TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

**DIPLOMARBEIT**

# Kreislaufgerecht Bauen jetzt.

## Potenzialanalyse verschiedener Strategien des zirkulären Bauens

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von
Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alireza Fadai**

E259 - Institut für Architekturwissenschaften
E259-02 - Forschungsbereich Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von
**Eva-Maria Neumaier**
12016793

Wien, am 22.05.2024

TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abstract


## english

The construction industry accounts for the largest consumption of raw materials and generates the highest amount of waste of all economic sectors in the European Union. Given the ongoing climate crisis and the finite nature of global resources, the transformation of construction practices towards a more circular economy is therefore of particular societal urgency. Whether and how building design can already be done in a more circular manner today, is to be addressed in this thesis.

After analyzing the fundamental principles of circular construction, the status quo, recent developments in the construction industry and the political framework, three main approaches to establishing a circular economy in the building sector are identified:

1. The closure of material cycles with technical means within established mineral construction methods.

2. The use of natural building materials that can be reintegrated into the biological cycle.

3. Modular construction, aiming to keep as many elements as possible in the resource cycle through reuse.

The potentials of these three strategies to promote circular construction are analyzed using a case study of a typical multi-family residential building. There are separate construction designs for the case study developed, each based on one of those strategies and aiming to optimize its circularity. So, the maximum potential for circularity of each approach as well as their technical and legal limitations can be demonstrated. The main focus is on the material and component level. To objectively measure and evaluate the circularity of each strategy, the assessment system of the *Urban Mining Index* is used.

The analysis shows that all three approaches enable a significant increase in circularity compared to current conventional construction methods. While mineral solid construction remains far from true circularity, it stands out for its ease of implementation and broad legal applicability. Natural building materials and modular construction allow for substantial circularity but face more legal and technical limitations. The use of natural building materials proves to be the most circular approach overall, also due to its very low global warming potential over the building's life cycle. However, there is significant potential for improvement in the modular construction and the concept of reuse through the establishment of new business models.

Overall, this thesis demonstrates that while complete circularity in conventional construction is currently not possible, a significant increase in resource efficiency and circularity can already be achieved today. Thus, this work serves not only as a comparative analysis of various strategies for increasing circularity but also as a guide to implement more circular building practices now.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## deutsch

Das Bauwesen verzeichnet den größten Rohstoffverbrauch und generiert das höchste Abfallaufkommen aller Wirtschaftszweige in der Europäischen Union. Angesichts der fortschreitenden Klimakrise und der Endlichkeit globaler Ressourcen ist die Transformation der Baupraxis hin zu einer kreislaufgerechten Wirtschaft von besonderer gesellschaftlicher Dringlichkeit. Der Frage, wie dies gelingen kann - ob und auf welche Weise heute schon kreislaufgerecht gebaut werden kann – widmet sich diese Diplomarbeit.

Nach einer Analyse der grundlegenden Prinzipien des zirkulären Bauens, der aktuellen Situation und neuer Entwicklungen in der Baubranche sowie den politischen Rahmenbedingungen werden drei Hauptströmungen identifiziert, die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen zu etablieren:

1. Das technische Schließen der Stoffkreisläufe auf Materialebene innerhalb der etablierten mineralischen Bauweise.

2. Der Einsatz natürlicher Baustoffe, die wieder in den Naturkreislauf zurückgeführt werden können.

3. Der Systembau, der darauf abzielt, mittels Wiederverwendung möglichst viele Elemente im Ressourcenkreis zu halten.

Die Potenziale dieser drei Strategien zur Förderung zirkulären Bauens werden anhand eines Fallbeispiels, eines typischen Mehrparteienwohnhauses, analysiert. Basierend auf jeder dieser Strategien wird ein eigener kreislaufoptimierter Gebäudeentwurf entwickelt. Somit kann sowohl das maximal mögliche Maß der Zirkularität jedes Ansatzes als auch dessen technische und rechtliche Grenzen aufgezeigt werden. Der Fokus liegt auf der Material- und Bauteilebene. Als Bemessungs- und Bewertungssystem der Kreislauffähigkeit wird der *Urban Mining Index* herangezogen.

Das Ergebnis dieser Analyse ist, dass alle drei Ansätze eine deutliche Erhöhung der Kreislauffähigkeit im Vergleich zur konventionellen Bauweise ermöglichen. Während die mineralische Massivbauweise weit von einer echten Zirkularität entfernt bleibt, zeichnet sie sich durch eine leichte Umsetzbarkeit und weitreichende baurechtliche Einsetzbarkeit aus. Die natürliche Bauweise und der Systembau ermöglichen eine großteilige Kreislaufführung, stoßen jedoch auf klare rechtliche und technische Einschränkungen. Die natürliche Bauweise erweist sich insgesamt als am zirkulärsten, auch aufgrund des geringen Treibhauspotenzials im Lebenszyklus, wobei die Bauteilwiederverwendung durch die Etablierung neuer Geschäftsmodelle noch deutliches Verbesserungspotenzial birgt.

Insgesamt legt diese Arbeit dar, dass eine vollständige Zirkularität im herkömmlichen Bauen derzeit zwar nicht möglich ist, jedoch bereits heute eine wesentliche Steigerung der Ressourceneffizienz und Kreislaufführung gelingen kann. Somit dient diese Arbeit nicht nur als vergleichende Analyse verschiedener Strategien zur Steigerung der Zirkularität, sondern auch als Handlungsanleitung für ein kreislauffähigeres Bauen jetzt.

TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# INHALT

*Abstract*

## 1. Einleitung 1

*Motivation* 2
*Methodik und Aufbau der Arbeit* 3
*Begriffserklärungen* 4

## 2. Rahmenbedingungen: Die Kreislaufbauwirtschaft 7

**Grundlegendes** 8
*vom linearen zum kreislaufgerechten Wirtschaftsmodell* 8
*Kreislaufgerecht bauen* 9

**Status Quo** 12

**Aktuelle Entwicklungen** 16

**Rechtliche Rahmenbedingungen** 20
*Der European Green Deal & die Taxonomie* 20
*Österreichs Kreislaufwirtschaftsstrategie* 22
*OIB-Richtlinie 7* 23
*EU-Abfallrahmenrichtlinie* 24
*Deponieverbot* 25

**Zwischenfazit und Zielsetzung** 26

## 3. Kreislauffähigkeit messen 29

**Bewertungskriterien** 30

**Bewertungssysteme** 34
*Level(s)* 34
*ÖGNI / DGNB* 34
*Klimaaktiv* 35
*Urban Mining Index* 36
*Madaster* 36
*Fazit* 37

**Lebenszyklus** 38
*Gebäudelebenszyklus* 38
*Materiallebenzsyklus* 39
*Lebensdauer von Bauteilen* 41

**der Urban Mining Index** 42
*Verwertungswege* 43
*Berechnung des Urban-Mining-Index* 46
*Treibhauspotenzial* 50

TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 4. Das Fallbeispiel 53

**Vorstellung des Fallbeispiels 54**
*Situation 54*
*Das Forschungsprojekt 56*
*Die Gebäude 58*

**Bestandshaus A: Massivbau konventionell 63**
*Konstruktion 64*
*Aufbauten 68*
*Kreislauffähigkeit 72*
*Auswertung 82*

**Bestandshaus B: Holz-Beton-Hybridbauweise 85**
*Konstruktion 86*
*Aufbauten 90*
*Kreislauffähigkeit 94*
*Auswertung 106*

## 5. Die Varianten 109

*Funktionsäquivalenz & Systemgrenzen 110*

**Variante 1: Mineralischer Massivbau 113**
*Kriterien 114*
*Konstruktion 116*
*Aufbauten 130*
*Kreislauffähigkeit 142*
*Auswertung 152*

**Variante 2: Biotische Bauweise 155**
*Kriterien 156*
*Konstruktion 158*
*Aufbauten 172*
*Kreislauffähigkeit 184*
*Auswertung 200*

**Variante 3: Systembau 205**
*Kriterien 206*
*Konstruktion 208*
*Ausbau 222*
*Kreislauffähigkeit 234*
*Auswertung 252*

## 6. Diskussion der Ergebnisse 257

**Fazit und Ausblick 264**

## 7. Verzeichnisse 267

*Literaturverzeichnis 268*
*Abbildungsverzeichnis 276*


TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Motivation 2
Methodik und Aufbau der Arbeit 3
Begriffserklärungen 4

# EINLEITUNG

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Motivation

Kreislauffähiges Bauen ist in Architektur-Fachkreisen derzeit in aller Munde. Ambitionierte Leuchtturmprojekte erhalten mit spektakulärer Bauteilwiederverwendung große Aufmerksamkeit: Beim K.118 in Winterthur verwendet das Baubüro InSitu das Tragwerk eines alten Supermarkts wieder und lässt davon die neue Gebäudekubatur bestimmen.[1] GXN setzt beim Circle House in Kopenhagen eine Fassade aus wiederverwerteten Plastikflaschen ein.[2] Und beim RoofKIT in Wuppertal besteht ein Teil des Bodenbelags aus der Lattung alter Bauernscheunen.[3] Während diese Projekte inspirieren und durch das Austesten des technisch Möglichen einen wichtigen Beitrag zur angewandten Forschung liefern, sind sie vom Alltag und den Möglichkeiten in der konventionellen Baupraxis weit entfernt.

Obwohl in der Branche ein grundsätzliches Bewusstsein darüber besteht, dass die aktuelle Baupraxis nur wenig nachhaltig und zirkulär ist, erscheint diese oft als alternativlos. Die Etablierung der Kreislaufwirtschaft am Bau steht noch völlig am Anfang. Doch nicht nur ambitionierte politische Forderungen wie der European Green Deal verdeutlichen die Notwendigkeit eines Wandels. Die Baubranche zählt zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftszweigen – verantwortlich für einen enormen Anteil des heimischen Rohstoffverbrauchs, des Abfallaufkommens und der Treibhausgasemissionen. Dadurch spielt die Transformation der Baubranche hin zu einem zirkulären und nachhaltigen Wirtschaften eine wichtige Rolle im Kampf gegen den Klimawandel und die Ressourcenverschwendung. Auch die Verknappung vieler Primärrohstoffe, endende Deponiekapazitäten und die zuletzt drastisch gestiegenen Energiepreise schärfen in der Baubranche allmählich das Bewusstsein für die Dringlichkeit ressourcenschonenderer Lösungen.

Die Notwendigkeit einer Etablierung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen ist also unbestreitbar gegeben. Entscheidend ist vielmehr, wie dies erreicht werden kann. Aus dieser Überlegung leitet sich die grundlegende Forschungsfrage dieser Arbeit ab:

*Wie kann heute schon kreislauffähig gebaut werden?*

Das Ziel dieser Thesis ist es, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie die Zirkularität am Bau bereits jetzt in größerem Umfang und jenseits außergewöhnlicher Leuchtturmprojekte gesteigert werden kann. Deshalb liegt der Fokus auf bereits vorhandenen und anwendbaren Lösungen.

Durch die praktische Anwendung verschiedener Strategien zur Steigerung der Kreislauffähigkeit an einem konkreten Fallbeispiel werden ihre tatsächlichen Potenziale verdeutlicht und vergleichbar gemacht. Dabei werden sowohl die Vorzüge als auch die Grenzen jeder Strategie hinsichtlich Materialität, Bauweise, rechtlicher und technischer Voraussetzungen sowie Marktverfügbarkeit analysiert. Darauf aufbauend kann die am besten geeignete Strategie zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft am Bau identifiziert werden.

1 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 59.
2 Siehe: GXN, *Circle House. Denmarks first circluar housing project.*
3 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 61.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Methodik und Aufbau der Arbeit

Diese Diplomarbeit beginnt mit einer Einführung in die grundlegenden Rahmenbedingungen des zirkulären Bauens. Neben einer Definition der Kreislaufwirtschaft werden wesentliche Prinzipien kreislauffähiger Architektur vorgestellt. Im Anschluss wird der Status Quo, das derzeitige Maß der Kreislauffähigkeit im Bauwesen, untersucht, gefolgt von einem Überblick über aktuelle Entwicklungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Zusätzlich werden relevante politische Rahmenbedingungen und rechtliche Schritte zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft erläutert.

Basierend auf diesen Grundlagen werden in einem Zwischenfazit drei Hauptströmungen identifiziert, wie die Zirkularität am Bau gesteigert werden kann. Diese drei Ansätze werden im weiteren Verlauf der Arbeit anhand eines konkreten Fallbeispiels ausführlich auf ihre Eignung als Bauweise, ihre Grenzen der Umsetzung und besonders ihr Potenzial zur Kreislaufführung untersucht und verglichen.

Um einen aussagekräftigen Vergleich zu ermöglichen, bedarf es zunächst der Festlegung einer angemessenen Bewertungsmethode. Hierfür werden mithilfe einer Literaturrecherche geeignete Kriterien zur Bestimmung der Zirkularität identifiziert. Basierend auf einer Analyse etablierter Bewertungssysteme kann die am besten geeignete Methode für diese Arbeit ermittelt werden.

Die vergleichende Untersuchung erfolgt anhand einer klassischen Bauaufgabe – einem fünfgeschossigen Mehrparteienwohnhaus mit Unterkellerung. Die vergleichende Untersuchung erfolgt anhand einer klassischen Bauaufgabe – einem fünfgeschossigen Mehrparteienwohnhaus mit Unterkellerung. Oftmals sind bei Bauprojekten viele Rahmenbedingungen festgelegt bereits bevor Architekt:innen beauftragt werden: Durch Lage, Grundstücksgröße und Abstandsflächen stehen Art und Maß der Nutzung sowie aufgrund der Forderung nach einer Tiefgarage auch die Notwendigkeit einer Unterkellerung fest. Daher wird ein konkretes Fallbeispiel als Planungsgrundlage angenommen. Dieses Projekt liefert als Entwurfsgrundlage nicht nur eine Vergleichbarkeit aller Ansätze, sondern bietet mit den vorhandenen Bestandsbauten auch eine Definition dessen, was gemeinhin als „konventionelle Bauweise“ bezeichnet wird. Diese Bestandsbauten dienen als Kontrollgruppe. Indem zuerst das Kreislaufpotenzial der konventionellen Bauten erfasst wird, lässt sich erkennen, inwiefern die untersuchten Ansätze eine Verbesserung erreichen.

Im Kapitel *Varianten* werden schließlich alle drei identifizierten Strömungen in separate Gebäudeentwürfe – eine Abwandlung des Fallbeispiels auf Bauteil- und Materialebene – übersetzt. Dafür werden zuerst Rahmenbedingungen für die Vergleichbarkeit dieser Varianten festgelegt, bevor diese nacheinander entwickelt und ausgewertet werden. Durch Fachinterviews, Literaturrecherche und Produktvergleiche werden die Potenziale der unterschiedlichen Materialien und Bauweisen für eine Kreislaufführung ermittelt. Die technischen und rechtlichen Grenzen der Anwendbarkeit sowie die Treibhausgasbilanz werden ebenfalls berücksichtigt. Darauf aufbauend werden für jede Variante die Konstruktion und alle Standard-Aufbauten festgelegt. Mithilfe der gewählten Bewertungsmethode wird schließlich die Zirkularität der jeweiligen Bauweise bemessen.

So kann in einer Diskussion der Ergebnisse beurteilt werden, welche Strömung das größte Potenzial zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen birgt, und aufgezeigt werden, wo weiteres Entwicklungspotenzial besteht. Zudem werden anwendungsorientiert kreislaufgerechte Ansätze in unterschiedlichen Materialkontexten aufgezeigt.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Begriffserklärungen

**Lineares Wirtschaftsmodell**
Ein Wirtschaftsmodell, in dem Produkte aus Primärrohstoffen hergestellt, eine Zeit lang genutzt und dann weggeworfen werden – auch „Wegwerfwirtschaft". Dieser lineare Umgang mit Ressourcen ist von hohem Rohstoffabbau und großer Müllproduktion gekennzeichnet.

**Kreislaufwirtschaft**
Ein Wirtschaftsmodell, das darauf abzielt, Ressourcen in einem (nahezu) geschlossenen Kreislauf zu führen. Mittels Teilen, Leasen, Wiederverwendung, Reparieren, Aufbereiten und Recycling wird der höchste Wert von Produkten, Komponenten und Materialien jederzeit erhalten.

**Lebenszyklus**
Beschriebt eine Nutzungsphase eines Produkts von Herstellung über Nutzung bis zur Entsorgung. Im linearen Wirtschaftsmodell spannt der Lebenszyklus „von der Wiege bis zur Bahre", also von der Herstellung bis zum Abfall. In der Kreislaufwirtschaft wird ein Lebenszyklus „von der Wiege bis zur Wiege" (engl. „Cradle to Cradle") angestrebt. Das Produkt wird am Nutzungsende in den Stoffkreislauf zurückgeführt.

**End of Life (EoL)**
(englisch für „Lebensende") beschreibt das Ende eines Lebenszyklus, also dessen Entsorgungsphase. In der Bauwirtschaft ist beim End of Life in der Regel das Lebensende des Gebäudes, also dessen Rückbau und Beseitigung gemeint.

**Urban Mining**
(englisch für „städtischer Bergbau") beschreibt den Rohstoffabbau aus anthropogenen, von Menschen gemachten Lagerstätten. Gemeint ist die Wiederverwendung und -verwertung von Materialien, die bereits in Gebäuden verbaut waren.

**Kreislaufpotenzial**
Prognostiziert den Anteil an Stoffen, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien in mehr oder weniger geschlossenen Materialkreisläufen geführt werden können. Die zukünftige Zirkularität kann dabei nur in einer begründeten Abschätzung erfasst werden – schließlich ist eine definitive Vorhersage zukünftiger Möglichkeiten nicht möglich.

**Treibhauspotenzial / Global Warming Potential (GWP)**
Ist der potenzielle Beitrag eines Stoffes zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten, d. h. zum so genannten Treibhauseffekt. Der Beitrag des Stoffes wird relativ zu dem Treibhauspotenzial des Stoffes Kohlendioxid ($CO_2$), also als $CO_2$-Äquivalente, angegeben.

**Pre-Use & Post-Use**
(englisch für "Vor der Nutzung & Nach der Nutzung") beschreiben alle eingehenden Materialien bei der Errichtung eines Gebäudes (Pre-Use) und alle Wert- und Abfallstoffe am End of Life (Post-Use).

**Closed-Loop & Loop**
(englisch für „Geschlossener Kreislauf & Kreislauf") beschreiben die Qualitätsstufen einer Kreislaufführung. Closed-Loop umfasst nur alle Stoffe, die ohne Qualitätsverlust erhalten verbleiben. Loop umfasst alle Stoffe, die eine Nachnutzung erfahren, auch diese mit Qualitätsverlust.

**Primär- & Sekundärrohstoff**
Ein Primärrohstoff ist jeder Stoff, der unbearbeitet direkt aus der Natur gewonnen wird. Ein Sekundärrohstoff ist ein Rezyklat, das durch die Aufbereitung aus entsorgtem Material gewonnen wird.

**Biotische Materialien**
Bestehen aus oder entstehen durch Lebewesen (Pflanzen, Tieren) und wurden nicht in fossile Materialien umgewandelt. Wird häufig synonym zu nachwachsenden Rohstoffen verwendet. Beispiele sind Holz, Stroh und Hanf.

**Fossile Materialien**
bestehen ebenfalls aus Lebewesen. Weil ihr Entstehungsprozess allerdings für Menschen relevante Zeithorizonte bei Weitem überschreitet, gelten sie nicht als nachwachsende Rohstoffe. Beispiele sind erdölbasierte Kunststoffe.

**Mineralische Materialien**
Sind anorganische (abiotische) nichtmetallische Materialien. Es kann sich um natürliche Mineralien, wie Naturstein oder Lehm, oder um synthetische Stoffe wie Beton handeln.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

**Metallische Materialien**
Sind ebenfalls anorganische (abiotische) Materialien. Beispiele sind Stahl, Kupfer und Aluminium.

**Natürlicher Baustoff**
Baustoff, der im Wesentlichen in der Beschaffenheit verbaut wird, wie er in der Natur vorkommt. Beispiele sind Naturstein, Holz und Lehm. Gegenteil: Synthetischer Baustoff.

**Synthetischer Baustoff**
Künstlich erzeugter, zusammengesetzter Baustoff, der erst durch einen chemischen Herstellungsprozess seine Funktion erlangt. Beispiele sind Beton, Ziegel und Kunststoffe

## Abkürzungen

Für die Messungen und Berechnungen in dieser Diplomarbeit wurden ausschließlich SI-Einheiten verwendet. Die Abkürzungen der SI-Einheiten werden in dieser Arbeit nicht gesondert erklärt, da sie allgemein bekannt sind und gemäß den Konventionen des Internationalen Einheitensystems (SI) verwendet werden.

**EoL**
End of Life (siehe Begriffserklärungen)

**UMI**
Urban Mining Index. Sowohl Bewertungssystem zur Kreislauffähigkeit als auch sein Indikator zur Kreislauffähigkeit von Baustoffen und -teilen; maßstabslos, in Prozent.

**GWP [kg $CO_2$-Eq.]**
Global Warming Potential – Synonym Treibhauspotenzial. Gibt den Beitrag eines Stoffes zum Treibhauseffekt relativ zu dem Treibhauspotenzial des Stoffes Kohlendioxid an.

**$CO_2$-Eq.**
$CO_2$-Äquivalente. Maßeinheit, die die Klimawirkungen unterschiedlicher Treibhausgase im Vergleich zu derjenigen von Kohlendioxid ausgedrückt

**EPD / UPD**
Environmental Product Declaration, deutsch Umweltproduktdeklaration

**U-Wert [W/m²K]**
Wärmestrom, der durch eine 1 m² große Fläche eines Bauteils innerhalb einer Stunde bei einer Temperaturdifferenz von 1 K fließt.

**Lambda λ [W/mK]**
Wärmeleitfähigkeit. Wärmestrom, der durch eine 1 m² große und 1 m dicke Schicht eines Baustoffs innerhalb einer Stunde bei einer Temperaturdifferenz von 1 K fließt.

**$L_{n,w}$ [dB]**
Normtrittschallpegel. Gibt die Lautstärke in einem zu schützenden Raum an.

**$R_w$ [dB]**
Bewertetes Schalldämm-Maß. Gibt das Maß an, um wieviel sich die Lautstärke durch ein Bauteil reduziert.

**Lebenszyklusmodule:**[4]

| | |
|---|---|
| A1-3 | Errichtung |
| B4 | Austausch |
| C3-4 | Abfallverwertung und Entsorgung |
| D | Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze |

4 Dies ist nur eine Auswahl der Lebenszyklusmodule, die in dieser Arbeit ausführlicher betrachtet werden. Alle Module sind in Abb. 20 im Kapitel Lebenszyklus dargestellt.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Grundlegendes 8
Status Quo 12
Aktuelle Entwicklungen 16
Rechtliche Rahmenbedingungen 20
Zwischenfazit und Zielsetzung 26

# RAHMEN-BEDINGUNGEN: DIE KREISLAUF-BAUWIRTSCHAFT

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Grundlegendes

## vom linearen zum kreislaufgerechten Wirtschaftsmodell

Der Earth Overshoot Day, der Tag, an dem die Menschheit alle stofflichen Ressourcen verbraucht hat, die die Erde im Laufe eines Jahres regeneriert, fiel 2023 auf den 2. August.[5] In nur acht Monaten wurden bereits alle Rohstoffe aufgebraucht, die nachhaltig für ein ganzes Jahr reichen müssten. Bis 2060 wird ein Wachstum der Weltbevölkerung auf 10 Milliarden Menschen prognostiziert. Wenn die Menschheit ihren Umgang mit Ressourcen bis dahin nicht wesentlich ändert, wird dann das Dreifache des Volumens an Ressourcen benötigt, das die Erde dauerhaft zur Verfügung stellen kann.[6]

Das durch die Konsumgesellschaft geprägte lineare Wirtschaftsmodell trägt einen wesentlichen Teil zu dieser Ressourcenverschwendung bei. Der Erde werden Materialien entnommen, die mit hohem Energieaufwand zu Produkten gefertigt werden und oft schon nach nur einer Nutzungsphase im Müll landen – der Prozess ist linear. Diese Wegwerfwirtschaft produziert jährlich allein in der EU 2,2 Milliarden Tonnen Abfall. Außerdem stellt die Entnahme und Nutzbarmachung von Ressourcen große Eingriffe in die Umwelt dar und es entstehen sehr hohe Treibhausgasemissionen. Einige wichtige Rohstoffe sind nur noch begrenzt an ihren Entstehungsorten verfügbar.

Eine Lösung für all diese Herausforderungen bietet die Kreislaufwirtschaft. Das europäische Parlament beschreibt die Kreislaufwirtschaft als „ein Modell der Produktion und des Verbrauchs, bei dem bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden. Auf diese Weise wird der Lebenszyklus der Produkte verlängert.“[7] Außerdem werden die Ressourcen, die jetzt schon in Produkten genutzt werden, am Nutzungsende nicht weggeworfen, sondern wieder gewonnen und neu verwendet. Müll und Verschmutzung können dadurch möglichst komplett vermieden werden und durch den verminderten Abbau an Rohstoffen kann sich die Natur regenerieren. In Verbindung mit dem Umstieg auf erneuerbare Energien ist die Kreislaufwirtschaft ein entscheidender Baustein hin zu einer $CO_2$-neutralen Wirtschaft.[8]

5 Siehe: overshootday.org, „Earth Overshoot Day“.
6 Siehe: GXN, *Circle House. Denmarks first circluar housing project*, 31.
7 Europäisches Parlament, „Kreislaufwirtschaft“.
8 Siehe: Europäisches Parlament.

