
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.

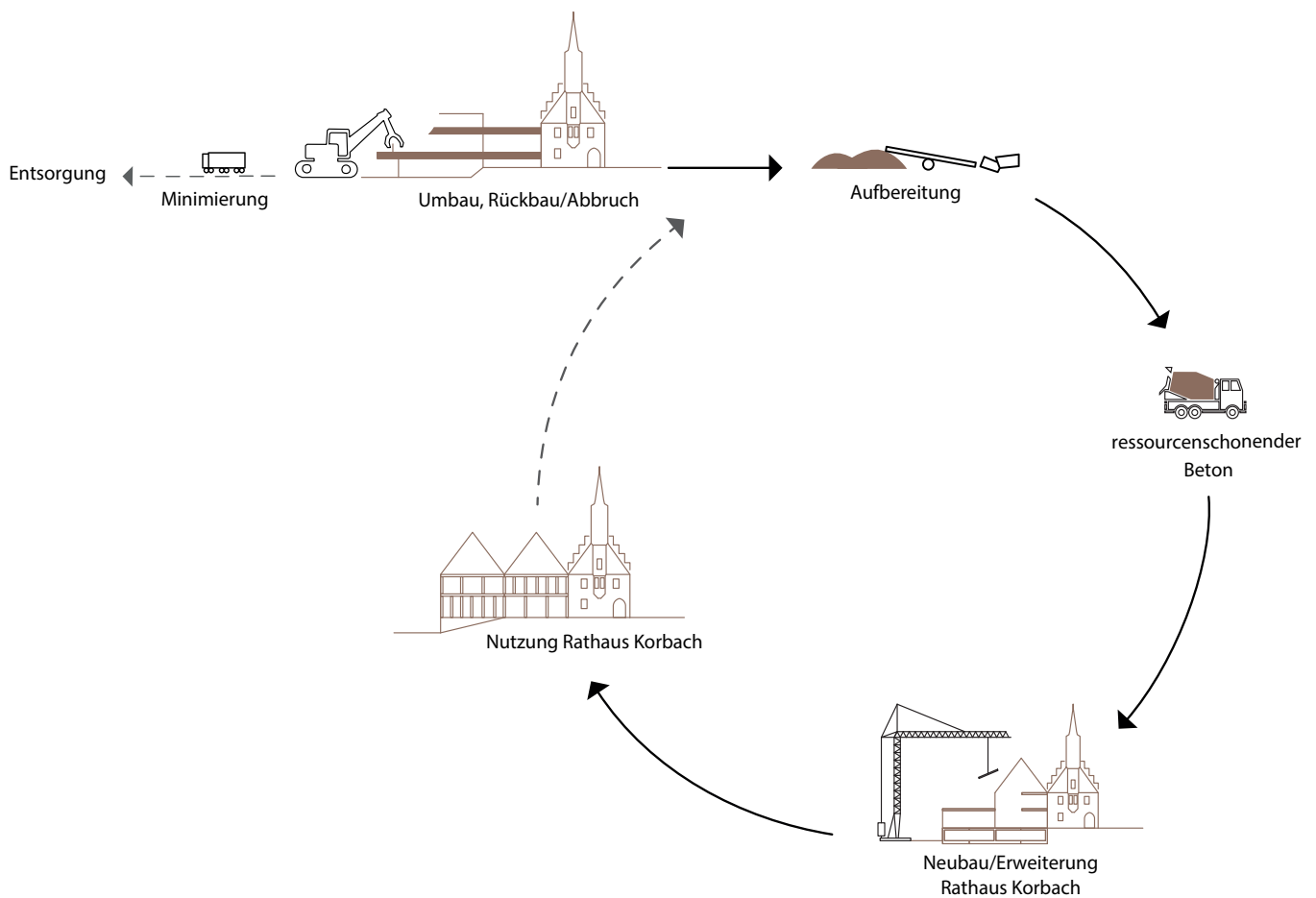
9.1.	Beschreibung des Projekts	231
9.2.	Leitdetails für den Neubau – Variantenvergleich mit dem Urban Mining Index	236
9.3.	Bewertung der Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene – der Urban Mining Indicator	278
9.4.	Zwischenfazit	284



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.

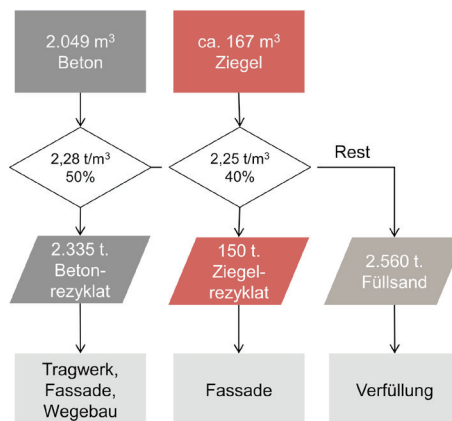
Bereits 2017 wurde in einer Masterarbeit von Hofer [203] eine Bestandsaufnahme durchgeführt und das Verwertungspotenzial ermittelt.

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

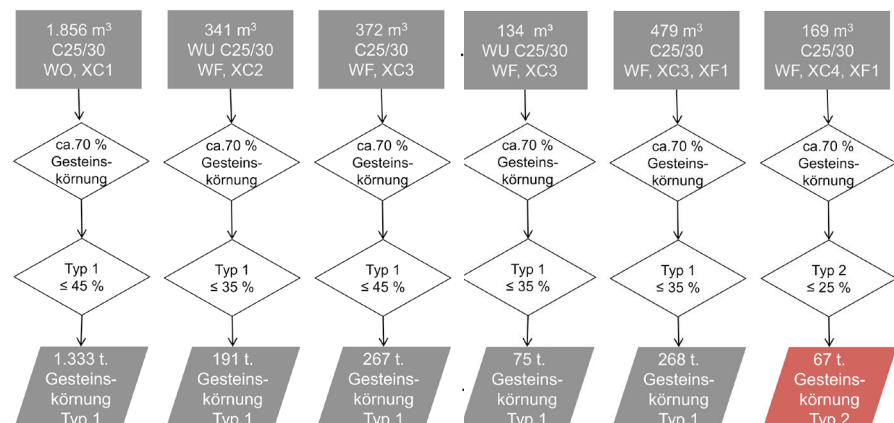
A Angebot

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



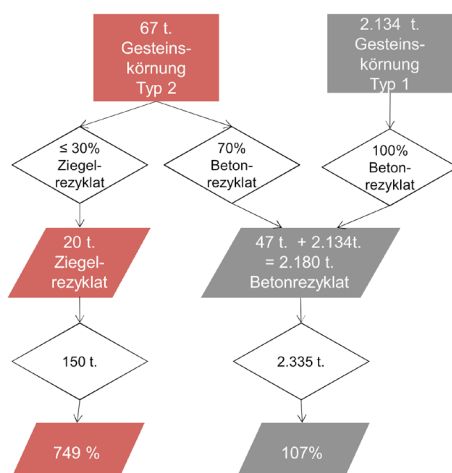
B Bedarf

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 ortsnahe 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 2⁷² nicht zugelassen und werden deshalb als Füllsand genutzt (nachrangige Verwertung gemäß KrWG), sofern die Güteüberwachung des Verwerter 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.

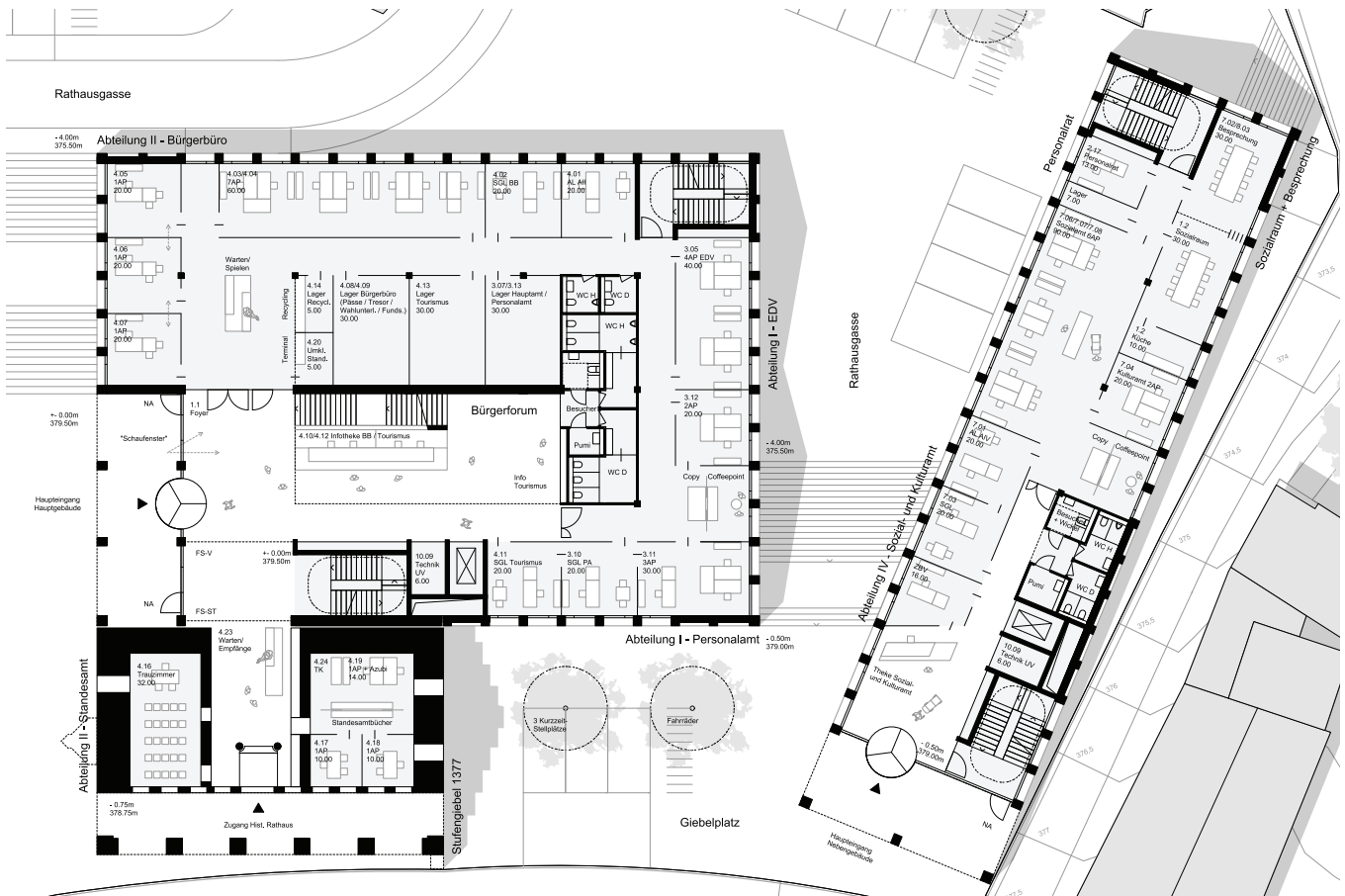


A 9.6

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



A 9.7

9.1.3. Die Neubauplanung

Der Neubau für das Rathaus Korbach besteht aus einem Hauptgebäude und einem Nebengebäude, die als viergeschossige Baukörper mit Satteldächern geplant sind. Abbildung A 9.7 zeigt den Erdgeschossgrundriss, weitere Pläne befinden sich in Anlage 3.

Der Entwurf nutzt die Hanglage des Grundstücks aus: Das Sockelgeschoss nimmt unter Terrain die Technik- und Lagerräume auf und öffnet sich zum rückwärtigen Parkplatz mit einem Nebeneingang. Die Hanglage wirkt sich positiv auf das Urban-Mining-Design-Konzept aus, da hier kein anstehendes Grundwasser, das eine Abdichtung des Sockelgeschosses erschweren würde, gegeben ist.

Auch die Satteldächer von Haupt- und Nebengebäude sind dem Urban-Mining-Design-Konzept zuträglich: So kann Regenwasser ohne aufwendige Abdichtung abgeführt werden, zum anderen war von vornherein eine Metalldeckung aus Zinkblech geplant.

Hiervon abgesehen, war in der Wettbewerbsphase eine kreislaufgerechte Neubauplanung mit Blick auf die zukünftige Verwertbarkeit noch nicht vorgesehen, sondern wurde erst nach Beauftragung der Planung von der Promovendin angeregt.

Wie im Wettbewerb vorgesehen, werden die Gebäude in Stahlbetonskelettbauweise mit Sichtbetonfassade ausgeführt.

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

9.1.4. Stand des Projekts

Der Rathausanbau aus den 70er Jahren und das Nebengebäude „Stadt-
wache“ 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 fach-
gerecht entsorgt werden. Dämmungen und Abdichtungen waren ver-
schmutzt 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 Mauer-
werk 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 Stahlbeton-
skelett mit Abbruchscheren und Pulverisierern 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 Holzwol-
platten 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 Scha-
lung und Dämmung konventionell am Stück abzubauen. Der separierte
verunreinigte Betonbruch wurde im Recyclingbetrieb mit einem Wind-
sichter 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 Wirtschaft-
lichkeit des selektiven Rückbaus für eine hochwertige Verwertung und
bestätigt die Kernthesen aus Kapitel 1.4.4. Es zeigt außerdem, wie wicht-
ig 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 Güteüberwa-
chung 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 zugelas-
senes Bauprodukt nach der Bauproduktenverordnung.

