verzichtet werden, wenn zwischen dem Holzwerkstoff und der Holzweichfaserdämmung eine Dampfbremse, z. B. aus Polyethylen (PE-LD), eingebracht wird, die nur am Rand verklebt wird.

Um die Luftdichtheit herzustellen und ein Klappern der Paneele beim Öffnen oder durch Wind zu vermeiden, können die Multiplexplatten im Rahmen verleimt werden. Noch besser, aber aufwendiger wäre ein Einklemmen mit Gummidichtungen.

Als Schutz gegen von außen eindringende Feuchtigkeit wird eine EPDM-Folie im Alu-Fensterprofil verklemmt und über den Sonnenschutzkasten abgeführt (nicht verklebt, offen hängend, siehe auch Abb. A 9.15). Zur Herstellung der Luftdichtheit wird ein komprimiertes Fugendichtungsband (Kompriband) zwischen Betonwand und Fensterrahmen verklebt.

In der ursprünglichen Variante werden die Eichenholzprofile und das Eichenholz furnier auf der Innenseite der Paneele und opaken Fensterflügel mit transparenter Kunstharzlasur beschichtet. In der Urban-Mining-Design-Variante wird ein Naturharzöl zur Beschichtung vorgeschlagen.

Die Berechnung der Kreislaufpotenziale für den Sonnenschutz wird aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt.

# Fenster

## Ursprüngliche Planung

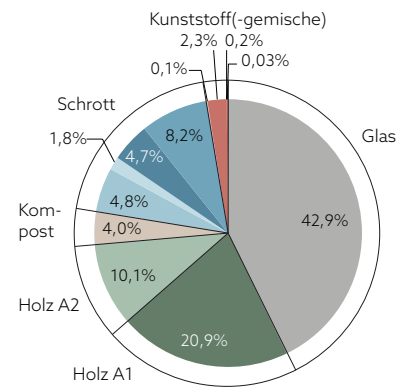
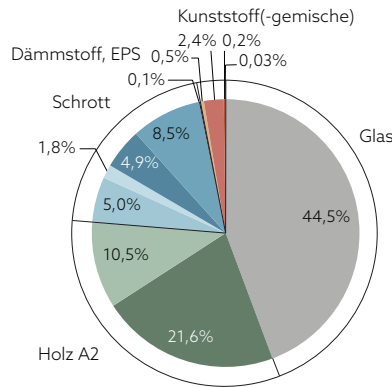
### Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m <sup>2</sup> ]
Fensterprofile, Eiche massiv lackiert	13,23
Rahmenfüllung außen, Multiplex, 12 mm	2,55
Dämmkern, EPS, 49 mm	0,28
Rahmenfüllung innen, Multiplex 18 mm mit Aluminiumeinlage	3,92
Deckschalen Aluminium	3,05
3-fach Isolierglas, 36 mm	27,17
Konsolen, Stahl verzinkt	3,00
Beschläge, Stahl verzinkt	5,20
Dichtungen, EPDM	1,46
Feuchtigkeitssperre, EPDM	0,10
Kompribänder, Polyurethan	0,02
Laibung/Fensterbank, Alu-Blech pulverbeschichtet, 2mm	1,12
<b>Gesamt</b>	<b>61,10</b>

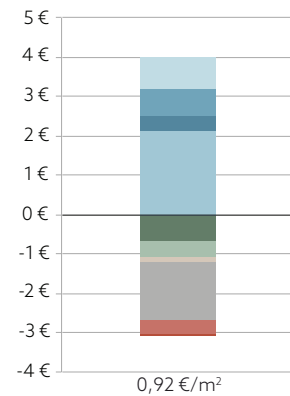
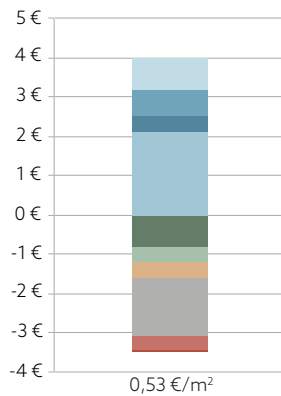
## Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ]
Fensterprofile, Eiche massiv geölt	13,23
Rahmenfüllung außen, Multiplex, 12 mm	2,55
Dämmkern, Holzweichfaser lignin-gebunden, 20+30 mm	2,50
Dampfbremse PE-LD	0,06
Rahmenfüllung innen, Multiplex, 18 mm	3,83
Deckschalen Aluminium	3,05
3-fach Isolierglas, 36 mm	27,17
Konsolen, Stahl verzinkt	3,00
Beschläge, Stahl verzinkt	5,20
Dichtungen, EPDM	1,46
Feuchtigkeitssperre, EPDM	0,10
Kompribänder, Polyurethan	0,02
Laibung/Fensterbank, Alu-Blech pulverbeschichtet, 2 mm	1,12
<b>Gesamt</b>	<b>63,30</b>

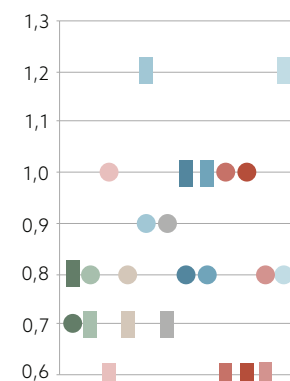
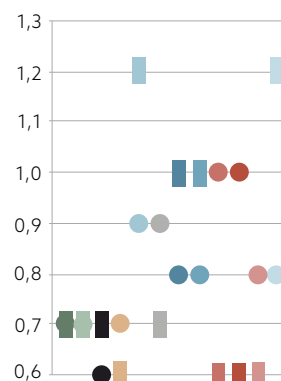
### Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



### Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



### Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



*Parameter der Kreislaufpotenziale der Fenstervarianten*

Die Gesamtmasse der für die Fenster eingesetzten Materialien ist in der Urban-Mining-Design-Variante leicht höher, was auf die höhere Dichte der Holzweichfaserplatten in den Paneelen zurückzuführen ist.

Den höchsten Anteil an den Fenstermaterialien hat das Isolierglas, nicht nur aufgrund des größten Flächenanteils und des Gewichts, sondern auch, weil davon ausgegangen werden muss, dass es einmal im Lebenszyklus von 50 Jahren ausgetauscht wird. Wie bereits auf Seite 124 in Kapitel 6 beschrieben, sind Isoliergläser heutzutage komplexe High-tecprodukte mit eingeschränkter Recyclingfähigkeit. In der Urban-Mining-Design-Variante wird ein Cradle-to-Cradle-zertifiziertes Isolierglas eines englischen Herstellers<sup>82</sup> mit 10% Post-Consumer-Material angenommen. Ob dies in der öffentlichen Ausschreibung tatsächlich umgesetzt werden kann, ist unklar.

Beim Vergleich der nebenstehenden Wertstoffgrafiken fällt der Anteil an kompostierbaren Materialien in der UMD-Variante auf, der aus den lignin-gebundenen Holzweichfaserplatten resultiert.

Die Fensterrahmen aus Eichenholz werden in der ursprünglichen Variante aufgrund der Beschichtung mit transparentem Kunstharzlack dem Altholz A2 zugeordnet, während die mit Naturöl (z.B. Holzöl, Leinöl) behandelten Profile der UMD-Variante der Altholzkategorie A1 entsprechen (nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt).

Die Dichtungen aus EPDM machen einen auffälligen Anteil von 2,4 bzw. 2,3% aus, da sie im Lebenszyklus zweimal ausgetauscht werden müssen. Auch die Beschläge haben mit 8,5 bzw. 8,2% einen nicht unerheblichen Anteil an den Wertstoffen, da sie einmal ausgetauscht werden müssen.

Mit den Wertstoffen beider Fenstervarianten können am Ende der Nutzungsdauer Erlöse erzielt werden. Insbesondere die Aluminiumschrotte aus Deckschalen und Blechen, aber auch die Beschläge und Konsolen aus verzinktem Stahl schlagen positiv zu Buche (rund 4 €).

Allerdings ist die Entsorgung und Verwertung für die übrigen Wertstoffe in der ursprünglichen Variante mit ca. 3,40 € um 0,40 € teurer als in der UMD-Variante. Dies resultiert hauptsächlich aus den höheren Verwertungskosten für die Rahmenprofile als Altholz A2 und aus den im Verhältnis zu ihrem Massenanteil relativ hohen Entsorgungskosten für die EPS-Dämmung.

Betrachtet man die Faktoren Arbeit und Wert, fallen die Unterschiede für den Arbeitsaufwand zur Rückgewinnung und zur Werthaltigkeit der Rahmenprofile, Rahmenfüllungen, Dampfbremsen und Dämmstoffe auf. Bei den Rahmenprofilen ist in der UMD-Variante der aus der Altholzkategorie resultierende höhere Wert ablesbar, bei den Rahmenfüllungen der geringere Faktor Arbeit aufgrund des Verzichts auf Verklebung. Da die Aluminiumeinlage in der ursprünglichen Variante nicht rückbaubar ist und mit dem Holzwerkstoff gemeinsam entsorgt werden muss, wird hier nicht der Wertfaktor für Aluminium, sondern für die Entsorgung (Verbrennung) des Altholzes A2 angesetzt (wobei aus dem Aluminium Schlacke entsteht). Die Holzfaserdämmung hat einen höheren Faktor Wert, außerdem einen höheren Faktor Arbeit durch leichtere Trennbarkeit ohne Verklebung.

82 AGC Glass UK Ltd., Rugby, Produkt: Float Glass [214].

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

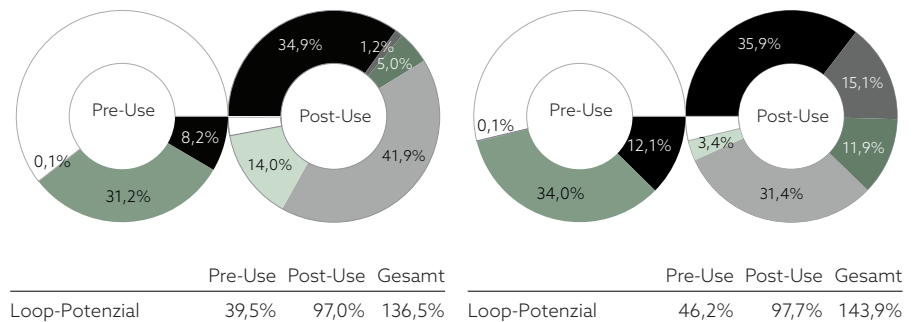
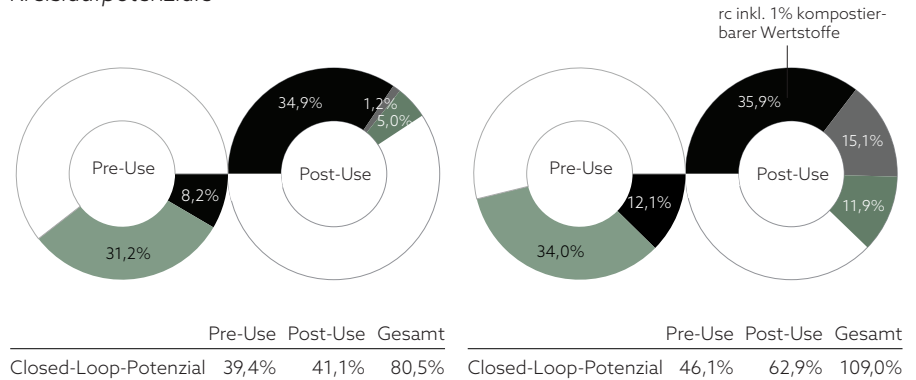
## Ursprüngliche Planung

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
■ Eichenprofile	13,23	RN 0 100	dc	en <sub>r</sub>
■ Multiplexplatten	6,39	RN 60,1 30,9	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
■ Dampfbremse, Alu.	0,08	RC 40	d	d
■ EPS-Dämmung	0,28	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
■ Deckschale, Alu.	3,38	RC 50	rc 98	rc
■ 3-fach Isolierglas	27,17	PR	rc 50	dc
■ Konsolen, Stahl	3,00	RC 35	rc 100	rc
■ Beschläge, Stahl	5,20	RC 35	rc 100	rc
■ Dichtungen, EPDM	1,46	DC 5	rc 45	en <sub>f</sub>
■ EPDM-Folie	0,10	DC 5	rc 45	en <sub>f</sub>
■ Komprimbänder, PU	0,02	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
■ Alu-Laibungsblech	1,01	RC 50	rc 98	rc
	61,32			

## Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
■ Eichenprofile	13,23	RN 100 0	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
■ Multiplexplatten	6,39	RN 60,1 30,9	dc <sub>cr</sub>	en <sub>cr</sub>
■ Dampfb. PE-LD	0,06	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
■ Holzweichfaserd.	2,50	RN 0 100	rc 100	en <sub>r</sub>
■ Deckschale, Alu.	3,38	RC 50	rc 98	rc
■ 3-fach Isolierglas	27,17	RC 10	rc 50	dc
■ Konsolen, Stahl	3,00	RC 35	rc 100	rc
■ Beschläge, Stahl	5,20	RC 35	rc 100	rc
■ Dichtungen, EPDM	1,46	DC 5	rc 45	en <sub>f</sub>
■ EPDM-Folie	0,24	DC 5	rc 45	en <sub>f</sub>
■ Komprimbänder, PU	0,02	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
■ Alu-Laibungsblech	1,01	RC 50	rc 98	rc
	63,65			

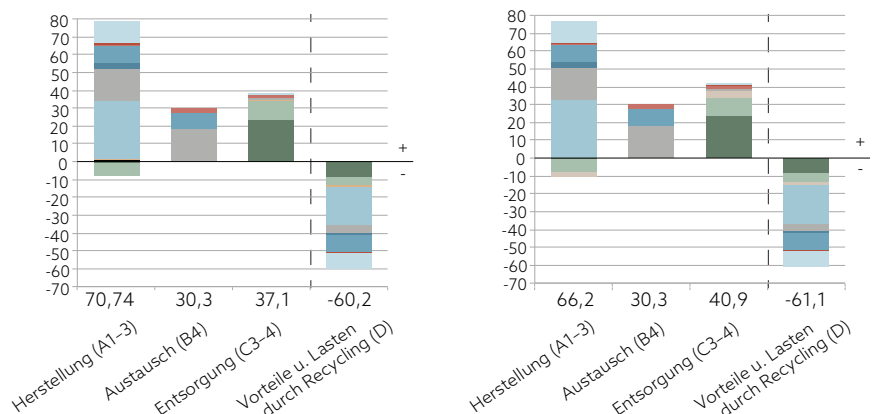
## Kreislaufpotenziale



## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>

### Hinweis:

in der Darstellung des Treibhauspotenzials fällt auf, dass für die Fensterprofile ein sehr geringer negativer Wert für die Speicherung von Treibhausgasen in der Herstellung (A1-3) ausgewiesen wird, während die Emissionen durch Verbrennung relativ hoch sind. Es wurde der Datensatz für Holzflügel- und Blendrahmen der Ökobau.dat verwendet. Da in dem Datensatz die Module C und D nicht ausgewiesen werden, wurde zusätzlich der Datensatz zur Verbrennung des Holzes verwendet. Die Bilanz scheint insgesamt nicht plausibel, die Herstellung der Profile müsste eigentlich ein höheres negatives Treibhauspotenzial ausweisen. Ein Grund liegt evtl. darin, dass der Datensatz der Ökobaudat einen Anstrich der Profile mit Kunstharzlacken berücksichtigt, der hier zu einem verfälschten Ergebnis führt.



### Kreislaufpotenziale der Fenstervarianten

Das Closed-Loop-Potenzial der Fenster kann durch das Urban Mining Design von 80,5% auf 109%, also um fast 30 Prozentpunkte gesteigert werden, das Loop-Potenzial jedoch nur von 136,1% auf 143,9%, also um 7,8 Prozentpunkte. Woran liegt das?

Die Pre-Use-Phase unterscheidet sich hinsichtlich der offenen und geschlossenen Kreisläufe nicht. Da keine weiterverwerteten Materialien in den Fenstern eingesetzt werden, sind Closed-Loop- und Loop-Potenzial identisch. Die Optimierung beträgt in der Pre-Use-Phase 6,7 Prozentpunkte. Der Anteil wiederverwerteter Materialien wird durch den Recyclinganteil im herstellereigenen, Cradle-to-Cradle-zertifizierten Isolierglas um 3,9 Prozentpunkte erhöht. Außerdem steigt der Anteil erneuerbarer Rohstoffe durch den Austausch der EPS-Dämmung gegen die Holzfaserdämmung um 2,8 Prozentpunkte.

In der Post-Use-Phase wirkt sich die Holzfaserdämmung zusätzlich positiv auf das Closed-Loop- und Loop-Potenzial aus, da sie (produktabhängig) kompostierbar und damit im natürlichen Kreislauf wiederverwertbar ist. Der Anteil wiederverwertbarer Wertstoffe steigt damit insgesamt allerdings nur um einen Prozentpunkt. Aufgrund des Faktors Arbeit von 0,8 und des Faktors Wert von 0,7 wird etwas mehr als die Hälfte (56%) des Dämmstoffs dem Recycling (Kompost) und der Rest den energetisch verwertbaren Wertstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen zugeordnet.

#### Hinweis:

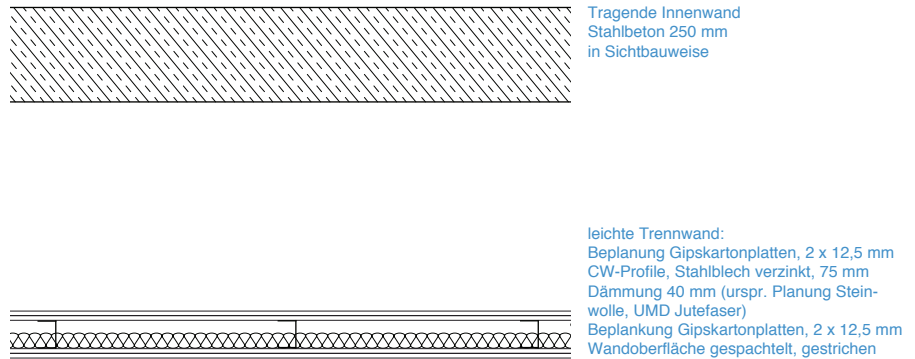
Würde die Holzfaserdämmung mit den Holzwerkstoffen verleimt, müsste das Verbundmaterial dem Altholz A2 zugeordnet werden. Der Faktor Wert würde sich nicht ändern, aber der Faktor Arbeit würde aufgrund des Aufwands für die sortenreine Trennung auf 0,6 sinken und eine stoffliche Verwertung unwahrscheinlicher machen. Holzweichefaserplatten können nicht zusammen mit anderen Sekundärholzmateriale stofflich verwertet werden (für Spanplatten werden Späne benötigt).

Das größte Optimierungspotenzial der Fensterkonstruktion liegt in der Verwendung von Hölzern aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft. So steigt in der UMD-Variante das Closed-Loop-Potenzial Post-Use allein um knapp 20 Prozentpunkte, wenn die Eichenholzprofile zertifiziert sind und damit gesichert ist, dass das Holz nachwachsen kann. Dies ist auch der Grund, warum das Closed-Loop-Potenzial durch das Urban Mining Design wesentlich mehr steigt als das Loop-Potenzial. In der UMD-Variante fließt sowohl der stofflich weiterverwertbare Anteil als auch der energetisch weiterverwertbare Anteil in das CLP ein, während beide in der Ursprungsvariante nur in das LP eingehen ( $dc_{cr}$  und  $en_{cr}$  steigen, während  $dc$  und  $en_r$  sinken). Dabei wurden die Sperrholzplatten in beiden Varianten gleich gewählt: Der Anteil zertifizierten Holzes beträgt 66%.<sup>83</sup> Die wiederverwertbaren Wertstoffe resultieren in beiden Varianten vorwiegend aus den geplanten Metallen und aus dem Isolierglas, wobei Letzteres aufgrund des materialspezifischen Recyclingpotenzials (MLP) von 50% und der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus (Faktor Arbeit 0,9 und Faktor Wert 0,7) nur zu 31,5% dem hochwertigen EoL-Szenario Recycling zugeordnet wird. Der Rest wird als Downcycling dem Loop-Potenzial zugerechnet.

### Treibhauspotenziale der Fenstervarianten

Die Treibhausgasemissionen können durch das Urban Mining Design geringfügig verringert werden, was hauptsächlich auf den Austausch des EPS gegen die Holzfaserdämmung zurückzuführen ist. Die längere Speicherung von CO<sub>2</sub> durch eine bessere Möglichkeit der Kaskadennutzung der Eichenholzprofile kann in der Ökobilanz nicht abgebildet werden.

<sup>83</sup> Die Angaben sind herstellereigen und beziehen sich auf WISA® – Birch products der Fa. UPM Plywood Oy, Finnland [215].



### 9.2.5. Innenwände und -stützen

In diese Arbeit werden zwei Arten von Innenwänden einbezogen, die den weit überwiegenden Teil der geplanten Innenwände des Erweiterungsbaus für das Rathaus Korbach ausmachen: die tragenden Stahlbetoninnenwände und die leichten Trennwände aus Gipskarton (s. Abb. A 9.17). Die in sehr geringem Umfang geplanten nicht tragenden Wände aus Kalksandsteinmauerwerk werden aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt.

#### *Tragende Stahlbetonwände*

Stahlbetonwände sind als tragende und aussteifende Wände in den Treppenhaus- und Sanitärkernen sowie als Schachtwände geplant. Außerdem bilden sie die tragende Mittelachse des Hauptgebäudes.

Auf eine Bekleidung wird verzichtet, stattdessen werden die Stahlbetonwände in einer definierten Sichtbetonoberflächenqualität ausgeführt.

Das Urban Mining Design bezieht sich deshalb nur auf die Herstellungsphase: Wie in allen anderen Betonbauteilen auch wird für die Herstellung des Betons rezyklierte Gesteinskörnung aus dem Abbruch des Bestandsgebäudes verwendet. Ansonsten eignen sich die Stahlbetonwände aufgrund des Verzichts auf den üblicherweise eingesetzten Putz bereits gut für das Urban Mining Design – abgesehen von der eingeschränkten Recyclingfähigkeit des Betons.

### *Leichte Trennwände*

Für die leichten Trennwände wurden konventionelle Gipskartonwände mit Metallständerwerk und Zwischendämmung geplant.

Das Optimum wären wiederverwendbare Systemtrennwände, die die Flexibilität der Grundrisse des neuen Rathaus-Anbaus erhöhen würden. Auch Wände aus Holzständern mit Beplankung aus Lehmbauplatten und Lehmputz wären denkbar.

Zum einen wären diese Optimierungen jedoch wesentlich teurer, zum anderen sind für Gipsbaustoffe bereits Recyclinganlagen vorhanden.<sup>84</sup>

Durch den geplanten Ausstieg aus der Kohleverstromung wird immer weniger Gips als Nebenprodukt aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) zur Verfügung stehen. Buchert et al. [216] sehen deshalb in einer Studie für das Umweltbundesamt ein „wachsendes Potenzial für die Gewinnung von RC-Gips aus rückgebauten Gipskartonplatten in Deutschland“.<sup>85</sup> Vor dem Hintergrund der nationalen und europäischen Bestrebungen nach einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft (vgl. Kapitel 1.2.2) ist davon auszugehen, dass sich ein Recycling etablieren wird. Die Optimierung der leichten Trennwände bezieht sich deshalb nur auf die Dämmung: Statt Mineralwolle wird in der Urban-Mining-Design-Variante Jutefaserdämmung aus recycelten Kakaosäcken vorgeschlagen.

### *Innenstützen*

Die Innenstützen aus Stahlbeton werden nicht extra berechnet und auch nicht abgebildet, da sie vom Aufbau her den tragenden Stahlbetonwänden gleichen. In der Berechnung der Kreislaufpotenziale für das Gesamtgebäude werden die Innenstützen als kurze Wandstücke den Flächen der tragenden Innenwände zugeschlagen.

84 Es gibt in Deutschland derzeit (Stand 2019) drei Gips-Recyclinganlagen: MUEG in Sachsen, Remondis in Rheinland-Pfalz und Schulz in NRW.

85 Allerdings gibt es derzeit noch Hemmnisse oder auch gute Gründe, die gegen ein Recycling von heutigen Gipsabfällen sprechen: Bis Anfang der 90er Jahre wurden in Gipspachtelmassen Asbestfasern verwendet (ab 1993 verboten). Der Bundesverband der Gipsindustrie hat deshalb laut UBA-Studie [217] in seinen Qualitätskriterien für RC-Gipse einen Grenzwert für Asbestfasern festgelegt, der sich an der Gefahrstoffverordnung orientiert. Vertreter der Recyclingwirtschaft fordern laut Verband für Abbruch und Entsorgung e.V. [218], einen Grenzwert für Asbestfasern rechtsgebietsübergreifend (Abfallrecht, Gefahrstoffrecht, Chemikalienrecht, Arbeitssicherheitsrecht) festzulegen. Aufgrund der aktuellen Diskussionen zum Thema Asbestfasern in Gipsabfällen hat laut Auskunft von Bunzel/MUEG [219] ein führender Hersteller von Gipsbaustoffen den Einsatz von RC-Gips vorerst ausgesetzt. Daraufhin hat die Gipsrecyclinganlage der Strabag Umwelttechnik in Lauffen/Baden-Württemberg Ende 2018 den Betrieb wieder eingestellt (aufgrund des Wegfalls des Hauptabnehmers).

**Tragende Innenwände**

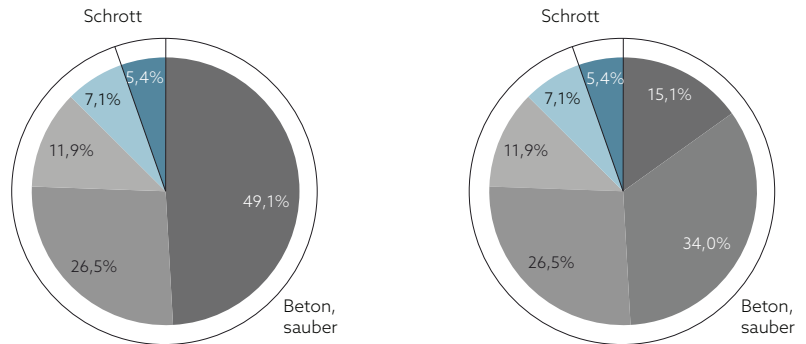
**Ursprüngliche Planung**

**Urban Mining Design**

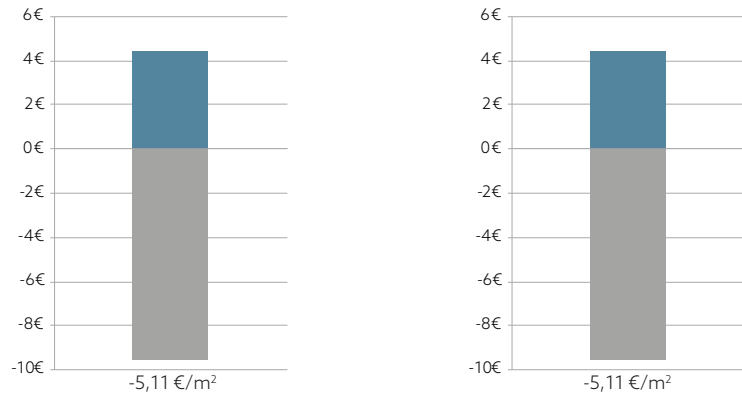
*Materialien und Massen im Lebenszyklus*

Stahlbeton C25/30, 250 mm	[kg/m <sup>2</sup> ]	Stahlbeton C25/30, 250 mm	[kg/m <sup>2</sup> ]
■ Kies	301,1	■ Kies	92,6
■ Sand	162,1	■ Rezyklierte Gesteinskörnung, Typ 1	208,5
■ Zement	73,0	■ Sand	162,1
■ Wasser	43,8	■ Zement	73,0
■ Bewehrungsstahl	33,1	■ Wasser	43,8
		■ Bewehrungsstahl	33,1
	<b>613,1</b>		<b>613,1</b>

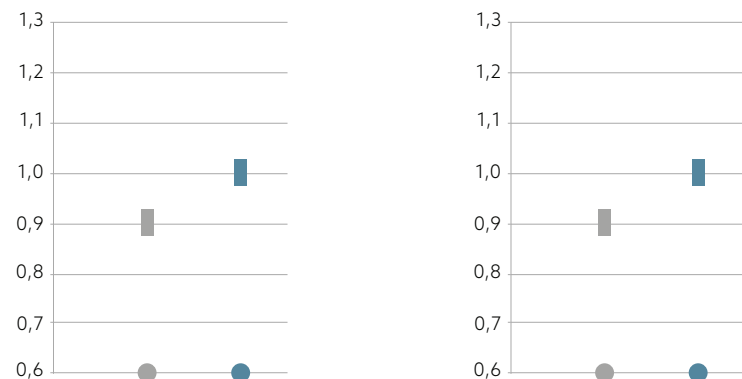
*Wertstoffe - Anteile nach Massen in %*



*Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)*



*Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □*



*Parameter der Kreislaufpotenziale der Varianten der tragenden Innenwände*

Für die tragenden Stahlbetoninnenwände wird die Betonzusammensetzung in der nebenstehenden Massenaufstellung etwas dezidiert dargestellt (für die übrigen Betonbauteile wurde zugunsten der Übersichtlichkeit darauf verzichtet). Dabei wurde die Betonrezeptur nur grob kalkuliert. Betonzusatzstoffe wie Flugasche, Betonverflüssiger etc. werden erst vom Betonhersteller berechnet und wurden in dieser Arbeit aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt. Die Zusätze unterscheiden sich im Übrigen in den Varianten nicht, da die rezyklierte Gesteinskörnung keinen Einfluss auf die grundsätzliche Betonrezeptur hat, wenn die Richtlinie des DAfStb für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen eingehalten wird. Deshalb unterscheiden sich die beiden Innenwandvarianten auch nur in ihrer Materialherkunft, nicht aber in den einzusetzenden Massen. Der Betonbruch in der Körnung 4/22 ersetzt mit einem Anteil von 34% an der Gesamtmasse (45% der Gesteinskörnung) das Primärmaterial Kies, während die Feianteile in Form von Sand in beiden Varianten in gleicher Menge (26,5% der Gesamtmasse) aus Primärmaterial stammen. Auch der Zement- und Wasseranteil<sup>86</sup> sowie der Stahlanteil bleiben gleich (im Gegensatz zu den WU-Betonbauteilen).

Da der Beton nicht mit fremden Stoffen wie z. B. Putz verunreinigt wird, kann er am Ende der Nutzungsdauer hochwertig verwertet werden und wird in beiden Varianten der Wertstofffraktion „Beton sauber“ zugeordnet. Die Bewehrungsstähle fließen nach dem Abbruch in den Stahlschrott.

Wie bereits in den Ausführungen zur Außenwand erwähnt, liegen bisher keine Erfahrungen zu Verwertungsmöglichkeiten und -kosten für Beton mit bereits rezyklierten Gesteinskörnungen vor. Möglicherweise ist der Feinanteil beim nächsten Verwertungsprozess höher, da die rezyklierte Gesteinskörnung nicht nur natürliches Gestein, sondern auch Zementstein enthält, der ggf. beim nächsten Brechvorgang in feinere Anteile zerfällt. Dies könnte ggf. zu abweichenden Verwertungsprozessen und -kosten führen. Allerdings wird bei einem späteren Rückbau nicht erkennbar sein, ob für das Tragwerk rezyklierte Gesteinskörnung verwendet wurde, und solange keine Dokumentationspflicht für die eingesetzten Materialien besteht (vgl. Madaster, Kapitel 4, Seite 79) wird die Recyclingkette später nicht nachvollziehbar sein. Außerdem können in dieser Arbeit nur die aktuellen Verwertungskosten zugrunde gelegt werden, die mangels anfallenden Materials noch nicht nach Beton ohne und mit rezyklierten Gesteinskörnungen unterscheiden. Insofern sind die nebenstehend ausgewiesenen Verwertungserlöse und Entsorgungskosten in beiden Varianten gleich hoch (5,11€/m<sup>2</sup> Stahlbetoninnenwand).

Weiterhin liegen noch keine Erkenntnisse vor, ob Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen möglicherweise einen anderen Rückbauaufwand verursacht. Die Differenzen dürften jedoch minimal sein.

Für beide Varianten werden deshalb dieselben Wirtschaftlichkeitsfaktoren Arbeit und Wert angesetzt.

86 Der Wasseranteil ist abhängig von der Feuchte der Gesteinskörnungen. Ggf. nehmen die Rezyklate mehr Wasser auf als natürliche Gesteinskörnung, wodurch eine zusätzliche Wasserzugabe für die Hydratation erforderlich werden könnte.

### Legende Kreislaufpotenziale

#### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

#### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

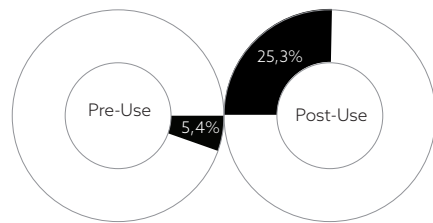
### Ursprüngliche Planung

	[kg/m <sup>2</sup> ] Pre-Use		Post-Use	
	sd	ud	sd	ud
<b>Stahlbeton C25/30</b>				
■ Kies	301,1 PR	rc39	dc	
■ Sand	162,1 PR	" "		
■ Zement	73,0 PR	" "		
■ Wasser	43,8 PR	" "		
■ Transporte Gesteinsk.	- -	- -		
■ Bewehrungsstahl	33,1 RC100	rc100	rc	
	613,1			

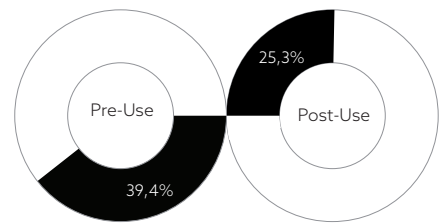
### Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ] Pre-Use		Post-Use	
	sd	ud	sd	ud
<b>Stahlbeton C25/30</b>				
■ Kies	92,6 PR	rc39	dc	
■ Rezyklierte Gesteinsk.	208,5 RC100	" "		
■ Sand	162,1 PR	" "		
■ Zement	73,0 PR	" "		
■ Wasser	43,8 PR	" "		
■ Transporte Gesteinsk.	- -	- -		
■ Bewehrungsstahl	33,1 RC100	rc100	rc	
	613,1			

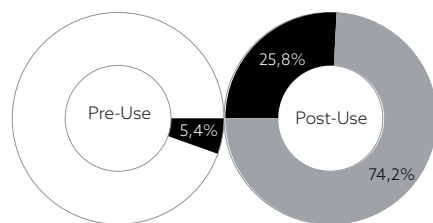
### Kreislaufpotenziale



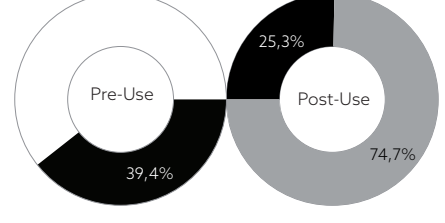
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,4%	25,3%	30,7%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	39,4%	25,3%	64,7%

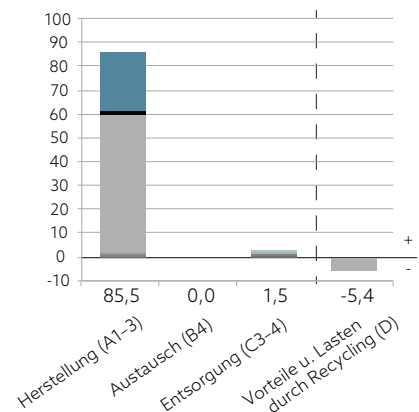
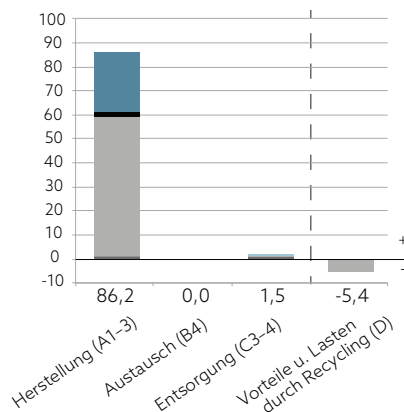


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	5,4%	100,0%	105,4%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	39,4%	100,0%	139,4%

### Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



*Kreislaufpotenziale der tragenden Innenwände*

Die Kreislaufpotenziale der Stahlbetonwände können nur in der Pre-Use-Phase verbessert werden. Durch den Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnung steigt das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use von 5,4 auf 39,4%. Während in der ursprünglichen Variante nur der Bewehrungsstahl ein Kreislaufpotenzial aufweist, schließen in der UMD-Variante die wiederverwerteten Betonmassen aus dem Bestand den Kreislauf mit zusätzlichen 34% der Gesamtmasse.

Die Post-Use-Phase ist jedoch in beiden Varianten gleich. Der Beton und der Stahl weisen zusammen ein Closed-Loop-Potenzial Post-Use von 25,3% auf. Davon sind 5,4% auf den Stahl und 19,9% auf den Beton zurückzuführen. Der Stahl wird sowohl im hochwertigen als auch im üblichen EoL-Szenario dem Recycling zugeordnet, sodass er zu 100% im Kreislauf verbleibt.<sup>87</sup> Aufgrund des eingeschränkten Material-Loop-Potenzials von Beton (39%) und der Wirtschaftlichkeitsfaktoren Arbeit und Wert in Höhe von 0,6 bzw. 0,9 wird nur für 21,1% des Betons ein hochwertiges Recycling im geschlossenen Kreislauf prognostiziert.