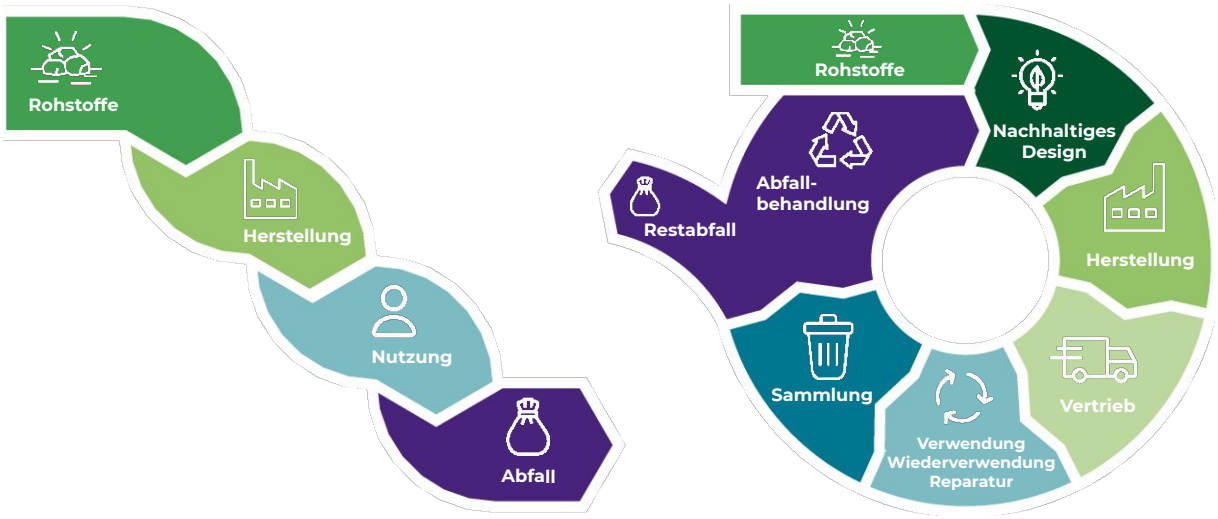



Abb. 1: Diagramm zur Linearwirtschaft (links) und Kreislaufwirtschaft (rechts). Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

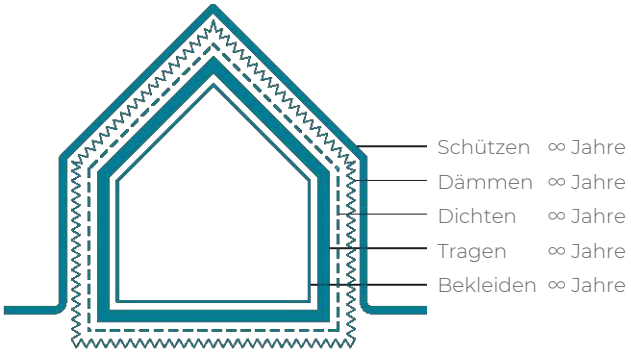



Abb. 2: Modell der fünf technisch-funktionalen Schichten der Baukonstruktion in Anlehnung an die sechs Shearing Layers nach Steward Brand. Eigene Darstellung nach Sortenrein Bauen., S.121.

## Kreislaufgerecht bauen

Dank des wachsenden Bewusstseins für die Endlichkeit stofflicher Ressourcen wurde bereits eine Vielzahl an Strategien zum zirkulären Bauen entwickelt. Nachfolgend wird ein Überblick über grundlegende Ansätze gegeben.

### Stoffströme vermeiden

Das Schonen materieller Ressourcen betrifft viele Ebenen des Planens und Bauens. Die oberste ist der Verzicht und die Reduktion von Baumaßnahmen – und die Nachnutzung vorhandenen Lands und Gebäudebestands. Durch städtisches Verdichten wird Infrastrukturfläche pro Kopf gespart und die in der Regel kompakteren Bauten erhalten meist viel Nutzfläche pro umbautes Volumen – sind also besonders materialeffizient. Das Aufwerten des Bestands ist einem Abbruch und Neubau stets vorzuziehen. Mit einer Verlängerung der Nutzung können die im Gebäude gebundenen Rohstoffe und graue Energie am besten erhalten werden.[9] Im Entwurf, bei der Konstruktion und im Ausbau ist Suffizienz, also eine Beschränkung auf das Notwendige, ein wichtiges Paradigma. Eine gleichbleibende Qualität bei weniger Fläche, Material oder Bauteilschichten zu erreichen, ist die direkteste Art der Ressourcenschonung.[10]

*„Kreislaufwirtschaft heißt: stehen lassen“ – Christian Holl*[11]

Nutzungsflexibilität ist die beste Voraussetzung für eine spätere Wiederverwendung. Eine freie und veränderbare Raumaufteilung gelingt mit gut belichtbaren Gebäudetiefen, möglichst wenigen tragenden Wänden im Innenraum und zentral angeordneten, nachträglich zugänglichen Haustechnikschächten. Vorgeplante Tragreserven fördern eine spätere Erweiterung und Aufstockung. Auch Reserven in der Raumhöhe ermöglichen eine spätere Anpassung an neue Komfortstandards (z.B. Nachrüstung einer Fußbodenheizung) oder Umwandlung in eine andere Nutzungskategorie (z.B. von Wohnen zu Arbeiten).[12] Da Flexibilität und Ressourceneffizienz sich oft widersprechen – wie bezüglich der Raumhöhe oder Tragreserven – ist die jeweilige Gewichtung stets eine Abwägung der situativen Anforderungen, besonders von Art und Ort der Nutzung. So ist eine Ladenzone in Zentrumslage tendenziell mehr von Nutzungsänderung betroffen, während für eine Wohnnutzung im suburbanen Raum Dauerhaftigkeit und suffiziente Materialnutzung entscheidender sind.[13]

### Urban Mining

Aufgrund der stetig zunehmenden Urbanisierung und dem ansteigenden Gebäudebestand befinden sich heute viele Rohstoffe nicht mehr an ihrem Entstehungsort, sondern in anthropogenen, von Menschen geschaffenen, Lagerstätten. Diese Ressourcen nutzbar zu machen, nennt sich Urban Mining (englisch für städtischer Bergbau) – analog zum Abbau von Primärrohstoffen in Minen.[14] Um eine Wiederverwertung verbauter Materialien in Zukunft zu erleichtern, muss diese schon bei der Planung von Neubauten mitgedacht werden. Das Urban Mining unterscheidet dabei in zwei Kategorien: Wiederverwendung von Bauelementen und Wiederverwertung von Baustoffen.[15] Deshalb sind

9 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 35.

10 Siehe: El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 44; Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 10–11.

11 Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 34.

12 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 12; Küpfer und Fivet, *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion*, 81.

13 Siehe: El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 58; Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 118.

14 Siehe: Küpfer und Fivet, *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion*, 15.

15 Siehe: Leal Filho, *Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele*, 124.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

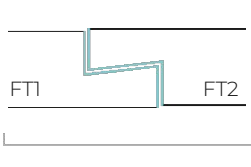
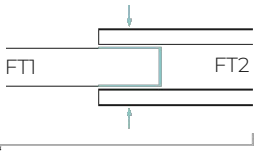
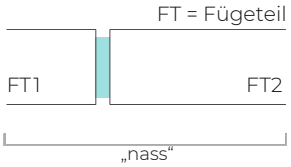
| | formschlüssige Verbindungen | kraftschlüssige Verbindungen | stoffschlüssige Verbindungen |
|---|---|---|---|
| Beschreibung | Verbindung durch Formgebung und Ineinandergreifen von Fügeteilen | Verbindung zweier Fügeteile durch Reibung oder Kräfte | Verbindung durch atomare oder molekulare Kräfte |
| physikalisches Wirkungs - prinzip |  |  |  |
| | „trocken“ | | „nass“ |
| Beispiele | • zimmermannsmäßige Vebindungen: Schwalbenschwanz, Nut-Feder, ...<br>• Stehfalz<br>• Bolzen<br>• Schnappverbindungen<br>• Reißverschluss | • Nageln<br>• Schrauben<br>• Nieten<br>• Keil-, Bolzen-, Stift- und Nietverbindungen<br>• Magnetismus<br>• Klemmen<br>• Auflager | • Schweißen<br>• Löten<br>• Kleben<br>• Beschichten<br>• Lackieren |

Abb. 3: Übersicht über unterschiedliche Verbindungsarten. Eigene Darstellung, teilweise angelehnt an Sortenrein Bauen, S. 106.

zwei Dinge entscheidend für ein erfolgreiches Mining: lösbare Verbindungstechniken und die Recyclingfähigkeit der Materialien.[16]

**Lösbare Verbindungen**

Das Konzept, ein Gebäude und seine Bestandteile in technisch-funktionalen Schichten zu gliedern, dient ursprünglich dazu, deren Austauschhäufigkeit zu prognostizieren, weist aber auch auf die Notwendigkeit der Lösbarkeit hin. Weil Funktionen wie Bekleiden (also Oberflächen und Beläge) meist eine höher Austauschrate wie die Tragkonstruktion haben, sind hier lösbare Verbindungen essenziell. Auch wenn gesamte Bauteile reversibel verbunden werden, hilft dieses Konzept, die kritischen baukonstruktiven Schnittstellen zu identifizieren.[17] Um den Bedarf aufwändiger Austäusche gering zu halten, sind möglichst dauerhafte, bewährte und wartungsfreundliche Materialien auszuwählen. Außerdem empfiehlt es sich, für funktionale Schichten, die sich nicht ohne Aufwand voneinander lösen lassen, Materialien derselben Lebensdauer zu verwenden.[18] Bauteile, die aus einem einzigen Material bestehen, können auch ohne Lösbarkeit gefügt werden, da alle Komponenten den selben Verwertungsprozess durchlaufen.[19] So wird zum Beispiel eine Lehmsteinwand mit Lehmmörtel stoffschlüssig verbunden. Da jedoch die gesamte Wand samt Mörtel aus reinem Lehm besteht, kann der komplette Bruch gemeinsam neu verwertet werden.

Verbindungstechniken werden nach ihren physikalischen Wirkungsprinzipien in drei differierende Fügearten eingeteilt: die formschlüssige, die kraftschlüssige und die stoffschlüssige Verbindung. Während form- und kraftschlüssige Verbindungen (sowie eine Kombination aus beidem) in der Regel reversibel sind, sind stoffschlüssige Verbindungen meist unlösbar.[20] Baupraktisch wird deshalb meist nur in nasse und trockene Verbindung unterschieden. Die stoffschlüssige Verbindung ist „nass“ – durch Abbinden, Verdunsten oder Abkühlen werden die Verbindungspartner aufgrund von chemischen Kräften zu einer nicht zerstörungsfrei lösbaren Verbindung zusammengehalten. Die form- und kraftschlüssige Verbindung ist „trocken“ – die Fügeteile halten nur durch Ineinandergreifen oder Haftreibung zusammen.[21] Die Kreislaufwirtschaft bevorzugt trockene, reversible Verbindungspunkte. Wenn eine chemische, nasse Verbindung gewählt wird, sollte das Bindemittel schwächer sein als die Fügeteile, damit diese sich von den Rückständen des Bindemittels reinigen lassen. Auch bei den Verbindungen gilt die Regel der Suffizienz. Eine möglichst geringe Anzahl an möglichst wenig

16 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 13.
17 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 119–21.
18 Siehe: Küpfer und Fivet, *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion*, 79–81.
19 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 13.
20 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 106–7.
21 Siehe: ETH Zürich Sustainability Forum, „Nass oder trocken“.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

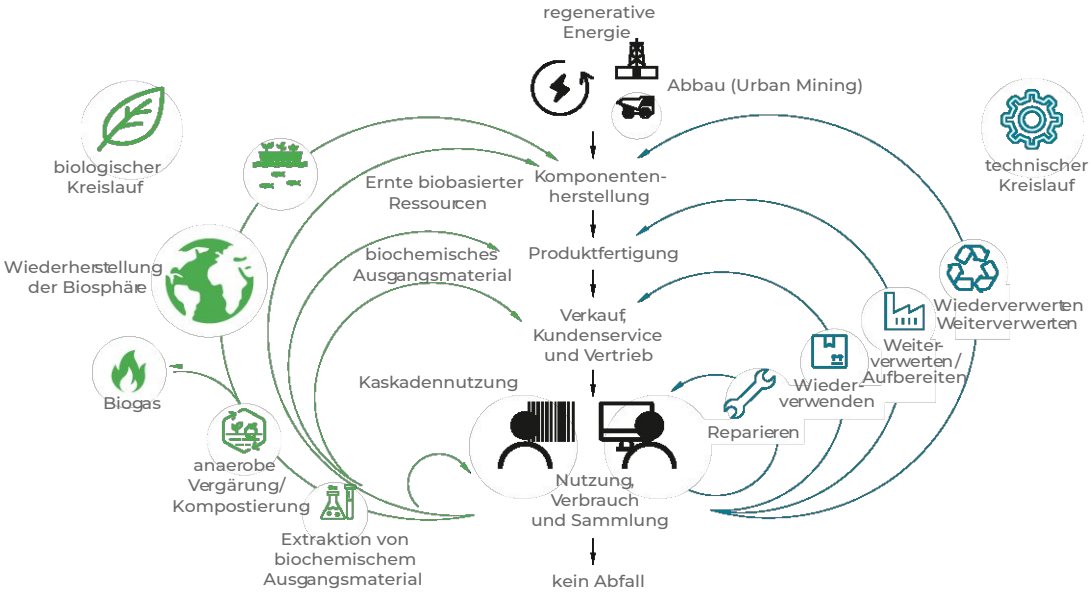



Abb. 4: Diagramm zu verschiedenen Wegen der Kreislaufführung im biotischen und im technischen Kreislauf angelehnt an das Schmetterlingsdiagramm der Ellen MacArthur Foundation. Eigene Darstellung nach Sortenrein Bauen, S. 25.

komplexen Verbindungstechniken erleichtert den Rückbau.[22]

**Kreislaufführung der Materialien**

Angelehnt an William McDonoughs und Michael Braungarts Cradle-to-Cradle-Konzept wird die stoffliche Kreislaufführung von Materialien heute zumeist in zwei grundsätzliche Kategorien unterschieden: den biologischen und den technischen Kreislauf. Im technischen Metabolismus werden Produkte und Materialien durch Prozesse wie Wiederverwendung, Reparatur, Wiederaufbereitung und Wiederverwertung im Kreislauf gehalten. Eine technisch-industrielle Aufbereitung geht stets mit Energieverbrauch einher. Solange diese nicht aus regenerativen Quellen stammt, gelingt ein Ressourcenschutz nur durch Reduktion.[23] Der technische Kreislauf ist dann geschlossen, wenn die Stoffe nach der Verwertung eine gleiche Qualität wie die Primärrohstoffe erreichen. Allerdings lassen sich viele Materialien nicht komplett und nicht auf selbem Qualitätsniveau technisch wiederverwerten.

Im biologischen Kreislauf werden die Nährstoffe aus biologisch abbaubaren Materialien in die Erde zurückgeführt, um die Natur zu regenerieren. Materialien des biologischen Kreislaufs sind nachwachsende Rohstoffe – diese sind allerdings nur dann tatsächlich zirkulär, wenn sie höchstens in dem Maß der Natur entnommen werden, wie sie auch nachwachsen. Theoretisch sind alle Rohstoffe Teil des biologischen Kreislaufs – auch mineralische und fossile Materialien wurden von der Natur geschaffen. Da deren Regeneration allerdings ein Menschenleben um ein Vielfaches überschreitet, ist der biologische Kreislauf dieser Materialien praktisch vernachlässigbar.[24]

**Sortenreinheit**

Sowohl im biotischen als auch im technischen Verwertungskreislauf ist die Sortenreinheit eine grundlegende Voraussetzung für eine gelingende Zirkularität auf gleichbleibender Qualitätsstufe. Störstoffe in Baumaterialien sind meist Zusätze, wie brand- oder verrottungshemmende Mittel, die die Leistungseigenschaften des Hauptmaterials verbessern sollen. Problematisch sind auch Beschichtungen oder Überzüge aus einer anderen Materialgruppe, wie Kunststofflacke auf Holz, und Anhaftungen stoffschlüssiger Verbindungen, wie Klebereste.[25]

22 Siehe: Küpfer und Fivet, *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion*, 79–81.

23 Siehe: Ellen MacArthur Foundation, „The Butterfly Diagram".

24 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 60–63.

25 Siehe: Hillebrandt u. a., 60.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Status Quo

Noch vor 250 Jahren war die gesamte Bauwirtschaft in Europa eine Kreislaufwirtschaft. Gebäude wurden sorgfältig rückgebaut und Bauteile, egal ob Bauholz oder Stein, wurden für neue Bauten wiederverwendet. Fast ausnahmslos wurden lokal vorhandene Materialien verwendet, die am Ende ihrer Nutzungsphase in den biologischen Kreislauf zurückgeführt werden konnten. Aufwendig errichtete Gebäude aus Stein wurden über viele Generationen hinweg genutzt. Unterstützt wurde diese Bauweise durch eine geringe Anzahl unterschiedlicher Baustoffe, den Einsatz funktional vielseitiger Bauteile, lösbare Verbindungstechniken und durch relativ hohe Materialkosten im Vergleich zu Lohnkosten. Mit der einsetzenden Industriellen Revolution wurden der Rückbau und die Wiederverwendung von Gebäuden unwirtschaftlich und zur Seltenheit. Gründe dafür sind die Industrialisierung der Produktion, neue Materialien und Herstellungsverfahren und damit zusammenhängend die wesentlich geringeren Produktions- und Materialkosten. In Kombination mit der Bevölkerungsexplosion hat die Industrielle Revolution zu einem massiv gestiegenen Gebäudebestand geführt.[26]

Heute ist ein großer Teil der auf der Erde vorhandenen Rohstoffe nicht mehr an ihrem Entstehungsort, sondern abgebaut und in anthropogenen, also in von Menschen geschaffenen Lagern verbaut. Allein aufgrund der Masse des Gebäudebestands ist es wenig überraschend, dass dort besonders viele Ressourcen gebunden sind. Damit nimmt die Baubranche eine Schlüsselrolle in der Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft ein. Um den aktuell enormen Ressourcenverbrauch auf ein nachhaltiges Maß zu reduzieren, muss im Bauwesen die Entwicklung seit der Industriellen Revolution hin zu einem linearen, ausbeuterischen Umgang mit Rohstoffen korrigiert werden. Das Prinzip der Kreislaufwirtschaft muss auch auf Gebäude und ihre Materialien angewandt werden, damit diese am Ende ihrer Nutzungsphase nicht als Abfall- sondern wieder als Wertstoffe verstanden werden.[27]

**Ressourcenverbrauch**

Der Ressourcenverbrauch der Bauwirtschaft ist gewaltig. Betrachtet man über die Errichtung von Gebäuden hinaus deren gesamter Lebenszyklus inklusive der Materialbeschaffung, der Errichtung, dem Gebäudebetrieb und der Nachnutzung, so fließt in der EU die Hälfte aller neu gewonnenen Rohstoffe in den Bau. Genauso ist die Baubranche für die Hälfte des Gesamtenergieverbrauchs der Europäischen

26 Siehe: Küpfer und Fivet, *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion*, 78.

27 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 10.

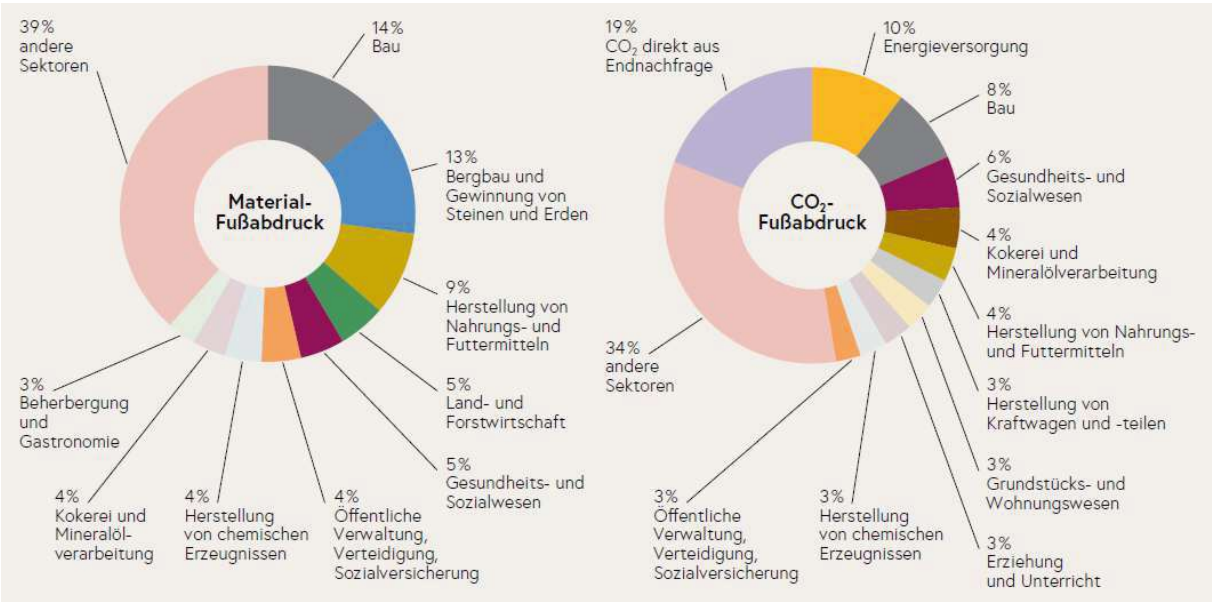



Abb. 5: Materialfußabdruck und CO2-Fußabdruck in Österreich nach Wirtschaftssektoren. Darstellung aus: Grundlagendokument - Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft, S. 40.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

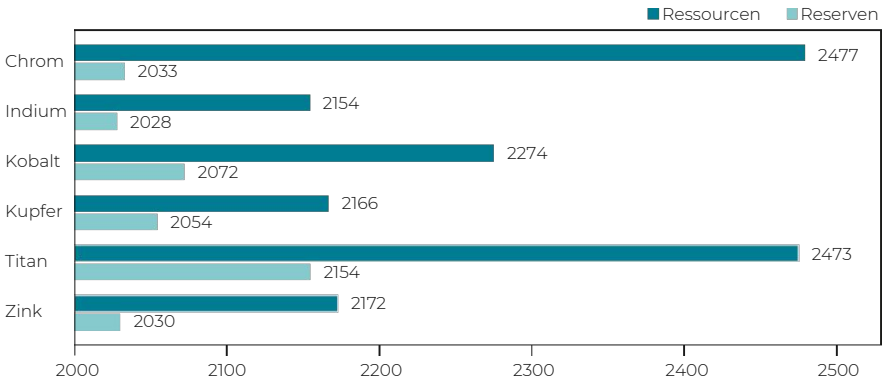



Abb. 6:
Die Darstellung zeigt das prognostizierte Versiegen der Rohstoffquellen. Unterschieden wird in Reserven, also Rohstofflager, die nach dem heutigen Stand der Technik abbaubar sind, und Ressourcen, also Rohstofflager, die aktuell nicht abbaubar sind. Eigene Darstellung nach Atlas Recycling, S. 124.

Union verantwortlich, für 40% der Treibhausgasemissionen und ein Drittel des Wasserverbrauchs.[28]

Das Umweltbundesamt stellt im Rahmen eines Grundlagendokuments zur Kreislaufwirtschaft den Ressourcenverbrauch in Österreich differenziert dar. Der Material-Fußabdruck, also der Indikator für Rohmaterialverbrauch pro Kopf lag in Österreich 2017 bei 33 Tonnen im Jahr. Damit liegt Österreich unter den EU-Ländern im Spitzenfeld und fast 50% über dem EU-Durchschnitt. Die Abbildung 5 zeigt, wie der österreichische Material-Fußabdruck auf die einzelnen Wirtschaftssektoren aufgeteilt ist. Unter „Bau“ wird in dieser Darstellung die Bauwirtschaft im engeren Sinn verstanden, also nur die Errichtung von Gebäuden, nicht aber deren Betrieb oder die Rohstoffbeschaffung. Trotz dieses engen Betrachtungsrahmens ist die Baubranche mit 14% der materialintensivste Wirtschaftszweig in Österreich. Auch der Anteil am $CO_2$-Fußabdruck, also dem Maß für alle direkt oder indirekt entstandenen Treibhausgasemissionen, ist in der Bauwirtschaft mit 8% besonders groß. Nur der Wirtschaftszweig der Energieversorgung trägt noch mehr zum österreichischen $CO_2$-Fußabdruck bei. Betrachtet man diese beiden wichtigen Indikatoren zusammen, so hat die Baubranche unter den Wirtschaftszweigen in Österreich den größten Ressourcenverbrauch.[29]

**Rohstoffknappheit**

Der große Verbrauch von Primärrohstoffen durch die Bauindustrie gelangt bei manchen Materialien bald schon an die globalen Grenzen. Einige wichtige Rohstoffe sind nur noch unter erschwerten Bedingungen abbaubar. Prominentes Beispiel hierfür ist Wassersand, der für die Beton- und Glasproduktion benötigt wird. Sand, Kies und Zuschlagstoffe sind nach Wasser die am zweithäufigsten genutzten natürlichen Ressourcen der Welt. Da geeignete Lager in der Nähe von urbanen Zentren zu großen Teilen schon aufgebraucht sind, verschiebt sich der Sandabbau in immer entlegenere Gebiete der Welt – mit schwerwiegenden Folgen für die ökologische und soziale Nachhaltigkeit.[30] Auch die natürlichen Reserven von anderen im Bau viel verwendeten Materialien wie den Metallen Kupfer und Zink drohen innerhalb der nächsten Jahrzehnte zu versiegen (siehe Abb. 6).[31] Neben der Rohstoffverknappung selbst ist auch die Abhängigkeit von Importen teils problematisch. Besonders Metalle wie Aluminium, Kupfer, Stahl und Zink, aber auch Erdöl als Basisrohstoff für Kunststoffe können nur aus wenigen Ländern bezogen werden. Da einige dieser Länder als politisch und wirtschaftlich instabil eingeschätzt werden und Menschenrechtsverletzungen bei der Rohstoffgewinnung vorkommen, ist die wirtschaftliche Abhängigkeit von ihnen bedenklich.[32]

**Abfall**

Neben Ressourcenschonung ist die Abfallreduzierung erklärtes Ziel der Kreislaufwirtschaft. Aktuell ist die Entwicklung in Österreich jedoch diesbezüglich gegenläufig. Von 2015 bis 2019 hat sich das

28 Siehe: Europäische Kommission. Generaldirektion Umwelt, *Level(s). Maßnahmen zu den Gesamtauswirkungen des Bausektors ergreifen*, 5.

29 Siehe: Moser, Karigl, und Benda-Kahri, „Grundlagendokument - Entwicklung einer Kreislaufwirtschaftsstrategie“, 37–41.

30 Siehe: Vereinte Nationen, „Global Sand Observatory Initiative“.

31 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 124.

32 Siehe: Hillebrandt u. a., 61.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

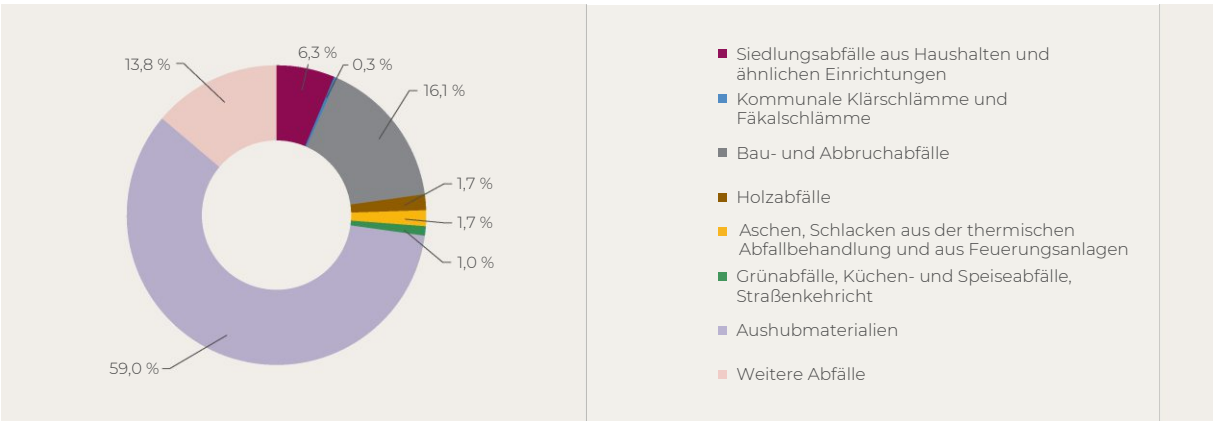



Abb. 7: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens im Jahr 2019 nach Abfallgruppen. Eigene Darstellung nach Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich, S. 15.

