

8. Kreislaufpotenziale beispielhafter Konstruktionen im Vergleich

In diesem Kapitel wird der Urban Mining Index für die Berechnung der Kreislaufpotenziale beispielhafter Konstruktionen angewandt.

Die Beispielkonstruktionen sind dem Atlas Recycling entnommen. Hillebrandt und Riegler-Floors haben für die Publikation mithilfe von Studierenden verschiedene recyclinggerechte Konstruktionen im Detail entwickelt.

Im Folgenden werden die Kreislaufpotenziale zweier Modellprojekte aus dem Atlas Recycling dargestellt.⁵⁴

Um aufzuzeigen, wie sich die Ergebnisse kreislaufkonsistenter Konstruktionen von denen konventioneller Konstruktionen unterscheiden, wurden Variantenvergleiche auf Bauteilebene durchgeführt. Hierzu wurden zwei Modellprojekte ausgewählt, die Riegler-Floors und Hillebrandt bereits hinsichtlich der Lebenszykluskosten konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen verglichen haben.⁵⁵ Der folgende Vergleich der Kreislaufpotenziale bezieht sich jeweils auf die wesentlichen Bauteile Gründung/Boden, Außenwand, Decke und Dach.

Die Vergleichsanalyse beinhaltet außerdem eine Bilanzierung des CO₂-Footprints, um zu prüfen, ob und wie sich die kreislaufkonsistenten Konstruktionen von den konventionellen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Klimawandel unterscheiden.

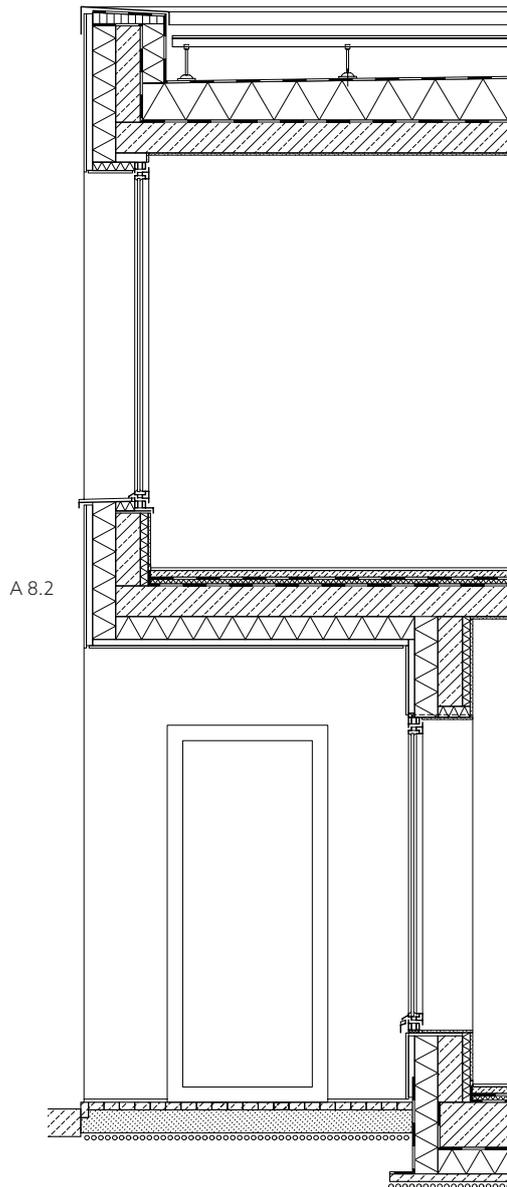
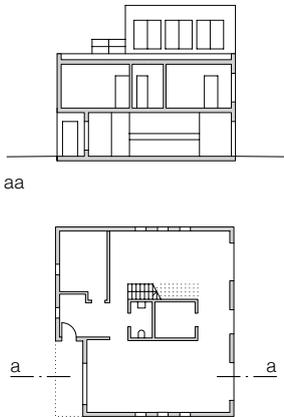
Schließlich wird reflektiert, in wieweit die kreislauforientierte Planung von Hillebrandt und Riegler-Floors durch die quantitative Bewertung mit dem Urban Mining Index bestätigt werden kann.

8.1.	Modellprojekt 1	186
8.2.	Modellprojekt 2	206
8.3.	Zwischenfazit	224

54 Die Kreislaufpotenziale dreier Beispielkonstruktionen wurden mit einer Beta-version des Urban Mining Index bewertet und im Atlas Recycling auszugsweise vorveröffentlicht. Seitdem wurde die Bewertungsmethodik überarbeitet. Die Erhebung von Preisen für Bau- und Abbruchabfälle wurde aktualisiert und der Bauteilkatalog wurde um die Auswertung der Daten anderer Wissenschaftler ergänzt (siehe Kapitel 6.4).

55 Die Lebenszykluskosten wurden für den Atlas Recycling von Riegler-Floors und Hillebrandt unter Mitwirkung von Rückbauunternehmer Dr. Paul Kamrath und Studierenden der Bergischen Universität Wuppertal für das jeweilige Gesamtgebäude berechnet. Die darin enthaltenen Rückbau- und Entsorgungskosten beziehen sich auf den Standort Dortmund und sind als Einzelfallberechnungen zu verstehen. Die im Folgenden dargestellten Entsorgungskosten und Verwertungserlöse beziehen sich auf die erhobenen bundesweiten Durchschnittspreise von 2019 (siehe Kapitel 6.1). Sie werden als Kosten bzw. Erlöse pro m² Bauteil dargestellt, da der Fokus der Bewertung in diesem Kapitel auf der Bauteilebene liegt.

Gebäudetyp Einfamilienhaus
Geschosse 2 + Staffelgeschoss
BGF 145 m²
BRI 1.100 m³



Konventionelle Konstruktion

EPS Schalungssteine mit Betonkern und Fassade aus HPL-Platten in Holzoptik

Dach mit Dachterrasse

Terrassendielen (PVC) auf Unterkonstruktion (PVC)⁵⁴, Abdichtungsbahn (PVC, verklebt), Dämmung (EPS), Dampfsperre (PP-Verbundmaterial), Stahlbetondecke, Gipsputz

Decken

Vinyl-Belag (PVC) geklebt, Faserzementestrich, Trennlage (Kunststoffmixfolie), Trittschalldämmung (EPS), Stahlbetondecke, Gipsputz, Glasfasertapete

Außenwände

HPL-Platten auf Unterkonstruktion, Schalungssteine (EPS) mit Ortbetonkern, Gipskartonplatte geklebt, Glasfasertapete

Gründung/Bodenplatte

Vinyl-Belag (PVC) geklebt, Faserzementestrich, Trennlage (Kunststoffmixfolie), Trittschalldämmung (EPS), Bitumenabdichtung, Stahlbetonfundamentplatte, Trennlage (Kunststoffmixfolie), Perimeterdämmung (XPS), Magerbeton, Schotterkoffer aus heterogenem Material

54 Da Terrassendielen und deren Unterkonstruktion in der Regel nicht aus reinem PVC bestehen, wurde angenommen, dass ein PVC-haltiges Holz-Kunststoffkomposit (Wood Plastic Compounds - WPC) geplant ist.

A 8.3

8.1. Modellprojekt 1

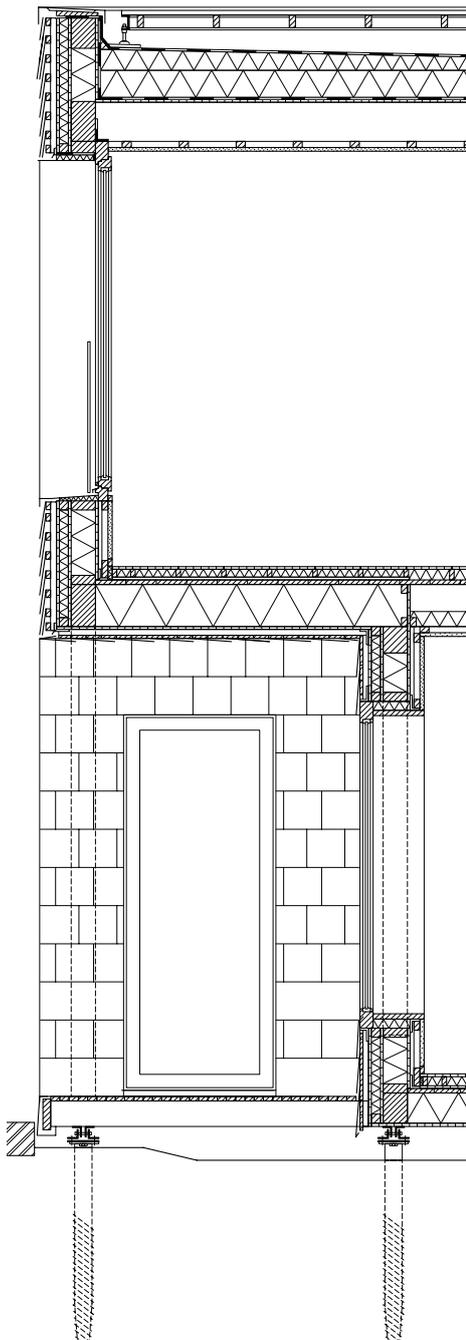
Im ersten Variantenvergleich werden die von Riegler-Floors und Hillebrandt entwickelten Konstruktionen für ein Einfamilienhaus untersucht (Abb. A 8.2). Die Konstruktionsschnitte (Abb. A 8.3 und A 8.4) zeigen den Aufbau der wesentlichen Bauteile in Varianten.

Bei genauer Betrachtung lässt sich erkennen, dass die beiden Wissenschaftlerinnen zwei Konstruktionen gegenübergestellt haben, die sich hinsichtlich der Kreislaufkonsistenz anscheinend extrem unterscheiden. Während die als konventionell beschriebene Konstruktion wie eine Do-it-yourself-Bauweise aus dem Baumarkt wirkt, überzeugt die recyclinggerechte Variante durch eine sorgfältige, kreislauforientierte Detailplanung. So wurden z. B. für Letztere authentische Materialien ausgewählt, für die konventionelle Konstruktion hingegen vermeintlich

A 8.2 Entwurfskonzept Modellprojekt 1: Schnitt und Grundriss EG nach Riegler-Floors/Hillebrandt [173], Maßstab 1:1000

A 8.3 Konventionelle Konstruktion nach Riegler-Floors/Hillebrandt [173], Vertikalschnitt Maßstab 1:50

A 8.4 Urban Mining Design nach Hillebrandt/Riegler-Floors [173], Vertikalschnitt Maßstab 1:50



Recyclinggerechte Konstruktion

Holztafelbau mit Fassade aus Lärchen- und Kupferschindeln

Dach mit Dachterrasse

Terrassendielen (Robinie), Stellfüße (Edelstahl), Bautenschutzmatte (Recycling-Gummigranulat), Dachabdichtungsbahn (bitumen- und halogenfrei, auf pflanzlicher Basis, mechanisch befestigt), Holzfaserdämmplatte, Dampfsperre (Aluminium-Grobkornfolie), OSB-Bauplatte (formaldehydfrei), Dachbalken (BSH), Lattung, Lehmbauplatte mit Lehmfeinputz

Decken

Korkbodenpaneele mit HDF-Trägerplatte (gekllickt), Lagerhölzer, Holzfaser-Trittschalldämmplatte, Schallentkopplung (Kork), massivholz-Diagonalplatte, Deckenbalken (BSH), Luftschalldämmung (Schafschurwolle), Lattung als Installationsebene, Lehmbauplatte mit Lehmfeinputz

Außenwände

Holzschindeln (Lärche) auf Lattung bzw. Recycling-Kupferschindeln auf Holzschalung, Konterlattung, MDF-Platte, Konterlattung, Gefachdämmung (Zellulosefaser aus Altpapier), Holzfaserplatte, Konterlattung, Lattung als Installationsebene, Lehmbauplatte mit Lehmputz und Spachtelung

Gründung/Bodenplatte

Korkbodenpaneele mit HDF-Trägerplatte, Lagerhölzer, Holzfaser-Trittschalldämmplatte, Schallentkopplung (Kork), Massivholz-Diagonalplatte, Deckenbalken (BSH) auf Stahl-L-Profilen (verzinkt), Gefachdämmung (Zellulosefasern aus Altpapier), Holzschalung, Schraubfundament (Stahl verzinkt)

A 8.4

günstige Kunststoff-Komposite mit Holzoptik. Trotz höherer Herstellungskosten sind die Gesamtkosten der kreislauforientierten Konstruktion in der Lebenszykluskostenanalyse von Riegler-Floors und Hillebrandt um 22% niedriger. Dies wird in der Prognose hauptsächlich auf höhere Instandsetzungs- sowie Rückbau- und Entsorgungskosten zurückgeführt.⁵⁶

Im Folgenden wird untersucht, ob sich die Vorteile der ökologisch orientierten Bauweise auch in den Kreislauf- und Treibhauspotenzialen zeigen. Hierzu werden die Auswertungen der Berechnungen auf Bauteilebene gegenübergestellt und die jeweiligen besonderen Aspekte beschrieben. Aufgrund des Umfangs der Berechnungen wird der Rechenweg nur einmal beispielhaft am Bauteil Gründung erläutert.

⁵⁶ Die energetische Performance hinsichtlich der Wärmedurchgangskoeffizienten ist in beiden Konstruktionsvarianten identisch.

Boden/Gründung

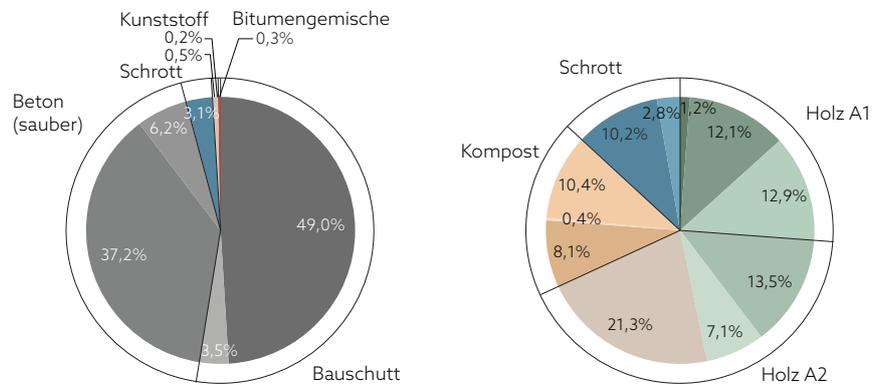
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

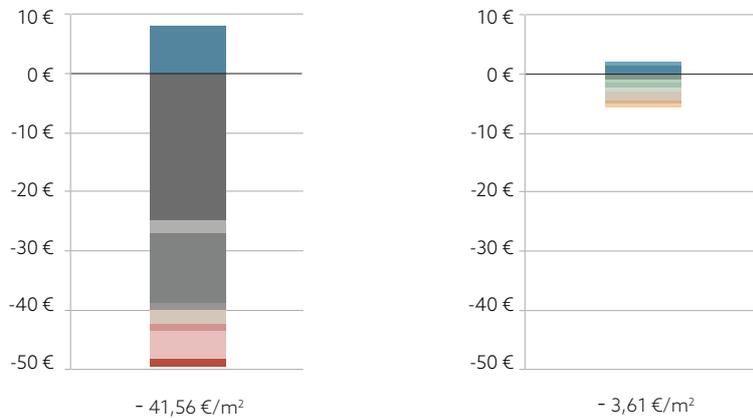
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]		[kg/m ²]
PVC-Belag, 2 mm	9,9	Kork-Paneele, 10,5 mm	24,0
Faserzementestrich, 45 mm	67,5	Lagerhölzer, Fichte, 30/60 mm	1,3
Trennlagen, Kunststoffgemisch	0,4	Holzfaserdämmplatte, 60 mm	9,2
Trittschalldämmung EPS, 30 mm	0,8	Korkunterlage, 2 mm	0,4
Abdichtung Bitumenbahnen, 5 mm	5,2	Holzfaserverplatte, 8 mm	8,0
Fundamentplatte Beton, 300 mm	720,0	Massivholzplatte, Weißtanne, 30 mm	13,7
Fundamentplatte Bewehrungsstahl	60,0	Brettschichtholzbalen, 140/200 mm	15,2
Wärmedämmung XPS, 100 mm	3,2	Gefachdämmung, Zellulose, 200 mm	11,7
Sauberkeitsschicht Magerbeton, 50 mm	120,0	Schalholz, Lärche, 22 mm	14,5
Tragschicht RC-Schotter, 500 mm	950,0	L-Profil, Stahl verzinkt, 70/70/7 mm	11,5
		Schraubfundamente, Stahl verzinkt, 1600 mm	3,2
	1.937,0		112,7

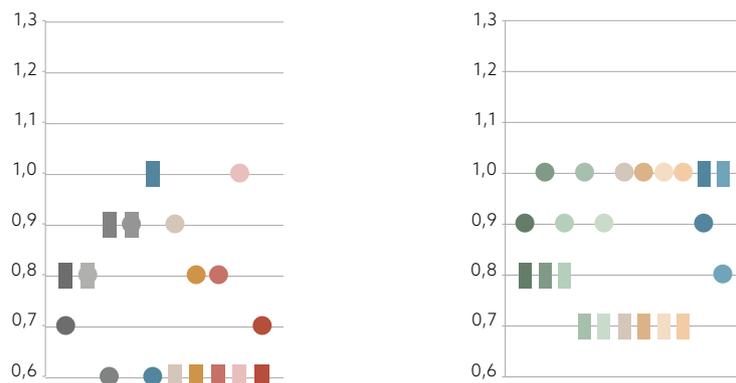
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



Hinweis: die Faktoren Arbeit und Wert können im Folgenden für jedes einzelne Material bzw. für jede Bauteilschicht den jeweiligen Grafiken „Faktor Arbeit und Faktor Wert“ entnommen werden. Aus Platzgründen werden im Text nur die durchschnittlichen Faktoren erwähnt oder einige wenige Faktoren erläutert.

8.1.1. Vergleichsanalyse Boden/Gründung

Die Aufstellung der Materialien und Massen zeigt, dass es sich bei der konventionellen Konstruktion um eine schwere Bauweise und bei der kreislaufkonsistenten Konstruktion um eine leichte Bauweise handelt. Wie erwähnt, werden in dieser Untersuchung die Kreislaufpotenziale und der CO₂-Fußabdruck der Konstruktion bewertet, nicht aber die Auswirkungen der Konstruktionen auf weitere Nachhaltigkeitskriterien. So werden z. B. Speichereffekte der massiven Bauweise, die den Energiebedarf der Nutzungsphase reduzieren können, nicht berücksichtigt.

Bei Betrachtung der Anteile der im Lebenszyklus anfallenden Wertstoffe zeigt sich, dass bei der konventionellen Konstruktion mehr als 95% der Materialien der mineralischen Abfallfraktion zugeordnet werden, während diese bei der recyclinggerechten Variante gar nicht vorkommen. Stattdessen werden dort vorwiegend Materialien verwendet, die dem biologischen Kreislauf zugeordnet werden können.

Rund die Hälfte der mineralischen Baustoffe der konventionellen Gründung kann zudem aufgrund von Bitumen- oder Kleberresten voraussichtlich nicht sortenrein zurückgewonnen werden und wird den „Gemischen aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit geringer Verschmutzung“ zugeordnet (in der Grafik kurz als Bauschutt bezeichnet).

Dies macht sich in der Prognose der Entsorgungskosten bemerkbar, bei der sich die Varianten deutlich unterscheiden. Die höheren Entsorgungskosten der konventionellen Konstruktion entstehen nicht nur durch einen höheren Preis für verschmutzte mineralische Materialien – der bei zukünftig steigendem Anspruch auf sortenrein verwertbare Materialien überdurchschnittlich stark steigen kann –, sondern durch die großen Massen, die zur Entsorgung anfallen. Einzig die größeren Stahlmassen (Bewehrungsstähle) wirken sich in der konventionellen Konstruktion positiv auf zu erzielende Erlöse aus.

Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Konstruktion 0,7 und für die kreislaufgerechte 0,8. Dass die Differenz nicht höher ist, liegt daran, dass die Faktoren für den Parameter Wert vom Preis pro Tonne Wertstoff abgeleitet sind und nicht vom Preis pro m² Fläche (s. Skala Kapitel 6, Punkt 6.1.3 und Kapitel 7, Punkt 7.3.1).

Der niedrige Faktor Wert der Kunststoffgemische und der verunreinigten Kunststoffe hat jedoch keinen Einfluss auf deren Kreislaufpotenziale, da für diese Materialien keine Recyclingmethoden existieren und sie deshalb sowohl im hochwertigen als auch im üblichen EoL-Szenario den energetisch verwertbaren Materialien aus fossilen Rohstoffen zugeordnet werden.

Beim Vergleich der Werte für den Faktor Arbeit fällt auf, dass die Faktoren der demontabel geplanten Gründung tatsächlich größtenteils im oberen Bereich liegen (das Maximum beträgt 1,0). Für den Rückbau der Schraubfundamente wurde der Mittelwert angenommen (Faktor 0,8), da hierfür keine Daten erhoben wurden. Für die recyclingorientierte Gründung beträgt der Durchschnittswert 0,95 und für die konventionelle Gründung 0,78. Bei der letztgenannten Variante wirkt sich vor allem der sehr hohe Aufwand für den Rückbau der massiven Fundamentplatte und der verschweißten Abdichtung negativ auf den Faktor Arbeit aus.