Für die restlichen 78,9% des Betons wird eine Weiterverwertung prognostiziert, die im Loop-Potenzial ausgewiesen wird. Letzteres beträgt in beiden Varianten insgesamt 100%. Da keine Verschmutzungen mit materialfremden Stoffen geplant sind, ist davon auszugehen, dass nach dem Rückbau kein Material deponiert werden muss (sofern in Abhängigkeit von der Bautätigkeit ein Markt für diese Rezyklate existieren wird).

**Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich die Prognosen immer nur auf die zu beurteilende Planung beziehen. Bei Umbau- oder Sanierungsmaßnahmen im Lebenszyklus muss das Urban Mining Design ebenfalls berücksichtigt werden.**

*Treibhauspotenziale der tragenden Innenwände*

Wie die nebenstehende Grafik zeigt, kann das praktizierte Urban Mining nur zu einer geringfügigen Verbesserung des CO<sub>2</sub>-Footprints der tragenden Innenwände beitragen. 97% der Treibhausgasemissionen gehen auf das Konto von Zement und Stahl, wobei der Zement mit 68% den größten Anteil hat. Nur 1,5% aller berücksichtigten Treibhausgasemissionen resultieren aus der Herstellung der Gesteinskörnung. Dabei macht es keinen großen Unterschied, ob es sich um natürliches Gestein oder Rezyklat handelt. Beim Abbau und der Aufbereitung von Kies und Sand entstehen laut Ökobaudat pro kg Rohstoff 0,00274 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. Für aufbereiteten Bauschutt werden 0,00267 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. pro kg veranschlagt.

Die geringfügige Optimierung resultiert daher aus der geringeren Distanz für die Transporte der Gesteinskörnung. Während die Recyclinganlage in einer Entfernung von 19 km zum Betonwerk Korbach liegt, kommen Kies und Sand aus 50 km entfernten Tagebaugruben. Pro Tonne und km entstehen ca. 0,0641 kg Treibhausgase. Bei 31 km Differenz und einem 1,5-fachen Ansatz für Leerfahrten können für 208 kg Rezyklat 0,62 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. pro m<sup>2</sup> Innenwand eingespart werden.

<sup>87</sup> In der Ökobilanzierung wird eine Sammelverlustrate bei der Berechnung der Gutschriften für den nächsten Lebenszyklus einkalkuliert. Diese beträgt z.B. für Baustahl laut EPD 1% [220]. Von solchen pauschalen Verlustraten wurde in dieser Arbeit abgesehen, stattdessen werden die beschriebenen Parameter zur Berechnung der Kreislaufpotenziale angesetzt. Dennoch könnten Sammelverlustraten auf den nicht wirtschaftlich selektiv rückbaubaren Anteil (übliches EoL-Szenario) in späteren Versionen des Urban Mining Index berücksichtigt werden.

**Leichte Trennwände**

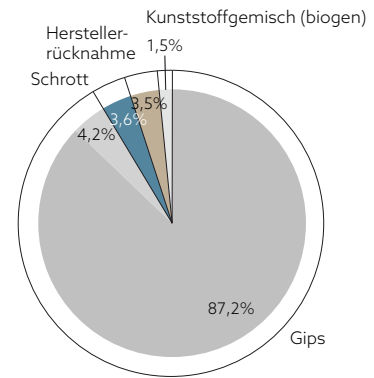
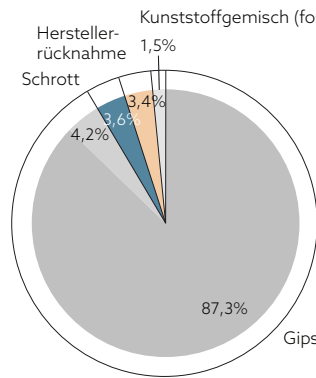
**Ursprüngliche Planung**

**Urban Mining Design**

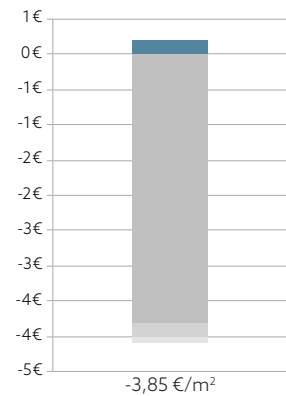
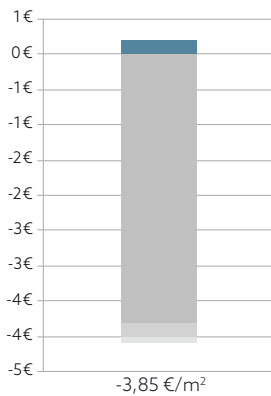
*Materialien und Massen im Lebenszyklus*

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
■ Gipskartonplatten, 2 x 2 x 12,5 mm	37,2	■ Gipskartonplatten, 2 x 2 x 12,5 mm	37,2
■ C-Profile, Stahl verzinkt, 75 mm	1,6	■ C-Profile, Stahl verzinkt, 75 mm	1,6
■ Dämmung, Steinwolle, 40 mm	1,4	■ Dämmung, Jutefaser, 40 mm	1,5
■ Gipsspachtel	1,8	■ Gipsspachtel	1,8
■ Anstrich, Kunststoffdispersion	0,7	■ Anstrich, Dispersionsfarbe mit biogenem Bindemittel	0,7
	<hr/> 42,7		<hr/> 42,8

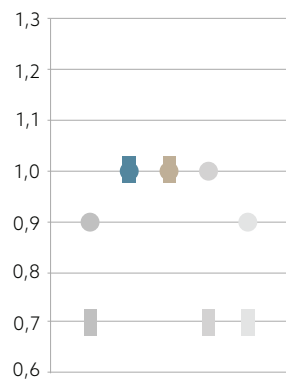
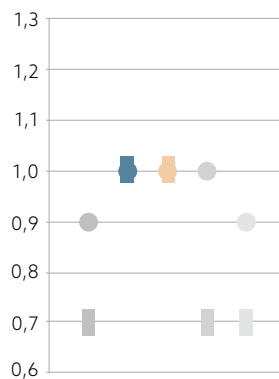
*Wertstoffe - Anteile nach Massen in %*



*Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)*



*Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □*



*Parameter der Kreislaufpotenziale der leichten Trennwände*

Bei den leichten Trennwänden wurden nur die Dämmung und der Anstrich hinsichtlich des Kreislaufpotenzials optimiert. Da die Jutefaser mit  $37 \text{ kg/m}^3$  eine leicht höhere Dichte als die Steinwolle ( $36 \text{ kg/m}^3$ ) aufweist, unterscheiden sich die Massen für  $1 \text{ m}^2$  Wandfläche geringfügig. In der UMD-Variante wird die Kunststoffdispersion durch eine Dispersion mit biogenem Bindemittel<sup>88</sup> ersetzt. Die Beschichtung geht insgesamt fünfmal in die Massenberechnung ein, weil der Anstrich voraussichtlich alle zehn Jahre erneuert werden wird (Nassabriebklasse 2 vorausgesetzt).

Der weitaus größte Anteil der Materialien für die leichten Trennwände und die daraus resultierenden Wertstoffe entfällt auf die Gipsbaustoffe (rund 87%). Nach dem Rückbau werden Gips und Karton mit anhaftender Dispersionsfarbe erst im Recyclingwerk mechanisch getrennt. Die Farbanteile müssen deshalb in der Kostenkalkulation mit dem Wert für Bau- und Abbruchabfälle aus Gips bepreist werden. **Hier ist vom Anwender des Urban Mining Index ein Mitdenken erforderlich: Sind die Wertstoffe nicht auf der Baustelle trennbar, sind sie preislich der maßgeblichen Wertstofffraktion zuzuordnen.**

Die Dämmstoffe können in beiden Varianten der Wertstofffraktion „Herstellerrücknahme“ zugeordnet werden, da sowohl sortenreine Steinwolle als auch sortenreine Jutefaserdämmung vom jeweiligen Marktführer<sup>89</sup> zurückgenommen wird.

Die zu erwartenden Verwertungserlöse und Entsorgungskosten sind in beiden Varianten gleich hoch. Da die Dämmstoffe von den Herstellern zurückgenommen werden, werden hierfür keine Entsorgungskosten angesetzt.

Die Gipskartonplatten haben entsprechend ihrem Massenanteil den größten Anteil an den zu erwartenden Verwertungserlösen und Entsorgungskosten. Der aktuelle durchschnittliche Annahmepreis für Gipsabfälle ist mit rund  $102 \text{ €/t}$  im Vergleich zu anderen mineralischen Bau- und Abbruchabfällen sehr hoch. Laut Auskunft von Bunzel/Fa. MUEG liegt der Preis, den ein Entsorger bei der Recyclinganlage in Sachsen bezahlt, mit  $39,75 \text{ €/t}$  nur geringfügig unterhalb des Annahmepreises der regionalen Deponie (etwas über  $40 \text{ €/t}$ ). Aufgrund des rückläufigen Angebots von REA-Gips ist mittel- bis langfristig mit einer steigenden Nachfrage nach RC-Gips zu rechnen. Möglicherweise unterscheiden Entsorger dann nicht nur den Preis für Beton und Mauerwerk nach Verschmutzungsgrad, sondern auch den für Gipsabfälle. **Solche abzusehenden Preisvorteile für das Recycling könnten im Urban Mining Index berücksichtigt werden, indem der Faktor Wert z.B. um eine Stufe (0,1) heraufgesetzt wird.**

In dieser Arbeit wird die Systematik jedoch zunächst beibehalten. Für die geplante Online-Anwendung kann eine solche Lösung diskutiert werden.

Aufgrund des gleichen Rückbauaufwands und Werts unterscheiden sich die Faktoren Arbeit und Wert der Varianten der leichten Trennwände nicht.

88 Dispersionsfarbe: Auro AG, Bindemittel aus Pflanzenalkoholester [221].

89 Steinwolle: Deutsche Rockwool GmbH & Co.KG [222].  
Jutefaserdämmung: Thermo Natur GmbH & Co.KG [223].

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

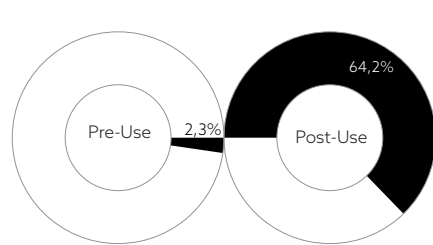
## Ursprüngliche Planung

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use		
		sd	ud		
Gipskartonplatten	37,2	DC2,0	rc99	d	
C-Profile, Stahl verzinkt	1,6	RC40	rc95	rc	
Dämmung, Steinwolle	1,4	RC24,6	rc97	d	
Gipsspachtel	1,8	PR	rc99	d	
Dispersionsfarbe	0,7	PR	en <sub>f</sub>	d	
<b>Gesamt</b>	<b>42,7</b>				

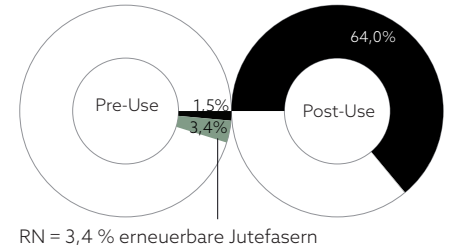
## Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use	Post-Use		
		sd	ud		
Gipskartonplatten,	37,2	DC2,0	rc99	d	
C-Profile, Stahl verzinkt	1,6	RC40	rc95	rc	
Dämmung, Jutefaser	1,5	RN0 97+	rc88	en <sub>r</sub>	
		DC88			
Gipsspachtel	1,8	PR	rc99	d	
Dispersionsfarbe	0,7	PR	en <sub>f</sub>	d	
<b>Gesamt</b>	<b>42,8</b>				

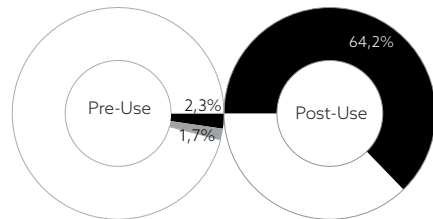
## Kreislaufpotenziale



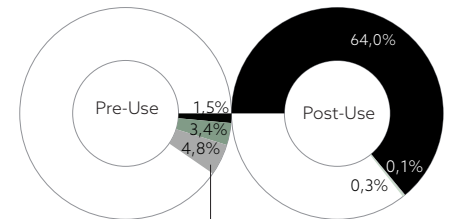
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	2,3%	64,2%	66,5%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	4,9%	64,0%	68,9%

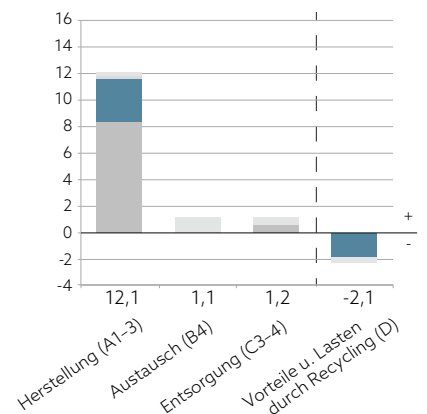
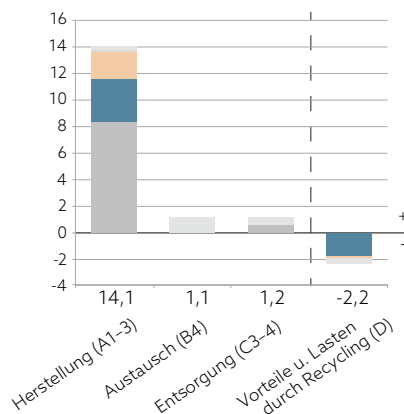


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	4,0%	64,2%	68,2%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	9,7%	64,4%	74,1%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



### Kreislaufpotenziale der leichten Trennwände

Auch hinsichtlich ihrer Kreislaufpotenziale unterscheiden sich die Varianten der leichten Trennwände nur geringfügig.

Die Ergebnisse werden bestimmt durch die großen Massen der Gipskartonplatten, die zu 98% aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen bzw. Nebenprodukten (REA-Gips) bestehen. In der Pre-Use-Phase ist das Closed-Loop-Potenzial deshalb in beiden Varianten gering (2,3% und 4,9%). In der ursprünglichen Variante fließen nur die Sekundärrohstoffanteile der C-Profile und der Steinwolle in das CLP ein.

In der Post-Use-Phase entfallen in beiden Varianten ca. 54,4% der wiederverwertbaren Materialien (rc) auf die Gipskartonplatten (Massenanteil 87,2% x MLP 99% x Faktor Arbeit 0,9 x Faktor Wert 0,7 = 54,4%).

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Optimierung fast nur auf die Dämmung bezieht, wird jedoch ein Aspekt umso deutlicher: die **Kaskadennutzung** der Jutefasern in der Urban-Mining-Design-Variante. Die Dämmung besteht zu ca. 97% aus erneuerbaren Rohstoffen (88% Jutefasern und 9% biopolymere Stützfasern), die im Closed-Loop-Potenzial der Pre-Use-Phase abgebildet werden. Die Jutefasern sind jedoch nicht nur erneuerbar, sondern werden im Rahmen einer Kaskadennutzung aus bereits gebrauchten Kakaosäcken gewonnen. **Der Anteil gebrauchter Rohstoffe (hier 88%) kann zusätzlich in der Pre-Use-Phase des Loop-Potenzials als weiterverwertete Rohstoffe<sup>90</sup> abgebildet werden und gleicht so den Primärrohstoffeinsatz bei anderen Baustoffen aus** (s. Seite 177).

In der Post-Use-Phase ist das Closed-Loop-Potenzial der UMD-Variante mit 64% geringfügig kleiner als das der konventionellen Konstruktion mit 64,2%. Dies liegt am geringeren MLP der Jutedämmung (88% gegenüber 97% bei der Steinwolle). Geht man nicht von Herstellerrücknahme, sondern von Kompostierung aus, könnten 100% im Naturkreislauf wiederverwertet werden. Jedoch ist der Annahmepreis für biologische Faserstoffe derzeit (noch) so hoch, dass sich der geringere Faktor Wert ( $f_v$  0,7 x 100% Kompostierung) negativer auswirken würde als der Weg über das Herstellerrecycling ( $f_v$  1,0 x 88% MLP).

Das Loop-Potenzial steigt post-use von 64,2% auf 64,4%. Neben dem Anteil der Jutedämmung, der durch Herstellerrücknahme im geschlossenen Kreislauf geführt wird, kommt hier noch der Anteil hinzu, für den das übliche EoL-Szenario energetische Verwertung prognostiziert wird (12% des Dämmstoffs = 0,4% der Gesamtmasse). Davon sind 9% nachwachsend (= 0,3% der Gesamtmasse), während 3% (Soda) als Schlacke weiterverwertet werden (= 0,1% der Gesamtmasse).

### Treibhauspotenziale der leichten Trennwände

Die Auswirkung des Urban Mining Designs auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck lässt sich nicht bemessen, da für die Jutefaserdämmung der UMD-Variante keine (vergleichbaren) Ökobilanzdaten vorliegen. Wie in Kapitel 8 auf Seite 215 bereits erläutert, dürfte der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck jedoch gering sein, da es sich um gebrauchte Jutefasern handelt.

#### Exkurs:

Würde die gesamte Konstruktion rein theoretisch nur aus erneuerbaren und zugleich gebrauchten Rohstoffen bestehen, wäre die Kaskadennutzung der erneuerbaren Rohstoffe nicht abbildbar, da ein Kreislaufpotenzial von 100% in der Pre-use-Phase überschritten würde und bei 100% „abgeschnitten“ wird. Die Kaskadennutzung kann jedoch einen Einsatz nicht erneuerbarer Primärrohstoffe in anderen Bauteilschichten ausgleichen, zumal es unrealistisch ist, dass ein Bauteil nur aus erneuerbaren und zugleich weiterverwerteten Rohstoffen besteht.

90 Der Hersteller deutet die Verwertung von alten Kakaosäcken als sogenanntes Upcycling, also als Verwertung auf höherem Niveau gegenüber dem Ausgangsprodukt. Dem wird hier nicht entsprochen. Da die Jutefasern (ähnlich wie Holzfasern) bei dem Verwertungsprozess kürzer werden, handelt es sich nach Auffassung der Verfasserin um eine Verwertung mit Qualitätsverlust (Weiterverwertung).

**Geschossdecken**

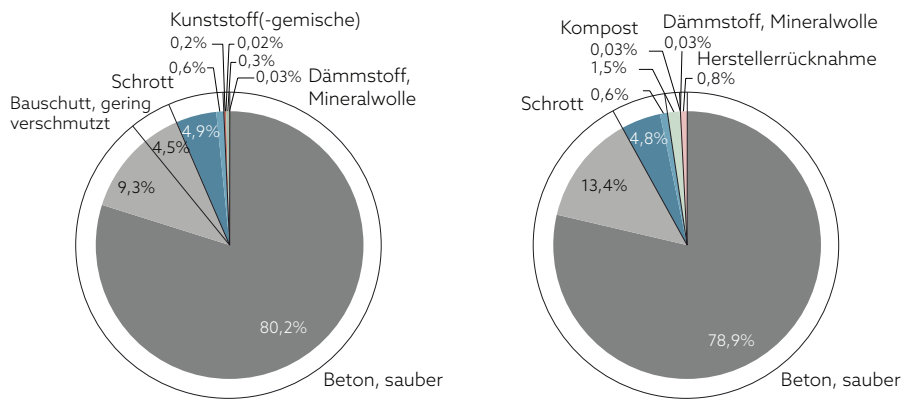
**Ursprüngliche Planung**

**Urban Mining Design**

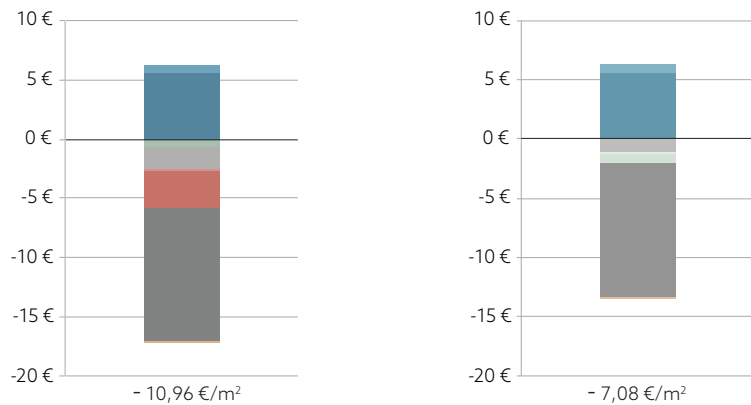
*Materialien und Massen im Lebenszyklus*

	[kg/m <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>2</sup> ]
Linoleum, verklebt, (nur in Bürobereichen), 3 mm	3,0	Teppichfliesen, lose verlegt, (nur in Bürobereichen), 6 mm	7,0
Zementestrich/Terrazzo, 77 - 80 mm	118,5	Zementestrich/Terrazzo, 74 - 80 mm	117,0
Trennlage, PE-Folie	0,2	Trennlage, Graupappe	0,2
Trittschalldämmung, EPS, 80 mm	2,1	Trittschalldämmung, Holzweichfaser, ligningebunden, 80 mm	12,8
Beton C 25/30, 280 mm	690,7	Beton C 25/30, 280 mm	690,7
Bewehrungsstahl	41,9	Bewehrungsstahl	41,9
Akustikauflage, Glaswolle, 50 mm	0,3	Akustikauflage, Glaswolle, 50 mm	0,3
Heiz-/Kühlsegel, verzinktes Stahlblech	5,0	Heiz-/Kühlsegel, verzinktes Stahlblech	5,0
	<b>861,7</b>		<b>875,0</b>

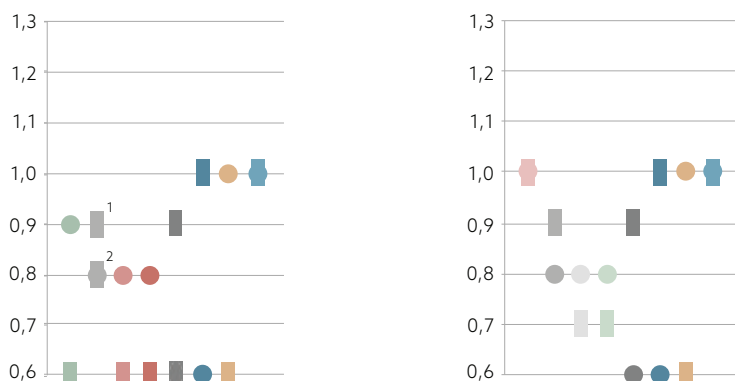
*Wertstoffe - Anteile nach Massen in %*



*Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)*



*Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □*



Legende Faktor Arbeit und Wert  
 1 Anteil Estrich sauber (Terrazzo)  
 2 Anteil Estrich mit Restanhaftungen (Kleber)  
 Der Faktor Arbeit ist gleich, da der Aufwand zur Entfernung des Linoleum dem Linoleum „angelastet“ wird.

### 9.2.6. Geschossdecken

Im Neubau des Rathauses Korbach wird es drei Geschossdecken geben: auf dem Sockelgeschoss, auf dem Erdgeschoss und auf dem 1. Obergeschoss. Der grundsätzliche Aufbau ist in Abbildung A 9.15 (Seite 246) dargestellt. Ursprünglich war für die Bürobereiche aus Gründen der Pflegeleichtigkeit ein Linoleumboden geplant und für die öffentlichen Bereiche Terrazzo oder Natursteinfliesen. Da der Linoleumbelag stuhlrollengeeignet verklebt werden müsste und ein schwimmend verlegter Linoleumboden (auf Trägerplatte) nicht gewünscht ist, wurden von der Verfasserin in der Urban-Mining-Design-Variante lose verlegte, recycelbare Teppichfliesen vorgeschlagen. Eine Entscheidung des Bauherrn steht noch aus.

Da ein Oberbodenbelag nur für ca. ein Drittel der Flächen vorgesehen ist, wurden die Massen in den nebenstehend beschriebenen Varianten auf 1 m<sup>2</sup> umgerechnet. Für die restlichen zwei Drittel wurde in beiden Varianten ein Terrazzo (bzw. einfach geschliffener Estrich für Technikflächen im Dachgeschoss) angenommen.<sup>91</sup>

In der UMD-Variante ersetzt eine Trennlage aus Graupappe und eine Trittschalldämmung aus ligningebundenen Holzweichfaserplatten die ursprünglich vorgesehenen Kunststoffe (Polyethylenfolie und Polystyrol).

#### *Parameter der Kreislaufpotenziale der Deckenvarianten*

Die Gesamtmasse der Materialien ist in der Urban-Mining-Design-Variante etwas größer, was auf einen viermaligen Austausch der Teppichfliesen (gegenüber einem zweimaligen Austausch des Linoleums) und die höhere Dichte der Holzweichfaserplatten zurückzuführen ist.

Betrachtet man die resultierenden Wertstoffe, überwiegen in beiden Varianten mineralische Materialien, wobei in der Ursprungsvariante ein Teil des Zementestrichs aufgrund von zu erwartenden Kleberrestanhaftungen als gering verschmutzter Bauschutt eingestuft wird.

Die Holzweichfaserplatten der UMD-Variante und die Graupappe können am Ende der Nutzungsdauer kompostiert werden, da sie keine chemischen Bindemittel, sondern nur holzeigenes Lignin enthalten.

Die Teppichfliesen werden vom Hersteller<sup>92</sup> zurückgenommen, ein Recyclingverfahren ist etabliert.

Die Entsorgungskosten können durch das Urban Mining Design nach heutigem Stand um ca. 35% verringert werden. Trotz der größeren Massen verursacht die Trittschalldämmung aus Holzweichfaser nur ein Viertel der Entsorgungskosten des Polystyrols. Ebenso ist die Abgabe des sauberen Estrichs um 60% günstiger gegenüber der Entsorgung als gering verschmutzter Bauschutt.

Dementsprechend höher sind in der UMD-Variante die Faktoren für den Parameter Wert der Bodenbeläge. Für die Teppichfliesen beträgt der Faktor Wert aufgrund des Herstellerrücknahmeverfahrens 1,0. Da die Rückführung nur bei geringen Transportkosten durchgeführt wird, organisiert der Hersteller laut EPD den umgekehrten logistischen Prozess. **Auf die Problematik des Transports im Zusammenhang mit der Herstellerrücknahme wird im Fazit noch einmal eingegangen (s. Seite 296).**

91 In den Sanitärbereichen sollen Fliesen verlegt werden. Von der Verfasserin wurde eine Verlegung im Dickbett mit rein mineralischem Mörtel (ohne Kunststoffmodifikation) vorgeschlagen. Die Flächen wurden aus Vereinfachungsgründen mit Blick auf den geringen Anteil (3% der Deckenflächen) in der Berechnung vernachlässigt.

92 Desso B.V., Niederlande [224].

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

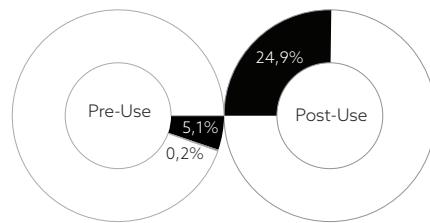
## Ursprüngliche Planung

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use		Post-Use	
		sd	ud	sd	ud
Linoleum	3,0	RC10 + en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>
Zementestrich/Terrazzo	118,5	PR	dc	d	d
Trennlagen, PE-Folien	0,2	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
EPS-Dämmung	2,1	PR	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>
Beton					
Gesteinskörnung	560,0	PR	rc39	rc39	dc
CEM II	81,7	PR	"	"	"
Wasser	49,0	PR	"	"	"
Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-	-
Bewehrungsstahl	41,9	RC100	rc100	rc100	rc
Akustikaufkl. Glaswolle	0,3	RC80	rc80	rc80	d
Heiz-/Kühlsegel, Stahl	5,0	RC30	rc95	rc95	rc
<b>Gesamt</b>	<b>861,7</b>				

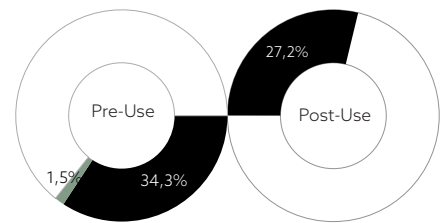
## Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ]	Pre-Use		Post-Use	
		sd	ud	sd	ud
Teppichfliesen	7,0	RC57,9	rc70	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>
Zementestrich/Terraz.	117,0	PR	rc39	dc	dc
Graupappe	0,2	DC100	rc100c	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>
Holzfaserdämmung	12,8	RN0 100	rc100c	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>
Beton					
Gesteinskörnung	560,0	RC45	rc39	dc	dc
CEM II	81,7	PR	"	"	"
Wasser	49,0	PR	"	"	"
Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-	-
Bewehrungsstahl	41,9	RC100	rc100	rc	rc
Glaswollaufklage	0,3	RC80	rc80	d	d
Heiz-/Kühlsegel, Stahl	5,0	RC30	rc95	rc	rc
<b>Gesamt</b>	<b>875,0</b>				

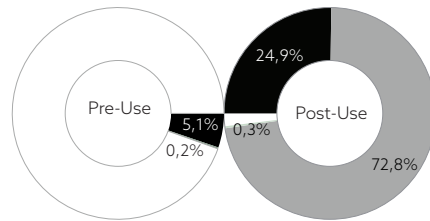
## Kreislaufpotenziale



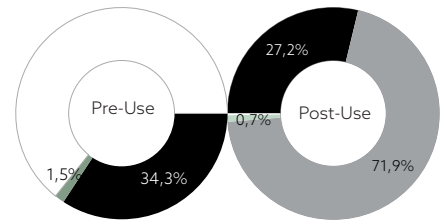
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,3%	24,9%	30,2%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	35,8%	27,2%	63,0%

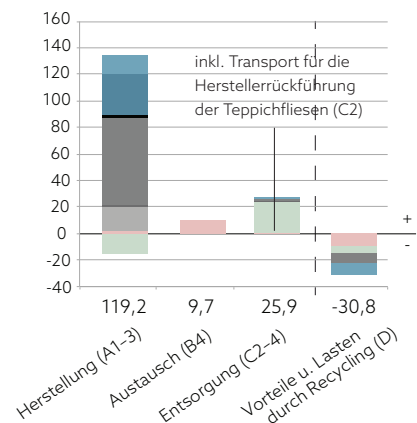
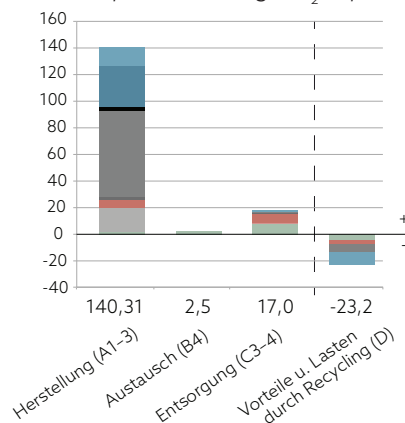


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	5,3%	98,0%	103,3%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	35,8%	99,8%	135,6%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



### Kreislaufpotenziale der Dachvarianten

Das Closed-Loop-Potenzial steigt durch das Urban Mining Design von 30,2% auf 63,0%. Dabei liegt das größte Optimierungspotenzial in der Pre-Use-Phase durch Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung für die Betondecken (28,8%). Die restlichen Anteile wiederverwerteter Materialien entfallen auf die Metalle (ca. 5%) und die Teppichfliesen (0,5%). Aber auch der Einsatz erneuerbarer Rohstoffe für die Trittschalldämmung trägt zu einer Steigerung des Closed-Loop- und des Loop-Potenzials bei (Anteil RN 1,5% statt 0,2%).

In der Post-Use-Phase steigt das Closed-Loop-Potenzial nur geringfügig von 24,9% auf 27,2%. Die wiederverwertbaren (oder kompostierbaren) Materialien haben hieran folgende Anteile:

Material	Ursprüngliche Planung	Urban Mining Design
Oberbodenbelag (Lino/Teppich)	0,00%	(Hersteller-rc) 0,56%
Estrich	2,61%	3,75%
Trittschalldämmung (EPS/Holzfasern)	0,00%	0,82%
Beton	16,88%	16,63%
Bewehrungsstahl	4,87%	4,79%
Heiz-/Kühldecke (Blech)	0,58%	0,57%
Summe	24,94%	27,12%

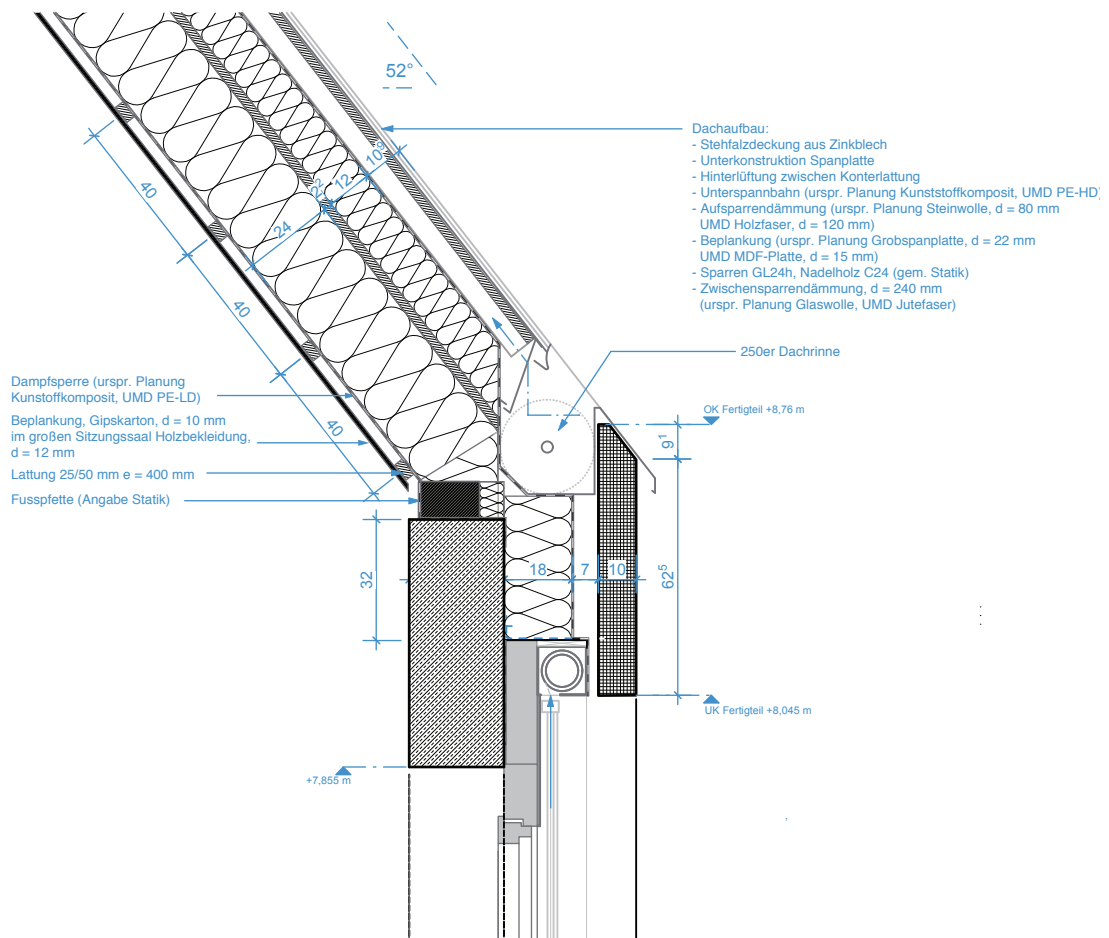
Das Loop-Potenzial steigt post-use von 98,0% auf fast 100%. Das übliche EoL-Szenario der Trittschalldämmung steigert das Loop-Potenzial um 0,4 Prozentpunkte, da die energetisch verwertbaren Wertstoffe im Gegensatz zur EPS-Dämmung erneuerbar sind (en<sub>r</sub>). Der Anteil weiterverwertbarer Wertstoffe sinkt geringfügig von 72,8% auf 71,9%. Das liegt jedoch zum einen daran, dass mehr Estrich hochwertig recycelt werden kann und deshalb in den wiederverwertbaren Wertstoffen enthalten ist; zum anderen ist der Anteil des weiterverwertbaren Betons geringfügig kleiner aufgrund der leicht höheren Gesamtmassen.

### Treibhauspotenziale

Durch das Urban Mining Design können ca. 15% der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen (Module A1–3) eingespart werden. Den größten Anteil hieran hat die Trittschalldämmung aus Holzweichfaser durch die Speicherung von CO<sub>2</sub> während der Wachstumsphase. Allerdings wird der gespeicherte Kohlenstoff in der Entsorgungsphase durch die Verbrennung wieder freigesetzt.

Der Bodenbelag aus Teppichfliesen verursacht über den Lebenszyklus (Module A–C) aufgrund des viermaligen Austausches höhere Emissionen als der Linoleumbelag (12,5 statt 11,4 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv.). Rechnet man jedoch die Gutschriften im Modul D für die insgesamt fünffache Verwertung dagegen (77,7% stofflich und 22,3% energetisch), ergibt sich Cradle to Cradle ein geringer CO<sub>2</sub>-Footprint (3,3 kg für die Teppichfliesen und 7,2 kg für das Linoleum). Selbst wenn der vom Hersteller angegebene durchschnittliche Transportweg von 700 km berücksichtigt wird, steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen nur um 0,35 kg/m<sup>2</sup>.