Für die hochwertige Aufbereitung wurden nach Abfrage bei den regiona-
len 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



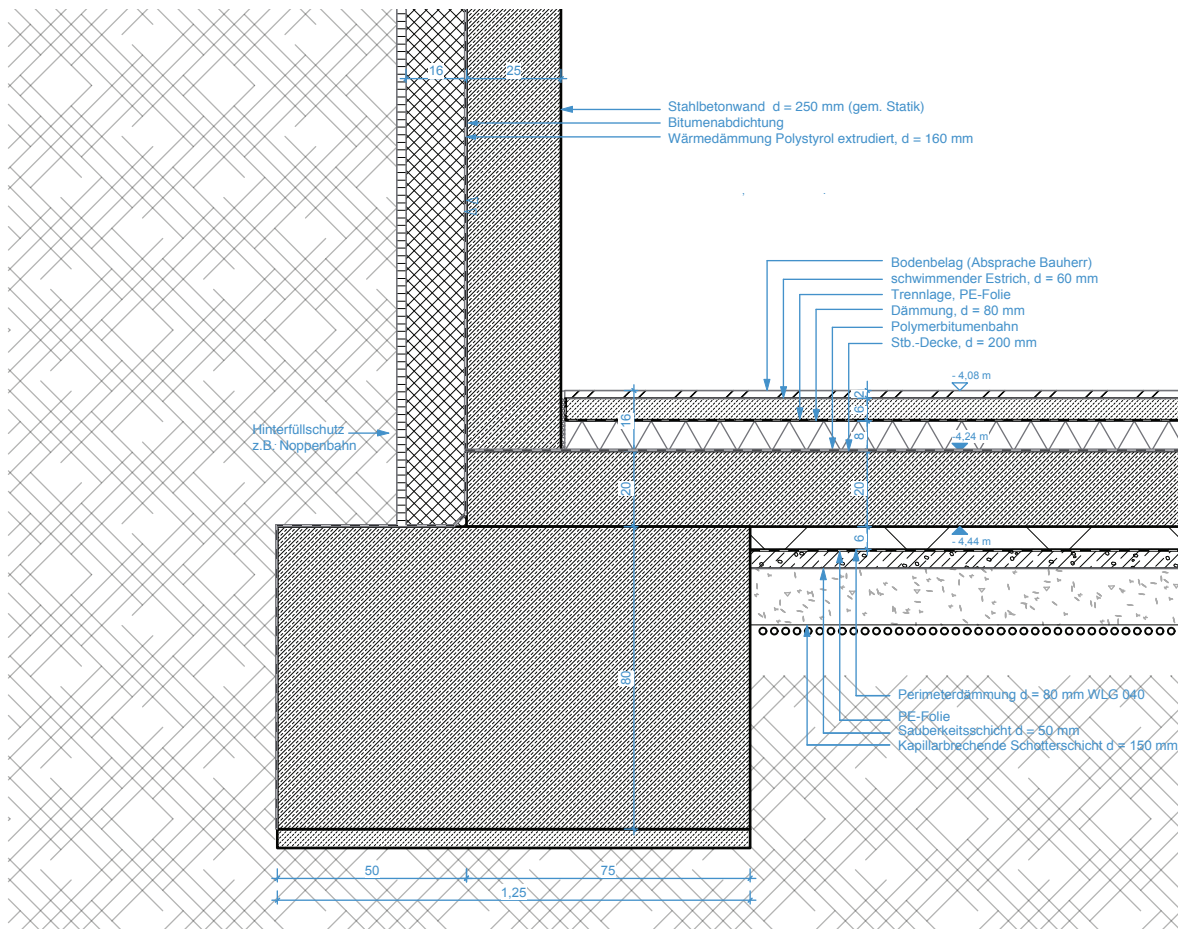
A 9.9



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 heimsielarchitekten 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-heimsielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken, Stand 12/2018

A 9.13 Sockeldetail Rathaus Korbach – Urban Mining Design, M 1:20, ARGE agn-heimsielarchitekten, Christian Thomann/Marc Matzken/Anja Rosen, Stand 12/2018



A 9.13

Bodenplatte/Gründung

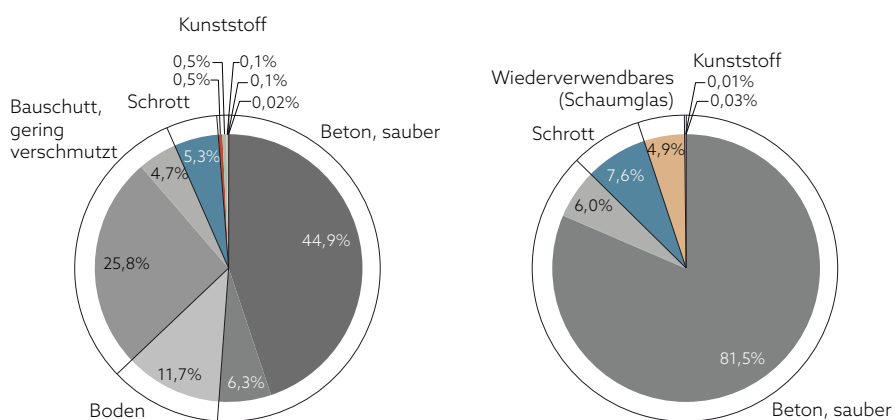
Ursprüngliche Planung

Urban Mining Design

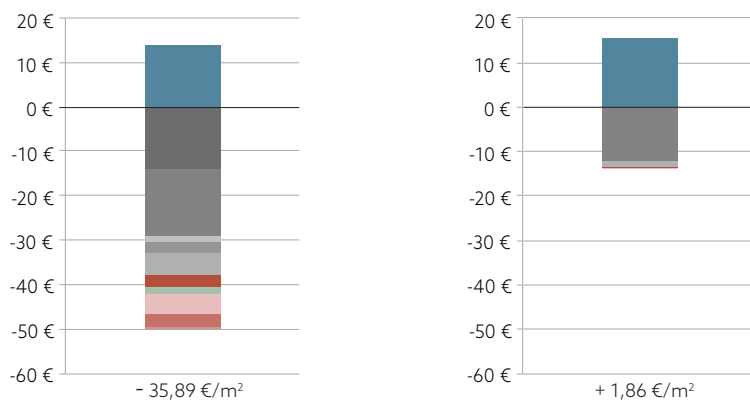
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m²]		[kg/m²]
Linoleum, 2 mm	9,0	Terrazzo, 60 mm	90,0
Zementestrich, 60 mm	90,0	Fundamentplatte, WU-Beton C 25/30 mit 35% RC-Anteil in der Gesteinskörnung, 500 mm	1.232,1
Trennlagen, PE-Folien	0,4	Bewehrungsstahl Bodenplatte	115,0
Trittschalldämmung EPS, 80 mm	2,1	Sauberkeitsschicht, PE-Folie	0,2
Abdichtung Bitumenbahnen, 2x5 mm	10,4	Schaumglasgranulat, 50 mm und Schaumglasschotter, verdichtet von 520 mm auf 450 mm	67,6
Bodenplatte, Beton C 25/30, 200 mm	493,2	Geo-Textilvlies, PET	0,5
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		
	1.911,1		1.511,9

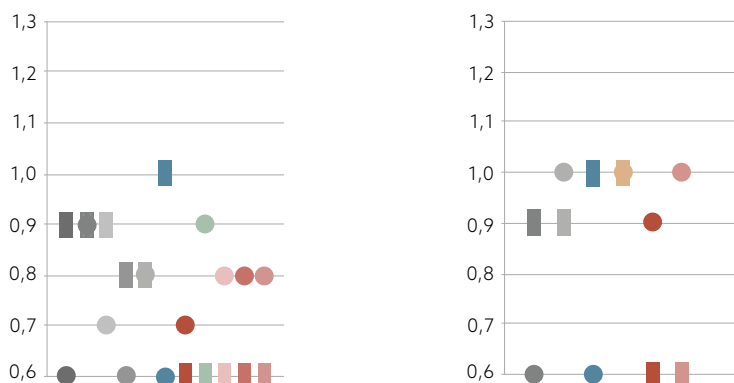
Wertstoffe – Anteile nach Massen in %



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.⁷³ 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 CO₂-Footprints spielt die Zusammensetzung des Betons in dem hier betrachteten Variantenvergleich eine entscheidende Rolle. Die Betonrezeptur wurde deshalb anhand einer einfachen Stoffraumrechnung⁷⁴ 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%.

Zusammensetzung Beton Bodenplatte	Beton C 25/30 [kg/m ³]	WU-Beton C 25/30 [kg/m ³]
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 Gründungsvarianten

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.

⁷³ Hierzu ist anzumerken, dass keine Anforderungen an den Trittschallschutz bestehen, da es keine fremden Arbeitsbereiche im Gebäude gibt.

⁷⁴ 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.

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 verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en_{cr})
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en_r)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en_f) oder zur Deponierung (d)

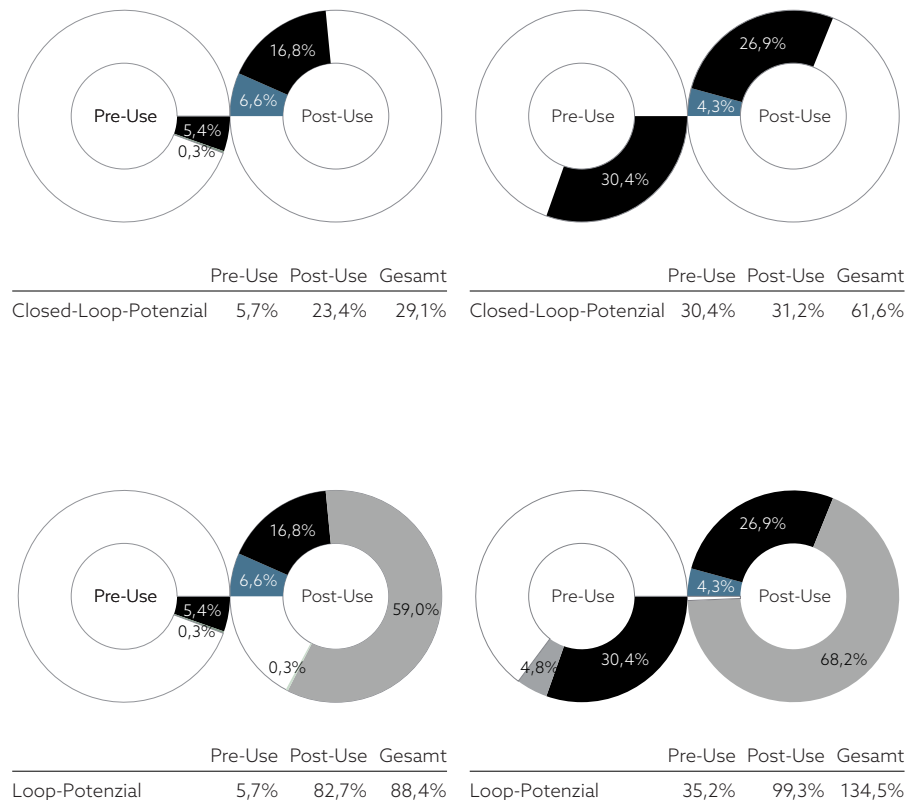
Ursprüngliche Planung

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Linoleum	9,0	RC 10 +			
		RN 0	62,0	en _r	en _r
Zementestrich	90,0	PR	dc	d	
Trennlagen, PE	0,4	PR	en _f	en _f	
EPS-Dämmung	2,1	PR	en _f	en _f	
Bitumenabdichtung	10,4	PR	rc 30	en _f	
Gesteinskörnung	401,8	PR	dc	d	
CEM II	56,4	PR	"	"	
Wasser	35,0	PR	"	"	
Transport Gesteinsk.	-	-	-	-	
XPS-Dämmung	2,8	PR	en _f	en _f	
Magerbeton	120,9	PR	rc 39	dc	
Hartsteinschotter	223,0	PR	ru	dc	
Fundament-Beton	857,3	PR	rc 39	dc	
Bewehrungsstahl	102,0	RC 100	rc 100	rc	
	1.911,1				

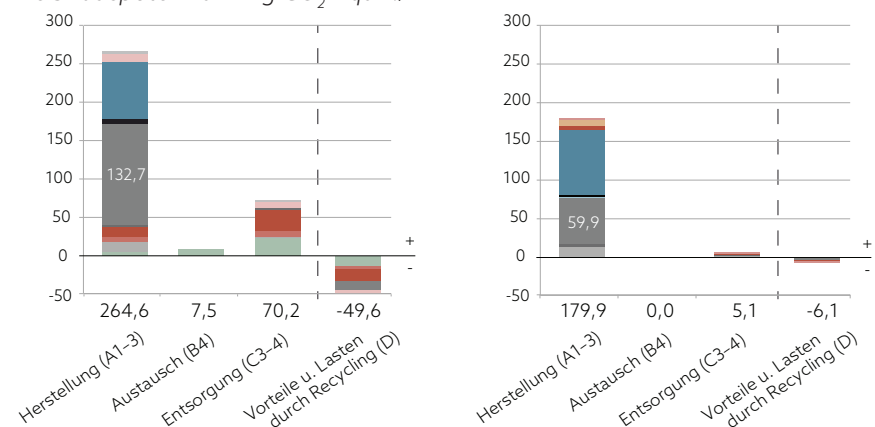
Urban Mining Design

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Terrazzo	90,0	PR	rc 39	dc	
Gesteinskörnung	985,5	RC 35	rc 39	dc	
CEM III	159,1	PR	"	"	
Wasser	87,5	PR	"	"	
Transport Gesteinsk.	-	-	-	-	
Bewehrungsstahl	115,0	RC 100	rc 100	rc	
PE-Folie	0,2	PR	en _f	en _f	
Schaumglasgranulat und -schotter	6,5	DC 98	ru 90	dc	
	67,6	DC 98	ru 86,5	dc	
Geo-Textilvlies, PET	0,5	PR	en _f	en _f	
	1.511,9				

Kreislaufpotenziale



Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



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 CO₂-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 „Bauschuttaufbereitung“ (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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Footprint der Gesamtkonstruktion um 66,5 kg/m² höher. Er läge damit aber immer noch 7% unter dem der ursprünglichen Planung.