Konventionelle Konstruktion

[kg/m²] Pre-Use Post-Use
sd ud

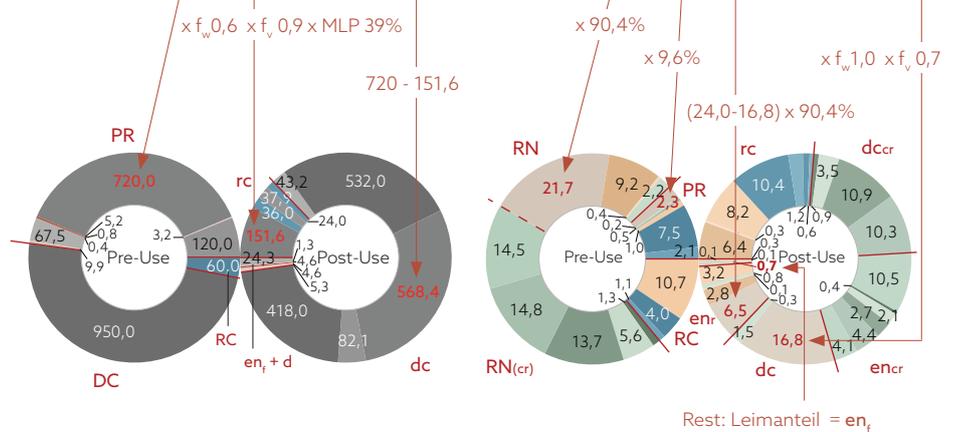
PVC-Belag	9,9	PR	en _f	en _f
Faserzementestrich	67,5	PR	dc	d
Trennlagen PE-Folie	0,4	PR	en _f	en _f
EPS	0,8	PR	en _f	en _f
Bitumenabdichtung	5,2	PR	rc	30
Beton	720,0	PR	rc	39
Bewehrungsstahl	66,0	RC 100	rc	100
XPS	3,2	PR	en _f	en _f
Sauberkeitsschicht	120,0	PR	rc	39
RC-Schotter	950,0	DC 100	dc	dc
Gesamt	1.937,0			

Recyclingorientierte Konstruktion

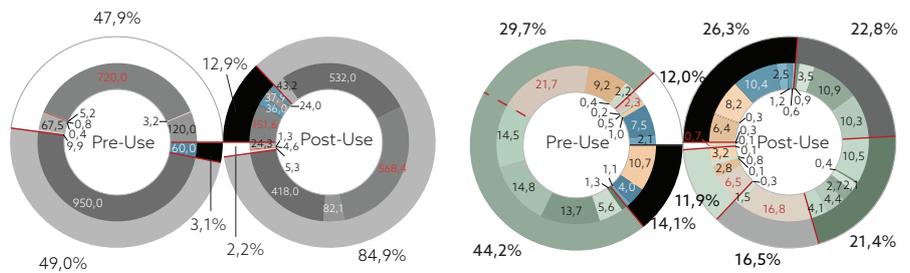
[kg/m²] Pre-Use Post-Use
sd ud

Kork-Paneele	24,0	RN0	90,4	dc	en _r
Lagerhölzer, Fichte	1,3	RN100		dc _{cr}	en _{cr}
Holzfaserdämmung	9,2	RN100		rc	100c
Korkunterlage	0,4	RN100		rc	100c
Holzfaserverplatte	8,0	RN70	27	dc _{cr}	en _{cr}
Massivholzplatte	13,7	RN100		dc _{cr}	en _{cr}
Brettschichtholz	15,2	RN97	0	dc _{cr}	en _{cr}
Dämmung, Zellulose	11,7	RC91,6		rc	100c
Schalholz, Lärche	14,5	RC100		dc	en _{cr}
L-Profil, Stahl verzinkt	11,5	RC35		rc	100
Schraubfundamente, Stahl verzinkt	3,2	RC35		rc	100
Gesamt	112,7				

Berechnung der Kreislaufpotenziale nach Massen



Aufteilung der Kreislaufpotenziale auf die Loops nach Qualitätsstufen



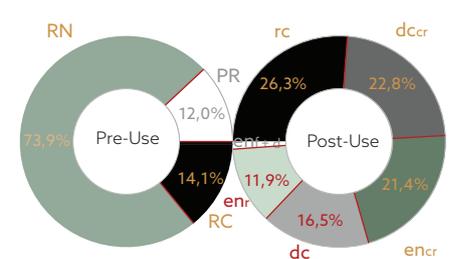
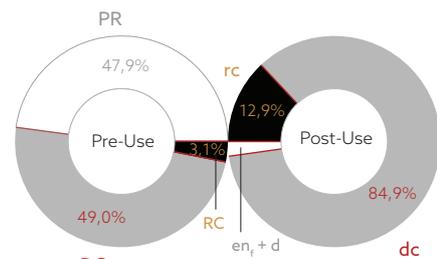
Kreislaufpotenziale

Pre-Use

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

Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc_{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)



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	3,1%	12,9%	16,0%
Loop-Potenzial	52,1%	97,8%	149,9%

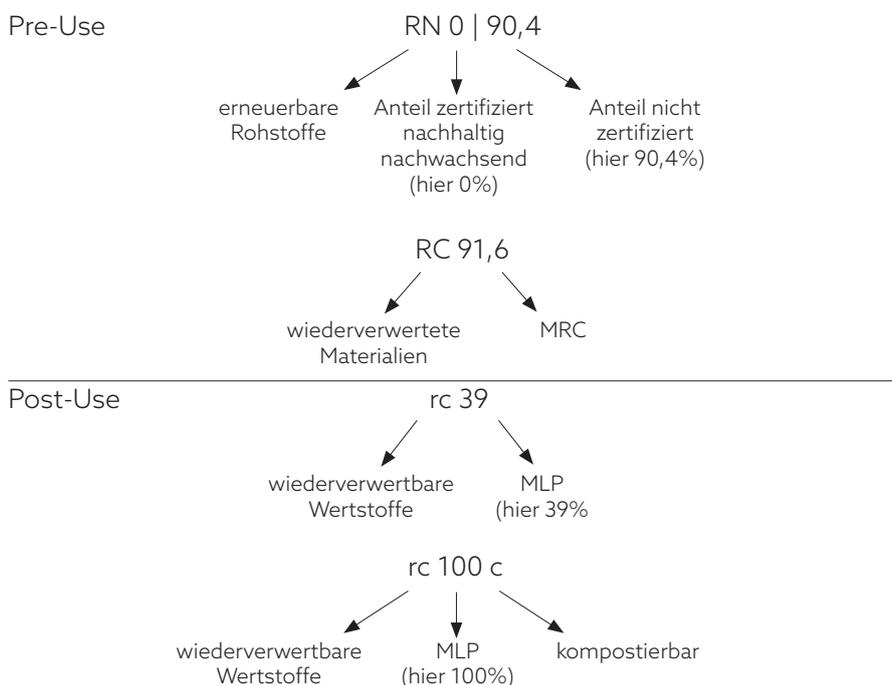
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	88,0%	70,5%	158,5%
Loop-Potenzial	88,0%	98,9%	186,9%

Kreislaufpotenziale

Am Beispiel des Bauteils Gründung werden im Folgenden die Grafiken zu den Kreislaufpotenzialen („Loops“) erläutert. Bei den nachfolgenden Bauteilen wird zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit auf die detaillierte Darstellung der Berechnung und der Materialmassen in den Loops verzichtet.

In der nebenstehenden Aufstellung sind den eingesetzten Materialien und Massen die materialspezifischen Qualitätsstufen Pre-Use und Post-Use zugeordnet (s. Kapitel 7.2 und 7.6). Die Formelzeichen der Qualitätsstufen sind um den jeweiligen Material-Recycling-Content (MRC) und das Material-Loop-Potenzial (MLP) ergänzt.

Die Abkürzungen werden wie folgt beispielhaft erläutert:



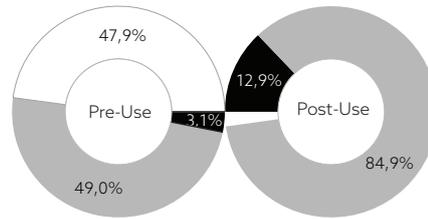
Anhand zweier Materialien wird die Verteilung der Massen auf die Loops erläutert:

Die Betonmassen der Bodenplatte der konventionellen Konstruktion bestehen zu 100% aus Primärmaterial (PR). Im Loop der Pre-Use-Phase sind deshalb unter „PR“ 720 kg/m² ausgewiesen (= 37,2% der Gesamtmassen der Konstruktion).

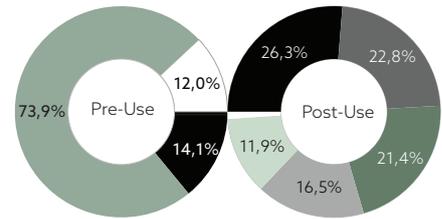
Post-Use wird der Beton mit einem Material-Loop-Potenzial von 39% den wiederverwertbaren Wertstoffen zugeordnet. Nach Multiplikation der Massen mit dem MLP und den Faktoren Arbeit und Wert (s. Grafik Seite 188) ergeben sich 151,6 kg/m², die im Loop der Post-Use-Phase unter „rc“ ausgewiesen sind (720 kg/m² x f_w 0,6 x f_v 0,9 x MLP 39% = 151,6 kg/m²).

Die Korkpaneele der recyclingorientierten Konstruktion bestehen zu 90,4% aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen. Der Anteil wird im Loop der Pre-Use-Phase deshalb unter „RN“ ausgewiesen (24 kg/m² x 94% = 21,7 kg/m²). Dies entspricht 22,6% der Gesamtmasse der Konstruktion. Der Rest (9,6%) sind Leimanteile, die aus fossilen Primärrohstoffen (PR) hergestellt werden und deshalb im Loop unter „PR“ ausgewiesen werden.

Konventionelle Konstruktion



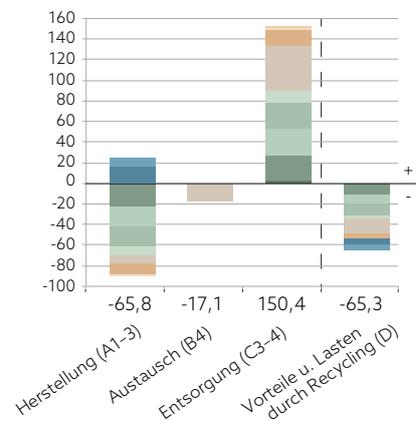
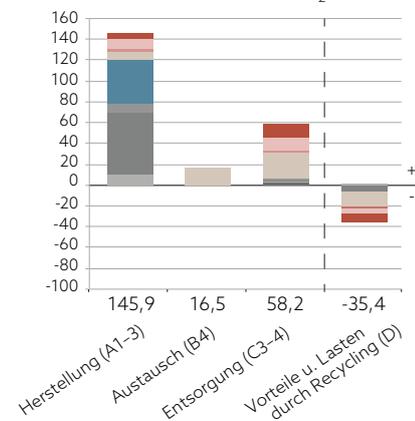
Recyclingorientierte Konstruktion



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	52,1%	97,8%	149,9%
Closed-Loop-Potenzial	3,1%	12,9%	16,0%

	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	88,0%	98,9%	186,9%
Closed-Loop-Potenzial	88,0%	70,5%	158,5%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



Post-Use können die Korkpaneele nach selektivem Rückbau (sd) als Alt-holz A2 weiterverwertet werden. Unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert wird für 70% des Materials dieses EoL-Szenario angenommen, sodass 16,8 kg/m² im Loop der Pre-Use-Phase unter „downcyclable“ (dc) ausgewiesen werden ($24 \text{ kg/m}^2 \times f_w 1,0 \times f_v 0,7 = 16,8 \text{ kg/m}^2$). Dies entspricht 14,9% der Gesamtmasse der Konstruktion. Zieht man die 16,8 kg von den 24 kg ab, verbleiben 7,2 kg, die auf die weiteren Qualitätsstufen aufgeteilt werden. Im üblichen selektiven Abbruch (ud) ist davon auszugehen, dass die Wertstoffe energetisch verwertet werden. Von den 7,2 kg/m², die diesem EoL-Szenario zugeordnet werden, können sich 90,4% im natürlichen Kreislauf durch Nachwachsen erneuern, sodass 6,5 kg/m² im Loop der Post-Use-Phase unter „energetisch verwertbar aus nachwachsenden Rohstoffen“ (en_r) ausgewiesen werden. Die restlichen 0,7 kg/m² sind der Qualitätsstufe „energetisch verwertbar, fossil“ (en_f) zugewiesen; dies sind die Leimanteile, die durch die Verbrennung verloren gehen und deren Rohstoffe nicht erneuerbar sind.

Insgesamt ist das Closed-Loop-Potenzial der konventionellen Konstruktion mit 16% wesentlich geringer als das der Variante im Urban Mining Design mit 158,5%. Pre-Use trägt bei der konventionellen Variante nur Bewehrungsstahl aus 100% Sekundärstahl zu geschlossenen Kreisläufen bei (3,1%). Der Schotter geht aufgrund des Qualitätsverlustes (Downcycling) nur in das Loop-Potenzial Pre-Use ein, das somit 52,1% beträgt. Auch Post-Use tragen nur der Bewehrungsstahl und der Beton sowie in geringem Maß die Bitumenbahn mit ihren jeweiligen Material-Loop-

Potenzialen zu geschlossenen Kreisläufen bei. Der große Anteil mineralischer Baustoffe, die am Ende der Nutzungsdauer voraussichtlich nur mit Qualitätsverlust weiterverwertet werden, bewirkt zumindest ein hohes Loop-Potenzial Post-Use (97,8%).

Die recyclingorientierte Variante weist dagegen mit den wiederverwerteten Materialien (Zellulose-Dämmstoff aus Altpapier und Sekundäranteile im Stahl) sowie dem hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe bereits ein hohes Kreislaufpotenzial Pre-Use auf (88%). Die kompostierbaren Materialien Holzfaser-Trittschalldämmung, Kork und Zellulosedämmung (boratfrei) können am Ende der Nutzungsdauer in den biologischen Kreislauf zurückgeführt werden und gehen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeitsfaktoren in den Anteil wiederverwertbarer Wertstoffe ein (26,3%). Bei den massiven Hölzern wurde vorausgesetzt, dass diese bei einer kreislauforientierten Planung aus zertifizierter Forstwirtschaft stammen, somit nachwachsen und in das Closed-Loop-Potenzial Post-Use eingehen können (s. Kapitel 7.4.2 und 7.4.3). Die Konstruktionshölzer werden der Altholzklasse A1 zugeordnet und sind damit stofflich weiterverwertbar (Downcycling im Post-Use-Anteil des Kreislaufpotenzials), während für die bewitterte Schalung nur energetische Verwertung angenommen wird.

Die nicht zertifizierten Anteile der Holzwerkstoffe fließen dagegen in das Loop-Potenzial ein.

Treibhauspotenzial

Parallel zu den Kreislaufpotenzialen wurde für alle Bauteile dieses Variantenvergleichs das Treibhauspotenzial berechnet.⁵⁷

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die Gründung fällt auf, dass sich die Herstellung der Baustoffe weitgehend gegensätzlich auswirkt: Während die konventionelle Konstruktion hohe Emissionen verursacht, speichern die Hölzer und Holzwerkstoffe der kreislaufgerechten Variante während der Wachstumsphase Kohlenstoff und entziehen der Atmosphäre dabei CO₂. Allerdings wird dieses bei der energetischen Verwertung am Ende der Nutzungsdauer wieder emittiert, sodass die Bilanz (bis auf die Prozessenergie) ausgeglichen ist. Die frei werdende Energie wird in den nächsten Lebenszyklus exportiert und kann dort fossile Energieträger ersetzen, womit eine Gutschrift für vermiedene Emissionen erzielt wird (Modul D). Lässt man diese Gutschrift außen vor, verursacht die konventionelle Gründung immer noch mehr als das Dreifache an Treibhausgasen gegenüber der kreislaufgerechten Variante. Dabei macht der zweimal auszutauschende PVC-Bodenbelag mehr als 22% der Emissionen im Lebenszyklus aus.

Insgesamt betrachtet kann die Berechnung der Treibhauspotenziale nicht den Vorteil der Kaskadennutzung abbilden. Die Möglichkeit zur längeren Speicherung des Kohlenstoffs bei stofflicher Verwertbarkeit der Hölzer und Holzwerkstoffe bleibt unberücksichtigt.

⁵⁷ Zur Ermittlung des Treibhauspotenzials der Konstruktionen wurden herstellereinspezifische Umweltproduktdeklarationen oder generische Daten aus der Ökobaudat verwendet. Die Quellen werden aufgrund der Vielzahl nicht einzeln im Quellenverzeichnis aufgeführt, können aber anhand der Deklarationsnummern (EPD) oder Identifikationsnummern (Ökobaudat) im mitgelieferten Exceltool nachvollzogen werden.

Außenwand

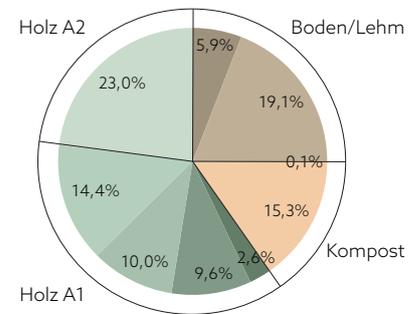
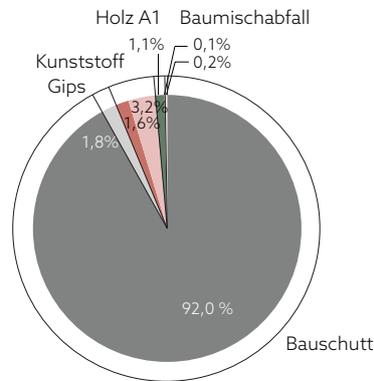
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

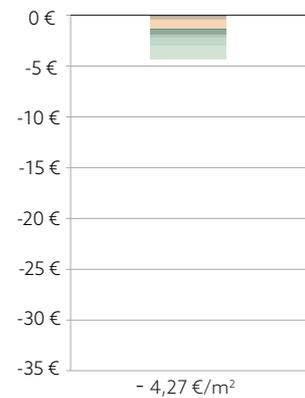
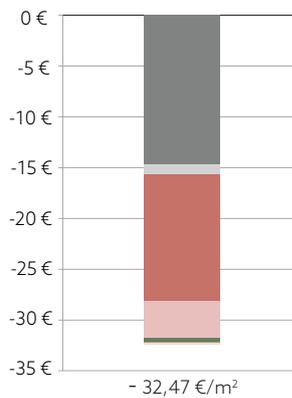
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]		[kg/m ²]
HPL-Platten, 6 mm	16,8	Lärchenschindeln, 20mm	13,2
Lattung, Fichte, 40/60 mm	6,0	Lattungen, Fichte, 2 x 40/60 mm + 60/60 mm	9,2
Betonfüllung, 200 mm	484,2	Dämmung, Zellulose (boratfrei), 60 + 160 mm	14,0
Schalungssystem, EPS, 220 mm	8,4	Holzständerwerk, KVH, 80/160 mm	8,8
Gipskartonplatte, 12,5 mm	9,3	Holzfasерplatten, 5, 8 und 15 mm	21,1
Glasfasertapete	0,5	Vorwandinstallation, Kanthölzer, 24 + 40/60 mm	2,4
Dispersionsfarbe	1,3	Lehm- oder Lehmputz, 25 mm	17,5
	526,5	Flachsgewebe	0,1
		Lehmputz, 3 mm	5,4
			91,7

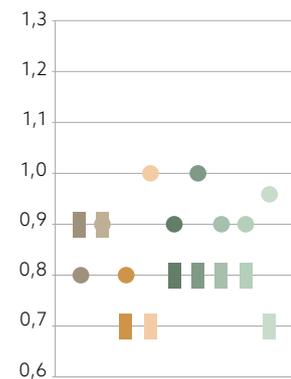
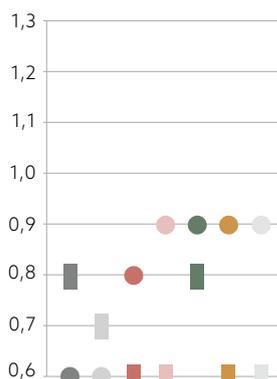
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



8.1.2. Vergleichsanalyse Außenwand

Die tragende Außenwand der konventionellen Variante besteht aus einem Schalungssystem aus Polystyrol (EPS), das mit Beton verfüllt wird und gleichzeitig als Dämmung dient. Eine solche Konstruktion wurde bisher nicht auf ihre Rückbau-Eignung untersucht. Nach Herstellerangaben [174] verbindet sich der Beton formschlüssig⁵⁸ und kleinteilig mit dem EPS. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass eine sortenreine Trennung nur mit sehr hohem Aufwand möglich ist. Der Beton wurde den Gemischen aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit geringer Verschmutzung (Bauschutt) zugeordnet.⁵⁹

Die HPL-Fassadenplatten bestehen aus Kraftpapieren, die mit Kunstharz getränkt sind und unter hohem Druck verpresst werden (High Pressure Laminates – HPL). Aufgrund des hohen Kunstharzanteils (30–40%) wurden die Platten den Kunststoffabfällen zugeordnet. Eine stoffliche Verwertung des Komposits ist nicht möglich. Gemäß Nutzungsdauertabelle des BNB-Systems müssen die Platten einmal während des angenommenen Gebäude-Lebenszyklus von 50 Jahren ausgetauscht werden, somit gehen die Platten doppelt in die Material- und Wertstoffmassen ein. In den Gesamtmassen der konventionellen Außenwand überwiegt die mineralische Abfallfraktion.

Die Außenwand der kreislauforientierten Variante besteht dagegen vollständig aus natürlichen Materialien, größtenteils aus zertifizierter Forstwirtschaft bzw. Wiederverwertung (Zellulosedämmung).

Die resultierenden Wertstoffe führen auch für dieses Bauteil zu erheblich unterschiedlichen Entsorgungskosten der beiden Varianten. Bei der konventionellen Außenwand werden für die großen Mengen des verunreinigten Betons und das Polystyrol hohe Entsorgungskosten prognostiziert. Das EPS macht zwar nur 1,6% der Gesamtmassen, aber nahezu 40% der Entsorgungskosten aus.

Dagegen werden für die kreislauforientierte Außenwandkonstruktion aufgrund der geringen Massen und der sortenreinen Trennbarkeit geringe Entsorgungskosten anfallen.