Gesamtabfallaufkommen um 20% erhöht – besonders aufgrund der steigenden Mengen an Bodenaushub und Bauabfällen.[33]

Die Abbildung 7 zeigt das Mengenverhältnis der verschiedenen Abfallgruppen untereinander. Die Kategorie „Bau- und Abbruchabfälle", die jedoch nur die mineralischen Bau- und Abbruchabfälle umfasst, ist mit 16,1% die zweitgrößte Abfallkategorie.[34] Auch unter den „Holzabfällen" ist der größte Anteil Bau- und Abbruchholz.[35] Die bei weitem größte Abfallkategorie Aushubmaterialien umfasst Bodenaushub und steht auch in Verbindung mit Bautätigkeiten. Es ist davon auszugehen, dass Tiefbau-Großprojekte wie die Errichtung des Brenner-Basistunnels einen wesentlichen Anteil dieser Abfallkategorie ausmachen,[36] jedoch sind auch hier Anteile von Hochbau-Abfällen in Form von Kelleraushüben und Erdarbeiten eingerechnet. Hinzu kommt die getrennte Erfassung von gefährlichen Abfällen wie Asbest, die auch in Abbrucharbeiten anfallen. Insgesamt kann der Anteil an Hochbau- und Abbruchabfällen also deutlich höher eingeschätzt werden als 16,1 %. Ein Bericht des Umweltbundesamt geht davon aus, dass der Hochbau insgesamt für über die Hälfte aller Abfallströme in Österreich verantwortlich ist.[37]

In der Gruppe der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle entfallen nahezu zwei Drittel des Abfalls auf die Kategorien gemischter Bauschutt und Betonabbruch. Da sich Beton seit den 1960er Jahren konstant als meistgenutzter Baustoff behaupten kann, ist es wenig überraschend, dass er seit einigen Jahren auch das meistvertretene Abbruchmaterial ist.[38] 1,3 Millionen Tonnen mineralischen Bau- und Abbruchmaterials werden in Österreich jährlich deponiert – das sind 14% dieser Abfallkategorie. Die Deponierung von Bauabfällen ist ökologisch fatal, denn sie trägt zu Bodenversiegelung und Umweltzerstörung bei. Es finden sich kaum noch geeignete Orte für neue Deponien, während der Bedarf an zu deponierendem Bauabfall zunimmt. In Deutschland werden aufgrund von ausgereizten Deponiekapazitäten für manche Regionen schon Entsorgungsengpässe befürchtet.[39] Auch in Österreich wäre das freie Deponievolumen von Baurestmassendeponien in weniger als 9 Jahren aufgebraucht, wenn sich der Anteil an Deponieabfällen nicht reduziert.[40]

Der größte Anteil der Bau- und Abbruchabfällen wird verwertet. Hölzer werden primär thermisch verwertet – zur Energiegewinnung wird das in ihnen gebundene $CO_2$ wieder freigesetzt.[41] Mineralische Bau- und Abbruchabfälle werden in speziellen Behandlungsanlagen zu Recycling-Gesteinskörnungen zerkleinert und als Recyclingbaustoffe weiter verwertet.[42] Trotz des Namens Recyclingbaustoff handelt es sich hierbei jedoch nicht um Recycling auf hohem Qualitätsniveau, sondern um

33 Siehe: Doris, *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021*, 10.
34 Siehe: Doris, 15.
35 Siehe: Doris, 68.
36 Siehe: Doris, 11.
37 Siehe: Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 7.
38 Siehe: Leal Filho, *Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele*, 124–25.
39 Siehe: Leal Filho, 118–19.
40 Siehe: Doris, *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021*, 150.
41 Siehe: Doris, 69.
42 Siehe: Doris, 72–73.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Downcycling, also um eine Verwertung mit geringerem Leistungsspektrum als das Ausgangsmaterial.[43] Weniger als 3% der Recyclingbaustoffe werden „bautechnisch verwendet“, also in Form von Zuschlagsstoffen in neuem Beton.[44] Der Hauptverwertungsweg für mineralischen Bauschutt ist die Untergrundverfüllung beim Straßen- und Wegebau. Da diese Verwertungsmöglichkeit jedoch Sättigungseffekte erwartet und da das gesetzliche Schutzniveau für Boden und Grundwasser voraussichtlich höher wird, könnte die Nachfrage nach Deponierung von Bauschutt weiter ansteigen.[45]

43 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 19.

44 Siehe: Doris, *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021*, 74.

45 Siehe: Leal Filho, *Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele*, 118–19.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Aktuelle Entwicklungen

„Es kommt [..] auf das Zusammenspiel von Wirtschaft und Politik an, um marktfähige Lösungen in einem sicheren regulativen Umfeld zu entwickeln. Utopien müssen sich an der Realität messen lassen, sie müssen es aushalten, dass man ihr Gewicht anhand realer Verbindlichkeiten misst, auch wenn das manchmal schmerzlich ist und womöglich zurückwirft.“ [46]

Wie die Betrachtung des Status Quo zeigt, ist die Bauwirtschaft in Österreich noch stark linear organisiert. Gleichzeitig wird deutlich, dass dieses Wirtschaften in mehreren Dimensionen an die globalen Grenzen stößt. Obwohl das Konzept der Kreislaufwirtschaft schon seit einigen Jahrzehnten diskutiert wird und das Potenzial hat, viele Probleme im Bauwesen abzuschwächen, konnte es sich bisher weder in der Baubranche noch in anderen großen Wirtschaftszweigen durchsetzen. Laut dem „Circularity Gap Report“ sind aktuell nur 9,7% der österreichischen Wirtschaft kreislauffähig.[47]

*„Im Wesentlichen haben wir immer noch eine Linearwirtschaft, keine Kreislaufwirtschaft. Das ist ökologisch fatal, ökonomisch leichtfertig und sozial unintelligent.“* [48]

Ein Grund dafür ist die große Komplexität von Bauprojekten mit einer Vielzahl an Stakeholder:innen und Schnittstellen, die es für ein Einzelunternehmen in der Baubranche allein schwer möglich macht, kreislauffähig zu agieren.[49] Solange die Akteur:innen in der Baubranche keine wirtschaftlichen Anreize in der Kreislauffähigkeit sehen, werden sie höchstwahrscheinlich nicht bereit sein, sich dafür zu engagieren und zusammenzuarbeiten. Die bisher sehr geringen Preise für Primärrohrstoffe, besonders im Vergleich zur Aufbereitung von Recyclingrohstoffen, beflügeln die Linearwirtschaft.[50] Doch die perspektivisch limitierte Verfügbarkeit vieler Primärrohstoffe und die Verknappung der Deponieplätze, gepaart mit den zuletzt drastisch gestiegenen Energiepreisen, sorgen auch in der Baubranche für ein Umdenken und wirtschaftliche Anreize für ressourcenschonendere Lösungen.

**Mineralische Baustoffe**

Dies gilt in besonderem Maße für die mineralische Massivbauweise, welche einen besonders hohen Anteil am Ressourcenverbrauch, den Treibhausgasemissionen und den Bauabfällen hat.[51] Hinter der aktuell meistverbreiteten Bauweise steht eine große Baustoffindustrie, die nun viel Forschung und Entwicklung in das Schließen der Stoffströme auf Materialebene und die Reduktion des Energiebedarfs in der Herstellung investiert. Der Bericht „Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen“ identifiziert für Beton und Zement besonders die Reduktion der herstellungsbedingten $CO_2$-Emissionen und nachgereiht den Einsatz von Rezyklat-Zuschlägen als Entwicklungsfelder. Beim Baustoff Ziegel ist die Reduktion der herstellungsbedingten $CO_2$-Emissionen dank Elektrifizierung der Produktion leichter. Das Schließen der Stoffströme wird durch hochwertigen Einsatz des Ziegelbruchs in anderen Industrien, wie der Beton- und Zementproduktion, forciert. Gips hat mit einem aktuell hohen Sekundärrohstoff-Gehalt und guter technischer Eignung von sortenreinem Material zum hochwertigen Recycling gute Ausgangsvoraussetzungen. Hier liegen die Probleme in mangelnder sortenreiner Trennbarkeit und dass Gips sowohl bei der Deponierung als auch als Anhaftung an anderen Baustoffen als Problemstoff gilt.[52] Der intensivere Einsatz bereits marktgängiger Recycling-Produkte scheitert zum Teil an der Skepsis der Bauherr:innen, ob diese dieselbe Qualitätsstufe erreichen können wie Primärprodukte.[53]

Der hohe Anspruch an Sortenreinheit, der für ein Baustoff-Recycling notwendig ist, führt auch dazu, dass im Massivbau wieder vermehrt schichtreduzierte oder gar einstoffliche Bauweisen forciert werden. Denn besonders Verbundbaustoffe und

46 Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 7.
47 Siehe: Circle Economy, „The Circularity Gap Report Austria“.
48 Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 7.
49 Siehe: Hart u. a., „Barriers and Drivers in a Circular Economy: The Case of the Built Environment“, 623.
50 Siehe: El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 55.
51 Siehe: Trebut und Pfefferer, *Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen*, 10.
52 Siehe: Trebut und Pfefferer, 30–33.
53 Siehe: Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 15–23.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 8:
Ein Beispiel für das Wiedererstarken des „Einfachen Bauens" ist das Haus 2226 in Lustenau von Baumschager Eberle Architekten. Die Wände sind in monolithischer Ziegelbauweise errichtet. Dank der großen thermischen Masse konnte die Haustechnik wesentlich reduziert werden. Foto: Baumschlager Eberle Architekten.

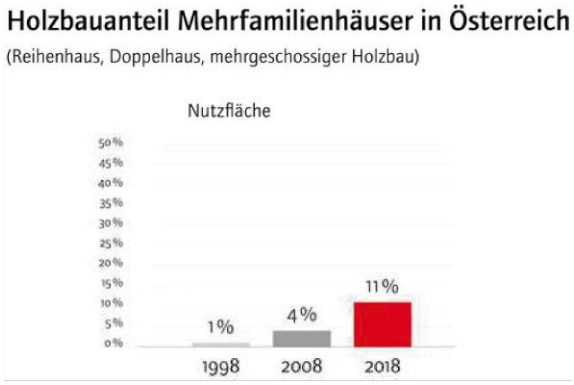



Abb. 9:
Der Holzbauanteil bei Mehrfamilienhäusern in Österreich stieg von 1998 bis 2018 deutlich an, beträgt aber immer noch nur 11%. Darstellung: Pro:Holz Austria: „Wieviel wird mit Holz gebaut?".

Verunreinigungen durch nicht sortenrein lösbare Schichten verhindern eine sortenreine Trennung im Rückbau und damit eine Rückführung in den Materialkreislauf.[54]

Ein mineralischer Baustoff mit sehr guter Eignung zur stofflichen Wiederverwertung erlebt aktuell eine Renaissance im großvolumigen Bauen: Lehm. Da das Material ohne Brennvorgang auskommt, ist erstens sein Energiebedarf in der Herstellung sehr gering und zweitens eine praktisch unbegrenzte Replastizierbarkeit und Wiederverwertung des Baustoffs möglich. Als schadstofffreies Erdmaterial kann es zudem ohne weitere Aufbereitung in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden. 2023 wurde in Deutschland die Norm DIN 18940 veröffentlicht, die Mauerwerk aus tragenden Lehmsteinen als standardisierte Konstruktionsweise zulässt. Gleichzeitig hat eine erste Firma große Erfolge in der industriellen Fertigung von Lehmsteinen erzielt. Angetrieben von einem neuen Marktfeld und dieser Konkurrenzsituation sind seither mehr als ein Dutzend Ziegel- und Kalksandsteinproduzent:innen in die Entwicklung von tragenden Lehmsteinen eingestiegen.[55]

**Biotische Baustoffe**

Mit dem Erstarken eines ökologischen Bewusstseins in der Bevölkerung gewinnt der Holzbau, der in der Industriellen Revolution an Bedeutung verloren hatte, seit den 1970er Jahren wieder an Popularität.[56] Laut einer Studie der Universität für Bodenkultur hat sich der Holzbauanteil in Österreich von 1998 bis 2018 nahezu verdoppelt und beträgt nun 24%. Bei Mehrparteienwohnbauten ist der Anteil allerdings immer noch bei gerade 11%.[57]

Das Material Holz ist in mehrfacher Hinsicht sehr kreislauffähig: Als meistverwendeter nachwachsender Rohstoff und Teil des biotischen Kreislaufs ist sein Stoffstrom von Natur aus geschlossen. Der materialbedingt hohe und weiterhin zunehmende Vorfertigungsgrad im Holzbau, der primär zur Reduzierung der Bauzeit vorangetrieben wird, erfordert auf der Baustelle schnelle, einfache und trockene Verbindungsdetails.[58] Diese Bauweise an eine Rückbaubarkeit und sortenreine Trennbarkeit anzupassen, ist verhältnismäßig einfach.[59] Und da das Material im Wachstum $CO_2$ bindet, ist ein gebautes Holzhaus ein $CO_2$-Speicher. Beim üblichen Entsorgungsweg, der energetischen Verwertung, wird dieses Treibhausgas wieder in die Atmosphäre freigesetzt, weshalb ein möglichst langer Erhalt im Stoffkreislauf – in Form von Wiederverwendung und Kaskadennutzung – forciert werden muss.[60]

54 Siehe: Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 33.

55 Vortrag von Dipl.-Ing. Christof Liebrich: „Moderner Lehmbau in Deutschland", von TU Wien, Netzwerk Lehm eV und Young Earth Builders eV, Wien, 14.03.2024.

56 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 131.

57 Siehe: proHolz Austria, „Wie viel wird mit Holz gebaut?"

58 Siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*, 142–44.

59 Siehe: Hart u. a., „Barriers and Drivers in a Circular Economy: The Case of the Built Environment", 623.

60 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 133.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Dafür ist besonders naturbelassenes Holz, frei von Klebstoff oder Metallverbindungen, geeignet, weshalb aktuell viele monomaterielle Fügetechniken entwickelt werden.[61]

Während als tragender biotischer Baustoff im mehrgeschossigen Bauen nur Holz in Frage kommt, können für andere Funktionen – besonders als Dämmstoffe und im Ausbau –viele weitere regenerativ Rohstoffe genutzt werden. Da auch diese Materialien Kohlenstoffspeicher sind und da sie, sofern schadstofffrei und sortenrein, über eine Kompostierung zurück in den biotischen Kreislauf geführt werden können, fördert ihr vermehrter Einsatz Ressourcenschonung und Abfallvermeidung. Auch hier ist ein nachhaltiger Anbau und die effiziente Nutzung von Rohstoffen, zum Beispiel in Form von Nebenprodukten, erstrebenswert.[62] Die (Weiter-)Entwicklung von Dämm- und Baustoffen aus nachwachsenden Quellen wird als wichtiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft angesehen.[63] Gerade Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind bereits am Markt, doch da die Bauvorschriften sich aktuell mehr auf den Energieverbrauch in der Betriebsphase als auf die graue Energie im Gebäude konzentrieren, sind sie den etwas leistungsstärkeren, aber deutlich unökologischeren fossilen Dämmstoffen unterlegen.[64]

**Wiederverwendung**

Die Wiederverwendung von Bauteilen und Produkten ist der direkteste Weg der Kreislaufführung und – weil Energie zur Wiederaufbereitung eingespart wird – meist auch die ökologisch beste Nutzungsform. Hier wird in Abgrenzung zur Wiederverwertung das Element in seiner originalen stofflichen Gestalt erneut eingesetzt.[65] Durch Leuchtturmprojekte wie der Kopfbau-Halle 118 in Winterthur vom Baubüro In Situ wurde der Wiederverwendung jüngst viel Aufmerksamkeit geschenkt. Auch Unternehmen, die mit gebrauchten Bauteilen handeln, wie das Baukarussell in Wien oder Concular in Deutschland, fördern die Wiederverwendung. Doch der Markt für wiederverwendete Produkte ist aktuell sehr klein – er besteht hauptsächlich aus Antiquitäten und nachrangig aus Fenstern und Türen, Belägen und Materialien für den Außenbereich. Nicht nur Gebrauch und Beschädigung, sondern auch mangelnde Akzeptanz und technische bzw. rechtliche Neuerungen schränken die Wiederverwendung ein. Entsprechen die Bauteile nicht mehr den aktuellen Vorgaben, ist ihr ReUse gänzlich verboten.[66] Der große Arbeitsaufwand, logistische Schwierigkeiten und die notwendige Prüfung auf Schadstofffreiheit machen die Wiederverwendung zudem oft unwirtschaftlich.[67]

Neue Geschäftsmodelle, wie das Leasing kurzlebiger Bauprodukte und die Hersteller:innenrücknahme, werden im Bericht „KreislaufBAUWirtschaft“ als vielversprechenderer Weg hin zu mehr Wiederverwendung angesehen.[68] Indem Unternehmen ihre eigenen Produkte zurücknehmen, gegebenenfalls wiederaufbereiten und neu auf den Markt bringen, sind Fragen der Haftung und der Liefergarantie wesentlich leichter zu lösen. Leasing-Angebote gibt es heute insbesondere für Haustechnik- und Innenausbau-Produkte, zum Beispiel Beleuchtung, Heizung und Büroeinrichtung. Laut der Studie „Geschäftsmodelle für zirkuläres Bauen und Sanieren“ ist dieses „As-a-Service-Modell“ auch für viele weitere Produktarten denkbar, wie Böden, Fassaden oder sogar konstruktive Bauteile. Rücknahmevereinbarungen werden bereits für Systembauteile wie Doppelböden, Fenster und Systemwände, aber auch konstruktive Bauteile wie Holzkonstruktionen und für Lehm-Baustoffe[69] angeboten. Sie verschaffen werterhaltenden Produkten einen wirtschaftlichen Vorteil am Markt, indem die Kund:innen durch Rückkauflösungen Geld erhalten und Entsorgungskosten sparen und indem die Firmen durch Wiederaufbereitung der Produkte einen erneuten Gewinn erzielen können.[70]

Da Gebäude und Bauteile meist einen sehr langen Produktlebenszyklus haben und dabei oft mehrfach den Besitz wechseln, ist ihr Lebensende für die baubeteiligten Unternehmen, die sich eher auf

61 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 48.

62 Siehe: Hillebrandt u. a., 60–61.

63 Siehe: Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 22.

64 Siehe: Kanters, „Circular Building Design: An Analysis of Barriers and Drivers for a Circular Building Sector“, 13.

65 Siehe: El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 55.

66 Siehe: Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 15–23.

67 Siehe: Kromoser u. a., *Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien*, 37; El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 55.

68 Siehe: Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 21–24.

69 Die Firma Claytec unterstützt Rücknahmevereinbarungen. Persönliches Interview mit M.Sc. Simon Breidenbach von der Firma Claytec GmbH & Co KG, digital, vom 01.06.2023.

70 Siehe: Padalkina, Schäufele, und Teuffel, „Geschäftsmodelle für zirkuläres Bauen und Sanieren - Die Rolle innovativer Geschäftsmodelle in der Transformation des Bausektors“, 26–28.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 10:
K.118 – Kopfbau Halle 118 in Winterthur (2021) von Baubüro In-Situ. Foto: Martin Zeller / Lea Hummel.

kurzfristige Gewinne konzentrieren, bisher außerhalb des Blickfelds.[71] Die Bereitschaft, modulare, rückbaubare und somit wiederverwendbare Konstruktionen zu forcieren, hängt in der Praxis noch stark von individueller Motivation der Bauherr:innen ab und wird vielmals aufgrund von Mehrkosten in der Planung abgewiesen.[72] So macht die Wiederverwendung aktuell trotz der ökologischen Vorteile nur einen geringen Marktanteil aus.[73]

71 Siehe: Eberhardt, Birgisdottir, und Birkved, „Potential of Circular Economy in Sustainable Buildings".

72 Siehe: Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 23.

73 Siehe: El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 55.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Rechtliche Rahmenbedingungen

Einen sehr großen Hebel auf die Baubranche und die Wirtschaftlichkeit grundsätzlich haben die politischen Rahmenbedingungen. Politische Groß-Maßnahmen, die Kreislaufwirtschaft zu fördern, wurden in der jüngsten Vergangenheit einige ergriffen. Das wohl bekannteste Rahmenwerk ist der European Green Deal – aber auch auf nationaler Ebene ist die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie zu nennen. Umgesetzt werden diese großen Rahmenwerke durch spezifische Richtlinien, Gesetze und Verordnungen – zum Beispiel durch die neu erarbeitete OIB-Richtlinie 7. Für die Kreislaufwirtschaft ist besonders das Abfallrecht interessant: die EU-Abfallrahmenrichtlinie, das Abfallwirtschaftsgesetz und die Deponieverordnung.

## Der European Green Deal und die Taxonomie

Der European Green Deal ist die 2019 von der EU gefasste politische Selbstverpflichtung, Europa bis 2050 zu einem klimaneutralen Kontinent zu machen.[74] Eine entscheidende Maßnahme, um dieses Ziel zu erreichen, ist die Entkoppelung des wirtschaftlichen Wachstums vom Ressourcenverbrauch: Die europäische Wirtschaft soll von einem linearen Modell hin zu einem zirkulären System umgebaut werden. Indem Primärrohstoffe durch Recyclingrohstoffe ersetzt werden, will die EU ein wettbewerbsfähiger Wirtschaftsstandort bleiben.[75]

Für die Transformation der europäischen Wirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft sind große Investitionen nötig. Auch wenn die Europäische Union selbst ein Drittel ihrer Finanzmittel für die Umsetzung des Green Deals vorsieht, besteht weiterhin eine Finanzierungslücke. Mithilfe der EU-Taxonomie sollen gezielt Finanzströme hin zu umweltfreundlichen und kreislaufgerechten Investitionen gelenkt werden, um diese Lücke zu schließen. Mit der Taxonomie bewertet die EU, welche wirtschaftlichen Tätigkeiten als ökologisch nachhaltig gelten. Sie müssen einem der sechs gesetzten Umweltziele erheblich dienen und dürfen gleichzeitig kein anderes Ziel relevant beeinträchtigen. Große Unternehmen und Banken müssen jährlich einen Bericht zur Taxonomiekonformität ihrer Investitionen veröffentlichen: So soll Greenwashing unterbunden und mithilfe eines Schneeballeffekts die Förderung nachhaltigen Wirtschaftens in allen Unternehmen vorangetrieben werden.[76]

Die sechs selbstgesetzten Umweltziele der EU sind:

1. Klimaschutz
2. Klimawandelanpassung
3. Schutz von Wasser- und Meeren
4. Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft
5. Verminderung der Umweltverschmutzung
6. Schutz von Biodiversität und Ökosystemen

Für alle Ziele und relevanten Branchen wurden Maßnahmen festgelegt, wie diese erreicht werden können und was eine relevante Beeinträchtigung wäre. Das Ziel 4 „Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft“ ist für diese Arbeit fraglos das Interessanteste. Es sieht für den Neubau von Immobilien folgende Kriterien vor:

1. Alle anfallenden Bau- und Abbruchabfälle müssen nach EU-Abfallrecht behandelt werden. Mindestens 90 Masse-% des Abbruchs werden für eine Wiederverwendung oder ein Recycling (exklusive Verfüllung) vorbereitet.
2. Das Treibhauspotenzial im Lebenszyklus wird berechnet und offengelegt.
3. Die Gebäude beinhalten Entwurfskonzepte für Anpassungsfähigkeit und Rückbau.
4. Durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen werden Primärrohstoffe vermieden. Die drei Baustoffkategorien mit den höchsten Masse-An-

74 Siehe: Europäische Kommission, „Der europäische Grüne Deal“.
75 Siehe: Ballester und Zaroffe, „Der Kreislaufwirtschaftsaktionsplan als wirtschaftliches Kernstück des Green Deal“, 379–80.
76 Siehe: Ballester und Zaroffe, 397–98.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

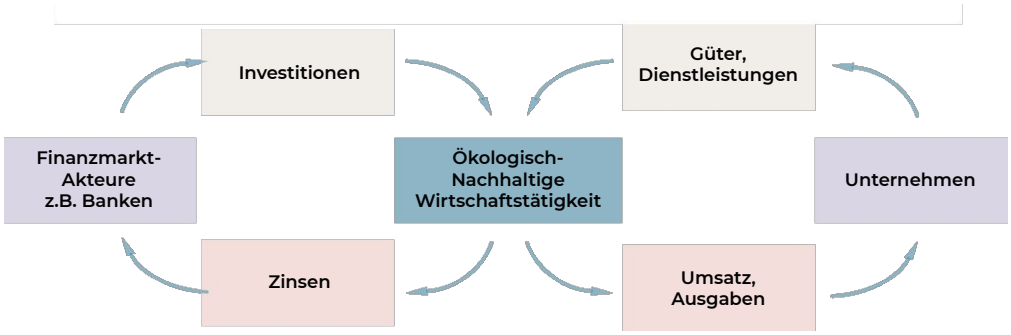



Abb. 11:
Wirkungsdiagramm der EU-Taxonomie. Über die Regulierung der Finanzwirtschaft wird indirekt die Realwirtschaft zu ökologisch-nachhaltigerem Handeln angehalten. Eigene Darstellung nach WKO: „EU-Taxonomie-Verordnung".

teilen enthalten folgende Höchstmengen an Primärrohstoffen:
   a. Beton, Naturstein, Agglomeratstein: 70 %
   b. Ziegel, Fliesen, Keramik: 70 %
   c. Biobasierte Kunststoffe: 80 %
   d. Glas und Mineralfaser-Dämmstoffe: 70 %
   e. Nicht biobasierte Kunststoffe: 50 %
   f. Metalle: 30 %
   g. Gips: 65 %
5. Elektronische Daten über das Gebäude und seine Baustoffe werden gesammelt und zur Verfügung gestellt – zur Wartung, Rückgewinnung und Wiederverwendung von Gebäude(teilen).

Hinzu kommt die Anforderung, erhebliche Beeinträchtigungen für andere Umweltziele zu vermeiden. Dazu zählen unter anderem ein geringer Primärenergiebedarf, der Verzicht auf schadstoffemittierende Baustoffe und das Verbot, auf unbebautem Land mit hoher biologischer Vielfalt oder Bodenfruchtbarkeit zu bauen.[77]

Eine vor der Veröffentlichung der Maßnahmen durchgeführte Marktstudie mehrerer europäischer Green Building Councils ergab, dass die Kriterien zur Vermeidung von Beeinträchtigungen für andere Umweltziele relativ leicht zu erfüllen sind. Wesentlich schwerer taten sich die untersuchten Referenzprojekte beim Erfüllen der Kriterien zum Übergang in die Kreislaufwirtschaft. Besonders der ausreichende Einsatz von Sekundärmaterialien konnte in vielen Bauprojekten aufgrund mangelnder Verfügbarkeit qualitativer Materialien nicht realisiert werden. Es wurde kritisiert, dass die Anforderungen für das Umweltziel 4 „Übergang in eine Kreislaufwirtschaft" aktuell deutlich schwerer zu erfüllen sind als jene für das Umweltziel 1 „Klimaschutz". Dafür muss bei einem Gebäudeneubau unter 5000 m² lediglich ein 10% geringerer Primärenergiebedarf als für ein Niedrigstenergiegebäude erreicht werden.[78] Da durch den geringeren Heizbedarf effektiv Betriebskosten gespart werden, ist dieses Ziel für Bauherr:innen auch ohne Taxonomie lukrativ. Die Studienverfasser:innen befürchteten deshalb, dass sich Unternehmen vornehmlich auf die Umsetzung des Umweltziels 1 fokussieren und forderten, dieses zu verschärfen.[79] Diese vorab geäußerte Kritik ist in die finale Version des Ziels Kreislaufwirtschaft eingeflossen, sodass die geforderten Maßnahmen leicht abgemildert wurden. Das Ungleichgewicht zu Ziel 1 bleibt bisher jedoch bestehen.