Erdberührte Außenwand

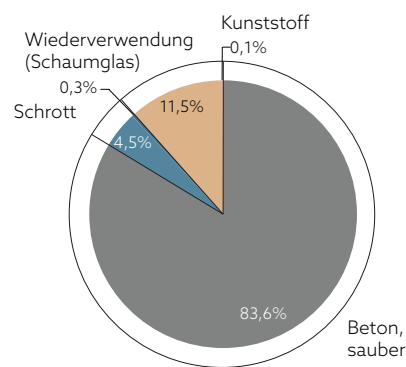
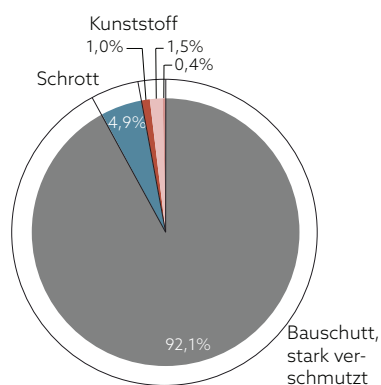
Ursprüngliche Planung

Urban Mining Design

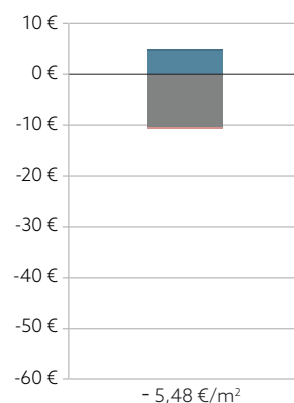
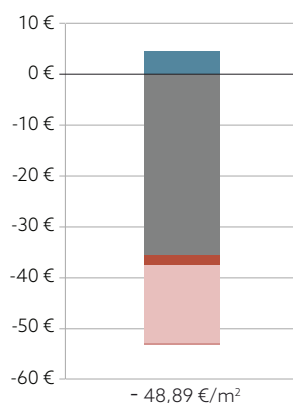
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m²]		[kg/m²]
■ 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
	669,4		736,7

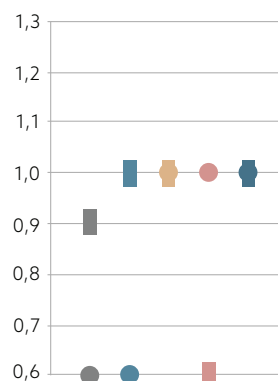
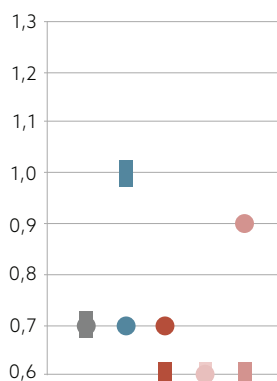
Wertstoffe – Anteile nach Massen in %



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.⁷⁵ Da die üblicherweise verwendeten Wallbags in dieser Stärke nicht erhältlich sind, wurde eine verlorene Schalung aus Stahlmaten 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.⁷⁶ 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_{cr})
- energetisch verwertb. 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)

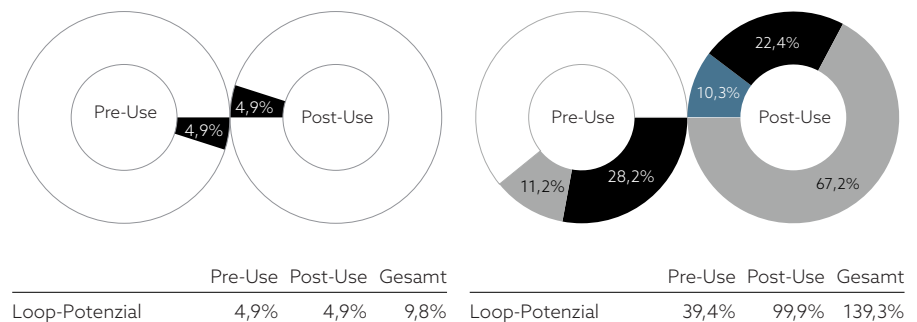
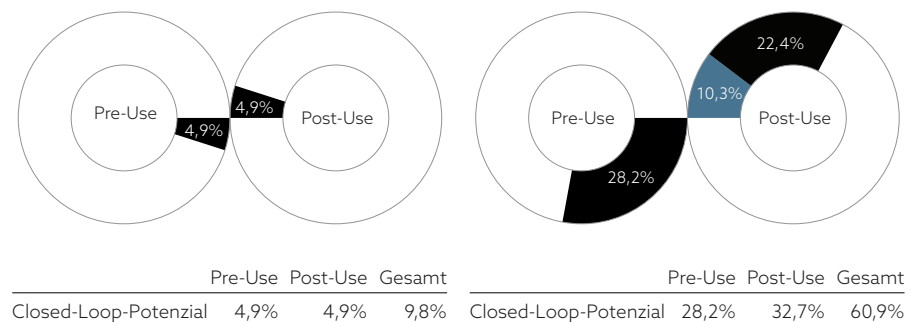
Ursprüngliche Planung

	[kg/m ²]	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 _f
■ XPS-Dämmung	10,2	PR	en _f	en _f
■ Noppenbahn PE-HD	2,4	PR	en _f	en _f
	669,4			

Urban Mining Design

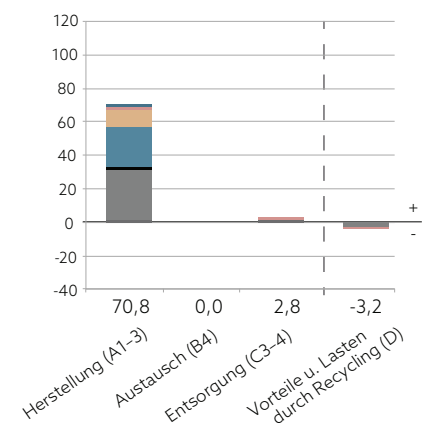
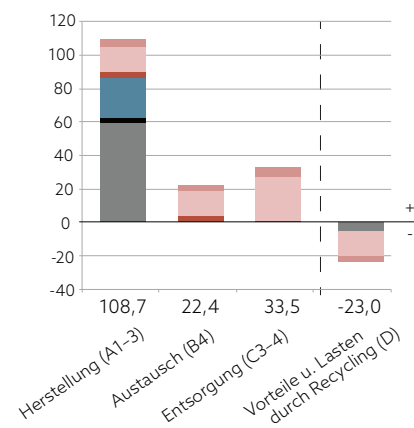
	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
■ Gesteinskörnung	492,8	RC35	rc39	d
■ CEM III	79,6	PR	"	"
■ Wasser	43,7	PR	"	"
■ Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-
■ Bewehrungsstahl	33,1	RC100	rc100	rc
■ Schaumglasschotter	84,5	RC98	ru90	d
■ Geo-Textilvlies, PET	0,5	PR	en _f	en _f
■ verlorene Schalung	2,5	RC100	rc100	rc
	736,7			

Kreislaufpotenziale



Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²

■ Gesteinskörnung	1,37	1,34
■ Portlandkompositzement/Hüttensandzement	57,94	-
■ Wasser	0,02	0,02
■ 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
	108,72	70,76



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.

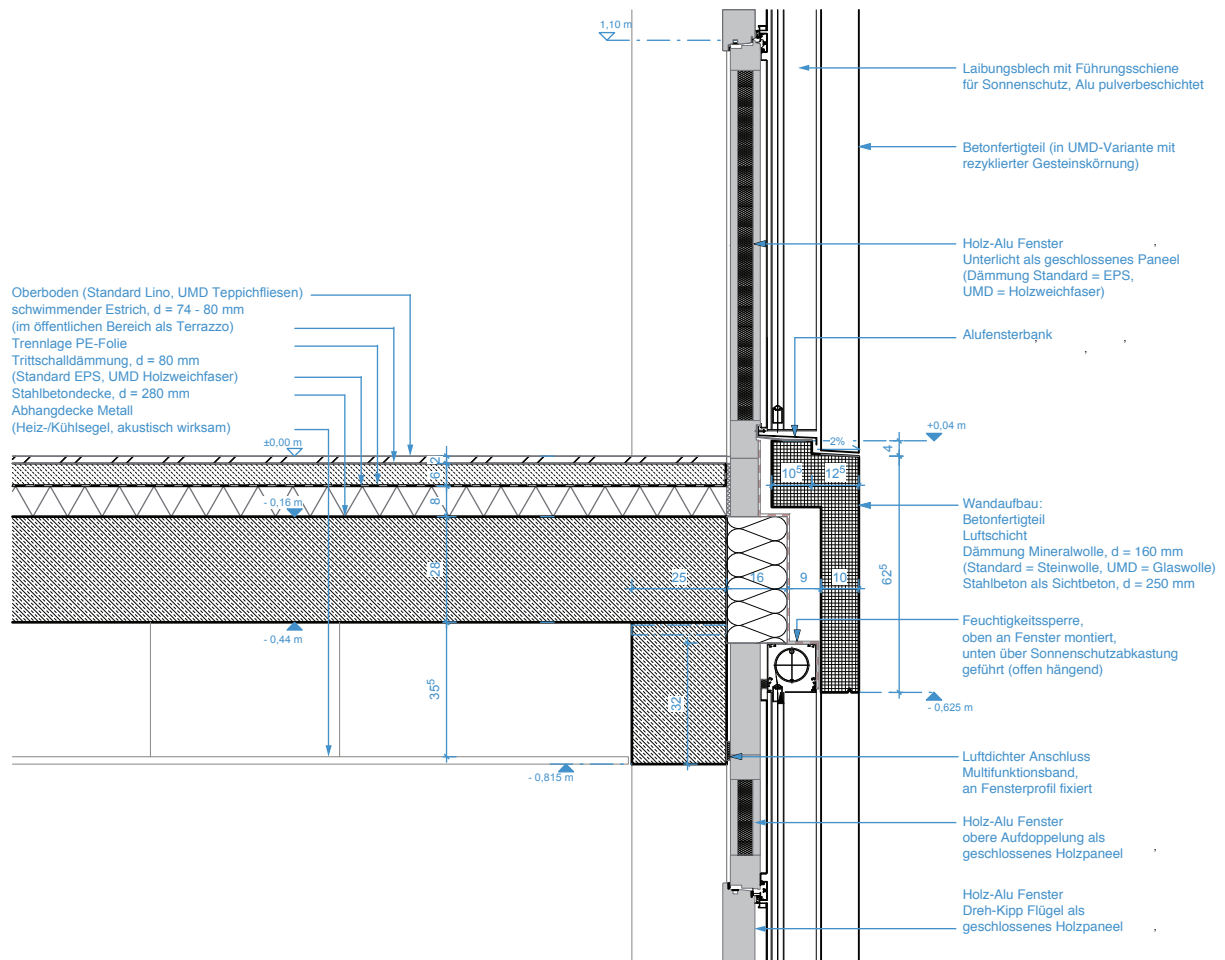
In der Post-Use-Phase steigt das Closed-Loop-Potenzial durch eine mögliche Wiederverwendung des Schaumglasschotters und ein mögliches Recyclings des sauber rückbaubaren WU-Betons von 4,9% auf 32,7%. Dennoch ist aufgrund des eingeschränkten Material-Loop-Potenzials des Betons (39%) und unter Berücksichtigung 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 CO₂, das bei der Carbonatisierung gebunden wird.

Die Vorteile der Urban-Mining-Design-Variante hinsichtlich des CO₂-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 Mineralwolldämmstoffe 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 Geschossdecke werden in Kapitel 9.2.6 erläutert.