Im Gesamtergebnis sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Gesamtkonstruktion bei der UMD-Variante Cradle to Cradle um ca. 9,3% geringer (124,0 statt 136,7 kg).



A 9.18

### 9.2.7. Dach

Das Dach für den Neubau des Rathauses Korbach wurde bereits im Wettbewerb als geneigtes Dach mit Zinkdeckung entworfen. Es kann im Großen und Ganzen bereits als Closed-Loop-Konstruktion bezeichnet werden, da sowohl das Dachtragwerk aus heimischem Nadelholz als auch die Deckung aus dem endlos recycelbaren Werkstoff Zink problemlos in geschlossenen Kreisläufen geführt werden können. Durch die Verfalzung des Zinkblechs und die Befestigung mittels Haften entsteht eine homogene Materialverbindung (vgl. Kapitel 6, Seite 126).

Auf der Innenseite wird das Dach mit Gipskartonplatten bekleidet, nur im Bereich des großen Sitzungssaals ist eine Holzbekleidung vorgesehen (23% der inneren Dachflächen). Gegebenenfalls muss die Holzbekleidung im Ratssaal noch akustisch optimiert werden, sodass eine Akustikdecke zur Ausführung kommen könnte. Für die im Folgenden dargestellten Berechnungen wurde zunächst die im Leitdetail dargestellte Massivholzverschalung angesetzt.

Optimierungen wären im Bereich der Dämmstoffe wünschenswert. Vom Brandschutzplaner ist noch zu prüfen, ob für die Zwischen- und Aufsparrendämmung Holzweichfasern oder andere biologische Faserstoffe brandschutztechnisch erlaubt sind. In den folgenden Vergleichsanalysen wird in der ursprünglichen Planung von Glaswolle als Zwischensparrendämmung und Steinwolle als feste Aufsparrendämmung ausgegangen. In der Urban-Mining-Design-Variante wird die Aufsparrendämmung aus Holzweichfaserplatten und die Zwischensparrendämmung aus recycel-

ten Jutefasern geplant. Sofern die Holzfaserdämmplatten in drei Schichten aufgedübelt werden, können kompostierbare Dämmplatten verwendet werden. Die im Nassverfahren hergestellten Platten eines deutschen Herstellers<sup>93</sup> werden bis zu einer Stärke von 40 mm nur mit holzeigenem Lignin gebunden.

Da die Dämmstoffe der ursprünglichen und der UMD-Variante unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen, wurde die Dämmstärke der Aufsparrendämmung entsprechend angepasst<sup>94</sup>, sodass beide Varianten nahezu den gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen (U-Wert 0,115 W/m<sup>2</sup>K bzw. 0,117 für die UMD-Variante). Die Vorgaben des Energieeinsparnachweises von EFG-Ingenieure [226] werden damit erfüllt (U-Wert max. 0,164 W/m<sup>2</sup>K).

Somit weisen beide Varianten auch den gleichen Energiebedarf in der Heizperiode auf. Geringe Unterschiede werden sich allerdings beim Kühlenergiebedarf ergeben. Da die Holzfaserdämmung aufgrund der höheren Dichte (und Dimensionierung) den sommerlichen Wärmeschutz besser erfüllt als die Steinwolle, wird die Urban-Mining-Design-Variante einen leicht geringeren Kühlenergiebedarf aufweisen als die ursprüngliche Variante.

Für die Unterspannbahn und die Dampfbremse werden in der ursprünglichen Variante konventionelle Kunststoffkompositfolien angenommen. Für die Urban-Mining-Design-Variante wird eine Polyethylenfolie hoher Dichte (PE-HD) als Unterspannbahn und eine Polyethylenfolie geringer Dichte (PE-LD) als Dampfbremse von der Promovendin empfohlen. Da die UMD-Variante den Feuchteschutz mit den geplanten alternativen Dämmstoffen und der PE-LD-Dampfbremse nicht erfüllen würde, wurde die Grobspanplatte zur Beplankung gegen eine dampfdiffusionsoffene MDF-Platte ausgetauscht.

Das Leitdetail für den Anschluss des Dachs an die Außenwand/Fassade wird hier nur in einer einzigen Variante zeichnerisch dargestellt, da nur die Materialwahl variiert wurde. Die verschiedenen Dachaufbauten und Mengenermittlungen sind den nachfolgenden Legenden zu entnehmen.

93 Udi Dämmsysteme GmbH, Chemnitz, Produkt Uditherm SK.

94 Die Dimensionierung der Dämmstärken und der Nachweis des Feuchteschutzes wurde mit dem U-Wert-Rechner Ubakus von Plag [225] durchgeführt.

## Dach

Hinweis: in der nebenstehenden Aufstellung der Materialien und Massen bezieht sich die Gipskartonbekleidung nur auf 77% der Dachbekleidungen und die Holzverschalung nur auf 23% der Dachbekleidungen. Die Massen wurden auf 1m<sup>2</sup> Dachfläche umgerechnet, um eine zweifache Darstellung aller Grafiken für das Dach zu vermeiden.

### Ursprüngliche Planung

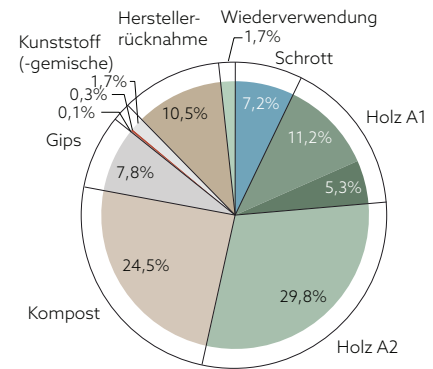
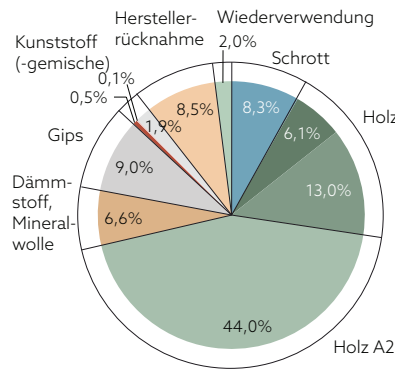
#### Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m <sup>2</sup> ]
Stehfalz-Zinkdeckung, 0,7 mm	5,6
Spanplatte, 25 und 22 mm	29,8
Lattungen, Fichte/Tanne, 60/40 und 50/25 mm	4,1
Unterspannbahn, Kunststoffmixfolie	0,3
Dämmung, Steinwolle WLG 035, 80 mm	5,8
Dachtragwerk KVH 75/240 mm, e 930 mm	8,8
Zwischensparrendämmung, Glaswolle WLG 035, 240 mm	4,5
Dampfbremse, PE-LD	0,1
Gipskartonplatten, 10 mm	6,1
Anstrich, Kunststoffdispersion	1,3
Holzverschalung (Ratssaal), Eiche, 12 mm	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>67,6</b>

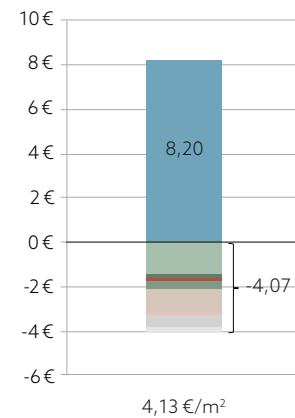
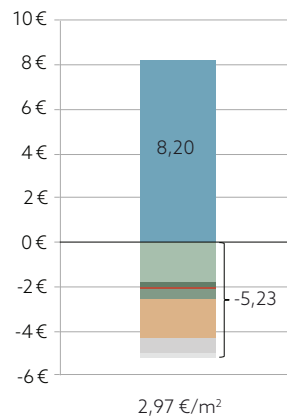
### Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ]
Stehfalz-Zinkdeckung, 0,7 mm	5,6
Spanplatte, 25 mm und MDF 15 mm	23,3
Lattungen, Fichte/Tanne, 60/40 und 50/25 mm	4,1
Unterspannbahn, PE-HD	0,1
Dämmung, Holzfaser WLG 045, 3x 40 mm	19,2
Dachtragwerk KVH 75/240 mm, e 930 mm	8,8
Zwischensparrendämmung, Jutefaser WLG 042, 240 mm	8,3
Dampfbremse, PE-LD	0,2
Gipskartonplatten, 10 mm	6,1
Anstrich, Dispersion mit biogenem Bindem.	1,3
Holzverschalung (Ratssaal), Eiche, 12 mm	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>78,3</b>

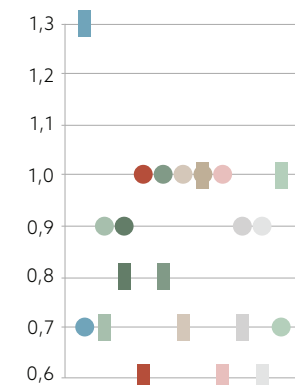
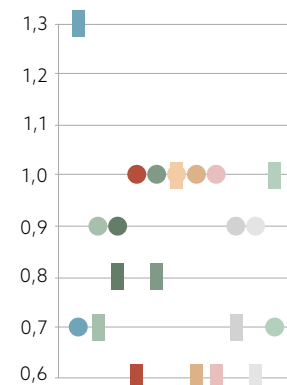
### Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



### Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



### Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



*Parameter der Kreislaufpotenziale der Dachvarianten*

Das Satteldach des neuen Rathausanbaus ist in beiden Varianten eine relativ leichte Konstruktion. Das geringe Gewicht resultiert aus dem Verzicht auf schwere mineralische Baustoffe. Selbst die Deckung aus Zinkblech – ein Metall mit hoher Dichte – hat im Vergleich zu einer massiven Deckung (vgl. konventionelle Dachkonstruktion in Kapitel 8 auf Seite 220) eine geringe Masse, da das Blech mit einer Materialstärke von 0,7 mm auskommt.

Die Dämmung aus Holzweichfaserplatten führt in der Urban-Mining-Design-Variante (ähnlich wie bei den Geschossdecken) zu einem höheren Materialeinsatz – gemessen am Gewicht. Die Zwischensparrendämmung aus Jutefasern ist fast doppelt so schwer wie diejenige aus Glaswolle. Die Masse kommt jedoch, wie bereits erwähnt, dem sommerlichen Wärmeschutz entgegen.<sup>95</sup>

Der Anstrich der Gipskartonbekleidung mit Dispersionsfarbe muss im angesetzten Lebenszyklus von 50 Jahren neunmal erneuert werden, was den relativ hohen Anteil der Farbe an den Materialmassen erklärt.

Aufgrund der unterschiedlichen Funktionen, die ein Dach zu erfüllen hat, besteht es in beiden Varianten aus einer Vielzahl von Schichten. Dementsprechend hoch ist in beiden Varianten die Materialvielfalt und die Anzahl der Wertstoffe am Ende der Nutzungsdauer.

Die Dämmmaterialien haben nach den beplankenden Holzwerkstoffen den größten Anteil an den Wertstoffen. In beiden Varianten werden die Dämmstoffe zum Teil von den marktführenden Herstellern zurückgenommen, um sie wieder in den Produktionskreislauf zurückzuführen: In der Ursprungsvariante betrifft dies die Steinwolle, in der UMD-Variante die Jutefaserdämmung.<sup>96</sup>

Die Holzverschalung aus hochwertigem Eichenholz wird als wiederverwendbar eingestuft, da sie zerstörungsfrei demontiert werden kann und auch eine Nachfrage nach alten Eichenholzbrettern existiert.

Das Dach kann in beiden Varianten als Wertstoffdepot bezeichnet werden. Der hohe Schrottwert der Zinkdeckung führt dazu, dass die Verwertungserlöse jeweils die Entsorgungskosten übersteigen.

Aufgrund der Herstellerrücknahme werden für die Steinwolle in der Ursprungsvariante und für die Jutefaserdämmung in der UMD-Variante keine Kosten angesetzt. Die Ersparnisse können jedoch durch die Transportkosten zum Hersteller wieder verloren gehen, je nachdem wie weit das Material zu transportieren ist.

Insgesamt kann für das Urban-Mining-Design-Dach ein leicht höherer Erlös erzielt werden als für die Dachkonstruktion nach der ursprünglichen Planung. Dies liegt zum einen an der geringeren Masse der MDF-Platte gegenüber der Spanplatte; zum anderen ist die Kompostierung der Holzweichfaserdämmung günstiger als die Entsorgung der Glaswolle. Der hohe Schrottwert des Zinkblechs führt zu einem sehr hohen Faktor Wert von 1,3. Der Rückbauaufwand ist in beiden Varianten gleich niedrig, dementsprechend hoch sind die Faktoren für den Parameter Arbeit.

95 Gegebenenfalls muss die Statik der Dachsparren noch geändert werden.

96 Vgl. Kapitel 9.2.5, Seite 265.

## Legende Kreislaufpotenziale

### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (d<sub>cr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

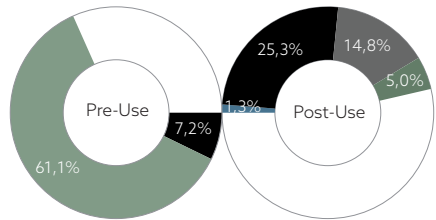
## Ursprüngliche Planung

	[kg/m <sup>2</sup> ] Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Zinkdeckung	5,6 RC30	rc100rc		
Spanplatten	29,8 RN0 91+ DC18	dc en <sub>r</sub>		
Lattungen	4,1 RN100 0	dr <sub>cr</sub> en <sub>r</sub>		
Unterspannbahn	0,3 PR	en <sub>f</sub> en <sub>f</sub>		
Steinwolle	5,8 RC24,6	rc97 d		
Dachtragwerk KVH	8,8 RN100 0	dr <sub>cr</sub> en <sub>r</sub>		
Glaswolle	4,5 RC40	rc80 d		
Dampfbremse, PE-LD	0,2 PR	en <sub>f</sub> en <sub>f</sub>		
Gipskartonplatten	6,1 RC2	rc99 d		
Dispersionsfarbe	1,3 PR	en <sub>f</sub> d		
Bekleidung, Eiche	1,3 RN100 0	ru en <sub>cr</sub>		
<b>Gesamt</b>	<b>67,6</b>			

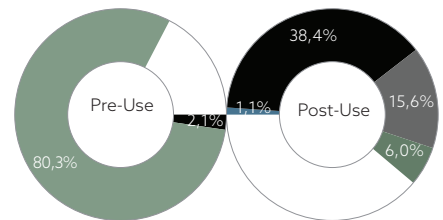
## Urban Mining Design

	[kg/m <sup>2</sup> ] Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Stehfalz-Zinkdeckung	5,6 RC30	rc100rc		
Spanplatte	15,8 RN0 91+ DC18	dc en <sub>r</sub>		
Lattungen	4,1 RN100 0	dr <sub>cr</sub> en <sub>r</sub>		
Unterspannbahn	0,1 PR	en <sub>f</sub> en <sub>f</sub>		
Holzfaserdämmung	19,2 RN0 100	rc100c en <sub>r</sub>		
MDF	7,5 RN47 47	dr <sub>cr</sub> en <sub>r</sub>		
Dachtragwerk KVH	8,8 RN100 0	dr <sub>cr</sub> en <sub>r</sub>		
Jutedämmung	8,3 RN0 91+ DC18	rc88 en <sub>r</sub>		
Dampfbremse, PE-LD	0,2 PR	en <sub>f</sub> en <sub>f</sub>		
Gipskartonplatten	6,1 RC2	rc99 d		
Dispersionsfarbe	1,3 PR	en <sub>f</sub> d		
Bekleidung, Eiche	1,3 RN100 0	ru en <sub>cr</sub>		
<b>Gesamt</b>	<b>78,3</b>			

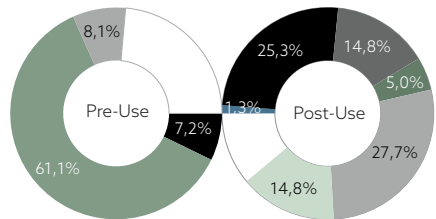
## Kreislaufpotenziale



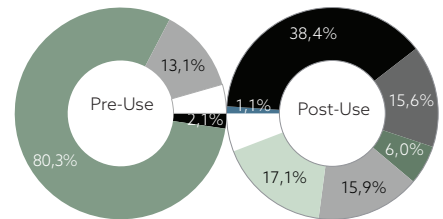
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	68,3%	46,4%	114,7%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	82,4%	61,1%	143,5%

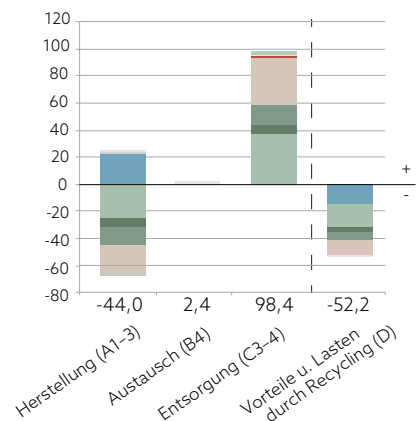
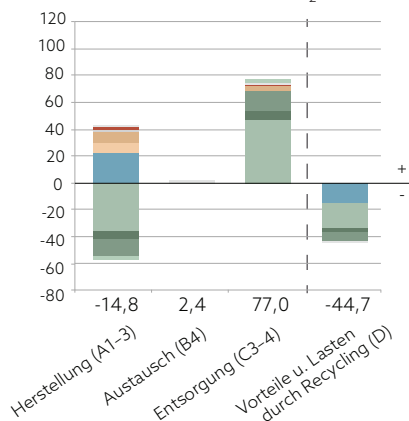


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	76,4%	88,9%	165,3%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	95,5%	94,1%	189,6%

## Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>



### *Kreislaufpotenziale der Dachvarianten*

Das Dach weist von allen Bauteilen des Rathauses Korbach in beiden Varianten die höchsten Kreislaufpotenziale aus. In der Pre-Use-Phase sticht der hohe Anteil erneuerbarer Rohstoffe hervor. In der Urban-Mining-Design-Variante wird deren Anteil durch den Einsatz der Holzfaserdämmung noch erhöht. In der ursprünglichen Planung ist dagegen der Anteil wiederverwerteter Materialien höher – aufgrund des Einsatzes von Glaswolle, die zu 40%<sup>97</sup> aus Sekundärmaterial (Scherben) hergestellt wird und von Steinwolle, deren Sekundärrohstoffanteil 24,6%<sup>98</sup> beträgt. In der Post-Use-Phase steigt das Closed-Loop-Potenzial durch das Urban Mining Design von 46,4% auf 61,1%. Dies ist hauptsächlich auf die Holzfaserdämmung zurückzuführen, die unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert zu 70% im hochwertigen EoL-Szenario als biologischer Faserstoff (Kompost) den wiederverwertbaren Wertstoffen zugeordnet wird. Die restlichen 30% gehen in das übliche EoL-Szenario energetische Verwertbarkeit nachwachsender Rohstoffe – und damit in das Loop-Potenzial – ein. Auch die Optimierung der Zwischensparrendämmung steigert das Closed-Loop-Potenzial. Aufgrund der Herstellerrücknahme und des Material-Loop-Potenzials wird für 88% der Jutefaserdämmung das hochwertige EoL-Szenario Wiederverwertung<sup>99</sup> prognostiziert.

Betrachtet man das Loop-Potenzial, fällt auf, dass in der Pre-Use-Phase der Anteil weiterverwerteter Materialien in der UMD-Variante um 5% höher ist. Dies ist ebenfalls auf die Jutefaserdämmung zurückzuführen, die aus weiterverwerteten Kakaosäcken hergestellt wird (s. Seite 267). In der Post-Use-Phase steigert das Urban Mining Design das Loop-Potenzial von 88,9 auf 94,1%. Der Anteil der Materialien, die in offenen Kreisläufen weitergeführt werden können, sinkt zwar gegenüber der Ursprungsvariante, jedoch zugunsten der Wertstoffe, die in geschlossene Kreisläufe zurückgeführt werden können. Dies liegt am Austausch der aussteifenden Spanplatte gegen eine MDF-Platte, die zu 47%<sup>100</sup> FSC-zertifiziertes Holz enthält.

### *Treibhauspotenzial der Dachvarianten*

Für die Urban-Mining-Design-Variante wird über den Lebenszyklus (Module A-C) ein um 12% geringeres Treibhauspotenzial ausgewiesen. Die Berechnung ist jedoch etwas ungenau, da für die Jutefaserdämmung aus weiterverwerteten Kakaosäcken keine (vergleichbaren) Ökobilanzdaten vorliegen. Wie in Kapitel 8 auf Seite 215 bereits erläutert, dürfte der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck jedoch gering sein. Die Aufsparrendämmung der UMD-Variante speichert in der Wachstumsphase (Modul A) Kohlenstoff, setzt diesen bei der Entsorgung durch Verbrennung aber wieder frei. Über den Lebenszyklus (Module A-C) ist der CO<sub>2</sub>-Footprint der UMD-Variante sogar höher (12,7 kg gegenüber 7,4 kg in der Ursprungsvariante). Für den Energieexport in den nächsten Lebenszyklus erhält die Holzfaserdämmung jedoch eine Gutschrift von 10 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>.

97 Quelle: Umweltproduktdeklaration des deutschen Marktführers Isover [227].

98 Steinwolle: Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG.

99 Die Jutefaserdämmung wird in der Post-Use-Phase nicht den weiter-, sondern den wiederverwertbaren Wertstoffen zugeordnet (obwohl die Fasern mit jedem Recycling an Qualität verlieren), weil die nicht mehr recycelbaren Fasern kompostiert und somit im natürlichen Kreislauf recycelt werden können.

100 MRC gemäß Atlas Recycling, Produkt Kronotec [228].

A	B	C	E	F	G	H	I	J	K
Massenermittlung auf Gebäudeebene					Qualitätsstufen Pre-Use				
KGR	Bauteil	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Masse an Materialien im Lebenszyklus pro m <sup>2</sup> [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse an Materialien im Lebenszyklus absolut [kg]	wieder- verwendete Materialien	wieder- verwertete Materialien	erneuerbare Primär- rohstoffe	weiter- verwertete Materialien	nicht erneuerbare Primär- rohstoffe
					RU [kg]	RC [kg]	RN [kg]	DC [kg]	PR [kg]
<b>Variante 1 ursprüngliche Planung</b>									
320	Gründung	1.349	1.911,1	2.578.451,9	0,0	138.765,2	7.528,5	0,0	2.432.158,1
330	Außenwände, erdberührt	348	669,4	233.073,8	0,0	11.510,0	0,0	0,0	221.563,8
	Außenwände	1.665	886,7	1.476.027,1	0,0	80.141,2	0,0	0,0	1.395.885,9
	Außenfenster	1.215	61,1	74.225,7	0,0	6.064,1	23.126,2	94,6	44.940,9
340	Innenwände, tragend	2.277	613,0	1.395.896,3	0,0	75.274,2	0,0	0,0	1.320.622,1
	Innenwände, nicht tragend	2.650	42,6	112.989,5	0,0	2.579,9	0,0	1.971,6	108.438,0
350	Decken	4.742	861,7	4.068.066,2	0,0	208.477,1	8.819,6	0,0	3.868.769,6
360	Dächer	2.678	67,6	181.149,1	0,0	13.075,9	110.719,4	14.674,4	42.679,5
	Summen	16.924		10.137.879,7	0,0	535.887,6	150.193,6	16.740,6	9.435.057,9
	Masse-Anteil auf Gebäudeebene				0,0%	5,3%	1,5%	0,2%	93,0%
<b>Variante 2 Urban Mining Design</b>									
320	Gründung	1.349	1.512,9	2.041.236,7	0,0	620.561,8	0,0	97.976,2	1.322.698,7
330	Außenwände, erdberührt	348	736,6	256.466,0	0,0	71.557,2	0,0	28.832,0	156.076,9
	Außenwände	1.665	883,7	1.470.966,6	0,0	511.139,9	0,0	0,0	959.826,7
	Außenfenster	1.215	63,3	76.894,7	0,0	10.130,9	26.168,6	94,6	41.308,9
340	Innenwände, tragend	2.277	613,0	1.395.896,3	0,0	549.926,3	0,0	0,0	845.970,0
	Innenwände, nicht tragend	2.650	42,7	113.095,5	0,0	1.641,2	3.804,3	5.423,0	102.227,1
350	Decken	4.742	875,0	4.148.937,3	0,0	1.421.324,7	60.693,8	1.096,3	2.665.822,6
360	Dächer	2.678	78,3	209.729,3	0,0	4.824,7	168.516,6	27.420,6	9.293,0
	Summen	16.924		9.711.873,3	0,0	3.189.972,8	259.183,3	160.842,6	6.101.874,7
	Masse-Anteil auf Gebäudeebene				0,0%	32,8%	2,7%	1,7%	62,8%

A 9.19 a

### 9.3. Bewertung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene – der Urban Mining Indicator

Um die Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene zu berechnen und daraus den Urban Mining Indicator für das Bauwerk abzuleiten, werden alle Bauteile in einer Aufstellung zusammengeführt. Das entwickelte Exceltool enthält hierfür ein separates Tabellenblatt „Gebäudebewertung“, in dem zwei verschiedene Varianten gegenübergestellt werden können.

Die Abbildungen A 9.19 a und b zeigen die Berechnungen zur Ermittlung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene anhand der in Kapitel 9.2 dargestellten Bauteilvarianten für das Modellprojekt Rathaus Korbach.

#### 9.3.1. Ermittlung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene

Zunächst werden die geplanten Flächen der Bauteile erfasst und mit ihrer zuvor ermittelten Gesamtmasse multipliziert. Durch Addition der Massen aller Bauteile ergibt sich die betrachtete Gesamtmasse auf Ebene des Gebäudes (s. Abb. A 9.19 a, Zeilen A–F).

Bauteile mit abweichendem Aufbau, aber relativ geringem Flächenanteil, beispielsweise die Decken gegen Außenluft im Eingangs- und Loggiabereich, wurden aus Vereinfachungsgründen in dieser Arbeit übermessen. Ebenso wurden der Einfachheit halber die Bruttoflächen zugrunde

A 9.19 Vergleichende Berechnung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene

- a Massenermittlung nach Bauteilen und Massen der Qualitätsstufen Pre-Use
- b Massen der Qualitätsstufen Post-Use
- c Kreislaufpotenziale auf Bauteil- und Gebäudeebene (ungewichtet)

M	N	O	P	Q	R	S	T
Qualitätsstufen Post-Use							
wieder- verwendbar	wieder- verwertbar	weiter- verwertbar zert. nachh. nachwachsend	energetisch verwertbar zert. nachh. nachwachsend	weiter- verwertbar	energetisch verwertbar nachwachsend	energetisch verwertbar fossil	Entsorgung/ Deponierung
ru [kg]	rc [kg]	dcrr [kg]	enrc [kg]	dc [kg]	enr [kg]	enf [kg]	d [kg]
170.594,2	434.449,1	0,0	0,0	1.522.005,5	8.742,8	22.824,2	419.836,1
0,0	11.510,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6.838,1	214.725,8
0,0	380.948,9	0,0	0,0	1.094.766,6	0,0	0,0	311,6
0,0	25.937,4	913,3	3.746,3	31.092,3	10.358,3	2.068,5	109,6
0,0	353.397,2	0,0	0,0	1.042.499,0	0,0	0,0	0,0
0,0	72.582,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1.205,8	39.200,9
0,0	1.019.440,9	0,0	0,0	2.975.138,9	10.242,1	14.756,2	66.488,1
2.266,1	45.850,8	26.782,6	9.129,3	50.221,0	26.840,3	5.653,1	14.406,0
172.860,3	2.344.117,1	27.695,9	12.875,6	6.715.723,3	56.183,5	53.345,8	755.078,2
1,7%	23,1%	0,3%	0,1%	66,2%	0,6%	0,5%	7,4%
86.821,0	547.895,5	0,0	0,0	1.391.071,8	0,0	944,4	13.154,7
26.478,3	57.552,2	0,0	0,0	169.319,3	0,0	174,1	2.942,0
0,0	373.430,1	0,0	0,0	1.094.766,6	0,0	0,0	2.769,9
0,0	27.641,2	11.606,4	9.119,3	24.347,8	2.394,9	1.782,0	3,1
0,0	353.397,2	0,0	0,0	1.042.499,0	0,0	0,0	0,0
0,0	72.332,7	0,0	0,0	106,0	353,0	1.096,8	39.207,0
0,0	1.126.518,8	0,0	0,0	2.984.482,0	27.187,6	9.980,8	768,2
2.266,1	80.605,5	32.729,9	12.622,2	33.419,9	35.849,4	4.509,7	7.726,7
115.565,4	2.639.373,3	44.336,4	21.741,5	6.740.012,4	65.784,8	18.487,9	66.571,6
1,2%	27,2%	0,5%	0,2%	69,4%	0,7%	0,2%	0,7%

V	X	Z	AB	AE	AH
Closed-Loop-Potenzial (CLP)			Loop-Potenzial (LP)		
Pre-Use	Post-Use	gesamt	Pre-Use	Post-Use	gesamt
5,7%	23,5%	<b>29,1%</b>	5,7%	82,8%	<b>88,5%</b>
4,9%	4,9%	<b>9,9%</b>	4,9%	4,9%	<b>9,9%</b>
5,4%	25,8%	<b>31,2%</b>	5,4%	100,0%	<b>105,4%</b>
39,3%	41,2%	<b>80,5%</b>	39,5%	97,1%	<b>136,5%</b>
5,4%	25,3%	<b>30,7%</b>	5,4%	100,0%	<b>105,4%</b>
2,3%	64,2%	<b>66,5%</b>	4,0%	64,2%	<b>68,3%</b>
5,3%	24,9%	<b>30,2%</b>	5,3%	98,0%	<b>103,3%</b>
68,3%	46,4%	<b>114,7%</b>	76,4%	88,9%	<b>165,4%</b>
6,8%	25,2%	<b>32,0%</b>	7,0%	92,0%	<b>99,0%</b>
30,4%	31,1%	<b>61,5%</b>	35,2%	99,3%	<b>134,5%</b>
27,9%	32,8%	<b>60,7%</b>	39,1%	98,8%	<b>137,9%</b>
34,7%	25,4%	<b>60,1%</b>	34,7%	99,8%	<b>134,6%</b>
46,2%	62,9%	<b>109,1%</b>	46,3%	97,7%	<b>144,0%</b>
39,4%	25,3%	<b>64,7%</b>	39,4%	100,0%	<b>139,4%</b>
4,8%	64,0%	<b>68,8%</b>	9,6%	64,4%	<b>74,0%</b>
35,7%	27,2%	<b>62,9%</b>	35,7%	99,7%	<b>135,5%</b>
82,5%	61,1%	<b>143,6%</b>	95,6%	94,2%	<b>189,7%</b>
35,5%	29,1%	<b>64,6%</b>	37,2%	99,2%	<b>136,4%</b>

A 9.19 b

A 9.19 c

gelegt, d. h., es blieb unberücksichtigt, dass z.B. der Bodenbelag eine leicht geringere Fläche hat als die tragende Decke. Grund für die Vereinfachung ist die leichtere Anwendbarkeit in frühen Planungsphasen.

Im nächsten Schritt werden durch automatische Verknüpfungen im Bewertungstool die Massen nach Qualitätsstufen Pre-Use ermittelt (Spalten G-K in Abb. A 9.19 a). Hierfür werden die in den einzelnen Bauteil-Tabellenblättern ausgewiesenen Massen nach Qualitätsstufen ebenfalls mit der Fläche des jeweiligen Bauteils multipliziert.

Anschließend werden auf die gleiche Weise die Massen für die Qualitätsstufen Post-Use berechnet. Dabei werden die Massen des hochwertigen EoL-Szenarios und die Massen des üblichen EoL-Szenarios, die denselben Qualitätsstufen zugeordnet sind, aus den jeweiligen Bauteil-Tabellenblättern addiert (vgl. Kapitel 7, Abb. A 7.11 e und f auf Seite 180).

Die Massenanteile der Qualitätsstufen in Prozent ergeben sich, indem die Summen der jeweiligen Qualitätsstufen durch die berücksichtigte Gesamtmasse des Gebäudes (Summe Spalte F) geteilt werden.

Schließlich wird das Closed-Loop und das Loop-Potenzial auf Gebäudeebene berechnet, indem die Massenanteile nach den in Kapitel 7.5 aufgestellten Formeln addiert werden (s. Abb. A 9.19 c).

## Legende Kreislaufpotenziale

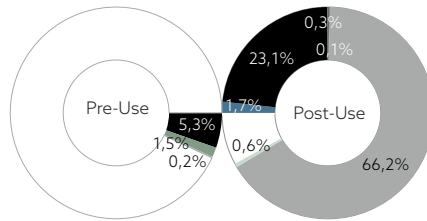
### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

### Post-Use

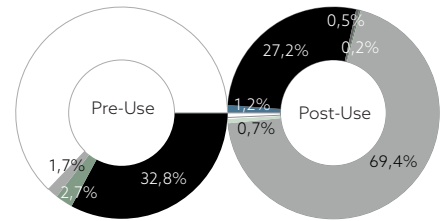
- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen ( $dc_{cr}$ )
- energetisch verwerb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen ( $en_{cr}$ )
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen ( $en_r$ )
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen ( $en_f$ ) oder zur Deponierung (d)

## Ursprüngliche Planung



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	6,8%	25,2%	32,0%
Loop-Potenzial	7,0%	92,0%	99,0%

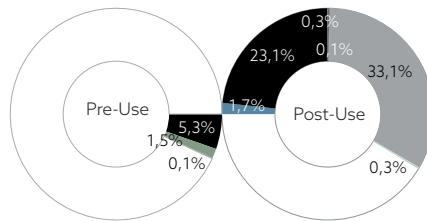
## Urban Mining Design



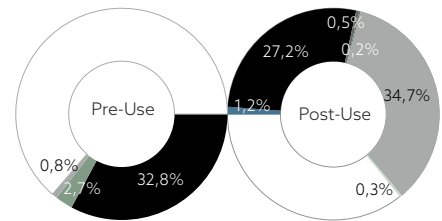
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	35,5%	29,0%	64,5%
Loop-Potenzial	37,2%	99,2%	136,4%

a

**Gewichtung der in  
offenen Kreisläufen  
geführten Materialien  
(LP - CLP) mit dem  
Faktor 0,5**



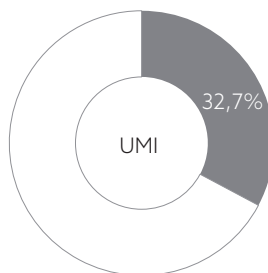
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Kreislaufpotenzial, gewichtet	6,9%	58,6%	65,5%



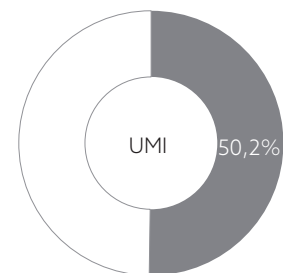
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Kreislaufpotenzial, gewichtet	36,3%	64,1%	100,4%

b

**Gewichtung der  
Post-Use- und der  
Pre-Use-Phase  
zu gleichen Teilen  
(Faktor 0,5)**



Urban Mining Indicator	32,7%
------------------------	-------



Urban Mining Indicator	50,2%
------------------------	-------

c

## A 9.20 Ergebnisse der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene und Überführung in den Urban Mining Indicator

- a Kreislaufpotenziale der Varianten des Modellprojekts Rathaus Korbach auf Gebäudeebene
- b Gewichtetes Kreislaufpotenzial auf Gebäudeebene
- c Urban Mining Indicator der Varianten des Modellprojekts Rathaus Korbach

Die nebenstehenden Grafiken zeigen die Kreislaufpotenziale der ursprünglichen Planung und des Urban Mining Designs.

Das Closed-Loop-Potenzial steigt durch die Optimierungen von 32,0% auf 64,5%, was einer Steigerung von mehr als 100% entspricht. Dies ist hauptsächlich auf den Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnung in der Pre-Use-Phase zurückzuführen. Hier machen sich der hohe Anteil der Decken und der Gründung an den Gesamtmassen bemerkbar. Das Closed-Loop-Dach hat dagegen aufgrund seiner geringen Masse einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis.

Das Loop-Potenzial steigt durch das Urban Mining Design ebenfalls deutlich von 99% auf 136,4%, allerdings ist die Steigerung nicht so hoch wie beim Closed-Loop-Potenzial. Dies liegt daran, dass die im Loop-Potenzial abgebildete Weiterverwertung (Downcycling) in der Urban-Mining-Design-Variante nur leicht höher ist. Die Betonmassen, die sich dort hauptsächlich widerspiegeln, gehen auch im Urban Mining Design mit einem eingeschränkten Material-Loop-Potenzial in die Post-Use-Phase ein.

### 9.3.2. Bewertung mit dem Urban Mining Indicator

**Der Urban Mining Indicator ist der gewichtete Maßstab auf Gebäudeebene.**

Hier bekommen die Qualitäten der geschlossenen und offenen Kreisläufe eine unterschiedliche Bewertung. Außerdem werden die Pre-Use- und die Post-Use Phase zu einer Gesamtbewertung zusammengeführt.

*Gewichtung der offenen Kreisläufe*

**Um den Qualitätsverlust der in offenen Kreisläufen geführten Materialien abzubilden, geht deren Anteil nur zur Hälfte in den Urban Mining Indicator ein.** Hierzu wird die Differenz zwischen Closed-Loop- und Loop-Potenzial gebildet (= Anteil der in offenen Kreisläufen geführten Materialien) und mit dem Faktor 0,5 gewichtet. Die Materialien, die dagegen in geschlossenen Kreisläufen geführt werden können, gehen voll in die Bewertung ein.