Insgesamt ist zu begrüßen, dass der European Green Deal und die EU-Taxonomie die Kreislaufwirtschaft explizit fördern und auf denselben Rang wie andere Umweltziele heben. Die Definierung klarer Maßnahmen und die Zielsetzung, Stoffströme auf Materialebene zu schließen, sind sehr zu begrüßen. Die Tatsache, dass der Anteil an Sekundärrohstoffen für viele Baustoffkategorien derzeit schwer zu erfüllen ist, begünstigt andere, zirkulärere Bauweisen wie den Holz- und Lehmbau, für die keine Vorgaben zum Sekundärrohstoffanteil gestellt werden, sowie die direkte Wiederverwendung von Baustoffen, die per se keine Primärrohstoffe enthalten. Auf Dauer müssen die definierten Ziele allerdings in ihrer Umsetzbarkeit angeglichen und die Kreislaufwirtschaft um einige Aspekte ergänzt werden.

77 Siehe: Europäische Kommission, Delegierte Verordnung (EU) 2023/2486 der Kommission vom 27. Juni 2023 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates, 52–55.

78 Siehe: Europäische Kommission, Delegierte Verordnung (EU) 2021/2139 der Kommission vom 4. Juni 2021 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates, 124–26.

79 Siehe: Hartenberger u. a., „Is the Real Estate Industry Ready for a Circular Economy?"



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Österreichs Kreislaufwirtschaftsstrategie

Wichtigstes nationales Instrument zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft ist die 2022 beschlossene österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. Im Prinzip gleichen die Visionen der Kreislaufwirtschaftsstrategie jenen des European Green Deals. Bis 2050 sollen die Treibhausgasemissionen auf netto null reduziert und der Ressourcenverbrauch sowie das Abfallaufkommen massiv verringert werden. Zudem wird „der verbleibende Rohstoffbedarf [...] weitgehend durch biogene Rohstoffe und durch qualitativ hochwertige nachhaltig gewonnene Sekundärrohstoffe aus dem Recycling gedeckt und damit die anthropogenen Stoffkreisläufe geschlossen."[80]

Die Kreislaufwirtschaftsstrategie formuliert Ansätze, um die gesamte österreichische Wirtschaft zu transformieren, bevor sie auf einige Sektoren gezielt eingeht. Allgemeine Maßnahmen sind die Anpassung rechtlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen, die Schaffung von Marktanreizen für Unternehmen, neue Förderungs- und Finanzierungsmöglichkeiten sowie Investitionen in Forschung, Technologie und Innovation, insbesondere im Bereich der Digitalisierung. Des Weiteren sollen bestehende rechtliche Hürden für eine Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft identifiziert und behoben werden – besonders relevant ist das Abfallrecht.[81] Dieses wird in nachfolgenden Kapiteln vertieft betrachtet.

Auf den Sektor Bauwirtschaft und Infrastruktur gehen die Verfasser:innen der Strategie aufgrund des großen Rohstoffbedarfs und des vielen ungenutzten Kreislaufpotenzials in der Branche spezifisch ein. Sie identifizieren drei übergeordnete Ziele für die Baubranche:

1. „Gebäude werden kreislauforientiert unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen [...] entwickelt. Der Fokus liegt dabei auf Langlebigkeit, Nutzungsflexibilität, Wartungsreduktion [...], modularer Bauweise, Trennbarkeit, Wiederverwendbarkeit von Bauteilen, Rezyklierbarkeit der verwendeten Baustoffe sowie auf der Verwendung eines möglichst hohen Anteils an nachhaltigen Baustoffen und Sekundärbaustoffen.
2. Die Nutzungsdauer von bestehenden Gebäuden wird durch Wartung und Sanierung verlängert. [...]
3. Die stoffliche Verwertung von Bodenaushubmaterial, Bau- und Abbruchabfällen wird, sofern ökologisch und ökonomisch zweckmäßig, erhöht. Erreicht wird das durch verbesserte Trennung beim Rückbau bzw. Abbruch, Entfernung von Schadstoffen, verwertungsorientierten Rückbau sowie neue Verwertungstechnologien und Geschäftsmodelle."[82]

Zur Erreichung dieser Ziele werden 17 Maßnahmen definiert. Großer Fokus liegt dabei auf der Entwurfsphase und Raumplanung, da gerade in den ersten Entscheidungsphasen der größte Einfluss auf die Bauaufgaben besteht. Ressourcenschonende und zirkuläre Bauweisen werden bevorzugt gefördert – explizit die Erhöhung der Materialeffizienz und Bauweisen mit leichter Rückbaubarkeit und Flexibilität. Auch die Anwendung der Hoch- und Tiefbaukriterien des Nationalen Aktionsplans für eine nachhaltige öffentliche Beschaffung (naBe) sowie der Einsatz kreislauffähiger Bauprodukte sollen gefördert und Rückbaukonzepte für Gebäude vorgeschrieben werden. Die Verlängerung der Nutzungsdauer von Gebäuden und Bauprodukten soll durch eine grundsätzliche Priorisierung von Sanierung vor Neubau, einer österreichweiten Abbruch-Bewilligungspflicht und verpflichtende Nachnutzungskonzepte für Gebäude bereits zur Baubewilligung erreicht werden. Auch Wiederverwendung, Recycling und Verwertung werden durch die Schaffung eines praxisorientierten Rechtsrahmens für ReUse-Bauteile, das Schließen von stofflichen Verwertungskreisläufen von Baumaterialien, finanzielle Anreize für Recyclingprodukte, digitale Materialdokumentation und einem Marktplatz für ReUse Bauteile gestärkt.[83]

Die Ziele und Maßnahmen der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie sind sehr umfassend und decken die Möglichkeiten und Bedürfnisse für eine Kreislaufwirtschaft am Bau gut ab. Damit sie rechtlich bindend werden, müssen diese Ziele allerdings noch in die bestehenden Gesetze und Verordnungen implementiert werden.

80 BMK, *Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*, 13.
81 Siehe: BMK, 25 ff.
82 BMK, 52–53.
83 Siehe: BMK, 53–54.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## OIB-Richtlinie 7

Eine dieser Maßnahmen der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie ist die „Erarbeitung einer OIB-Richtlinie [...] zur Umsetzung der Grundanforderung 7 [...] der Bauprodukteverordnung [...] in Österreich."[84] Diese Grundanforderung lautet:

„7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen: Das Bauwerk muss derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und insbesondere Folgendes gewährleistet ist:
a) Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können;
b) das Bauwerk muss dauerhaft sein;
c) für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden."[85]

Bereits die bestehenden sechs OIB-Richtlinien gliedern sich entsprechend der EU-Bauprodukteverordnung. Mit der OIB-Richtlinie 7 „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen" wird nun auch die finale siebte Grundanforderung an Bauwerke vom Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) in nationales Recht übersetzt. 2023 erschien bereits ein Grundlagendokument, das die Inhalte der neuen Richtlinie absteckt, bevor sie finalisiert wird und voraussichtlich 2027 in Kraft tritt.[86] Im Kern fordert die Grundanforderung 7 Ressourceneffizienz am Bau und bietet eine gute Grundlage für die Implementierung der Kreislaufwirtschaft. Das Grundlagendokument der neuen OIB-Richtlinie betont klar, dass in diesem Werkzeug die Anforderungen des European Green Deals, der EU-Taxonomie-Verordnung und des ebenfalls europäischen Bewertungsrahmens Level(s) Beachtung finden müssen.[87] Nachfolgend werden die bisher bekannten Inhalte der OIB-Richtlinie 7 zusammengefasst.

**1. Treibhauspotenzial im Lebenszyklus eines Bauwerks**
Während die OIB-Richtlinie 6 den Primärenergiebedarf in der Nutzung abbildet, soll in der 7. Richtlinie das GWP der verbauten Materialien, die sogenannte graue Energie ermittelt werden.

**2. Dokumentation von Materialien & Ressourcen**
Eine Materialaufstellung gibt die Mengen der Bauteile und Massen der Baumaterialien sowie deren wesentliche Eigenschaften (z.B. Nutzungsdauer) an. Sie soll eine Dokumentation der verwendeten Materialien bis zum Ende des Gebäudelebenszyklus gewährleisten.

**3. Bauabfälle & Abbruchmaterialien**
Durch eine systematische Planung und die getrennte Sammlung von Bau- und Abbruchabfällen sollen Wiederverwendung, Recycling und sonstige Verwertung von Elementen und Materialien gesteigert werden. Dafür ist auf Schadstofffreiheit, Einsatz von Recyclingbaustoffen, Trennbarkeit und verwertungsorientierten Rückbau zu achten.

**4. Nutzungsdauer, Anpassungsfähigkeit & Dauerhaftigkeit**
Um eine möglichst hohe Dauerhaftigkeit von Gebäuden zu erreichen, ist auf eine Nutzungsflexibilität der Gebäudestruktur und eine Reparaturfähigkeit von Bauteilen zu achten.

**5. Rückbau**
Bereits in der Planungsphase ist ein Rückbaukonzept zu erstellen, das eine Rückbauanleitung sowie eine Beschreibung der Qualität und Quantität der eingesetzten Baumaterialien beinhaltet. Beim Rückbau sind die Bauteile für eine Wiederverwendung oder ein Recycling vorzubereiten. Eine Wiederverwendung ist anzustreben, andernfalls sind die Materialien für ein optimales Recycling sortenrein zu trennen.[88]

Wie die Ziele der neuen OIB-Richtlinie umgesetzt werden, genaue Messinstrumente oder Grenzwerte, sind bisher nicht bekannt. Die gesetzten Forderungen sind jedenfalls vielversprechend für eine deutliche Steigerung der Zirkularität. Da die Richtlinie bei Inkrafttreten sofort verpflichtend für alle Bauaufgaben wird, ist es sinnvoll, bereits vor 2027 ihre Erfüllung anzustreben.

84 BMK, *Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*, 53.

85 Europäisches Parlament und Europäischer Rat, Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, Anhang I.

86 Siehe: Österreichisches Institut für Bautechnik, „OIB-Grundlagendokument zur Ausarbeitung einer OIB-Richtlinie 7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen", 2.

87 Siehe: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2.

88 Siehe: Österreichisches Institut für Bautechnik, 4–6.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## EU-Abfallrahmenrichtlinie

Die Grundlage für die Umsetzung der Ressourcenschonung bei den Abfallströmen im Bauwesen bildet das Abfallrecht. Hier zu nennen ist besonders die EU-Richtlinie 2008/98/EG, die sogenannte Abfallrahmenrichtlinie. Auf ihr beruht die Abfallgesetzgebung in allen EU-Mitgliedsstaaten, sie betrifft also auch die Bau- und Abbruchabfälle in Österreich. Ihr oberstes Ziel ist die Minimierung negativer Folgen von Abfall auf Mensch und Umwelt. Dazu definiert das Abfallrecht in der Abfallhierarchie die klare Verpflichtung zur Vermeidung, Wiederverwendung und Verwertung.[89] Wesentliche Gedanken der Kreislaufwirtschaft werden also zentral gefordert. Eine Sonstige Verwertung, z.B. Verfüllung oder energetische Verwertung, ist nur einer Beseitigung, also Deponierung, vorzuziehen.[90]

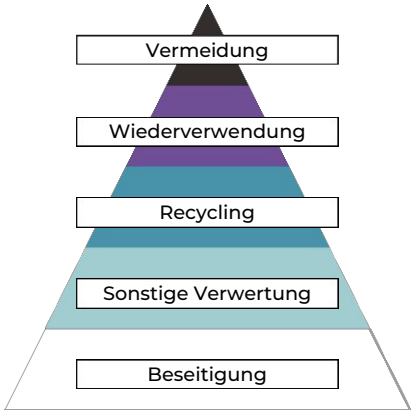



Abb. 12: Abfallhierarchie der EU-Abfallrahmenrichtlinie. Eigene Darstellung.

Gleichzeitig gilt ein Aspekt der Abfallrahmenrichtlinie als Hemmnis für die Kreislaufführung: die Definition des Abfallendes. Ein Stoff muss nicht nur den technischen und rechtlichen Anforderungen genügen und frei von Gesundheitsbelastungen sein, um kein Abfall zu sein. Erst wenn ein Stoff verwertet wurde und wieder Verwendung findet oder am Markt nachgefragt wird, ist sein Abfallende erreicht. Dies hat zum Ziel, dass Abfall nicht unsachgemäß entsorgt wird, erschwert aber den Wiedereinsatz von Stoffen teils erheblich. Da Behörden diese Definition in der Umsetzung sehr unterschiedlich auslegen, ist es für Hersteller:innen teils schwer abzusehen, ob und wann ihr ReUse Produkt das Abfallende erreicht. [91] Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie hat es sich zum Ziel gesetzt, diese Regelung eindeutiger zu definieren und vermehrt ein Abfallende herbeizuführen, um die Verwendung von Sekundärrohstoffen zu erleichtern.[92]

89 Siehe: Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 9.

90 Siehe: Europäisches Parlament und Europäischer Rat, Richtlinie (EU) 2018/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle.

91 Siehe: Leal Filho, *Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele*, 119.

92 Siehe: BMK, *Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*, 27–28.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Deponieverbot

Umgesetzt wird die EU-Abfallrahmenrichtlinie in Österreich mit dem Abfallwirtschaftsgesetz 2002. Dieses regelt den Umgang mit Abfallströmen in Österreich mithilfe von mehreren Verordnungen, zum Beispiel der Deponieverordnung. Diese wurde 2021 novelliert, um die europäischen Vorgaben zur Kreislaufwirtschaft zu implementieren, und enthält nun bereits in § 1 Abs. 2 folgende Passage: „Zur Schaffung einer Kreislaufwirtschaft soll im Einklang mit der Abfallhierarchie angestrebt werden, dass Abfälle, die sich zum Recycling und anderen Formen der Verwertung eignen, zukünftig nicht auf Deponien zur Ablagerung angenommen werden.“[93]

In dieser Novelle der Deponieverordnung wird die Deponierung der meisten mineralischen Baustoffe verboten, um das Recycling diese Stoffe zu fördern. Laut Österreichischem Baustoff-Recycling Verband wurden bereits vor dieser Vorgabe über 80% der mineralischen Fraktion von Baurestmassen verwertet.[94] Um den Betrieben eine Übergangszeit zu gewähren, treten die festgelegten Deponieverbote erst zeitversetzt ein. Bereits ab dem 1. Januar 2024 ist die Deponierung von Ziegeln aus der Produktion, Straßenbruch, Betonabbruch, Asphalt und einigen weiteren mineralischen Baustoffen verboten. Ausnahmen gelten, wenn das Material verunreinigt ist.[95] Ab dem 1. Januar 2026 wird auch die Deponierung von Gips-Wandbauplatten, Gipskarton- und Gipsfaserplatten untersagt. Auch hier gelten Ausnahmen, wenn das Material aufgrund von Verschmutzung oder mangelnder Qualität für ein Recycling nicht geeignet ist.[96] Mit dem 31. Dezember 2026 ist auch die Deponierung von künstlichen Mineralwolleabfällen verboten.[97]

Das Bundesministerium für Klimaschutz erhofft sich von dieser Novelle, die Recycling- und Verwertungsinfrastruktur in Österreich deutlich voranzutreiben. Stoffe, deren Verwertung bereits technisch möglich ist, sollen dank regulativer Vorgaben nun auch in großem Stil recycelt werden.

93 § 1 Abs. 2, Deponieverordnung 2008, Fassung 2021.

94 Siehe: Österreichischer Baustoff- Recycling Verband, „Baustoff-Recycling ist die erste Wahl!“ Anmerkung: Auch Verwertungen mit starkem Qualitätsverlust wie Verfüllungen sind inkludiert.

95 Siehe: § 7 Abs. 14, Deponieverordnung 2008, Fassung 2021.

96 Siehe: § 7 Abs. 15, Deponieverordnung 2008, Fassung 2021.

97 Siehe: § 7 Abs. 10c, Deponieverordnung 2008, Fassung 2021.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Zwischenfazit und Zielsetzung

Die politischen Zielsetzungen zur Etablierung der Kreislaufwirtschaft am Bau sind sehr ambitioniert. Mit der EU-Taxonomie-Verordnung, die finanzielle Anreize schafft, sowie der OIB-Richtlinie 7 und dem Deponieverbot, die klare gesetzliche Vorgaben an die Bau- und Baustoffwirtschaft stellen, wurden und werden sehr potente Strategien umgesetzt, alle Akteur:innen in der Branche zu ressourcenschonendem Handeln zu bewegen.

Ein Abgleich mit dem Status Quo und den aktuellen Entwicklungen in der Baubranche zeigt jedoch eine große Differenz zwischen diesen Zielen und der aktuellen Situation. Die Etablierung der Kreislaufwirtschaft am Bau steht noch völlig am Anfang. Es gibt mehrere Tendenzen zur Ressourcenschonung, aber bisher hat sich noch keine kreislauffähige Bauweise im großmaßstäblichen Bauen durchgesetzt. Die aktuell vorhandenen Potenziale zu identifizieren, ist Ziel dieser Masterarbeit.

Strategien zur Vermeidung von Bauaufgaben und zur Verlängerung der Nutzungszeit, besonders auf städtebaulicher Ebene, im Bestandserhalt und der Umnutzung, sind ein essenzieller Beitrag zur Ressourcenschonung, betreffen aber nicht das Schließen von Stoffkreisläufen im engeren Sinne und werden deshalb in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Zudem sind oftmals aufgrund der Vorstellungen der Bauherr:innen, der Grundstücksform, und der rechtlichen Vorgaben bereits viele Rahmenbedingungen, wie Art und Maß der Nutzung sowie die Forderung nach einer Tiefgarage festgelegt, bevor Planer:innen zu einem Projekt kommen. Im Folgenden werden deshalb die verbleibenden Möglichkeiten für eine zirkuläre Bauweise innerhalb eines engen Handlungsrahmens untersucht. Der Fokus liegt auf dem Nah-Bereich, auf der Baustoff- und Bauteilebene. Schließlich wird die Kreislauffähigkeit von Materialien auf der Stoff-Ebene entschieden, wie die begriffe Primärrohstoff und Sekundärrohstoff verdeutlichen. Hier lassen sich aus dem Kapitel aktuelle Entwicklungen drei grundlegende Strategien zum Schließen der Stoffkreisläufe ableiten:

1. Im Rahmen der etablierten Bauweise, dem mineralischen Massivbau, wird angestrebt, durch den Einsatz von Rezyklaten und einer verstärkten Ausrichtung auf Suffizienz, mittels Schichtreduktion und Einstofflichkeit, die Stoffströme auf Rohstoff- und Materialebene innerhalb des technischen Kreislaufs zu schließen. Hinzu kommen intensive Bemühungen, das Treibhauspotenzial in der Herstellung zu minimieren. Ein möglicher Vorteil dieses Trends ist seine einfache Umsetzbarkeit, die wenig rechtliche Anpassung vonseiten der ausführenden Betriebe bedarf. Dadurch ist eine Skalierbarkeit in der Praxis denkbar.

2. Aus der Nachhaltigkeitsbewegung heraus wird auf den Einsatz von Materialien aus nachwachsenden Quellen und auf natürliche Baustoffe gesetzt, wodurch die Stoffströme im biologischen Kreislauf geschlossen werden können. Dafür sind schadstofffreie, nachwachsende Rohstoffe wie unbehandeltes Holz, aber auch sortenreiner Lehm geeignet. Jedoch ist fraglich, ob alle Funktionen eines Gebäudes mit diesen Materialien erfüllt werden können. Ein erwarteter Vorteil ist das große Maß an $CO_2$-Bindung bei dieser Bauweise.

3. Die Wiederverwendung möglichst vieler Bauteile und Produkte, kombiniert mit einer modularen Bauweise und Vorfertigung, ist vonseiten der Politik der forcierte Weg. Er gilt als direkteste Kreislaufführung und geringster Eingriff in die Umwelt. Aufgrund der aktuell geringen Verbreitung und der notwendigerweise lösbaren Fügetechnik ist auch hier fraglich, ob ein gesamtes Gebäude nach diesem Prinzip errichtet werden kann. Da die Wiederverwendung hauptsächlich von zerstörungsfrei trennbaren Verbindungen abhängt, ist die Materialität der Baustoffe zweitrangig.

Welche dieser drei Strategien aktuell das größte Potenzial für eine Kreislaufführung hat, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit anhand eines Fallbeispiels untersucht. Um für möglichst viele Bauaufgaben eine Aussagekraft zu erlangen, wird als Anwendungsfall eine sehr typische Aufgabenstellung gewählt: ein fünfgeschossiges Mehrparteienwohnhaus mit Unterkellerung im Stadteinzugsgebiet. Anhand dieses Fallbeispiels werden die drei identifizierten Strategien zum kreislaufoptimierten Bauen in drei Gebäudeentwürfe übersetzt, welche sich in Kubatur, Funktion und Nutzung gleichen.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Das Ziel ist es, heute schon in der Baupraxis vorhandene Lösungsansätze aufzuzeigen und ihre Zirkularität zu bewerten. Es werden also keine neuen Methoden entwickelt, sondern bestehende und marktreife Erkenntnisse, Produkte und Bauweisen angewandt. Basierend auf einer tiefergreifenden Recherche zu den jeweiligen Strategien wird für jeden Entwurf die kreislaufoptimierteste Bauweise bestimmt. Im Sinne einer ressourcenschonenden Planung muss immer materialgerecht gebaut werden – das heißt, ausgehend von den geeigneten Materialien werden jeweils die Konstruktion und aufbauend darauf der Ausbau bestimmt. So können nur die Gebäude in Gänze verglichen werden und nicht einzelne Bauteile.

Anhand einer Bewertungssystematik werden die drei Bauweisen anschließend untersucht, um so die aktuell zirkulärste Strategie zu identifizieren. Als Kontrollgruppe zu den drei kreislaufoptimierten Varianten werden auch die bestehenden, konventionell errichteten Gebäude des Fallbeispiels betrachtet.

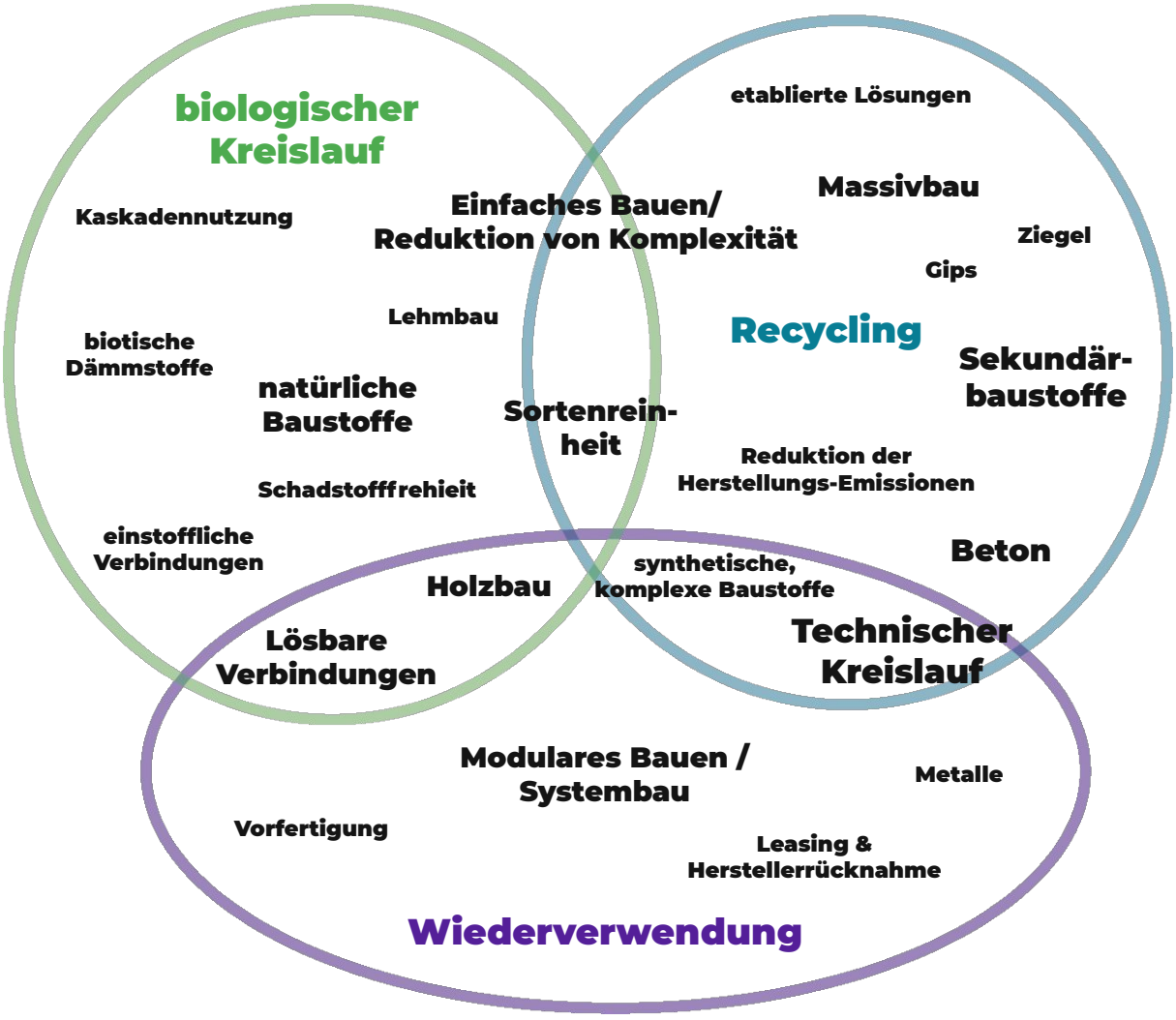



Abb. 13: Zusammenfassung verschiedener Konzepte des kreislauffähigen Bauens in drei Strategien. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 3

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Bewertungskriterien 30
Bewertungssysteme 34
Lebenszyklus 38
Der Urban Mining Index 42

# KREISLAUF-FÄHIGKEIT MESSEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Bewertungskriterien

Für einen Vergleich der Kreislauffähigkeit der drei Bauweisen muss zuerst eine klare Bewertungssystematik festgelegt werden. Da der Fokus dieser Masterarbeit auf der Untersuchung der Gebäude auf Bauteil- und Materialebene liegt, muss eine geeignete Mess-Methodik besonders diesen Aspekt gut abbilden.