Die nebenstehenden Grafiken für die Faktoren Arbeit und Wert zeigen die Zuordnung dieser beiden Parameter auf Materialebene.

Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Konstruktion 0,67 und für die kreislaufgerechte rund 0,8.

Der Aufwand für den Rückbau der konventionellen inneren Wandbekleidung aus Gipskarton wurde geschätzt. Aufgrund der Verklebung auf der inneren EPS-Schalung muss von aufwendig zu entfernenden EPS-Anhaftungen ausgegangen werden, sodass die Platten mit einem Faktor von 0,6 in die stoffliche Gipsverwertung eingehen.

Die Urban-Mining-gerechte Außenwandkonstruktion ist dagegen verklebungsfrei geplant, sodass ein sortenreiner Rückbau möglich ist. Für den Lehmputz, das Flachsgewebe und die Lehmbauplatten könnte eine gemeinsame Verwertung angenommen werden. Vorsichtshalber wurde

58 Schwalbenschwanzförmige Innenseite der „Schalungssteine“.

59 Eine Zuordnung zum Bauschutt mit hoher Verschmutzung erfolgte nicht, da Kunststoffe prinzipiell in Aufbereitungsanlagen über Windsichter abgetrennt werden können. Aufgrund der Verzahnung mit dem EPS ist jedoch davon auszugehen, dass Reste von EPS im gebrochenen Beton verbleiben.

Legende Kreislaufpotenziale

Pre-Use

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

Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc_{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)

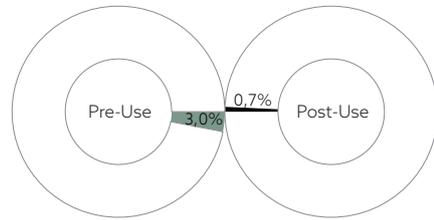
Konventionelle Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
HPL-Platten	16,8	RN60	en _r	en _r
Lattung, Fichte	6,0	RN100	dc	en _r
Betonfüllung	484,2	PR	dc	d
Schalungssystem, EPS	8,4	PR	en _f	en _f
Gipskartonplatte	9,3	RN2	rc	99 d
Glasfasertapete	0,5	PR	d	d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	d	d
Gesamt	526,5			

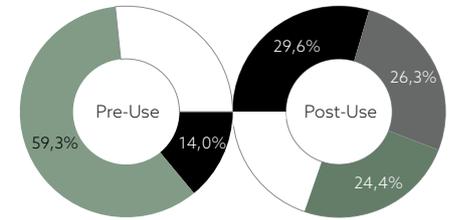
Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Lärchenschindeln	13,2	RN100 0	en _{cr}	en _{cr}
Lattungen, Fichte	9,2	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}
Dämmung, Zellulose	14,0	RC	91,6 rc	en _r
Holzständerwerk	8,8	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}
Holzfaserverplatten	21,1	RN70 27	dc _{cr}	en _{cr}
Vorwand, Kanthölzer	2,4	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}
Lehmputzplatte	17,5	RN0 3	rc	100 dc
Flachsgewebe	0,1	RN0 100	rc	100 en _r
Lehmputz	5,4	PR	rc	100 dc
Gesamt	91,7			

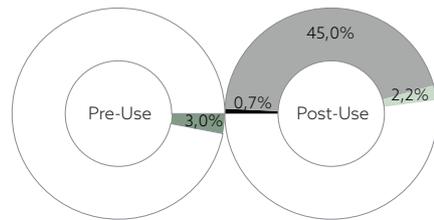
Kreislaufpotenziale



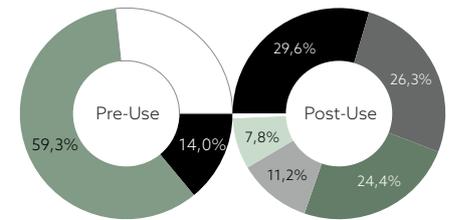
Closed-Loop-Potenzial: Pre-Use 3,0%, Post-Use 0,7%, Gesamt 3,7%



Closed-Loop-Potenzial: Pre-Use 73,3%, Post-Use 80,3%, Gesamt 153,6%

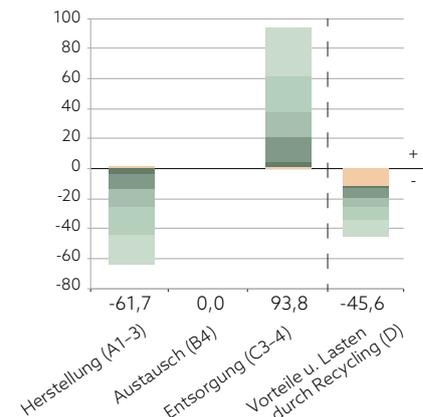
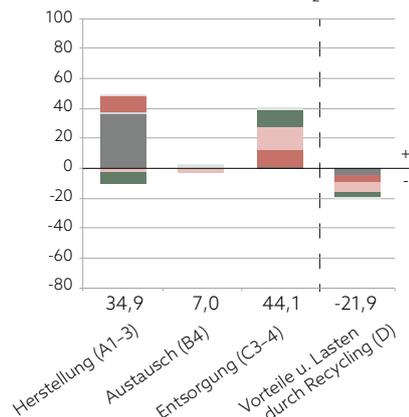


Loop-Potenzial: Pre-Use 3,0%, Post-Use 47,9%, Gesamt 50,9%



Loop-Potenzial: Pre-Use 73,3%, Post-Use 99,3%, Gesamt 172,6%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



jedoch eine Trennung des Putzes und des Gewebes von den Platten mit mittlerem Arbeitsaufwand (Faktor 0,8) angenommen. Für die massiven Hölzer wurde keine zerstörungsfreie Demontage zwecks Wiederverwendung, sondern ein selektiver maschineller Rückbau zur stofflichen Verwertung angenommen, da die verwendeten Hölzer nicht als besonders wertvoll gelten (Faktor Arbeit 0,9 statt 0,8, vgl. Bauteilkatalog Kapitel 6.5 Bauteile 335.01 und 335.02 sowie Kapitel 5, Abb. A 5.4 auf Seite 92). Der geringere Rückbauaufwand der kreislaufgerechten Konstruktion zeigt sich in einem durchschnittlichen Faktor Arbeit von 0,9 gegenüber der konventionellen Konstruktion von 0,8. Gewichtet man den durchschnittlichen Faktor Arbeit nach Massen (so wie er in die Kreislaufpotenziale einfließt), beträgt das Verhältnis sogar 0,93 zu 0,62.

Für die Berechnung des Kreislaufpotenzials ist relevant, dass die konventionelle Außenwand fast vollständig aus nicht erneuerbaren Primärmaterialien besteht. Von allen untersuchten Bauteilen weist sie mit 3% das geringste Loop- und Closed-Loop-Potenzial Pre-Use auf. Auch am Ende der Nutzungsdauer (Post-Use) werden voraussichtlich nicht einmal 1% der Materialien im geschlossenen Kreislauf geführt. Einzig die Gipskartonplatten sind prinzipiell wiederverwertbar. Aufgrund der (Un-)Wirtschaftlichkeit der sortenreinen Trennung gehen jedoch nur rund 40% der Platten in das End-of-Life-Szenario stoffliche Verwertung ein, während für 60% des Gipsbaustoffs eine Deponierung angenommen wird.

Für knapp die Hälfte der Materialien wird eine Weiterverwertung Post-Use prognostiziert. Hierzu trägt hauptsächlich der mit hohem Rückbauaufwand sortenrein zu trennende Beton bei. Die Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen (HPL und EPS) sind zwar energetisch verwertbar, gehen bei der Verbrennung jedoch unwiederbringlich verloren (nicht erneuerbar); sie tragen somit nicht zum Kreislaufpotenzial bei.

Die recyclinggerechte Außenwand besticht dagegen durch sehr hohe Kreislaufpotenziale. Der „weiße Anteil“ in der Grafik der Pre-Use-Phase resultiert hauptsächlich aus den primären abiotischen Lehmbaustoffen der inneren Wandbekleidung. Lehm ist zwar aufgrund seiner Plastizität sehr gut recyclingfähig, aber derzeit als Sekundärrohstoff nicht erhältlich, da kaum noch Gebäude aus Lehm zurückgebaut werden. Post-Use tragen die Lehmbaustoffe und die lt. Atlas Recycling kompostierbare Zellulosedämmung knapp 30% zu geschlossenen Kreisläufen bei, während für den hohen Anteil zertifizierter Hölzer unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert zu fast gleichen Teilen eine stoffliche und eine energetische Kaskadennutzung prognostiziert wird.

Die Berechnungen der Treibhauspotenziale spiegeln ein ähnliches Bild wie bei der Bodenplatte wider. Auffällig ist der hohe CO₂-Fußabdruck der HPL-Platten bei der energetischen Verwertung. Da der generische Datensatz für HPL-Platten in der Ökobaudat nur ein Cradle-to-Gate-Datensatz ist (Modul A1-3), wurden die Emissionen in Modul C anhand des Datensatzes für Hausmüllverbrennung berechnet. Die Datensätze für die Verbrennung von Kunststoffen oder Holzwerkstoffen würden noch höhere Emissionswerte liefern. Die CO₂-Bilanz der Außenwand aus natürlichen Materialien ist wiederum relativ ausgeglichen.

Hinweis:

Die Masse des Materials wird immer mit den Faktoren Arbeit und Wert multipliziert, also bestimmen beide Faktoren nach Masse die Kreislaufpotenziale.

Addiert man alle Faktoren der Konstruktion für den Parameter Arbeit und teilt sie durch die Anzahl der Materialien, ergibt sich ein Durchschnittsfaktor, der - ohne Berücksichtigung der Massen - eine einfache Auskunft über den Rückbauaufwand der Konstruktion gibt.

Multipliziert man erst jeden einzelnen Faktor mit der jeweiligen Materialmasse und teilt dann das Ergebnis durch die Gesamtmasse ergibt sich ein massengewichteter Durchschnittsfaktor. Dieser deutet an, wie sich der Parameter Arbeit in den Kreislaufpotenzialen niederschlägt, da die Kreislaufpotenziale massengewichtet sind.

Decke

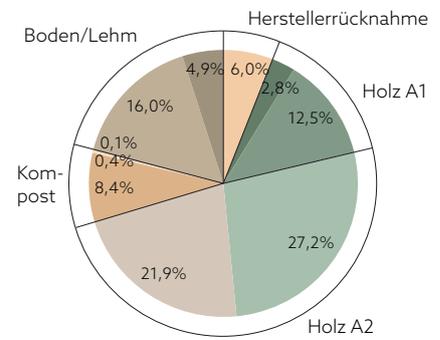
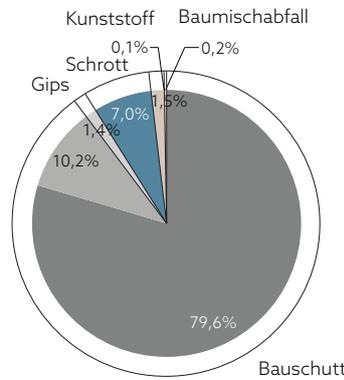
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

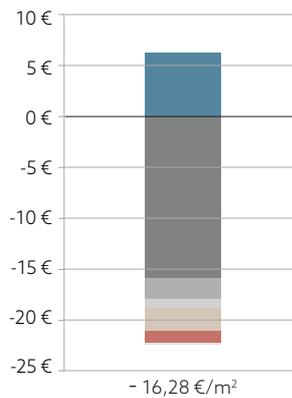
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]		[kg/m ²]
PVC-Belag, 2 mm	9,9	Kork-Paneele, 10,5 mm	24,0
Faserzementestrich, 45 mm	67,5	Lattungen, Fichte, 30/60 + 40/60 mm	1,3
Trennlage PE-Folie	0,2	Trittschalldämmung, Holzfaser, 60 mm	9,2
Trittschalldämmung EPS, 30 mm	0,8	Korkunterlage, 2 mm	0,4
Deckenplatte Beton, 220 mm	528,0	Massivholzplatte, Weißtanne, 30 mm	13,7
Deckenplatte Bewehrungsstahl	46,6	Brettschichtholzbalken, 140/280 mm	29,8
Gipsputz, 10 mm	9,0	Gefachdämmung, Schafwolle (biozid- und baratfrei), 100 mm	6,6
Dispersionsfarbe	1,3	Lehmbauplatte, 25mm	17,5
	663,3	Flachsgewebe	0,1
		Lehmputz, 3mm	5,4
			109,6

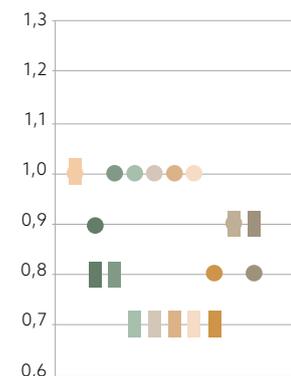
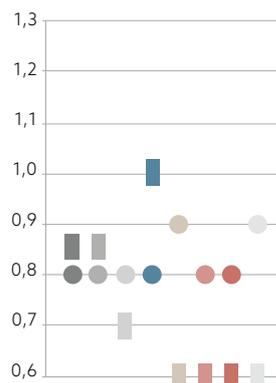
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



8.1.3. Vergleichsanalyse Decke

Die konventionelle Decke ist in schwerer Bauweise aus Stahlbeton mit schwimmendem Estrich geplant, während die kreislauforientierte Decke in Leichtbauweise aus natürlichen Materialien und ohne Estrich entworfen ist. Die leichte Decke ist für ein Einfamilienhaus durchaus umsetzbar, müsste aber sorgfältig (auch zu den flankierenden Bauteilen) schallentkoppelt werden.

In beiden Varianten werden die Oberbodenbeläge während der Gebäudenutzungsdauer voraussichtlich zweimal ausgetauscht, gehen also dreifach in die Material- und Wertstoffmassen ein. Der Anstrich (Nassabriebklasse 3) der konventionellen Deckenbekleidung wird nach BNB-Nutzungsdauerentabelle sogar neunmal im Lebenszyklus erneuert, dies macht sich aber aufgrund der geringen Massen kaum bemerkbar. Bei dem Lehmfeinputz der kreislaufgerechten Deckenbekleidung handelt es sich bereits um ein Oberflächenfinish. Beschädigungen können durch Plastifizieren (Aufweichen) und Reiben oder Spachteln repariert werden (siehe Kolumba-Museum von Peter Zumthor). Ein Austausch wurde deshalb nicht einkalkuliert.

Die Gefachdämmung aus Schafwolle wird von einem Hersteller zurückgenommen, um das Material zu recyceln. Alternativ ist aber auch eine Wiederverwendung des hochwertigen Dämmmaterials als Stopfwohle oder Fugenband sowie eine Kompostierung möglich [175].

Die Grafik zu den Wertstoffen der konventionellen Decke zeigt, dass rund 90% der Materialien den mineralischen Gemischen mit geringer Verschmutzung (Bauschutt) zugeordnet werden. Durch das Aufbringen von Gipsputz wird die Stahlbetondecke verunreinigt.⁶⁰ Der Estrich wird durch Kleberreste des PVC-Belags verunreinigt.

Die Verunreinigung spiegelt sich auch in den Kosten wider: Die Entsorgungskosten der konventionellen Decke sind um ein Drittel höher als die der leichten, recyclinggerechten Konstruktion. Dies liegt hauptsächlich an den großen Mengen Beton (und Faserzementestrich), die aufgrund von Restanhaftungen (Gips und Kleber) bzw. Beimischungen (Glasfasern) als verschmutzte mineralische Gemische recht teuer entsorgt werden müssen. Die zu erwartenden Erlöse für den Bewehrungsstahl gleichen dies nur zu einem kleinen Teil aus.

Damit in Zusammenhang steht der Faktor Wert: Der durchschnittliche Faktor für die konventionelle Decke beträgt 0,7, für die recyclinggerechte Deckenkonstruktion hingegen 0,8.

Die durchschnittlichen Faktoren für den Rückbauaufwand weisen eine leicht höhere Differenz auf: Während der durchschnittliche Faktor Arbeit für die konventionelle Decke bei 0,8 liegt, beträgt er für die kreislauforientierte Decke 0,94 (massengewichtet sogar 0,8 zu 0,97). Bei der letztgenannten wurde z.B. eine Verklebung des Deckenbelags vermieden,

⁶⁰ Gips ist sulfathaltig und darf nicht mit anderen mineralischen Baustoffen verwertet werden. In Recycling-Gesteinskörnung für Beton würde der Gips treibend wirken und den Beton im nächsten Lebenszyklus damit schädigen. Um eine Rezyklierfähigkeit von Beton zu gewährleisten, sollte das Aufbringen von Gipsputz deshalb unbedingt vermieden werden.

Legende Kreislaufpotenziale

Pre-Use

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

Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc_{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)

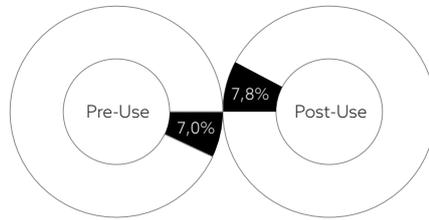
Konventionelle Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
PVC-Belag	9,9	PR	en _f	en _f
Faserzementestrich	67,5	PR	dc	d
Trennlage PE-Folie	0,2	PR	en _f	en _f
Trittschalldäm. EPS	0,8	PR	en _f	en _f
Deckenplatte Beton	528,0	PR	dc	d
Bewehrungsstahl	46,6	RC100	rc100	rc
Gipsputz	9,0	PR	rc99	d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	en _f	en _f
Gesamt	663,3			

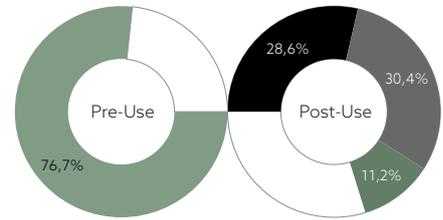
Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Kork-Paneele	24,0	RN0 90,4	dc	en _r
Lattungen, Fichte	1,3	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}
Holzfaserdämmung	9,2	RN0 100	rc100c	en _r
Korkunterlage	0,4	RN0 100	rc100c	en _r
Massivholzplatte	13,7	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}
Brettschichtholz	29,8	RN97 0	dc _{cr}	en _{cr}
Schafwolldämmung	6,6	RN0 100	rc100c	en _r
Lehmbauplatte	17,5	RN0 3	rc100	dc
Flachsgewebe	0,1	RN0 100	rc100c	en _r
Lehmputz	5,4	PR	rc100	dc
Gesamt	109,6			

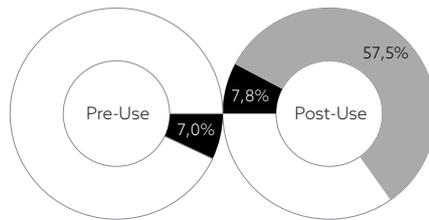
Kreislaufpotenziale



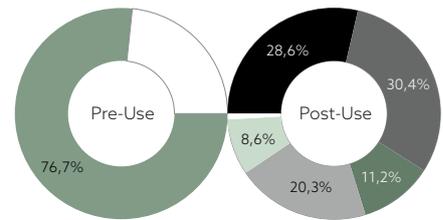
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	7,0%	7,8%	14,8%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	76,7%	70,2%	146,9%

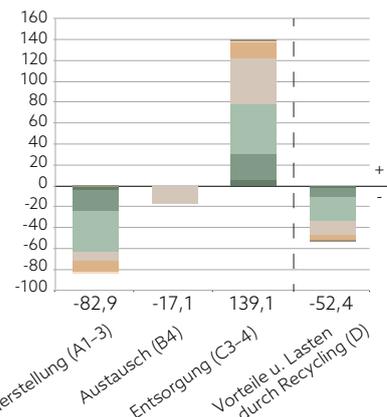
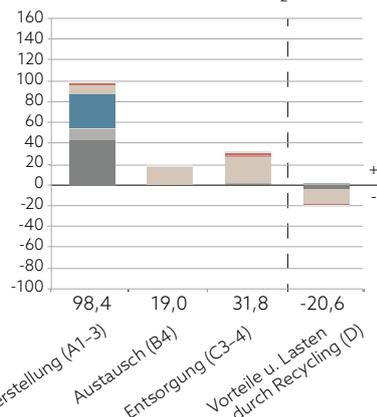


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	7,0%	65,2%	72,2%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	76,7%	99,1%	175,8%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



indem Korkpaneele mit Clickverbindung verwendet werden. Der Kork ist zwar auf der Trägerplatte verklebt, aber da die beiden Materialien homogen sind, ist eine Trennung am Ende der Nutzungsdauer nicht notwendig. Die Korkpaneele werden der Altholzkategorie A2 zugeordnet. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit für den selektiven Rückbau (Faktor Arbeit 1,0 und Faktor Wert 0,7) werden die Paneele zu 70% der stofflichen Verwertung und zu 30% der energetischen Verwertung zugeordnet. Sie fließen in das Loop-Potenzial Post-Use ein. Da nach eigener Recherche kein Hersteller Kork-Paneele aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft führt, ist der geschlossene Kreislauf hier nicht gesichert.

Die Kreislaufpotenziale der Decke sind insgesamt denen der Außenwand ähnlich: Die konventionelle Decke weist in der Summe ein Closed-Loop-Potenzial von nur 14,8% aus, die recyclinggerechte Decke hingegen von 146,9%. In die Pre-Use-Phase der konventionellen Konstruktion geht nur der Bewehrungsstahl als Sekundärstahl ein. Post-Use ist der Anteil an weiterverwertbaren Materialien etwas höher als bei der Außenwand, da der Rückbauaufwand für die Decke geringer eingeordnet wird: Die Betonmassen der Decke werden mit einem Faktor Arbeit von 0,8 multipliziert, diejenigen der Außenwand mit nur 0,6. Dies bewirkt ein Loop-Potenzial der konventionellen Decke von 72,2%.