Der Faktor für die Gewichtung wird zunächst auf 0,5 festgelegt. Es ließe sich diskutieren, ob er höher oder niedriger sein sollte und ob überhaupt eine pauschale Gewichtung zielführend ist. Hierauf wird im Zwischenfazit (Kapitel 9.4) noch einmal eingegangen.

Für das Modellprojekt Rathaus Korbach ergibt sich auf diese Weise für die ursprüngliche Planung ein gewichtetes Kreislaufpotenzial von 65,5%, das sich aus dem Pre-Use-Anteil von 6,9% und dem Post-Use-Anteil von 58,6% zusammensetzt.

Die Urban-Mining-Design-Variante kommt auf ein gewichtetes Kreislaufpotenzial von 100,4%, wobei die Pre-Use-Phase einen Anteil von 36,3% und die Post-Use-Phase einen Anteil von 64,1% hat.

*Wie lassen sich nun Pre-Use- und Post-Use-Phase zusammenführen?*

Ziel ist die Bewertung des Urban Mining Indicators im 100-Punkte-System. Dies dient zum einen einer klareren Aussage, zum anderen der Anpassung an die deutschen Gebäudezertifizierungssysteme (vgl. Ziele in Kapitel 1.4.6 und 1.4.8).

Die Maximalbewertung der beiden Phasen von jeweils 100% (zusammen 200%) muss also auf insgesamt 100% zurückgeführt werden. Hierzu ließen sich die beiden Phasen unterschiedlich gewichten. Im Cradle-to-Cradle-System von Braungart/McDonough (s. Kapitel 4.2.2, Seite 70) geht der Materialverbleib (rezyklierbare und kompostierbare Rohstoffe) z.B. im Verhältnis 2:1 zur Materialherkunft (rezyklierte und schnell nachwachsende Rohstoffe) in die Bewertung ein. Die Post-Use-Phase hat dort also eine Gewichtung von zwei Dritteln, während die Pre-Use-Phase nur mit einem Drittel gewichtet wird. Dies mag verschiedene Gründe haben. Einer der Gründe wird in dem aktuell noch höheren Aufwand für die Aufbereitung von Sekundärrohstoffen gesehen, vor allem weil die derzeit im Umlauf befindlichen Produkte und verbauten Materialien noch nicht unter dem Aspekt der Rohstoffrückgewinnung geplant wurden. Um hier einen Paradigmenwechsel in der Planung zu bewirken, könnten Rezyklierbarkeit und Kompostierbarkeit höher gewichtet werden, und ihnen damit eine besondere Bedeutung beigemessen werden.

Ein Grund kann aber auch sein, dass die Deklaration von rezyklierbaren und kompostierbaren Rohstoffen schlichtweg einfacher ist als der faktische Einsatz bereits rezyklierter und schnell nachwachsender Rohstoffe. Der Blick in die Zukunft ist schließlich nur eine Prognose mit entsprechenden Ungenauigkeiten, während der gegenwärtige Materialeinsatz genau nachgewiesen werden muss. Die Möglichkeit der Nachnutzung ist leichter zu benennen als das Recycling zu praktizieren. Eine stärkere Gewichtung der Post-Use-Phase (wie im Cradle-to-Cradle-System) könnte deshalb in vielen Fällen zu einem besseren Ergebnis führen als eine gleich gewichtete Bewertung.

So würde der Urban Mining Indicator für das Modellprojekt Rathaus Korbach bei einer **2:1-Gewichtung** der Post-Use-Phase gegenüber der Pre-Use-Phase folgendermaßen ausfallen:

- Ursprüngliche Planung 41,4%
- Urban Mining Design 54,8%

Werden die Phasen jedoch **gleich gewichtet**, stellt sich der Urban Mining Indicator wie in Abbildung A 9.20 c dar:

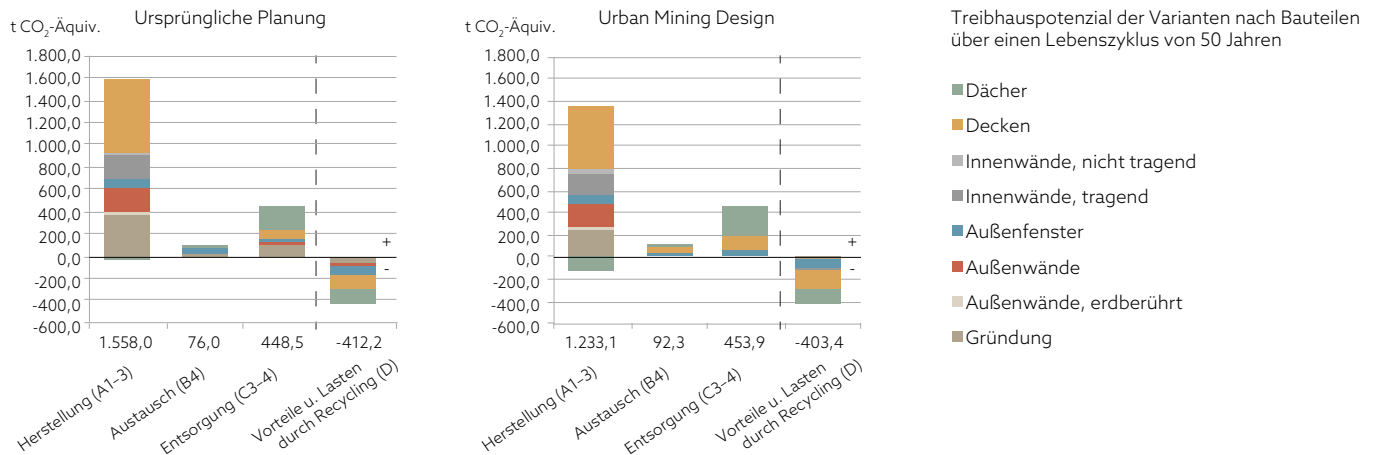
- Ursprüngliche Planung 32,7%
- Urban Mining Design 50,2%

Die Gleichgewichtung fördert ein möglichst hochwertiges Recycling bereits in der Gegenwart und verschiebt es nicht in die Zukunft.

Bereits jetzt wären in vielen Bereichen höhere Recyclingraten möglich, wenn die Industrie Anreize dazu erhielte. Derzeit landen noch viele Wertstoffe auf Deponien oder werden minderwertig weitergenutzt, weil Primärbaustoffe zu günstig sind (der Rohstoffbedarf nachfolgender Generationen wird nicht eingepreist) und die Deponierung, Verfüllung oder ein Downcycling (noch) billiger ist als die hochwertige Aufbereitung.<sup>101</sup>

**Im Urban Mining Indicator werden die Pre-Use-Phase und die Post-Use-Phase deshalb zunächst gleich gewichtet.** Sollte der Urban Mining Index

<sup>101</sup> Für das Modellprojekt Rathaus Korbach wurden in der Kostenschätzung ca. 60.000€ Mehrkosten (bei Baukosten von ca. 20 Mio. €) für die Aufbereitung der mineralischen Wertstoffe zu rezyklierter Gesteinskörnung für Beton prognostiziert – bedingt durch höheren Aufwand für die Verwertung, separate Lagerhaltung und Güteüberwachung.



A 9.21

auf breites Interesse stoßen, kann in der Wissenschaft eine anderweitige Gewichtung diskutiert werden.

**Der Urban Mining Indicator stellt somit die gewichtete Zirkularitätsrate des Bauwerks dar.** Er kann zwar auch auf Bauteilebene ermittelt werden (s. Legende zu Abb. A 9.24 auf Seite 286), es erscheint jedoch sinnvoll, den Detaillierungsgrad des Ergebnisses an den Detaillierungsgrad der jeweiligen Ebene anzupassen.

### 9.3.3. Treibhauspotenzial der Varianten auf Gebäudeebene

Das Treibhauspotenzial wird auf Gebäudeebene überschlägig ermittelt, indem die Ergebnisse der Bauteile pro m<sup>2</sup> Fläche (s. Kapitel 9.2) mit den geplanten Bauteilflächen multipliziert werden. In Abbildung A 9.21 ist das Treibhauspotenzial der untersuchten Varianten für das Modellprojekt Rathaus Korbach auf Gebäudeebene nach Bauteilen und Lebenszyklusphasen gegliedert gegenübergestellt.

Die Vergleichsgrafik zeigt, dass die Decken von allen Bauteilen das höchste Treibhauspotenzial aufweisen. Dies liegt an den großen darin verbauten Betonmassen und dem CO<sub>2</sub>-intensiven Baustoff Zement.

Im Gesamtergebnis (Module A-D) sind die Treibhausgasemissionen der Urban-Mining-Design-Variante mit rund 1.376 Tonnen um 17,6% geringer als die der ursprünglichen Planung (1.679 Tonnen). Dies resultiert hauptsächlich aus der Verwendung von Hüttensandzement in den WU-Betonbauteilen der UMD-Variante und an der Optimierung der Dämmstoffe (s. jeweilige Bauteile in Kapitel 9.2).

Bei einer Nettogrundfläche von 4.746m<sup>2</sup> und einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren hat die UMD-Variante ein Treibhauspotenzial von ca. 5,8 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup> NGF\*a während die ursprüngliche Planung auf 7,0 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup> NGF\*a kommt. Im DGNB-Zertifizierungssystem beträgt der Referenzwert für die Baukonstruktion und die technische Gebäudeausrüstung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes 9,4 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup> NGF\*a. Demgegenüber erscheinen die ermittelten Werte gering, aber noch plausibel, da in dieser Arbeit nur die Baukonstruktion untersucht wurde und Vereinfachungen durchgeführt wurden (z.B. ohne Treppen und Türen).

A 9.21 Treibhauspotenzial der untersuchten Varianten auf Gebäudeebene

---

## 9.4. Zwischenfazit

Im Kapitel 8 wurde anhand zweier fiktiver Modellprojekte gezeigt, dass sich die kreislaforientierte Planung deutlich in der quantitativen Bewertung der Kreislaufpotenziale niederschlägt, wobei sich die Bauweisen in den dort untersuchten Varianten gänzlich unterschieden haben. In diesem Kapitel ist die Bauweise eines realen Projekts – eine Stahlbetonskelettkonstruktion mit vorgehängter Betonfertigteilfassade – nun beibehalten worden. Die geplanten Materialien wurden größtenteils nicht ausgetauscht, sondern in ihrer Zusammensetzung und Fügung optimiert, wobei das Erscheinungsbild und die funktionale Qualität weitgehend unangetastet blieben.

Die Anwendung des Urban Mining Index an dem Modellprojekt Rathaus Korbach hat das Optimierungspotenzial der massiven Bauweise messbar gemacht: Vor allem in der Verwendung von Sekundärrohstoffen, die hier aus dem Bestand gewonnen wurden, und in dem sortenrein trennbaren Bauteilaufbau, der eine höherwertige Nachnutzung der Baustoffe ermöglicht, besteht großes Potenzial zur Einsparung von Ressourcen durch zirkuläres Bauen.

### **Der Vergleich auf Gebäudeebene hat aber auch gezeigt, dass die Einheit Masse eine erhebliche Rolle spielt.**

Der Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnung wirkt sich nicht zuletzt deshalb deutlich aus, weil der Recyclingbaustoff eine hohe Dichte aufweist.

Zwischenzeitlich wurde in Erwägung gezogen, die Ergebnisse auf Gebäudeebene nicht nach Massen der Bauteile, sondern nach ihrem Flächenanteil zu bewerten. Hierzu könnten die auf Bauteilebene ermittelten Kreislaufpotenziale mit dem jeweiligen Flächenanteil der Bauteile multipliziert werden. In Abbildung A 9.22 sind die Ergebnisse dieser Berechnungsweise für die beiden Varianten des Rathauses Korbach probenhalber dargestellt. Beide Varianten hätten einen höheren Urban Mining Indicator (ursprüngliche Variante 40% und UMD-Variante 53,8%) und die Differenz zwischen den Varianten wäre geringer, da das Dach aufgrund seines relativ großen Flächenanteils einen stärkeren Einfluss auf das Gesamtergebnis hat.

Die Überlegung wurde jedoch verworfen, zum einen um das System der Massengewichtung auch auf Gebäudeebene beizubehalten, zum anderen weil die Flächengrößen letztlich nicht entscheidend sind, sondern die auf oder in diesen Flächen verbauten Rohstoffe, die zweckmäßigerweise in Massen kalkuliert werden. Hierauf wird im Fazit noch einmal eingegangen (s. Seite 295).

### *Plausibilität der Ergebnisse*

Beim Modellprojekt Rathaus Korbach wurden – subjektiv gesehen – große Anstrengungen zur kreislaufgerechten Optimierung der Konstruktionen unternommen. Immerhin ist das Urban-Mining-Konzept in Deutschland bisher einmalig und wird vom Land Hessen als Modellprojekt für ressourcenschonendes Bauen unterstützt. Trotzdem erreicht das Gesamtgebäude ‚nur‘ einen Urban Mining Indicator von 50,2%. Deshalb stellt sich die Frage, ob die Bewertung plausibel bzw. objektiv richtig ist oder – anders ausgedrückt – ob sie ‚gerecht‘ ist.

KGR	Bauteil	Closed-Loop-Potenzial (CLP)				Loop-Potenzial (LP)				CLP + LP gesamt gewichtet	Flächen- anteil [%]	Bewertungs- punkte
		Pre-Use		Post-Use		Pre-Use		Post-Use				
		voll	gewichtet 1/2	voll	gewichtet 1/2	offene Kreis- läufe	gewichtet 1/4	offene Kreis- läufe	gewichtet 1/4			
<b>Variante 1 ursprüngliche Planung</b>												
320	Gründung	5,7%	2,8%	23,5%	11,7%	0,0%	0,0%	59,4%	14,8%	29,4%	7,97%	2,34%
330	Außenwände, erdberührt	4,9%	2,5%	4,9%	2,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,9%	2,06%	0,10%
	Außenwände	5,4%	2,7%	25,8%	12,9%	0,0%	0,0%	74,2%	18,5%	34,2%	9,84%	3,36%
	Außenfenster	39,3%	19,7%	41,2%	20,6%	0,1%	0,0%	55,8%	14,0%	54,3%	7,18%	3,90%
340	Innenwände, tragend	5,4%	2,7%	25,3%	12,7%	0,0%	0,0%	74,7%	18,7%	34,0%	13,45%	4,58%
	Innenwände, nicht tragend	2,3%	1,1%	64,2%	32,1%	1,7%	0,4%	0,0%	0,0%	33,7%	15,66%	5,28%
350	Decken	5,3%	2,7%	24,9%	12,5%	0,0%	0,0%	73,1%	18,3%	33,4%	28,02%	9,36%
360	Dächer	68,3%	34,2%	46,4%	23,2%	8,1%	2,0%	42,5%	10,6%	70,0%	15,82%	11,08%
<b>Urban Mining Indicator</b>											<b>40,00%</b>	
<b>Variante 2 Urban Mining Design</b>												
320	Gründung	30,4%	15,2%	31,1%	15,6%	4,8%	1,2%	68,2%	17,0%	49,0%	7,97%	3,91%
330	Außenwände, erdberührt	27,9%	14,0%	32,8%	16,4%	11,2%	2,8%	66,0%	16,5%	49,6%	2,06%	1,02%
	Außenwände	34,7%	17,4%	25,4%	12,7%	0,0%	0,0%	74,4%	18,6%	48,7%	9,84%	4,79%
	Außenfenster	46,2%	23,1%	62,9%	31,5%	0,1%	0,0%	34,8%	8,7%	63,3%	7,18%	4,54%
340	Innenwände, tragend	39,4%	19,7%	25,3%	12,7%	0,0%	0,0%	74,7%	18,7%	51,0%	13,45%	6,87%
	Innenwände, nicht tragend	4,8%	2,4%	64,0%	32,0%	4,8%	1,2%	0,5%	0,1%	35,7%	15,66%	5,59%
350	Decken	35,7%	17,9%	27,2%	13,6%	0,0%	0,0%	72,6%	18,1%	49,6%	28,02%	13,89%
360	Dächer	82,5%	41,2%	61,1%	30,6%	13,1%	3,3%	33,0%	8,3%	83,3%	15,82%	13,19%
<b>Urban Mining Indicator</b>											<b>53,80%</b>	

A 9.22

Diese Frage lässt sich leichter beantworten, wenn noch einmal eine Vergleichsanalyse aus Kapitel 8 zu Hilfe genommen wird. Dort wurden konventionelle Konstruktionen in Gänze optimiert, d. h. auch unter Veränderung der Bauweise und des Erscheinungsbildes sowie ohne Berücksichtigung eines Investitionskostenbudgets. Das heißt, die kreislaufgerechte Planung zielte dort auf das Optimum ab. Beim Modellprojekt Rathaus Korbach musste dagegen zwischen den unterschiedlichen Belangen (Beibehaltung des Entwurfs aus dem Wettbewerb, Investitionskostenbudget, Brandschutz und Optimierung der Kreislauffähigkeit) abgewogen werden, wie es bei realen Projekten üblich ist.

A 9.22 Test einer anderen Berechnungsweise des Urban Mining Indicators: Gewichtung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene nach Bauteilflächen

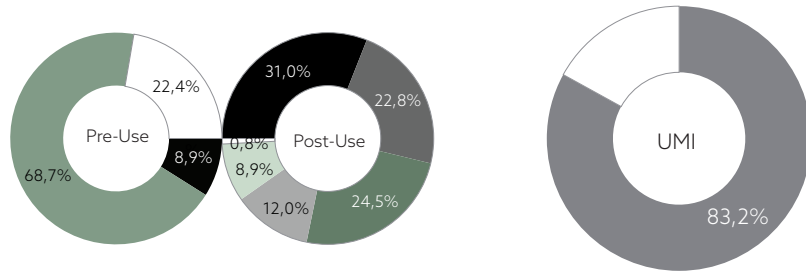
In Abbildung A 9.23 auf der folgenden Seite sind die Kreislaufpotenziale der Urban-Mining-Design-Variante des Modellprojekts 1 aus Kapitel 8 auf Gebäudeebene dargestellt.<sup>102</sup> Gewichtet man diese Kreislaufpotenziale nach dem beschriebenen Verfahren, ergibt sich ein Urban Mining Indicator von 83,2%.

**Diese 83,2% sind also ein Ergebnis für eine optimale, kreislaufgerechte Planung nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik.**

Es stellt sich die Frage, warum nicht nahezu 100% erreicht werden (können): Liegt es an der Methodik oder an den gegebenen Rahmenbedingungen?

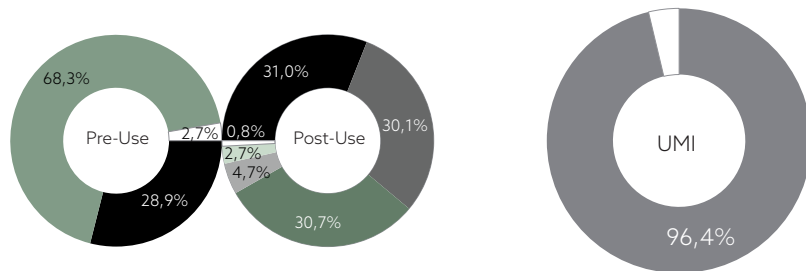
102 Die Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene für das Modellprojekt 1 aus Kapitel 8 wurden überschlägig nach Flächengrößen berechnet, die Riegler-Floors auch zur Berechnung der Lebenszykluskosten des Modellprojekts für den Atlas Recycling angesetzt hat. Kleinteilige Flächen und Innenwände wurden vernachlässigt.

- A 9.23 Kreislaufpotenziale der Urban Mining Design Variante des Modellprojekts 1 aus Kapitel 8 auf Gebäudeebene
- A 9.24 Urban Mining Indicator derselben Konstruktion
- A 9.25 Kreislaufpotenziale derselben Konstruktion bei optimiertem Material-Recycling-Content (MRC)
- A 9.26 Urban Mining Indicator derselben Konstruktion bei optimiertem Material-Recycling-Content (MRC)



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt		
Closed-Loop-Potenzial	77,6%	78,2%	155,8%	Urban Mining Indicator	83,2%
Loop-Potenzial	77,6%	99,2%	176,8%		
	A 9.23				A 9.24

Bauteil	Flächen	Massen	Urban Mining Indicator aktuell MRC=MLP	
Gründung	135 m <sup>2</sup>	15.214 kg	86,4 %	96,5%
Außenwände	420 m <sup>2</sup>	38.506 kg	81,6 %	95,8%
Decke	135 m <sup>2</sup>	14.797 kg	80,7 %	96,5%
Dach	135 m <sup>2</sup>	22.825 kg	85,5 %	97,3%
<b>Gesamt</b>		<b>91.342 kg</b>	<b>83,2 %</b>	<b>96,4%</b>



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt		
Closed-Loop-Potenzial	97,3%	91,8%	189,1%	Urban Mining Indicator	96,4%
Loop-Potenzial	97,3%	99,2%	196,5%		
	A 9.25				A 9.26

Die Differenz zu 100% resultiert zum einen aus dem Einsatz nicht erneuerbarer Primärrohstoffe (s. Abb. A 9.23, weißes Feld mit 22,4%). Zum anderen liegt die Differenz an der Gewichtung der offenen Kreisläufe. Es ist also sowohl auf äußere Umstände als auch auf die Methodik zurückzuführen, dass das optimale Modellprojekt keine volle Punktzahl erhält. Betrachtet man die Gründe genauer, lässt sich der Primärrohstoffeinsatz darauf zurückführen, dass derzeit auch für Baustoffe, die zu 100% in geschlossenen Kreisläufen geführt werden könnten, kein ausreichendes Angebot an Sekundärrohstoffen besteht (z.B. Lehmabbaustoffe). Dies ist ein äußerer Umstand, der sich nur im Zuge steigender Nachfrage nach Closed-Loop-Materialien ändern wird, der aber die Objektivität des Ergebnisses im Urban Mining Index nicht verfälscht.

Die Gewichtung der Materialien, die nur in offenen Kreisläufen geführt werden können, ist gewollt. Der Urban Mining Indicator von 83,2% für das betrachtete optimale Modellprojekt erscheint somit grundsätzlich gerecht. Ein Ergebnis von 100% ist derzeit kaum möglich, da sich die zirkuläre Wirtschaftsweise erst noch etablieren muss.

Es wurde deshalb noch einmal überprüft, welchen Urban Mining Indicator die UMD-Variante des Modellprojekts 1 aus Kapitel 8 bei einem optimierten Material-Recycling-Content (MRC) erreichen würde. Dabei wurde angenommen, dass das Material-Loop-Potenzial voll ausgeschöpft wird. Das heißt, die geplanten Materialien enthalten den maximalen Anteil an Sekundärrohstoffen nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik, und sämtliche erneuerbaren Rohstoffe stammen aus zertifiziert

### Legende Kreislaufpotenziale

#### Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

#### Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (d<sub>ccr</sub>)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>cr</sub>)
- weiterverwertbare Wertstoffe (d<sub>c</sub>)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en<sub>r</sub>)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en<sub>f</sub>) oder zur Deponierung (d)

nachhaltigem Anbau (auch in Holzwerkstoffen, die derzeit noch nicht zertifizierte Hölzer enthalten).

Die Ergebnisse der optimierten Produktion sind in den Abbildungen A 9.25 und A 9.26 den Ergebnissen nach aktueller Produktion gegenübergestellt. Demnach erreicht die berechnete Konstruktion bei optimierter Baustoffproduktion einen Urban Mining Indicator von 96,4%.

Der verbleibende Primärrohstoffeinsatz geht auf die Leimanteile in den Holzwerkstoffen und Leimbindern sowie auf das mineralische Brandschutzmittel (auf Sulfatbasis) in der Zellulosedämmung zurück.

Der geringe Anteil an Materialien, die post-use in offenen Kreisläufen geführt werden, lässt sich auf die Anteile der Lehmbaustoffe zurückführen, die unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert im üblichen EoL-Szenario weiterverwertet werden (z.B. im Erdbau), sowie auf die Anteile der Zellulosedämmung (aus erneuerbaren Rohstoffen), die im üblichen EoL-Szenario energetisch verwertet werden.

**Das Rechenbeispiel zeigt, dass ein Urban Mining Indicator von nahezu 100% nur erreichbar ist, wenn sowohl die Planung als auch die Baustoffherstellung optimiert werden.**

**Das Beispielprojekt Korbach verdeutlicht die derzeitigen Grenzen der Kreislaufführung moderner mineralischer Baustoffe:** Die chemisch-physikalischen Prozesse bei der Hydratation von Beton sind nach heutigem Stand der Forschung unumkehrbar. Eine Re-Plastifizierung ist nicht möglich, das Recycling beschränkt sich damit auf die begrenzt wieder einsetzbare gebrochene Körnung.

So steigt der Urban Mining Indicator des Modellprojekts Korbach durch die optimierte Planung zwar deutlich von 32,7% auf 50,2%, eine weitere Optimierung unter Beibehaltung der Bauweise ist unter den heutigen Rahmenbedingungen aber nur möglich, wenn durch entsprechende Forschung das Material-Loop-Potenzial von Beton verbessert wird.

Wichtige Impulse für die Wirtschaft können hier die Ergebnisse zweier Forschungsprojekte setzen, die 2018 abgeschlossen wurden:

In dem Verbundforschungsprojekt „R-Beton“ hat ein Konsortium unter Führung der Heidelberger Zement AG [229] von 2014 bis 2018 die gesamte Wertschöpfungskette von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen untersucht. Ziel ist unter anderem, die Maximalanteile an RC-Gesteinskörnung, auch unter Einbeziehung von Feinanteilen, zu erhöhen.

Die Abschlussberichte des Konsortiums sind bisher nicht veröffentlicht.

In dem Forschungsprojekt „BauCycle“ haben vier Institute des Fraunhofer Verbundes [230] von 2016 bis 2018 Verwertungsstrategien für feinkörnigen Bauschutt entwickelt. Hierzu gehört ein opto-pneumatisches Sortierverfahren für die Feinfraktion, das sulfatische oder silikatische Partikel bis 1 mm Größe erkennen und somit auch Gips von anderen mineralischen Baustoffen trennen kann. Weiterhin entwickelten die Forscher Bauprodukte, in denen die Feinfraktion als Sekundärrohstoff eingesetzt werden kann, wie z.B. Porenbetonsteine oder Akustikputz. Da das Verfahren parallel zu dieser Arbeit entstanden ist und sich noch am Markt behaupten muss, werden die Ergebnisse hier nicht berücksichtigt.

---

Die neuen Möglichkeiten der Weiterverwertung werfen aber noch einmal die Frage der Gewichtung des Qualitätsverlustes auf, der zunächst mit einem Faktor von 0,5 pauschal festgelegt wurde.

Eine spezifische Gewichtung der Materialien, die mit Qualitätsverlust weiterverwertet werden, könnte sich z. B. am monetären Wertverlust vom Ausgangsprodukt zum fertigen Rezyklat orientieren. Dieser Verlust müsste aber auf Materialebene ermittelt werden. So beträgt beispielsweise der Preis für 1 m<sup>3</sup> Transportbeton je nach Region sowie Festigkeits- und Expositionsklasse derzeit ca. 130–145 € netto.<sup>103</sup> Dies entspricht einem Preis von 54–60 € pro Tonne (bezogen auf eine durchschnittliche Dichte von 2,4 Tonnen pro m<sup>3</sup>). Eine Tonne gebrochene Gesteinskörnung 0/45 aus Beton z. B. für den Straßen- und Wegebau kostet fertig aufbereitet und güteüberwacht je nach Region ca. 7–11 € netto.<sup>104</sup> Das Rezyklat hat damit nur einen monetären Wert von 13 bis 18% gegenüber dem Ausgangsprodukt. Dementsprechend würde der Faktor für die Gewichtung des Qualitätsverlustes im Urban Mining Index 0,1 bis 0,2 betragen. Es stellt sich allerdings die Frage, ob diese Abwertung gegenüber einer Wiederverwertung in Beton, die in dieser Arbeit als Recycling in das Closed-Loop-Potenzial einfließt, angemessen ist. Der Preis für güteüberwachte rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 für Beton nach DIN EN 12620 beträgt z. B. in Baden-Württemberg zwischen 8 und 17 € netto pro Tonne.<sup>105</sup> Selbst wenn man diesen Preis mit 50% Aufschlag belegt, da für die Herstellung einer Tonne Gesteinskörnung Typ 1 zwei Tonnen Beton benötigt werden (s. Kapitel 9.1.2 auf Seite 233) und die Feianteile aktuell nur den halben Preis erwirtschaften, beträgt der Wert der rezyklierten Gesteinskörnung Typ 1 gegenüber dem Ausgangsprodukt Beton maximal 22–42%. Unter dem Aspekt des Wertverlustes könnte also auch die hochwertigste Verwertung des Betons als Downcycling bezeichnet werden. Auch Hillebrandt und Seggewies weisen im Atlas Recycling darauf hin, dass zwischen den Qualitätsstufen der aktuellen Verwertung von Beton (Material-EoL-Status) keine klare Trennung möglich ist. In dieser Arbeit orientiert sich die Einstufung der Betonverwertung jedoch am Material-Loop-Potenzial nach Hillebrandt/Seggewies, wonach Konstruktionsbeton nach derzeitigem Stand der Forschung einen maximalen Recyclinganteil (nicht Downcyclinganteil) von 39% enthalten kann. Das Beispiel der Betonverwertung zeigt, dass die Frage der angemessenen Gewichtung der Nachnutzung mit Qualitätsverlust nicht abschließend geklärt werden kann. Um einen Qualitätsverlust überhaupt im Urban Mining Indicator berücksichtigen zu können, werden die Materialien, die nur in offenen Kreisläufen geführt werden können, deshalb pragmatisch zur Hälfte gewichtet.

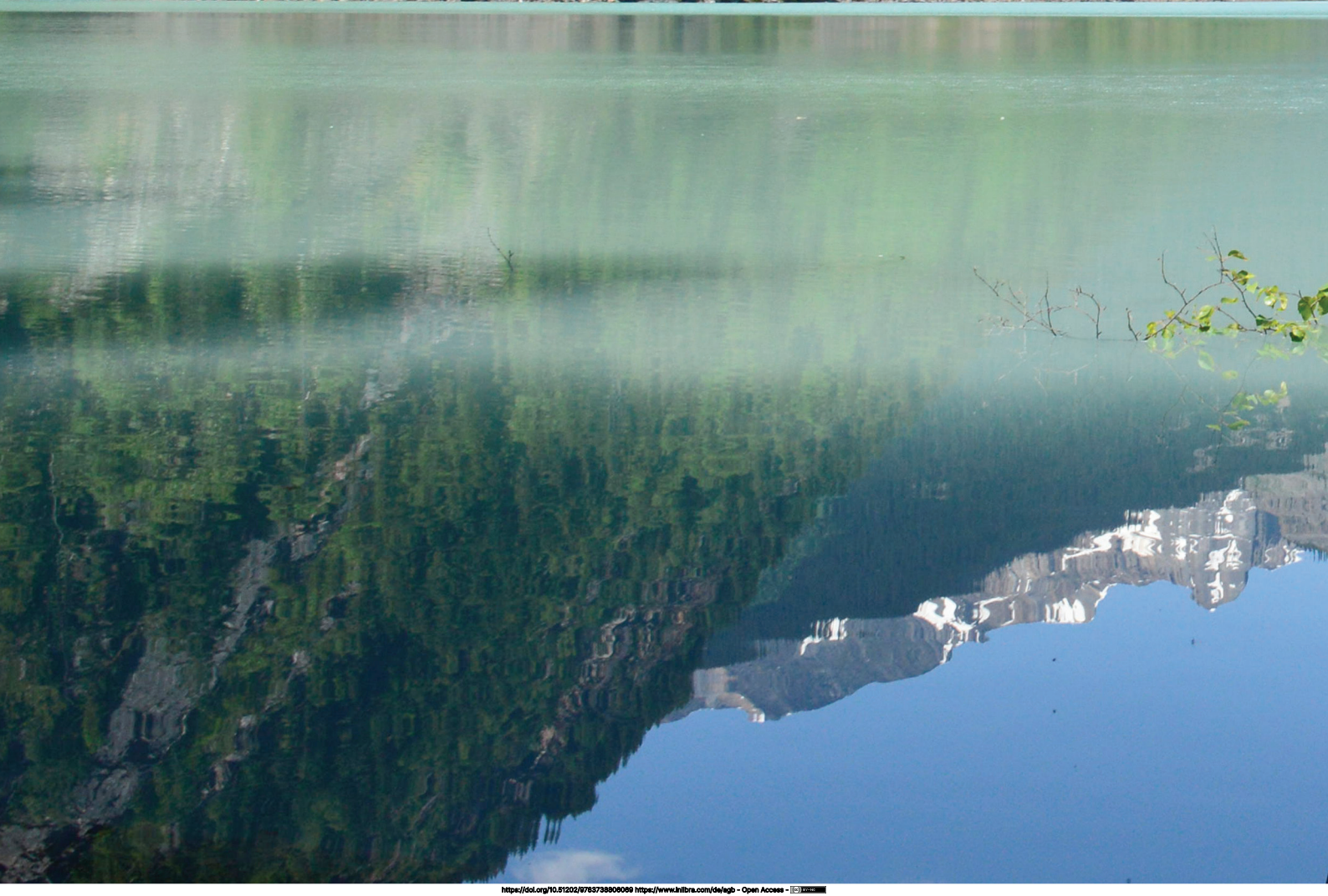
---

103 Quelle: Preislisten der Cemex Deutschland AG, 2019 [231].

104 Eigene Recherche, Recyclingbetriebe Buhck Hamburg, rwg1 Berlin und Fees Kirchheim-Teck.

105 Quelle: Fees Kirchheim-Teck und Scherer+Kohl Ludwigshafen, Stand 01/2020.





---

## 10. Fazit und Ausblick auf weitere Forschung

Die zentrale Frage dieser Arbeit lautete, wie das zirkuläre Bauen objektiv messbar gemacht werden kann. Im Folgenden wird reflektiert, ob der Urban Mining Index Kreislaufpotenziale messen, objektiv bewerten und verständlich darstellen kann und ob die weiteren eingangs formulierten Ziele erreicht werden konnten. Hierzu werden die Forschungsergebnisse zunächst bewertend zusammengefasst. Aspekte, die derzeit noch unzureichend in der Bewertung berücksichtigt werden können, werden benannt und die Datengrundlage zur Anwendung der Methodik wird noch einmal kritisch beleuchtet.

Anschließend soll die Frage beantwortet werden, welchen Beitrag der Urban Mining Index im Forschungsgebiet des zirkulären Bauens leisten kann. Hierzu werden die Ergebnisse den in Kapitel 4 vorgestellten Arbeiten anderer Wissenschaftler gegenübergestellt.

Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf die Verwendbarkeit der Ergebnisse in verwandten Forschungsfeldern zum Ressourcen- und Umweltschutz. Hier spielt insbesondere das Ineinandergreifen von Ökoeffektivität und Ökoeffizienz eine bedeutende Rolle.

10.1.	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	292
10.2.	Beitrag des Urban Mining Index im Forschungskontext Zirkuläres Bauen	300
10.3.	Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse in verwandten Forschungsfeldern	302
10.4.	Schlusswort	306

---

## 10.1. Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

### 10.1.1. Zusammenfassung

Hauptziel der Arbeit war die Entwicklung einer Methodik für die objektive, quantitative Bewertung der Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen in der Neubauplanung.

Um eine Bewertung überhaupt möglich zu machen, wurden zunächst Qualitäten der Nachnutzung definiert, nach denen die Kreislaufpotenziale abgestuft werden können. Für die quantitative Berechnung der Mengen, die in diese Qualitätsstufen eingehen, wurden messbare Parameter aufgestellt. Durch empirisch-experimentelle Forschung auf Rückbaustellen und in Versuchsständen sowie durch Einbeziehung der Ergebnisse anderer Wissenschaftler wurde eine Datenbasis für die messbaren Parameter erarbeitet. Anhand dieser Datenbasis konnten Bewertungsmaßstäbe (Benchmarks) aufgestellt werden, an denen die Kreislaufpotenziale von Konstruktionen gemessen und eingeordnet werden können. Auf dieser Grundlage wurden die definierten Parameter in einer Formel zur Berechnung der Kreislaufpotenziale zusammengefasst. Entscheidend für die Aufstellung der Formel war die objektive Einordnung der Benchmarks auf Skalen, denn nur durch diese Skalen konnten Faktoren festgelegt werden, mit der die quantitativ messbaren Parameter in der Formel durch Multiplikation in Beziehung gesetzt werden.

Die Vergleichsanalysen in Kapitel 8 und 9 haben gezeigt, dass die Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen mit dem entwickelten Urban Mining Index grundsätzlich analysiert und gemessen werden können. In der Gegenüberstellung von Planungsvarianten konnten deutliche Unterschiede in den Kreislaufpotenzialen gemessen werden, welche die qualitative Bewertung durch den Planer – die im Entwurfsprozess stets vorausgehen muss, um überhaupt sinnvolle Varianten zu messen – bestätigt haben.

Auf Gebäudeebene konnten die Kreislaufpotenziale der Pre- und Post-Use-Phase zusammengeführt und mit einer Gewichtung des Loop- und Closed-Loop-Potenzials in einer einzigen bewertenden Prozentzahl, dem Urban Mining Indicator, abgebildet werden. **Eine eindeutige Messbarkeit und Bewertbarkeit ist damit grundsätzlich gegeben.**

### 10.1.2. Interpretation der Ergebnisse – Objektivität der Bewertung

Entscheidend ist nun die Objektivität der Bewertung, denn letztlich ist sie es, die eine quantitative Bewertung nach wissenschaftlichen Maßstäben von einer subjektiven Bewertung, die sich auf erworbenes Wissen und Erfahrungen stützt, unterscheidet.