Die Vorgaben zur Nachhaltigkeit im Bauwesen sind aktuell sehr dynamisch. Die Regelungen zur Kreislaufwirtschaft als relativ neues Kriterium sind besonders volatil. Die Vorgaben der EU-Taxonomie-Verordnung erschienen erst 2023, die konkreten Inhalte der OIB-Richtlinie 7 werden sogar erst 2025 erwartet. Auch Bewertungssysteme unterliegen dieser Dynamik, sodass die festgelegten Kriterien und deren Gewichtung teils stark variier.

Nachfolgend werden wesentliche Parameter zur Untersuchung der Zirkularität am Bau vorgestellt und die für diese Arbeit relevanten Kriterien ermittelt. Anschließend werden existierende Bewertungssystematiken kurz umrissen, bevor anhand der festgelegten Kriterien eine Auswahl getroffen wird. Zur Festlegung des Betrachtungszeitraums wird das Konzept des Lebenszyklus eingeführt und ein geeigneter Zeitrahmen gewählt. Das Bewertungssystem wird abschließend genauer erläutert.

Zur Ermittlung der Bewertungskriterien wird auf die 2023 von der Universität für Bodenkultur veröffentlichte explorative Studie „Ein Zirkularitätsfaktor für Wien“ zurückgegriffen. Sie beschäftigt sich damit, wie die Zirkularität von Bauwerken erfasst und verglichen werden kann. Dazu werden vorhandene Bewertungsmodelle analysiert und darauf aufbauend mögliche Bewertungsindikatoren zur Kreislauffähigkeit festgestellt. Dass die Studie eine österreichische Perspektive einnimmt und einen Fokus auf die hiesigen Systeme und Rechtslage setzt, ist für diese Arbeit besonders interessant.

Insgesamt identifiziert die Studie die in der folgenden Abbildung dargestellten acht Indikatoren als besonders relevant und bewertbar für eine Kreislauffähigkeit. Das Mindestmaß an notwendiger Datengrundlage für eine Bewertung bilden laut der Studie eine Auflistung aller verbauten Materialien sowie eine Ökobilanzierung – stets unter der Prämisse eines Lebenszyklusdenkens. Das Wissen um die verbauten Materialien wird vor allem für die Bemessung weiterer Kriterien benötigt. Eine vollständige Ökobilanzierung mit Betrachtung aller Lebenszyklusphasen ist auf lange Sicht wünschenswert. Aufgrund der geringen Datenlage empfiehlt die Studie jedoch, als Mindestanforderung zur Ein-

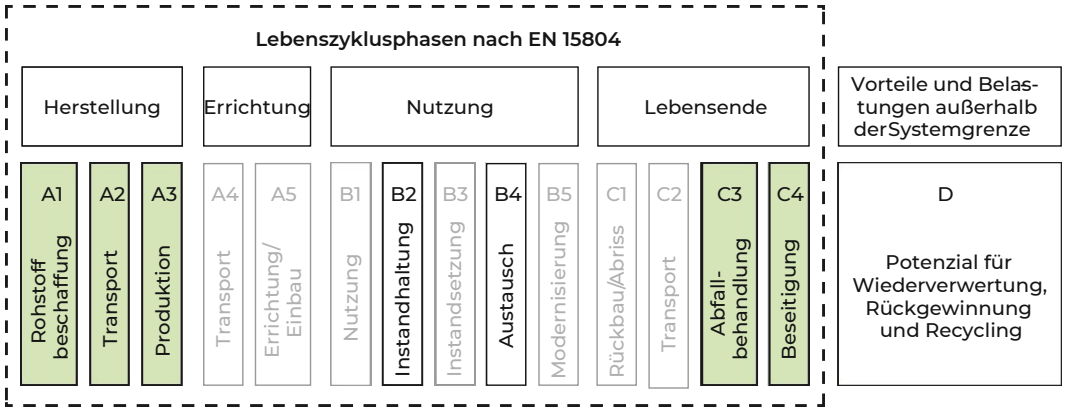



Abb. 14:
Übersicht der Lebenszyklusphasen inklusive Einschätzung der Relevanz (schwarz dargestellt) und kurzzeitige Umsetzbarkeit (grün dargestellt) für einen Zirkularitätsfaktor. Eigene Darstellung nach Ein Zirkularitätsfaktor für Wien, S. 19.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

schätzung der Umweltauswirkungen eines Objekts dessen Treibhauspotenzial im Lebenszyklus zu berücksichtigen, wozu verhältnismäßig viele Daten vorliegen und was aufgrund der extremen Klimaauswirkungen besonders kritisch ist. Die Notwendigkeit einer soliden Datengrundlage führt auch dazu, dass im GWP nicht alle Nutzungsphasen berücksichtigt werden können.[98] In der Abbildung sind die als relevant (schwarz dargestellt) und als kurzfristig umsetzbar (grün dargestellt) eingeschätzten Lebenszyklusphasen hervorgehoben.

Die Studie empfiehlt sechs weitere quantifizierbare Indikatoren: die Nutzungsintensität, die Flexibilität, Umnutzbarkeit und Nachverdichtung, Langlebigkeit, Tauschbarkeit und Reparaturfähigkeit, Rückbau und Reuse, Recycling sowie Entsorgung und sonstige Verwertung. Es wird geraten, schwer bewertbare Kriterien wie die Suffizienz nicht in eine Bewertung miteinzubeziehen.[99] Bei der Auswahl für diese Masterarbeit geeigneter Bewertungskriterien muss bedacht werden, dass ein Vergleich mehrerer Gebäude derselben Kubatur und Nutzung, aber mit unterschiedlichen Bauweisen und Materialitäten durchgeführt wird. In diesem „Nah-Fokus“ sind nicht alle Indikatoren relevant, die beim Vergleich völlig unterschiedlicher Bauten wichtig wären. Nachfolgend werden die Indikatoren, die von der Explorativen Studie identifiziert wurden, kurz vorgestellt, um anschließend ihre Signifikanz für diese Thesis abzuwägen.

**Nutzungsintensität**
Inwiefern eine Erhöhung der Nutzungsintensität, also die Nutzung eines Gebäudes für möglichst viele Stunden oder von möglichst vielen Personen, realisierbar ist, hängt vom Gebäudetyp ab. Besonders bei Wohngebäuden ist dies schwer möglich. Da alle in dieser Arbeit betrachteten Objekte nicht nur Wohngebäude sind, sondern zudem dieselbe Grundrissanordnung haben, ist hier ein Vergleich umso weniger relevant.

**Flexibilität, Umnutzbarkeit und Nachverdichtung**
Die Flexibilität, Umnutzbarkeit und Nachverdichtung eines Gebäudes lässt sich laut der zuvor erwähnten Studie durch unterschiedliche Maßnahmen – von Gebäudekubatur über Tragwerksentwurf bis zur Haustechnik-Anordnung – erreichen. Die Bewertung erfolgt über „qualitative Kriterien beruhend auf Erfahrungswerten“[100]. Da in dieser Arbeit möglichst gleichwertige Gebäude entworfen werden und gleichzeitig die Auslegung und Bemessung dieses Kriteriums sehr variiert, ist es für diese Thesis nicht geeignet.

98 Siehe: Kromoser u. a., *Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien*, 19.
99 Siehe: Kromoser u. a., 17–18.
100 Kromoser u. a., 20.

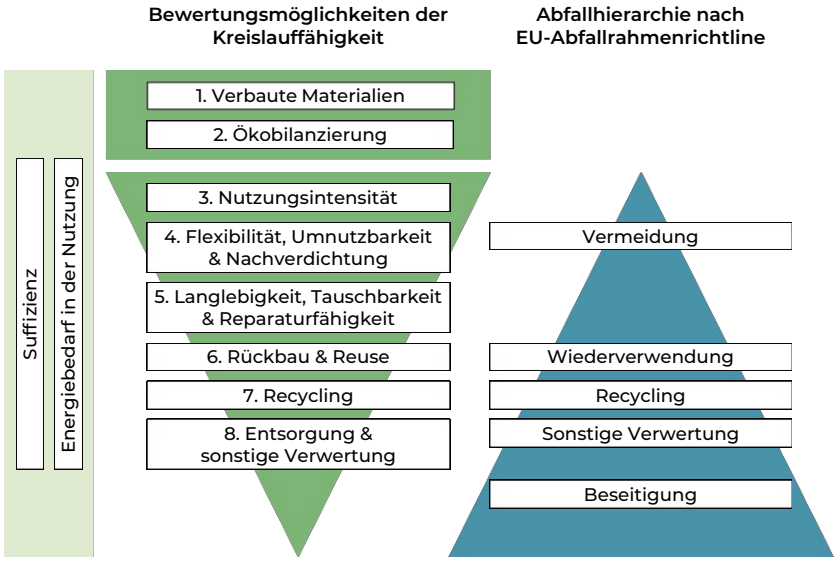



Abb. 15:
Notwendige Informationen und Indikatoren zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden laut Ein Zirkularitätsfaktor für Wien. Eigene Darstellung nach Ein Zirkularitätsfaktor für Wien, S. 12.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

**Langlebigkeit, Tauschbarkeit und Reparaturfähigkeit**
Das Kriterium der Langlebigkeit, Tauschbarkeit und Reparaturfähigkeit steht nur in indirektem Zusammenhang mit der Kreislauffähigkeit. Doch je länger ein Gebäude, Bauteil oder Produkt genutzt werden kann, desto geringer ist seine Umweltauswirkung. Die Gebäudelebensdauer wird bei einer quantitativen Betrachtung faktisch bereits durch den Betrachtungszeitraum bestimmt. Der Fokus liegt also auf seinen Bauteilen. Möglichst langlebige Materialien sowie die Möglichkeit eines zerstörungsfreien Austauschs wirken sich positiv auf die Zirkularität aus und lassen sich gut quantifizieren.

**Rückbau und Reuse**
Die Rückbaubarkeit und Wiederverwendung eines Gebäudes und seiner Bestandteile lässt sich qualitativ oder quantitativ abbilden. Der Rückbau bewertet, wie sortenrein und zerstörungsfrei das Gebäude wieder abgebaut werden kann. ReUse, also die Wiederverwendung von Bauteilen oder Materialien, zielt erstens darauf ab, ob Produkte nach dem Rückbau weitergenutzt werden können. Zweitens versteht sich darunter die (vielleicht wichtigere, weil nicht spekulative) Auskunft, wie viel ReUse-Materialien bereits im Neubau eingesetzt werden.

**Recycling**
Das Recycling ist analog zum ReUse zu verstehen. Einerseits wird bemessen, wieviel Materialien sich nach dem Rückbau für eine stoffliche Weiterverwertung eignen und andererseits wird beziffert, wie hoch der Anteil an Rezyklat im Neubau ist.

**Entsorgung und sonstige Verwertung**
Entsorgung, Deponierung und thermische Verwertung von Baustoffen ist das Gegenteil von zirkulärer Verwertung. Indem der Anteil dieses Verwertungswegs dokumentiert wird, werden klare Rückschlüsse über die Kreislauffähigkeit möglich.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Zwischenfazit

Die letztgenannten vier Kriterien sind für diese Masterarbeit sehr geeignet – aufgrund ihrer quantitativen Messbarkeit und besonders, da ihr Fokus klar auf Materialität und Bauweise liegt. Die Kriterien Nutzungsintensität und Flexibilität, Umnutzbarkeit und Nachverdichtung hingegen beschäftigen sich genereller mit der Gebäudestruktur und eignen sich mehr zum Vergleich völlig unterschiedlicher Bauten. Sie werden in dieser Arbeit ausgeklammert. Die von der Studie als notwendiger Datengrundlage betitelten Massenaufstellung und Treibhausgasbilanz im Lebenszyklus werden auch in dieser Masterarbeit erfasst.

Neben den inhaltlichen Anforderungen an ein Bewertungssystem ist besonders die wissenschaftliche Nachvollziehbarkeit entscheidend. Hierfür ist insbesondere die Transparenz der Bewertungssystematik essenziell. Zudem werden sowohl eine quantitative Bemessungs- als auch Bewertungsmethode benötigt, um die verschiedenen Varianten zueinander ins Verhältnis setzen zu können.

Die Kriterien für die Auswahl eines Bewertungssystems lauten also wie folgt:

- Erfassung der verbauten Materialien
- Erfassung des GWPs im Lebenszyklus
- Erfassung der Kreislauffähigkeit auf Bauteil- und Materialebene:
  Abbildung der Indikatoren Langlebigkeit, Tauschbarkeit und Reparaturfreundlichkeit, Rückbau und Reuse, Recycling sowie Entsorgung und sonstige Verwertung
- Transparenz
- Quantitative Bemessung
- Quantitative Bewertung

Basierend auf diesen Kriterien werden im folgenden Kapitel bestehende Bewertungssysteme daraufhin analysiert, ob sie für die Anwendung in dieser Arbeit geeignet sind.

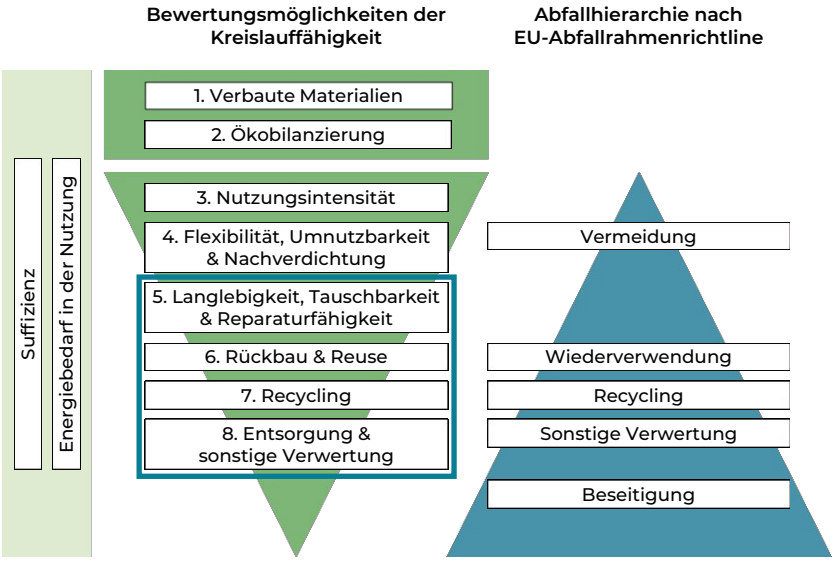



Abb. 16:
Hervorgehobene Darstellung der Kriterien, die für diese Arbeit besonders relevant sind. Eigene Darstellung nach Ein Zirkularitätsfaktor für Wien, S. 12.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Bewertungssysteme

Aufbauend auf den im vorigen Kapitel identifizierten Kriterien werden nachfolgend mehrere Bewertungssysteme kurz vorgestellt, bevor ihre Eignung für diese Thesis diskutiert wird. Die Studie „Ein Zirkularitätsfaktor für Wien“ identifizierte sechs Bewertungssysteme als besonders geeignet zur Bemessung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden, weshalb sie auch für diesen Anwendungsfall näher betrachtet werden.[101] Einzig das System Minergie, was sowohl den höchsten Schweizer Energiestandard am Bau als auch um dessen Bewertungssystem darstellt, wird aufgrund des klaren Länderfokus auf die Schweiz nicht weiter untersucht.

## Level(s)

Level(s) ist eine Rahmen-Bewertungssystematik der Europäischen Union, die im Zusammenhang mit dem European Green Deal entwickelt wurde, um dessen Anforderungen mit einheitlichen Standards europaweit umsetzen zu können. Ziel ist, das Lebenszyklusdenken zu fördern. Die Systematik erfasst ab der Entwurfsplanung bis zum Gebäudelebensende primär Umweltaspekte, aber auch damit verknüpfte Indikatoren wie Gesundheit, Komfort und Lebenszykluskosten. Diese Aspekte werden in 6 Makroziele gegliedert: Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen im Lebenszyklus, ressourceneffiziente Stoffkreisläufe, effiziente Nutzung der Wasserressourcen, gesunde und behagliche Räume, Anpassung an den Klimawandel und Klimawandelresilienz sowie Optimierung der Lebenszykluskosten. Diese werden durch 16 Kernindikatoren und eine Lebenszyklusanalyse teils quantitativ und teils qualitativ gemessen. Level(s) ist in drei Ebenen (Levels) mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden gegliedert: In Level 1, der Entwurfsplanung, wird die Nachhaltigkeit des Gebäudes qualitativ bewertet. Ebene 2 umfasst die Detailplanung und eine quantitative Bewertung. Diese wird in Level 3, dem fertigen Gebäude, im Betriebszustand geprüft. Je höher die Ebene, desto genauer und umfassender ist die Erfassung.[102]

Mit den Indikatoren 1.1 Energieeffizienz in der Nutzungsphase und 1.2 Erderwärmungspotenzial (GWP) im Lebenszyklus wird die Nachhaltigkeit der Gebäude erfasst. Das Makroziel 2 Ressourceneffiziente Stoffkreisläufe und die ihm zugeordneten Indikatoren 2.1 bis 2.4 beschreiben die Kreislauffähigkeit: ein Leistungsverzeichnis zur Erfassung aller verbauten Materialien, eine Dokumentation der Bau- und Abbruchabfälle, die Bewertung der Anpassungsfähigkeit und Anforderungen für die Rückbaufreundlichkeit. Im Gegensatz zu anderen Bewertungssystemen gewichtet Level(s) seine Indikatoren nicht zueinander. Es werden lediglich Informationen gesammelt, aber keine Bewertung oder Einordnung vorgenommen.[103]

## ÖGNI / DGNB

Die Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI) und die Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) sind kooperierende Nichtregierungsorganisationen, die das Ziel verfolgen, die Nachhaltigkeit in der Bau- und Immobilienbranche zu etablieren. Ihre Gebäudezertifizierungssysteme sind bis auf nationale Normen ident, sodass sie nachfolgend als einheitlich verstanden werden. Der Begriff der Nachhaltigkeit wird holistisch gedacht. Neben ökologischen Aspekten werden auch wirtschaftliche, soziokulturelle Kriterien und die Prozessqualität, die technische Qualität sowie der Standort über den gesamten Lebenszyklus hinweg betrachtet. Das System ist sehr umfangreich – es unterscheidet in Neubau, Sanierung und Gebäude im Betrieb, sowie in Gebäude, Quartier und Innenraum und in diverse Gebäude-Nutzungen (hier relevant sind die Wohngebäude – mehr als 6 WE). Die Bewertung von Gebäudeneubauten basiert auf insgesamt 29 Kriterien,

101 Siehe: Kromoser u. a., *Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien*, 17.

102 Siehe: Dodd, Donatello, und Cordella, „Level(s) – Ein gemeinsamer EU-Rahmen von Kernindikatoren für die Nachhaltigkeit von Büro- und Wohngebäuden. Benutzerhandbuch 1: Einführung in den gemeinsamen Level(s)-Rahmen (Version 1.1 der Veröffentlichung)“, 2–13.

103 Siehe: Kromoser u. a., *Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien*, 59.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

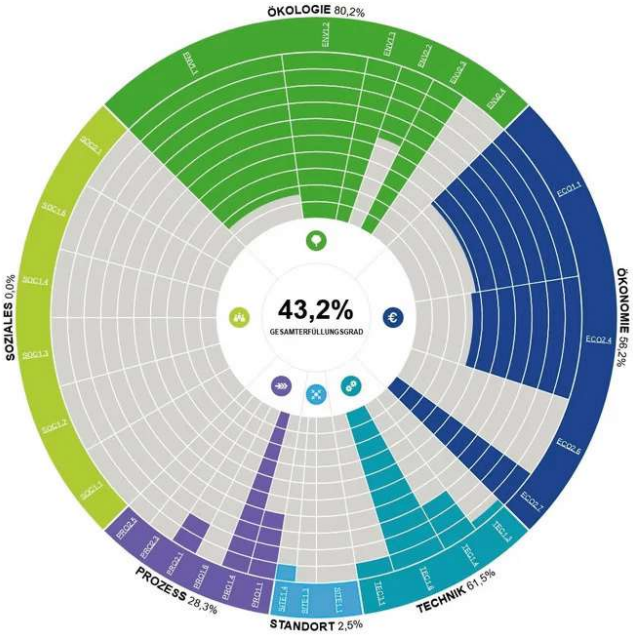



Abb. 17: Laut DGNB stehen bei der Version 2023 etwa 40% der Bewertungspunkte direkt oder indirekt im Zusammenhang mit Zirkularität. Die Darstellung zeigt, auf welche Kriterien sich diese Punkte aufteilen. Darstellung: DGNB: Zirkuläres Bauen im DGNB System.

die für eine erfolgreiche Zertifizierung alle bearbeitet werden müssen.[104] Die Betrachtung ist also sehr vielschichtig, wobei die Aspekte der Kreislaufwirtschaft mittels Circular-Economy-Boni in mehreren Kriterien abgeprüft werden und bei acht Kriterien eine besondere Berücksichtigung finden. Etwa 40% des Gesamterfüllungsgrads betreffen die Zirkularität von Gebäuden (siehe Abb. 17).[105] Obwohl ÖGNI / DGNB ein quantitatives Ergebnis produziert, messen die Indikatoren fast ausschließlich qualitativ mittels ja/nein-Fragen und Mindestwerten.

Neben der klassischen Zertifizierung wurde 2022 zudem der Gebäuderessourcenpass eingeführt. Er soll als quantifizierte Informationsgrundlage das zirkuläre Bauen stärken, indem er Auskunft über die verbauten Materialien, die Treibhausgasemissionen von Gebäuden sowie deren Kreislauffähigkeit gibt.[106] Für eine Zertifizierung nach ÖGNI / DGNB ist ein:e ausgebildete Auditor:in erforderlich, aber da die Kriterien für Neubauten frei zugänglich sind, ist auch eine Nachprüfbarkeit ohne Auditor:innen-Ausbildung möglich.[107]

## KlimaAktiv

Die KlimaAktiv-Gebäudezertifizierung wurde 2004 vom Österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft und Umwelt eingeführt und wird ausschließlich in Österreich angewandt. Ziel ist eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung mit nur wenigen Kriterien, nämlich Standort, Energie und Versorgung, Baustoffe und Konstruktion sowie Komfort und Gesundheit. Das Kriterium „Baustoffe und Konstruktion“ bildet am ehesten die Aspekte der Zirkularität ab. Es werden besorgniserregende und klimaschädliche Baustoffe ausgeschlossen sowie klimafreundliche Bauprodukte gefördert, eine Ökobilanz, ein Rückbau- und Verwertungskonzept sowie eine in Verwertungswegen gewichtete Materialaufstellung gefordert. Mit einer gesamten Gewichtung von 15% gegenüber 55% für Energiebedarf und -versorgung im Betrieb fällt dieses Kriterium in der Gesamtbetrachtung jedoch kaum ins Gewicht. Zudem findet die Bewertung hier analog zu ÖGNI / DGNB vielfach qualitativ statt.[108] Das für diese Arbeit relevanteste Tool, das bei KlimaAktiv gefordert wird, ist der Entsorgungsindikator EI10. Hier wird das aktuelle Verwertungspotenzial aller Bauteilkomponenten

104 Siehe: DGNB, „DGNB System. Kriterienkatalog Gebäude Neubau“.
105 Siehe: DGNB, „Zirkuläres Bauen im DGNB System“.
106 Siehe: DGNB, „Gebäuderessourcenpass“.
107 Siehe: Kromoser u. a., *Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien*, 95.
108 Siehe: BMI, *klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten Neubau und Sanierung 2020*, 7, 27–35.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

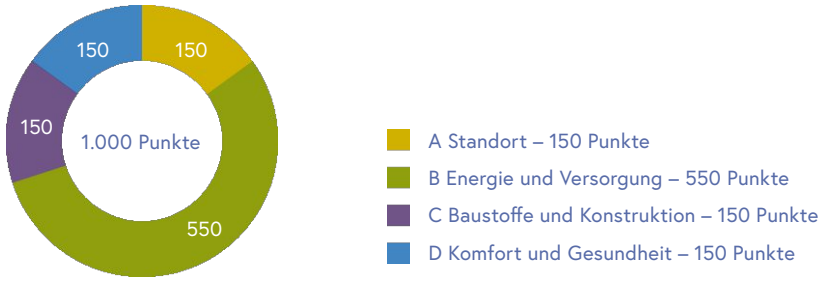



Abb. 18:
Kriterien des Bewertungssystems KlimaAktiv und deren Gewichtung nach Punktzahl. Auf das Kriterium *Baustoffe und Konstruktion* entfallen nur 15% der Punkte. Darstellung: KlimaAktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten Neubau, S. 9.

unter wirtschaftlichen und technischen Aspekten auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet – bei einem angenommenen Gesamtlebenszyklus von 100 Jahren. Das Tool ist also semiquantitativ, unterscheidet aber nur ungenau zwischen den Verwertungswegen Recycling, Verbrennung und Deponierung.[109]

## Urban Mining Index

Der von Dr. Anja Rosen im Rahmen ihrer Dissertation im Jahr 2021 entwickelte Urban-Mining-Index (UMI) ist ein Planungstool für zirkuläres Bauen und ermöglicht eine quantitative Bewertung des Kreislaufanteils von Gebäuden auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen. Er ist nicht an Gebäudetypen oder Bauaufgabe (Neubau oder Bestand) gebunden. Der Anteil sekundärer und erneuerbarer Rohstoffe in den Baumaterialien wird sowohl vor dem Einbau ins Gebäude (Pre-Use) als auch nach dem Ende des Gebäudelebenszyklus (Post-Use) in Masse-Prozent erfasst. Eine ausführliche Aufstellung aller verbauter Materialien und Einbausituationen wird als Grundlage benötigt. Unterschieden wird weiterhin in die Qualitätsniveaus der Stoffkreisläufe. Das Closed-Loop-Potenzial erfasst alle Materialien, die in geschlossenen technischen und biologischen Kreisläufen geführt werden können, die also wiederverwendet oder recycelt werden. Demgegenüber stellt das Loop-Potenzial außerdem die Materialien dar, die unter Qualitätsverlust weiterverwendet und gedowncycelt werden.[110] Zur Beurteilung der Kreislauffähigkeit werden sowohl die Einbausituation, also der Rückbauaufwand und die sortenreine Trennbarkeit, als auch das Nachnutzungspotenzial nach Materialgruppe und die Verwertungsmöglichkeiten der einzelnen Rohstoffe miteinbezogen. So kann von jeder einzelnen Bauteilschicht auf die kompletten Bauteile und das gesamte Haus geschlossen werden. Auch der Austausch von Materialien wird erfasst, indem diese dementsprechend mehrfach in die Berechnung einfließen. Der Urban Mining Index beachtet neben technischen Aspekten wie Stand der Technik, sortenreine Lösbarkeit und Schadstofffreiheit auch die Wirtschaftlichkeit. Als Open-Source-Tool ist er für akademische Zwecke frei zugänglich.