Bei der recyclingorientierten Decke unterscheiden sich Loop- und Closed-Loop Potenzial nur in der Post-Use-Phase. Da in der Pre-Use-Phase keine weiterverwerteten Materialien eingesetzt werden, liegen Loop- und Closed-Loop-Potenzial gleich hoch bei 76,7%. Hier gehen die nachwachsenden Massivhölzer und Holzwerkstoffe (Korkpaneele) ein.

In der Post-Use-Phase überwiegt der Anteil weiterverwertbarer Materialien, die zusätzlich nachwachsen. Die Brettschichtholzbalken z.B. können zersägen und zu Spanplatten weiterverarbeitet werden. Da die Zeit, die ein Baum braucht, um nachzuwachsen, in etwa der Lebensdauer eines Bauwerks entspricht, wird der Kreislauf damit geschlossen. Durch die stoffliche Kaskadennutzung bleibt der Kohlenstoff im neuen Holzwerkstoff gespeichert und das Klima wird auf diese Weise im kleinen Maßstab geschützt.

In der Ökobilanz kann diese Kaskadennutzung leider nicht abgebildet werden. Wie die Grafik zum Treibhauspotenzial der recyclinggerechten Variante zeigt, wird in der Entsorgungsphase die energetische Verwertung des Holzes angesetzt, was zu hohen Emissionen führt. Die Brettschichtholzbalken geben bei der Verbrennung pro m² Deckenfläche knapp 50 kg CO₂-Äquivalente frei (hellgrüner Anteil im Modul D). Für die energetische Nutzung und die vermiedenen Emissionen aus fossilen Energieträgern erfolgt im Modul D eine Gutschrift von ca. 22 kg CO₂. Der Datensatz für Brettschichtholz in der Ökobaudat [176] enthält auch ein alternatives End-of-Life-Szenario mit stofflicher Verwertung. Danach würde im Modul D weniger als 1 kg CO₂ pro m² Deckenfläche gutgeschrieben. Dennoch muss in Modul C der Wert für die Verbrennung angesetzt werden, da davon ausgegangen wird, dass das Holz spätestens im nächsten Lebenszyklus verbrannt wird. Der Ansatz dieses Szenarios liefert deshalb ein schlechteres Ergebnis, obwohl das CO₂ länger gespeichert wird.

Dach

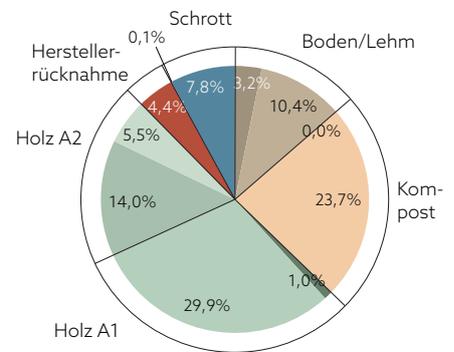
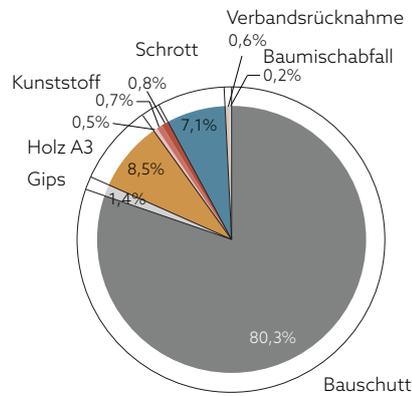
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

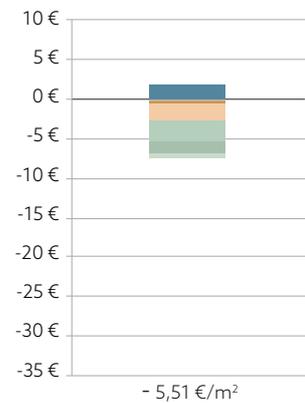
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]	[kg/m ²]	
Terrassendielen, Holz-PVC-Komposit, 26 mm, inkl. Unterkonstruktion	56,1	Terrassenholz, Robinie, 30/50 + 40/90 mm	25,3
Stelzlager, PVC	3,0	Stahlprofile 100/55/4,1 mm	6,6
Abdichtung, PVC 1,5 mm	3,88	Dachabdichtung, pflanzliche Basis, 3 mm	3,7
Gefälledämmung, EPS, im Mittel 200 mm	4,5	Holzfaserdämmung, 180 + 70-140 mm	40,0
Dampfsperre, Bitumenbahn mit Aluminiumeinlage, 5 mm	5,2	Dampfsperre, Aluminium, 0,05 mm	0,1
Deckenplatte, Beton, 220 mm	528,0	OSB/3-Platte, 15 mm	9,3
Deckenplatte, Bewehrungsstahl	46,6	Brettschichtholz, Fichte, 120/260 mm	23,7
Gipsputz, 10mm	9,0	Lattung, Fichte, 40/60 mm	1,7
Dispersionsfarbe	1,3	Lehmbauplatte, 25 mm	17,5
		Flachsgewebe	0,1
		Lehmputz, 3 mm	5,4
	657,6		133,4

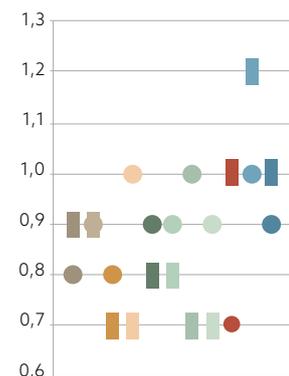
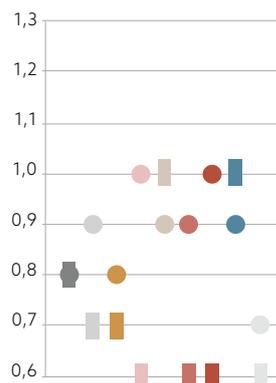
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



8.1.4. Vergleichsanalyse Dach

Das Dach des Modellprojekts 1 ist ein Flachdach mit Dachterrasse. Bei der konventionellen Variante bestehen die Terrassendielen aus Holz-Kunststoff-Komposit (Wood Plastic Compounds – WPC). Das Kompositmaterial ist gemäß Verbands-EPD [177] zwar im selben Produktkreislauf recyclingfähig, aber da keine Rücknahmesysteme bestehen (und auch nicht absehbar sind), muss davon ausgegangen werden, dass es am Ende der Nutzungsdauer energetisch verwertet wird. WPC mit PVC-Anteil ist zudem in die Altholzkategorie A III einzustufen (wegen halogenorganischer Verbindungen im PVC-Anteil) und kann somit auch nicht von der Holzwerkstoffindustrie stofflich weiterverwertet werden (vgl. Kapitel 3, Abb. A 3.5). Der Belag der recyclinggerechten Variante soll aus massivem Robinienholz hergestellt werden.

Die Abdichtung des konventionellen Dachaufbaus besteht aus einer herkömmlichen PVC-Folie. Für saubere Kunststoffabdichtungen existiert in Europa das Rücknahmesystem „Roofcollect“. Wenn die PVC-Folie vlieskaschiert ist (was hier unterstellt wird), kann sie trotz vollflächiger Verklebung nach den ausgewerteten Untersuchungen von Graubner et al. (siehe Anlage 2) rückstandsfrei und mit geringem Aufwand entfernt werden. Deshalb wird die Bahn den wiederverwertbaren Wertstoffen zugeordnet.⁶¹

Für die recyclingfähige Konstruktion wurde eine innovative Abdichtungsbahn eines belgischen Herstellers gewählt, die bis zu 60% aus Pflanzenölen und Kiefernharzen (Reststoffe der Biopolymerherstellung und der Papierindustrie) besteht. Weitere Inhaltsstoffe sind Styrol-Butadien-Styrol (SBS), mineralische Füllstoffe, ein Polyester-/Glasvlies sowie eine weiße Acrylatbeschichtung auf der Oberfläche. Die Cradle-to-Cradle-zertifizierte Abdichtung wurde in einem Versuchsstand untersucht (siehe Kapitel 6.2, Seite 124). Laut Verarbeitungsrichtlinien des Herstellers muss sie vollflächig mit dem Untergrund verklebt werden. Eine mechanische Befestigung (wie in dieser Studie angenommen) liegt damit in der Verantwortung des Planers. Nach Herstellerangaben ist die Bahn recyclingfähig. Für Bitumenbahnen hat der Hersteller bereits (in Belgien) ein Rückholssystem aufgebaut. Das neue Produkt fällt noch nicht zum Rückbau an. Es wird angenommen, dass sich das Rückholssystem bei Verbreitung des Produkts ausweitet.

Die Terrassenbeläge und Abdichtungen müssen voraussichtlich einmal im Gebäudelebenszyklus ausgetauscht werden, somit gehen die Materialien doppelt in die Massenberechnungen ein.

Betrachtet man die Entsorgungskosten, schlagen bei der konventionellen Dachkonstruktion nicht nur die großen Betonmassen zu Buche, sondern auch die hohen Kosten für die EPS-Dämmung. Die WPC-Terrassendielen, die als Altholz A3 entsorgt werden müssen, wurden defensiv mit dem

⁶¹ PVC-Abdichtungen sind zwar recyclingfähig, aber aus anderen Gründen nicht empfehlenswert: Bei der Herstellung von PVC entstehen giftige Emissionen, während der Nutzung treten Weichmacher aus und im Brandfall emittieren giftige Gase. Diese Aspekte sind aber keine Kriterien des Urban Mining Index. Das Kriterium Schadstoffe wurde geprüft: Die Produkte gängiger Hersteller halten die Kriterien auf Seite 325, Abb. A 5.3 ein. Es ist jedoch diskussionswürdig, ob PVC generell in die Liste der Schad- und Risikostoffe, die aus dem Kreislauf auszuschließen sind, aufgenommen werden sollte, wie es im Cradle-to-Cradle-System bereits der Fall ist. Hier von wurde zunächst abgesehen, da sich die Liste am Zertifizierungssystem der DGNB orientiert.

Legende Kreislaufpotenziale

Pre-Use

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

Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (d_{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)

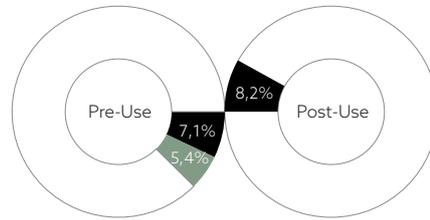
Konventionelle Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Holz-PVC-Dielen + UK	56,1	RN0 63	en _f	en _f	
Stelzlager, PVC	3,0	RP	dc	en _f	
Abdichtung, PVC	3,88	PR	rc 60	en _f	
EPS-Dämmung	4,5	PR	en _f	en _f	
Bitumenbahn/Alueinl.	5,2	PR	en _f	en _f	
Deckenplatte, Beton	528,0	PR	dc	d	
Bewehrungsstahl	46,6	RC100	rc 100	rc	
Gipsputz	9,0	PR	rc 99	d	
Dispersionsfarbe	1,3	PR	en _f	en _f	
Gesamt	657,6				

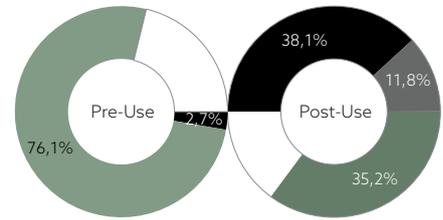
Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Robinienholz	25,3	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}	
Stahlprofile	6,6	RC35	rc100	rc	
Dachabdichtung	3,7	RN0 60	rc95	en _r	
Holzfaserdämmung	40,0	RN0 100	rc100c	en _r	
Dampfsperre, Alu	0,1	PR	rc100	rc	
OSB/3-Platte	9,3	RN45 44	dc _{cr}	en _{cr}	
Brettschichtholz	23,7	RN97 0	dc _{cr}	en _{cr}	
Lattung, Fichte	1,7	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}	
Lehmbauplatte	17,5	RN0 3	rc100	dc	
Flachsgewebe	0,1	RN0 100	rc100c	en _r	
Lehmputz	5,4	PR	rc100	dc	
Gesamt	133,4				

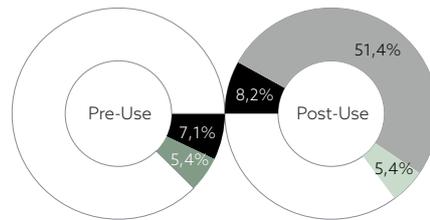
Kreislaufpotenziale



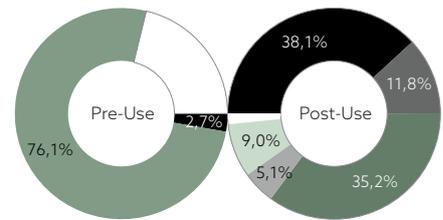
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	12,5%	8,2%	20,7%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	78,8%	85,1%	163,9%

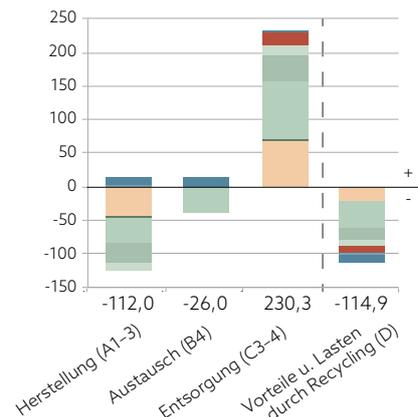
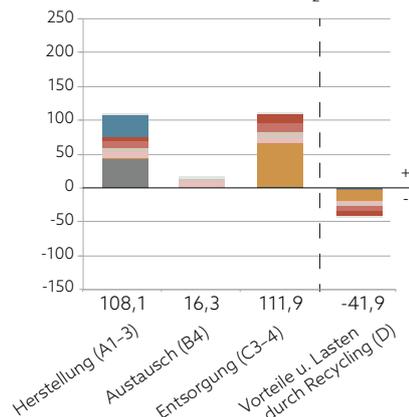


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	12,5%	65,0%	77,5%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	78,8%	99,2%	178,0%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



Preis für Altholz A2 kalkuliert, da für Altholz A3 kein Preis erhoben wurde. Nach den übermittelten Preislisten der Entsorger unterscheiden sich die Annahmepreise der beiden Kategorien jedoch in der Regel nicht. Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Konstruktion 0,7, für die recyclingorientierte 0,8. Der durchschnittliche Faktor Arbeit ist zwar nahezu gleich (0,87 zu 0,89), gewichtet man den Faktor jedoch nach Massen, liegen die Werte bei 0,81 für das konventionelle und 0,93 für das recyclingorientierte Dach. Auffällig ist der geringere Rückbauaufwand der verklebten PVC-Dachbahn (Faktor 1,0) gegenüber der mechanisch befestigten (0,7). In der Tat war der Aufwand für die Entfernung der mechanischen Befestigung (Tellerdübel) im Versuchsstand recht mühsam (s. Seite 124). Vorteilhafter wäre deshalb eine Befestigung mittels Auflast. Ob die Terrassendielen inkl. Unterkonstruktion hierfür ausreichen, müsste vom Tragwerksplaner berechnet werden.

Die Grafiken der Kreislaufpotenziale zeigen ein ähnliches Bild wie die der übrigen Bauteile. Bei der konventionellen Konstruktion macht sich Pre-Use der Holzanteil in den WPC-Terrassendielen als nachgewachsener Rohstoff und die Bewehrung aus Sekundärstahl⁶² bemerkbar. Post-Use zeigt sich wieder ein hoher Anteil weiterverwertbarer Wertstoffe (51,4%), was auf die Beton-Dachdecke zurückzuführen ist.

Im Gegensatz dazu zeichnet sich die recyclingorientierte Dachkonstruktion durch ein hohes Closed-Loop-Potenzial aus. Sie enthält Pre-Use nicht nur einen hohen Anteil (76,1%) nachwachsende Rohstoffe; auch Post-Use fließen voraussichtlich ca. 38% der Wertstoffe in den geschlossenen Kreislauf zurück. Den größten Anteil hieran haben die Stahlprofile, die kompostierbare (borat- und leimfreie) Holzfaserdämmung sowie die Lehmbaustoffe. Die PVC-Abdichtung trägt bei der konventionellen Konstruktion mit 0,2% zum CLP bei, während die innovative Abdichtung mit 3,2% in das CLP eingeht. Dies liegt jedoch nicht nur am Material-Loop-Potenzial, das für die PVC-Bahn mit 60%⁶³ angenommen wurde, während bei der innovativen Dachbahn lt. Atlas Recycling 95% angesetzt wurden, sondern auch an der Massengewichtung in der Gesamtkonstruktion.

Für das Terrassenholz wurde aufgrund der Bewitterung nur eine energetische Verwertbarkeit angenommen. Diese geht in das Closed-Loop-Potenzial ein, da angenommen wurde, dass das Holz aus zertifizierter Forstwirtschaft stammt.

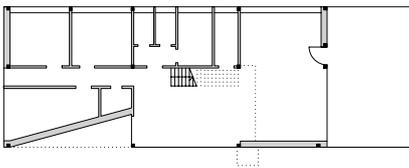
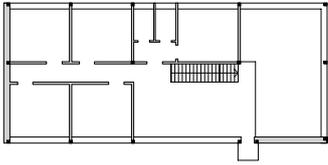
Im Vergleich des CO₂-Fußabdrucks fällt auf, dass die WPC-Terrassendielen im Gegensatz zu den Massivholzdielen im Herstellungsprozess kein negatives Treibhauspotenzial aufweisen. Lt. Verbands-EPD beträgt der Anteil biogenes CO₂ im Modul A1-3 zwar -21,08 kg/m²⁶⁴; dieser Vorteil wird jedoch durch die übrigen Inhaltsstoffe wieder wettgemacht.

62 Bewehrungsstähle bestehen vollständig aus recyceltem Stahl. Aus diesem Grund erfolgt bei der Bilanzierung des Treibhauspotenzials nach den Regeln der Ökobilanzierung auch keine Gutschrift für den nächsten Lebenszyklus.

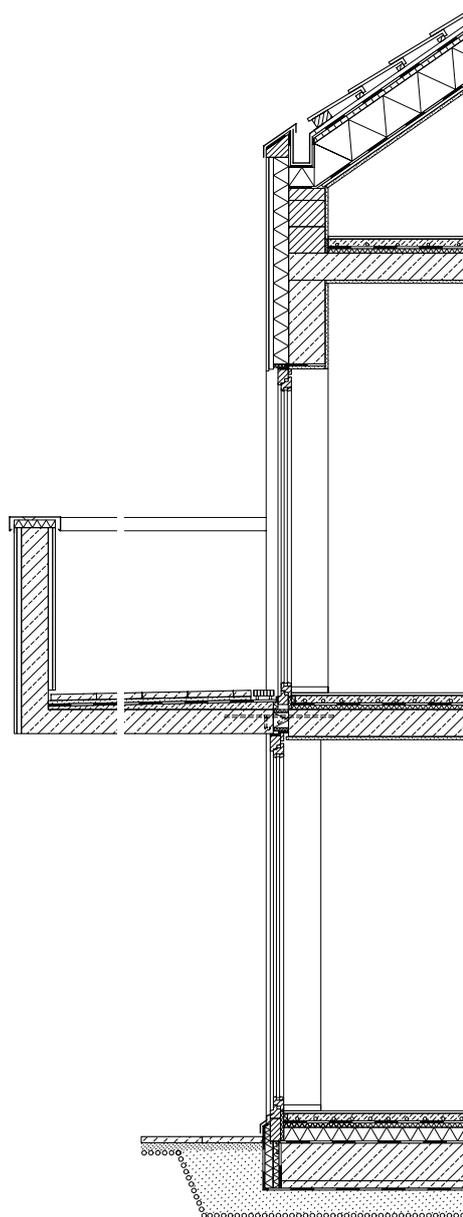
63 Lt. Wecobis [178] beträgt der Anteil an Weichmachern, die im Laufe der Zeit ausgasen, und des Trägermaterials, das stets erneuert werden muss, in PVC-Bahnen 39%.