Außenwand

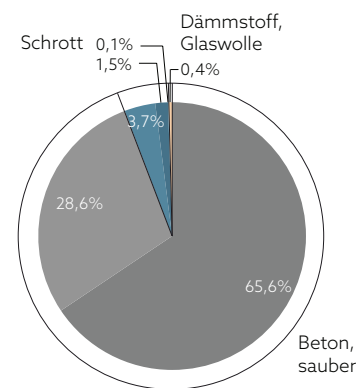
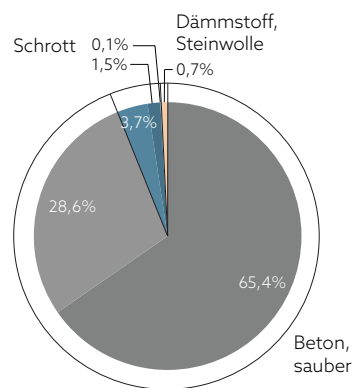
Ursprüngliche Planung

Urban Mining Design

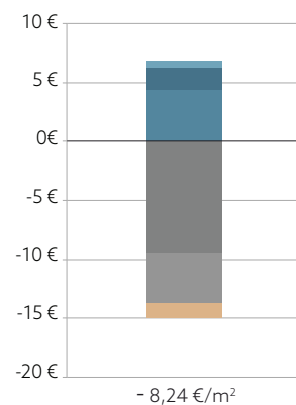
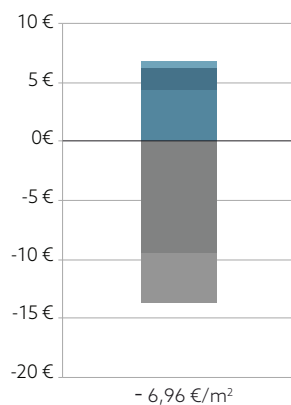
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m²]		[kg/m²]
■ 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
	886,7		883,7

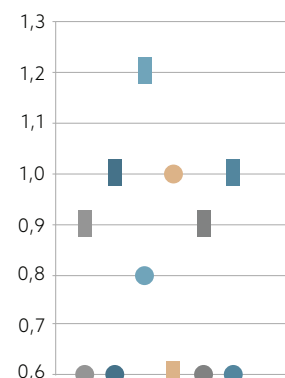
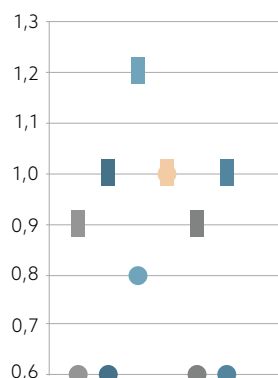
Wertstoffe – Anteile nach Massen in %



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.⁷⁷

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-Verschnittresten 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.⁷⁸ 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.⁷⁹

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_{cr})
- energetisch verwertb. 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)

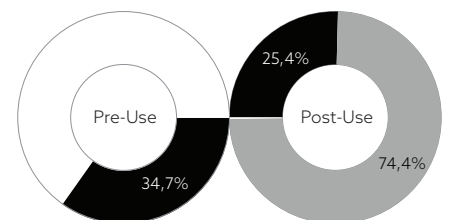
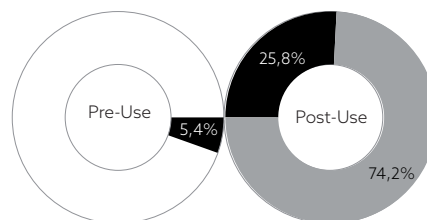
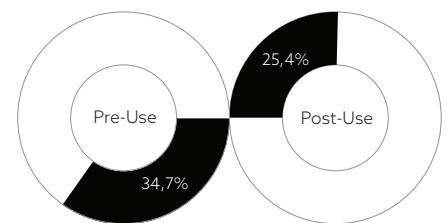
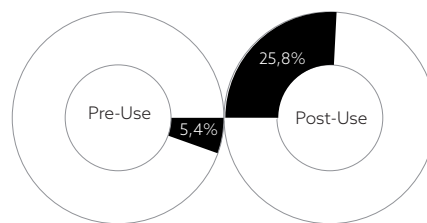
Ursprüngliche Planung

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Beton				
■ - 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	RC 100	rc 100	rc
■ Edeldahlanker	0,7	PR	rc 100	rc
■ Steinwolle	6,2	RC 24,6	rc 97	d
	886,7			

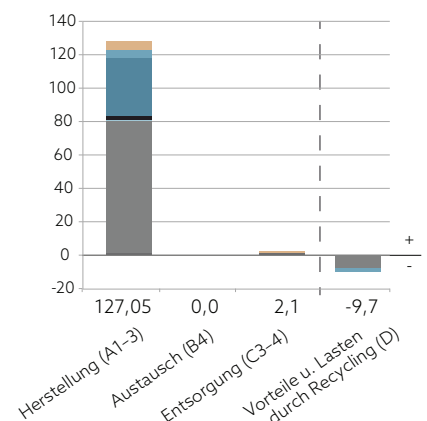
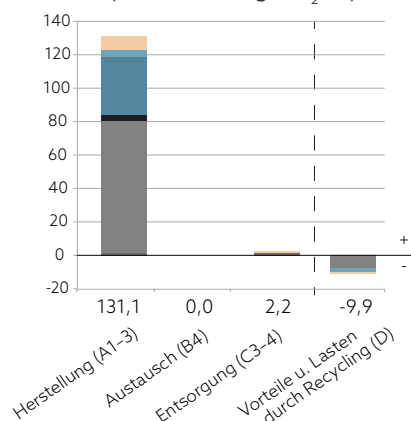
Urban Mining Design

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Beton				
■ - 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
	883,7			

Kreislaufpotenziale



Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



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%
	5,43%	25,81%	34,75%	25,39%

* 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 Herstellerangaben⁸⁰ zu 80% aus Sekundärrohstoffen (Altglas) besteht, während Steinwolle nach Angaben des Marktführers⁸¹ 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.

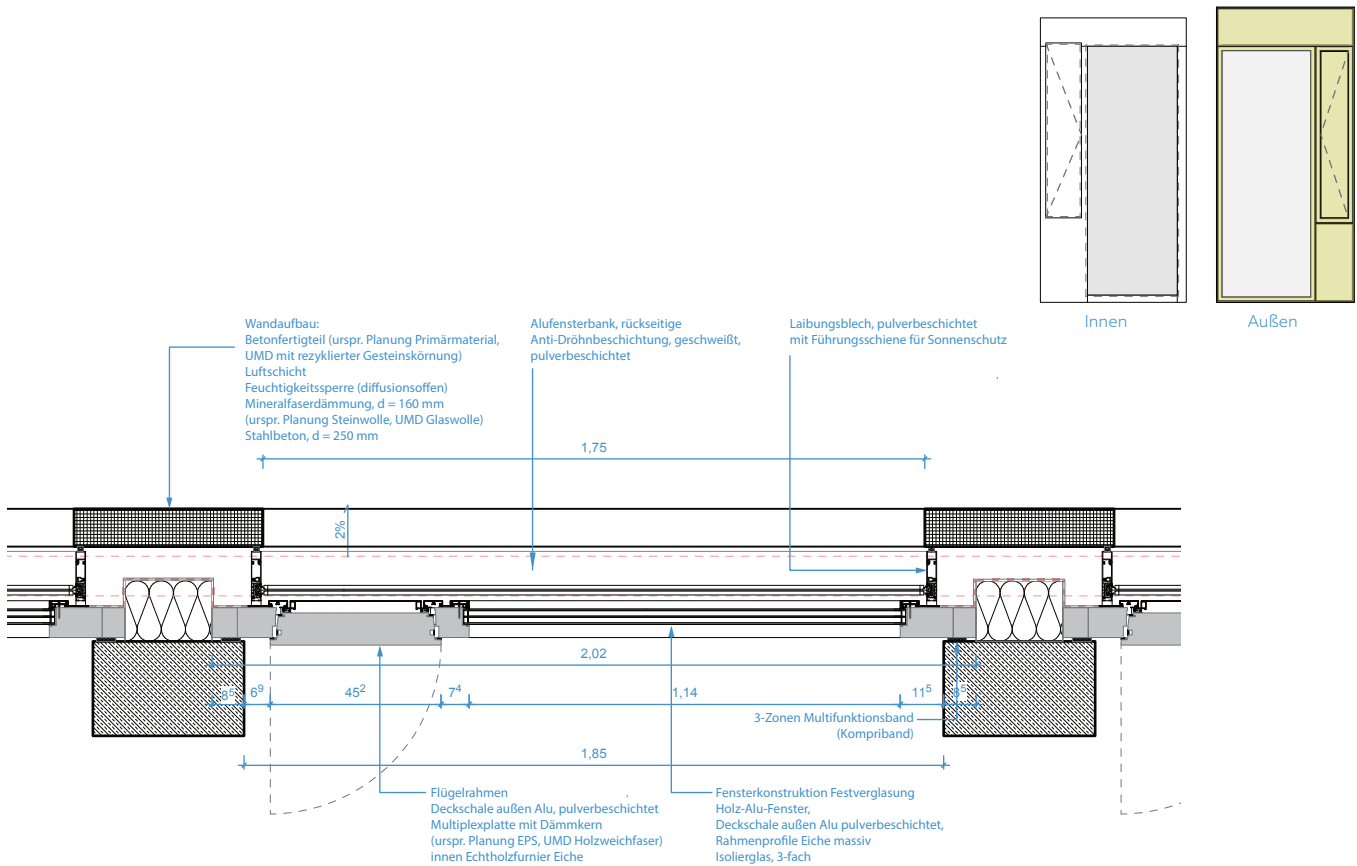
Treibhauspotenziale der Außenwandvarianten

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 Ecosse[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, Horizontal-
 schnitt Fenstertyp 1, M 1:20, mit maßstab-
 loser 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 Echtholz 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

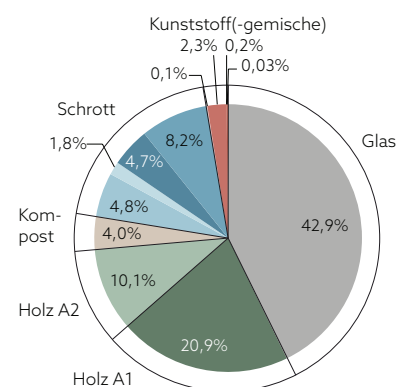
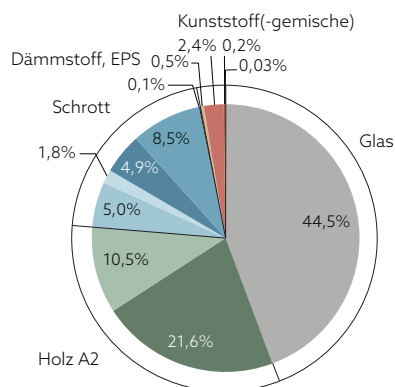
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]
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
	61,10

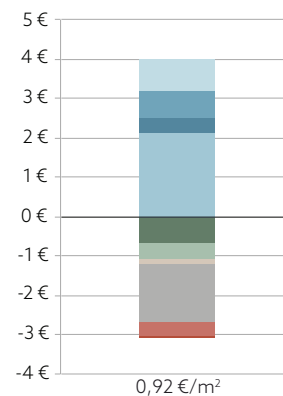
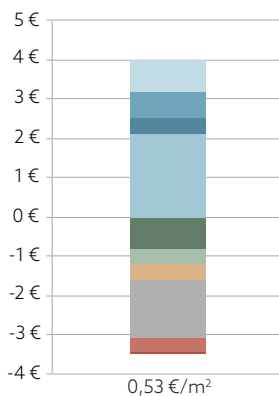
Urban Mining Design

	[kg/m ²]
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
	63,30

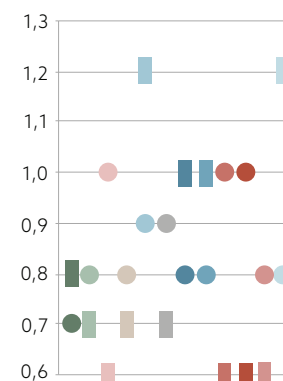
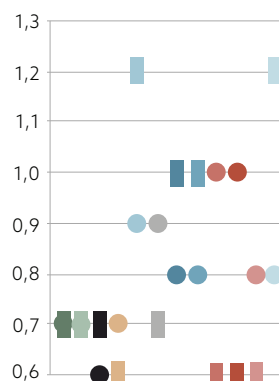
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



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 Herstellers⁸² 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 holzfernden 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_{cr})
- energetisch verwertb. 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)