## Madaster

Der 2017 von Thomas Rau entwickelte Zirkularitätsindikator von Madaster ist eine weitere Bewertungssystematik mit ähnlichem Schwerpunkt wie der Urban Mining Index. In einem digitalen Materialpass sollen alle verbauten Bauteile und Materialien sowie deren $CO_2$-Bilanz und finanzielle Aspekte abgebildet werden. Basierend auf dem von der Ellen MacArthur Foundation entwickelten Material Circularity Indicator werden die verbauten Materialien in drei Phasen betrachtet: Materialherkunft, Lebensdauer und Materialverwertung. Es werden also der Anteil rezyklierter Materialien beim Einbau, die erwartete Nutzungsdauer der Produkte und das Verhältnis von anfallendem Abfall zu wiederverwendbaren und -verwertbaren Stoffen bemessen. Für die Prognose der Materialverwertung werden die Eignung der Materialien für ein Recycling oder eine Wiederverwendung sowie die Einfachheit der Demontage betrachtet. Bei Madaster handelt es sich allerdings um ein privatwirtschaftliches Unternehmen, das seine Datengrundlage – und damit die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse – nicht frei zur Verfügung stellt.[111]

109 Siehe: IBO (Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie), „EI Entsorgungsindikator".
110 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, V.
111 Siehe: Kromoser u. a., *Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien*, 69–74.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Fazit

Bezogen auf den Fokus lassen sich die fünf Bewertungsprogramme in zwei Gruppen unterteilen. Level(s), ÖGNI / DGNB und KlimaAktiv verfolgen einen holistischen Nachhaltigkeitsansatz und betrachten neben der Zirkularität eine Vielzahl an Kriterien von Ökobilanz über Standortqualität bis zur Ökonomie. Diese sehr breite Betrachtung ist für diese Arbeit nicht zielführend. Die Kriterien bezüglich Kreislaufwirtschaft in Level(s) und KlimaAktiv lassen sich grundsätzlich auch losgelöst betrachten – bei ÖGNI / DGNB hingegen ist das zirkuläre Bauen nicht in wenigen Kriterien gebündelt, sondern bei viele anderen Aspekten mitbetrachtet. Dieses Bewertungssystem ermöglicht somit keine fokussierte Bewertung allein der Kreislauffähigkeit. KlimaAktiv und ÖGNI / DGNB wenden zudem vielfach eine qualitative und somit weniger klar vergleichbare Bewertung an. Level(s) hingegen definiert einen klaren, quantitativen Bemessungsrahmen, führt aber keine Bewertung, also Gewichtung der einzelnen Kriterien durch. Somit ist auch Level(s) kein geeignetes Tool zur Durchführung eines Vergleichs wie in dieser Masterarbeit.

Die Systeme Urban Mining Index und Madaster konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Materialströme im Gebäude. Aufgrund des klaren, begrenzten und quantitativ messbaren Fokus eignen sie sich besser zur Beurteilung des Fallbeispiels. Madaster ist als einziges der untersuchten Bewertungssysteme nicht transparent nachvollziehbar und kommt deshalb nicht in Frage.

Als einziges Tool erfüllt somit der Urban Mining Index alle gestellten Kriterien, weshalb er als Bewertungssystematik für diese Masterarbeit verwendet wird. Im übernächsten Kapitel wird seine Methodik zur besseren Nachvollziehbarkeit ausführlicher vorgestellt. Zuvor wird jedoch das für eine Kreislaufbetrachtung unerlässliche Konzept des Lebenszyklus vorgestellt.

| | Level(s) | ÖGNI / DGNB | KlimaAktiv | UMI | Madaster |
|---|---|---|---|---|---|
| Erfassung verbaute Materialien | ja | ja* | ja | ja | ja |
| GWP im Lebenszyklus | ja | ja | ja | ja | ja |
| Erfassung der Kreislauffähigkeit auf Bauteil- & Materialebene | ja | nein | ja | ja | ja |
| Transparenz | ja | ja | ja | ja | nein |
| Qantitative Bemessung | ja | nein | nein | ja | ja |
| Quantitative Bewertung | nein | ja | ja | ja | ja |

*Erfassung in externem Tool Gebäuderessourcenpass

Abb. 19: Vergleich der betrachteten Bewertungssysteme im Bezug auf die Erfüllung der eingangs festgelegten Kritereien. Von den betrachteten Bewertungssystemen erfüllt nur der Urban Mining Index alle gestellten Kriterien. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Lebenszyklus

Eine Betrachtung im Lebenszyklus ist bei der Bemessung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden unerlässlich. Der angenommene Lebenszyklus des Gebäudes bestimmt den Betrachtungszeitraum, während die prognostizierte Nutzungsdauer von Materialien und Bauteilen deren Austauschhäufigkeit bedingt. Zuerst muss jedoch der Begriff des Lebenszyklus differenziert und geklärt werden. Zudem ist klar festzulegen, welche (zeitlichen) Rahmenbedingungen bei einer Betrachtung im Lebenszyklus gelten.

Der Grundgedanke des Lebenszyklus ist aufgrund seiner Anlehnung an das natürliche Leben von Geburt bis Tod leicht verständlich. Im linearen Wirtschaftsmodell spannt ein Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung und verschiedene Nutzungen bis zur Entsorgung als Abfall. McDonough et al. beschreiben diesen Zyklus als „von der Wiege bis zur Bahre“.[112] Dass dieses lineare Wirtschaften auf Dauer zu globalen Problemen führt, wurde bereits zu Beginn der Arbeit ausgeführt. In der Kreislaufwirtschaft wird deshalb ein Lebenszyklus „von der Wiege bis zur Wiege“, oder auf Englisch „Cradle to Cradle“ angestrebt. Im Gegensatz zur linearen Logik sollen die genutzten Rohstoffe am Nutzungsende in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können.[113]

Neben dem Kriterium des Umfangs ist auch die Betrachtungsebene entscheidend für das Verständnis des Lebenszyklus. In der Bauwirtschaft wird unter dem Begriff Lebenszyklus in der Regel der Lebenszyklus eines Gebäudes verstanden. Doch die einzelnen Bestandteile des Gebäudes können stark davon abweichende Lebenszyklen aufweisen.

## Gebäudelebenszyklus

Als Gebäudelebenszyklus wird die zeitliche Abfolge von Errichtung über verschiedene Nutzungs- und Sanierungsphasen bis hin zur Entsorgung eines Gebäudes bezeichnet. Die ÖNORMEN EN 15 804 bzw. EN 15 978, die die rechtliche Grundlage für Ökobilanzierungen für Bauprodukte bzw. für Gebäude bilden, teilen den Lebenszyklus eines Gebäudes in Phasen ein (siehe Abb. 20). Eine mögliche Kreislaufführung von Bauteilen und Materialien wird in Modul D „Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze“ abgebildet – die Festsetzung, welche Elemente bis wann zu welchem Nutzungszyklus zählen, ist hierbei entscheidend.[114]

Die Dauer eines Gebäudelebenszyklus, also die Lebensdauer des Gebäudes ist abhängig von mehreren Faktoren – die wichtigsten davon sind die die wirtschaftliche und die technische Lebensdauer. Die technische Lebensdauer endet, wenn das Gebäude seine Funktion nicht mehr erfüllen und dieser Zustand selbst durch Reparatur nicht mehr erreicht werden kann. Sie kann abhängig von der Bausubstanz mehrere hundert Jahre andauern. Die wirtschaftliche Lebensdauer ist meist wesentlich kürzer. Sie endet dann, wenn der Baugrund unter Betrachtung aller Kosten mit einer anderen Nutzung mehr Rendite erwirtschaften könnte. Da Gebäude meist als Wertanlage betrachtet werden, liegt die tatsächliche Lebensdauer eines Gebäudes oft wesentlich näher an der wirtschaftlichen als an der technischen Lebensdauer.[115]

Im Sinne der Ressourcenschonung und der Kreislaufwirtschaft ist allerdings eine möglichst lange Lebensdauer von Gebäuden anzustreben. In rein ökonomischen Betrachtungen wird die Lebensdauer von Wohnimmobilien auf nur 30 bis 50 Jahren geschätzt.[116] Bewertungssysteme für die Nachhaltigkeit von Gebäuden nehmen für ihre Lebenszyklusbetrachtungen in der Regel einen längeren Zeitraum an. Die angenommene Gebäudelebensdauer variiert bei den Systemen Level(s), ÖGNI/DGNB und

112 McDonough u. a., *Cradle to cradle*, 47.
113 Siehe: McDonough u. a., 134.
114 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 30.
115 Siehe: Schulte, *Immobilienökonomie: 1. Betriebswirtschaftliche Grundlagen*, 211–13.
116 Siehe: Schulte, 214.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

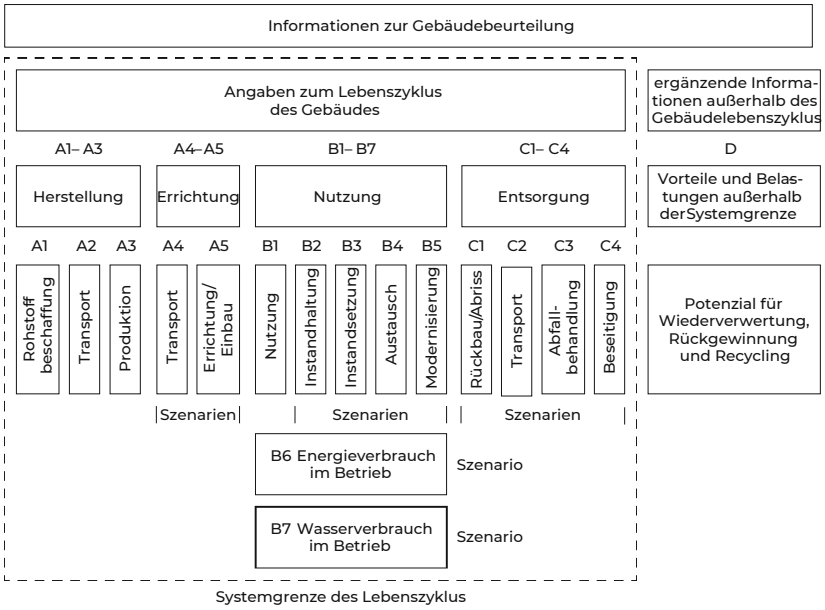



Abb. 20: In Anlehnung an die Norm EN 15804 wird der Lebenszyklus von Gebäuden in die dargestellten Module eingeteilt. Eigene Darstellung nach Atlas Recycling, S. 114.

KlimaAktiv von 50 bis 100 Jahren.[117] Bei theoretischen Untersuchungen stellt dieser angenommene Gebäudelebenszyklus stets den Betrachtungszeitraum der Analysen dar.

*"All buildings are predictions. All predictions are wrong." - Stewart Brand*[118]

Bei all diesen Werten handelt es sich um Prognosen, also um wissensbasierte Abschätzungen der Zukunft. Das tatsächliche Lebensende der Gebäude lässt sich schließlich nicht mit Sicherheit vorhersagen. Zudem beeinflussen die Annahmen auch die Planung – wenn von nur 30 Jahren Standzeit des Gebäudes ausgegangen wird, ist es auch nachvollziehbar, nur kurzlebige Produkte zu verbauen. Im Hinblick auf die aktuell wesentlichen Bemühungen der Politik, vorzeitigen Abbruch am Bau zu verhindern, ist zu hoffen, dass die Lebensdauern von Gebäuden in Zukunft wieder länger werden. Eine lange Betrachtungszeit von Gebäuden hat zudem den Vorteil, dass sich die unterschiedlichen Nutzungsdauern der verbauten Stoffe deutlicher abzeichnen – die Dauerhaftigkeit sich also besser messen lässt. Diese Masterarbeit orientiert sich deshalb an dem Betrachtungszeitraum von KlimaAktiv, der einen Gebäudelebenszyklus von 100 Jahren annimmt.

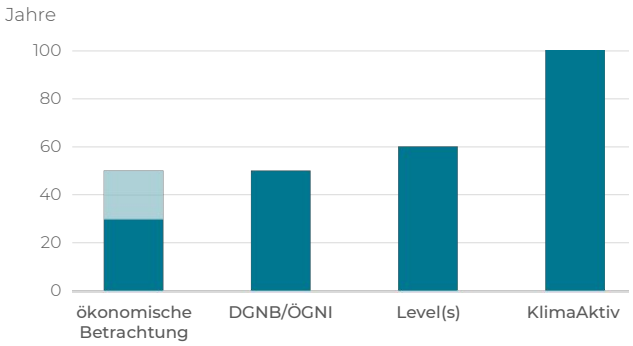



Abb. 21: Betrachtungszeitraum für eine Lebenszyklusanalyse in unterschiedlichen Bewertungssystemen. Eigene Darstellung.

## Materiallebenszyklus

Neben dem Gebäude als Ganzes erfahren auch seine einzelnen Bestandteile einen Lebenszyklus: Den Materiallebenszyklus. Dieser besteht aus der Rohstoffgewinnung, Herstellung und Verarbeitung der Produkte, der Nutzung, dem Rückbau und schließlich der Beseitigung und Verwertung. Der Materiallebenszyklus kann kürzer, gleich lang oder länger als der des Gebäudes sein.

117 Siehe: BMI, *klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten Neubau und Sanierung 2020*, 32; DGNB, „DGNB System. Kriterienkatalog Gebäude Neubau", 148 ff.; European Commission. Joint Research Centre., *Level(s)*, 23.

118 Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 118.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Analog zum Gebäude als Ganzes haben auch die einzelnen Baumaterialien eine technische Lebensdauer – die längste mögliche Nutzdauer unter idealen Einbaubedingungen. Doch auch im Materialllebenszyklus wird die technische Lebensdauer meist nicht erreicht. Die Verweildauer von Materialien im Gebäude hängt neben der technischen Nutzdauer von mehreren immateriellen Gründen ab, die im Folgenden dargestellt werden.

Ein wirtschaftlich bedingtes Austauschen von Bauteilen ist oft in der Steigerung der Effizienz begründet. So kann die Wärmedämmung oder das Heizsystem ausgetauscht werden, um Energiekosten zu sparen. Oder der Innenausbau wird aufgrund einer herbeigeführten Nutzungsänderung des Gebäudes ausgetauscht. Sichtbare Bauteile unterliegen zudem der modischen Obsoleszenz. Besonders Oberflächen werden oft aus ästhetischen Gründen ausgetauscht. Die Einschätzung der modischen Obsoleszenz ist sehr subjektiv und abhängig von der Nutzung des Gebäudes. So unterliegen Hotelanlagen deutlich eher der modischen Lebensdauer als Schulen. Auch funktionale Gründe, die mit der Mode einhergehen, können die Lebensdauer von Bauteilen beeinflussen. Zum Beispiel können gesellschaftliche Änderungen, die neue Wohn- und Arbeitsformen bedingen, auch zu einem Austausch des Innenausbaus von Gebäuden führen. Zudem gelten Bauteile aufgrund der schnellen technischen Weiterentwicklung oft bald schon als veraltet, auch wenn sie noch funktionsfähig sind. Auch die Änderung baurechtlicher Bestimmungen kann die Verweildauer von Bauteilen verkürzen. Wenn diese nicht mehr den Komfort-, Sicherheits- oder Ökologieansprüchen genügen, erfolgt oft eine Auswechslung, obwohl die Funktionstauglichkeit im eigentlichen Sinne noch gegeben ist.[119]

Die prognostizierte Verweildauer von Bauteilen steht in enger Korrelation zu ihrer technisch-funktionalen Bauteilschicht. Oberflächen und bewegliche Objekte wie Möbel erleben deutlich stärkere Abnutzungen als die Tragstruktur. Sie werden als Modeobjekte betrachtet und oft schon nach wenigen Jahren ausgetauscht, während die Konstruktion in der Regel den gesamten Gebäudelebenszyklus überdauert. Wenn allerdings Materialien kreislauffähig und kreislaufgerecht eingebaut sind, kann angenommen werden, dass der Ausbau des Materials nicht sein Lebensende bedingt.[120]

### Die Überlagerung der Lebenszyklusphasen und das End-of-Life

Zwischen den Lebenszyklen eines Gebäudes und denen der verbauten Materialien besteht eine grundsätzliche Abhängigkeit. Besonders deutlich überlagern sich die Lebenszyklusphasen bei der Errichtung des Gebäudes und beim Rückbau. In diesen Phasen wird entschieden, ob die verbauten Ressourcen ein Kreislaufpotenzial haben und behalten.[121]

Die Abbildung 22 zeigt, dass in der Rückbauphase die meisten Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Material bestehen. Aufgrund ihrer Bedeutung im Lebenszyklus wird diese Phase auch End-of-Life (EoL, englisch für Lebensende) ge-

119 Siehe: Bahr und Lennerts, *Lebens- und Nutzungdauer von Bauteilen*, 41–43.
120 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 119–21.
121 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 32.

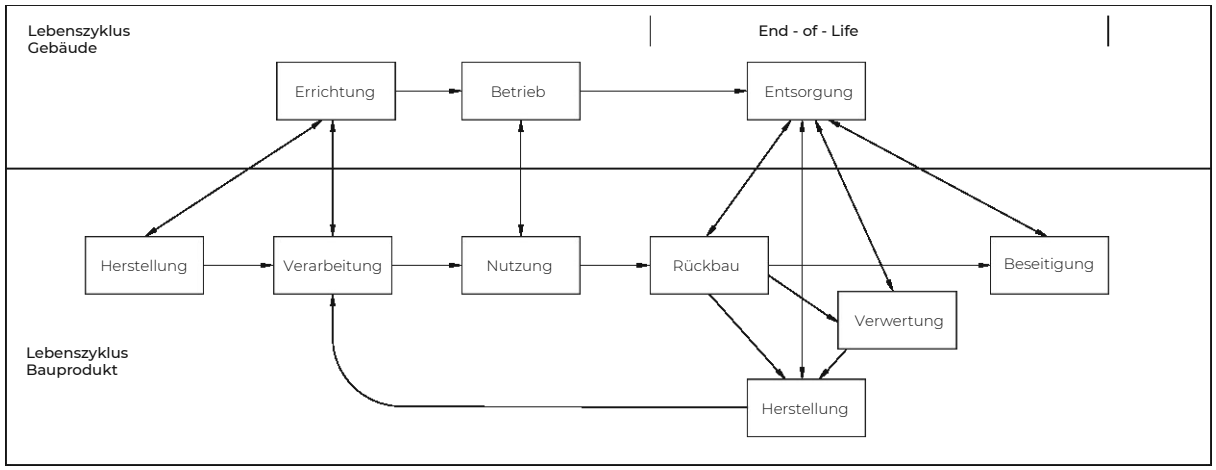



Abb. 22: Der Zusammenhang zwischen Gebäudelebenszyklus und Lebenszyklus von Materialien ist im End-of-Life am größten. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

nannt – gemeint ist das Ende des Gebäudelebens. Hier entscheidet sich, ob der Kreis der Circular Economy geschlossen werden kann. Während nach der linearen Logik das Gebäude abgebrochen, die Materialien höchstens grob sortiert und dann entsorgt werden, wird im kreislauforientierten Bauen ein selektiver Rückbau angestrebt, der Materialien sortenrein trennt und wiederverwendbare Bauteile sorgfältig demontiert.[122] Entscheidend für das Gelingen eines sortenreinen Rückbaus sind zu einem großen Teil die Entscheidungen in der Errichtungs- und Nutzungsphase. Im Sinne einer lebenszyklusorientierten Planung muss schon vor dem Einbau der Rückbau mitbedacht werden.

## Lebensdauer von Bauteilen

Die korrekte Abschätzung der tatsächlichen Lebensdauer von Bauteilen und Materialien wird für Planende immer relevanter. Für Lebenszyklusbetrachtungen, egal ob sie sich auf Kosten, Treibhausgasemissionen oder Kreislauffähigkeit beziehen, ist sie eine wichtige Kerngröße. Unter Lebensdauer wird in diesem Kontext immer die tatsächliche Zeitspanne zwischen Einbau und Ersatz eines Bauteils verstanden; als Abgrenzung zur technischen Lebensdauer ist deshalb von Nutzungsdauer die Rede.

Insgesamt hat die Lebensdauer von Bauteilen innerhalb der letzten 50 Jahren kontinuierlich abgenommen. Gründe dafür sind unter anderen die geringe Haltbarkeit neuer verbauter Materialien, der Einsatz von verklebten und Verbundbaustoffen und die erhöhte Reparaturanfälligkeit der Konstruktionen.[123] Wenn Bauteile innerhalb des Gebäudelebenszyklus ausgewechselt werden, ist dies mit Kostenaufwand und Störung der Nutzbarkeit verbunden. Besonders problematisch sind Auswechslungen von Produkten, die unter anderen Schichten verbaut werden. Wenn die darüberliegenden Schichten nicht beschädigungsfrei lösbar sind, so müssen auch sie zerstört und ausgetauscht werden. In der Planung ist deshalb neben der Priorisierung langlebiger und zerstörungsfrei lösbarer Materialien auch relevant, dass fest verbundene Materialschichten eine möglichst gleich lange Lebensdauer haben, damit sie ohne Verlust von Nutzungsdauer gemeinsam ausgetauscht werden können.

Aufgrund des großen Interesses gibt es bereits mehrere Forschungsarbeiten zum Thema Lebensdauern von Bauteilen. Das Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI) veröffentlicht in seiner Reihe „Baukosten – Bauelemente Neubau“ stets eine ausführliche Zusammenstellung von Nutzungsdauern von Bauteilen und Bauelementen. Diese Werte basieren allerdings rein auf nicht weiter sortierten Daten aus der Praxis – sie differenzieren nicht, aus welchem Grund ein Bauelement abgebrochen wurde. Deshalb liegt hier eine teils sehr weite Streuung der Daten vor. Sowohl das deutsche Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) als auch das Österreichische Institut für Baubiologie und –ökologie (IBO) haben in Forschungsprojekten eine wissenschaftliche Methodik entwickelt, um die maximalen Nutzungsdauern von Bauteilen anhand von Daten aus der Praxis, aber auch vertiefenden Analysen und übergeordneten Plausibilitätsüberlegungen, zu prognostizieren.[124] Beide Forschungseinrichtungen haben ähnlich belastbare Ergebnisse produziert. Während aber das BNB nur einen Gebäudelebenszyklus von 50 Jahren annimmt, geht das IBO von einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren aus. Dadurch erreicht Zweiteres eine größere Aussagekraft bezüglich langlebiger Bauteile.

Die Lebensdauern sind nicht zuletzt von den Einbaubedingungen abhängig – neben einem mängelfreien Einbau sind auch Witterung und Klima entscheidend. Die vom österreichischen IBO veröffentlichten durchschnittlichen Nutzungsdauern von Baustoffen und Bauteilen nehmen als Grundlage durchschnittliche österreichische Bedingungen und typische Einbausituationen an. Bezogen auf die Quantifizierung von zirkulärem Bauen ist es wichtig zu beachten, dass eine Wiederverwendung ebenso wie eine Wiederverwertung von Baustoffen nicht als eine Verlängerung der Nutzungsdauer angesehen wird.[125]

Aufgrund des längeren Betrachtungszeitraums und des regionaleren Bezugs werden die Lebensdauern von Bauteilen in dieser Arbeit mithilfe der IBO-Studie „Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen“ bestimmt.

122 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 20.

123 Siehe: El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 64.

124 Siehe: Bahr und Lennerts, *Lebens- und Nutzungdauer von Bauteilen*; Zelger u. a., *Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen*.

125 Siehe: Zelger u. a., *Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen*, 2–11.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Der Urban Mining Index

Der erklärte Anspruch des Urban-Mining-Index (UMI) ist es, die Stoffströme in Baukonstruktionen und Gebäuden mess- und bewertbar zu machen. Denn laut Dr. Rosen werden abstrakte Themen der Nachhaltigkeit erst durch die quantitative Bemessung richtig fassbar und zu einer selbstverständlichen und optimierbaren Planungskomponente in den Köpfen der Entscheidungsträger:innen.[126]

Die Betrachtung im Urban Mining Index führt bis hinein in die Rohstoffebene – schließlich wird auf dieser Ebene über das tatsächliche Kreislaufpotenzial von Materialien entschieden. Der Anteil sekundärer und erneuerbarer Rohstoffe in den Baumaterialien wird sowohl vor dem Einbau ins Gebäude (Pre-Use) als auch nach dem Ende des Gebäudelebenszyklus (Post-Use) erfasst. Zudem werden unterschiedliche Qualitätsstufen der zirkulären Materialnutzung berücksichtigt und entsprechend gewichtet: Materialien, die bei gleichbleibender Qualität in geschlossenen Kreisläufen wiederverwendet oder recycelt werden können, werden dem „Closed-Loop-Potenzial“ zugeordnet. Hingegen fließen Materialien, die nur mit Qualitätsverlust in offenen Kreisläufen geführt werden – Weiterverwendung und Downcycling –, nur ins „Loop-Potenzial“ ein. Dazu werden für jedes Material bzw. jede Bauteilschicht Materialqualität und Nachnutzungspotenzial sowie Aufwand und Wirtschaftlichkeit des Rückbaus bewertet.[127]

Das Vorgehen ist dabei vom Kleinen ins Große. Die Erfassung der Kreislauffähigkeit findet auf Bauteilebene statt – Grundlage der Kalkulierung ist stets ein Quadratmeter eines Standardaufbaus. Die Masse ist dabei die Basis der Berechnung – die Gewichtung der Zirkularität der verschiedenen Materialien und Bauteile zueinander erfolgt über deren Masseanteil. Das hat zur Folge, dass schwere Baustoffe deutlicher abgebildet werden als leichte.

126 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*.