Im Zwischenfazit zu Kapitel 9 wurde bereits für die durchgeführten Vergleichsanalysen ein plausibles Ergebnis festgestellt. Die Methodik scheint also das angestrebte Ziel – die objektive Bewertung der zirkulären Eigenschaften von Baukonstruktionen – zu erreichen.

Da eine Plausibilitätsprüfung jedoch nur für ausgewählte Modellprojekte durchgeführt werden kann und sich außerdem auf die zuvor festgelegten Parameter bezieht, müssen diese Parameter sowie die Ganzheitlichkeit

der Betrachtung noch einmal kritisch hinterfragt werden.

Hierzu werden im Folgenden noch einmal die eingangs formulierten Teilziele (s. Kapitel 1.4) aufgegriffen und reflektiert, inwieweit diese erreicht werden konnten oder noch Aspekte offenblieben.

- **Einbeziehung des gesamten Lebenszyklus**

Der Urban Mining Index berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus. In den Kreislaufpotenzialen werden die Pre-Use- und die Post-Use-Phase grafisch dargestellt. Die Nutzungsdauer der Baustoffe geht in die Bewertung ein, indem die Austauschzyklen bzw. Austauschhäufigkeiten berücksichtigt werden. Muss ein Baustoff z. B. zweimal im Lebenszyklus ausgetauscht werden, fällt sowohl der Materialeinsatz (Pre-Use) als auch der Materialverbleib (Post-Use) insgesamt dreimal an. Die Nutzungsdauerntabelle des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung hat sich bereits für Lebenszyklusanalysen in den deutschen Gebäudezertifizierungssystemen bewährt und wurde in das UMI-Anwendungstool integriert.

Es bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass in der BBSR-Tabelle nur durchschnittliche technische Nutzungsdauern abgebildet werden. Die tatsächlichen Nutzungsdauern können davon abweichen. So werden beispielsweise Gipskartonwände mit einer technischen Nutzungsdauer von > 50 Jahren kalkuliert. Der funktionale Aspekt der Umbaubarkeit, der dazu führt, dass Gipskartonwände während des Lebenszyklus des Gebäudes zurückgebaut und neu erstellt werden, bleibt unberücksichtigt.

**Weiterhin bleibt eine systembedingte Problematik bestehen: Ein erforderlicher Austausch eines Baustoffs im Lebenszyklus kann sich positiv auswirken, wenn das Kreislaufpotenzial des Baustoffs hoch ist.**

Eine geringe Nutzungsdauer fließt also nicht per se negativ in die Bewertung ein. Wie in Kapitel 8 erwähnt, **stößt der Urban Mining Index bei der Berücksichtigung der Nutzungsdauern aufgrund seiner prozentualen Auswertung an Grenzen bzw. grundlegende Strategiekonflikte, die in der Wissenschaft bereits länger diskutiert werden** (s. Kapitel 2.1.4 „Produktivität der Strategien“). Eine möglichst lange Nutzungsdauer sollte auch für Materialien mit hohem Kreislaufpotenzial angestrebt werden. Gerade bei nachwachsenden Rohstoffen kommt es darauf an, dass die Nutzungsdauer mindestens so hoch ist wie die Umtriebszeit. Eine hohe Nutzungsdauer minimiert außerdem Prozessenergien, die per Definition außerhalb der Systemgrenzen liegen. Auf das Thema Nutzungsdauern wird noch einmal in Kapitel 10.2 eingegangen.

- **Qualitätsstufen der Kreislaufpotenziale**

Übergeordnetes Ziel ist es, Materialien in möglichst geschlossenen Kreisläufen zu führen, um einen Qualitätsverlust in der Nachnutzung zu vermeiden.

Hierfür wurden Qualitätsstufen in Anlehnung an die Hierarchie der Abfallrahmenrichtlinie definiert. **Eine Vermeidung, die in der Hierarchie am höchsten steht, kann jedoch mit dem UMI nicht abgebildet werden.** Sie ist nicht quantifizierbar und wirkt sich nur in Systematiken aus, die den Ressourcenverbrauch in absoluten Zahlen darstellen (z. B. Ökobilanz).

---

Die Hierarchiestufen Wiederverwendung, Wiederverwertung und sonstige Verwertung wurden weiter differenziert: Es wird unterschieden, ob die Materialien durch die Nachnutzung einen Qualitätsverlust erfahren oder nicht. **Durch die Abstufung der Qualitäten war es möglich, zwischen geschlossenen und offenen Kreisläufen zu unterscheiden und diese unterschiedlich zu gewichten.**

In der Post-Use-Phase wird allerdings nicht zwischen Wieder- und Weiterverwertung differenziert, da zum einen nur schwer unterschieden werden kann, ob ein Bauprodukt oder Bauteil noch einmal für denselben oder für einen anderen Zweck einsetzbar ist; zum anderen ist eine Nachnutzbarkeit unter Beibehalt der Produktgestalt ohnehin nur für wenige Baumaterialien und -produkte realistisch (s. Abb. A 5.4 auf Seite 92), da der Markt für gebrauchte Baumaterialien sehr eingeschränkt ist.

Die Unterscheidung zwischen Wieder- und Weiterverwertung (Pre-Use) und Wieder- und Weiterverwertbarkeit (Post-Use) ist dagegen relativ einfach möglich und orientiert sich an der derzeitigen Praxis. **Eine Unsicherheit bleibt allerdings auch hier: Die technologische Entwicklung wird Veränderungen herbeiführen, sodass es sein kann, dass Materialien, die heute noch vorwiegend mit Qualitätsverlust verwertet werden, zukünftig hochwertig wiederverwertet werden können.**

Die Nachnutzung in Form von Energie wird nur in der Post-Use-Phase berücksichtigt, wobei eine Differenzierung nach der Reproduzierbarkeit getroffen werden konnte (zertifiziert nachhaltig nachwachsend/nachwachsend/fossil).

#### • **Messbarkeit der definierten Parameter**

Als quantifizierbar wurden in Kapitel 5 vier Parameter identifiziert, die im Folgenden hinsichtlich ihrer Messbarkeit noch einmal kritisch beleuchtet werden (vgl. Abb. A 5.11 auf Seite 106).

#### *Die Massenanteile der Qualitätsstufen*

Die Massen der Baustoffe sind relativ einfach kalkulierbar und können den Qualitätsstufen Pre-Use auch einfach zugeordnet werden.

Zur Berechnung der resultierenden Wertstoffmassen Post-Use muss der Anwender des UMI Störstoffanteile und Schadstoffe angeben, die eine Verwertung einschränken oder unmöglich machen. **Hier ist noch weitere Forschung erforderlich, da es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, maximale Störstoffanteile für diverse Sekundärbaustoffe zu ermitteln.**

Zur Berücksichtigung recyclingeingeschränkender Schadstoffgehalte konnte eine Aufstellung der DGNB verwendet werden, die in das Anwendungstool integriert wurde. **Der Aufwand für den Ausschluss von Schadstoffen kann trotzdem hoch sein,** da der Anwender für schadstoffrelevante Produkte in Produkt- oder Sicherheitsdatenblättern von Herstellern recherchieren muss, ob Schadstoffe enthalten sind.

Die Zuordnung der Wertstoffe zu den Qualitätsstufen Post-Use ist relativ komplex. Die Komplexität wird aber für den Anwender vereinfacht, indem die Baumaterialien per Dropdownmenü definierten Wertstoffgruppen zugewiesen werden (s. Abb. A 6.4 auf Seite 113). Die Zuweisung der Massen zu den verschiedenen Qualitätsstufen erfolgt dann im

Hintergrund. Die Vereinfachung für den Anwender hat aber den Nachteil, dass die Berechnung nicht leicht nachvollziehbar ist. Hier stand die Anwenderfreundlichkeit im Vordergrund, da sie eine Grundvoraussetzung für die Verbreitung des Urban Mining Index ist (s. Seite 297).

Generell lässt sich diskutieren, ob die Masse die geeignete Basis für die Berechnung und Bewertung der Kreislaufpotenziale ist. Alternativ könnte auch das Volumen<sup>106</sup> von Baustoffen als Basis herangezogen werden – wie im Entsorgungsindikator des IBO (s. Kapitel 4.3.2). Das IBO [232] begründet die Kalkulation nach Volumen damit, dass in vielen Teilbereichen der Entsorgung (Lagerung, Transport, Deponierung) das Volumen maßgeblich ist. **Der UMI ist jedoch auf die zirkuläre Verwendung von Materialien ausgerichtet und dabei ist in erster Linie die Masse maßgeblich.** So beziehen sich z. B. die meisten Rohstoffpreise auf die Masse. Viele leichte Baustoffe enthalten Luft (z. B. Dämmstoffe), die bei einer Bewertung nach Volumen mitgemessen würde, aber bei der Verwertung entweicht. **Aufgrund der Bewertung nach Massenanteilen ist bei der Anwendung des UMI zu berücksichtigen, dass sich schwere Baustoffe stärker im Ergebnis niederschlagen als leichte.**

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

Der maximale Recyclinganteil im Neuprodukt – das MLP – liegt für eine Reihe von Baumaterialien vor, muss aber vom Anwender im Atlas Recycling recherchiert werden. Eine Integration der Daten in eine zukünftige Online-Anwendung in Abstimmung mit Hillebrandt/Seggewies würde die Anwenderfreundlichkeit erhöhen. **Die Datenbasis muss zudem fortlaufend erweitert werden.** Eine Aufnahme des MLP in Umweltproduktdeklarationen (EPDs) wäre sinnvoll und kann z. B. bei der *ECO Platform*<sup>107</sup> angeregt werden.

#### *Der Wert der zurückzugewinnenden Stoffe (Koeffizient Faktor Wert)*

Die durchschnittlichen monetären Werte von Abbruchmaterialien an der Schnittstelle Abbruchunternehmen/Entsorger konnten im Rahmen einer deutschlandweiten Umfrage erhoben werden. Mit bis zu 36 teilnehmenden Entsorgern kann die Umfrage als repräsentativ bezeichnet werden. **Sie muss jedoch von Zeit zu Zeit erneuert und erweitert werden,** um Preisänderungen für zukünftige Anwendungen des UMI zu berücksichtigen. Die Werte wurden auf einer Skala eingeordnet, die mit Faktoren hinterlegt ist. In Kombination mit den Faktoren für den Rückbauaufwand spiegeln sie die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus wider. Durch Multiplikation der Masse eines Wertstoffs mit den jeweiligen Faktoren ergibt sich die Zuordnung der Massen zu der materialspezifischen hochwertigsten Qualitätsstufe.

**Die Schwierigkeit bei einer Bewertung der Wirtschaftlichkeit besteht in der Prognostizierung über relativ lange Zeiträume: So kann sich der**

106 Masse und Volumen sind grundlegende Eigenschaften von Materialien. Der Begriff Material kommt von „Materie“ (lateinisch *materia* = Stoff). In der Physik ist Materie alles, was eine Masse besitzt – im Gegensatz zum Vakuum, einem Raum (Volumen) ohne Materie.

107 Die ECO Platform [233] ist eine vom deutschen Institut Bauen und Umwelt e.V. initiierte Non-Profit-Organisation, die sich als Dachorganisation der nationalen EPD-Programmhälter für die Schaffung eines europäischen Kern-EPD-Systems einsetzt.

---

Wert von Abbruchmaterialien als Sekundärrohstoff mit zunehmender Rohstoffknappheit, Änderungen rechtlicher Rahmenbedingungen und Weiterentwicklung der Recyclingtechnologien stark ändern. Daneben gibt es weitere Aspekte, die die Wirtschaftlichkeit der Verwertung beeinflussen, allen voran die Transportkosten zum Verwerter.

Letztere können insbesondere bei der Hersteller- oder Verbandsrücknahme eine große Rolle spielen. Bei dieser Wertstoffgruppe könnten durchschnittliche Transport-Mehrkosten anstelle eines Entsorgungspreises angesetzt werden. Solange aber keine Sammelstellen bestehen, sind diese Transport-Mehrkosten kaum zu beziffern.

Trotz dieser Ungewissheiten ist der heutige Preis für Wertstoffe ein Anhaltspunkt, der für eine grobe Prognose der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus genutzt werden kann. Die Berücksichtigung des Parameters Wert im UMI fördert die Kreislauffähigkeit von Baustoffen, da mit hochwertigen, nachnutzbaren Wertstoffen ein besseres Ergebnis erzielt wird. So regt der hohe Faktor Wert für die Hersteller- oder Verbandsrücknahme (Faktor 1,0) eben diese Kreise dazu an, Post-Consumer-Material zurückzunehmen, um daraus neue Produkte herzustellen.

#### *Der Rückbauaufwand (Koeffizient Faktor Arbeit)*

Die Ermittlung des Rückbauaufwands für diverse Baukonstruktionen war ein Kernelement dieser Arbeit. Durch empirisch-experimentelle Forschung und durch Zusammenführung der Ergebnisse mit Daten anderer Wissenschaftler (Schultmann et al., Graubner et al.) konnte eine Datenbasis für einen bewerteten Bauteilkatalog geschaffen werden.

**Dieser Bauteilkatalog kann jedoch nur einen Anfang darstellen. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Konstruktionen und ständiger Neuentwicklungen ist es sinnvoll bzw. erforderlich, diesen fortlaufend zu ergänzen.**

Die Messbarkeit der physikalischen Größe Arbeit in Form von Energie als Maßeinheit ist grundsätzlich gegeben. Die Maßeinheit setzt an der Basis des Rückbauaufwands an und nicht auf der höheren Ebene der Kosten.

**Dies bietet den Vorteil, dass Personen- und Maschinenaufwand nicht in Kosten umgerechnet werden müssen, die regional sehr unterschiedlich sein können und aufwendig zu ermitteln sind.**

Das Verfahren birgt jedoch die Gefahr von Ungenauigkeiten: Dem Parameter Arbeit liegt die Bruttoarbeit zugrunde. Die technologische Entwicklung wird zu höherer Effizienz von Abbruchmaschinen führen, was das Verhältnis von Bruttoarbeit zu Nettoarbeit stark verbessern kann, sodass heute gebaute Konstruktionen beim Rückbau einen weit geringeren Arbeitsaufwand (brutto) erfordern könnten. Die Kosten für effiziente Maschinen werden eine zunehmende Rolle spielen.

Die Wirtschaftlichkeit des Rückbauaufwands, gemessen anhand einer monetären Vergleichsgröße könnte mittelfristig in den Urban Mining Index integriert werden. Ein Forschungsvorhaben von Helmus [234] zur Erstellung eines Abbruchkosten-Index wurde 2019 genehmigt und kann eine Datenbasis für die Weiterentwicklung des UMI liefern. Eine Fortschreibung des Abbruchkosten-Index (ähnlich dem Baukosten-Index – BKI) würde gleichzeitig die Datenbasis verbessern.

Trotz etwaiger Ungenauigkeiten fördert die Berücksichtigung des Rück-

bauaufwands in der quantitativen Bewertung die kreislaufgerechte Planung von Baukonstruktionen. Die gesammelten Erfahrungen auf Rückbaustellen (s. Kapitel 6.3 und 9.1.4) haben die eingangs formulierten Thesen (s. Seite 14) bestätigt, wonach ein geringer Aufwand für den Rückbau und die sortenreine Trennung die Wahrscheinlichkeit für eine hochwertige Nachnutzung erhöhen, während ein hoher Aufwand einschränkend wirkt.

Generell führt die Einteilung der Parameter Wert und Arbeit auf einer abgestuften Skala zu groben Faktoren. Eine detailliertere Bewertung wäre möglich durch Interpolation zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Zahlenwert der jeweiligen Skala. Dies würde jedoch eine Genauigkeit suggerieren, die aufgrund der dargelegten Aspekte nicht gegeben ist.

- **Eignung der Bewertungsebenen**

Die Bewertung geht im Urban Mining Index bis auf die Rohstoffebene hinunter. Dies ist auch sinnvoll, da die Kreislauffähigkeit von Materialien auf dieser Ebene entschieden wird, was die Begriffe Primärrohstoff und Sekundärrohstoff verdeutlichen. Die Bewertung zieht sich durch Bauteilschichten über Bauteile bis hin zum ganzen Gebäude. Auf der Ebene von Bauteilschichten wird mit dem entwickelten Exceltool jeweils 1 m<sup>2</sup> Bauteilfläche bewertet. Dies ist in frühen Planungsphasen, wenn die Leitdetails entwickelt werden, sehr sinnvoll, da in dieser Phase wichtige Entscheidungen zur Auswahl der Materialien und ihrer Fügung getroffen werden.

**Die Berechnung für 1 m<sup>2</sup> Bauteilfläche und Multiplikation der Ergebnisse mit den Flächen hat aber einen Nachteil: Die Ergebnisse auf Gebäudeebene weisen gewisse Ungenauigkeiten auf**, da die innere Flächengröße von Bauteilen der Gebäudehülle nicht mit der äußeren Flächengröße übereinstimmt, genauso wie die konstruktive Deckenfläche nicht mit der Fläche von Belägen und Bekleidungen übereinstimmt. Die Ungenauigkeiten sind jedoch aus Sicht der Verfasserin akzeptabel, wenn der UMI zur Optimierung der Planung genutzt wird, da es dann nicht auf eine hundertprozentige Genauigkeit ankommt.

Zur nachträglichen Bewertung eines fertigen Bauwerks, z.B. im Rahmen einer Gebäudezertifizierung (s. Seite 299), können die Tabellenblätter in dem entwickelten Exceltool auch zur Berechnung von jeweils 1 m<sup>2</sup> Bauelementfläche in der 3. Ebene nach DIN 276 (s. Abb. A 7.2 auf Seite 157) genutzt werden, was ein genaueres Ergebnis für das Gesamtgebäude ermöglicht.

- **Anwendbarkeit und Darstellung**

Ziel war es, mit dem Urban Mining Index ein Werkzeug zu schaffen, das Architekten und Ingenieuren als praktikables Planungsinstrument zur Bewertung der Kreislauffähigkeit konkreter Gebäudeplanungen dienen kann. Auch wenn die in dieser Dissertation beschriebene Systematik recht komplex ist – was der objektiven Bewertung durch Einbeziehung diverser Parameter geschuldet ist –, ist die Anwendung des UMI-Tools relativ einfach und überschaubar, da viele Rechenoperationen und Zuordnungen automatisiert wurden. Die Anwendung durch Studierende der Universität Wuppertal (s. Kapitel 7.4) hat zu Verbesserungen geführt

---

und insgesamt plausible Ergebnisse geliefert. Schwierigkeiten hatten die Studierenden teilweise mit der Beschaffung benötigter Daten, z. B. dem Material-Recycling-Content oder dem Material-Loop-Potenzial. Sofern diese nicht aus dem Atlas Recycling oder Produktinformationen der Hersteller hervorgehen, müssen sie beim Hersteller angefragt werden. Weiterhin war für die Studierenden die Einschätzung des Rückbauaufwands aufgrund der begrenzten Datenbasis nicht immer einfach. Dies konnte mit der Erweiterung des Bauteilkatalogs von 36 auf 131 Konstruktionen nach Auswertung der Daten anderer Wissenschaftler verbessert werden.

Die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Footprints der Konstruktion ist mit einem Exceltool gegenüber einer Ökobilanz-Software recht aufwendig, wenn die Datenbasis nicht im Tool hinterlegt ist. Die Daten aus der Ökobaudat wurden nicht in das UMI-Tool integriert, da die Ökobilanzierung zum einen nicht Hauptziel des UMI ist und zum anderen die Implementierung einer Schnittstelle zur Ökobaudat in eine noch zu entwickelnde UMI-Online-Anwendung wesentlich einfacher ist.

Sowohl die Teilergebnisse einzelner Parameter als auch das Gesamtergebnis werden in grafisch visualisierter Form dargestellt.

Das Gesamtergebnis – der Urban Mining Indicator – wird als Prozentwert in einem Kreisdiagramm visualisiert und ist damit eindeutig und leicht ablesbar.

**Die grafische Darstellung der Kreislaufpotenziale auf Bauteilebene ist für den Anwender hingegen nicht so einfach nachvollziehbar wie gewünscht.**

Dies liegt an der Komplexität der Rechenoperationen, wie z. B. der Aufteilung einzelner Wertstoffe auf verschiedene EoL-Qualitätsstufen, bedingt durch die Berücksichtigung zweier EoL-Szenarien (hochwertige Nachnutzung und übliche Nachnutzung). Die Komplexität ist also der Einbeziehung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus geschuldet. Die Abbildung aller Materialien eines Bauteils in den Kreislaufdiagrammen, geordnet nach Qualitätsstufen, wäre zu kleinteilig und kaum noch lesbar, wie das erste Beispiel in Kapitel 8 auf Seite 190 zeigt.

**Mit den entwickelten Kreislaufdiagrammen wurde letztlich ein Kompromiss gefunden: In erster Linie sollen die Ergebnisse der Qualitätsstufen ablesbar sein, um nachvollziehen zu können, welche Anteile der Gesamtkonstruktion in geschlossenen oder offenen Kreisläufen geführt werden können. Für den Anwender des Tools sind die Kreislaufpotenziale auf Materialebene dennoch erkennbar, wenn auch nur als ausgewiesene Zahl (s. Kapitel 7, Abb. A 7.11 h auf Seite 181). So können Schwächen oder Stärken einer Planung trotzdem schnell auf die Kreislaufeigenschaften bestimmter Materialien oder deren Fügung zurückgeführt werden.**

Bei der grafischen Darstellung der Ergebnisse stößt ein Exceltool für eine solch komplexe Anwendung insgesamt gesehen an Grenzen. Das Hinzufügen oder Löschen von Zeilen in Excel führt leicht zu Fehlerausweisungen in den Diagrammen. Die Anwenderfreundlichkeit des UMI kann durch eine nutzerorientierte Software oder Online-Anwendung (z. B. mit grafisch visualisiertem Bauteilaufbau, ähnlich dem Ubakus von Plag [235] oder der eLCA-Software des BBSR [236]) noch verbessert werden. Dies ist aber nicht Aufgabe der Wissenschaft.

- **Eignung für Zertifizierungssysteme**

Der UMI kann von Gebäudezertifizierungssystemen (s. Kapitel 4.1) für eine quantitative Bewertung der Rückbau- und Recyclingfähigkeit genutzt werden.

Im BNB-System wird bisher nur die Post-Use-Phase des zirkulären Bauens abgebildet. Insofern bietet die komplette Bewertung mit dem UMI eine gute Möglichkeit, das Kriterium „Rückbau, Trennung und Verwertung“ durch ein Kriterium „Kreislaufpotenziale“ oder „Zirkularität“ zu ersetzen. Die bisherigen inhaltlichen Ziele des Kriteriums werden durch den UMI vollständig abgebildet. Darüber hinaus kann zukünftig die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus in der Bewertung berücksichtigt werden, die, wie in Kapitel 1.4 beschrieben, entscheidenden Einfluss auf das Kreislaufpotenzial eines Bauwerks hat. Der Urban Mining Indicator passt ohne Veränderung in das 100-Punkte-Schema des BNB-Systems.

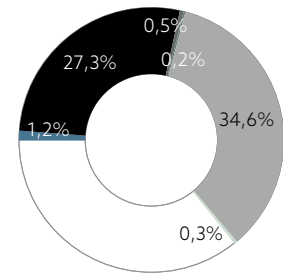
Im DGNB-System wird die Verwendung von Sekundärrohstoffen und zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen bereits im Kriterium ENV1.3 „Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung“ berücksichtigt. Um eine Doppelbewertung zu vermeiden, könnte nur die Post-Use-Phase des UMI im Kriterium TEC1.6 Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit angewandt werden. Die Abbildung A 10.2 zeigt das Ergebnis der Post-Use-Phase für das Modellprojekt Rathaus Korbach mit der Gewichtung der offenen Kreisläufe von 0,5.

Eine andere Möglichkeit wäre, Teile der Kriterien des ENV1.3 mit dem TEC1.6 zu vereinen und durch ein Kriterium „Circularity“<sup>108</sup> zu ersetzen. Im Kriterium ENV1.3 könnten weitere Aspekte der verantwortungsvollen Beschaffung verbleiben (z.B. verantwortungsbewusste Gewinnung nicht erneuerbarer Primärrohstoffe).

Der Urban Mining Index kann darüber hinaus Grundlagen für die Berechnung der bisher in den Zertifizierungssystemen nicht berücksichtigten EoL-Kosten in der Lebenszykluskostenberechnung liefern. Entweder können die Systeme die erarbeitete Datenbasis zur Ermittlung von Entsorgungskosten und Verwertungserlösen nutzen (s. Kapitel 6, Abb. A 6.4) und in eigene Berechnungstools integrieren, oder mit dem UMI-Tool werden auf Bauteilebene die Kosten und Erlöse unter Berücksichtigung möglicher Verschmutzungen direkt prognostiziert und nur noch in bestehende LCC-Tools der Systeme übertragen. Die Prognose von Rückbaukosten ist dagegen mit dem UMI nicht möglich, solange eine Weiterentwicklung mit dem Abbruchkosten-Index (s. Seite 296) aussteht.

**Insgesamt kann der Schluss gezogen werden, dass die Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen mit dem Urban Mining Index objektiv gemessen werden können, auch wenn Unsicherheiten oder Ungenauigkeiten in der Bewertung bleiben.**

**Der UMI bietet Planern ein leicht handhabbares Instrument zur Bewertung von Planungsalternativen mit einfach ablesbaren Ergebnissen. Auch für Zertifizierer ist der UMI eine gute Möglichkeit zur objektiven Bewertung der Circular-Economy-Aspekte.**



Kreislaufpotenzial, Post-Use, gewichtet 64,1%

A 10.2 Bewertung der Kreislauffähigkeit Post-Use (gewichtet) für das Modellprojekt Rathaus Korbach

108 In Anlehnung an den Sprachgebrauch der DGNB wird der englische Begriff verwendet.

---

## 10.2. Beitrag des Urban Mining Index im Forschungskontext zirkuläres Bauen

Grundsätzlich fördert eine quantitative Bewertung der Kreislaufpotenziale von Bauwerken die Bemühungen der Wirtschaft, kreislauffähige Bauprodukte zu entwickeln, da bei entsprechender Nachfrage eine Wettbewerbssituation entsteht. Die quantitative Bewertung kann also wichtige Impulse für die industrielle Forschung setzen.

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, haben sich in den letzten Jahren mehrere wissenschaftliche und gemeinnützige Institutionen mit der Bewertung der Rückbau- und Recyclingfähigkeit von Baukonstruktionen auseinandergesetzt. Bisher gab es jedoch keine wissenschaftliche Methode, die die Qualität der Nachnutzung berücksichtigt und die den Rückbauaufwand, basierend auf praxisnahen wissenschaftlichen Erhebungen, in einer quantitativen Bewertung abbildet.

**Der Urban Mining Index ist damit die erste Methode zur Messung von Zirkularitätsraten für Gebäude, die die Qualität der Nachnutzung und den Aufwand für den Rückbau und die sortenreine Trennung der Wertstoffe am Ende der Nutzungsdauer angemessen berücksichtigt.**

Darüber hinaus ist der UMI die erste Systematik, die die Grenzen der Kreislaufführung von Baustoffen in Form von materialspezifischen Recyclingpotenzialen (Material-Loop-Potenzial – MLP) berücksichtigt. Grundsätzlich kann darüber diskutiert werden, ob der maximale Recyclinganteil im Neuprodukt, in Zeiten, wo dieser Anteil mangels ausreichend verfügbarer Sekundärrohstoffe für die meisten Baumaterialien nicht erreicht wird, überhaupt in die Bewertung einbezogen werden sollte. Auch wird sich mit besseren Recyclingverfahren das MLP von Produkten in Zukunft erhöhen. Nach Ansicht der Verfasserin ist das MLP ein nicht zu vernachlässigender Parameter im zirkulären Bauen, da die heutigen Neubauvorhaben erst in ferner Zukunft zum Rückbau anstehen. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Entwicklung des anthropogenen Rohstofflagers (s. Kapitel 3.5) könnte bereits in rund 30 Jahren der Peak erreicht sein, an dem mehr Wertstoffe aus dem Rückbau anfallen, als für neue Bauprodukte benötigt werden. Die Einbeziehung des MLP im UMI führt somit vor Augen, welcher Anteil voraussichtlich auf Deponien landen oder minderwertig weiterverwertet werden wird. Außerdem treibt die Berücksichtigung des MLPs die Bauindustrie an, Recyclingverfahren weiter zu optimieren.

Eine praxisorientierte Systematik zur Ermittlung von Zirkularitätsraten für Gebäude ist parallel zur Entwicklung des Urban Mining Index entstanden: der Madaster Circularity Indicator (s. Kapitel 4, Seite 87).

Beide Systeme streben ein Ziel an: die zirkulären Eigenschaften von Gebäuden durch Optimierung der Planung zu verbessern.

Im Madaster CI werden die zuvor genannten Aspekte (Qualität der Nachnutzung, Rückbauaufwand, MLP) nicht abgebildet. Die für den UMI erarbeiteten Grundlagen, vor allem die empirischen Untersuchungen zum Rückbauaufwand und die differenzierten Qualitätsstufen, könnten für

eine Weiterentwicklung des Madaster CI genutzt werden. Außerdem kann die für den UMI durchgeführte (und regelmäßig zu aktualisierende) deutschlandweite Erhebung von Verwertungskosten und -erlösen eine gute Datenbasis für die Madaster Datenbank sein: Für die dort registrierten deutschen Immobilien kann der aktuelle Materialwert anhand der Datenbasis aus dem UMI beziffert werden.

Anders als im Madaster CI wirken sich kurze Nutzungsdauern von Produkten mit hohem Kreislaufpotenzial – entgegen einem anzustrebenden Suffizienzgedanken – positiv im Urban Mining Index aus.

Im Madaster CI liegt die Lösung darin, dass nicht direkt die Zirkularitätsrate berechnet wird, sondern – genau andersherum – der lineare Anteil der Materialflüsse (Linear Flow Index, s. Kapitel 4.3, Seite 81).

Dabei wird dieser lineare Anteil mit einem Faktor multipliziert, der den Einfluss der Nutzungsdauer abbildet. Ist die Nutzungsdauer eines linearen Produkts kürzer als die durchschnittliche Nutzungsdauer eines funktional vergleichbaren Produkts steigt der Anteil linearer Materialflüsse entsprechend. Die Zirkularitätsrate wird berechnet, indem die lineare Rate von 100% abgezogen wird. Auf diese Weise wird durch den Austausch von zirkulären Produkten im Lebenszyklus nicht die Gesamtmasse und der Anteil kreislauffähiger Materialien erhöht.

Das Verfahren ist nicht auf den UMI übertragbar, da im UMI zwischen geschlossenen und offenen Kreisläufen unterschieden wird. Außerdem können lineare Stoffflüsse als Basis der Berechnung weder mit einem Material-Loop-Potenzial noch mit den Wirtschaftlichkeitsfaktoren Arbeit und Wert in Beziehung gesetzt werden.

Sollte der UMI als wissenschaftliche Methode zur Berechnung von Kreislaufpotenzialen angenommen werden, wäre eine Zusammenarbeit in der Forschung zwischen den beteiligten Institutionen der Madaster Foundation und der Universität Wuppertal erstrebenswert. Ziel sollte es sein, eine europaweit einheitliche Methode zur quantitativen Bewertung der zirkulären Eigenschaften von Bauwerken zu entwickeln.

## 10.3. Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse in verwandten Forschungsfeldern

### 10.3.1. Verwendbarkeit in der Forschung zur Ökobilanzierung

Die durchgeführten Variantenvergleiche haben gezeigt, dass die kreislaufoptimierten Konstruktionen (fast) immer auch diejenigen mit dem geringeren CO<sub>2</sub>-Footprint sind. Allerdings wurde das Treibhauspotenzial nach den gültigen Normen, insbesondere DIN 15804 für Bauprodukte und DIN 15978 für Gebäude, mit Daten aus der Ökobaudat oder Umweltproduktdeklarationen berechnet. Die Einbausituation im Gebäude und die sortenreine Trennbarkeit blieben somit bei der Berechnung der Gutschriften und Belastungen für den nächsten Lebenszyklus (Modul D) unberücksichtigt. Weiterhin wurde der heute übliche Entsorgungsweg bilanziert, für Holz z. B. die energetische Verwertung. Die Effekte des kreislaufgerechten Bauens können damit nur unzureichend abgebildet werden. Wenn die sortenreine Trennbarkeit der Materialien berücksichtigt werden könnte, würden sich möglicherweise Änderungen im CO<sub>2</sub>-Footprint der Varianten ergeben.

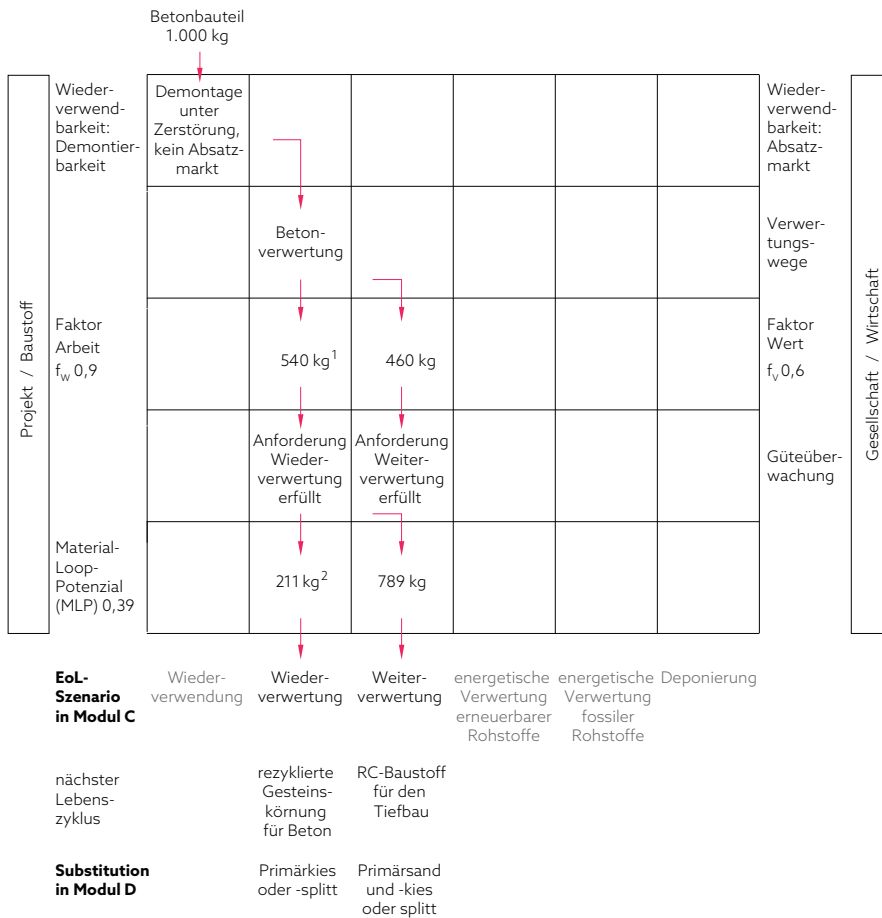
Um die Einbausituation und die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus zu berücksichtigen, bedarf es unterschiedlicher Szenarien für das Ende der Nutzungsdauer. Genauso wie bei der Berechnung der Kreislaufpotenziale den Materialien verschiedene Verwertungswege zugewiesen werden, können auch im Modul D für die Umweltwirkungen verschiedene Verwertungswege abgebildet werden. Vereinzelt existieren bereits Ökobilanzdaten für unterschiedliche End-of-Life-Szenarien auf Bauproduktenebene. Allerdings kann der Ökobilanzierer nicht ohne Weiteres abschätzen, welches EoL-Szenario eintreten wird.

Mit Förderung des Umweltbundesamtes arbeitet zurzeit ein Forscherteam unter der Leitung von Trinius [237] an der Weiterentwicklung methodischer Grundlagen und Szenarien für die Bereitstellung produktbezogener Informationen in Modul C und D einer Umweltproduktdeklaration (EPD). Die Verfasserin hat im November 2017 an einem von drei für das Forschungsprojekt durchgeführten Workshops in Brüssel teilgenommen. Ziel war unter anderem die Erarbeitung von Parametern zur Bestimmung materialspezifischer 100%-EoL-Szenarien.<sup>109</sup> Die Teilnehmer waren sich weitgehend einig, dass anteilige EoL-Szenarien nur auf Gebäudeebene entschieden werden können und dass hierfür die notwendigen Grundlagen fehlen.

#### **Der Urban Mining Index liefert nun die Grundlagen für die anteilige Berücksichtigung von EoL-Szenarien in der Ökobilanzierung.**

Abbildung 10.2 zeigt die Systematik des Urban Mining Index (Post-Use-Phase) am Beispiel eines Betonbauteils und weist auf die Überführung der Ergebnisse in die Ökobilanz hin. In der Grafik werden die Bewertungsparameter nach projektspezifischen und gesellschaftlich/wirtschaftlich bedingten Einflussgrößen geordnet dargestellt, wie von Trinius et al. im

<sup>109</sup> Für die drei beispielhaften Materialien Beton, Dämmstoffe und Fenster sollten Parameter entwickelt werden, die bestimmen, unter welchen Voraussetzungen (z. B. Schadstoffgehalte, Verunreinigungen) ein EoL-Szenario (Recycling, energetische Verwertung, Deponierung) entweder relevant oder eben nicht relevant ist (100% oder 0%).