64 Bezogen auf ein durchschnittliches Flächengewicht von 18,36 kg/m².

Gebäudetyp Bürogebäude
Geschosse 2 + Dachgeschoss
BGF 491 m²
BRI 1.842 m³



A 8.5



Konventionelle Konstruktion
 Kalksandsteinmauerwerk mit Fassade aus faserverstärkten Harzkompositplatten

Dach
 Dachsteine (Beton), Lattung, Konterlattung, Unterspannbahn (Kunststoffverbund), OSB-Platte, Dachsparren mit EPS-Zwischendämmung, OSB-Platte, Gipskartonplatten mit Dispersionsfarbe, Ringanker (Stahlbeton)

Decken
 Laminat geklebt, Zementheizestrich mit Kunststoffrohren in FBH-Trägerplatte mit aufkaschierter EPS-Trittschalldämmung, Trennlage (Kunststoffmixfolie), Stahlbetonplatte, Gipsputz, Raufasertapete mit Dispersionsfarbe

Außenwände
 faserverstärkte Harzkompositplatte, Unterkonstruktion (Aluminium), Winddichtung (Polyestervlies), Wärmedämmung (EPS), Mauerwerk (Kalksandstein), Gipsputz, Raufasertapete mit Dispersionsfarbe

Gründung/Bodenplatte
 Laminat geklebt, Zementheizestrich mit Kunststoffrohren in FBH-Trägerplatte mit aufkaschierter EPS-Trittschalldämmung, Wärmedämmung (PUR), Abdichtung (kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung mit Gewebeeinlage), Stahlbetonplatte, Sauberkeitsschicht (Magerbeton), Trennlage (Kunststoffmixfolie), Tragschicht aus Schläcken, Streifenfundamente aus Stahlbeton (in der Zeichnung nicht dargestellt, aber in der Berechnung enthalten)

A 8.6

8.2. Modellprojekt 2

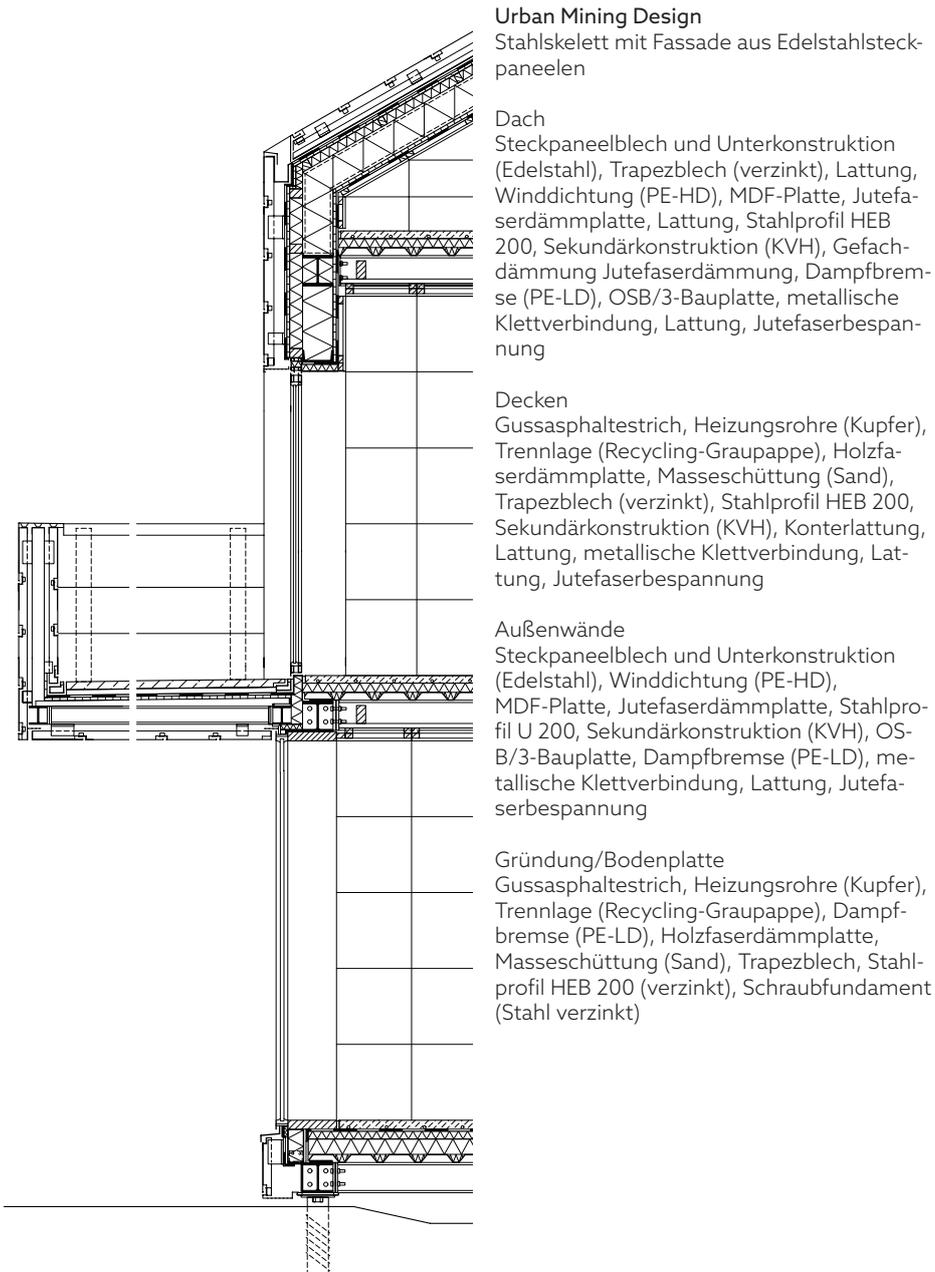
Im ersten Modellprojekt hat sich die recyclingorientierte Konstruktion in Holzbauweise gegenüber der konventionellen Massivbau-Variante sowohl hinsichtlich der Kreislaufpotenziale als auch hinsichtlich des CO₂-Fußabdrucks deutlich als vorteilhaft erwiesen. Im zweiten Variantenvergleich wird nun ein Modellprojekt mit dem Urban Mining Index untersucht, bei dem Riegler-Floors und Hillebrandt einer konventionellen Massivbaukonstruktion für ein Bürogebäude eine Konstruktion in Stahlbauweise gegenübergestellt haben.

Die Konstruktionsschnitte (Abb. A 8.6 und A 8.7) zeigen den Aufbau der wesentlichen Bauteile in Varianten. Das Tragwerk der konventionellen Variante besteht aus Kalksandsteinmauerwerk und Stahlbetondecken.

A 8.5 Entwurfskonzept Modellprojekt 2: Grundrisse EG und OG nach Riegler-Floors/Hillebrandt [179], Maßstab 1:1000

A 8.6 Konventionelle Konstruktion nach Riegler-Floors/Hillebrandt [179], Vertikalschnitt Maßstab 1:50

A 8.7 Urban Mining Design nach Hillebrandt/Riegler-Floors [179], Vertikalschnitt Maßstab 1:50



A 8.7

Bodenbeläge und Abdichtungen sind wie üblich verklebt.

Die recyclingorientierte Konstruktion wurde vollständig im Urban Mining Design geplant: Von den Fundamenten über das Tragwerk bis zur Hülle wurde das Closed-Loop-Material Stahl gewählt. Abklebungen wurden vermieden.

Mit dem zu erwartenden hohen Schrottwert erwies sich die „urbane Mine“ in der von Riegler-Floors und Hillebrandt durchgeführten Lebenszykluskostenanalyse als wahres Wertstofflager: Der Barwert über einen Lebenszyklus von 50 Jahren lag trotz 25% höherer Baukosten um 32% unter dem der konventionellen Konstruktion. Im Folgenden wird untersucht, ob sich die Vorteile des Urban Mining Designs mit dem Urban Mining Index bestätigen lassen.

Boden/Gründung

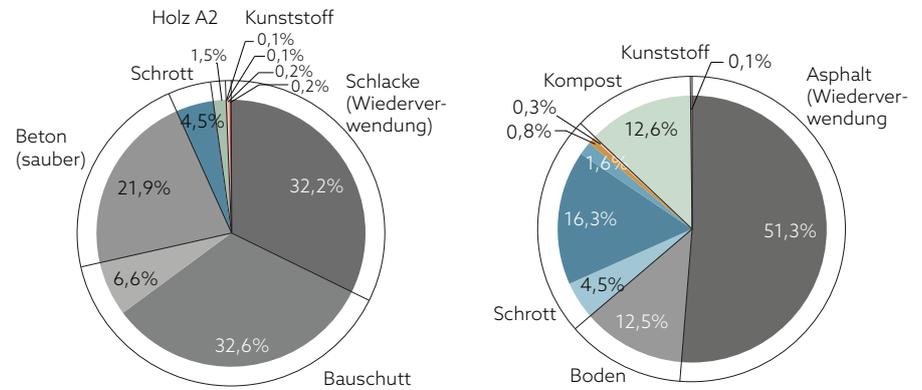
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

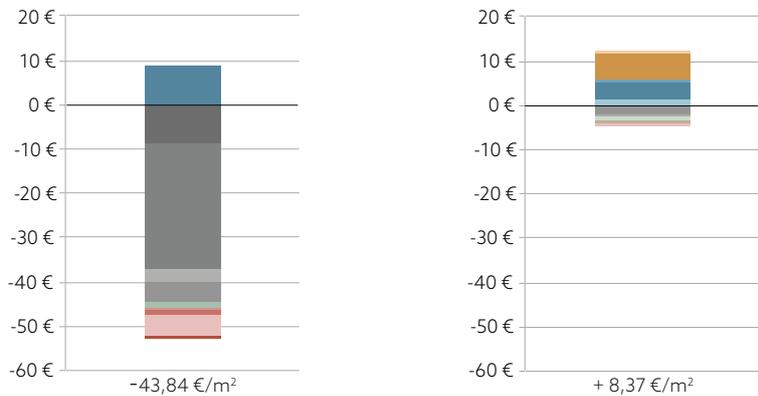
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]		[kg/m ²]
Laminat, 8 mm	22,2	Gussasphaltestrich, 50 mm	100,0
Zementestrich, 65 mm	97,5	Fußbodenheizrohre, Kupfer	1,5
Fußbodenheizrohre, PEX mit EPS-Trägerplatte	1,9	Heizrohrlamellen, Aluminium	0,5
Trennlagen PE-Folie	0,4	Graupappe, 0,34 mm	0,2
Trittschalldämmung EPS, 30 mm	0,8	Dampfbremse, PE-LD, 0,2 mm	0,2
Wärmedämmung PUR, 100 mm	3,3	Holzfaserdämmung, 60 mm + 100 mm	24,6
Abdichtung Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung, 4 mm	2,8	Masseschüttung Sand, in Sicken des Trapezblechs	24,3
Bodenplatte Beton, 200 mm	480,0	Trapezblech, Stahl verzinkt, 48,5/250 mm	8,8
Bodenplatte, Bewehrungsstahl	66,6	HEB-Profil, Stahl verzinkt, 200/200/9 mm	31,7
Fundamente/Sauberkeitsschicht, Beton	322,2	Schraubfundament, Stahl verzinkt, 1600 mm	3,1
KapillARBrechende Schlacken, 250 mm	475,0		
	1.473,0		194,9

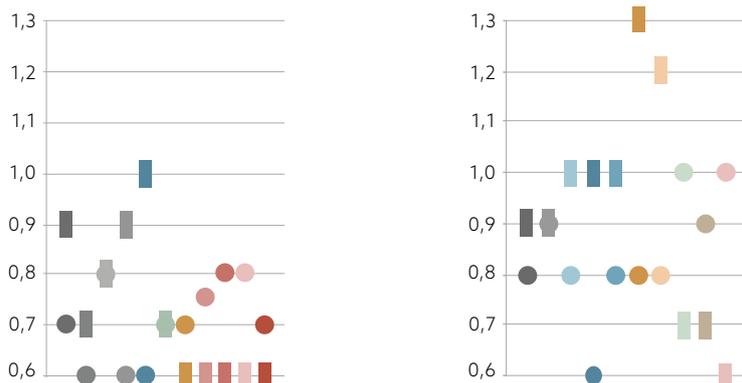
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



8.2.1. Vergleichsanalyse Boden/Gründung

Die Aufstellung der Materialien und Massen zeigt, dass es sich auch bei dem Modellprojekt 2 um den Vergleich einer schweren mit einer leichten Bauweise handelt. Der Boden und die Decke der recyclingorientierten Konstruktion sind durch den verwendeten Gussasphalt und die Sand-Masseschüttung in den Sicken der Trapezbleche jedoch schwerer als in der Leichtbauweise des Modellprojekts 1. Beide Materialien machen somit auch mehr als 60 Masse-% der anfallenden Wertstoffe aus.

Bei der konventionellen Gründung sind die im Lebenszyklus anfallenden Wertstoffe größtenteils mineralischen Ursprungs, wobei der Anteil gegenüber der leichten Bauweise noch wesentlich höher ist. Gleich große Anteile haben hier mit jeweils rund 32% die kapillARBrechenden Schlacken, die prinzipiell wiederverwendbar sind, sowie die Betonmassen der Bodenplatte. Letztere werden aufgrund zu erwartender Bitumenreste den mineralischen Gemischen mit starker Verschmutzung zugeordnet. Während eine Bahnenware (wie auf der konventionellen Gründung im Modellprojekt 1 verwendet) noch mit hohem Aufwand rückstandsfrei lösbar ist, sind bei einer kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtung Rückstände auf dem Beton zu erwarten⁶⁵. Deshalb wird eine Deponierung des Betons der Bodenplatte angenommen.

Bei der recyclingorientierten Gründung kann aufgrund der Aufständigung auf eine Abdichtung komplett verzichtet werden. Die ligningebundene Holzfaserdämmung⁶⁶ kann im Rückbaufall kompostiert werden. Der Gussasphaltestrich ist komplett aus nicht erneuerbarem Primärmaterial, birgt aber einen wahren Schatz: Die Heizrohre aus Kupfer haben zwar nur einen relativ geringen Anteil an der Masse des Bauteils, ihr Schrottwert ist jedoch äußerst hoch. Der selektive Rückbau des Estrichs lohnt sich somit alleine aufgrund seines „inneren“ Werts. Beim Einschmelzen des Asphalts lässt sich der Kupferschrott leicht trennen und dem Recycling zuführen, während der Estrich selbst wieder ausgegossen werden kann.

Mit den verwendeten Wertstoffen der recyclingorientierten Gründung kann am Ende der Nutzungsdauer insgesamt ein Erlös von mehr als 8 € pro m² erzielt werden, während die großen Massen verschmutzten Betons bei der konventionellen Konstruktion zu sehr hohen Entsorgungskosten (ca. 44€/m²) führen. Da für die Annahme gebrauchter Schlacke kein Preis vorliegt, wurde hier ersatzweise der Preis für sortenreinen Sand angenommen.

Die großen Unterschiede im Wert der Materialien lassen sich auch an den entsprechenden Faktoren in den nebenstehenden Grafiken ablesen. Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Gründung 0,73 und für die recyclingorientierte 0,93.

Auch beim Faktor Arbeit sind deutliche Unterschiede zu erkennen: Während die Materialien bzw. Bauteilschichten bei der konventionellen Gründung zwischen 0,6 und 0,8 liegen, weisen diejenigen der recyclingorientierten Variante Arbeitsfaktoren zwischen 0,8 und 1,0 auf.

Eine Ausnahme bilden die HEB-Profile: Da sie der Witterung ausgesetzt

65 Analog der von Graubner et al. untersuchten Abdichtung aus Heißbitumen (siehe Anlage 2, Flachdach 05).

66 Udi Dämmsysteme GmbH, Chemnitz Deutschland, Produkt: Uditherm Sk.

Legende Kreislaufpotenziale

Pre-Use

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

Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc_{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)

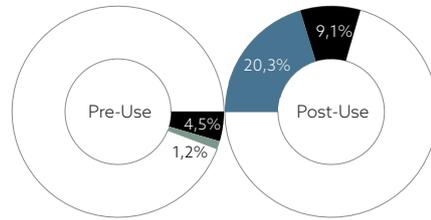
Konventionelle Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use		
				sd	ud
Laminat	22,2 RN	0	79,7	dc	en _r
Zementestrich	97,5 PR			dc	d
PEX-Heizrohre/EPS	1,9 PR			en _f	en _f
Trennlagen PE-Folie	0,4 PR			en _f	en _f
EPS-Dämmung	0,8 PR			en _f	en _f
PUR-Dämmung	3,3 PR			en _f	en _f
Bitumenabdichtung	2,8 PR			en _f	en _f
Bodenplatte Beton	480,0 PR			d	d
Bewehrungsstahl	66,6 RC	100		rc	rc
Betonfundamente u. Sauberkeitsschicht	322,2 PR			rc	39 dc
Schlacken	950,0 PR			ru	dc
		1.947,7			

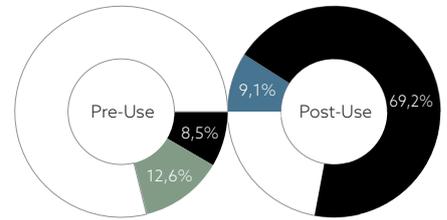
Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use		
				sd	ud
Gussasphaltestrich	100,0 RP			rc	100 dc
Kupfer-Heizrohre	1,5 RC	65		rc	100 rc
Aluminium-Lamellen	0,5 RC	50		rc	98 rc
Graupappe	0,2 DC	100		dc	en _r
Dampfbremse, PE-LD	0,2 PR			en _f	en _f
Holzfaserdämmung	24,6 RN	0	100	rc	100c en _r
Masseschüttung Sand	24,3 PR			ru	dc
Trapezblech, Stahl	8,8 RC	35		rc	100 rc
HEB-Stahlprofil	31,7 RC	35		rc	100 rc
Schraubfundamente					
Stahl, verzinkt	3,1 RC	35		rc	100 rc
		194,9			

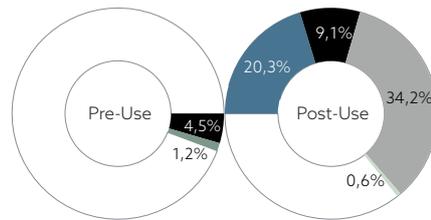
Kreislaufpotenziale



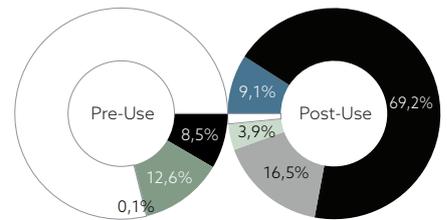
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,7%	29,41%	35,2%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	21,1%	78,3%	99,4%

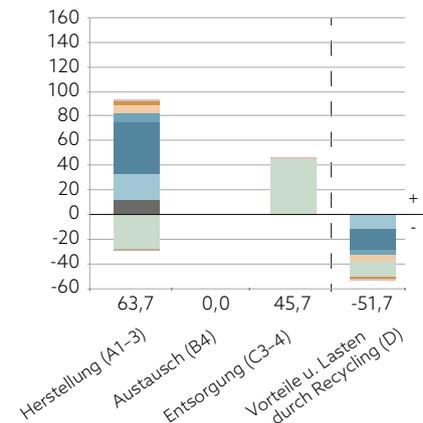
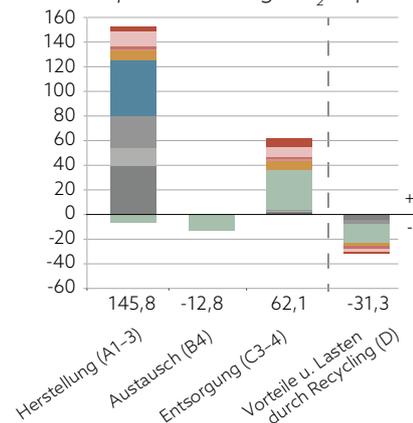


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	5,7%	64,2%	69,9%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	21,2%	98,7%	119,9%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



sind, ist davon auszugehen, dass die Schrauben nicht lösbar sind und die Profile deshalb entweder thermisch oder mittels Scherschneiden getrennt werden müssen. Bei den Metallen mindert der Faktor Arbeit für den selektiven Rückbau allerdings nicht deren Kreislaufpotenzial: Da Metalle nicht nur im selektiven Rückbau, sondern auch im derzeit üblichen selektiven Abbruch recycelt werden, wird das Material in beiden Szenarien (sd und ud) dem Recycling zugeordnet.

Die Ergebnisse der Kreislaufpotenziale bestätigen das Urban Mining Design: Pre-Use ist der Anteil recycelter und nachwachsender Rohstoffe zwar gering, da die großen Massen an Gussasphaltestrich und Sand aus primären Rohstoffquellen stammen; dafür können diese Post-Use jedoch im geschlossenen Kreislauf geführt werden. Der Sand ist direkt wiederverwendbar, der Estrich wiederverwertbar. Geringe Teile der beiden Materialien gehen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus in das Loop-Potenzial ein, da im üblichen EoL-Szenario von einer Weiterverwertung (z.B. im Straßenbau) ausgegangen wird. Die Stahlbauteile fließen mit einem Sekundärrohstoffanteil von 35% in die Pre-Use-Phase des Closed-Loop-Potenzials ein und zu 100% in die Post-Use-Phase. Insgesamt beträgt das Closed-Loop-Potenzial der recyclingorientierten Gründung 99,4%, das Loop-Potenzial ca. 120%. Dagegen weist die konventionelle (massive) Gründung mit 35,2% ein relativ geringes Potenzial zur Generierung geschlossener Kreisläufe auf. Es werden fast nur primäre Rohstoffe und Nebenprodukte aus der Stahlindustrie (Schlacken) eingesetzt. Letztere können (ggf. nach Aufbereitung) wiederverwendet werden und gehen deshalb unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert zu 63% in das Closed-Loop-Potenzial ein. Dagegen fließen 79% des Fundament- und Magerbetons aufgrund des geringen MLP und des hohen Rückbauaufwands nur in die Weiterverwertung (Downcycling), ebenso wie 65% des Zementestrichs, sodass das Loop-Potenzial insgesamt 69,9% beträgt. 36% des mit Kleberresten verunreinigten Zementestrichs werden aufgrund der (Un-)Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus einer Deponierung zugeordnet. Die stark verschmutzte Bodenplatte wird komplett der Deponierung zugeordnet.

Beim Blick auf die Treibhauspotenziale fällt auf, dass die verwendeten Metalle in der Herstellung hohe klimaschädliche Emissionen verursachen. So entsteht bei der Reduktion von Eisenerz, das vor allem aus Eisendioxiden besteht, im Hochofen unter Zusatz von Koks Roheisen und Kohlendioxid. Für das Recycling von Primärstahl werden in der Ökobilanz Gutschriften in den nächsten Lebenszyklus exportiert. Die Konstruktionsstähle der recyclingorientierten Variante mit einem Primärstahlanteil von 65% erhalten deshalb eine Gutschrift im Modul D. Für die Bewehrungsstähle der konventionellen Konstruktion hingegen erfolgt keine Gutschrift, da diese bereits aus 100% Sekundärstahl bestehen. Lässt man die Gutschriften außen vor, verursacht die konventionelle Gründung insgesamt immer noch das 1,8-Fache an Treibhausgasen der Urban-Mining-Design-Variante. Dies liegt hauptsächlich am hohen Treibhauspotenzial des Zements in den großen Betonmassen.