127 Siehe: Rosen, V.

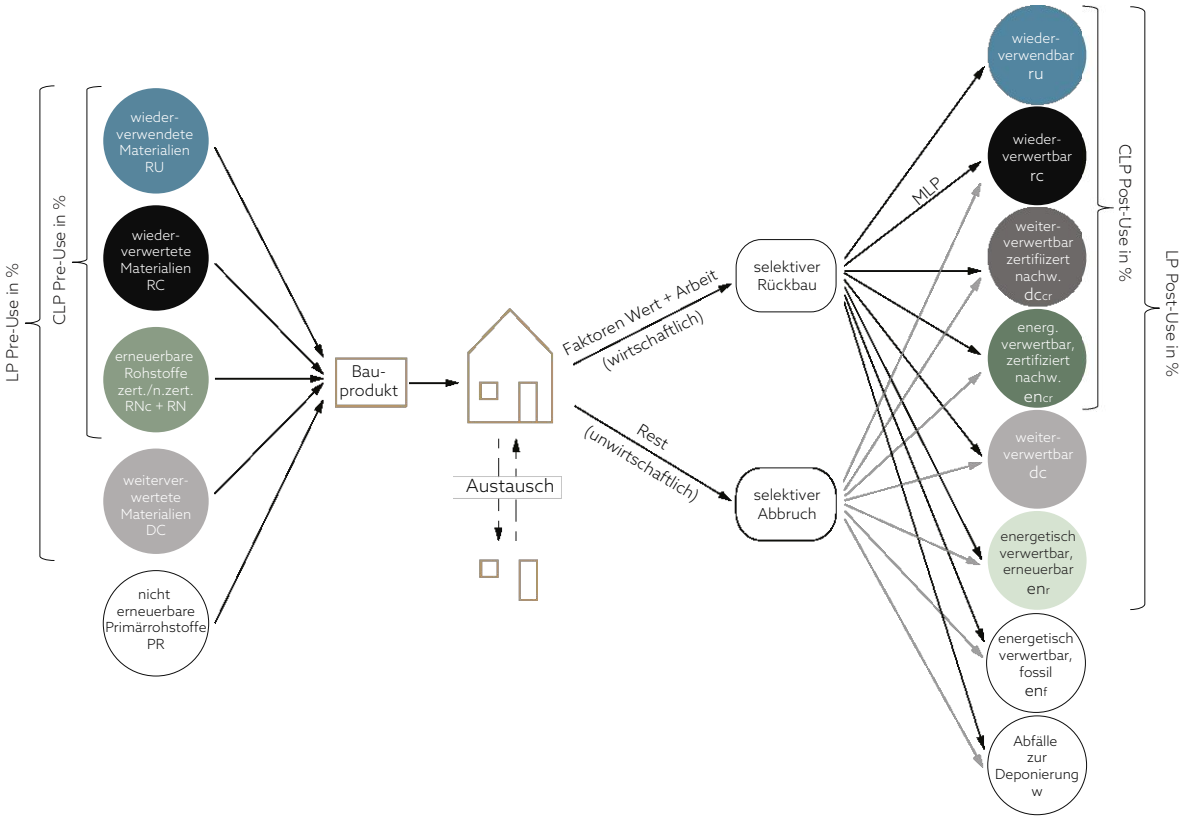



Abb. 23: Zusammensetzung des Kreislaufpotenzials in die Kategorien Pre-Use und Post-Use sowie in verschiedene Qualitätsstufen der Verwertung. Darstellung: Urban Mining Index, S. 190.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Wichtig zu betonen ist, dass mit dem Urban Mining Index das Potenzial einer Kreislaufführung gemessen wird. Anhand möglichst realitätsnaher Kriterien wird das Vermögen für eine Zirkularität abgeschätzt. Wie bei der Abschätzung eines Gebäudelebenszyklus können auch beim Bestimmen des Kreislaufpotenzials nur Prognosen unter Einbeziehung möglichst vieler Faktoren getroffen werden, aber keine tatsächliche Vorhersage der Zukunft. [128] Zudem ist die Angabe des Potenzials eine relative Aussage, keine absolute. Es werden Angaben zu den Anteilen gewisser Szenarien getroffen, aber keine Aussage über die tatsächlichen Zahlen.

## Verwertungswege

Aufbauend auf der Arbeit von Hillebrandt und Seggewies im Atlas Recycling definiert auch der Urban Mining Index die nachfolgenden Verwertungswege zum Umgang mit Altmaterialien und zur Ressourcenschonung. Das Kreislaufpotenzial wird anhand der Gewichtung dieser Kategorien ermittelt. Dabei wird unterschieden in eine geschlossene Kreislaufführung ohne relevanten Qualitäts- und Materialverlust, eine offene Kreislaufführung, die eine Verwertung unter Qualitäts- und Materialverlust ermöglicht, und in eine Aufgabe von Qualität und Kreislaufführung.[129]

**Wiederverwendung (ReUse)**
Bei der Wieder- und Weiterverwendung wird ein Produkt in seiner originalen Gestalt erneut eingesetzt. Wird die ursprüngliche Funktion des Produkts beibehalten, handelt es sich um Wiederverwendung. Gefördert wird die Wiederverwendung durch Hersteller:innenrücknahmen – Unterneh-

128 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 24.
129 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 59–60.

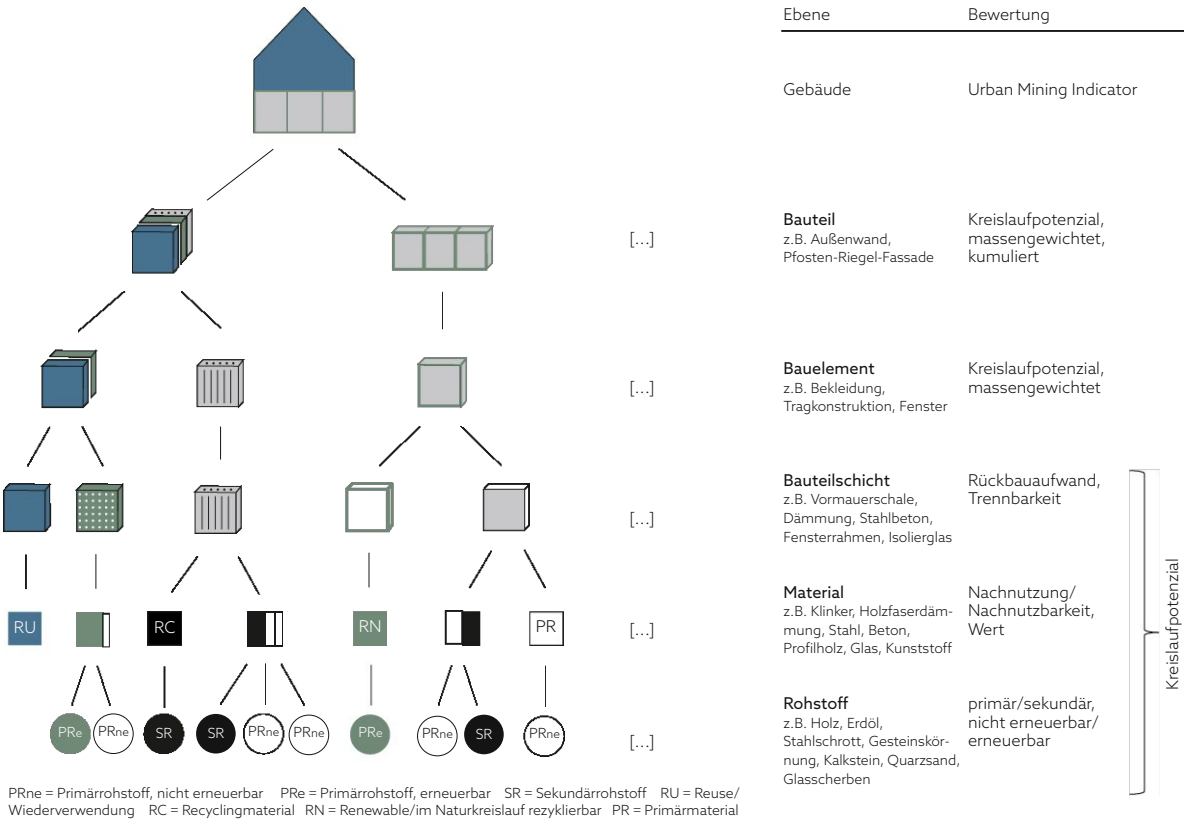



Abb. 24: Ebenen der Bewertungssystematik. Darstellung: Urban Mining Index, S. 172.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

men nehmen ihre eigenen Produkte zurück, reparieren sie gegebenenfalls und bringen sie wieder auf den Markt. Auch Unternehmen, die mit gebrauchten Bauteilen handeln, wie das Baukarussell in Wien oder Concular in Deutschland, fördern die Wiederverwendung. Doch nicht nur Gebrauch und Beschädigung, sondern auch mangelnde Akzeptanz und technische bzw. rechtliche Neuerungen schränken die Wiederverwendung ein. Aktuell werden nur 11% der Bauteile und Materialien wiederverwendet, obwohl dies die ökologisch beste Nutzungsform ist.[130]

**Weiterverwendung (Further Use)**
Wenn ein Bauteil oder Material nochmals eingesetzt werden kann, aber nicht für die ursprüngliche Nutzung, dann handelt es sich um eine Weiterverwendung. Dies passiert meist, wenn seine Qualität für die ursprüngliche Verwendung nicht mehr ausreichend ist. Ein Beispiel ist der Einsatz alter Fassadenklinker zur Gartengestaltung. Aufgrund des Qualitätsverlusts bei der Weiterverwendung handelt es sich hierbei nicht um eine geschlossene Kreislaufführung.

**Wiederverwertung (Recycling) und Kompostierung**
Bei einer Verwertung werden die Materialien aufgelöst und neu geformt. Es handelt sich dann um eine Wiederverwertung, wenn aus den Ausgangsstoffen ein neues Produkt derselben Qualität geschaffen wird. Beispielhaft für die Wiederverwertung ist Stahl, der sich nahezu unbegrenzt einschmelzen und zu neuen Stahlbauteilen formen lässt.

Wenn nachwachsende Rohstoffe nicht im Hochbau verwend- oder verwertbar sind, können sie durch eine Kompostierung wieder Teil des biotischen Verwertungskreislaufs werden. Ihre Nährstoffe werden freigesetzt, sodass neue Pflanzen daraus wachsen können. So findet kein Qualitätsverlust statt, weshalb die Kompostierung zur Wiederverwertung gezählt werden kann. Aktuell enden die meisten biogenen Baustoffe allerdings in der energetischen Verwertung.[131]

130 Siehe: El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 55.
131 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 61.

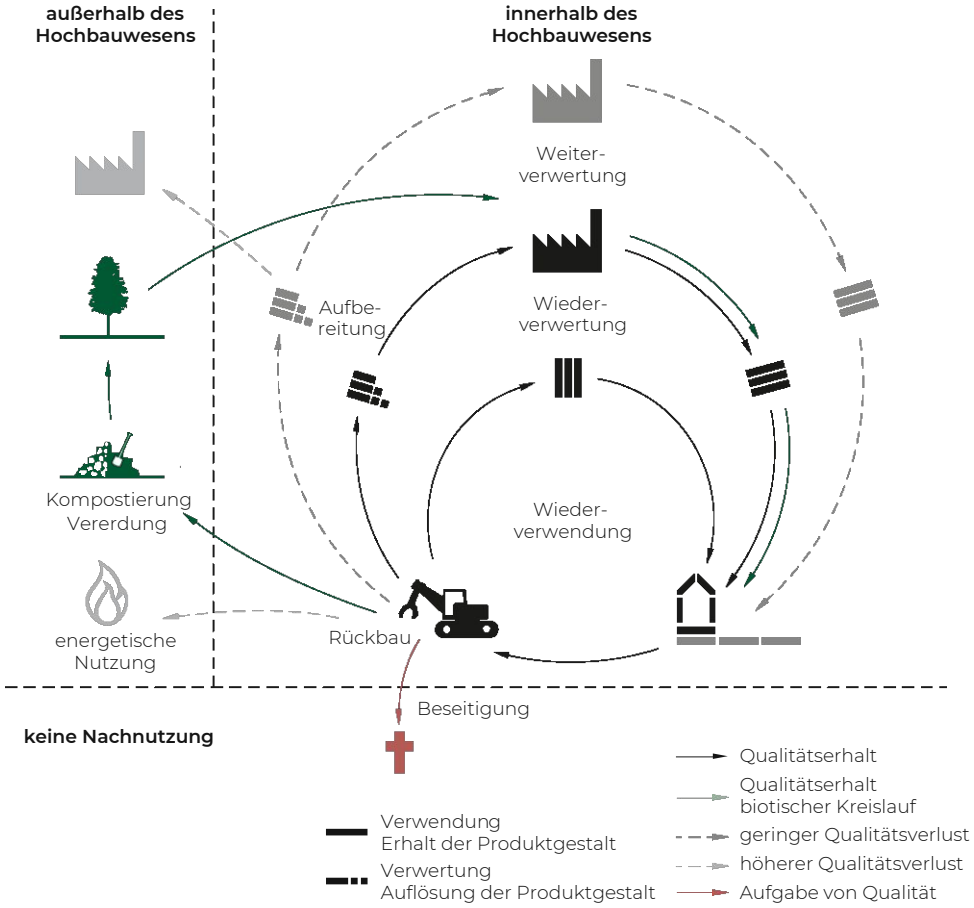



Abb. 25: Verwertungswege und das Maß ihrer Kreislaufführung. Eigene Darstellung nach Atlas Recycling, S. 59.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

**Weiterverwertung und Kaskadennutzung (Downcycling)**
Eine Weiterverwertung hingegen geht mit einem Qualitätsverlust einher. Wenn also aus Altglas Glaswolle produziert wird, ist dies eine Weiterverwertung. Da hier ein Ressourcenverlust stattfindet, ist die Weiterverwertung keine geschlossene Kreislaufführung. Bei nachwachsenden Rohstoffen, speziell Holz, wird oftmals das Synonym Kaskadennutzung verwendet. Wenn die Stoffe bereits Teil des biotischen Kreislaufs sind und durch Weiterverwertung bzw. Kaskadennutzung deren Nutzungsdauer verlängert wird, ist dies grundsätzlich positiv zu bewerten.

Besonders Wieder- und Weiterverwertung werden in Fachkreisen oftmals nicht sauber unterschieden. Vielfach ist von Recycling die Rede, wenn es sich tatsächlich nur um ein Downcycling handelt.

**Energetische Verwertung**
Werden Abfälle als Brennstoff für die Energiegewinnung genutzt, so handelt es sich um eine energetische Verwertung. Vorteilhaft ist, dass so mit Abfällen primäres Brennmaterial substituiert wird. Allerdings wird auch bei diesen Stoffen das ihnen immanente $CO_2$ freigesetzt – mit negativen Auswirkungen auf das Klima. Der Qualitätsverlust der Rohstoffe ist bei der energetischen Verwertung sehr hoch, weshalb sie keinen kreislauffähigen Verwertungsweg darstellt.[132]

**Beseitigung**
Werden Stoffe keinerlei Nachnutzung zugeführt, so enden sie in der Deponierung oder thermischen Beseitigung. Hier findet keinerlei Nutzung der Stoffqualitäten mehr statt, vielmehr entstehen große gesellschaftliche Nachteile durch diese sehr lineare Entsorgung von Baustoffen.[133]

Im Urban-Mining-Index werden nur die Verwertungswege betrachtet, die zumindest eine Teil-Kreislaufführung ermöglichen. Primärrohstoffe aus nicht erneuerbaren Quellen werden ebenso nicht gezählt wie deponierte Abfälle und energetisch verwertete Abfälle aus nicht erneuerbaren Quellen, denn hier findet eine Aufgabe von Qualität statt. Die weiteren Verwertungswege werden untergliedert in eine hochwertige Kreislaufführung (Closed Loop Potential, CLP) und eine bedingte Kreislaufführung (Loop Potential, LP). Im Pre-Use, also bei der Errichtung des Gebäudes, zählen wiederverwendete Materialien (Reuse), wiederverwertete Materialien (Recycling), erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable) zur hochwertigen Kreislaufführung und weiterverwertete Materialien (Downcycling) zur bedingten Kreislaufführung. Analog zählen beim Post-Use, dem End-of-Life, wiederverwendbare und wiederverwertbare Materialien zum Closed-Loop sowie weiterverwertbare Stoffe zum Loop-Potenzial.

Die Gruppe der nachwachsenden Rohstoffe wird zudem weiter differenziert. Bei nachwachsenden Rohstoffen aus zertifiziert nachhaltigem Anbau wird garantiert, dass niemals mehr aus der Umwelt entnommen wird als nachwachsen kann. Eine Kreislaufführung wird schon in der Herstellung garantiert, weshalb diese Rohstoffe ins Closed-Loop-Potenzial miteinbezogen werden, auch wenn sie dem Downcycling oder der energetischen Verwertung zugeführt werden. Andere nachwachsende Rohstoffe werden nur im Loop-Potenzial beachtet, da sie bereits beim Anbau im Naturkreislauf rezykliert wurden, aber eine Garantie fehlt, dass dies weiterhin in selbem Maße geschieht.[134]

132 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 24.
133 Siehe: El Khouli, John, und Zeumer, *Sustainable Construction Techniques*, 55.
134 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 90–93, 168–71.

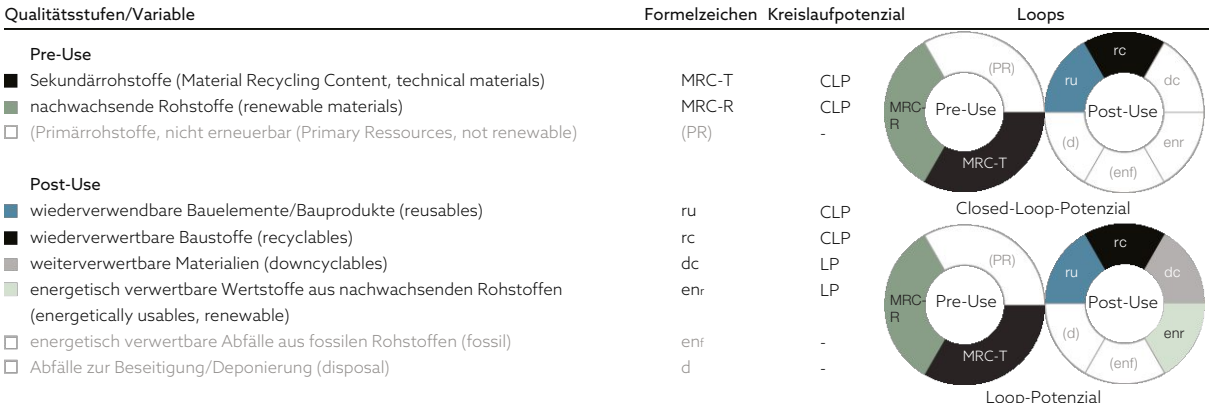
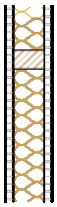



Abb. 26: Legende des Urban Mining Index mit Qualitätsstufen der Verwertung. Darstellung Urban Mining Index, S. 161.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

**Beispiel: Trockenbauwand** *Bauteilfläche: 908,9 m² (5,0%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 12,5 | Gipskartonplatte, verschraubt |
| 100 | Holz-Ständerkonstruktion, verschraubt<br>dazwischen: Glasfaser-Dämmung, gesteckt |
| 12,5 | Gipskartonplatte, verschraubt |
| **125** | |

Abb. 27: Beispielhafter Wandaufbau einer Trockenbauwand zur Erläuterung des Urban Mining Index. Eigene Darstellung.

## Berechnung des Urban Mining Index

Um mit dem UMI das Kreislaufpotenzial eines Standardaufbaus zu kalkulieren, wird jede Bauteilschicht getrennt betrachtet. Die Pre-Use Werte, also der Anteil wiederverwendeter, rezyklierter oder nachwachsender Materialien jeder Bauteilschicht, können mittels Herstellerangaben oder Durchschnittswerten leicht ermittelt werden. Die Post-Use Werte, also die Art der Verwertung eines Baustoffs nach dessen Nutzungsende, erfordern eine komplexere Kalkulation. Neben dem technisch bestmöglichen Verwertungsszenario (dem Material-Loop-Potenzial) werden im Urban Mining Index Muss-Kriterien wie Schadstofffreiheit, Sortenreinheit und zerstörungsfreie Lösbarkeit sowie wirtschaftliche Kennwerte wie Wert und Arbeit des Rückbaus berücksichtigt. Auch der Austausch von Materialien wird erfasst, indem diese entsprechend ihrer Nutzungsdauer mehrfach in die Berechnung einfließen. Aus den ermittelten, massegewichteten Potenzialen aller einzelner Bauteilschichten ergibt sich das Kreislaufpotenzial eines gesamten Aufbaus. Mittels der Bauteilflächen kann der Anteil an der gesamten Gebäudemasse und somit sein Beitrag zum gesamten Kreislaufpotenzial ermittelt werden.

Anhand eines Beispielaufbaus, einer Trockenbauwand, kann die Berechnung des UMIs verdeutlicht werden. Zuerst müssen die verbauten Materialien, die Art und Weise, wie sie eingebaut wurden und (mittels IBO-Studie) ihre Austauschhäufigkeit bestimmt werden. Über das Volumen und die durchschnittliche Rohdichte lässt sich die Masse jeder Bauteilschicht ermitteln und unter Berücksichtigung der Austäusche auch die Masse im Lebenszyklus. In einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren muss eine Gipskartonplatte, die eine Nutzungsdauer von 50 Jahren hat, einmal ausgetauscht werden. Demnach wird zur Ermittlung der Masse im Lebenszyklus das Gewicht eines Quadratmeters Gipskartonplatte dupliziert. So lässt sich der Masse-Anteil jeder Bauteilschicht am gesamten Standardaufbau bestimmen. Die leichte Glaswolle-Dämmung fällt trotz Austausch kaum ins Gewicht. Die Materialherkünfte können dank Hersteller:innenangaben oder Durchschnittswerten leicht bestimmt werden. Gipskartonplatten und Glaswolle enthalten standardmäßig bereits anteilig Rezyklat, bestehen aber auch aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen. Die Ständer aus unbehandeltem Vollholz sind selbstverständlich zu 100% erneuerbare Rohstoffe.

Der Verwertungsweg der Stoffe im Post-Use, als die Prognose der zukünftigen Verwertung, muss unter Zuhilfenahme einiger Annahmen ermittelt werden. Rosen stellt dazu einige Parameter auf, die im Folgenden ausgeführt werden.

**Schadstofffreiheit, zerstörungsfreie Lösbarkeit & Sortenreinheit**

Schadstoffbelastete Materialien, die für Menschen gefährliche Stoffe enthalten, müssen aus deren Umfeld entfernt werden. Sie werden idealerweise gar nicht erst eingebaut, verhindern jedenfalls definitiv eine weitere Kreislaufführung im Ausbau.[135]

Die zerstörungsfreie Lösbarkeit von Bauteilen und Materialien ist ein entscheidendes Kriterium, um diese wiederverwenden zu können. Für wieder- und weiterverwertbare Materialien hingegen ist die Zerstörungsfreiheit irrelevant, da ihre Produktgestalt sowieso umgeformt wird.[136]

135 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 90.

136 Siehe: Rosen, 96–97.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

| | schadstoff-frei | zerstörungsfrei lösbar | sorten-rein | End of Life Szenario selektiver Rückbau | End of Life Szenario selektiver Abbruch | Arbeit | | Wert | | MLP | | Wahrscheinlichkeit hohes Verwertungsszenario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Holz-Ständer-konstruktion | ja | nein | ja | dc - Kaskadennutzung | enr - energetische Verwertung | 0,9 | * | 0,8 | * | 0,83 | = | 0,6 |
| Glaswolle | ja | ja | ja | rc - Wiederverwertung | enf/w - Deponierung | 0,9 | * | 0,7 | * | 0,80 | = | 0,48 |
| Gipskartonplatte | ja | nein | ja | rc - Wiederverwertung | enf/w - Deponierung | 1,0 | * | 0,7 | * | 0,99 | = | 0,69 |

Abb. 28: Berechnung der Verwertungswege der einzelnen Bauteilschichten im Post-Use. Eigene Darstellung.

Gegengleich zur Zerstörungsfreiheit verhält sich die Sortenreinheit. Für die Wiederverwendung ist es egal, ob ein Baustoff aus Verbundmaterialien besteht. Bei der Wieder- und Weiterverwertung hingegen ist die Sortenreinheit eines Materials entscheidend für die Qualität der Verwertbarkeit.

Diese Parameter sind „Muss-Kriterien". Ohne eine Schadstofffreiheit ist keinerlei Zirkularität der Stoffe möglich. Die zerstörungsfreie Lösbarkeit ist eine zwingende Voraussetzung für die Wiederverwendung und die Sortenreinheit ist entscheidend für die Wiederverwertung.

**Austauschhäufigkeit**

Wie im Kapitel Lebenszyklus ausgeführt, wird für die Lebenszyklusbetrachtung ein Zeitraum von 100 Jahren angenommen. Die Lebensdauer der Bauteile und Materialien wird mithilfe der IBO-Studie „Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen" ermittelt. Daraus lässt sich die nötige Austauschhäufigkeit der Materialien und gegebenenfalls anderer, nicht lösbar verbundener Materialien ableiten. Die Masse dieser Bauteile wird dementsprechend mehrfach gezählt, das anfallende Treibhauspotenzial zählt zum Modul B4.

**Material-Loop-Potential (MLP)**

Das Material-Loop-Potential (MLP) stellt dar, welcher Anteil eines Materials unter Beachtung der heute bestmöglichen Technik idealerweise im Stoffkreislauf geführt werden könnte, also zu welchem Teil aktuell die Primärrohstoffe in diesem Material durch Sekundärrohstoffe substituiert werden können. Diese Daten beruhen auf wissenschaftlichen Untersuchungen und Einschätzungen aus der Praxis.[137] Der MLP-Anteil ist ein wichtiger Indikator zur qualitätsverlustfreien Kreislaufführung von Materialien.[138]

**Faktoren Arbeit und Wert**

Um die Wirtschaftlichkeit einer Rückbauaufgabe zu bewerten, ist der Arbeitsaufwand ein entscheidender Faktor. Bisher fehlen quantifizierbare Durchschnittswerte zu den Kosten verschiedener Abbruch- und Rückbauarbeiten. Um den Arbeitsaufwand dennoch in der Bewertung abbilden zu können, kategorisiert Rosen typische Abbruch- und Rückbauarbeiten in einer fünfstufigen Skala von sehr geringem bis sehr hohem Demontageaufwand. Da ein sehr geringer Arbeitsaufwand die Entscheidung für einen Rückbau kaum beeinträchtigt, wird dafür der Faktor 1,0 vergeben. Je höher der Arbeitsaufwand, desto geringer wird die Wahrscheinlichkeit eines sortenreinen Rückbaus, weshalb der Faktor auf bis 0,6 für einen sehr hohen Arbeitsaufwand fällt.[139]

Neben dem Faktor Arbeit ist auch der Wert der auszubauenden Materialien entscheidend. Für manche Materialien, wie Metalle, besteht heute schon ein lukrativer Sekundärrohstoffmarkt, für andere besteht keine Nachfrage oder der Aufbereitungsprozess übersteigt den Verkaufswert. Basierend auf den aktuellen Entsorgungs- und Verwertungspreisen werden die Preise für Wertstoffe zum Zeitpunkt des geplanten Rückbaus prognostiziert. Analog zum Faktor Arbeit wird der Faktor Wert anhand einer in diesem Fall achtstufigen Skala be-

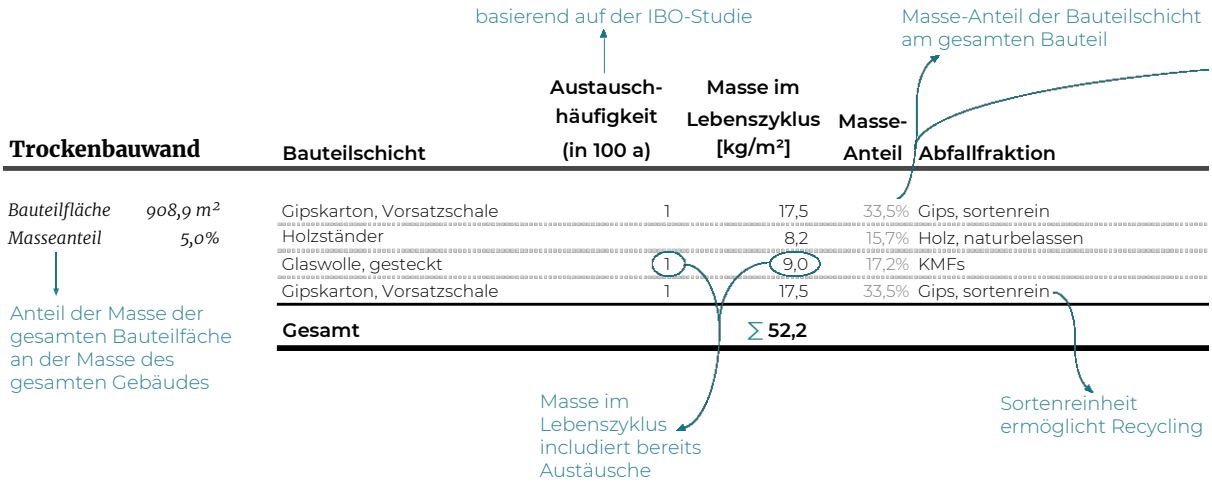
137 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 64.

