



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 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
URL 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

1.	Motivation, Fragestellung und Ziele der Arbeit	3
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
2.	Strategie und wissenschaftliches Vorgehen	17
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 ₂ -Footprint	34
2.5.	Wissenschaftliches Vorgehen	35

3.	Status quo: Rückbau und Entsorgung im Bauwesen	39
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
4.	Bewertungsmethoden: Stand von Forschung und Technik	59
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
5.	Parameter zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen	89
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.	Konstruktive Ebene	96
5.2.1.	Zerstörungsfreie Lösbarkeit	96
5.2.2.	Sortenreinheit	97
5.3.	Wirtschaftliche Ebene	98
5.3.1.	Rückbauaufwand – Faktor Arbeit	98
5.3.2.	Entsorgungskosten und Verwertungserlöse – Faktor Wert	105
6.	Recherchen und Untersuchungen zur Entwicklung von Benchmarks für die Einordnung der ökonomischen Kriterien	109
6.1.	Empirische Erhebung von Entsorgungskosten und -erlösen nach Wertstofffraktionen	110
6.1.1.	Preisabfrage	110
6.1.2.	Auswertung und Ergebnisse	112
6.1.3.	Benchmarks für den Faktor Wert	114
6.2.	Untersuchungen zum Rückbauaufwand am Beispiel von Fassaden- und Dachbekleidungen in Versuchsständen	116
6.2.1.	Fassaden	116
6.2.2.	Dachbekleidungen	123
6.2.3.	Auswertung	127
6.3.	Recherchen zum Rückbauaufwand auf Baustellen	133
6.3.1.	Problematiken beim selektiven Abbruch	133
6.3.2.	Erhebungen zum Aufwand des selektiven Rückbaus	138
6.4.	Auswertung von Daten anderer Wissenschaftler zum Rückbauaufwand	142
6.4.1.	Auswertung der Daten von Schultmann et al.	142
6.4.2.	Auswertung der Daten von Graubner et al.	145
6.5.	Tabellarischer Bauteilkatalog	146
6.5.1.	Inhalt und Gliederung	146
6.5.2.	Ableitung von Benchmarks für den Rückbauaufwand	146
6.5.3.	Plausibilitätsprüfung und Korrekturen	147
7.	Berechnungsmethode zur systematischen Bewertung und Darstellung der Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen	155
7.1.	Ebenen und Basis der Berechnung	156
7.1.1.	Ebenen der Berechnung innerhalb der Gebäudestruktur	156
7.1.2.	Die Masse als Basis der Berechnungen	158
7.2.	Abbildung der Qualitätsstufen als Variable	160
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.	Koeffizienten zur Berechnung der Kreislaufpotenziale	162
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
7.4.	Überprüfung der Methodik und Verifizierung	166
7.4.1.	Beschreibung des Entwurfs und der Berechnungsergebnisse	166
7.4.2.	Identifizierte Problematiken	168
7.4.3.	Verifizierung	170
7.5.	Formeln zur Berechnung der Kreislaufpotenziale	172
7.5.1.	Closed-Loop-Potenzial (CLP)	172
7.5.2.	Loop-Potenzial (LP)	174
7.6.	Entwicklung eines Tabellenwerkzeugs zur systematischen Berechnung und Bewertung der Kreislaufpotenziale	175
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
8.	Kreislaufpotenziale beispielhafter Konstruktionen im Vergleich	185
8.1.	Modellprojekt 1	186
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
8.2.	Modellprojekt 2	206
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
8.3.	Zwischenfazit	224
9.	Anwendung der Forschungsergebnisse auf Gebäudeebene in der Neubauplanung für das Modellprojekt „Rathaus Korbach“	229
9.1.	Beschreibung des Projekts	231
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
9.2.	Leitdetails für den Neubau – Variantenvergleich mit dem Urban Mining Index	236
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
9.3.	Bewertung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene – der Urban Mining Indicator	278
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
9.4.	Zwischenfazit	284
10.	Fazit und Ausblick auf weitere Forschung	291
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
Anhang		
	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