Außenwand

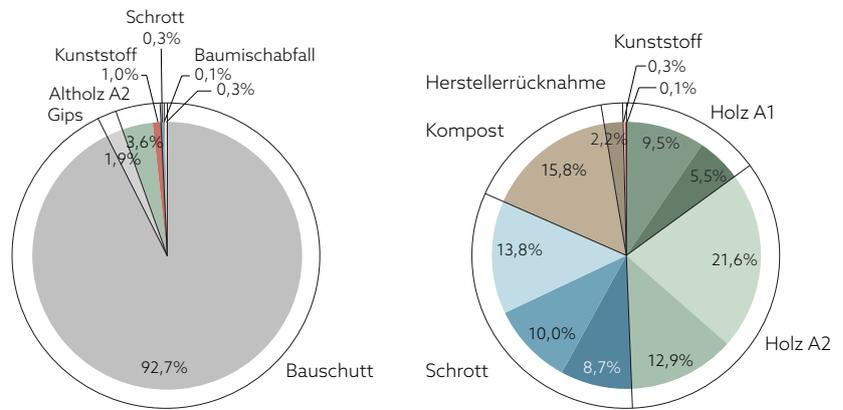
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

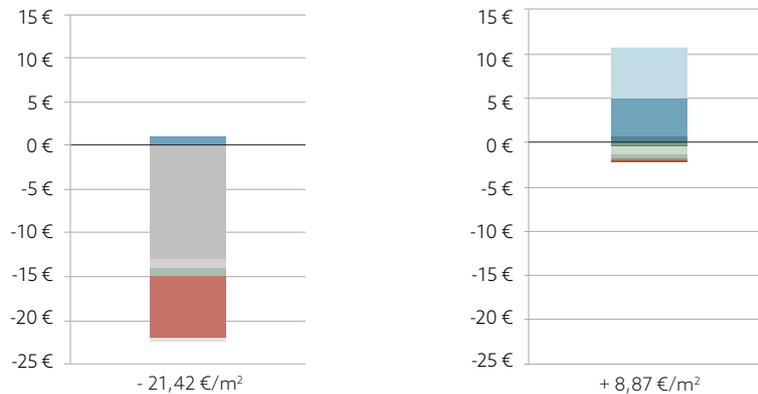
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]		[kg/m ²]
Faserverstärkte Harzkompositplatte, 6mm	16,8	Steckpaneelblech, Edelstahl, 1 mm	8,6
Unterkonstruktion Aluminium	1,4	U-Profile, Edelstahl, 2-3 mm	6,3
Winddichtung, Polyestervlies	0,1	Winddichtung PE-HD, 0,2 mm	0,1
Wärmedämmung EPS, 180 mm	9,3	MDF-Platte, 15 mm	8,1
Mauerwerk Kalksandstein mit Dünnbettmörtel, 240 mm	432,0	Konstruktionsholz/Lattungen, Fichte, 60/85 + 30/50 mm	3,5
Gipsputz, 10 mm	9,0	Jutefaserdämmung, 85 + 200 mm	10,0
Raufasertapete	0,7	U-Profil, Stahl verzinkt 200/75/8,5 mm	5,5
Dispersionsfarbe	1,3	Holzständer KVH Fichte, 120/200 mm	6,0
	470,6	OSB/3-Platte, 22 mm	13,6
		Dampfbremse, PE-LD 0,2 mm	0,2
		Wandbespannung, Jute recycelt, 2 mm	0,3
			62,2

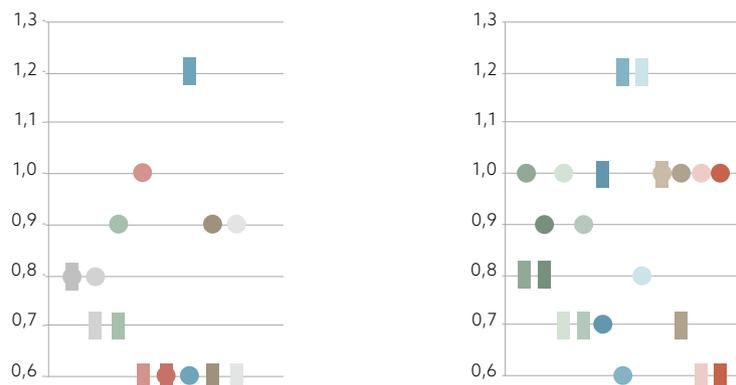
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



8.2.2. Vergleichsanalyse Außenwand

Die tragende Außenwand der konventionellen Konstruktion wird aus Kalksandsteinmauerwerk erstellt und macht im Rückbaufall mehr als 90% der anfallenden Wertstoffe aus. Das Mauerwerk wird innen mit Gips verputzt und somit verunreinigt. Die beiden Materialien können im Rückbaufall nur getrennt verwertet werden, da Gips sulfathaltig ist und nicht mit anderen mineralischen Materialien vermischt werden darf (s. Punkt 8.1.3). Die faserverstärkten Harzkompositplatten für die Fassadenbekleidung bestehen zu ca. 70% aus Nadelholzfasern, die ähnlich wie HPL-Platten mit Phenolharzen unter hohem Druck und Temperatur verpresst werden [180]. Nach aktueller Altholzverordnung zählen gebrauchte Verbundstoffe mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent) zum Gebrauchtholz und können in die Altholzkategorie A2 eingestuft werden, sofern sie keine halogenorganischen Verbindungen (in der Beschichtung) enthalten. Die stoffliche Verwertbarkeit erscheint zwar fragwürdig, lässt sich aber eventuell darauf zurückführen, dass die Platten mit anderen (weniger fremdstoffhaltigen) Holzwerkstoffen vermischt werden.

In der Außenwand der recyclingorientierten Variante besteht ca. ein Drittel der Materialien, gemessen an ihrem Gewicht, aus Stahl und Edelstahl. Der überwiegende Teil der Wertstoffe basiert jedoch auf nachwachsenden Rohstoffen. Die Jutefaserdämmung besteht zu 88% aus den weiterverwerteten Fasern gebrauchter Kaffeesäcke. Der Dämmstoff wird laut Hillebrandt/Seggewies [180] vom Hersteller zurückgenommen, wieder zerfasert und zu neuen Dämmmatten verarbeitet.

Die Eisenmetalle der recyclingorientierten Außenwand weisen am Ende der Nutzungsdauer der Bauteile einen hohen Schrottwert auf. Dementsprechend hoch sind die zu erzielenden Erlöse. Die konventionelle Außenwand führt dagegen zu relativ hohen Entsorgungskosten. Diese sind zum Großteil auf das verunreinigte Kalksandsteinmauerwerk (zu erwartende Restanhaftungen von Gips) und die teuer zu entsorgende EPS-Dämmung zurückzuführen.

Die unterschiedliche Werthaltigkeit ist am Faktor Wert ablesbar: Während die konventionelle Außenwand einen durchschnittlichen Faktor von 0,71 aufweist, kommt die recyclingorientierte Variante auf 0,85.

Beim Rückbauaufwand ist die Differenz leicht geringer: Die konventionelle Außenwand hat einen durchschnittlichen Faktor Arbeit von 0,81 und die Variante im Urban Mining Design von 0,91. Das Kalksandsteinmauerwerk wäre im Vergleich zu anderen tragenden Konstruktionen eigentlich mit geringem Aufwand rückbaubar, wenn es materialhomogen verputzt oder monolithisch verbaut würde (Faktor 0,9). Da aber der Gipsputz vor dem Abbruch entfernt werden muss, wird der Rückbauaufwand für Mauerwerk und Gipsputz zusammen um eine Stufe höher eingeschätzt (Faktor 0,8).

Der Rückbauaufwand der verklebten Harzkompositplatten lehnt sich an die Ergebnisse der Rückbauversuche mit verklebten Eternitplatten an (s. Kapitel 6.2, Seite 118) und wird als gering eingeschätzt (Faktor 0,9).

Die Holzbaustoffe und die innere Wandbekleidung der recyclingorientierten Außenwand sind mit geringem bis sehr geringem Aufwand rückbaubar. Die Bewertung des Rückbaus der U-Profile (Querschnittfläche 32,2 cm²) orientiert sich an den Auswertungen für Stahlbauteile (s. Kapitel 6, Abb. A 6.59 und Bauteile Nr. 343.03 und 351.04 im Bauteilkatalog).

Legende Kreislaufpotenziale

Pre-Use

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

Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (d_{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)

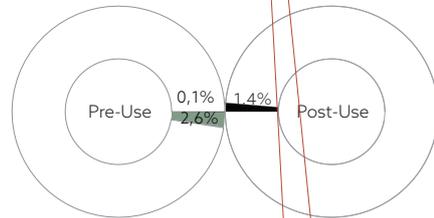
Konventionelle Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Faserverstärkte					
Harzkompositplatte	16,8	RN0 70	en _r	en _r	
U-Konstruktion, Alu	1,4	RC 50	rc 98	rc	
Winddichtung, PE	0,1	PR	en _f	en _f	
Dämmung, EPS	9,3	PR	en _f	en _f	
Kalksandstein mit Dünnbettmörtel	432,0	PR	dc	d	
Gipsputz	9,0	PR	rc 99	d	
Raufasertapete	0,7	DC 70 + RN27,5	en _{cr}	en _{cr}	
Dispersionsfarbe	1,3		en _f	en _f	
Gesamt	470,6				

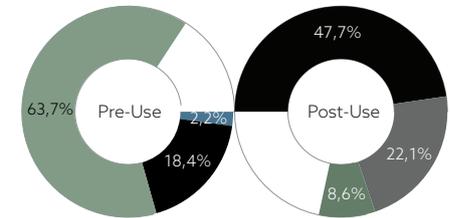
Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Edelstahlblech	8,6	RC 65,2	rc 100	rc	
U-Profile, Edelstahl	6,3	RC 65,2	rc 100	rc	
Winddichtung, PE-HD	0,1	PR	en _f	en _f	
MDF-Platte	8,1	RN 47 47	d _{cr}	en _{cr}	
K-Holz/Lattungen	3,5	RN 100 0	d _{cr}	en _{cr}	
Jutfaserdämmung	10,0	DC 88+ RN 0 97	rc 88	en _r	
U-Profil, Stahl verzinkt	5,5	RC 35	rc 100	rc	
Holzständer KVH	6,0	RN 100 0	d _{cr}	en _{cr}	
OSB/3-Platte	13,6	RN 45 44	d _{cr}	en _{cr}	
Dampfbremse, PE-LD	0,2	PR	en _f	en _f	
Jutebespannung	0,3	RU 100+ RN 100	rc 100c	en _r	
Gesamt	62,2				

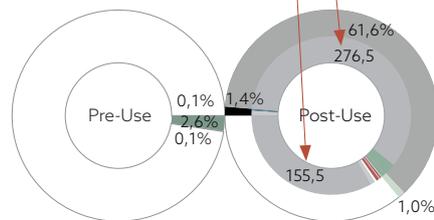
Kreislaufpotenziale



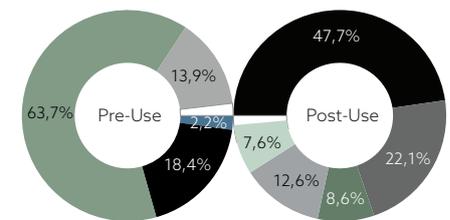
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	2,7%	1,4%	4,1%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	84,3%	78,4%	162,7%



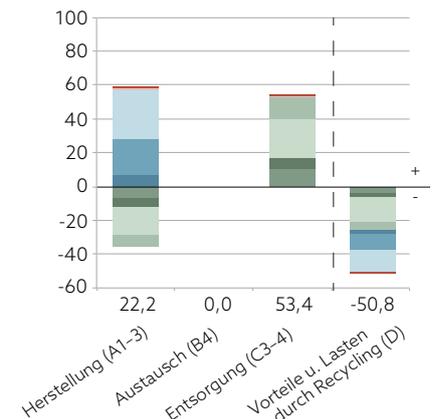
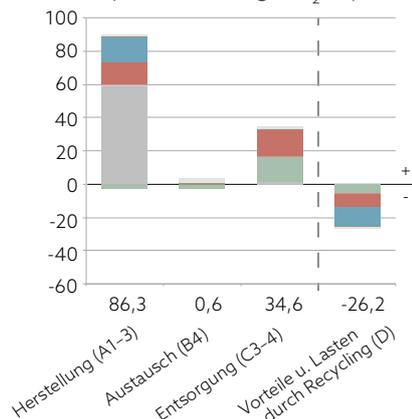
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	2,8%	64,0%	66,8%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	98,2%	98,6%	196,8%

Hinweis: Das Treibhauspotenzial wird in allen Berechnungen in dieser Arbeit nach DIN EN 15978 ermittelt. Für die Vorteile und Lasten außerhalb des Lebenszyklus (Modul D) werden die in der Okobau.dat oder in Umweltproduktdeklarationen (EPD's) der Hersteller ausgewiesenen Daten herangezogen, und zwar unabhängig von den EoL-Szenarien, die in der Berechnung der Kreislaufpotenziale ausgewiesen werden. Grund ist, dass die Vorteile und Lasten durch Recycling in der Okobaudat und den EPD's auf statistischen Verwertungsquoten beruhen und für die meisten Materialien und Produkte noch keine Daten für verschiedene EoL-Szenarien vorliegen. Der voraussichtliche Verwertungsweg in Abhängigkeit der Einbausituation kann in der Okobaudat und in EPD's nicht berücksichtigt werden. Dies hat zur Folge, dass z.B. für Holz und Holzwerkstoffe in den Modulen C und D immer die energetische Verwertung kalkuliert wird.

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



Hinsichtlich der Kreislaufpotenziale weisen die Varianten – wie zu erwarten war – große Unterschiede auf. Die konventionelle Außenwand verfügt über so gut wie kein Closed-Loop-Potenzial. Lediglich die Alu-Unterkonstruktion und rund die Hälfte des Gipsputzes wird den wiederverwertbaren Wertstoffen zugeschrieben. 64% des Kalksandsteinmauerwerks werden unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert (je 0,8) dem Loop-Potenzial zugewiesen. Für 36% wird aufgrund der Unwirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus eine Entsorgung auf der Deponie angesetzt (siehe Kennzeichnung in nebenstehender Grafik).

Die Außenwand im Urban Mining Design verfügt dagegen über ein Closed-Loop-Potenzial von insgesamt 162,7%. Pre-Use fließen die geplanten Edelstahlbleche mit einem Sekundärstahlanteil von 65,2%⁶⁷ sowie die nachgewachsenen Rohstoffe ein. Die im Lebenszyklus dreimal zu erneuernde Wandbespannung aus Jute und die Jutefaserdämmung gehen bereits aus einer Kaskadennutzung hervor und wirken sich deshalb mehrfach im Kreislaufpotenzial Pre-Use aus (s. Kapitel 7, Seite 177). Beide gehen mit ihrem Anteil nachwachsender Rohstoffe in das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use ein. Zusätzlich geht die aus gebrauchten Kaffeesäcken gefertigte Wandbespannung (siehe Atlas Recycling [183]) als Wiederverwendung in das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use ein, während die weiterverwerteten Fasern der Jutedämmung zusätzlich im Loop-Potenzial Pre-Use ausgewiesen werden.

Post-Use ist fast die Hälfte der Materialien wiederverwertbar. Hier zeichnen sich vor allem die verwendeten Metalle aus, die ohne Qualitätsverlust quasi endlos recycelt werden können. Aufgrund des etablierten Herstellerrücknahme- und Aufbereitungsverfahrens fließt die Jutefaserdämmung in die wiederverwertbaren Materialien ein. Der Dämmstoff könnte auch kompostiert werden, da die Stützfasern aus PLA (Polyacid = Polymilchsäure) bestehen und damit biologisch abbaubar sind. Auch die massiven Hölzer der Sekundärkonstruktion, von denen angenommen wird, dass sie aus zertifizierter Forstwirtschaft stammen und somit nachhaltig nachwachsen, sowie die Anteile zertifizierter Holzwerkstoffe fließen in das Closed-Loop-Potenzial Post-Use ein. Nur die nicht zertifizierten Anteile der Holzwerkstoffe werden im hochwertigen EoL-Szenario den weiterverwertbaren und im üblichen EoL-Szenario den energetisch verwertbaren Wertstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen zugeordnet und gehen somit ins Loop-Potenzial ein.

An den Grafiken der Treibhauspotenziale lässt sich erkennen, dass die konventionelle Außenwand im Herstellungsprozess nahezu viermal höhere Emissionen verursacht als die Urban-Mining-Design-Variante. Letztere emittiert zwar in der Entsorgungsphase durch die energetische Verwertung der Hölzer und Holzwerkstoffe mehr Treibhausgase, allerdings werden diese in der Herstellungsphase der Atmosphäre entzogen. Aufgrund des erforderlichen Austausches wurden die äußere und die inneren Bekleidungen der konventionellen Variante mehrfach bilanziert. Für den Dämmstoff und die Wandbespannung der recyclinggerechten Konstruktion liegen keine Ökobilanzdaten vor. Ersatzdaten (z. B. von Hanfdämmstoff) wurden absichtlich nicht angesetzt, da es sich um gebrauchte Jutefasern handelt, deren CO₂-Fußabdruck minimal sein dürfte.

⁶⁷ Der Sekundärrohstoffanteil bezieht sich auf herstellereinspezifische Daten [182].

Decke

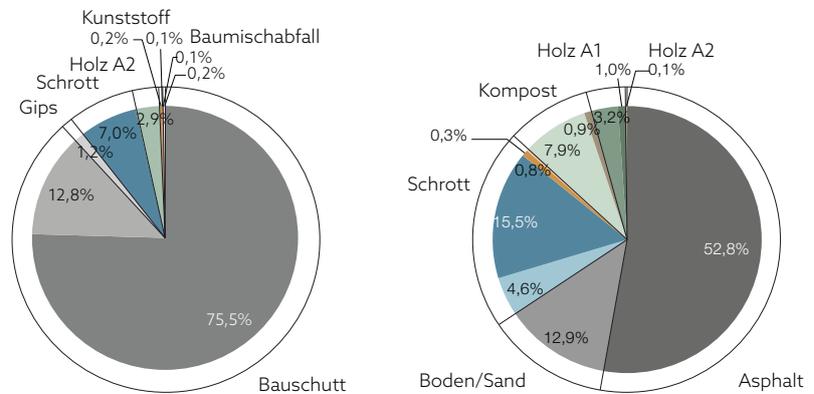
Konventionelle Konstruktion

Recyclingorientierte Konstruktion

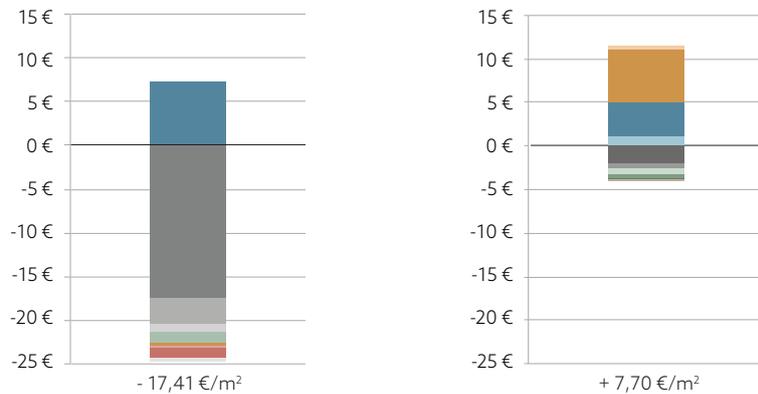
Materialien und Massen im Lebenszyklus

	[kg/m ²]		[kg/m ²]
Laminat, 8 mm	22,2	Gussasphaltestrich, 50 mm	100,0
Zementestrich, 65 mm	97,5	Fußbodenheizrohre, Kupfer	1,5
Fußbodenheizrohre, PEX mit EPS-Trägerplatte	1,9	Heizrohrlamellen, Aluminium	0,5
Trennlagen PE-Folie	0,2	Graupappe, 0,34 mm	0,2
Trittschalldämmung EPS, 30 mm	0,8	Trittschalldämmung Holzfaser, 60 mm	15,0
Deckenplatte Beton, 240 mm	576,0	Masseschüttung Sand, in Sicken des Trapezblechs	24,3
Deckenplatte, Bewehrungsstahl	53,8	Trapezblech, Stahl verzinkt, 48,5/250 mm	8,8
Gipsputz, 10 mm	9,0	HEB-Profil, Stahl verzinkt, 200/200/9 mm	29,4
Raufasertapete	0,7	KVH Fichte 120/200 mm	6,0
Dispersionsfarbe	1,3	Lattungen, Fichte, 30/50 mm	1,8
	763,3	Wandbespannung, Jute recycelt, 2 mm	1,7
			189,2

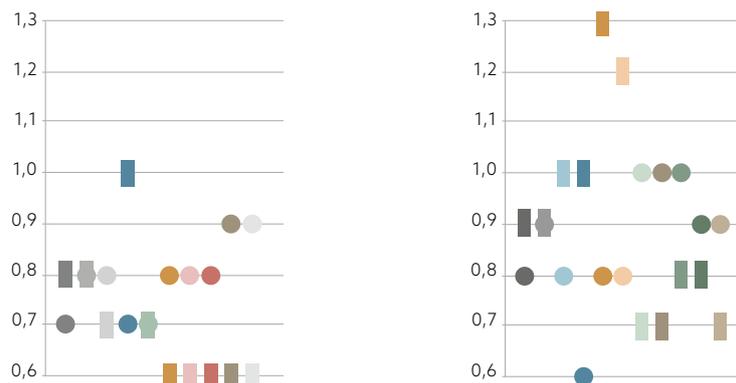
Wertstoffe - Anteile nach Massen in %



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



8.2.3. Vergleichsanalyse Decke

Die Massen der recyclingorientierten Decke machen insgesamt rund ein Viertel der konventionellen Decke aus. Bei dem untersuchten Modellprojekt handelt es sich um ein kleines Bürogebäude für einen einzelnen Nutzer. Es gibt deshalb keine fremden Arbeitsbereiche, gegen die ein besonderer Schallschutz einzuhalten wäre. Zur Schalldämmung werden die Sicken des Trapezblechs mit Sand gefüllt; dieser ist im Rückbaufall sehr leicht wieder zu entfernen. Außerdem dämpfen die Holzfaserdämmung und der Gussasphaltestrich den Trittschall. Gussasphalt weist aufgrund des Bitumenanteils eine gewisse Elastizität auf und verfügt damit – genau wie die Holzfaserdämmung – über eine relativ niedrige dynamische Steifigkeit. Beide federn damit den Trittschall besser ab als ein Zementestrich mit EPS-Dämmung. Die Holzfaserdämmplatten sind in einer Stärke bis 40 mm ohne Leimanteil erhältlich und können somit kompostiert werden. Um die hier geplante Stärke von 60 mm zu erhalten, werden drei Lagen à 20 mm übereinandergelegt. Auf einen Oberbodenbelag wird verzichtet; stattdessen wird der Gussasphalt als Sichtestrich nur geschliffen. Im Gegensatz dazu fällt der Laminatbelag der konventionellen Decke im angenommenen Lebenszyklus von 50 Jahren dreimal an.