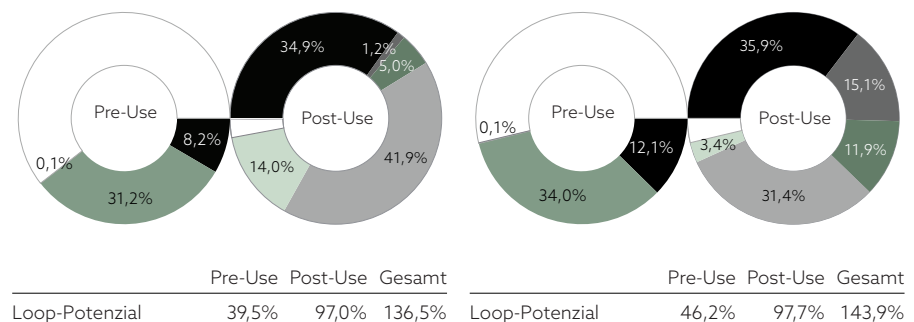
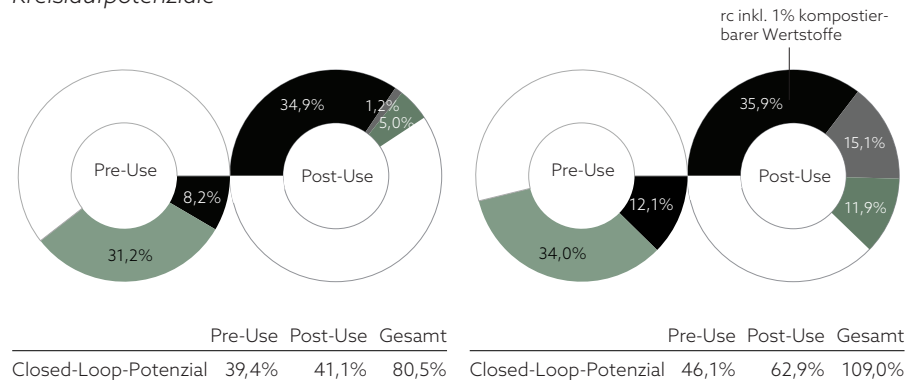
Ursprüngliche Planung

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Eichenprofile	13,23	RN 0 100	dc	en _r
Multiplexplatten	6,39	RN 60,1 30,9	dc _{cr}	en _{cr}
Dampfbremse, Alu.	0,08	RC 40	d	d
EPS-Dämmung	0,28	PR	en _f	en _f
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 _f
EPDM-Folie	0,10	DC 5	rc 45	en _f
Kompribänder, PU	0,02	PR	en _f	en _f
Alu-Laibungsblech	1,01	RC 50	rc 98	rc
	61,32			

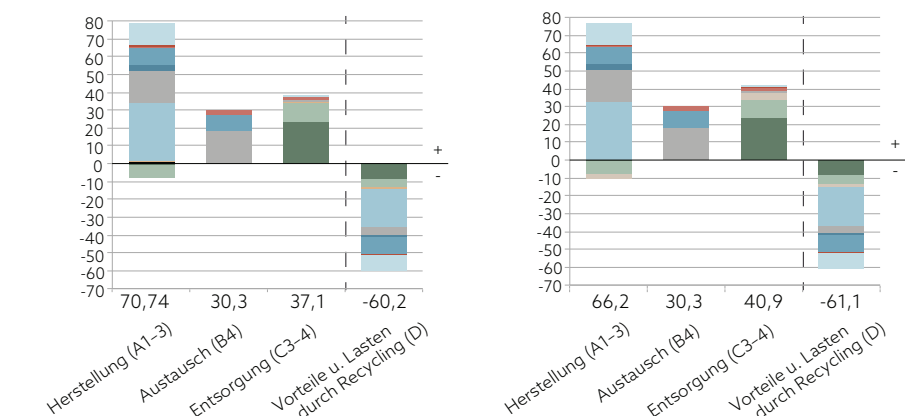
Urban Mining Design

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Eichenprofile	13,23	RN 100 0	dc _{cr}	en _{cr}
Multiplexplatten	6,39	RN 60,1 30,9	dc _{cr}	en _{cr}
Dampfb. PE-LD	0,06	PR	en _f	en _f
Holzweichfaserd.	2,50	RN 0 100	rc 100	en _r
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 _f
EPDM-Folie	0,24	DC 5	rc 45	en _f
Kompribänder, PU	0,02	PR	en _f	en _f
Alu-Laibungsblech	1,01	RC 50	rc 98	rc
	63,65			

Kreislaufpotenziale



Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



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 herstellereinspezifischen, 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. Holzweichfaserplatten können nicht zusammen mit anderen Sekundärholzmateriale stofflich verwertet werden (für Spanplatten werden Späne benötigt).

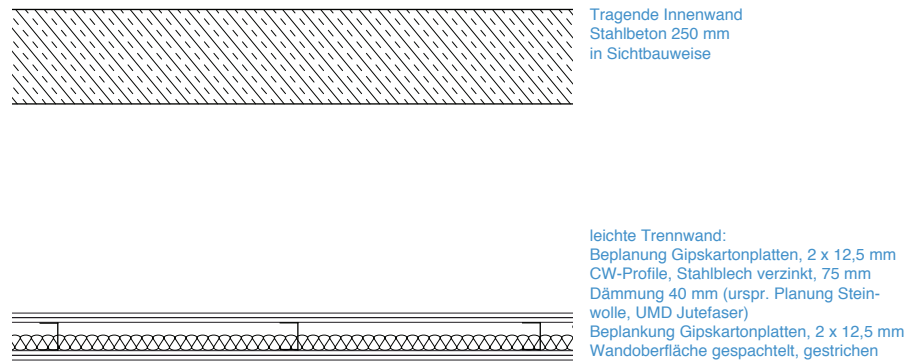
Das größte Optimierungspotenzial der Fensterkonstruktion liegt in der Verwendung von Hölzern aus zertifizierter nachhaltiger Forstwirtschaft. So steigt in der UMD-Variante das Closed-Loop-Potenzial Post-Use allein um knapp 20 Prozentpunkte, wenn die Eichenholzprofile zertifiziert sind und damit gesichert 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%.⁸³ 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 CO₂ durch eine bessere Möglichkeit der Kaskadennutzung der Eichenholzprofile kann in der Ökobilanz nicht abgebildet werden.

⁸³ Die Angaben sind herstellereinspezifisch und beziehen sich auf WISA® – Birch products der Fa. UPM Plywood Oy, Finnland [215].

A 9.17 Innenwände, Vertikalschnitt, M 1:20



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.⁸⁴

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“.⁸⁵ 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.

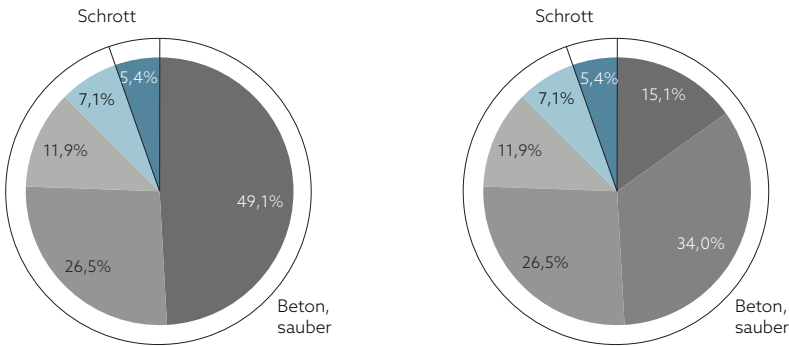
84 Es gibt in Deutschland derzeit (Stand 2019) drei Gips-Recyclinganlagen: MUEG in Sachsen, Remondis in Rheinland-Pfalz und Schulz in NRW.

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).

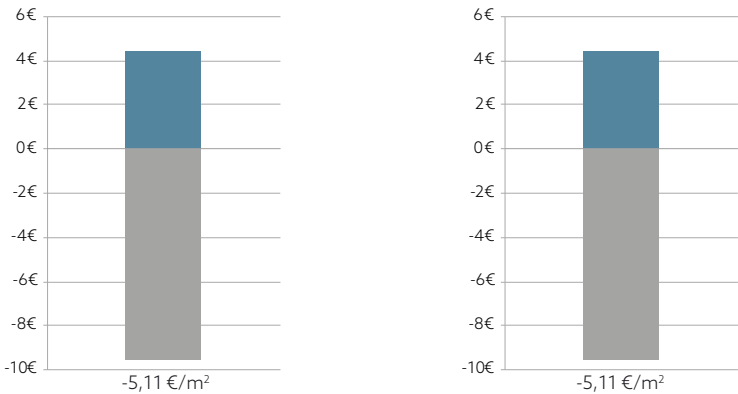
Materialien und Massen im Lebenszyklus

Stahlbeton C25/30, 250 mm	[kg/m²]	Stahlbeton C25/30, 250 mm	[kg/m²]
■ 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
	613,1		613,1

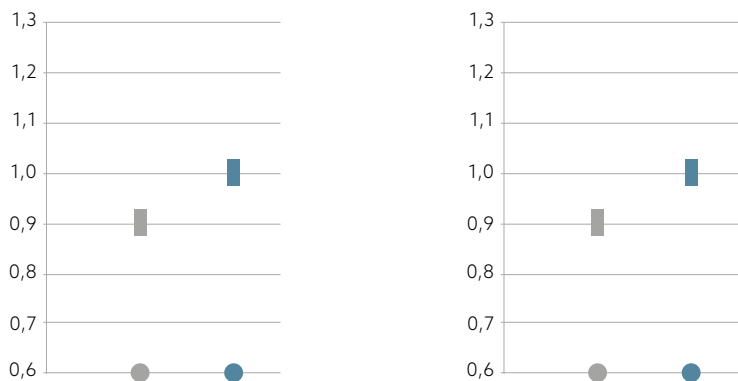
Wertstoffe – Anteile nach Massen in %



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 Feinanteile in Form von Sand in beiden Varianten in gleicher Menge (26,5% der Gesamtmasse) aus Primärmaterial stammen. Auch der Zement- und Wasseranteil⁸⁶ 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€/m² 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_{cr})
- energetisch verwertb. 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)

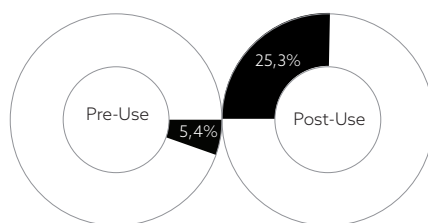
Ursprüngliche Planung

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Stahlbeton C25/30				
■ Kies	301,1	PR	rc 39	dc
■ Sand	162,1	PR	"	"
■ Zement	73,0	PR	"	"
■ Wasser	43,8	PR	"	"
■ Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-
■ Bewehrungsstahl	33,1	RC 100	rc 100	rc
	613,1			

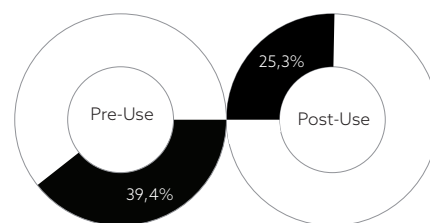
Urban Mining Design

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Stahlbeton C25/30				
■ Kies	92,6	PR	rc 39	dc
■ Rezyklierte Gesteinsk.	208,5	RC 100	"	"
■ Sand	162,1	PR	"	"
■ Zement	73,0	PR	"	"
■ Wasser	43,8	PR	"	"
■ Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-
■ Bewehrungsstahl	33,1	RC 100	rc 100	rc
	613,1			

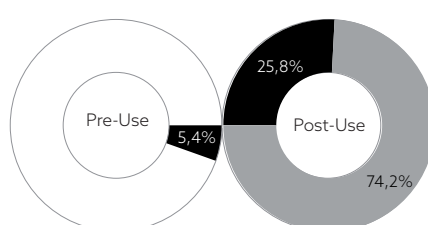
Kreislaufpotenziale



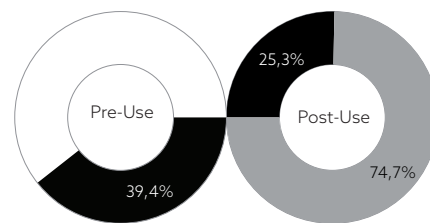
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,4%	25,3%	30,7%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	39,4%	25,3%	64,7%

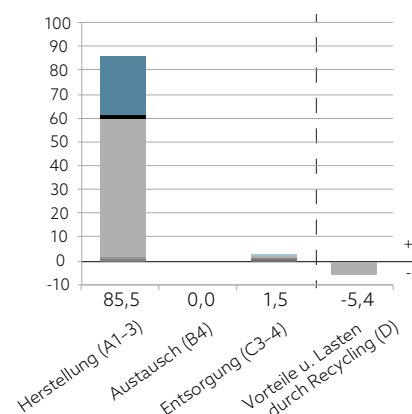
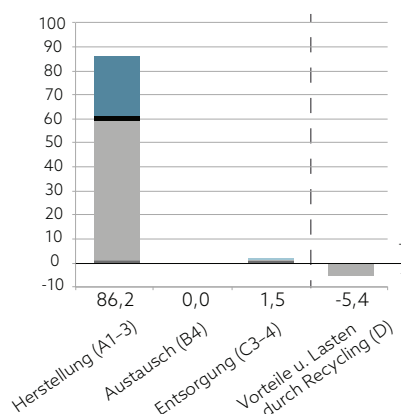


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	5,4%	100,0%	105,4%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	39,4%	100,0%	139,4%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



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.⁸⁷ 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 CO₂-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 CO₂-Äquiv. Für aufbereiteten Bauschutt werden 0,00267 kg CO₂-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 CO₂-Äquiv. pro m² Innenwand eingespart werden.