A 10.3 Systematik des UMI am Beispiel eines Betonbauteils (Post-Use-Phase) mit Überführung der Ergebnisse in die Ökobilanz [239]

$$^1 1.000 \text{ kg} \times f_w 0,9 \times f_v 0,6 = 540 \text{ kg}$$

$$^2 540 \text{ kg} \times \text{MLP } 0,39 = 211 \text{ kg}$$

Die Grafik wurde vorveröffentlicht in Hillebrandt/Riegler-Floors/Rosen/Seggewies, Atlas Recycling, Edition Detail, München 2018, und seitdem überarbeitet

zuvor genannten Forschungsprojekt vorgeschlagen wurde. Anwender von Umweltproduktdeklarationen könnten so zukünftig Daten für unterschiedliche EoL-Szenarien mit dem Urban Mining Index quantifizieren. Im Beispiel des Betonbauteils würden unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert sowie des Material-Loop-Potenzials im Modul C 21,1% mit dem Datensatz für die Wiederverwertung und 78,9% mit dem Datensatz für die Weiterverwertung bilanziert. Somit könnten Umweltwirkungen unterschiedlicher Verwertungsprozesse (z.B. zusätzliche Siebung für die Aufbereitung zur Wiederverwertung oder eine Nasaufbereitung) abgebildet werden. Im Modul D können die Gutschriften für die unterschiedlichen Szenarien abgebildet werden: Der Anteil hochwertig aufzubereitender RC-Gesteinskörnung für Beton (21,1%) kann im nächsten Lebenszyklus Primärkies oder -splitt ersetzen. Der für den Tiefbau aufzubereitende Betonbruch (78,9%) ersetzt dort Primärsand und -kies oder -splitt. Leider liegen noch keine Ökobilanzdaten für die beschriebenen Szenarien vor, sodass die Ergebnisse hier nicht dargestellt werden können.<sup>110</sup> Im Beispiel des Betons werden die Unterschiede in der Umweltwirkung nicht allzu groß sein, da sich die Aufbereitungsprozesse und die substituierten Primärmaterialien nicht sehr unterscheiden. Allerdings bezieht sich die Prognose auf den heutigen Stand der Technik. Wenn es der Forschung

110 Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts von Trinius et al. [238] wurde die Idee einer End-of-Life-Deklaration entwickelt. Damit soll die Recycling- und Entsorgungsbranche aufgefordert werden, die Bedingungen für spezifische EoL-Szenarien zu definieren und spezifische Umweltdaten bereitzustellen, die in eine EPD für Bauprodukte integriert werden können. Ein Endbericht ist bisher nicht veröffentlicht.

---

gelänge, Verfahren für die Rückgewinnung von Zement aus Zementstein zu entwickeln, wären die Unterschiede in der Umweltwirkung für die Substitution erheblich größer. Es bleibt also eine nicht zu vernachlässigende Unsicherheit in der Prognose.

Dennoch schließt die Berechnung der Kreislaufpotenziale Post-Use eine Lücke bei der Anwendung produktbezogener Ökobilanzdaten und Szenarien auf Gebäudeebene. Der Urban Mining Index kann damit nicht nur die Ökoeffektivität abbilden, sondern leistet auch einen Beitrag zur Berechnung der Ökoeffizienz.

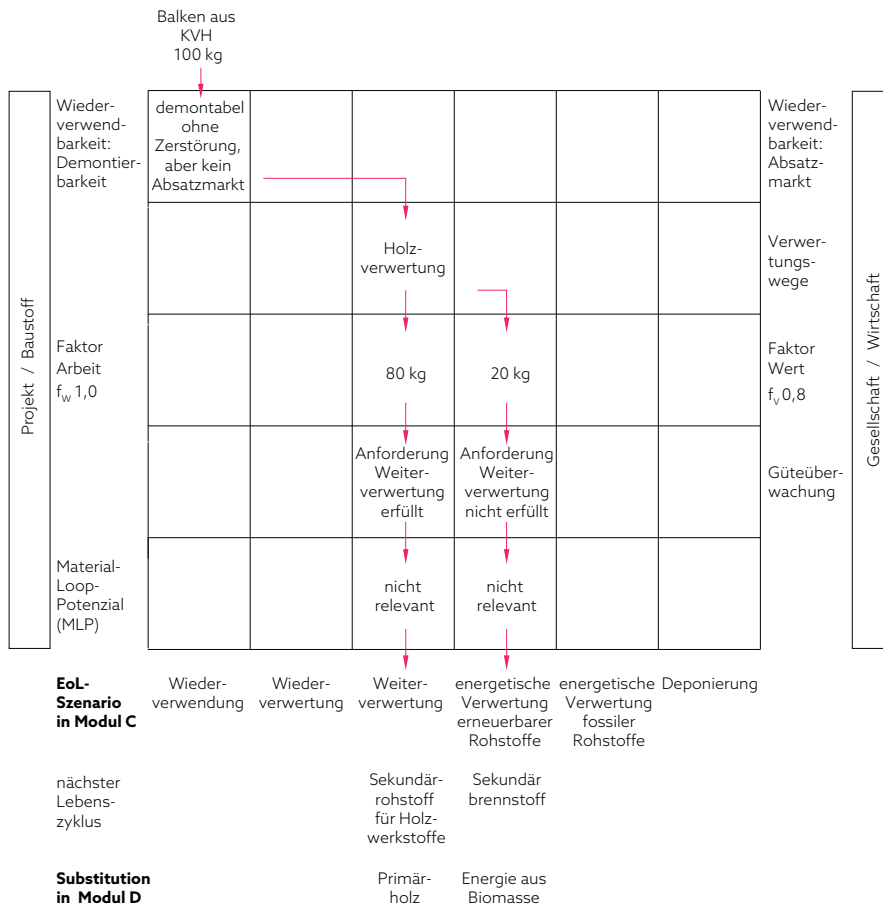
**Es gibt aber noch einen Aspekt, der in der Ökobilanzierung bisher nicht gelöst ist und weiterer Forschung bedarf: Die Vorteile der Kaskadennutzung sind nach den derzeit gültigen Normen nicht abbildbar.**

Eine Ökobilanz, in der für Holz das EoL-Szenario stoffliche Verwertung gewählt wird, schneidet in der Bewertung nach DGNB (in der das Modul D mitbewertet wird) schlechter ab als eine Bilanz, in der das EoL-Szenario energetische Verwertung gewählt wird. Für das stoffliche Recycling erfolgt eine wesentlich geringere Gutschrift als für die energetische Verwertung (s. Kapitel 2, Abb. A 2.11, Seite 31).

Dies liegt zum einen daran, dass die Kohlenstoffbilanz nach den Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe gemäß DIN EN 16485 immer ausgeglichen sein muss und der Kohlenstoff deshalb in Modul C das Produktsystem verlässt, auch wenn das Holz nicht am Ende des Lebenszyklus, sondern erst im nächsten oder übernächsten verbrannt wird. Zum anderen wird davon ausgegangen, dass die Verbrennung von Altholz die Verbrennung fossiler Energieträger substituiert, während bei der stofflichen Verwertung ‚nur‘ Primärholz substituiert wird, das einen kleineren ökologischen Rucksack hat, also in der Herstellung geringere negative Umweltwirkungen verursacht.

Durch den klimapolitisch geplanten Ausstieg aus der Verbrennung fossiler Energien ist dieser Ansatz aus Sicht der Verfasserin nicht mehr gerechtfertigt, da das beim Rückbau heutiger Neubauvorhaben anfallende Altholz keine fossilen Energieträger mehr substituieren wird, wenn die politischen Ziele mit der notwendigen Ernsthaftigkeit verfolgt werden. Altholz wird dann (zumindest in Deutschland) nur noch erneuerbare Energien substituieren, also Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie und Biomasse. In Abbildung A 10.4 sind deshalb noch einmal die Systematik des UMI (Post-Use) und die Überführung der Ergebnisse in die Ökobilanz am Beispiel eines Holzbauteils dargestellt.

Da die energetische Nutzung von Biomasse durch Verbrennung unzweifelhaft höhere Treibhausgasemissionen verursacht als die Nutzung der übrigen erneuerbaren Energieträger, bzw. sich der Energieeinsatz für deren Herstellung schneller amortisiert, sollte Biomasse nachrangig energetisch genutzt werden. Die längere Speicherung des biogenen Kohlenstoffs durch stoffliche Verwertung sollte dagegen Vorrang haben. **Die stoffliche Verwertbarkeit muss bereits heute gelenkt und geplant werden.** Die Normenreihe zum Nachhaltigen Bauen kann ihre Lenkungswirkung nur entfalten, wenn die Substitutionsmöglichkeiten an die klimapolitisch bedingte Entwicklung angepasst werden.



A 10.4 Systematik des UMI am Beispiel eines Holzbauteils (Post-Use-Phase) mit Überführung der Ergebnisse in die Ökobilanz

Mit den berechneten Kreislaufpotenzialen Post-Use (80% Weiterverwertung und 20% energetische Verwertung) können zukünftig die Umweltwirkungen der EoL-Szenarien in der Ökobilanzierung anteilig berechnet werden.

Ideal wäre es, wenn die zeitliche Dimension, die bei der Kaskadennutzung eine wesentliche Rolle spielt, in der Normung abgebildet werden könnte. Wie dies geschehen kann, ist Aufgabe weiterer Forschung.

### 10.3.2. Verwendbarkeit in der Forschung zu Lebenszykluskosten

Die Forschungsergebnisse können weiterhin auf dem Gebiet der Ökonomie des Planens und Bauens genutzt werden.

Mit dem UMI können auf Materialebene die Nachnutzungsmöglichkeiten bzw. die voraussichtlichen Verwertungswege und deren Anteile nach Masse prognostiziert werden. Damit können die Entsorgungskosten und Verwertungserlöse für die jeweiligen Anteile aus heutiger Sicht geschätzt werden.

Gegebenenfalls können die erhobenen und recherchierten Daten zum Rückbauaufwand ebenfalls in der Forschung weiter verwendet werden, indem diese mit Kosten hinterlegt werden. Hierfür müssen z. B. Nutzungskosten für Maschinen ermittelt werden, die mit den Rückbaudauern bzw. der Einsatzzeit der Maschinen zusammengeführt werden.

Diese Daten können aber nur einen Teil der Rückbaukosten abbilden. Weitere Kosten für Logistik, Sicherheit etc. sind stark projektabhängig, wie die Recherchen auf Rückbaustellen (s. Kapitel 6.3) gezeigt haben.

Der von Helmus et al. zu entwickelnde Abbruchkostenindex könnte anhand von Vergleichsprojekten solche spezifischen Rückbaukosten abbilden.

Das zirkuläre Bauen bleibt somit ein weites Feld für weitere Forschung.

---

## 10.4. Schlusswort

Auch wenn viele Aspekte des zirkulären Bauens aufgrund der langen Zeiträume von der Planung bis zum Rückbau nicht vorhersehbar sind, muss die Forschung eine Annäherung an die Quantifizierung und die Qualität der zurückzugewinnenden Ressourcen wagen. Auch andere Instrumente im Bauwesen, wie die Energieeinsparverordnung und die Werkzeuge zur Berechnung des Energiebedarfs, liefern keine genauen Daten zum tatsächlichen Verbrauch. Noch weniger kann die Ökobilanz verlässliche Zahlen über tatsächliche Emissionen über 50 Jahre liefern, da sich wahrscheinlich alleine schon die Quellen des deutschen Stroms in diesem Zeitraum stark ändern werden.

**Die quantitativen Instrumente haben aber eines geschafft: Sie machen die Themen fassbar und können das Optimierungspotenzial aufzeigen. Sie bewirken vor allem eine Veränderung in den Köpfen der Planer.**

Das energieeffiziente Bauen hat sich so zur Selbstverständlichkeit entwickelt. Nun muss die Baubranche den Blick auf die Ressourcen erweitern und neben den energetischen auch die stofflichen Ressourcen betrachten.

Klimawandel und Ressourcenverbrauch hängen eng zusammen. Klimaschutz und Ressourcenschonung sind Grundvoraussetzungen zum Erreichen der eingangs erwähnten globalen Ziele, wie Bekämpfung von Armut und Ungleichheit sowie Schaffung und Erhaltung von Frieden. Alles hängt miteinander zusammen und funktioniert nur in konsistenten Kreisläufen. Darum müssen Ziele zu konsistenten Kreisläufen konsequent verfolgt und gemessen werden.

Der Urban Mining Index kann einen kleinen Beitrag zur Transformation der linearen Bauwirtschaft hin zu einer zirkulären Bauwirtschaft leisten. Er liefert keine fertigen Lösungen, aber seine Anwendung schafft Anreize für Planer und Bauindustrie, Lösungen zu entwickeln.

Die quantitative Bewertung ermöglicht außerdem, politische Anreiz- oder Sanktionsmodelle zu etablieren, die vor Baubeginn wirken. So könnte z. B. der Energieausweis zu einem Ressourcenpass erweitert werden.

Der Urban Mining Index ist *ein* Ansatz, die Kreislaufpotenziale von Bauwerken und Baukonstruktionen *objektiv* zu messen. Andere Instrumente wie der Madaster Circularity Indicator liefern weitere Ansätze.

**Für eine breite Anwendung sollte eine einheitliche Systematik gefunden werden. Hierfür ist im Prinzip die Entwicklung einer Norm zur Messung der Zirkularität von Bauwerken notwendig.** In solch einer Norm können Ziele, Methodik und Parameter zur Quantifizierung einheitlich unter Mitwirkung der interessierten Kreise aus der Wissenschaft, der Politik und der Bauwirtschaft festgelegt werden.

## Anlagen

Anlage 1 zu Kapitel 6.1: Aufstellung der Preiserhebung nach Wertstoffgruppen

Wertstoff/ Abfall	Betrieb (anonym)	Antwort	Beton, unbewehrt	Beton, bewehrt	Beton, bewehrt, Kanten >60cm	Ziegel	Fliesen + Keramik	Gemische aus Beton, Ziegel, Fliesen, u. Keramik nach Verschmutzungsgrad sauber gering stark			Holz A1	Holz A2	biologische Faserstoffe, kompostier- bar	Glas	Kunst- stoffe	Bitumen- gemische	Asphalt
Abfall- schlüssel			170101			170102	170103	170107	170107	170107	170201	170201	n.n.	170202	170203	170302	170302
Frankfurt	1	x									36,30	36,30					
	2	x	16,66	26,18				24,99	26,78	101,15	21,42	30,94	46,41	53,55		166,60	16,66
	3	x						25,70	31,83	63,07	42,84	42,84	55,10	36,74		206,94	22,61
	4	x						24,40		41,65	41,65						
	5	x						20,83								172,55	
	6	x	7,14					17,85	27,97								5,36
Berlin	7																
	8																
	9	x	2,98					33,32	keine Annahme mehr			39,67	39,67				19,04
	12	x	5,95	5,95	17,85	33,32	33,32	33,32			65,45	65,45		23,80	190,40	297,50	20,23
	13	x	13,03					44,81		60,44	52,89	52,89	55,53				
	14																
	15	x	1,07	1,07		14,16		33,20									
	16	x	23,80	29,75				46,41		77,35						Ausreißer	
	17	x	Ausreißer														
München	18																
	19	x	Ausreißer	36,89	36,89	36,89	36,89	36,89	Ausreißer	101,15	29,75	69,02		33,32	148,75	208,25	41,65
	20																
	21																
Hamburg	22	x	4,17	6,55	22,02	19,04	24,99	21,42	29,75	Ausreißer	59,5	69,02	26,18	59,50	160,65	339,15	14,28
	23	x	10,42					20,84					79,33				18,24
	24																
	25																
	26																
Düsseldorf	27																
	29	x	8,33					17,85	41,65		53,55	53,55	47,60			315,35	
	30	x	8,33		14,88	10,12	13,69	8,93	30,35								8,93
	31	x	14,88			23,21		43,44	107,10	Ausreißer	Ausreißer						41,65
Jever	32																
	33																
	34																
Greifswald	35																
	36																
	37																
	38	x						30,65			66,67	66,67					
	39																
Goslar	40	x	8,09	12,26				20,83	35,58	49,50	81,40	81,40	48,67	95,20	166,60	214,20	8,93
	41	x	5,71	9,88				15,59	23,56	34,99			35,11				7,14
	42	x	5,71	8,21				11,54	22,49	40,70			35,11				7,38
	43	x	8,09	10,47				24,40	26,06	49,74			47,36			279,17	10,59
Warendorf	44	x	15,47	23,80	29,75	20,23	20,23	17,85	23,80	35,70	77,35	Ausreißer	89,25	Ausreißer	238,00		17,85
	45																
	46																
	47	x						40,46			55,34	89,25	85,68	48,79			41,65
	48																
Cottbus	49	x	9,38	15,63	26,05	30,22	30,22	30,22	33,35	36,47							
	50																
	51	x	10,12	12,50	12,50	23,80	23,80	23,80	32,13	32,13	47,60	71,40		77,35	261,80	273,70	35,70
	52																
Halle (Saale)	53																
	54																
Aalen	55	x	14,88	30,82	35,20	30,82	28,49	30,82	30,82		Ausreißer	Ausreißer		57,12	303,45	303,45	30,82
	56																
	57	x	13,09	27,37	30,94	39,27	39,27	39,27			64,26	64,26		41,65	238,00	238,00	21,42
	58																
	59	x	8,93	11,31	11,31	Ausreißer	33,32	17,85	23,80	38,08	47,60	53,55			261,80	178,50	11,90
Freiburg	60	x	17,85	Ausreißer	Ausreißer	17,85	35,70	35,70			47,60	95,20		71,40		285,60	29,75
	61																
	62	x	9,28	11,07	14,88	11,31	Ausreißer	13,63									12,14
	63																
Waldraiburg	64																
	65																
	66																
	67																
	68																
<b>Gebrauchtaustoffhändler</b>																	
Bremen	69	x															
Köln	70	x															
Tübingen	71	x															
<b>Schrottbörse</b>																	
Internet	72	x															
<b>Durchschnitt</b>			<b>10,14</b>	<b>16,45</b>	<b>22,93</b>	<b>23,86</b>	<b>29,08</b>	<b>26,32</b>	<b>30,21</b>	<b>57,95</b>	<b>51,71</b>	<b>61,34</b>	<b>54,28</b>	<b>54,40</b>	<b>218,83</b>	<b>248,50</b>	<b>20,18</b>
Rücklaufquote	50%	36															

Preise in Euro/Tonne (brutto), Stand 01/2019 – Analog zu den Preisangaben der Entsorger werden Gebühren für den Anlieferer hier positiv dargestellt und Vergütungen negativ.



Nr.	Bauteilschicht	Abbruchverfahren	Masseverlust	Fremdstoff	Anhaftungen	EoL	Arbeitszeit [h/m <sup>2</sup> ]	Maschinen-Energie (brutto) [MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>WDVS auf Beton</b>								
W01	Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt	einschneiden und abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		abhebeln	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,14	
W02	Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + gedübelt	einschneiden und abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,24	0,05
W03	Silikatputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + gedübelt	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,14	0,06
W04	Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung HF geklebt + gedübelt	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Schrauben lösen, Dübel abtrennen, HF abhebeln	3,5%	mineralischer Mörtel	0,3%	energ. Verwert.	0,26	0,22
W05	Silikatputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + gedübelt, inkl. Altputz	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Elektrohammer und nachträgliche Separierung	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,43	0,13
W06	Silikatputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + gedübelt auf Altputz	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,06	0,03
W07	Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung HF geklebt + gedübelt auf Altputz	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Schrauben lösen, Dübel abtrennen, HF abhebeln	3,5%	mineralischer Mörtel	0,3%	energ. Verwert.	0,17	0,05
W08	Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + gedübelt auf WDVS	einschneiden und abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln mit Elektrohammer	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,16	0,07
W09	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + gedübelt auf WDVS	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,14	0,08
<b>WDVS auf Kalksandstein</b>								
W10	Silikatputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		EPS abhebeln, Mörtel mit Elektrohammer entfernen	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,33	0,21
W11	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + gedübelt	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln, Mörtel mit Elektrohammer entfernen	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,25	0,21
W12	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + gedübelt	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln, Mörtel mit Elektrohammer entfernen	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,29	0,24
W13	Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung HF geklebt + gedübelt	abziehen		Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Schrauben lösen, Dübel abtrennen, HF abhebeln mit Elektrohammer	3,5%	mineralischer Mörtel	0,3%	energ. Verwert.	0,33	0,29
W14	Silikatputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + gedübelt auf Altputz	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,32	0,04
W15	Silikatputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + gedübelt auf Altputz	abschälen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,05	0,03
W16	Silikatputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + gedübelt auf WDVS	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln mit Elektrohammer	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,12	0,03
W17	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + gedübelt auf WDVS	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,08	0,05

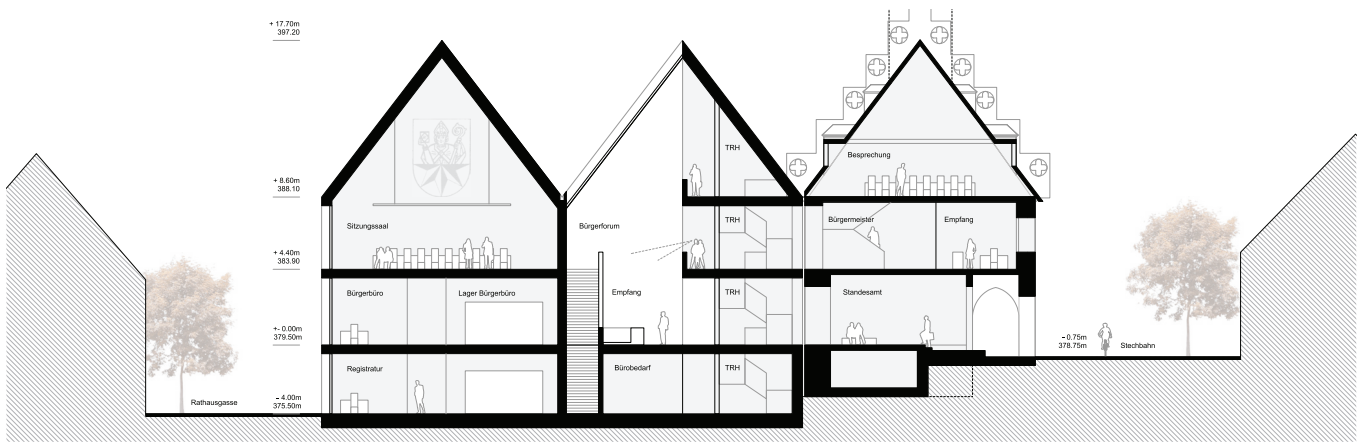
Nr.	Bauteilschicht	Abbruchverfahren	Masseverlust	Fremdstoff	Anhaftungen	EoL	Arbeitszeit [h/m <sup>2</sup> ]	Maschinen-Energie (brutto) [MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>WDVS auf Poroton</b>								
W18	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		EPS und Mörtel mit Elektrohammer entfernen	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,30	0,47
W19	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + Dübel	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,23	0,26
W20	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + Dübel	einschneiden und abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		MiWo abhebeln, Mörtel mit Elektrohammer entfernen	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,37	0,33
W21	Mineralischer Putz mit Glasfaserarmierung HF geklebt + Dübel	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Schrauben lösen, Dübel abtrennen, HF und Mörtel mit Elektrohammer entfernen	3,5%	mineralischer Mörtel	0,3%	energ. Verwert.	0,36	0,33
W22	Silikatputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + Dübel auf Altputz	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,14	0,03
W23	Silikatputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + Dübel auf Altputz	abschälen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,07	
W24	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + Dübel auf WDVS	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,08	0,03
W25	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + Dübel auf WDVS	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,07	0,03
<b>WDVS auf Porenbeton</b>								
W26	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		EPS abhebeln, Mörtel mit Elektrohammer entfernen	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,34	0,24
W27	Mineralischer Oberputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + Dübel	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,01	
		Schrauben lösen, Dübel abtrennen, MiWo abhebeln, Mörtel mit Elektrohammer entf.	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,38	0,25
W28	Mineralischer Putz mit Glasfaserarmierung HF geklebt + Dübel	abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Schrauben lösen, Dübel ziehen/trennen, HF abhebeln, Mörtel mit Elektrohammer entfernen	3,5%	mineralischer Mörtel	0,3%	energ. Verwert.	0,20	0,10
W29	Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung EPS geklebt + Dübel auf Altputz	einschneiden und abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, EPS abhebeln, Mörtel mit Elektrohammer entfernen	5,0%	mineralischer Mörtel	17,0%	energ. Verwert.	0,40	0,16
W30	Silikatputz mit Glasfaserarmierung MiWo geklebt + Dübel auf Altputz	einschneiden und abziehen	15,0%	Glasfaser	2,5%	Deponierung	0,02	
		Dübel abtrennen, MiWo abhebeln, Mörtel mit	2,0%	mineralischer Mörtel	0,5%	Deponierung	0,24	0,11

Hinweis: Graubner et al. haben für WDVS auf Altputz und für WDVS auf Alt-WDVS (Aufdoppelungen) den Rückbauaufwand auch für die Alt-Materialien (Bestand) dokumentiert. Da der Rückbauaufwand für den Bestand in dieser Arbeit jedoch keine Rolle spielt, wurden hier nur die Aufwendungen für die neuen Schichten zusammengestellt.

Nr.	Bauteilschicht	Abbruchverfahren	Masseverlust	Fremdstoff	Restanhaftungen	EoL	Arbeitszeit [h/m <sup>2</sup> ]	Maschinenenergie (brutto) [MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>Flachdachaufbau auf Stb.-Decke</b>								
FD01	Kies	abheben					0,04	
	PIB-Kunststoffbahn	schneiden, aufrollen				Recycling	0,02	
	Mineralwolle, lose verlegt	abheben				Deponierung	0,01	
	Bitumendampfsperre, punktwise verschweißt	schneiden, abziehen				energ. Verwert.	0,03	
FD02	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, untere Lage kaltselfstklebend	schneiden, abziehen		EPS	0,3%	energ. Verwert.	0,15	
	EPS, verklebt	abhebeln, Elektrohammer	3,3%			energ. Verwert.	0,06	0,06
	Bitumendampfsperre, vollflächig verschweißt	schneiden, lösen mit Elektrohammer und abziehen		EPS	1,0%	energ. Verwert.	0,11	0,06
FD03	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, untere Lage kaltselfstklebend	schneiden, abziehen		Mineralwolle	2,4%	energ. Verwert.	0,06	
	Mineralwolle, verklebt	abhebeln	0,9%			Deponierung	0,02	
	Bitumendampfsperre, kaltselfstklebend	schneiden, abziehen		Mineralwolle	0,3%	energ. Verwert.	0,06	
FD04	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, vollflächig verschweißt	schneiden, abheben		Mineralwolle	2,4%	energ. Verwert.	0,07	
	Mineralwolle, verklebt	abhebeln	1,6%			Deponierung	0,01	
	Bitumendampfsperre, teilflächig verschweißt	schneiden, abziehen		Mineralwolle	0,3%	energ. Verwert.	0,02	
FD05	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, in Heißbitumen verklebt	schneiden, abschälen		Schaumglas	1,1%	energ. Verwert.	0,02	
	Schaumglas	teilen, stückig abheben	9,0%			Downcycling	0,18	
	Heißbitumen	abschaben (mit Rückständen von 0,5 bis 3 mm auf Beton)	k.A.			energ. Verwert.	0,05	
FD06	Kies auf Filtervlies	abheben					0,04	
	XPS, lose verlegt	abheben				energ. Verwert.	0,01	
	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, vollflächig verschweißt	schneiden, abziehen	6,1%			energ. Verwert.	0,02	
FD07	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, untere Lage kaltselfstklebend	schneiden (elektrisch), abziehen		EPS	0,3%	energ. Verwert.	0,02	0,03
	EPS, verklebt auf Altbitumenbahn	abhebeln	1,8%			energ. Verwert.	0,03	
FD08	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, vollflächig verschweißt	schneiden, abziehen				energ. Verwert.	0,12	
	Mineralwolle auf Altbitumen verklebt	abheben				Deponierung	0,02	
FD09	Kies auf Filtervlies	abheben					0,04	
	XPS, lose verlegt	abheben				energ. Verwert.	0,01	
	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, vollflächig verschweißt auf Altbitumenbahnen	schneiden (elektrisch), abziehen				energ. Verwert.	0,03	0,05
FD10	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, in Heißbitumen verklebt	schneiden, abschälen				energ. Verwert.	0,02	
	Schaumglas in Heißbitumen auf Altbitumenbahnen verklebt	teilen (elektrisch), stückig abheben mit Altbitumen	8,4%			Downcycling	0,08	0,10
<b>Flachdachaufbau auf Trapezblech</b>								
FD11	FPO mit Vlies, verklebt	schneiden, aufrollen				Recycling	0,01	
	EPS, verklebt	abhebeln				energ. Verwert.	0,06	
	Bitumendampfsperre, kaltselfstklebend	schneiden, abziehen	3,8%	EPS	1,0%	energ. Verwert.	0,01	
FD12	FPO mit Vlies, verklebt	schneiden (elektrisch), abziehen				Recycling	0,01	
	Mineralwolle, verklebt	abheben	1,2%			Deponierung	0,01	
	Bitumendampfsperre, kaltselfstklebend	schneiden, abziehen		Mineralwolle	0,3%	energ. Verwert.	0,01	
FD13	Elastomerbitumenbahnen, 2-lagig, vollflächig verschweißt	schneiden, abschälen		Schaumglas	1,1%	energ. Verwert.	0,01	
	Schaumglas, verklebt	abheben	0,9%			Downcycling	0,02	
FD14	PIB-Kunststoffbahn, mit Klettstreifen + Schrauben	einschneiden, Schrauben lösen + teilweise flexen, aufrollen				Recycling	0,09	0,02
	EPS, lose verlegt	abheben				energ. Verwert.	0,01	
	Dampfsperre PE-Folie, lose verlegt	abheben				energ. Verwert.	0,01	

Bauteilschicht	Abbruchverfahren	EoL	Arbeitszeit [h/m <sup>2</sup> ]	Maschinenenergie [MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>Innenwandbekleidungen</b>				
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Gipskartonleichtbauwand	ablösen mit Elektrohammer, inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial unter Zerstörung der Gipskartonplatten	Deponierung	0,20	0,29
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Ziegelmauerwerk mit Zementputz	ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial unter Zerstörung des Zementputzes	Downcycling	0,20	0,58
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Ziegelmauerwerk mit Gipsputz	Ablösen mit Elektrohammer, inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	0,13	0,19
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Kalksandsteinmauerwerk mit Zementputz	ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial unter Zerstörung des Zementputzes	Downcycling	0,12	0,11
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Kalksandsteinmauerwerk mit Gipsputz	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	0,16	0,76
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Stahlbetonwand mit Zementputz	ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial unter Zerstörung des Zementputzes	Downcycling	0,14	0,18
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Stahlbetonwand mit Gipsputz	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	0,13	0,19
Rauhfasertapete, verklebt mit Tapetenkleber (auf allen Untergründen)	ablösen mit Seifenwasser	energ. Verwert.	0,04	
Holzverschalung inkl. Holzlattung auf Gipskartonleichtbauwand	lösen der Schrauben	Wieder- verwendung	0,20	0,86
Holzverschalung inkl. Holzlattung auf Mauerwerk mit Zement- oder Gipsputz	abbrechen mit Nageleisen	Recycling	0,04	
Holzverschalung inkl. Holzlattung auf Stahlbetonwand mit Zementputz	abbrechen mit Nageleisen	Recycling	0,06	
<b>Bodenbeläge</b>				
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Zementestrich	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	0,38	1,17
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Anhydritestrich	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	0,50	1,71
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Gussasphaltestrich	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	1,00	3,60
Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Trockenestrich	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial unter Zerstörung des Trockenestrichs	Deponierung	0,25	1,31
Laminat, verklebt auf Zementestrich	Ablösen mit Elektrostripper	energ. Verwert.	0,19	0,90
Laminat, verklebt auf Anhydrit- oder Gussasphaltestrich	Ablösen mit Elektrostripper	energ. Verwert.	0,25	1,08
Laminat, verklebt auf Trockenestrich	Ablösen mit Elektrostripper unter Zerstörung des Trockenestrichs	energ. Verwert.	0,25	0,95
Textiler Bodenbelag, verklebt auf Zementestrich	einschneiden/einreißen und abziehen	energ. Verwert.	0,08	
Textiler Bodenbelag, verklebt auf Anhydritestrich	einschneiden/einreißen und ablösen mit Elektrostripper	energ. Verwert.	0,19	0,90
Textiler Bodenbelag, verklebt auf Gussasphaltestrich	einschneiden/einreißen und ablösen mit Elektrostripper	energ. Verwert.	0,18	1,08
Textiler Bodenbelag, verklebt auf Trockenestrich	einschneiden/einreißen und abziehen	energ. Verwert.	0,08	
Natursteinplatten, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Zementestrich	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	0,20	0,94
Natursteinplatten, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Anhydritestrich	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	0,18	0,81
Natursteinplatten, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Gussasphaltestrich	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial	Downcycling	0,13	0,36
Natursteinplatten, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiziertem mineralischem Mörtel auf Trockenestrich	Ablösen mit Elektrohammer inkl. Fliesenkleber und Fugenmaterial unter Zerstörung des Trockenestrichs	Deponierung	0,25	1,31





Querschnitt



Ansicht Westen

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt (Destatis): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Indikatorenbericht 2018, Seite 1, Logos von Maria Gershuni mit deutscher Bezeichnung, [https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft\\_mods\\_00089372](https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft_mods_00089372), Stand 13.02.2019
- [2] von Carlowitz, Hans Carl: *Sylvicultura Oeconomica*, 1713
- [3] United Nations: The Sustainable Development Goals Report 2018, Seite 27, New York 2018, <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2018/TheSustainableDevelopmentGoalsReport2018-EN.pdf>, Stand 15.02.2019
- [4] wie [3], Seite 26
- [5] Statistisches Bundesamt: Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 4 Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Umweltschutzmaßnahmen; Seite 23, Tabelle 5.1, 2017, Stand 24.01.2019
- [6] Umweltbundesamt: Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän, Dessau-Roßlau, Juli 2017, Seite 32
- [7] Hillebrandt, Annette: <http://www.urban-mining-design.de>, Stand 24.01.2019
- [8] United Nations, General Assembly: Transforming our world – the 2030 Agenda for Sustainable Development, Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, [http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E), Stand 13.02.2019
- [9] Statistisches Bundesamt (Destatis): Indikatoren der UN-Nachhaltigkeitsziele, Seite 5, 06/2018, [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-un-nachhaltigkeitsziele-2018-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-un-nachhaltigkeitsziele-2018-pdf.pdf?__blob=publicationFile), Stand 13.02.2019
- [10] Die Bundesregierung: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Neuauflage 10/2016, Seite 11, Kabinettsbeschluss vom 11. Januar 2017, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975292/730844/3d30c6c2875a9a08d364620ab7916af6/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-neuauflage-2016-download-bpa-data.pdf>, Stand 13.02.2019
- [11] wie [9], Seite 22
- [12] Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission, Mapping the role of Raw Materials in Sustainable Development Goals, 2018, Stand 14.02.2019
- [13] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm I. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Berlin 2012, Seite 7
- [14] Europäische Kommission: Internetportal, Eurostat, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei\\_srm030/default/table?lang=de](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm030/default/table?lang=de), Stand 17.02.2019
- [15] wie [1], Seite 54
- [16] wie [14], eigene Darstellung, Datenbasis Eurostat
- [17] eigene Darstellung, Datenbasis: Eurostat, Circular material use rate - Calculation Method, Anhang 2 (Seite 31), Luxemburg 2018, <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/9407565/KS-FT-18-009-EN-N.pdf/b8efd42b-b1b8-41ea-aaa0-45e127ad2e3f>, Stand 17.02.2019
- [18] Wagner, Jörg; Heidrich, Kerstin; Baumann, Janett; Kügler, Thomas; Reichenbach, Jan (alle Intecus GmbH Dresden): Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung, im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.), Dessau-Roßlau Mai 2012, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4275.html>, Stand 17.11.2019
- [19] Steger, Sören; Ritthoff, Michael (beide Wuppertal Institut); Bulach, Winfried; Schüler, Doris; Kosinska, Izabela; Degreif Stefanie; Dehoust, Günter; Bergmann, Thomas (alle Öko-Institut e.V. Darmstadt) und Krause, Peter; Oetjen-Dehne, Rüdiger (beide Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität, im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.), Dessau-Roßlau April 2019, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-27\\_texte\\_34-2019\\_sekundaerrohstoffwirtschaft.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-27_texte_34-2019_sekundaerrohstoffwirtschaft.pdf), Stand 17.11.2019
- [20] Hillebrandt, Annette; Riegler-Floors, Petra; Rosen, Anja; Seggewies, Johanna-Katharina: Atlas Recycling, Edition Detail, München 2018
- [21] von Hauff, Michael; Kleine, Alexandro: Nachhaltige Entwicklung – Grundlagen und Umsetzung, Seite 38f, Oldenbourg Verlag, München 2009
- [22] wie [21], Seite 38
- [23] wie [22]
- [24] Huber, Joseph: Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz, in: Fritz, Hüber, Levi (Hrsg.), Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive, S. 31-46, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1995
- [25] Braungart, Michael/McDonough, William (Hg.): Die nächste industrielle Revolution - Die Cradle to Cradle-Community, Europäische Verlagsanstalt, 2. Aufl. Hamburg 2009, Seiten 17 ff
- [26] Schmidt, Mario: Die Bedeutung der Effizienz für Nachhaltigkeit – Chancen und Grenzen, in Hartard, Schaffer & Giegrich (Hrsg.): Ressourceneffizienz im Kontext der Nachhaltigkeitsdebatte, Nomos Verlag, Baden-Baden 2008, Seite 31-46
- [27] wie [26], Grafiken auf Seiten 41 und 44 zusammengefasst durch Rosen
- [28] wie [25], Seite 69
- [29] Taghizadegan Rahim: Cradle-to-cradle - die nächste Sau, die man durch das globale Dorf treibt?; in: wirks - Magazin für Zukunftskompetenz, Seite 4, Sommerbeginn 2010, <http://www.wirks.at/wp-content/uploads/2010/05/C2C-Kritik-II.pdf>, Stand 28.02.2019
- [30] wie [26], Seite 45