In beiden Varianten sind die im Rückbaufall anfallenden Wertstoffe größtenteils mineralischen Ursprungs. Während der Gussasphalt und der Sand in der Urban-Mining-Design-Variante sortenrein rückbaubar sind, werden der Zementestrich und die Stahlbetondecke in der konventionellen Variante verunreinigt. Das verklebte Laminat hinterlässt Kleberreste auf dem Estrich, und der Gipsputz verunreinigt den Beton. Estrich und Beton werden deshalb den mineralischen Gemischen mit geringer Verschmutzung zugeordnet.

Die wertvollen Kupferheizrohre und die übrigen Metalle machen die Decke (ebenso wie die Gründung) zu einem wahren Wertstofflager. Am Ende der Nutzungsdauer kann so insgesamt ein Erlös von fast 8 € pro m² erzielt werden, während bei der konventionellen Konstruktion mit Entsorgungskosten gerechnet werden muss – vor allem aufgrund des verschmutzten Betons.

Der Wert der Materialien lässt sich auch an den entsprechenden Faktoren in den nebenstehenden Grafiken ablesen. Der durchschnittliche Faktor Wert beträgt für die konventionelle Decke 0,70 und für die recyclingorientierte 0,91.

Auch die Faktoren zum Rückbauaufwand liegen um durchschnittlich 0,1 Punkte auseinander. Die Bauteilschichten der kreislauforientierten Decke sind rückbaufreundlich geplant, was sich in einem durchschnittlichen Faktor Arbeit von 0,86 zeigt. Bei der konventionellen Konstruktion verursachen das Lösen des verklebten Laminats, das notwendige Abschlagen des Gipsputzes und der Abbruch der massiven, 24 cm starken Betondecke einen mittleren bis hohen Rückbauaufwand (Faktor Arbeit Ø0,79).

Die zuvor beschriebenen Parameter bewirken auch bei der Decke des Modellprojekts 2 wieder große Unterschiede in der quantitativen Bewertung der Kreislaufpotenziale: Die konventionelle Decke weist ein sehr

Legende Kreislaufpotenziale

Pre-Use

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

Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (dc_{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)

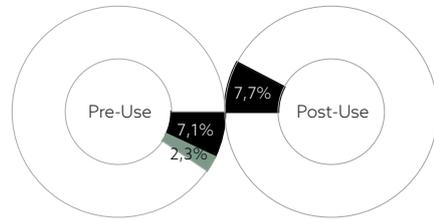
Konventionelle Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Laminat	22,2	RN0	79,7	dc	en _r
Zementestrich	97,5	PR		dc	d
PEX-Heizrohre/EPS		PR		en _f	en _f
Trennlagen PE-Folie	1,9	PR		en _f	en _f
EPS-Dämmung	0,2	PR		en _f	en _f
Deckenplatte Beton	0,8	PR		dc	d
Bewehrungsstahl	576,0	RC100	rc100	rc	rc
Gippsputz	53,8	PR	rc99	d	
Raufasertapete	9,0	DC70 +		en _f	en _r
Dispersionsfarbe	1,3	PR		en _f	en _f
Gesamt	763,3				

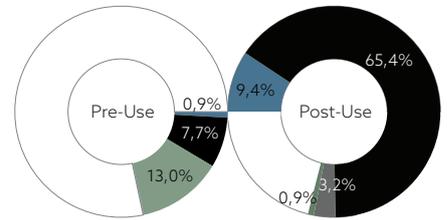
Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	sd	ud
Gussasphaltestrich	100,0	PR	rc100	dc	
Kupfer-Heizrohre	1,5	RC65	rc100	rc	
Alu-Lamellen	0,5	RC50	rc98	rc	
Graupappe	0,2	DC100	dc	en _r	
Holzfaserdämmung	15,0	RN0 100	rc100c	en _r	
Masseschüttung Sand	24,3	PR	ru	dc	
Trapezblech, Stahl	8,8	RC35	rc100	rc	
HEB-Stahlprofil	29,4	RC35	rc100	rc	
KVH, Fichte	6,0	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}	
Lattungen, Fichte	1,8	RN100 0	dc _{cr}	en _{cr}	
Jutebespannung	1,7	RU100+	rc100c	en _r	
Gesamt	189,2				

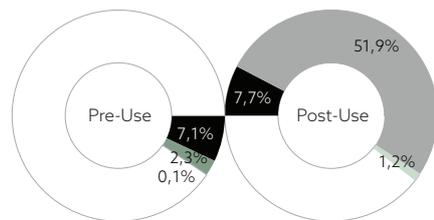
Kreislaufpotenziale



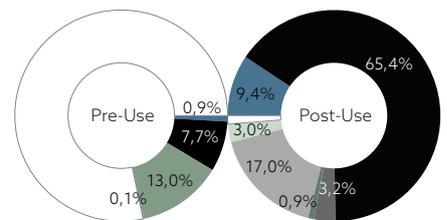
Closed-Loop-Potenzial 9,4% 7,7% 17,1%



Closed-Loop-Potenzial 21,6% 78,9% 100,5%

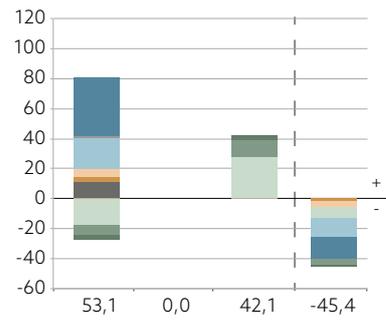
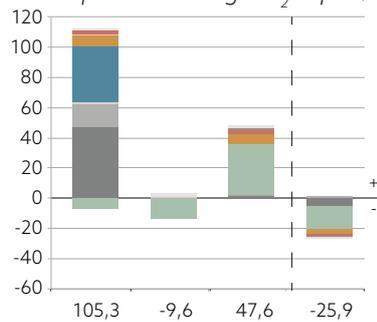


Loop-Potenzial 9,5% 60,8% 70,3%



Loop-Potenzial 21,7% 98,9% 120,6%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



Hinweis: Für den Gussasphaltestrich der recyclingorientierten Konstruktion liegen keine Ökobilanzdaten für ein hochwertiges Recycling vor, sodass hier nur die Bauschuttzubereitung im Modul C angesetzt werden kann. Die Gutschriften für ein Closed-Loop-Recycling würden sicherlich höher ausfallen.

geringes Closed-Loop-Potenzial von 17% auf. Im Gegensatz dazu kommt die Decke im Urban Mining Design auf ca. 100%. Hierzu tragen vor allem die großen Massen des recyclingfähigen Gussasphaltestrichs und die tragenden Stahlbauteile bei.

Allerdings zeigt sich am Beispiel der Decke eine Problematik, die auf die prozentuale Bewertungsmethodik zurückzuführen ist: Ein erforderlicher Austausch eines Baustoffs im Lebenszyklus kann sich positiv auswirken, wenn das Kreislaufpotenzial dieses Baustoffs hoch ist. Bei der konventionellen Decke weist der Laminatbelag ein materialspezifisches Closed-Loop-Potenzial von 79,9% auf, bedingt durch den Anteil nachwachsender Rohstoffe in gleicher Höhe. Im Gesamtergebnis trägt der Laminatbelag 2,3% zum Closed-Loop-Potenzial bei. Da es sich innerhalb der konventionellen Decke um einen der wenigen Baustoffe handelt, die überhaupt ein Closed-Loop-Potenzial aufweisen, wirkt sich der erforderliche zweimalige Austausch im Lebenszyklus positiv auf das Ergebnis aus: Ohne Austausch würde das CLP der Gesamtkonstruktion Pre-Use statt 9,4% nur 8,0% betragen (da ca. zwei Drittel des o.g. CLP-Anteils wegfallen).

Der Verzicht auf den Einsatz von Ressourcen, also die Anwendung des Suffizienzprinzips, das mit der hierarchisch höchsten Stufe der Abfallrahmenrichtlinie – der Vermeidung – eng verbunden ist, kann dagegen nicht abgebildet werden. So wirkt sich der Verzicht auf einen Oberbodenbelag bei der recyclingorientierten Konstruktion nicht positiv aus. Würde ein Belag mit hohem, möglichst vollständigem Sekundärrohstoffanteil gewählt und hätte dieser zudem ein hohes Material-Loop-Potenzial mit Herstellerrücknahmeverfahren und sehr geringem Rückbauaufwand (z.B. recyclingfähige Teppichfliesen eines niederländischen Herstellers mit Cradle-to-Cradle-Zertifikat), würde das Closed-Loop-Potenzial der Gesamtkonstruktion sogar noch steigen, obwohl in absoluten Zahlen gemessen mehr Ressourcen gebraucht würden.

Hier stößt der Urban Mining Index mit seiner prozentualen Auswertung an Grenzen bzw. grundlegende Strategiekonflikte, die in der Wissenschaft bereits länger diskutiert werden (siehe Kapitel 2.1.3). Bewusst wurde im Beispiel der Teppichfliesen der Ausdruck „gebraucht“ und nicht „verbraucht“ gewählt. Denn wenn der Materialkreislauf geschlossen ist, werden weder Ressourcen verbraucht noch entstehen Abfälle. Wenn die Prozessenergien (und sonstigen Medien) für Herstellung, Transport, Recycling etc. ebenfalls aus erneuerbaren Quellen stammen, wäre die vollkommene Kreislaufkonsistenz gegeben.

Betrachtet man den CO₂-Fußabdruck fallen auch hier die Auswirkungen aus dem erforderlichen Austausch des Laminatbelags bei der konventionellen Decke ins Gewicht: Der Holzwerkstoff verursacht im Verhältnis zum Masseanteil relativ hohe Emissionen bei der energetischen Verwertung. Rechnet man die Speicherung von CO₂ im Herstellungsprozess (A1-3 und B4) und die Gutschriften für den Energieexport (D) dagegen, ist das Treibhauspotenzial des Laminatbelags insgesamt negativ (-2,1 kg pro m²). In einer Ökobilanz nach DGNB, bei der das Modul D gegenge-rechnet wird, würde sich der Austausch damit ebenfalls positiv auswirken.

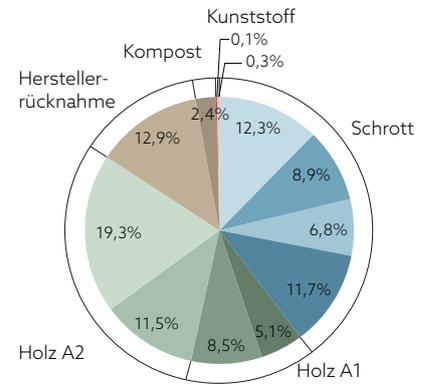
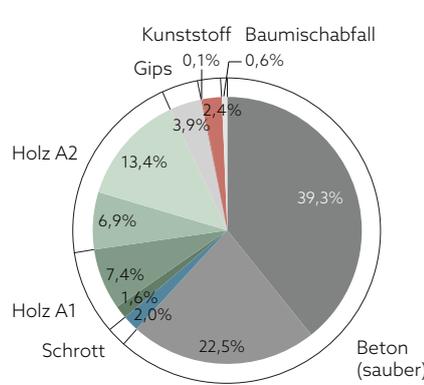
Dach

Konventionelle Konstruktion

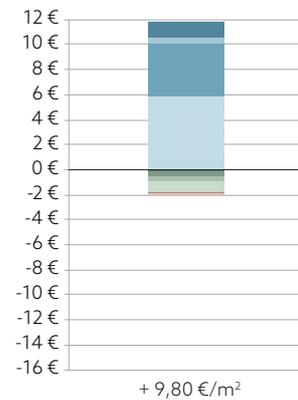
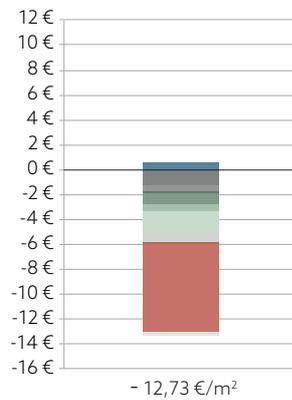
Recyclingorientierte Konstruktion

Materialien und Massen im Lebenszyklus

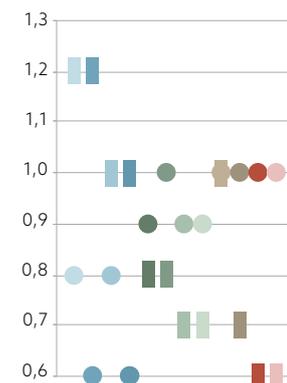
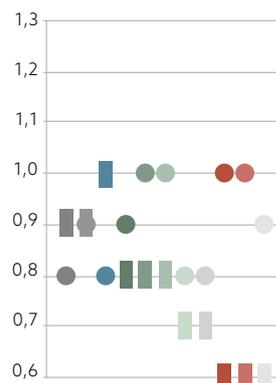
	[kg/m ²]		[kg/m ²]
■ Betondachsteine	45,6	■ Steckpaneelblech, Edelstahl, 1 mm	8,6
■ Lattung Fichte, 30/50 mm	3,2	■ U-Profile, Edelstahl, 2-3 mm	6,3
■ Unterspannbahn PUR auf PET-Vlies	0,2	■ Trapezblech, Stahl verzinkt, 35/207 mm	4,8
■ Zwischensparrendämmung EPS, 240 mm	4,8	■ Lattungen, Fichte, 24-40/40-60 mm	3,6
■ OSB/3-Platten (innere und äußere Beplankung, 22mm)	27,2	■ Winddichtung PE-HD, 0,2 mm	0,1
■ Sparren KVH Fichte, 120/240 mm	15,0	■ MDF-Platte, 15 mm	8,1
■ Brettschichtholzbinde	14,0	■ Jutefaserdämmplatten, 60 + 200 mm	9,1
■ Ringanker, Beton	79,6	■ HEB-Profil, Stahl verzinkt, 200/200/9 mm	8,2
■ Ringanker, Bewehrung	4,0	■ KVH Fichte, 120/200 mm	6,0
■ Gipskartonplatten, 12,5 mm	7,9	■ OSB/3-Platte, 22 mm	13,6
■ Dispersionsfarbe	1,3	■ Dampfbremse, PE-LD 0,2 mm	0,2
	202,8	■ Wandbespannung, Jute recycelt, 2 mm	1,7
			70,3



Verwertungserlöse (+) und Entsorgungskosten (-)



Faktor Arbeit ○ und Faktor Wert □



8.2.4. Vergleichsanalyse Dach

Das konventionelle Dach ist ein Sparrendach mit üblicher Deckung aus Betondachsteinen. Zur Aussteifung ist ein Ringanker aus Beton vorgesehen, der den massenmäßig größten Anteil an den Materialien hat, gefolgt von den Dachsteinen. Zur äußeren und inneren Beplankung werden OSB-Platten eingesetzt, die innenseitig gleichzeitig als Dampfbremse dienen. Die aus den Materialien im Rückbau resultierenden Wertstoffe sind größtenteils Beton und Holz.

Das Dach der Urban-Mining-Design-Variante besteht gemessen am Gewicht zu mehr als einem Drittel aus Metallen. Die Primärtragkonstruktion wird aus Stahlprofilen hergestellt, die wasserführende Schicht ist ein Trapezblech, das mit Steckpaneelen aus Edelstahl bekleidet wird. Das Dach ist damit zwar recht teuer in der Herstellung und kostet nach Berechnungen von Riegler-Floors und Hillebrandt das 2,5-Fache des konventionellen Dachs, es ist dafür aber auch sehr wertvoll. Da die Metalle endlos recycelbar sind und nicht an Wert verlieren, sondern im Zuge der Rohstoffverknappung eher noch gewinnen, kann die Investition damit als wahre Geldanlage bezeichnet werden. Zusätzlich zu einer ggf. zu erzielenden Miete und Grundpreissteigerung kann mit dem reinen Verkauf des Materials beim Rückbau ein Erlös erzielt werden.

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Bauteilen kann der Beton des konventionellen Dachs sortenrein getrennt und als reiner Betonbruch verwertet werden. Die Entsorgungskosten sind deshalb weniger hoch als bei den zuvor beschriebenen massiven Bauteilen. Die EPS-Dämmung verursacht jedoch auch hier hohe Entsorgungskosten. Dagegen fallen für den Jutedämmstoff keine Entsorgungskosten an, da der Hersteller sortenreine Materialien zurücknimmt. Rechnet man statt Herstellerrücknahme (etwa weil die Transportkosten zu hoch wären) mit dem Preis für biologische Faserstoffe (Kompost), würden 0,45€/m² Dachfläche für die Verwertung des Dämmstoffs anfallen. Im schlimmsten Fall würde der Entsorger den Wertstoff als Baumischabfall annehmen; dann entstünden 1,71€/m². Auch dann lägen die Entsorgungskosten noch weit unter den Kosten für die Entsorgung des Styropors des konventionellen Dachs (7,19€/m²).

Der Aufwand für den Rückbau unterscheidet sich bei den hier betrachteten Dachkonstruktionen nicht: Der durchschnittliche Faktor Arbeit beträgt 0,88. Während die holzbasierten Materialien in beiden Dächern einen ähnlichen Rückbauaufwand verursachen, sind die Betondachsteine etwas leichter zu entfernen als die gesteckten Edelstahlbleche (s. Bauteile 363.01 und 363.03 im Bauteilkatalog). Allerdings wirkt sich der höhere Rückbauaufwand nicht negativ auf das Kreislaufpotenzial aus, da Zinkblech aufgrund seines hohen Werts nicht nur im selektiven Rückbau, sondern auch im selektiven Abbruch dem Recycling zugeführt wird. Der Aufwand für den sortenreinen Rückbau der Gipskartonplatten wurde geschätzt, da keine Versuchsergebnisse oder Daten von Rückbaustellen vorliegen und auch nicht erhoben wurden. Es wird ein mittlerer Aufwand angenommen, da die Schrauben zur Befestigung verspachtelt werden und die Platten von den OSB-Platten abgebrochen werden müssen. Die textile Wandbespannung lässt sich dagegen sehr leicht zurückbauen.

Legende Kreislaufpotenziale

Pre-Use

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

Post-Use

- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (d_{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)

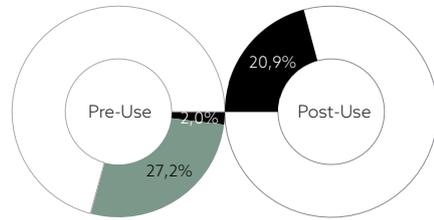
Konventionelle Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Betondachsteine	45,6	PR	rc 39	dc
Lattung Fichte	3,2	RN 0 100	dc	en _r
Unterspannbahn PUR auf PET-Vlies	0,2	PR	en _f	en _f
EPS-Dämmung	4,8	PR	en _f	en _f
OSB/3-Platten	27,2	RN 0 86	dc	en _r
Sparren KVH Fichte	15,0	RN 0 100	dc	en _r
Brettschichtholz	14,0	RN 0 97	dc	en _r
Ringanker, Beton	79,6	PR	rc 39	dc
Bewehrungsstahl	4,0	RC 100	rc 100	rc
Gipskartonplatten	7,9	RC 2	rc 99	d
Dispersionsfarbe	1,3	PR	en _f	en _f
Gesamt	202,8			

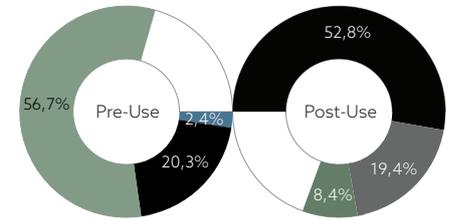
Recyclingorientierte Konstruktion

	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	
			sd	ud
Edelstahlblech	8,6	RC 65,2	rc 100	rc
U-Profil, Edelstahl	6,3	RC 65,2	rc 100	rc
Stahltrapezblech	4,8	RC 35	rc 100	rc
Lattungen, Fichte	3,6	RN 100 0	d _{cr}	en _{cr}
Winddichtung PE-HD	0,1	PR	en _f	en _f
MDF-Platte	8,1	RN 47 47	dc	en _r
Jutefaserdämmung	9,1	DC 88+ RN 0 97	rc 88	en _r
HEB-Profil, Stahl	8,2	RC 35	rc 100	rc
KVH Fichte	6,0	RN 100 0	d _{cr}	en _{cr}
OSB/3-Platte	13,6	RN 45 44	d _{cr}	en _{cr}
Dampfbremse, PE-LD	0,2	PR	en _f	en _r
Jutebespannung	1,7	RU 100+	rc 100c	en _r
Gesamt	70,3			

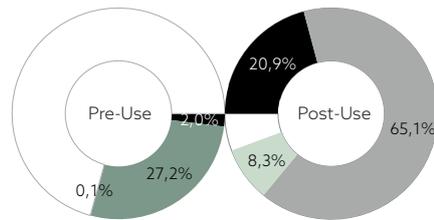
Kreislaufpotenziale



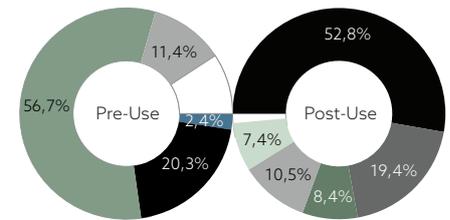
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	29,2%	20,9%	50,1%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	79,4%	80,6%	160,0%

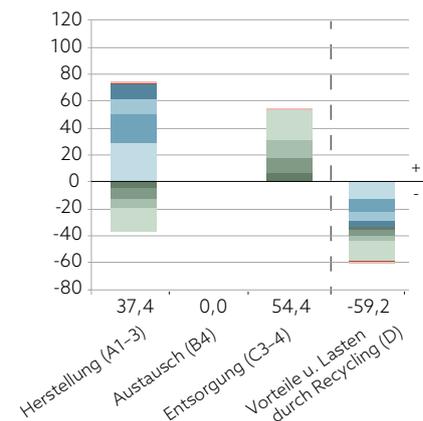
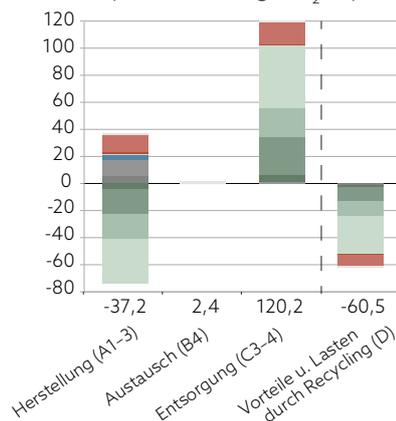


	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	29,3%	94,3%	123,6%



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Loop-Potenzial	90,8%	98,5%	189,3%

Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äquiv./m²



Das Dach weist von allen Bauteilen der konventionellen Konstruktion die höchsten Kreislaufpotenziale auf, kommt jedoch bei Weitem nicht an die recyclingorientierte Konstruktion heran.