⁸⁷ 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

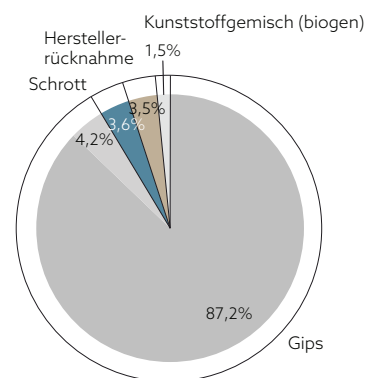
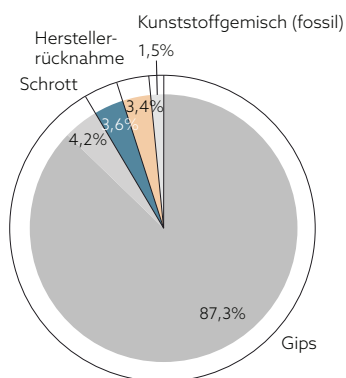
Ursprüngliche Planung

Urban Mining Design

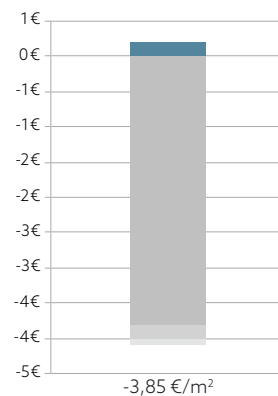
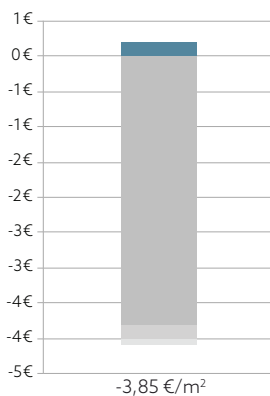
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]		[kg/m ²]
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
	<u>42,7</u>		<u>42,8</u>

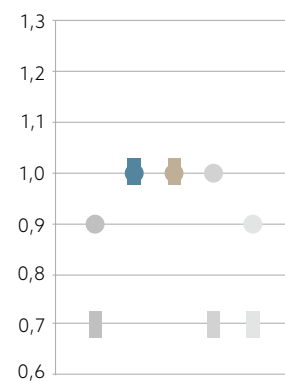
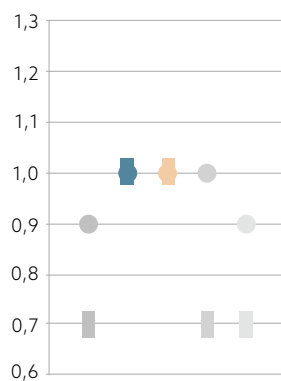
Wertstoffe – Anteile nach Massen in %



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 kg/m^3 eine leicht höhere Dichte als die Steinwolle (36 kg/m^3) aufweist, unterscheiden sich die Massen für 1 m^2 Wandfläche geringfügig. In der UMD-Variante wird die Kunststoffdispersion durch eine Dispersion mit biogenem Bindemittel⁸⁸ 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 Anwen-**

der des Urban Mining Index ein Mitdenken erforderlich: Sind die Wert-
stoffe nicht auf der Baustelle trennbar, sind sie preislich der maßgebli-
chen Wertstofffraktion zuzuordnen.

Die Dämmstoffe können in beiden Varianten der Wertstofffraktion „Herstellerrücknahme“ zugeordnet werden, da sowohl sortenreine Steinwolle als auch sortenreine Jutefaserdämmung vom jeweiligen Marktführer⁸⁹ 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 €/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 €/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_{cr})
- energetisch verwertb. 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)

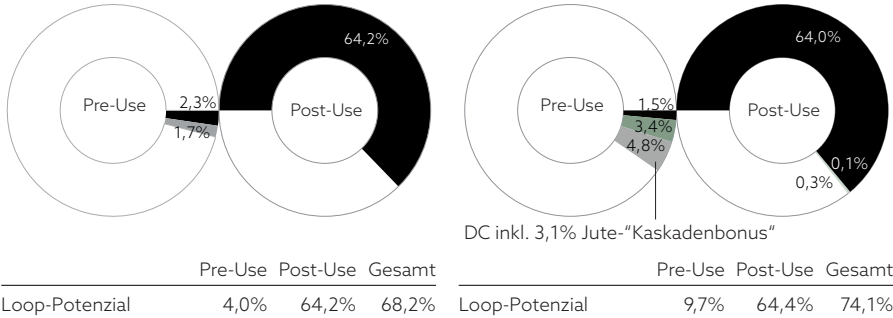
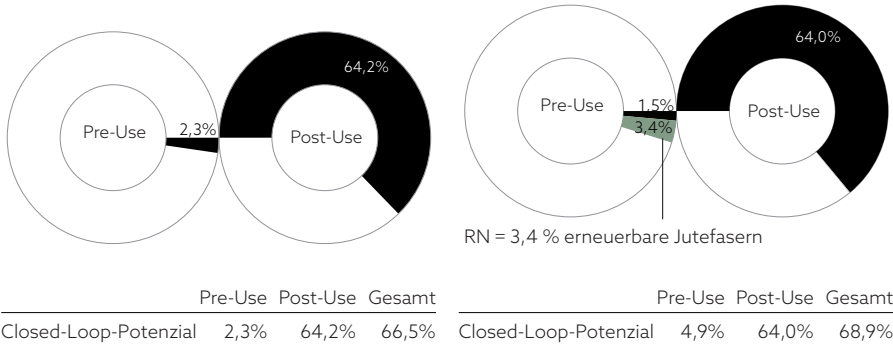
Ursprüngliche Planung

	[kg/m²]	Pre-Use	Post-Use	
		sd	ud	
Gipskartonplatten	37,2	DC 2,0	rc 99	d
C-Profile, Stahl verzinkt	1,6	RC 40	rc 95	rc
Dämmung, Steinwolle	1,4	RC 24,6	rc 97	d
Gipsspachtel	1,8	PR	rc 99	d
Dispersionsfarbe	0,7	PR	en _f	d
	42,7			

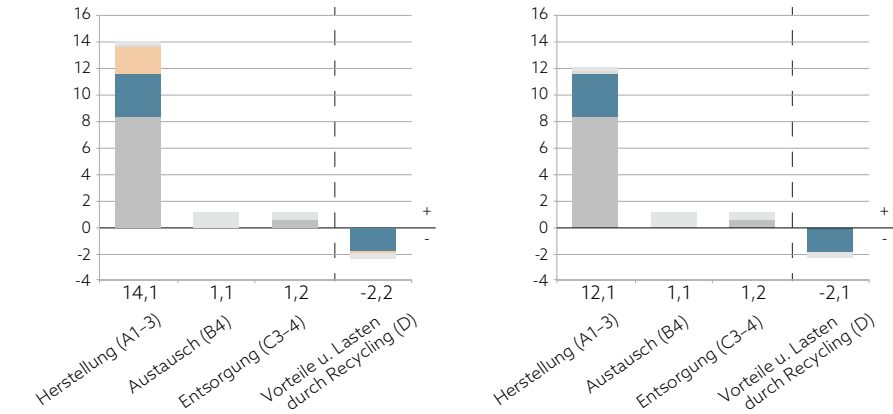
Urban Mining Design

	[kg/m²]	Pre-Use	Post-Use	
		sd	ud	
Gipskartonplatten,	37,2	DC 2,0	rc 99	d
C-Profile, Stahl verzinkt	1,6	RC 40	rc 95	rc
Dämmung, Jutefaser	1,5	RN 0 97+	rc 88	en _r
		DC 88		
Gipsspachtel	1,8	PR	rc 99	d
Dispersionsfarbe	0,7	PR	en _f	d
	42,8			

Kreislaufpotenziale



Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



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 Rohstoffe⁹⁰ 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 CO₂-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 CO₂-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

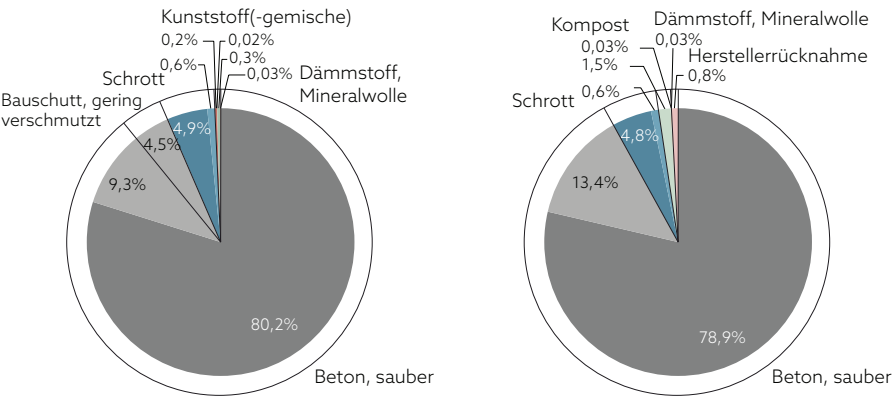
Ursprüngliche Planung

Urban Mining Design

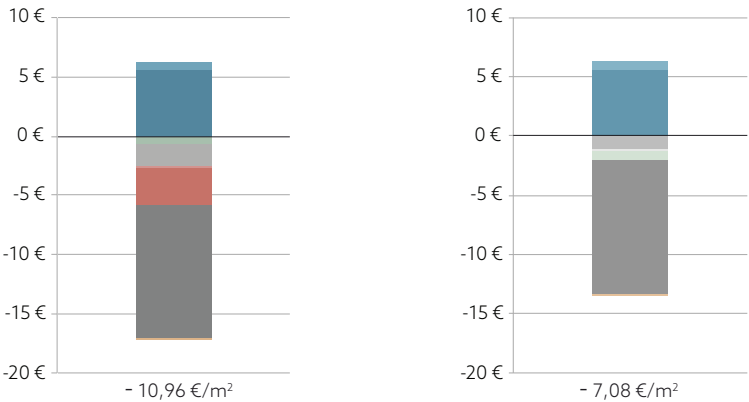
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m²]		[kg/m²]
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, ligninegebunden, 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
	861,7		875,0

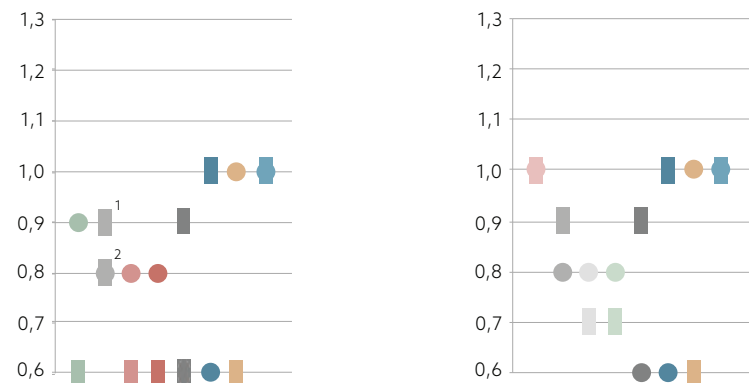
Wertstoffe – Anteile nach Massen in %



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 m² umgerechnet. Für die restlichen zwei Drittel wurde in beiden Varianten ein Terrazzo (bzw. einfach geschliffener Estrich für Technikflächen im Dachgeschoss) angenommen.⁹¹

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 Hersteller⁹² 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_{cr})
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en_{cr})
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en_r)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en_f) oder zur Deponierung (d)

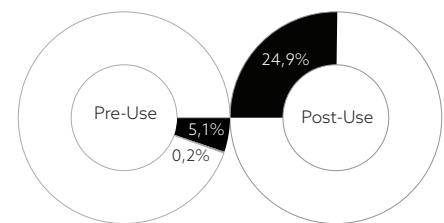
Ursprüngliche Planung

	[kg/m²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Linoleum	3,0	RC 10 + en _r	en _r		
			RN 0 62		
Zementestrich/Terrazzo	118,5	PR	dc	d	
Trennlagen, PE-Folien	0,2	PR	en _f	en _f	
EPS-Dämmung	2,1	PR	en _f	en _f	
Beton					
Gesteinskörnung	560,0	PR	rc 39		
CEM II	81,7	PR	"		
Wasser	49,0	PR	"		
Transporte Gesteinsk.	-	-	-		
Bewehrungsstahl	41,9	RC 100	rc 100		
Akustikaufkl. Glaswolle	0,3	RC 80	rc 80		
Heiz-/Kühlsegel, Stahl	5,0	RC 30	rc 95		
	861,7				

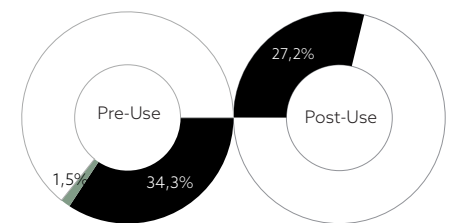
Urban Mining Design

	[kg/m²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Teppichfliesen	7,0	RC 57,9	rc 70	en _r	
Zementestrich/Terraz.	117,0	PR	rc 39	dc	
Graupappe	0,2	DC 100	rc 100c	en _r	
Holzfaserdämmung	12,8	RN 0 100	rc 100c	en _f	
Beton					
Gesteinskörnung	560,0	RC 45	rc 39	dc	
CEM II	81,7	PR	"	"	
Wasser	49,0	PR	"	"	
Transporte Gesteinsk.	-	-	-	-	
Bewehrungsstahl	41,9	RC 100	rc 100	rc	
Glaswollauflage	0,3	RC 80	rc 80	d	
Heiz-/Kühlsegel, Stahl	5,0	RC 30	rc 95	rc	
	875,0				