- [31] Schlichting, Hans-Joachim: Zum Antrieb natürlicher Stoffkreisläufe, Universität Münster (Hrsg.), ohne Datum, [https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich\\_physik/didaktik\\_physik/publikationen/stoffkreis\\_ufe.pdf](https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/stoffkreis_ufe.pdf), Seite 3, Stand 04.03.2019
- [32] wie [20], Seite 59, Grafik: Hillebrandt, Annette
- [33] wie [20], Seite 59 f, Hillebrandt/Seggewies: Recyclingpotenziale von Baustoffen
- [34] DIN EN ISO 9000:2015 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe, Seiten 39 und 53
- [35] DIN EN ISO 14044:2006 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Seiten 30-32
- [36] wie [20], Seite 115, Rosen: Bewertung der Kreislaufpotenziale
- [37] Stiller, Gudrun (Hrsg.): [www.wirtschaftslexikon24.com/d/utilitarismus/utilitarismus.htm](http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/utilitarismus/utilitarismus.htm). Stand 23.03.2018
- [38] Global Footprint Network: Earth overshoot days 1969-2018, <http://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/>, Stand 24.03.2018
- [39] eigene Darstellung in Anlehnung an: EPEA Internationale Umweltforschung GmbH, 2012, <http://braungart.epea-hamburg.org/de/content/c2c-design-konzept>, Stand 27.12.2017
- [40] Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bilanz>, Stand 01.02.2019
- [41] wie [35], Seite 5
- [42] DIN EN 15978:2012-10 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden, Berechnungsmethode. Deutsche Fassung der EN 15978:2011, Beuth Verlag, Berlin
- [43] DIN EN 15804:2014-07, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen, Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Deutsche Fassung der EN 15804:2012+A1:2013, Beuth Verlag, Berlin
- [44] wie [42], Seiten 43 ff
- [45] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) e. V. (Hrsg.): DGNB System. Kriterienkatalog Gebäude Neubau, Version 2018, Seite 68
- [46] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI, Hrsg.): Ökobaodat, Version 2019-I, Datensatz für blanke Kupferhausinstallationsrohre, UUID 12b2623c-da84-4f78-9299-262486c54514, [https://www.oekobaodat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6943ea24-03bc-4a84-9bf9-c320b052be82&stock=OBD\\_2017\\_I&lang=de](https://www.oekobaodat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6943ea24-03bc-4a84-9bf9-c320b052be82&stock=OBD_2017_I&lang=de), Stand 28.02.2019
- [47] Rosen, Anja, für energum: Ökobilanz für den Neubau Funktionstrakt und Pflege für das Herz- und Diabetenszentrum Bad Oeynhausen, Auswertung mit eLCA vom 19.08.2015
- [48] eigene Darstellung, Quelle: Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI, Hrsg.): Ökobaodat, Version 2019-I, Datensatz für Nadelschnittholz (Durchschnitt), UUID 57fed1c6-f30d-4e78-9fb6-b93810b6e825, [https://www.oekobaodat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=57fed1c6-f30d-4e78-9fb6-b93810b6e825&stock=OBD\\_2020\\_II&lang=en](https://www.oekobaodat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=57fed1c6-f30d-4e78-9fb6-b93810b6e825&stock=OBD_2020_II&lang=en), Stand 28.02.2019
- [49] DIN EN 16485:2014-07 Rund- und Schnittholz – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen, Beuth Verlag Berlin
- [50] wie [20], Seite 58 f, Hillebrandt/Seggewies: Recyclingpotenziale von Baustoffen
- [51] Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR, Hrsg.): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Berlin 24.02.2017, [https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff\\_gebauededaten/BNB\\_Nutzungsdauern\\_von\\_Bauteilen\\_2017-02-24.pdf](https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf), zuletzt abgerufen am 22.09.2019
- [52] wie [20], Seiten 138 ff und 152 ff, Hillebrandt/Riegler-Floors: Konstruktionen für Detailkatalog
- [53] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Berlin 2016, Seite 126-129
- [54] wie [13]
- [55] Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates (EUBauPVO)
- [56] Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Abfallrahmenrichtlinie - AbfRR), Amtsblatt der Europäischen Union, 22.11.2008
- [57] Richtlinie (EU) 2018/851 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, Amtsblatt der Europäischen Union, 14.6.2018
- [58] wie [57], Artikel 1, Absatz 3, Buchstabe h)
- [59] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), 24.02.2012, zuletzt geändert durch § 44 Abs. 4 G v. 22.5.2013 I 1324
- [60] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.): Referentenentwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union – noch nicht abschließend unter den Bundesministerien abgestimmt, <https://www.bmu.de/gesetz/referentenentwurf-eines-gesetzes-zur-umsetzung-der-abfallrahmenrichtlinie-der-europaeischen-union/>, oder direkt [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Glaeserne\\_Gesetze/19\\_Lp/krwg\\_novelle/Entwurf/krwg\\_novelle\\_refe\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19_Lp/krwg_novelle/Entwurf/krwg_novelle_refe_bf.pdf), Stand 05.08.2019
- [61] Bundesgütegemeinschaft Recycling-Baustoffe e. V., Bundesvereinigung Recycling-Baustoffe e.V., Straßen- und Tiefbau-Verband Nordrhein-Westfalen, vero-Fachgruppe (Hrsg.): Produktion und Verwendung von güteüberwachten Recycling-Baustoffen im Straßen- und Erdbau – Leitfaden für öffentliche Verwaltungen, RC-Baustoff-Produzenten und Bauherren in Nordrhein-Westfalen, [https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/gueteueberwachte\\_recyclingbaustoffe\\_strassenbau.pdf](https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/gueteueberwachte_recyclingbaustoffe_strassenbau.pdf), Stand 10/2015
- [62] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder, Bonn Juli 2013, <https://www.bmu.de/publikation/abfallvermeidungsprogramm-des-bundes-unter-beteiligung-der-laender/>, Stand 29.11.2019
- [63] wie [60], Seite 14, Fußnote
- [64] Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV), 10.12.2001, zuletzt geändert durch Art. 2 der Verordnung vom 22.12.2016

- [65] Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung – AltholzV) vom 15.08.2002, zuletzt geändert durch Art. 62 des Gesetzes vom 29.03.2017
- [66] Ludwig, Grit; Gawel, Erik; Pannicke, Nadine: Kaskadennutzung von Holz: Bestandsaufnahme, Rechtsrahmen und Reformvorschläge für die Altholzverwertung in Deutschland, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (Hrsg.), Leipzig 2016, abgerufen am 25.08.2018 unter [https://www.ufz.de/export/data/global/121106\\_Factsheet%20Altholz%20Rechtsrahmen%20Web.pdf](https://www.ufz.de/export/data/global/121106_Factsheet%20Altholz%20Rechtsrahmen%20Web.pdf)
- [67] Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV), Ausfertigungsdatum: 21.09.1998, neugefasst durch Bek. vom 04.04.2013, zuletzt geändert durch Art. 3 Abs. 2 V v. 27.09.2017
- [68] Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV), Ausfertigungsdatum: 18.04.2017, geändert durch Art. 2 Abs. 3 G v. 05.07.2017, Seite 7
- [69] Deutsche Umwelthilfe (DUH), Pressemitteilung, Berlin 27.06.2018, abgerufen am 27.08.2018 unter <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/deutsche-umwelthilfe-kritisiert-bundeslaender-fuer-fehlenden-vollzug-der-gewerbeabfallverordnung/>
- [70] DIN 18007:2000-05 Abbrucharbeiten – Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche, Beuth Verlag, Berlin
- [71] DIN 18459:2016-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Abbruch- und Rückbauarbeiten
- [72] Statistisches Bundesamt (Destatis), Abfallbilanz 2016, Wiesbaden 2018
- [73] Statistisches Bundesamt (Destatis): Fachserie 19 Reihe 1, Umwelt, Abfallentsorgung, Wiesbaden 2018, korrigiert 2019 (Tabelle 1.3)
- [74] Initiative Kreislaufwirtschaft Bau, c/o Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (Hrsg.): Mineralische Bauabfälle, Monitoring 2016, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016, Berlin 2019
- [75] Stoll, Michael: Recycling von mineralischen Abfällen – Aktueller Stand und Ausblick aus Sicht der Wirtschaft. In: Thomé-Kozmiensky, Karl J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Nietwerder 2014
- [76] eigene Darstellung nach: Kytzia, S.; Lier, S.; Stüssi, U.; Seyler, C.: Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton, Institut für Bau und Umwelt (IBU) Hochschule Rapperswil, Forschungsbericht der Holcim Schweiz AG (Auftraggeber und Hrsg.), Zürich 2010
- [77] wie [20], Hillebrandt/Seggewies, Seiten 64ff.
- [78] wie [57], Seite 211 und 236ff
- [79] Bundesgütegemeinschaft Recycling-Baustoffe e.V., Deutscher Abbruchverband (DA), Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V., Zentralverband Deutsches Baugewerbe e.V.: Abbruch-, Recycling- und Bauwirtschaft begrüßen Verschiebung der Mantelverordnung, gemeinsame Pressemitteilung vom 27.09.2017, <https://www.deutscher-abbruchverband.de/2017/09/abbruch-recycling-und-bauwirtschaft-begruessen-verschiebung-der-mantelverordnung/>, Stand 02.09.2018
- [80] Haeming, Hartmut: Deponien in Deutschland – Situation und Bedarf, Erfahrungsaustausch Kommunale Kreislaufwirtschaft GGSC am 25./26.06.2015, abgerufen am 16.06.2017 unter: [https://www.ggsc-seminare.de/pdf/2015\\_6\\_info/Vortrag\\_INWES\\_Haeming.pdf](https://www.ggsc-seminare.de/pdf/2015_6_info/Vortrag_INWES_Haeming.pdf)
- [81] Dehne, Iswing; Knappe, Florian; Oetjen-Dehne, Rüdiger; Theis, Stefanie: Abschätzung des zukünftigen Bedarfs an Deponiekapazitäten in Rheinland-Pfalz, ifeu – Insitut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH / u.e.c. (Hrsg.), Heidelberg/Berlin 2016, abgerufen am 23.07.2017 unter [https://ifu.rlp.de/fileadmin/ifu/Abfallwirtschaft/160704\\_Kurzfassung\\_Deponiestudie\\_RLP.pdf](https://ifu.rlp.de/fileadmin/ifu/Abfallwirtschaft/160704_Kurzfassung_Deponiestudie_RLP.pdf)
- [82] Dt. Abbruchverband e. V. (Hrsg.): Abbrucharbeiten – Grundlagen, Planung, Durchführung, Rudolf Müller Verlag, 3. Aufl., Köln 2015
- [83] wie [70]
- [84] Kühlen, Anna; Schultmann, Frank; Reinhardt, Markus; Haghsheno, Shervin; Mettke, Angelika; Schmidt, Stephanie; Harzheim, Johannes: Immissionsschutz beim Abbruch - Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch (Phase 3), Abschlussbericht des Forschungsprojekts, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Karlsruhe/Osnabrück 2016, Seite 10
- [85] wie [84], Seite 9
- [86] Schultmann, Frank: Projektplanungsmodelle und -methoden für den Rückbau von Bauwerken, Seite 18, Karlsruhe 2003, abgerufen am 11.10.2018 unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000053350>
- [87] Deilmann, Clemens u. a.: Materialströme im Hochbau, Zukunft Bauen – Forschung für die Praxis, Bd. 6, Hrsg. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Berlin 2017
- [88] Thome, Volker, Fraunhofer IBP, <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/forschung-im-fokus/blitz-im-buero.html>, Stand 29.07.2017
- [89] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (Hrsg.): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Büro- und Verwaltungsgebäude – Neubau, Version 2015, <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/buerogebaeude/>, Stand 21.07.2018
- [90] DIN 276-1:2008-12, Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau, Beuth Verlag, Berlin
- [91] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) e. V. (Hrsg.): DGNB System. Kriterienkatalog Gebäude Neubau, Version 2018
- [92] BRE Global Ltd. (Hrsg.): BREEAM International New Construction 2016. Non-domestic buildings, Technical Manual, SD233 1.0
- [93] U.S. Green Building Council (Hrsg.): LEED v4 for Building Design and Construction (BD+C), <https://www.usgbc.org/resources/leed-v4-building-design-and-construction-current-version>, Stand 04/2016, Download vom 12.11.2016
- [94] DIN EN ISO 14020:2002-02 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Allgemeine Grundsätze (ISO 14020:2000); Deutsche Fassung EN ISO 14020:2001, Beuth Verlag, Berlin
- [95] DIN EN ISO 14021:2016-07 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II) (ISO 14021:2016); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14021:2016

- [96] DIN EN ISO 14024:2018-06 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltkennzeichnung Typ I - Grundsätze und Verfahren (ISO 14024:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14024:2018, Beuth Verlag, Berlin
- [97] wie [20], Rosen, Anja: Bewertungssysteme im Überblick, Seite 29, auf Basis der Label-Herausgeber RAL gGmbH (Blauer Engel), Natureplus e.V., PEFC Deutschland e.V., Forest Stewardship Council
- [98] RAL gGmbH / Blauer Engel (Hrsg.): Vergabekriterien, <https://www.blauer-engel.de/de/fuer-unternehmen/vergabegrundlagen>, Stand 31.10.2017
- [99] Natureplus e. V.(Hrsg.): Vergaberichtlinie 0000, Basiskriterien, Stand 05/2011, [https://www.natureplus.org/fileadmin/user\\_upload/pdf/cert-criterias/RL00Basiskriterien.pdf](https://www.natureplus.org/fileadmin/user_upload/pdf/cert-criterias/RL00Basiskriterien.pdf), abgerufen am 26.01.2019
- [100] Internetplattform des FSC - Forest Stewardship Council Deutschland, <https://www.fsc-deutschland.de/de-de/warenzeichen/kennzeichen>, Stand 01/2019
- [101] PEFC Deutschland e.V.: Infoblatt „Alles was Sie über PEFC wissen sollten“, Januar 2019, [https://pefc.de/media/filer\\_public/ce/71/ce71bf76-efae-49c5-b7ee-f2cc4e030916/pefc\\_in\\_kuerze.pdf](https://pefc.de/media/filer_public/ce/71/ce71bf76-efae-49c5-b7ee-f2cc4e030916/pefc_in_kuerze.pdf), Stand 26.01.2019
- [102] DIN EN ISO 14025:2011-10 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011, Beuth Verlag, Berlin
- [103] wie [43]
- [104] Cradle to Cradle Products Innovation Institute, <http://www.c2ccertified.org/products/registry>, Stand 30.10.2017
- [105] McDonough Braungart Design Chemistry LLC: Cradle to Cradle Certified™ Product Standard, Version 3.1, 2016, Seite 3
- [106] wie [105], Seite 12f
- [107] Schultmann, Frank: Kreislaufführung von Baustoffen – stoffflussbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden, in der Reihe „Baurecht und Bautechnik“ (Bd. 10), Erich Schmidt Verlag, Berlin 1998
- [108] wie [84], Seite 46
- [109] OECD: Frascati Handbuch 2015: Leitlinien für die Erhebung und Meldung von Daten über Forschung und experimentelle Entwicklung, Seite 47, [https://read.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/frascati-handbuch-2015\\_9789264291638-de#page1](https://read.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/frascati-handbuch-2015_9789264291638-de#page1), Stand 28.01.2019
- [110] Graubner, Carl-Alexander/Ritter, Frank: Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Innenbauteile bei Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen – Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2010
- [111] Graubner, Carl-Alexander/Clanget-Hulin, Martina: Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Außenbauteile bei Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen – Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2013
- [112] Waltjen, T., et al, Passivhaus-Bauteilkatalog – Ökologisch bewertete Konstruktionen, Hrsg. Österreichisches Institut für Baubiologie und -Ökologie IBO), Springer Verlag, Wien 2003, 3. Auflage 2009
- [113] Mötzl (heute Figl), H.; Pladerer, C. et al: Assessment of Buildings and Constructions (ABC) – Disposal, Hrsg. Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2010
- [114] IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH: EI – Entsorgungsindikator, Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators von Bauteilen und Gebäuden, Wien 2012, [https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/ei\\_berechnungsleitfaden\\_v1\\_2012.pdf](https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/ei_berechnungsleitfaden_v1_2012.pdf), Stand 28.01.2019
- [115] IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH: EI KON – Entsorgungsindikator für Bauteile, EI10 – Entsorgungsindikator für Gebäude, Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators EI Kon von Bauteilen und des Entsorgungsindikators EI10 auf Gebäudeebene, Wien 2018
- [116] wie [115], Seite 4
- [117] wie [115], Seite 5
- [118] wie [115], Seite 6
- [119] wie [115], Seite 12 f
- [120] wie [114]
- [121] DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag, Berlin
- [122] DIN 8593-0:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin
- [123] Rau, Thomas; Oberhuber, Sabine: Material Matters, deutschsprachige Ausgabe, econ Verlag, Berlin 2018
- [124] Madaster Services B.V.: Madaster Circularity Indicator explained, v1.1, Utrecht/Netherlands 2018, [https://docs.madaster.com/files/Madaster\\_Circularity\\_Indicator\\_explained\\_v1.1.pdf](https://docs.madaster.com/files/Madaster_Circularity_Indicator_explained_v1.1.pdf), Stand 22.01.2019
- [125] Ellen MacArthur Foundation and Granta Design: CIRCULARITY INDICATOR – An Approach to Measuring Circularity – Project Overview, 2015, [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators\\_Project-Overview\\_May2015.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators_Project-Overview_May2015.pdf), Stand 03.02.2019
- [126] Brand, Stewart: How Buildings Learn - what happens after they're built, Penguin Publishing Group, 1994
- [127] Bond van Nederlandse Architecten (Bund der Niederländischen Architekten) BNA: NL/SfB-Tabellen, ISBN-13: 978-90-807626-3-3, Amsterdam 12/2005
- [128] Verbene, Jeroen: Building Circularity Indicators – An approach for measuring circularity of a building, Masterthesis an der Technischen Universität Eindhoven, Niederlande, 2016, <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46934924/846733-1.pdf>, Stand 22.01.2019
- [129] wie [20], Seite 71, Hillebrandt/Seggewies: Material-Loop-Potenzial (MLP) von Konstruktionsbeton
- [130] eigene Praxiserfahrung, Projekt Rathaus Korbach (siehe Kapitel 9.1)
- [131] Madaster Services B.V.: Release notes, Release 2018.3, [https://docs.madaster.com/files/Releasenotes\\_Release\\_2018.3\\_nl.pdf](https://docs.madaster.com/files/Releasenotes_Release_2018.3_nl.pdf), Stand 03.02.2019
- [132] wie [20], Seiten 120 ff, Riegler-Floors/Hillebrandt: Kostenvergleich konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen

- [133] wie [20], Seiten 64 ff, Hillebrandt/Seggewies: Recyclingpotenziale von Baustoffen
- [134] Verbene und Cox: Blogbeitrag auf der Madaster-Webseite, <https://madaster.com/from-identity-to-circularity/>, Stand 09.02.2019
- [135] Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Niederl%C3%A4ndische\\_Organisation\\_f%C3%BCr\\_Angewandte\\_Naturwissenschaftliche\\_Forschung&oldid=209542168](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Niederl%C3%A4ndische_Organisation_f%C3%BCr_Angewandte_Naturwissenschaftliche_Forschung&oldid=209542168), Stand 09.02.2019
- [136] Durmisevic, Elma: Transformable Building Structures – Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction, Dissertation, Technische Universität Delft 2006
- [137] Schwede, Dirk A.; Störl, Elke: Methode zur Analyse der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen. In: Bautechnik 94 (2017), Heft 1, S. 1–9
- [138] wie [20], Seite 30 f, Rosen, Anja: Bewertungssysteme im Überblick
- [139] wie [91], Seite 107 ff, Auszug aus der Kriterienmatrix zum Kriterium ENV 1.2
- [140] wie [20], Seite 116, Rosen, Anja: Bewertung der Kreislaufpotenziale
- [141] wie [20], Hillebrandt/Seggewies, Seite 64
- [142] eigene Darstellung, Datenquelle wie [20], Seite 82, Hillebrandt/Seggewies: Recyclingpotenziale von Baustoffen
- [143] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Kabinettsendfassung der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) 2017, Seite 2, [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/gewabfv\\_\\_novelle\\_kabinettsendfassung\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/gewabfv__novelle_kabinettsendfassung_bf.pdf), Stand 30.07.2017
- [144] wie [20], Seite 42, Riegler-Floors/Hillebrandt: Lösbare Verbindungen und Konstruktionen
- [145] DIN 8593-0:2003-09 Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Seite 4 Tabelle 2, Beuth Verlag, Berlin
- [146] wie [68], § 8 Absatz 2
- [147] Duden Online: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Arbeit#Bedeutung1a>, Stand 13.03.2019
- [148] Wikipedia, [https://de.wikipedia.org/wiki/Arbeit\\_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Arbeit_(Physik)), Stand 28.12.2017
- [149] DEBlnet – Deutsches Ernährungsberatungs- und Informationsnetz, Träger: Institut für Ernährungsinformation, [http://www.ernaehrung.de/tipps/allgemeine\\_infos/ernaehr10.php](http://www.ernaehrung.de/tipps/allgemeine_infos/ernaehr10.php), Stand 28.12.2017
- [150] Böning, D., Maassen, N. Steinach, M.: Der Wirkungsgrad von Muskelarbeit, Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 68. Jahrgang 9/2017, S. 203-214, [https://www.germanjournalsportsmedicine.com/fileadmin/content/archiv2017/Heft\\_9/Standard\\_Boening\\_Wirkungsgrad\\_Muskelarbeit\\_9-2017.pdf](https://www.germanjournalsportsmedicine.com/fileadmin/content/archiv2017/Heft_9/Standard_Boening_Wirkungsgrad_Muskelarbeit_9-2017.pdf), Stand 18.04.2019
- [151] Liebherr-France SAS, digitale Hersteller-Datenerhebung im Praxiseinsatz, Colmar, 2019, zur Verfügung gestellt per E-mail von Herrn Boehrmer am 07.05.2019
- [152] Stingel, Maschinist bei der Fa. Reithelshöfer, Roth/Bayern, Telefon-Interview vom 06.06.2019
- [153] Leifeld, Roland, RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme, Telefoninterview vom 24.05.2019
- [154] Verschiedene Quellen: a) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, [https://www.statistik-bw.de/DatenMelden/Formularservice/33\\_A\\_Umrechnungsfaktoren.pdf](https://www.statistik-bw.de/DatenMelden/Formularservice/33_A_Umrechnungsfaktoren.pdf), Stand 30.01.2019; b) Bayrisches Landesamt für Statistik, [https://www.statistik.bayern.de/mam/service/erhebungen/bauen\\_wohnen/abfall/abfallartenkatalog+umrechnungsfaktoren\\_2018.pdf](https://www.statistik.bayern.de/mam/service/erhebungen/bauen_wohnen/abfall/abfallartenkatalog+umrechnungsfaktoren_2018.pdf), Stand 30.01.2019; c) Abfallscout, <https://www.abfallscout.de/themen/container-mieten-umrechnung-abfallarten>, Stand 19.01.2019; d) Müller, Annette: Unterlagen zur Lehre, Modul C Abbruch und Rückbau, 5. Bauwerksspezifische Kennzahlen, Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung e.V. (Hrsg.), [http://www.abw-recycling.de/Lehre/WS\\_13-14/Modul%20C/5BauwerksspezKennzahlen.pdf](http://www.abw-recycling.de/Lehre/WS_13-14/Modul%20C/5BauwerksspezKennzahlen.pdf), Stand 25.07.2016
- [155] Öko-Institut e.V.: Rohstoffwende 2049 – Zur Zukunft der nationalen und internationalen Rohstoffpolitik, Dokumentation der Jahrestagung 2016, <https://www.oeko.de/forschung-beratung/themen/rohstoffe-und-recycling/rohstoffwende-2049-zur-zukunft-der-nationalen-und-internationalen-rohstoffpolitik>, Stand 28.05.2018
- [156] Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ) vom 28.03.2019, Seite 13: In Deutschland wird der Sand knapp – Vor allem auf dem Bau werden Rohstoffe teurer / Immer weniger Sandgruben, dpa
- [157] wie [20] Seite 116, Rosen, Anja: Bewertung der Kreislaufpotenziale
- [158] wie [20] Seiten 108 ff, Rosen, Anja: Sind Kreislaufpotenziale messbar? Eine Analyse am Beispiel von Fassaden- und Dachbekleidungen
- [159] wie [133], Seite 69
- [160] Baunetzwissen, [www.baunetzwissen.de/flachdach/fachwissen/flachdacharten/das-unbelueftete-flachdach-umkehrdach-155949](http://www.baunetzwissen.de/flachdach/fachwissen/flachdacharten/das-unbelueftete-flachdach-umkehrdach-155949), Stand 04.10.2017
- [161] wie [158] Seite 112 f
- [162] wie [133]
- [163] Foto: Antal Abbruch- und Baumanagement GmbH, Frankfurt
- [164] wie [163]
- [165] Pischinger, Stefan: Verbrennungskraftmaschinen I, Vorlesungsumdruck des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen, Seite 76, Aachen 2015
- [166] Müller, Annette: Unterlagen zur Lehre, Modul C Abbruch und Rückbau, 8. Kontrollierter Rückbau, Seite 16, Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung e.V. (Hrsg.), [http://www.abw-recycling.de/Lehre/WS\\_13-14/Modul%20C/8KontrollierterRueckbau.pdf](http://www.abw-recycling.de/Lehre/WS_13-14/Modul%20C/8KontrollierterRueckbau.pdf), Stand 25.07.2016
- [167] DIN 276:2018-12 – Kosten im Bauwesen, Beuth Verlag, Berlin
- [168] Krauss, Franz; Führer, Wilfried; Jürges Thomas: Tabellen zur Tragwerklehre, 9. überarbeitete Auflage, Aachen 2003
- [169] wie [165]
- [170] wie [111]
- [171] wie [20], Seite 82, Hillebrandt/Seggewies: Recyclingpotenziale von Bauplatten
- [172] FSC (Hrsg.): Principles and Criteria for Forest Stewardship, Version 5.2, Juli 2015, Deutsche übersetzte Fassung, Bonn 28.03.2018, <https://www.fsc-deutschland.de/preview.fsc-pinzipien-und-kriterien.a-1300.pdf>, Stand 27.10.2019

- [173] wie [20], Seite 130 f, Riegler-Floors/Hillebrandt: Kostenvergleich konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen, Kostenvergleich 2
- [174] Argisol Bausysteme Bewa GmbH Obersülzen, Produktinformationen zu ARGISOL-Schalungselementen aus NEOPOR®, [https://www.argisol.de/products/wall-system-25cm.html?L=1%23get\\_URL\\_ID\\_TOK%23#get\\_URL\\_ID\\_TOK](https://www.argisol.de/products/wall-system-25cm.html?L=1%23get_URL_ID_TOK%23#get_URL_ID_TOK), Stand 18.07.2019
- [175] wie [20], Seite 89, Hillebrandt/Seggewies: Recyclingpotenziale von Baustoffen/Dämmungen
- [176] wie [46], Datensatz für Brettschichtholz, UUID: 65088842-af32-46a8-819d-b92901c9e91e , Eigentümer des Datensatzes: Thünen Institut für Holzforschung, [https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=65088842-af32-46a8-819d-b92901c9e91e&stock=OBD\\_2017\\_I&lang=de](https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=65088842-af32-46a8-819d-b92901c9e91e&stock=OBD_2017_I&lang=de), Stand 29.07.2019
- [177] Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e.V.: Umweltproduktdeklaration Nr. EPD-VHI-20150033-IBE1-DE für WPC-Terrassendielen, Herausgeber: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 07/2015, <https://vhi.de/wp-content/uploads/2014/05/WPC-Terrassendielen.pdf>, Stand 19.07.2019
- [178] Wecobis – ökologisches Baustoffinformationssystem, Hrsg.: Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat mit Bayrischer Architektenkammer, <https://www.wecobis.de/en/bauproduktgruppen/dichtungen-abdichtungen/abdichtungsbahnen/kunststoffdichtungsbahnen.html>, Stand 03.08.2019
- [179] wie [20], Seite 132f, Riegler-Floors/Hillebrandt: Kostenvergleich konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen, Kostenvergleich 3
- [180] Bauwissen Online, Hrsg.: wion media services GmbH & Co. KG, beaufsichtigt durch Bayerische Architektenkammer, <https://www.bauwissen.de/begriffe/harzkompositplatte-faserverstaerkt>, Stand 04.08.2019
- [181] wie [20], Seite 91, Hillebrandt/Seggewies: Recyclingpotenziale von Dämmstoffen
- [182] Outokumpu Oyj, Finnland: Umweltproduktdeklaration für kaltgewalzte Edelstahlbleche, Deklarationsnr.: EPD-OTO-20190002-IBD1-EN, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 06/2019
- [183] wie [20], Seite 138
- [184] wie [43], Seite 31
- [185] Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (Hrsg.): GHG Profiles for Annex-1-Parties (engl. für Treibhausgasemissionen der Annex-1-Länder), [https://di.unfccc.int/ghg\\_profile\\_annex1](https://di.unfccc.int/ghg_profile_annex1), Stand 13.01.2020
- [186] Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2018/2019, Seiten 1 und 4, Düsseldorf 01/2019
- [187] worldsteel association (Hrsg.): Steel Statistical Yearbook 2018, Tabelle 29 und 30, Brüssel 2018, [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:e5a8eda5-4b46-4892-856b-00908b5ab492/SSY\\_2018.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:e5a8eda5-4b46-4892-856b-00908b5ab492/SSY_2018.pdf), Stand 11.01.2020
- [188] Wirtschaftsvereinigung Stahl, Düsseldorf, <https://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahlanwendung/bauwesen/>, Stand 04.08.2019
- [189] Verein deutscher Zementwerke e.V. (vdz): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2017, Düsseldorf 08/2018, Seite 15, <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2017>, Stand 13.01.2020, in Verbindung mit [186]
- [190] wie [189], Seite 7
- [191] wie [187], Tabelle 6
- [192] Lemken, Thomas/Liedtke, Christa/Bienge, Katrin/Salzer, Corinna: Stahl – ein Werkstoff mit Innovationspotenzial, Seite 17, Hrsg.: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Wuppertal 06/2008, [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/3009/file/3009\\_Werkstoff\\_Stahl.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/3009/file/3009_Werkstoff_Stahl.pdf), Stand 11.08.2019
- [193] wie [46], Datensatz für Bewehrungsstahl, UUID e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082, <https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082&version=20.17.009>, Stand 28.02.2019
- [194] bauforumstahl e.V. & Industrieverband Feuerverzinken e.V.: Umweltproduktdeklaration für feuerverzinkte Baustähle – Offene Walzprofile und Grobbleche, Deklarationsnr.: EPD-BFS-20180167-IBG1-DE, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 12/2018
- [195] European Association for Panels and Profiles (PPA-Europe): Umweltproduktdeklaration für Profilbleche aus Stahl für Dach-, Wand-, Decken- und Deckenkonstruktionen, Deklarationsnr.: EPD-PPA-20180077-CBG2-EN (englische Ausgabe), Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 09/2018
- [196] Vallourec Deutschland GmbH: Umweltproduktdeklaration für Kreisförmige, quadratische und rechteckige Stahlbauhohlprofile, Deklarationsnr.: EPD-VAL-20150248-IBB1-DE, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 09/2015
- [197] wie [182]
- [198] GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.: Umweltproduktdeklaration für bandbeschichtetes Aluminiumblech, Deklarationsnr.: EPD-GDA-20130259-IBG1-DE, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 11/2018
- [199] KME Germany GmbH & Co. KG: Umweltproduktdeklaration für TECU® Classic Kupfertafeln und -bänder, Deklarationsnr.: EPD-KME-20190038-IBA1-DE, Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 04/2019
- [200] Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation, Geoportal Hessen, [https://www.geoportal.hessen.de/map?LAYER\[visible\]=1&LAYER\[querylayer\]=1](https://www.geoportal.hessen.de/map?LAYER[visible]=1&LAYER[querylayer]=1), Stand 09.07.2018
- [201] Rosen, Anja, für ARGE agn-heimspielarchitekten: Gutachten zur Entwicklung von Methoden für die Planung und Ausführung ressourcenschonender Bauprojekte in massiver Bauweise unter Berücksichtigung des selektiven Rückbaus des Baubestands, abgeleitet am Best-Practice-Beispiel „Rathaus Korbach“, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV), unveröffentlichter Zwischenbericht, Ibbenbüren/Wiesbaden 18.12.2018
- [202] Center for Environmental Systems Research (CESR): RückRat – Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus und Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining in der Stadt Korbach, laufendes Forschungsprojekt unter Leitung von Clemens Mostert, Projektlaufzeit 12/2018 bis 11/2020, <https://www.uni-kassel.de/einrichtungen/cesr/forschungsprojekte/aktuelle-projekte/rueckrat.html>, Stand 17.08.2019

- [203] Hofner, Jonas: Erhebung des Verwertungspotenzials von Materialien im Gebäudebestand vor Rückbau und Abriss am Beispiel des Rathauses von Korbach, erstellt am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen des Center for Environmental Systems Research (CESR), Kassel, 2017
- [204] wie [20], Seite 36 ff, Romm, Thomas Matthias und Kasper, Thomas: Ökoeffizientes Bauen mit Ressourcen vor Ort
- [205] DIN 4226-100:2002-02 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen
- [206] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb., Hrsg.): Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Beuth Verlag, Berlin 09/2010
- [207] HeidelbergCement AG (Hrsg.): Betontechnische Daten, Seiten 143ff, Heidelberg 07/2017, <https://www.heidelbergcement.de/de/betontechnische-daten>, Stand 20.08.2019
- [208] wie [206]
- [209] Thienel, K. Ch.: Eisenhüttenschlacken und Hüttensand, Seite 8, Universität der Bundeswehr, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, München, Herbsttrimester 2017, <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/masterstudium>, Stand 17.12.2018,
- [210] Deutsches Institut für Bautechnik: Europäische Technische Bewertung für Misapor Standard 10/75, ETA-13/0549 v. 21.06.2018, <https://www.misapor.ch/media/download/3ea7a686/f673/4fa0/b5c7/1fe6e7cb4fef/de-3ea7a686-f673-4fa0-b5c7-1fe6e7cb4fef.pdf>, Stand 08.09.2019
- [211] EFG Beratende Ingenieure, Übersicht Betonfestigkeitsklassen, Expositionsklassen und Betonüberdeckung für Betonbauteile, Bauvorhaben Erweiterung Rathaus Korbach, unveröffentlicht, Fuldabrück 2018
- [212] Knauf Insulation: EPD Glass Mineral Wool 035-034 (engl.), Deklarationsnr.: EPD-KNA-20140052-CBC1-EN, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., 05/14
- [213] Deutsche Rockwool: Umweltproduktdeklaration, Deklarationsnr.: EPD-DRW-20180065-IBC1-DE, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin, 08/18
- [214] wie [20], Hillebrandt/Seggewies: Recyclingpotenziale von Baustoffen, Seite 66
- [215] UPM Plywood Oy, Finnland: Produktdatenblatt für das Produkt WISA® Birch Products, <https://expresszuschnitt.de/downloads/datenblaetter/holz/sperrholz/birkensperrholz/WISA-Umweltdeklaration.pdf>, Stand 28.09.2019
- [216] Buchert, Matthias; Sutter, Jürgen; Alwast, Holger; Schütz, Nadja; Weimann, Karin: Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten, im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.), Texte 33/2017, Seite 4, Dessau-Roßlau 03/2017, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24\\_texte\\_33-2017\\_gipsrecycling.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24_texte_33-2017_gipsrecycling.pdf), Stand 08.10.2019
- [217] wie [216], Seite 55
- [218] Verband für Abbruch und Entsorgung e.V., Online-Artikel vom 04.06.2019, <https://www.abbruch-mv.de/2019/06/04/warum-die-recyclingwirtschaft-einen-grenzwert-fuer-asbest-braucht/>, Stand 10.10.2019
- [219] Bunzel, Jörg-Michael/Fa. MUEG, Braunsbedra/Sachsen: telefonische Auskunft vom 11.10.2019
- [220] bauforumstahl e.V.: Umweltproduktdeklaration für Baustähle – Offene Walzprofile und Grobbleche, Deklarationsnr.: EPD-BFS-20180116-IBG2-DE, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 10/2018
- [221] Auro AG: Technisches Merkblatt für Wandfarbe 321, Stand 11/2019, Bindemittel Replebin: <https://www.auro.de/de/service/rohstoffkunde/>, Stand 25.02.2020
- [222] wie [213]
- [223] Thermo Natur GmbH & Co.KG, Technisches Datenblatt 09/2019, [https://www.thermo-natur.de/wp-content/uploads/TDB\\_THERMO\\_JUTE\\_100\\_PLUS.pdf](https://www.thermo-natur.de/wp-content/uploads/TDB_THERMO_JUTE_100_PLUS.pdf), Stand 08.10.2019
- [224] Desso BV: EPD Tufted carpet (engl.), Deklarationsnr.: EPD-DES-20150183-CAB1-DE, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin, 01/16
- [225] Plag, Ralf: Online-Rechner für U-Werte und Feuchteschutz, <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/>, Stand 17.09.2019
- [226] EFG Beratende Ingenieure, Energieeinsparnachweis nach DIN V 18599 Teil 1-11:2011-12, für das Bauvorhaben Erweiterung Rathaus Korbach, Seite 104, Vorabzug unveröffentlicht, Fuldabrück 24.10.2018
- [227] Saint Gobain ISOVER G+H AG: Umweltproduktdeklaration für unkaschierte Glaswolle Platten und Filze, Deklarationsnr.: EPD-SGI-20160161-CAA1-DE, Hrsg.: Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin 12/2016
- [228] wie [171] und Seite 99
- [229] HeidelbergCement AG (Konsortioalführer): R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation, Verbundforschungsvorhaben, Laufzeit vom 01.11.2014 bis 31.10.2018, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, Projektplattform <https://www.r-beton.de>, Stand 27.10.2019
- [230] Eitner, Janis; Fleck, Tanja; Kumpmann, Iris; Pontes, Ulrich; Jakubiak, Julian (alle Fraunhofer): neuartiges Recycling von Bauschutt, Presseinformation 25.10.2018, [https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/2018/Oktober/pi39\\_Neuartiges%20Recycling%20von%20Bauschutt.pdf](https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/2018/Okttober/pi39_Neuartiges%20Recycling%20von%20Bauschutt.pdf), Stand 27.01.2020
- [231] Cemex Deutschland AG, <https://www.cemex.de/produkte/beton/preislisten>, Stand 25.01.2020
- [232] wie [114], Seite 4
- [233] ECO Platform, c/o Construction Products Europe AISBL, Brüssel/Belgien, <https://www.eco-platform.org>, Stand 08.02.2020
- [234] Helmus, Manfred/Kesting, Holger/Randel, Anne: Entkernungs- und Abbruchkostenindex (EAKI) – Entwicklung eines Werkzeugs zur Kostenermittlung für den Rückbau und das Bauen im Bestand, laufendes Forschungsprojekt an der Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- [235] wie [225]
- [236] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): eLCA – Online-Anwendung zur Berechnung von Ökobilanzen für Gebäude, <https://www.bauteileditor.de>, Stand 03.11.2019