In der Pre-Use-Phase wirken sich in beiden Varianten die Massivhölzer und die Holzwerkstoffplatten positiv aus. Der prozentuale Anteil an nachwachsenden Rohstoffen ist in der recyclingorientierten Variante aufgrund der höheren Materialdichte der Dämmungen höher. Außerdem kommen dort die Sekundärrohstoffanteile in den Metallen und das wiederverwendete Jutegewebe für die Wandbespannung hinzu, sodass das Closed-Loop-Potenzial Pre-Use ca. doppelt so hoch wie in der konventionellen Variante ist. Wird darüber hinaus die Weiterverwertung von gebrauchten Jutefasern als Dämmstoff berücksichtigt, ergibt sich ein Loop-Potenzial für das Urban-Mining-Design-Dach von 79,4% Pre-Use, während die konventionelle Variante nur auf 29,2% kommt.

Post-Use wird beim konventionellen Dach der Anteil weiterverwertbarer Materialien am höchsten sein. Hierzu zählt ein Großteil des Betons, aber auch die holzbasierten Materialien. Aufgrund des relativ geringen Material-Loop-Potenzials des Baustoffs Beton (39%) und der Abschläge für die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus gehen nur 32% der Betondachsteine und 28% des Betonringankers in das Closed-Loop-Potenzial ein; der Rest wird dem Loop-Potenzial zugeordnet. Die Weiterverwertung des Altholzes wird ebenfalls dem offenen Kreislauf zugeordnet, weil davon ausgegangen wird, dass die Hölzer nicht zertifiziert sind und somit nicht gewährleistet ist, dass das Holz nachhaltig nachwächst.

Das Dach der recyclingorientierten Variante hat von allen Bauteilen das höchste Closed-Loop-Potenzial Post-Use (80,6%). Positiv wirken sich hier die Metalle mit ihrem hohen Material-Loop-Potenzial, aber auch die zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffe aus. Der Anteil von nicht zertifiziertem Holz in den Holzwerkstoffplatten geht darüber hinaus in das Loop-Potenzial ein. Nur 1,5% geht am Ende der Nutzungsdauer verloren. Hierzu zählen vor allem die nicht nachwachsenden Inhaltsstoffe der Holzwerkstoffplatten (Polyurethanleime) und die Kunststofffolien zur Wind- und Dampfdichtung. Solange sich für Letztere kein Weg zur stofflichen Verwertung etabliert, muss davon ausgegangen werden, dass die Wertstoffe energetisch verwertet werden und die fossilen Rohstoffe damit unwiederbringlich verloren gehen.

An den Grafiken zum Treibhauspotenzial ist ablesbar, dass das Dach der recyclingorientierten Variante im Lebenszyklus höhere Emissionen verursacht als die konventionelle Ausführung (rund 92 zu 85 kg CO₂-Äquiv./m² in den Modulen A–C). Dieser Nachteil lässt sich auch nicht ausgleichen, wenn man die Gutschriften für das Recycling am Ende der Nutzungsdauer (Modul D) berücksichtigt.

Beim Urban-Mining-Design-Dach verursacht vor allem die Herstellung der Bauteile aus Edelstahl relativ hohe klimaschädliche Emissionen. Im Modul D erhalten nur die Primärstahlanteile Gutschriften für das Recycling (die „Output-Nettoflüsse“). Nach DIN EN 15804 [184] ist „die Menge an Output von Sekundärstoff, die in der Lage ist, tatsächlich eins zu eins den Input an Sekundärmaterial als ‚closed loop‘ zu substituieren, [...] Teil des untersuchten Produktsystems und wird nicht dem Modul D zugeordnet.“

8.3. Zwischenfazit

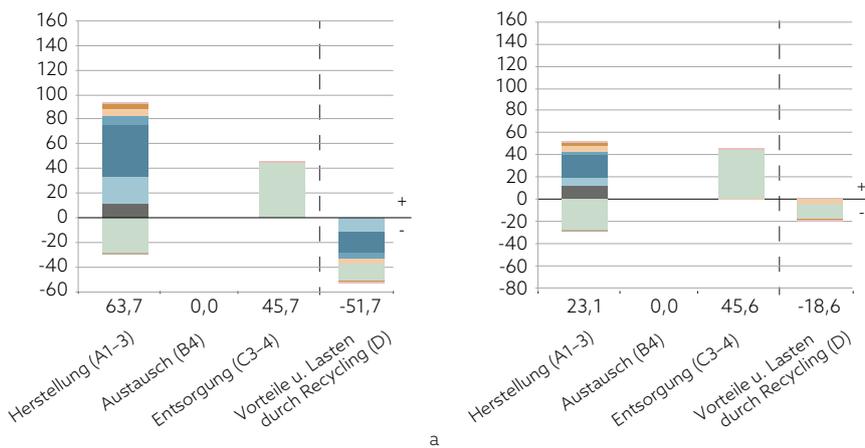
Die Vorteile der kreislaforientierten Planung konnten in beiden Modellprojekten durch die Berechnung der Kreislaufpotenziale mit dem Urban Mining Index bestätigt werden. Alle Bauteile der kreislaforientierten Konstruktionen weisen sehr hohe Closed-Loop-Potenziale auf und eignen sich damit für das Bauen in geschlossenen Stoffkreisläufen. Dabei spielt die Post-Use-Phase durchgehend eine größere Rolle als die Pre-Use-Phase. Das liegt daran, dass viele Baustoffe noch nicht einem bestehenden Kreislaufprozess entnommen werden können, also derzeit nicht als Sekundärrohstoffe erhältlich sind. So ist in vielen Stahlbauteilen immer noch ein hoher Primärstahlanteil enthalten, da der Bedarf das aktuell im Umlauf befindliche Angebot an Sekundärstahl übersteigt. Ebenso werden auch viele Holzwerkstoffe noch nicht mit 100% Holz aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft angeboten.

Auch das Loop-Potenzial ist in allen recyclingorientierten Bauteilen höher als bei den konventionellen. Die Weiterverwertbarkeit ist zwar auch bei der konventionellen Bauweise teilweise recht hoch, doch führen schwer lösbare Materialverbindungen, wie z.B. die Bitumendickbeschichtung der konventionellen Bodenplatte im Modellprojekt 2, zu Restanhaftungen, die selbst ein Downcycling verhindern können. Für solche Bauteile wird ein anteiliger Verlust durch Deponierung prognostiziert. Das deutet darauf hin, dass für das Loop-Potenzial der konstruktive Aspekt entscheidender ist als der materielle – zumindest bei einem hohen Anteil mineralischer Materialien.

Resultate aus der Bauweise

In beiden Modellprojekten wurde die recyclingorientierte Konstruktion jeweils als Leichtbauweise einer schweren Bauweise gegenübergestellt. Lässt sich daraus nun der Schluss ziehen, dass die Leichtbauweisen hinsichtlich des zirkulären Bauens generell Vorteile gegenüber massiven Bauweisen haben? Im Großen und Ganzen kann diese Frage bejaht werden. Leichte Konstruktionen werden in der Regel entweder in Holz- oder Stahlskelettbauweise erstellt. Sowohl Holz als auch Metall eignen sich gut für das Bauen in geschlossenen Stoffkreisläufen, da Holz in den natürlichen und Metall in den technischen Kreislauf zurückgeführt werden kann. Mineralische Materialien hingegen erfahren – sofern sie gebrannt werden – im Herstellungsprozess eine chemische Veränderung, die nach aktuellem Stand der Forschung unumkehrbar ist. Beton und Ziegel lassen sich nicht wieder plastifizieren und werden deshalb in gebrochener Form verwertet. Im Neumaterial kann nur ein Teil durch gebrochene oder gemahlene Körnung ersetzt werden, sodass der Großteil in andere Kreisläufe abwandert. Im Ergebnis werden die mineralischen Materialien der massiven Bauweisen größtenteils im Loop-Potenzial ausgewiesen.

Die hier gezeigten Modellprojekte eignen sich für eine Leichtbauweise. Diese ist jedoch nicht für alle Bauaufgaben geeignet. Bei Projekten mit hohen Anforderungen an den Brand- und Schallschutz wird die Massivbauweise kaum zu ersetzen sein. Im folgenden Kapitel 9 wird überprüft, wie das Kreislaufpotenzial einer Massivbauweise optimiert werden kann.



A 8.8 Treibhausgasemissionen der recyclingorientierten Gründung aus Modellprojekt 2 mit unterschiedlicher Datenbasis (Rechenex-
emple)

a Bilanzierung mit den korrekten materialspezifischen Ökobilanzdatensätzen aus Umweltproduktdeklarationen oder Ökobaudat.

b Bilanzierung aller Stahlbauteile mit dem Ökobilanz-Datensatz für Bewehrungsstähe (100% Sekundärstahl) – Unterschiede durch verschiedene Verarbeitungsprozesse und Festigkeiten bleiben unberücksichtigt

Resultate zum CO₂-Footprint

Die recyclingorientierten Konstruktionen weisen fast durchgängig einen niedrigeren CO₂-Footprint auf als die konventionellen Konstruktionen. Dabei bewirkt der Holztafelbau mit Holzfassade noch einen größeren Unterschied zur konventionellen Bauweise als der Stahlskelettbau mit Edelstahlfassade. Beim Holzbau erklärt sich dies durch die Speicherung von Kohlenstoff im Wachstumsprozess. Beim Stahlbau können die hohen Emissionen der Primärstahlherstellung zum Teil durch Recycling reduziert werden.

Die deutschen Treibhausgasemissionen betragen im Jahr 2017 nach Angaben des Klimasekretariats der Vereinten Nationen [185] insgesamt 906,6 Mio. Tonnen⁶⁸. Im selben Jahr hat die deutsche Stahlindustrie nach Daten der Wirtschaftsvereinigung Stahl [186] nur für die Rohstahlproduktion ca. 57,8 Mio. Tonnen CO₂ emittiert (inkl. Exporte⁶⁹). Auf Baustahl entfallen ca. 35% der gesamten Stahlproduktion [188]. Damit waren die in Deutschland hergestellten Baustähle für ca. 2,23% der deutschen Klimagase verantwortlich.⁷⁰

Der Anteil der Zementindustrie war nach Daten des Vereins deutscher Zementwerke e.V. [189] im Jahr 2017 mit 2,26% (inkl. Exporte⁷¹) nahezu gleich hoch.

Mit Blick auf diese Zahlen stellt sich die Frage, ob das Bauen mit Stahl genauso klimaschädlich ist wie das Bauen mit Beton bzw. Zement. Bei der Beantwortung dieser Frage spielt die Recyclingfähigkeit von Stahl eine wichtige Rolle. 2017 betrug der Anteil des Hochofenverfahrens in Deutschland gemäß Statistik der worldsteel association [191] 70% und der des Elektrostahlverfahrens (Schrottverwertung) 30%, weil derzeit wesentlich mehr Stahl nachgefragt wird, als durch Sekundärmaterial gedeckt werden kann. Aber einmal angenommen, es wäre so viel Stahl im Umlauf, dass man Stahlbauteile komplett aus Schrott im Elektrostahlverfahren herstellen könnte, also nur noch in geschlossenen Kreisläufen führen würde, wäre dann das Bauen mit Stahl klimafreundlich?

68 Die Angabe beinhaltet alle Treibhausgase ohne Landnutzungsänderungen.

69 Nach Statistischem Jahrbuch 2018 der worldsteel association [187] betrug die Rohstahlproduktion in Deutschland 2017 43,3 Mio. Tonnen. Davon wurden 26,4 Mio. Tonnen als Stahlhalbzeuge und Stahlfertigprodukte exportiert, während gleichzeitig 27,1 Mio. Tonnen importiert wurden.

70 Die Angabe bezieht sich auf die Rohstahlproduktion, d.h. ohne Formgebung, wie Walzen, Strangpressen, Gießen, etc.

71 Der Zementabsatz betrug 2017 nach Angaben des vdz [190] 33,5 Mio. Tonnen. Davon wurden 6,2 Mio. Tonnen exportiert, während gleichzeitig 1,6 Mio. Tonnen importiert wurden.

Um sich einer Antwort anzunähern, wurde ein Rechenexempel durchgeführt. Hierfür wurden die Stähle der recyclingorientierten Gründung aus Modellprojekt 2 (HEB-Profile, Trapezblech und Schraubfundamente) hilfsweise mit dem Ökobilanz-Datensatz für Bewehrungsstahl bilanziert, der zu 100% aus recyceltem Schrott hergestellt wird. In Abb. A 8.8 sind die Ergebnisse gegenübergestellt. Sie sind nicht ganz vergleichbar, da unterstellt wird, dass die Verarbeitung zu Profilen und Blechen nicht mehr Treibhausgase verursacht als die Verarbeitung zu Bewehrungsstählen. Würde diese Annahme aber annähernd zutreffen, wären die Klimagasemissionen der Gesamtkonstruktion in der Herstellungsphase (Modul A1-3) um ca. 60% geringer (23,1 statt 63,7 kg CO₂-Äquiv.).

Mit legierten Stählen wie z. B. Edelstahl, kann ein solches Rechenexempel nicht durchgeführt werden, da Legierungen einen signifikanten Einfluss auf den Ressourcenverbrauch und das Treibhauspotenzial haben. Nach Lemken et al. vom Wuppertal Institut [192] ist „Typischer Edelstahl [...] ca. 2 bis 3 mal so ressourcenintensiv wie unlegierter Stahl aus der Hochofenroute und ca. 5 bis 10 mal ressourcenintensiver gegenüber einem solchen Stahl aus der Elektrofenroute. Die Spannbreite ist abhängig von den gewählten Indikatoren: Gesamtmaterialaufwand (TMR), Wasser, kumulierter Energieverbrauch (KEA) [sic] und Treibhauspotenzial (GWP).“ Legierte Stähle sind deshalb nach Lemken et al. für eine großflächige Anwendung nicht zu empfehlen.

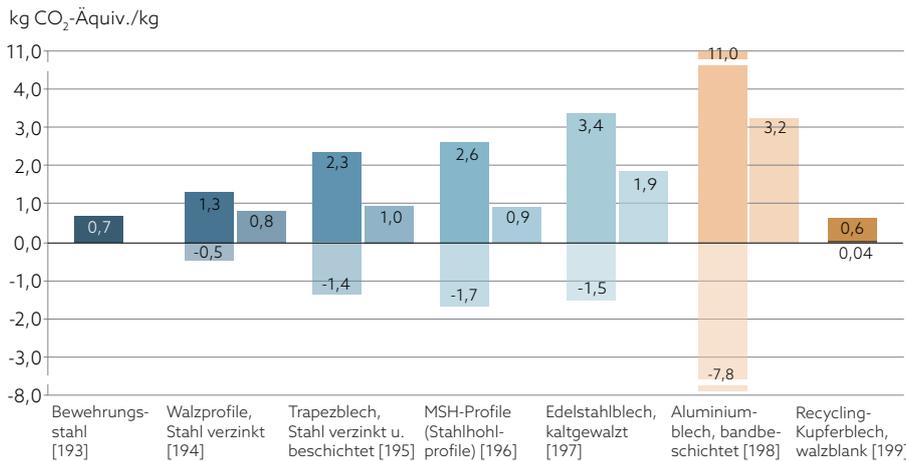
Eine Optimierung der Treibhausgasemissionen könnte sicherlich erzielt werden, wenn der Strom für das Elektrostahlverfahren zu 100% aus erneuerbaren Energien gewonnen würde. Aber auch damit könnte nur ein Teil des Edelstahls klimafreundlich produziert werden, da die Nachfrage das Schrottaufkommen derzeit noch übersteigt.

Abb. A 8.9 zeigt den CO₂-Footprint verschiedener in Modellprojekt 2 verwendeter Metalle über den Lebenszyklus. Die Daten basieren auf Umweltproduktdeklarationen von Herstellern oder generischen Daten der Ökobaudat (siehe Abb. A 8.9 und Anhang).

Bei einem Vergleich des kumulierten Treibhauspotenzials fällt auf, dass die unlegierten Stähle in dieser Hinsicht recht nah beieinanderliegen. Das deutet darauf hin, dass das durchgeführte Rechenexempel plausibel ist. Weiterhin fällt das relativ hohe Treibhauspotenzial von Edelstahlblech in der Herstellung auf, was die Ausführungen von Lemke et al. bestätigt.

Aufgrund der hohen CO₂-Emissionen bei der Edelstahlherstellung ist zu überlegen, ob andere Metalle als ebenso kreislauffähige, aber klimaschonendere Bekleidung dienen können. In Abb. A 8.9 wurden deshalb dem Edelstahlblech zwei weitere Bleche gegenübergestellt: Aluminiumblech, das dem Edelstahlblech optisch ähnelt, verursacht in der Herstellung noch viel höhere Treibhausgasemissionen. Selbst unter Berücksichtigung der Gutschriften für das Recycling der Primäraluminiumanteile am Ende der Nutzungsdauer ist der kumulierte CO₂-Footprint um 68% höher als der des Edelstahlblechs.

Wesentlich geringere Klimagasemissionen verursacht die Herstellung eines Kupferblechs aus 100% Recyclingmaterial, wie es z. B. von Hille-



A 8.9 Treibhausgasemissionen der in Modellprojekt 2 verwendeten Metalle in kg CO₂-Äquiv. pro kg Metall

Pluswerte: Herstellung (Modul A1-3)
 Minuswerte: Gutschriften für Recycling (Modul D)
 rechte Säulen: kumuliert (Modul A1-3 + Modul D)

Die Entsorgungsphase (Modul C) ist wegen geringfügigkeit nicht dargestellt.

brandt und Riegler-Floors für ein anderes Modellprojekt im Atlas Recycling vorgeschlagen wird. Es handelt sich um ein Produkt eines deutschen Herstellers [199], weshalb die Werte nicht für alle Kupferbleche gelten. Der Abb. A 8.9 ist zu entnehmen, dass keine Gutschrift für den Export in den nächsten Lebenszyklus ausgewiesen wird, sondern eine geringfügige Belastung. In der Umweltproduktdeklaration wird angenommen, dass bei der Sammlung 1% des Materials verloren geht. Die Schrottverluste werden rechnerisch durch die Produktion von Primärkupfer am Lebensende ausgeglichen.

Durch den Einsatz von Kupfer an der Fassade würde sich jedoch zum einen das ästhetische Erscheinungsbild ändern. Zum anderen handelt es sich um ein Schwermetall: bei großflächiger Anwendung müssen deshalb Schwermetallfilter in die Regenentwässerung integriert werden.

Berücksichtigt werden sollte auch, dass Metalle zwar Closed-Loop-Materialien sind und den nachfolgenden Generationen leicht zur Verfügung stehen, wenn sie sortenrein und leicht trennbar verbaut werden. Allerdings können die Metalle, wenn sie im Boden verbleiben, von eben diesen nachfolgenden Generationen wahrscheinlich effizienter und umweltfreundlicher gewonnen werden als heute, da die Technologie zur Förderung und Verarbeitung stetig weiterentwickelt wird. Die Forschung arbeitet z. B. daran, Eisenoxid zur Eisen- und Stahlherstellung mit Wasserstoff statt mit Koks (aus Kohle) zu reduzieren. Dies würde den Herstellungsprozess wesentlich klimaschonender machen. Solange solche Technologien noch nicht zur Verfügung stehen, sollte mit Primärmetallen (vor allem Edelstählen) sparsam umgegangen werden. Im besten Fall werden sie so eingesetzt, dass sie durch ihren Wert auch den selektiven Rückbau anderer Materialien forcieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die recyclingorientierte Planung mit dem Urban Mining Index quantitativ nachgewiesen werden kann. Die Variantenvergleiche haben gezeigt, dass die kreislaufgerechten Bauteile in den meisten Fällen auch geringere Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus verursachen. Der CO₂-Footprint (und andere, in dieser Arbeit nicht betrachtete Indikatoren der Ökobilanz) sollten jedoch möglichst zusätzlich berechnet werden, um die Auswirkungen des Urban Mining Design auf die Umwelt zu überprüfen.



RATHAUS KORBACH