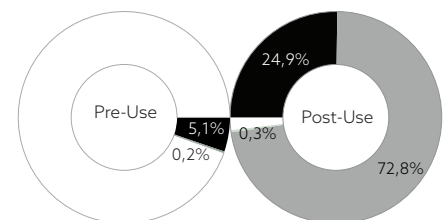
Kreislaufpotenziale



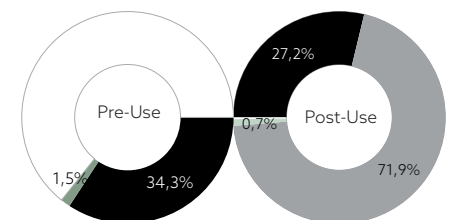
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,3%	24,9%	30,2%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	35,8%	27,2%	63,0%

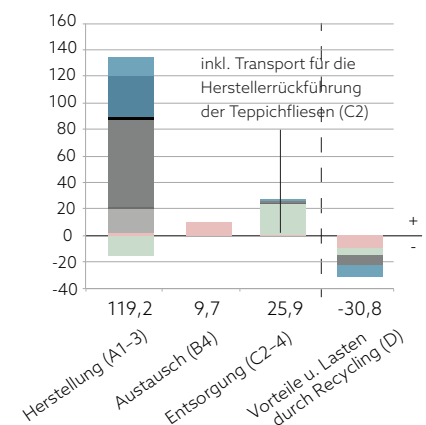
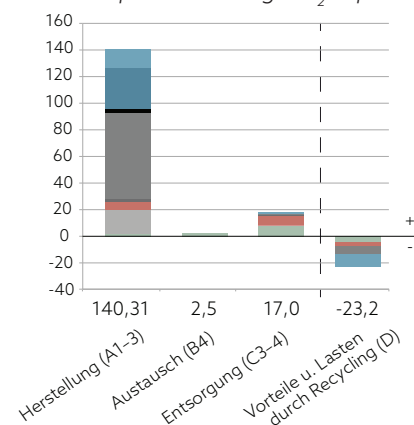


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	5,3%	98,0%	103,3%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	35,8%	99,8%	135,6%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



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%

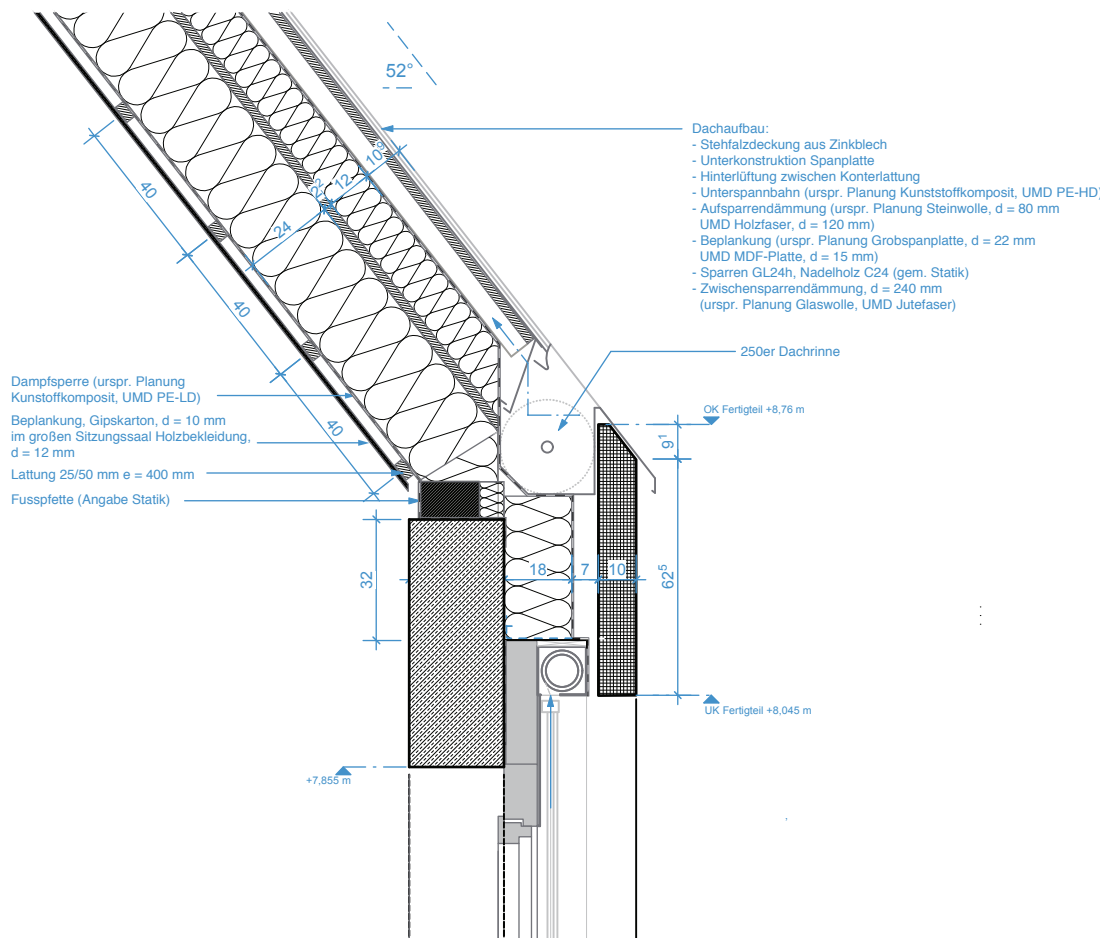
Das Loop-Potenzial steigt post-use von 98,0% auf fast 100%. Das übliche EoL-Szenario der Trittschalldämmung steigert das Loop-Potenzial um 0,4 Prozentpunkte, da die energetisch verwertbaren Wertstoffe im Gegensatz zur EPS-Dämmung erneuerbar sind (en_r). Der Anteil weiterverwertbarer Wertstoffe sinkt 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 CO₂ 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Emissionen nur um 0,35 kg/m².

Im Gesamtergebnis sind die CO₂-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 Herstellers⁹³ 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 angepasst⁹⁴, sodass beide Varianten nahezu den gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen (U-Wert 0,115 W/m²K bzw. 0,117 für die UMD-Variante). Die Vorgaben des Energieeinsparnachweises von EFG-Ingenieure [226] werden damit erfüllt (U-Wert max. 0,164 W/m²K).

Somit weisen beide Varianten auch den gleichen Energiebedarf in der Heizperiode auf. Geringe Unterschiede werden sich allerdings beim Kühlernergiebedarf 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 Kühlernergiebedarf 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 1m² Dachfläche umgerechnet, um eine zweifache Darstellung aller Grafiken für das Dach zu vermeiden.

Ursprüngliche Planung

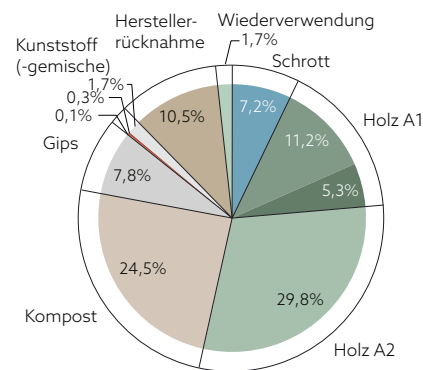
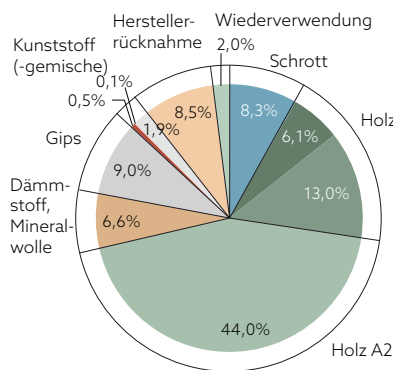
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]
Stehfalz-Zinkdeckung, 0,7 mm	5,6
Unterkonstruktion/Beplankung, 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
	67,6

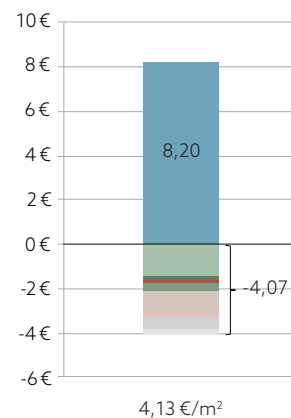
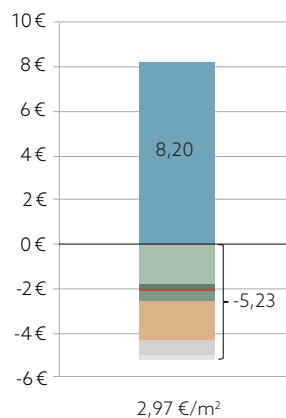
Urban Mining Design

	[kg/m ²]
Stehfalz-Zinkdeckung, 0,7 mm	5,6
Unterkonstruktion/Beplankung, 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
	78,3

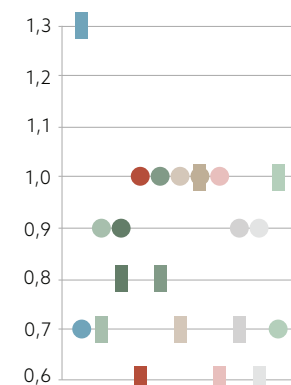
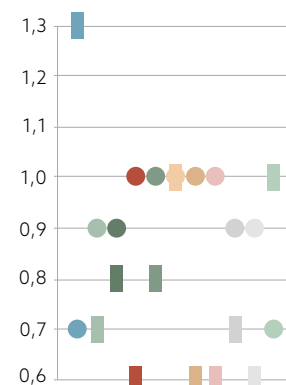
Wertstoffe – Anteile nach Massen in %



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.⁹⁵

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.⁹⁶

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.

Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dcr)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en_{cr})
- weiterverwertbare Wertstoffe (d_c)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en_r)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en_f) oder zur Deponierung (d)

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use
			sd ud
Zinkdeckung	5,6	RC 30	rc 100rc
Spanplatten	29,8	RN 0 91+ DC 18	dc en _r
Lattungen	4,1	RN 100 0	dr _{cr} en _r
Unterspannbahn	0,3	PR	en _i en _r
Steinwolle	5,8	RC 24,6	rc 97 d
Dachtragwerk KVH	8,8	RN 100 0	dr _{cr} en _r
Glaswolle	4,5	RC 40	rc 80 d
Dampfbremse, PE-LD	0,2	PR	en _i en _r
Gipskartonplatten	6,1	RC 2	rc 99 d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	en _i d
Bekleidung, Eiche	1,3	RN 100 0	ru en _{cr}

67,6

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Stehfalz-Zinkdeckung	5,6	RC 30	rc 100	rc
Spanplatte	15,8	RN 0 91+ DC 18	dc	en _f
Lattungen	4,1	RN 100 0	dr _{cr}	en _f
Unterspannbahn	0,1	PR	en _f	en _f
Holzfaserdämmung	19,2	RN 0 100	rc 100c	en _f
MDF	7,5	RN 47 47	dr _{cr}	en _f
Dachtragwerk KVH	8,8	RN 100 0	dr _{cr}	en _f
Jutedämmung	8,3	RN 0 91+ DC 18	rc 88	en _f
Dampfbremse, PE-LD	0,2	PR	en _f	en _f
Gipskartonplatten	6,1	RC 2	rc 99	d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	en _f	d
Bekleidung, Eiche	1,3	RN 100 0	ru	en _{cr}
	78,3			

The figure consists of two donut charts. The left chart, labeled 'Pre-Use', shows a distribution of 61.1% (green), 7.2% (black), and 31.7% (grey). The right chart, labeled 'Post-Use', shows a distribution of 25.3% (green), 1.3% (black), 14.8% (grey), and 58.6% (green). The green segments represent 'Yes' responses, black represents 'No', and grey represents 'Don't know'.

Response	Pre-Use (%)	Post-Use (%)
Yes	61.1	25.3
No	7.2	1.3
Don't know	31.7	14.8
Yes	-	58.6

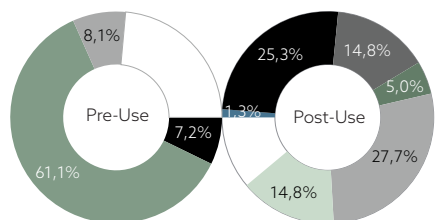
Pre-Use

Category	Percentage
Dark Green	80,3%
Black	2,1%
Light Green	17,6%

Post-Use

Category	Percentage
Black	38,4%
Grey	15,6%
Green	6,0%
White	40,0%

	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	82.4%	61.1%	143.5%

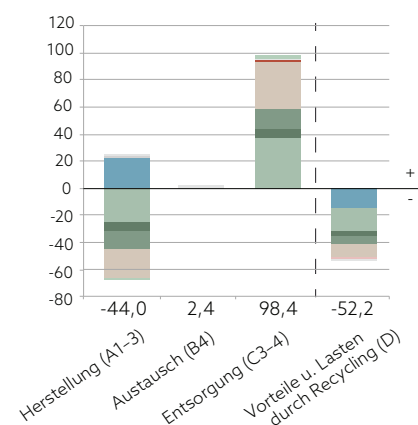


The figure consists of two donut charts. The left chart, labeled 'Pre-Use', shows a distribution of 80.3% (dark green), 13.1% (grey), and 2.1% (light green). The right chart, labeled 'Post-Use', shows a distribution of 38.4% (black), 15.6% (grey), 6.0% (light green), 17.1% (medium green), and 1.1% (very light green).