- [237] Trinius, Wolfram/Schmincke, Eva mit Institut Bauen und Umwelt e.V.: Ressourcenschonende Gebäude – EPD für Bauprodukte – Demontage- und Recyclinginformationen (Module C und D) einschließlich gefährlicher Stoffe, laufendes Forschungsprojekt, gefördert vom Bundesumweltministerium, unveröffentlicht
- [238] Trinius, W.; Goerke, J.: Declaration of the End-of-Life for Building Products , Sustainable Built Environment Conference 2019, Graz, IOP Conference Series, Earth and Environmental Science, Sci. 323 012050, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/323/1/012050>, Stand 08.02.2020
- [239] wie [20], Seite 115, Rosen, Anja: Bewertung der Kreislaufpotenziale, überarbeitet
- [240] wie [20], Seite 216, Definition der Verfasserin
- [241] Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Internetportal: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/rohstoffe-als-ressource/gesamter-materialaufwand-deutschlands#der-indikator-gesamter-materialaufwand>, Stand 22.02.2020
- [242] wie [14], Glossar, [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Domestic\\_material\\_consumption\\_\(DMC\)/de](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Domestic_material_consumption_(DMC)/de), Stand 15.02.2019
- [243] wie [20], Seite 217
- [244] Jacobs, Georg (Hrsg.): Maschinengestaltung I, Seite 56–59, Verlag Mainz, Aachen 2016
- [245] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie 4600 Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden, Seite 6, Beuth Verlag, Düsseldorf, Januar 2012
- [246] wie [245], Seite 7
- [247] wie [20], Seite 217, Definition der Verfasserin
- [248] wie [20], Seite 217, Definition von Hillebrandt/Seggewies
- [249] wie [20], Seite 217, Definition von Hillebrandt/Seggewies
- [250] wie [20], Seite 218
- [251] wie [20], Seite 218, Definition von Hillebrandt/Seggewies
- [252] wie [5], Seite 20
- [253] wie [20], Seite 219
- [254] wie [20], Seite 10, Hillebrandt: Architekturkreisläufe – Urban Mining Design
- [255] wie [253]
- [256] wie [253]
- [257] wie [253]
- [258] wie [253]

## Abbildungsverzeichnis

### A 1. Abbildungen Kapitel 1

- A 1.1 Die 17 Ziele der UN für nachhaltige Entwicklung (engl. Sustainable Development Goals - SDGs), Logos von Maria Gershuni [1]
- A 1.2 Inländischer Materialverbrauch (Domestic Material Consumption – DMC) und Materialfußabdruck in Industrie- und Entwicklungsländern, Jahre 2000-2017 [3]
- A 1.3 Materialfußabdruck pro Kopf (Raw Material Consumption – RMC) nach Rohstoffart in Industrie- und Entwicklungsländern, Jahre 2000-2017 [4]
- A 1.4 Genutzte Inländische Rohstoffentnahme in Deutschland 2015, nach Rohstoffgruppen [5]
- A 1.5 Sustainable Development Goals mit besonderer Relevanz für den Verbrauch stofflicher Ressourcen und Zuordnung relevanter Indikatoren auf den verschiedenen politischen Ebenen
- A 1.6 Reduzierung des theoretischen Rohstoffbedarfs durch die Sekundärrohstoffwirtschaft – DERec und DERec im Verhältnis zu DMI und RMI für das Jahr 2013, eigene Darstellung, Datenbasis UBA [19]
- A 1.7 Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland, 2000 = 100% [15]
- A 1.8 Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (Circular Material Use Rate – CMU) in % der inländischen Materialverwendung, Europa nach Ländern, 2016 [16]
- A 1.9 Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (Circular Material Use Rate – CMU) der 28 EU-Mitgliedsstaaten (gesamt), 2016 [17]
- A 1.10 Beispiel einer modernen Ruine: seit Jahren leerstehende Tankstelle im Münsterland

### A 2. Abbildungen Kapitel 2

- A 2.1 Wegweiser an einem Kreisverkehr in Ostbevern bei Münster
- A 2.2 Produktivitätsraten der Nachhaltigkeitsstrategien Konsistenz, Effizienz und Suffizienz im Aufwands- und Ertragsdiagramm nach Schmidt [27]
- A 2.3 „Kraftfelder“ suffizienter Strategien (a), effizienter Strategien ohne Kostenkomponente für Ressourcen- und Umweltaufwand (b), mit Kosten für Ressourcen- und Umweltaufwand (c) und notwendiges Kraftfeld zum Erreichen des nachhaltigen Zielgebiets (d) nach Schmidt [30]
- A 2.4 Natürlicher Kreislauf und gestörter Kreislauf nach Schlichting [31]
- A 2.5 Eingriff des Technischen Kreislaufs in die von Schlichting beschriebenen Naturkreisläufe, eigene Darstellung
- A 2.6 Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen nach Hillebrandt [32]
- A 2.7 Earth Overshoot Day 1969-2018 [38]
- A 2.8 Wirkungsrichtungen der Ökoeffizienz und der Ökoeffektivität nach Braungart/EPEA [39]
- A 2.9 Ökobilanzmodule A – D in Anlehnung an DIN EN 15 978 [42]
- A 2.10 Umweltinformationen und zugeordnete Indikatoren in Anlehnung an DIN EN 15 978 [44]
- A 2.11 Treibhauspotenzial von 1m<sup>3</sup> Nadelschnittholz – frisch, Durchschnitt DE [48]
- A 2.12 Systemgrenzen des Urban Mining Index
- A 2.13 Ablaufplan zur Vorgehensweise

### A 3. Abbildungen Kapitel 3

- A 3.1 Konventioneller Abbruch in Brochterbeck/Münsterland (2018): sortenreine Trennung von Ziegeln, Beton, Holz, Metall, Dämm- und Kunststoffen? Fehlanzeige!
- A 3.2 Ebenen des Abfallrechts mit Relevanz für Rückbau und Recycling im Bauwesen
- A 3.3 Abfallhierarchie nach Abfallrahmenrichtlinie [56]
- A 3.4 Einordnung von Bau- und Abbruchabfällen nach Abfallverzeichnis (beispielhafter Auszug) [64]
- A 3.5 Potenziale von Althölzern für die höherwertige stoffliche Verwertung nach AltholzV [65]
- A 3.6 Abfallaufkommen gesamt in Deutschland 2016 in Mio. t [72]
- A 3.7 Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland 2016 in Mio. t [73]
- A 3.8 Verbleib der ungefährlichen Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland 2016 in Mio. t [74]
- A 3.9 RC-Baustoffverwendung in Deutschland 2010 in Mio. t [75]
- A 3.10 Wirkungsabschätzung für Konstruktionsbetone, RC-Beton mit erhöhtem Zementanteil, Relation in % [76]
- A 3.11 Entsorgungssicherheit über Deponiekapazitäten in Deutschland nach Haeming, Hartmut, 2018
- A 3.12 selektiver Abbruch mittels Abbruchzange
- A 3.13 Selektiver Rückbau von Installationen aus einer Mauerwerkswand
- A 3.14 Eignung von Abbruchverfahren mit Fokus auf den selektiven Rückbau von Gebäuden in Anlehnung an DIN 18007
- A 3.15 Abbruchtechniken [84]
- A 3.16 Kosten, Zeitbedarf und Verwertungsquoten beim Rückbau für unterschiedliche Demontagetiefen (Ergebnisse von Optimierungsrechnungen) [86]
- A 3.17 Materiallager des Gebäudebestands in Deutschland 2010 in Mio. t nach Materialgruppen [87]
- A 3.18 Zukunftsszenarien für den Rezyklateinsatz nach Sensitivitätsstudien von Deilmann et al. [87]
- A 3.19 Hochrechnungen zu Materialströmen im Hochbau (Wohnen und Nichtwohnen) [87]

### A 4. Abbildungen Kapitel 4

- A 4.1 Atomium, Brüssel
- A 4.2 weltweit angewendete Zertifizierungssysteme für Gebäude, 2017

- A 4.3 recyclingbezogene Kriterien in den etablierten Zertifizierungssystemen
- A 4.4 Bewertung der Indikatoren Rückbau, Sortenreinheit und Verwertung im Kriterium 4.1.4 des BNB-Systems
- A 4.5 Bewertung der Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit im Kriterium TEC 1.6 der DGNB
- A 4.6 Kriterien mit Bezug zum Recycling von Baumaterialien im BREEAM-System International New Construction, 2016
- A 4.7 BREEAM-System International New Construction, 2016: Kriteriengruppen und deren Gewichtung für Nichtwohngebäude [92]
- A 4.8 LEED-System Building Design and Construction (BD+C) v4: Kriteriengruppen und deren Gewichtung
- A 4.9 Kriterien der Gruppe „Materialien & Rohstoffe“ im LEED-System Building Design and Construction (BD+C) v4 [93]
- A 4.10 etablierte Umweltzeichen Typ I für Bauprodukte [97]
- A 4.11 Cradle-to-Cradle-System: Materialkreisläufe der Bio- und Technosphäre, EPEA GmbH
- A 4.12 Bewertung des Materialrecyclings im Cradle-to-Cradle System [106]
- A 4.13 Volumenbezogene, materialabhängige Dauerkennwerte von Abbruchtechniken in h/m<sup>3</sup> für einen 40-Tonnen-Bagger und zwei Arbeitskräfte [108]
- A 4.14 Vergleich der Arbeitsaufwände zum Rückbau von WDVS an unterschiedlichen Untergründen [111]
- A 4.15 Bewertung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Rückbaueigenschaften nach Graubner und Clanget-Hulin in Anlehnung an DGNB und BNB
- A 4.16 Entsorgungseinstufung der Baustoffe im Entsorgungsindikator EI10 des IBO [117]
- A 4.17 Einstufung des Verwertungspotenzials mit Zuordnung der (fiktiven) Reduktion/Erhöhung der betrachteten Abfallmengen im Entsorgungsindikator EI10 des IBO [118]
- A 4.18 Beispielhafte Baustoffe/Bauteilschichten mit Zuordnung der Entsorgungseinstufung und des Verwertungspotenzials im Entsorgungsindikator EI 10 des IBO [119]
- A 4.19 Systemgrenzen der Messmethodik im Madaster Circularity Indicator: Bauphase (blau) Nutzungsphase (grün) End-of-Life Phase (orange) [124]
- A 4.20 Darstellung der Komponenten des Madaster Circularity Indicators auf der Madaster-Plattform [131]
- A 4.21 Beispiel für eine Codierung von Gebäudedaten nach den Tabellen des NL-SfB Standard [127]
- A 4.22 Beurteilung der Demontagefähigkeit von Bauprodukten und -materialien im Madaster Circularity Indicator [124]

## **A 5. Abbildungen Kapitel 5**

- A 5.1 Reitermann und Sassenroth mit Martin Rauch: Kapelle der Versöhnung, Berlin
- A 5.2 Parameter zur Bewertung der Kreislaufpotenziale im Lebenszyklus
- A 5.3 Schad- und Risikostoffe, die aus dem Kreislauf auszuschließen sind
- A 5.4 Wertstoffe und ihre End-of-Life Szenarien [140]
- A 5.5 Material Recycling Content (MRC) am Beispiel einer Spanplatte [142]
- A 5.6 Material-Loop-Potenzial (MLP) der gleichen Spanplatte [142]
- A 5.7 Charakterisierung der Gruppen von Fügetechniken in Anlehnung an DIN 8593-0 [145]
- A 5.8 schwere körperliche Tätigkeit bei der Entkernung eines Mehrfamilienwohnhauses in Handarbeit
- A 5.9 Physikal Activity Level (PAL) zur Bestimmung des Leistungsumsatzes [149]
- A 5.10 Kraftstoffbedarf für verschiedene Abbruchverfahren mit entsprechenden Anbaugeräten für einen 40-65 t. Abbruchbagger [152]
- A 5.11 Bewertungsparameter mit Maßstäben und Eigenschaften nach Lebenszyklusphasen

## **A 6. Abbildungen Kapitel 6**

- A 6.1 Mindmap Datenerhebung
- A 6.2 Übersicht der Preiserhebung in Deutschland
- A 6.3 Preisabfrage für Bau- und Abbruchabfälle an die Entsorger
- A 6.4 Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-) für Bau- und Abbruchabfälle, bundesweiter Durchschnitt
- 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)
- A 6.8 trocken gestapelt: Ziegel an Dämmebene mit MDF-Verschalung (2)
- A 6.9 leicht demontierbar: Ziegel mit Edelstahlankern befestigt
- A 6.10 Dokumentation Rückbau und Wert: Ziegel an Dämmebene mit MDF-Verschalung (2)
- 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)
- A 6.14 homogen: WDVS aus Mineraldämmstoffplatten mit Leichtputz auf Porenbeton (8)
- A 6.15 WDVS: Glasgewebe mit Putzrückständen
- A 6.16 Dokumentation Rückbau und Wert: WDVS (8)
- A 6.17 Holzbekleidung auf Außenwand in Holzständerbauweise (9-10)
- A 6.18 Holzständerwand mit OSB-Beplankung
- A 6.19 Dokumentation Rückbau und Wert: Holzbekleidung auf Außenwand in Holzständerweise (9-10)
- 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)
- 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)
- 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)
- A 6.29 langlebig: Schieferdeckung auf geneigtem Dach (14)
- A 6.30 Demontage Schieferdeckung
- A 6.31 Dokumentation Rückbau und Wert: Schieferdeckung
- 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: Stahlfalzdeckung aus Zinkblech auf geneigtem Dach (15)
- A 6.35 Demontageaufwand im Vergleich
- A 6.36 Vergleich Parameter „Arbeit“
- A 6.37 Vergleich Parameter „Wert“ auf Basis der Preiserhebung 2016
- A 6.38 Übersicht der untersuchten Fassaden
- A 6.39 Übersicht der untersuchten Dachbekleidungen
- A 6.40 Anteil der Qualitätsstufen unter Berücksichtigung des Material-Loop-Potenzial am Beispiel der Pfosten-Riegel-Fassade
- A 6.41 „Zeilgalerie“ in der Frankfurter Innenstadt
- A 6.42 Fehlplanungen des Entwurfskonzeptes
- A 6.43 Rückbau Kinosaal in der Zeilgalerie: 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 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 Rückbauprojekt Wohnhaus in Waldkraiburg/Bayern
- A 6.54 Abfalltrennung
- A 6.55 Dokumentation des Rückbauaufwands am Beispiel des Bodenbelags aus Abb. A 6.56
- A 6.56 selektiver Rückbau eines Bodenbelags
- 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 Bruttoraum- inhalt (BRI) [166]
- A 6.58 Beispielhafte Dokumentation der Untersuchungsergebnisse von Graubner et al. [170]
- A 6.59 flächenbezogene Zeitaufwandswerte und Energiebedarfe für den Abbruch beispielhafter Rohbauteile

## **A 7. Abbildungen Kapitel 7**

- A 7.1 Logo des Urban Mining Index
- A 7.2 Ebenen der Gebäudestruktur mit Bewertungsgrundlagen
- A 7.3 Wertstoffe einer beispielhaften Außenwandkonstruktion (= Bauteilebene; Anteile nach Massen in %)
- A 7.4 Qualitätsstufen als Variable zur Bewertung der Kreislaufpotenziale (vor der Verifizierung)
- A 7.5 Qualitätsstufen Post-Use der WU-Beton-Bodenplatte aus der beispielhaften Berechnung Kapitel 7.3.3
- A 7.6 Berechnung der Kreislaufpotenziale am Beispiel einer studentischen Arbeit, Leona Heidrich, Bergische Universität Wuppertal, Korrektur Rosen
- A 7.7 MRC und MLP von Konstruktionsvollholz und einer beispielhaften Holzfaserplatte, nach Hillebrandt/Seggewies, Atlas Recycling [171]
- A 7.8 Qualitätsstufen als Variable zur Bewertung der Kreislaufpotenziale (nach der Verifizierung)
- A 7.9 Berechnung der Kreislaufpotenziale am Beispiel der studentischen Arbeit aus Kapitel 7.4.1 nach der Verifizierung
- A 7.10 Systematik zur Berechnung der Kreislaufpotenziale nach Qualitätsstufen
- A 7.11 Erfassung eines beispielhaften Dachaufbaus mit dem entwickelten Excel Tool

## **A 8. Abbildungen Kapitel 8**

- A 8.1 Lärchenschindeln an der Kapelle Sumvig von Peter Zumthor, Foto: Hillebrandt
- A 8.2 Entwurfskonzept Modellprojekt 1: Schnitt und Grundriss EG nach Riegler- Floors/Hillebrandt [173], Maßstab 1:1000
- A 8.3 Konventionelle Konstruktion nach Riegler- Floors/Hillebrandt [173], Vertikalschnitt Maßstab 1:50
- A 8.4 Urban Mining Design nach Hillebrandt/Riegler-Floors [173], Vertikalschnitt Maßstab 1:50
- A 8.5 Entwurfskonzept Modellprojekt 2: Grundrisse EG und OG nach Riegler-Floors/Hillebrandt [179], Maßstab 1:1000
- A 8.6 Konventionelle Konstruktion nach Riegler- Floors/Hillebrandt [179], Vertikalschnitt Maßstab 1:50
- A 8.7 Urban Mining Design nach Hillebrandt/Riegler-Floors [179], Vertikalschnitt Maßstab 1:50
- A 8.8 Treibhausgasemissionen der recyclingorientierten Gründung aus Modellprojekt 2 mit unterschiedlicher Datenbasis (Rechenexemple)
- A 8.9 Treibhausgasemissionen der in Modellprojekt 2 verwendeten Metalle in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. pro kg Metall

**A 9. Abbildungen Kapitel 9**

- A 9.1 Visualisierung Rathaus Korbach, Christian Thomann/ARGE agn heimspielarchitekten
- A 9.2 Bestand Rathaus Korbach, Foto: Christian Thomann/ARGE agn heimspielarchitekten
- A 9.3 Luftbild historischer Innenstadtkern von Korbach [200]
- A 9.4 Urban Mining Konzept Rathaus Korbach, Anja Rosen für ARGE agn heimspielarchitekten
- A 9.5 Rechenmodell für die Direktverwertung der mineralischen Abbruchmaterialien aus dem Bestandsgebäude [201]
- A 9.6 Sichtbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 unter Verwendung von Ziegelrezyklat an einer Musterfassadentafel
- A 9.7 Erweiterung Rathaus Korbach, Grundriss EG, ohne Maßstab, ARGE agn-heimspielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken
- A 9.8 Selektiver Rückbau des Rathausanbaus: ausgebaute Dachdämmung mit Verschmutzung von Bitumen
- A 9.9 Selektiver Rückbau Porenbetonmauerwerk und Gussasphaltestrich im Erdgeschoss
- A 9.10 Abbruch des Stahlbetonskeletts
- A 9.11 Aufbereitung der mineralischen Abbruchabfälle in einer mobilen Brechanlage
- A 9.12 Sockeldetail Rathaus Korbach – ursprüngliche Planung, M 1:20, ARGE agn-heimspielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken, Stand 12/2018
- A 9.13 Sockeldetail Rathaus Korbach – Urban Mining Design, M 1:20, ARGE agn-heimspielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken/Anja Rosen, Stand 12/2018
- A 9.14 Stoffraumrechnung für den Beton der Gründungvarianten
- A 9.15 Anschluss Außenwand/Fassade an Geschossdecke Rathaus Korbach, M 1:20, ARGE agn-heimspielarchitekten, Vitali Hense/Marc Matzken, Stand 09/2019
- A 9.16 Fassade Rathaus Korbach, Horizontalschnitt Fenstertyp 1, M 1:20, mit maßstabloser Ansicht innen und außen, ARGE agn-heimspielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken, Stand 09/2019
- A 9.17 Innenwände, Vertikalschnitt, M 1:20
- A 9.18 Anschluss Dach an Außenwand/Fassade Rathaus Korbach, M 1:20, ARGE agn-heimspielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken, Stand 12/2018
- A 9.19 Vergleichende Berechnung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene
- A 9.20 Ergebnisse der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene und Überführung in den Urban Mining Indicator
- A 9.21 Treibhauspotenzial der untersuchten Varianten auf Gebäudeebene
- A 9.22 Test einer anderen Berechnungsweise des Urban Mining Indicators: Gewichtung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene nach Bauteilflächen
- A 9.23 Kreislaufpotenziale der Urban Mining Design Variante des Modellprojekts 1 aus Kapitel 8 auf Gebäudeebene
- A 9.24 Urban Mining Indicator derselben Konstruktion
- A 9.25 Kreislaufpotenziale derselben Konstruktion bei optimiertem Material-Recycling-Content (MRC)
- A 9.26 Urban Mining Indicator derselben Konstruktion bei optimiertem Material-Recycling-Content (MRC)

**A 10. Abbildungen Kapitel 10**

- A 10.1 Reflektion und Ausblick am Kinney Lake, Mt. Robson Provincial Park, Canada
- A 10.2 Bewertung der Kreislauffähigkeit Post-Use (gewichtet) für das Modellprojekt Rathaus Korbach
- A 10.3 Systematik des UMI am Beispiel eines Betonbauteils (Post-Use-Phase) mit Überführung der Ergebnisse in die Ökobilanz [239]
- A 10.4 Systematik des UMI am Beispiel eines Holzbauteils (Post-Use-Phase) mit Überführung der Ergebnisse in die Ökobilanz

Abbildungen ohne Hinweise auf den Urheber sind eigene Grafiken oder Fotos der Verfasserin.

## Glossar

### Arbeit (netto/brutto)

in der Physik eine mechanische Energie, die durch Kraft auf einen Körper übertragen wird, gemessen in der → SI-Einheit Joule (J). Nettoarbeit ist die auf einen Körper einwirkende Arbeit, auch abgegebene Arbeit genannt. Bruttoarbeit ist die von einem thermodynamischen System (z. B. Motor) in Form von chemischer, elektrischer oder thermischer Energie aufgenommene Arbeit. Das Verhältnis von Nettoarbeit (Ertrag) zu Bruttoarbeit (Aufwand) wird als Wirkungsgrad bezeichnet.

### Barwertmethode

Mit der Barwertmethode wird unter Berücksichtigung von Preissteigerungen und Diskontierungszinsen der Gegenwartswert einer Zahlung, die in der Zukunft liegt, ermittelt.

### Benchmark

Maßstab für den Vergleich von Leistungen (Quelle: Duden).

### Circular Economy

Engl., häufig mit „Kreislaufwirtschaft“ übersetzt; systemischer Ansatz, der im Gegensatz zum linearen Wirtschaftsmodell (Abbauen – Produzieren – Entsorgen) steht. Die Circular Economy zielt darauf ab, das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln, indem Produkte so entworfen und gestaltet werden, dass die darin gebundenen stofflichen Ressourcen in möglichst endlosen Produktionskreisläufen genutzt werden können.

### Closed-Loop-Potenzial (CLP)

„Möglichkeit einer Konstruktion oder eines Produkts, geschlossene Kreisläufe (engl. Closed Loops) zu generieren. Das Closed-Loop-Potenzial einer Konstruktion ist der prozentuale Anteil an Materialien und Baustoffen, der unter Berücksichtigung definierter Kriterien ohne Qualitätsverlust in geschlossenen Kreisläufen geführt werden kann“ [240].

### CO<sub>2</sub>-Footprint

Synonym für → Treibhauspotenzial.

### Downcycling

Aufbereitungsprozess von gebrauchten Produkten oder Abfällen, der mit einem Qualitätsverlust gegenüber dem Ausgangsprodukt verbunden ist (→ Weiterverwertung oder -verwertung).

### Forest Stewardship Council (FSC)

Engl. für Rat für verantwortungsvolle Forstwirtschaft; nicht-gewinnorientierte Organisation mit Sitz in Bonn, die ein international angewandtes System zur Zertifizierung nachhaltiger Forstwirtschaft entwickelt hat und betreibt.

### End of Life (EoL)

Engl. für Lebensende; kennzeichnet die letzte Lebenszyklusphase eines Bauwerks

oder seiner Teile, d. h. das Ende der Nutzungsdauer.

### Gesamtmaterialaufwand (Total Material Requirement – TMR)

Wirtschaftlicher Indikator, der die verwerteten Rohstoffe und die nicht verwerteten Materialentnahmen im In- und Ausland umfasst, die eine Gesellschaft durch Produktion und Konsum auslöst [241].

### Heizwert

Kennwert aus der → Thermodynamik, der die bei der Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge eines Energieträgers in der Basiseinheit J/kg beziffert. Mithilfe der Dichte (kg/dm<sup>3</sup>) lässt sich der spezifische Heizwert in einen volumetrischen Heizwert (J/l) umrechnen.

In Verbrennungsmotoren wird die im Kraftstoff chemisch gebundene Energie zunächst in Wärme umgewandelt. Durch den dabei entstehenden hohen Druck im Arbeitsraum wird schließlich mechanische (Expansions-) → Arbeit an einem Kolben geleistet, der eine Kurbelwelle antreibt. Abwärme über die Zylinderwand, Abgasrestwärme sowie Reibung sind dabei als Verlust anzusehen.

### Inländischer Materialverbrauch (Domestic Material Consumption – DMC)

„Beschreibt die Gesamtentnahme an direkt verwertetem Material in einer Volkswirtschaft. Er ist definiert als die jährliche Menge an Rohmaterial, die aus dem inländischen Hoheitsgebiet entnommen wird, zuzüglich aller physischen Einfuhren abzüglich aller physischen Ausfuhren“ [242].

### Kaskadennutzung

„Mehrfache, hintereinandergeschaltete stoffliche und gegebenenfalls anschließende energetische Verwertungsmaßnahmen von Rohstoffen, etwa von Holz (z. B. Bauholz – Spanplatte – energetische Verwertung)“ [243].

### Konsistenz

Eine der drei Leitstrategien für nachhaltige Entwicklung, die darauf abzielt, die aus menschlichen Aktivitäten resultierenden Stoff- und Energieströme mit den Naturkreisläufen in Einklang zu bringen.

### Kreislaufpotenzial

Prognostiziert den Anteil an Materialien und Baustoffen einer Konstruktion, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien in mehr oder weniger geschlossenen Materialkreisläufen geführt werden können.

### Lastzyklus

Datensatz, der die Beanspruchung einer Maschine über einen festgelegten Zeitraum abbildet.

### Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Indikator nach VDI-Richtlinie 4600; Summe des „primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung“ eines Produkts oder einer Dienstleistung entsteht „bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. [...] Der KEA beschreibt die Summe

aus dem kumulierten Energieverbrauch (KEV) und dem kumulierten nicht energetischen (stofflichen) Aufwand (KNA)“ [245].

### Kumulierter Energieverbrauch (KEV)

Indikator nach VDI-Richtlinie 4600; Summe aller „gehandelten, primärenergetisch über Bereitstellungsnutzungsgrade bewerteten Endenergien (EE) für Wärme, Kraft, Licht und sonstige Nutzelektrizitätserzeugung“ (ohne stofflich genutzte Energieträger) [246].

### Loop-Potenzial (LP)

„Gibt Auskunft über den Anteil eines Materials oder einer Konstruktion, der eine gleichwertige (→ Wiederverwertung oder Wiederverwendung) oder qualitätsvolle Nachnutzung [...] (→ Weiterverwertung oder Weiterverwendung) möglich macht. Zum Loop-Potenzial zählen deshalb über den Closed-Loop-Anteil hinaus auch Anteile an Materialien und Baustoffen, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien eine stoffliche Verwertung mit Qualitätsverlust (→ Downcycling) ermöglichen oder einer energetischen Verwertung zugeführt werden können“ [247].

### Material-Loop-Potenzial (MLP)

„Möglicher, zukünftiger Anteil von Recyclingmaterialien in einem Produkt bei einer maximalen Optimierung der Produktion hinsichtlich ihres Sekundärrohstoffanteils“ [248].

### Material Recycling Content (MRC)

„Aktueller Anteil an Recyclingmaterialien in einem Produkt (→ Recycling Content)“ [249].

### Mikrostruktur

Als Mikrostruktur wird in der Materialwissenschaft die mikroskopisch feine, nur mit optischen Hilfsmitteln erkennbare Struktur (das Gefüge) eines Materials bezeichnet (Quelle: Duden).

### Nachwachsende Rohstoffe

„Organische Rohstoffe aus land- und forstwirtschaftlicher Produktion, die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel Verwendung finden, sondern stofflich oder zur Erzeugung von Wärme, Strom, Bau- oder Kraftstoffen genutzt werden“ [250].

### Ökobilanz

Standardisierte, in ISO 14044 geregelte Umweltmanagementmethode, die sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebenszyklus eines Produkts bezieht. Mithilfe einer Ökobilanz werden verschiedene Indikatoren (z. B. das → Treibhauspotenzial) eines Produkts berechnet. Die Ökobilanzierung für Gebäude ist in DIN EN 15978 geregelt.

### Post-Consumer-Abfälle / Pre-Consumer-Abfälle

Post-Consumer-Abfälle entstehen beim Endverbraucher (Konsumenten) nach der Nutzung eines Produkts. Pre-Consumer-Abfälle fallen hingegen bereits im Produktionspro-

zess oder während der Weiterverarbeitung an (z. B. Produktionsreste oder sortenreine Baustellenverschnitte).

#### **Post-Use**

Engl. für nach Gebrauch oder nach der Nutzung

#### **Pre-Use**

Engl. für vor Gebrauch oder vor der Nutzung.

#### **Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC)**

Engl. für Programm zur Anerkennung von Forstzertifizierungssystemen; ursprünglich europäisches, seit 2002 internationales Zertifizierungssystem für nachhaltige Forstwirtschaft, das alternativ zum → FSC angewandt wird.

#### **Recycling**

Verwertung von Abfällen, die nach einem Nutzungszyklus entstehen (keine Produktionsreste), zu Produkten oder Sekundärrohstoffen, die weitgehend das gleiche Leistungsspektrum erfüllen wie das Ausgangsprodukt, aus dem die Abfälle entstanden sind (→ Wiederverwertung).

#### **Recycling Content**

„Engl. für Recyclinganteil, Sekundärrohstoffanteil im Baustoff“; zum Recycling Content im → MRC und → MLP zählen keine Rückführungen aus eigenen Herstellungsprozessen (→ Pre-Consumer-Materialien), „da diese der Effizienz der Verfahrenstechnik zuzuschreiben sind“, und kein „Material, das als Nebenprodukt anderer Herstellungsprozesse anfällt, da dieses ebenfalls nicht aus gezielter Rückführung ehemals genutzter und aufbereiteter Produkte oder baulicher Abfälle rekrutiert“ wird [251].

#### **Rohstoffproduktivität**

Quotient aus Bruttoinlandsprodukt und Einsatz von abiotischem Primärmaterial im Inland. „Die Rohstoffproduktivität drückt aus, wie viel Bruttoinlandsprodukt (in Euro, preisbereinigt) je eingesetzter Tonne abiotischen Primärmaterials erwirtschaftet wird. Zum abiotischen Primärmaterial zählen die im Inland entnommenen Rohstoffe, ohne land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse, sowie alle importierten abiotischen Materialien (Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren)“ [252].

#### **Reuse**

Engl. für → Wiederverwendung.

#### **SI-Einheit**

Internationales Einheitensystem für physikalische Größen (von französisch: *Système international d'unités*).

#### **Thermodynamik**

Ingenieurwissenschaftliche Disziplin im Maschinenbau, die sich unter anderem mit den Möglichkeiten der Energieumwandlung beschäftigt; von altgriechisch *thermós* (deutsch warm) und *dýnamis* (deutsch: Kraft).

#### **Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential – GWP)**

Beitrag eines Produkts oder Bauwerks zur Erwärmung der Erdatmosphäre über einen bestimmten Zeitraum (nach DIN EN ISO 14044 100 Jahre) durch anthropogene Treibhausgase z. B. durch Verbrennung fossiler Brennstoffe; berechnet in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten mithilfe einer → Ökobilanz.

#### **Umtriebszeit**

Begriff aus der Forstwirtschaft, der den (durchschnittlichen) Zeitraum von der Pflanzung oder der natürlichen Begründung bis zum Holzeinschlag beziffert; abhängig z. B. von der Baumart und dem Standort.

#### **Urban Mining, urbane Minen**

„Städte oder Siedlungen als menschengemachte (anthropogene) Rohstofflager, in denen die aus ihren natürlichen Lagerstätten entnommenen Rohstoffe in Form von Gebäuden, Gütern, Infrastruktur, Waren oder Abfällen gebunden sind“ [253].

#### **Urban Mining Design**

Von Hillebrandt [254] begründete „Strategie zur Schließung von Kreisläufen im Bauwesen zum Zweck der Ressourcenschonung und Abfallvermeidung“, indem Bauwerke als urbane Mine entworfen, gestaltet und bewirtschaftet werden (→ Urban Mining).

#### **Weiterverwendung**

„Erneute Verwendung eines gebrauchten Produkts für einen anderen Verwendungszweck mit gegenüber dem Ursprungszweck niedrigerem Qualitätsanspruch unter Beibehaltung der Produktgestalt“ [255].

#### **Weiterverwertung**

„Einsatz von Altstoffen und Produktionsabfällen bzw. Hilfs- und Betriebsstoffen in einem von diesen zuvor noch nicht durchlaufenen Produktionsprozess. Durch Weiterverwertung entstehen Produkte mit neuen bzw. anderen Eigenschaften und/oder anderer Gestalt, sogenannte Sekundärwerkstoffe, mit einem gegenüber dem Ursprungszweck niedrigeren Qualitätsanspruch (→ Downcycling)“ [256].

#### **Wiederverwendung**

„Erneute Verwendung eines gebrauchten Produkts für den gleichen Verwendungszweck (bei weitgehend gleichem Qualitätsanspruch) unter Beibehaltung der Produktgestalt“ [257].

#### **Wiederverwertung**

„Wiederholter Einsatz von Altstoffen und Produktionsrücklaufmaterial bzw. Hilfs- und Betriebsstoffen in einem gleichartigen wie dem bereits durchlaufenen Produktionsprozess unter Auflösung der Produktgestalt. Durch Wiederverwertung entstehen aus den Ausgangsstoffen qualitativ weitgehend gleichwertige Werkstoffe“ (→ Recycling) [258].

### Erklärung der Verfasserin

Die vorliegende Arbeit wurde von mir selbstständig verfasst. Alle über die selbstständige Arbeit hinausgehenden Hilfsmittel sowie wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen sind als solche gekennzeichnet und die zugrunde liegenden Quellen angegeben.

Es gibt keine früheren Promotionsanträge der Verfasserin an in- oder ausländischen Hochschulen.


Wuppertal, 19. März 2020

Anja Rosen

ISBN 978-3-7388-0605-2



9 783738 806052

Fraunhofer IRB  Verlag