Response	Pre-Use (%)	Post-Use (%)
Yes	80.3	38.4
No	13.1	15.6
Don't know	2.1	6.0
Not sure	-	17.1
Other	-	1.1

	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	95,5%	94,1%	189,6%

Lebenszyklusphase	Beitrag (kg CO ₂ e)
Herstellung (A1-3)	-14,8
Austausch (B4)	2,4
Entsorgung (C3-4)	77,0
Vorteile u. Lasten durch Recycling (D)	-44,7



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%⁹⁷ aus Sekundärmaterial (Scherben) hergestellt wird und von Steinwolle, deren Sekundärrohstoffanteil 24,6%⁹⁸ 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 Wiederverwertung⁹⁹ 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%¹⁰⁰ 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Äquiv./m².

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	Masse an Materialien im Lebenszyklus pro m ²	Masse an Materialien im Lebenszyklus absolut	wieder-verwendete Materialien	wieder-verwertete Materialien	erneuerbare Primärrohstoffe	weiter-verwertete Materialien	nicht erneuerbare Primärrohstoffe
		[m ²]	[kg/m ²]	[kg]	RU [kg]	RC [kg]	RN [kg]	DC [kg]	PR [kg]
Variante 1 ursprüngliche Planung									
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%
Variante 2 Urban Mining Design									
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%

CLP Pre-Use
LP Pre-Use

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]	dcrc [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%

CLP Post-Use

LP Post-Use

A 9.19 b

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%	29,1%	5,7%	82,8%	88,5%
4,9%	4,9%	9,9%	4,9%	4,9%	9,9%
5,4%	25,8%	31,2%	5,4%	100,0%	105,4%
39,3%	41,2%	80,5%	39,5%	97,1%	136,5%
5,4%	25,3%	30,7%	5,4%	100,0%	105,4%
2,3%	64,2%	66,5%	4,0%	64,2%	68,3%
5,3%	24,9%	30,2%	5,3%	98,0%	103,3%
68,3%	46,4%	114,7%	76,4%	88,9%	165,4%
6,8%	25,2%	32,0%	7,0%	92,0%	99,0%
30,4%	31,1%	61,5%	35,2%	99,3%	134,5%
27,9%	32,8%	60,7%	39,1%	98,8%	137,9%
34,7%	25,4%	60,1%	34,7%	99,8%	134,6%
46,2%	62,9%	109,1%	46,3%	97,7%	144,0%
39,4%	25,3%	64,7%	39,4%	100,0%	139,4%
4,8%	64,0%	68,8%	9,6%	64,4%	74,0%
35,7%	27,2%	62,9%	35,7%	99,7%	135,5%
82,5%	61,1%	143,6%	95,6%	94,2%	189,7%
35,5%	29,1%	64,6%	37,2%	99,2%	136,4%

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

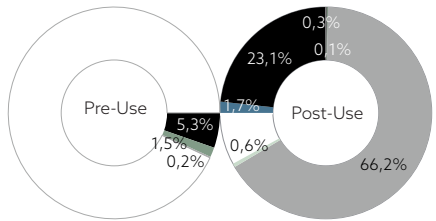
Pre-Use

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Rohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

Post-Use

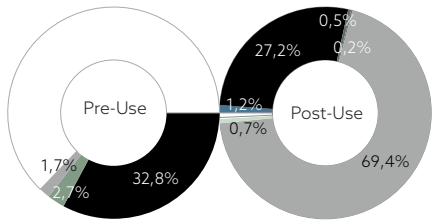
- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (d_{crc})
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (en_{cr})
- weiterverwertbare Wertstoffe (d_c)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en_r)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en_f) oder zur Deponierung (d)

Ursprüngliche Planung



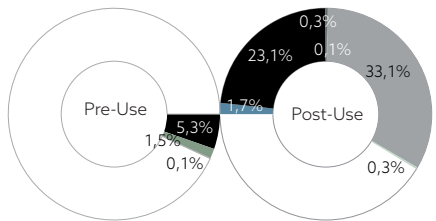
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	6,8%	25,2%	32,0%
Loop-Potenzial	7,0%	92,0%	99,0%

Urban Mining Design

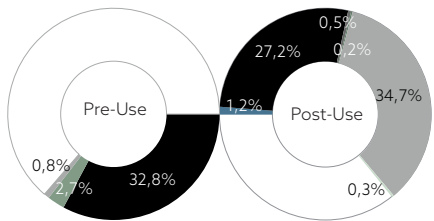


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	35,5%	29,0%	64,5%
Loop-Potenzial	37,2%	99,2%	136,4%

Gewichtung der in offenen Kreisläufen geführten Materialien (LP - CLP) mit dem Faktor 0,5

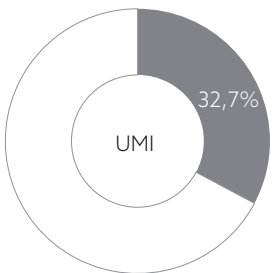


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Kreislaufpotenzial, gewichtet	6,9%	58,6%	65,5%

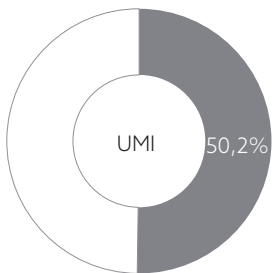


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Kreislaufpotenzial, gewichtet	36,3%	64,1%	100,4%

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%
------------------------	-------

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:

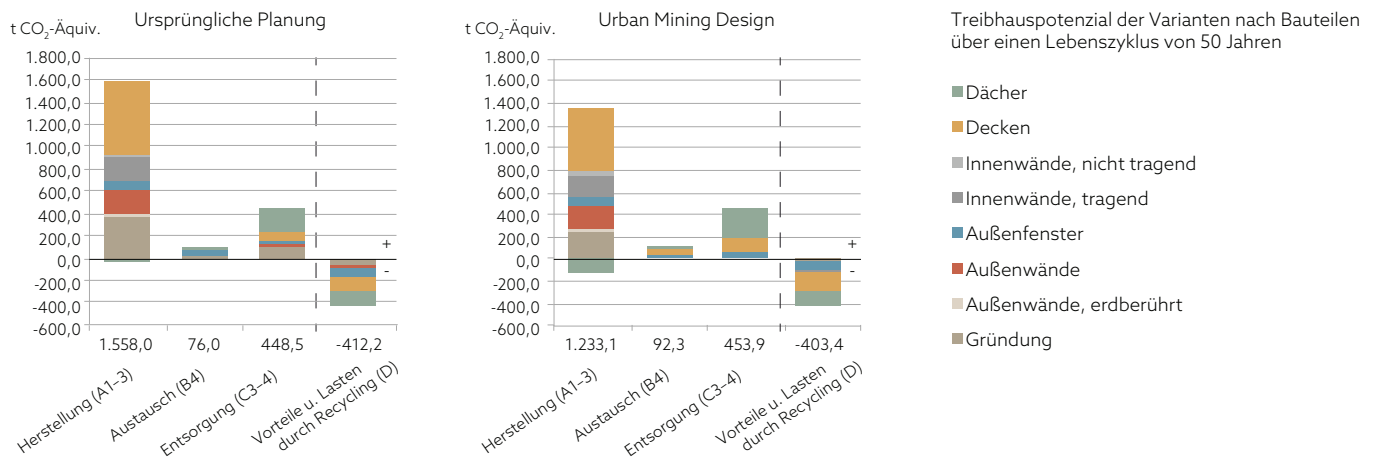
- Ursprüngliche Planung 32,7%
- Urban Mining Design 50,2%

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.¹⁰¹

Im Urban Mining Indicator werden die Pre-Use-Phase und die Post-Use-Phase deshalb zunächst gleich gewichtet. Sollte der Urban Mining Index

¹⁰¹ 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 m² 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 CO₂-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 4.746m² und einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren hat die UMD-Variante ein Treibhauspotenzial von ca. 5,8 kg CO₂-Äquiv./m² NGF*a während die ursprüngliche Planung auf 7,0 kg CO₂-Äquiv./m² NGF*a kommt. Im DGNB-Zertifizierungssystem beträgt der Referenzwert für die Baukonstruktion und die technische Gebäudeausrüstung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes 9,4 kg CO₂-Äquiv./m² 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 Betonfertigteilfeassade – 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	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			
Variante 1 ursprüngliche Planung												
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%
Urban Mining Indicator												40,00%
Variante 2 Urban Mining Design												
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%
Urban Mining Indicator												53,80%

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

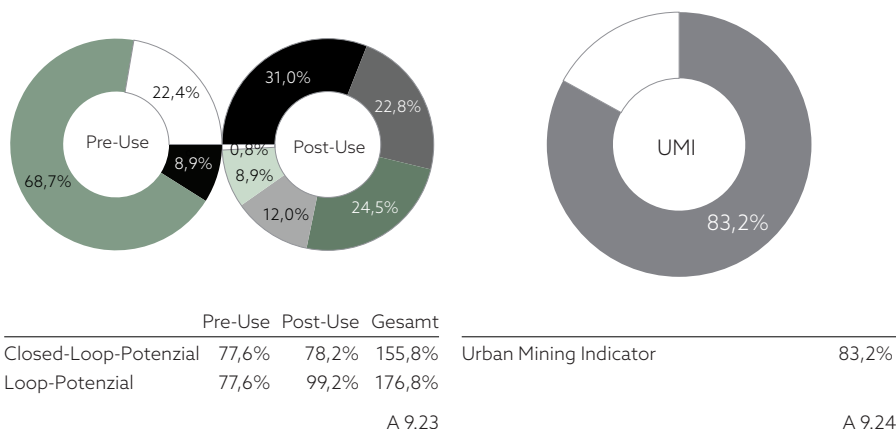
In Abbildung A 9.23 auf der folgenden Seite sind die Kreislaufpotenziale der Urban-Mining-Design-Variante des Modellprojekts 1 aus Kapitel 8 auf Gebäudeebene dargestellt.¹⁰² Gewichtet man diese Kreislaufpotenziale nach dem beschriebenen Verfahren, ergibt sich ein Urban Mining Indicator von 83,2%.

Diese 83,2% sind also ein Ergebnis für eine optimale, kreislaufgerechte Planung nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik.

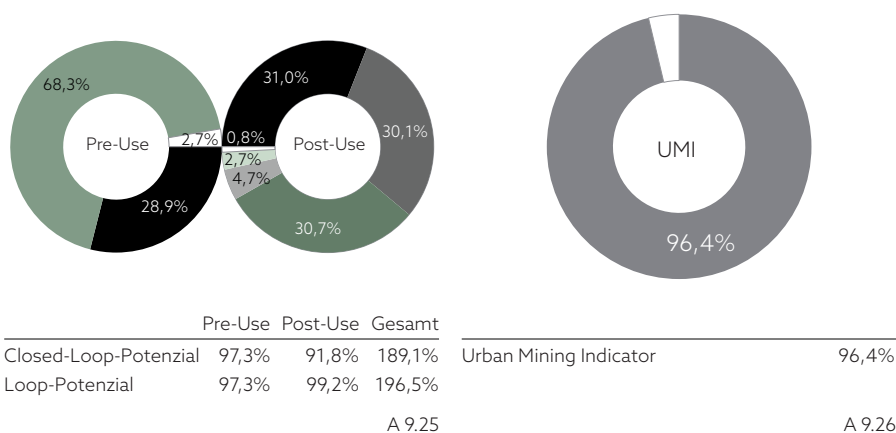
Es stellt sich die Frage, warum nicht nahezu 100% erreicht werden (können): Liegt es an der Methodik oder an den gegebenen Rahmenbedingungen?

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)



Bauteil	Flächen	Massen	Urban Mining Indicator aktuell MRC=MLP	
Gründung	135 m ²	15.214 kg	86,4 %	96,5%
Außenwände	420 m ²	38.506 kg	81,6 %	95,8%
Decke	135 m ²	14.797 kg	80,7 %	96,5%
Dach	135 m ²	22.825 kg	85,5 %	97,3%
Gesamt		91.342 kg	83,2 %	96,4%



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. Lehmbaumstoffe). 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 wachsenden Rohstoffen (d_{ccr})
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig wachsenden Rohstoffen (en_{ccr})
- weiterverwertbare Wertstoffe (d_c)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachhaltig wachsenden Rohstoffen (en_r)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (en_f) 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 Lehmstoffe 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 m³ Transportbeton je nach Region sowie Festigkeits- und Expositions-kategorie derzeit ca. 130–145 € netto.¹⁰³ Dies entspricht einem Preis von 54–60 € pro Tonne (bezogen auf eine durchschnittliche Dichte von 2,4 Tonnen pro m³). 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.¹⁰⁴ 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.¹⁰⁵ 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 Feinanteile 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.