138 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 94–95.

139 Siehe: Rosen, 98–105, 147–53, 163.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




stimmt. Da ein hoher Verwertungserlös den sortenreinen Rückbau antreibt, wird für einen äußerst positiven Entsorgungswert der Faktor 1,3 angesetzt.

Die Faktoren Wert und Arbeit bestimmen gemeinsam die Wirtschaftlichkeit einer Rückbauaufgabe. Ihr Produkt darf höchstens 1,0 ergeben, da nicht mehr als 100% Material zurückgewonnen werden kann.[140]

**Bestimmung des Post-Use-Potenzials**

In der Post-Use-Phase wird jedem Material entsprechend dem Stand der Technik und unter Berücksichtigung der Schadstofffreiheit, Sortenreinheit und zerstörungsfreien Lösbarkeit ein hochwertiger und ein üblicher Verwertungsweg zugewiesen. Im Beispielaufbau, der Trockenbauwand, sind alle verbauten Materialien frei von Schadstoffen – sie können also verwertet werden. Eine zerstörungsfreie Lösbarkeit ist aufgrund der rein verschraubten und gesteckten Verbindungen theoretisch möglich, wird aber aufgrund des hohen Arbeitsaufwands für konventionelle Trockenbauwände selten realisiert. Die trockene Verbindung ermöglicht aber eine sortenreine Rückgewinnung aller verbauter Materialien.

Für die mineralischen Baustoffe Gipskarton und Glaswolle kann also – auch weil es technisch möglich ist – als hochwertiger Verwertungsweg ein Recycling angenommen werden. Der übliche Verwertungsweg ist eine Deponierung. Bei Holz ist eine Kaskadennutzung, also eine Weiterverwertung, einer energetischen Verwertung vorzuziehen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass der hochwertige Verwertungsweg eintritt, wird mittels der Koeffizienten Wert, Arbeit und MLP ermittelt. Während der geringe Arbeitsaufwand, die Ständerwand zurückzubauen, zu einem recht hohen Arbeits-Faktor führt, spielgelt sich der geringe Wert aller verbauten Materialien in einem geringeren Werts-Faktor wieder. Gleichzeitig ist das technische Verwertungspotenzial für alle betrachteten Baustoffe, besonders für die sortenreine Gipskartonplatte, sehr gut. Das Produkt aller drei Werte ergibt die Wahrscheinlichkeit, nach der der hochwertige Verwertungsweg eintritt. So beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass die Gipskartonplatten sortenrein rückgebaut und recycelt werden, 63%. Der übrige Anteil wird dem niedrigen Verwertungsszenario zugeführt– in diesem Fall der Deponierung.

Als nachwachsender Rohstoff wird bei der Holz-Ständerkonstruktion im Post-Use weiters differenziert, ob sie aus zertifiziert nachhaltigem Anbau stammt. Da in Österreich 75% der Wälder über ein Nachhaltigkeitszertifikat verfügen, wird in dieser Arbeit stets angenommen, dass drei Viertel der Hölzer zertifiziert nachhaltig sind. Deshalb werden von den 60% Weiterverwertung der Holz-Ständerkonstruktion 45% der Weiterverwertung z.N. (dccn) und 15% der Weiterverwertung ohne zertifizierte Nachhaltigkeit (dc) zugeteilt. Selbiges gilt für den niedrigen Verwertungsweg, die energetische Verwertung des Holzes.

Diese aufwändige Bestimmung des Post-Use-Potenzials ist für viele Standard-Einbausituationen und Materialien im Urban Mining Index bereits

140 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 105, 112–14, 162.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

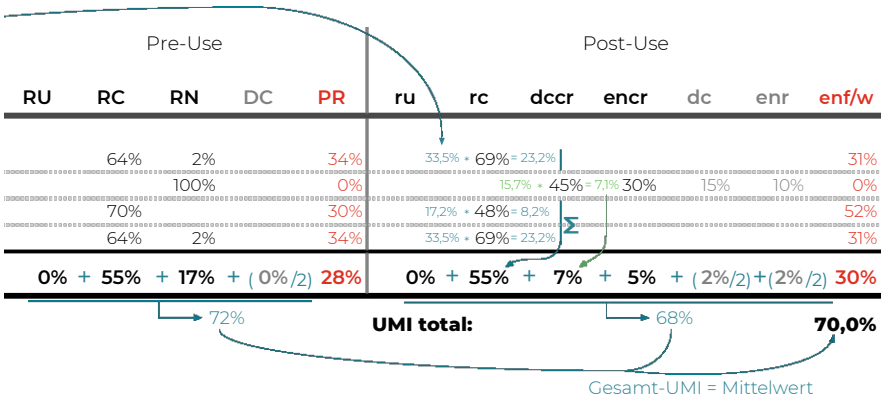



Abb. 29:
Berechnung des Urban Mining Index der beispielhaften Trockenbauwand. Eigene Darstellung.

hinterlegt, sodass diese Ermittlung nur in Sonderfällen nötig ist.[141]

**Der Urban Mining Index**

Die Verwertungswege der einzelnen Bauteilschichten werden nach ihrer Masse gewichtet zusammengezählt und ergeben so die Qualitätsanteile des gesamten Bauteils. So ergeben die 45% zertifiziert nachhaltiges Downcycling (dccr) des Holzes multipliziert mit seinen 15% Masseanteil einen Anteil am gesamten Bauteil von 7%. Eine komplette Materialkonsistenz von 100% kann sowohl in der Errichtungsphase (Pre-Use) als auch in der Rückbauphase (Post-Use) erreicht werden, wenn jeweils nur Wiederverwendung, Wiederverwertung und (zertifiziert nachhaltige) nachwachsende Rohstoffe zum Einsatz kommen. Für den Urban Mining Index werden pro Bauteilschicht und Betrachtungsphase die Anteile der hochwertigen Verwertungswege voll addiert sowie die Anteile der geringerwertigen Verwertungswege zur Hälfte hinzugerechnet:

Im Fall der Trockenbauwand zählen nur die Kategorien dc und enr zum geringeren Loop Potenzial. Es ergibt sich also ein sehr guter Urban Mining Index von 70%. Für eine leichtere Erfassung des Ergebnisses wird der Urban Mining Index zudem als Doppel-Kreis-Diagramm dargestellt. Dabei steht der linke Kreis für den Anteil zirkulärer Materialien im Pre-Use, also vor Einbau, und der rechte Kreis für die Zirkularität Post-Use, also im Gebäude-Rückbau. Die einzelnen Verwertungswege werden farblich dargestellt.

Der Urban Mining Index des gesamten Gebäudes setzt sich analog aus den nach Masse gewichteten UMIs der einzelnen Bauteile zusammen. Da die leichte Trockenbauwand nur 5% an der gesamten Gebäudemasse ausmacht, fließt sie nur zu einem geringen Teil in den UMI des gesamten Gebäudes ein.

141 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 161–64, 172–75.

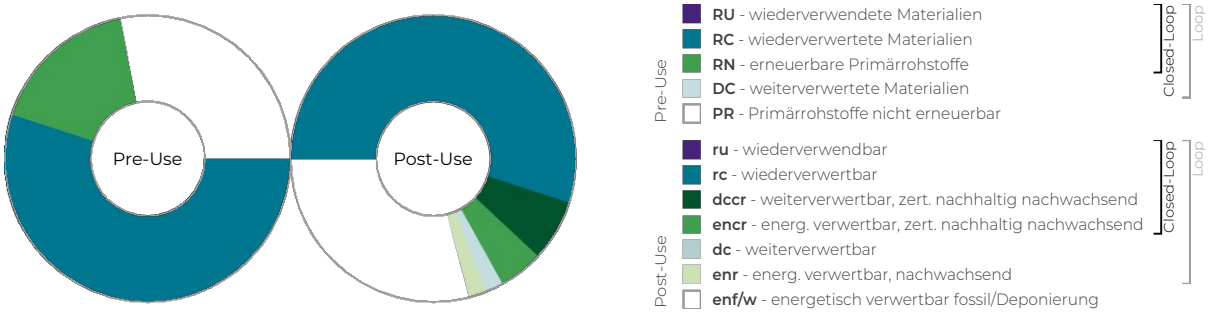



Abb. 30: Darstellung des Urban Mining Index und Legende der Verwertungswege. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

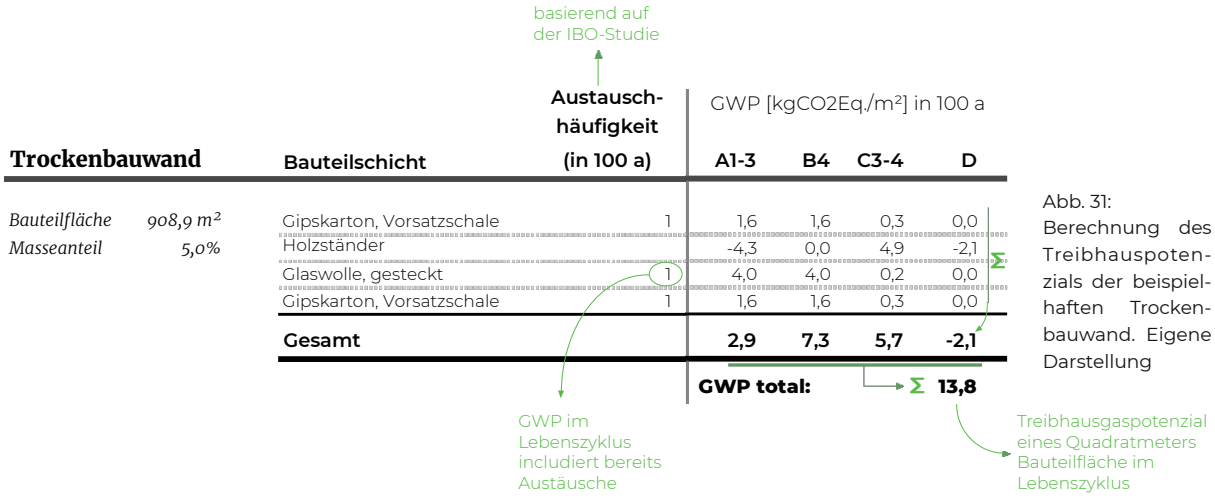



Abb. 31: Berechnung des Treibhauspotenzials der beispielhaften Trockenbauwand. Eigene Darstellung

## Das Treibhauspotenzial

Im Sinne einer ganzheitlich betrachteten Nachhaltigkeit kann die Kreislaufführung von Materialien nicht als Selbstzweck betrachtet werden. Vielmehr muss das Handeln immer wieder auf das zugrundeliegende Ziel, die Ressourcenschonung, ausgerichtet werden. Neben Materialressourcen sind auch Energieressourcen möglichst zu schonen – die Vermeidung von Treibhausgasemissionen muss angestrebt werden. Eine Kreislaufführung von Stoffen, die jedoch nur unter stark erhöhtem $CO_2$-Ausstoß gelingt, verfehlt das Ziel der Nachhaltigkeit.[142] Deshalb ist es notwendig, bei der Untersuchung von Kreislaufpotenzialen parallel auch die Treibhauspotenziale zu betrachten, um zu prüfen, ob sich eine Verbesserung der Kreislaufführung auch auf den Kohlenstoffkreislauf auswirkt.[143]

> *„Für das Erreichen eines neuen planetaren Gleichgewichts spielt das Bauen eine entscheidende Rolle. Die drei wesentlichen Parameter sind dabei die umfassende Reduktion des Materialverbrauchs, des Müllaufkommens und der Energie [...].“* [144]

Wie bei der Untersuchung der Bewertungskriterien bereits diskutiert, ist eine Ermittlung des GWPs für alle Lebenszyklusphasen aktuell mangels Daten kaum realisierbar (Abb. 14 und 33). Mit der Herstellung (A1-3), dem Austausch (B4), der Abfallverwertung und Entsorgung (C3-4) sowie den Lasten und Vorteilen außerhalb der Systemgrenze (D) beschränkt sich die Betrachtung deshalb auf die relevantesten Module. Wo die Datenlage es erlaubt, werden in Modul C und D die den Verwertungswegen entsprechenden Szenarien abgebildet.[145]

Im UMI-Tool wird das GWP analog zur Zirkularität erfasst. So wird bei der Ermittlung des Kreislaufpotenzials jeder Bauteilschicht auch das Treibhauspotenzial dieser Schicht berechnet. Als Datenbasis dient die vom deutschen Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen kuratierten Datenbank ÖKOBAUDAT. Für einige wenige Fälle stehen auf dieser Datenbank keine geeigneten Daten zur Verfügung, weshalb auf andere Quellen wie baubook und Produkt-EPDs zurückgegriffen wird. Durch die Summierung des Treibhauspotenzial jeder Bauteilschicht kann die $CO_2$-Bilanz eines m² Bauteil berechnet und unter Zuhilfenahme der Bauteilflächen kann so das GWP des gesamten Gebäudes ermittelt werden.

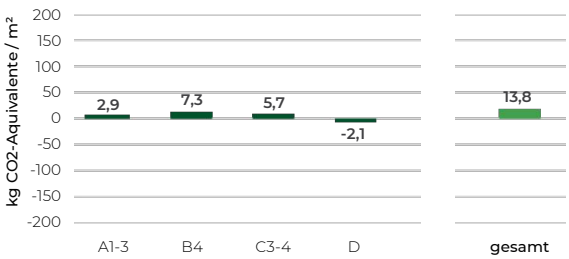



Abb. 32: Darstellung des Treibhauspotenzials der Trockenbauwand. Eigene Darstellung.

142 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 114–15.
143 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 34.
144 Gengnagel und Apellániz, „Lebenszyklusanalyse und parametrischer Raumentwurf“.
145 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 303.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

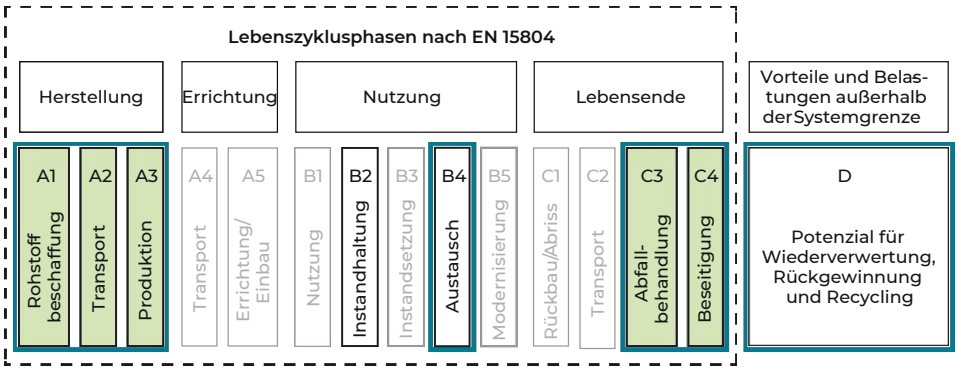



Abb. 33:
Darstellung der im Urban Mining Index erfassten Lebenszyklusphasen zur Berechnung des Treibhauspotenzials im Lebenszyklus sowie der laut Studie Ein Zirkularitätsfaktor für Wien relevanten und erfassbaren Lebenszyklusphasen. Eigen Darstellung basierend auf Ein Zirkularitätsfaktor für Wien, S. 19.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Vorstellung des Fallbeispiels 54
Bestandshaus A: Massivbau konventionell 63
Bestandshaus B: Holz-Beton-Hybridbau 85

# DAS FALLBEISPIEL

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Vorstellung des Fallbeispiels

Als Grundlage für die Untersuchung werden zwei im Rahmen eines Forschungsprojekts tatsächlich realisierte Gebäude, folgend Fallbeispiel genannt, gewählt. Dieses Fallbeispiel, seine Verortung und die Gründe, warum es für diese Masterarbeit ausgewählt wurde, werden nachfolgend präsentiert. Die zwei Gebäude des Fallbeispiels dienen als Kontrollgruppe – als konventionell errichtete Bauten bilden sie das Maß der Kreislauffähigkeit ab, was bereits standardmäßig am Bau erreicht wird. So lassen sich die möglichen Verbesserungen der anderen Bauweisen ins Verhältnis setzen. Die Konstruktion und Materialität dieser Bestandsbauten werden ausführlicher vorgestellt, bevor mithilfe des Urban Mining Index ihr Kreislaufpotenzial bestimmt wird.

## Situation

Im vorarlbergischen Wolfurt, einer Gemeinde in der Metropolregion Bregenz, wurden 2019 zwei Wohnbauten als Forschungsprojekt errichtet. Die zwei Gebäude sind nahezu ident – jedoch ist ein Haus in konventioneller Massivbauweise errichtet und das andere als Holz-Beton-Hybridbau. Das Bauunternehmen Rhomberg untersuchte damit die Wirtschaftlichkeit der Holzbauweise im Vergleich zum Massivbau.

Angelehnt an diese Forschungsarbeit werden nun die Gebäude in der wolfurter Lerchenstraße vergleichen mit in der Kubatur identen kreislaufoptimierten Entwürfen. Dieses Projekt wurde ausgewählt, da es als Mehrparteienwohnhäuser der Gebäudeklasse 5 mit 19 Wohneinheiten ein sehr repräsentativer und effizienter Bautyp ist, der im städtischen Raum viel Anwendung findet. Es handelt sich um ein Projekt, das primär nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten entwickelt wurde – es wird untersucht, ob auch gerade in diesem Kontext kreislauffähige Bauweisen bestehen können. Da die Gebäude des Fallbeispiels bereits als Vergleich angelegt wurden, wurde eine Grundstruktur gewählt, die sowohl im Holzbau als auch im Massivbau sinnvoll ist. Zudem wird eine gebaute Definition für die „konventionelle Bauweise“ geliefert.

## Verortung

Wolfurt ist eine Marktgemeinde in Vorarlberg mit etwa 9 000 Einwohner:innen. Im Ballungsraum Rheintal zwischen den Städten Bregenz und Dornbirn gelegen, wächst die Bevölkerungszahl der Ort-

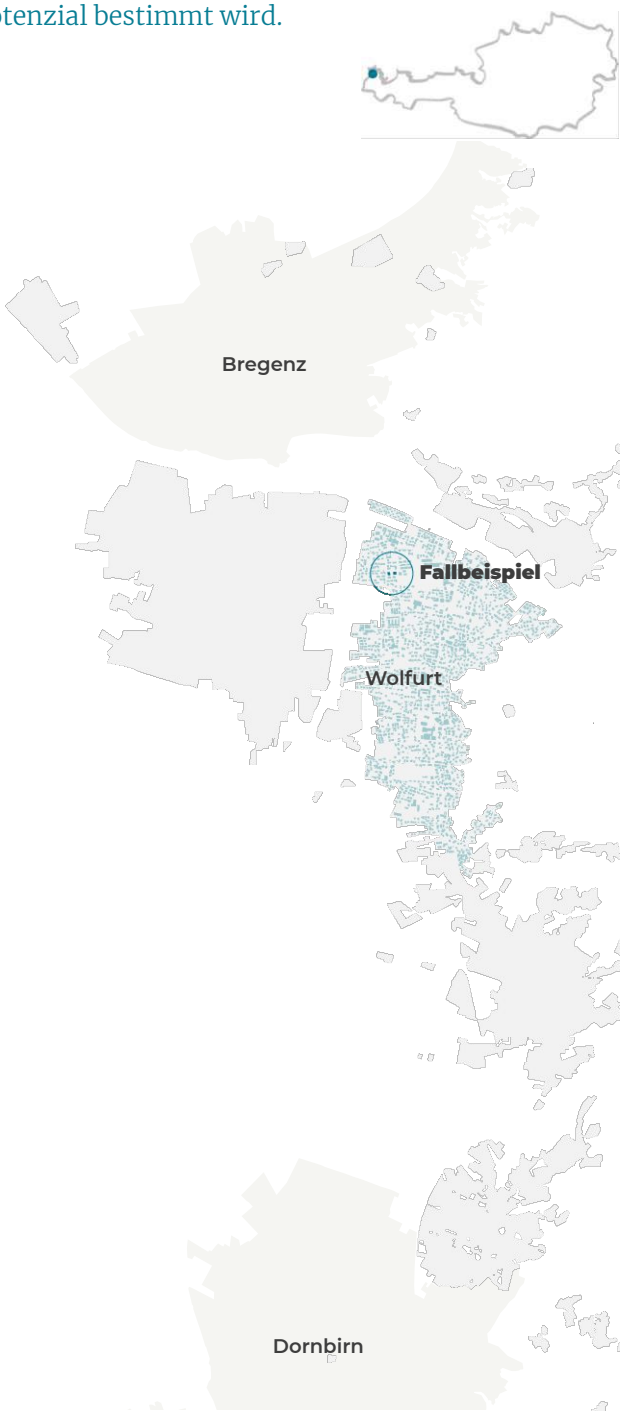



Abb. 34: Verortung des Fallbeispiels, maßstabslos. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

schaft seit den 1960er Jahren kontinuierlich an.146 Die Bebauung ist durch Zersiedelung und Einfamilienhäuser geprägt – mehrgeschossige Bauten und Wohnangebote zur Miete sind rar. Aufgrund der Nähe und guten Erreichbarkeit der beiden wirtschaftlich starken Oberzentren Bregenz und Dornbirn ist Wolfurt ein typischer Pendler:innenort.

Von der Lerchenstraße aus kann das Zentrum von Bregenz in 13 Minuten mit dem Fahrrad und in nur 7 Minuten per Auto erreicht werden. Dornbirn kann mit der Rheintal-Autobahn motorisiert in 12 Minuten erreicht werden – doch auch mit dem Fahrrad ist man nur 28 Minuten unterwegs. Zu Fuß können in einem 15-Minuten-Radius mehrere Nahversorger, Ärzt:innen, eine Bildungseinrichtung sowie mehrere Erholungsgebiete erreicht werden. Zudem ist eine Bushaltestelle direkt am Baugebiet vorgesehen, die innerhalb von 2 Minuten in das Ortszentrum und 11 Minuten zum Bahnhof von Wolfurt führt.147 Das Baugebiet kann also als sehr gut angebunden beschrieben werden.

Aufgrund der günstigen Lage und des rapiden Bevölkerungswachstums in der Region Rheintal war es sinnvoll, hier mehr hochwertigen Wohnraum in verdichteter Form zu schaffen. Mit dieser Zielsetzung hat die Gemeinde Wolfurt 2016 eine Quartiersbetrachtung durchgeführt, die Kriterien für die Bebauung festlegte, welche einen „Mehrwert für das Quartier und alle davon Betroffenen“ schaffen sollten.148

Ziel war, dass das Baugrundstück gemeinsam mit dem benachbarten Bauplatz östlich der Lerchenstraße eine Quartiersmittel bildet, die zwischen den verdichteten Bebauungen aus den 1970er Jahren und den Einfamilienhausstrukturen in der Umgebung vermittelt. Dazu wurde ein Außenraumkonzept über beide Baufelder und die Lerchenstraße hinweg entwickelt, welches Verkehrsberuhigung und Aufenthaltsqualität schafft. In diesem Zuge wurde bereits eine Bushaltestelle für den angedachten Ausbau des ÖPNVs architektonisch integriert. Auch die oberirdischen PKW-Abstellflächen wurden ins Konzept eingebunden – es wurden nur wenige Parkplätze vorgesehen, die im Zuge einer temporären Sondersituation (z.B. Quartiersfest) umgenutzt werden können. Des Weiteren führt nun ein öffentlicher Rad- und Fußweg über beide Baugrundstücke, der Teil eines übergeordneten Radwegkonzepts ist. Neben den grundsätzlich verpflichteten Spielplätzen wurde die Schaffung von Urban Gardening und gemeinschaftlichen Grünräumen sowie die Pflanzung von insektenfreundlichen Stauden und Bäumen für das Außenraumkonzept vorgegeben. Auch der Erhalt der Bäume an der Flurstraße sowie die Einbindung eines „kleinen Platzes“ war Teil der Vorgaben.

146 Siehe: Statistik Austria, „Ein Blick auf die Gemeinde: Wolfurt“.
147 Siehe: VMobil, „Linie 148“.
148 Siehe: Bechter, „Lerchenstraße Wolfurt – Quartiersbetrachtung“, 8.

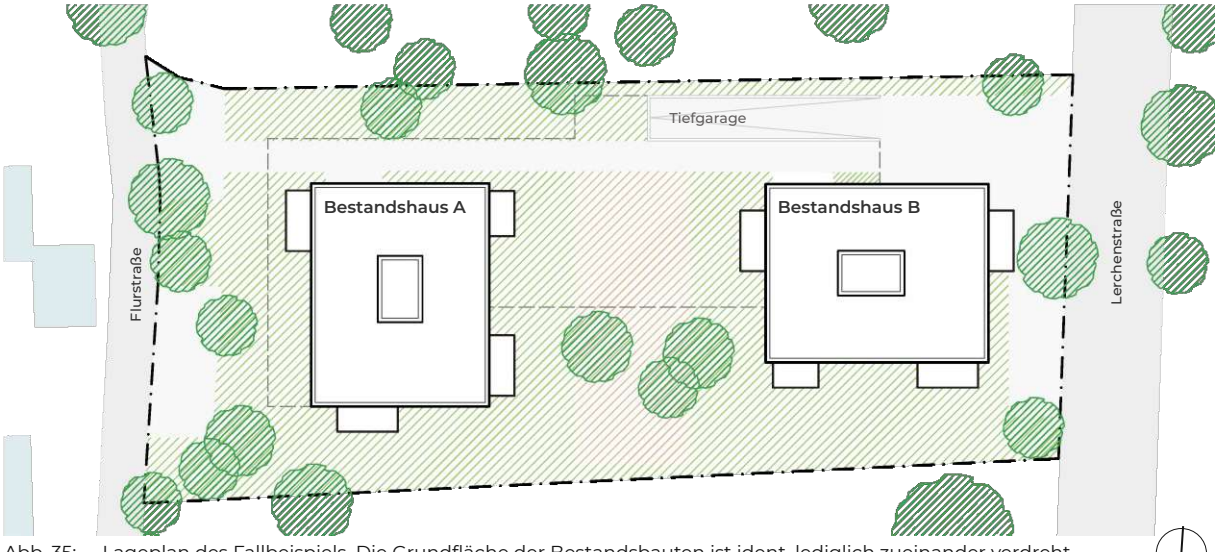



Abb. 35: Lageplan des Fallbeispiels. Die Grundfläche der Bestandsbauten ist ident, lediglich zueinander verdreht. Maßstab 1:750. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Das Forschungsprojekt

Im Rahmen der Quartiersbetrachtung wurde ein Bauträgerwettbewerb für das Grundstück zwischen Lerchenstraße und Flurstraße durchgeführt, den Rhomberg Bau gemeinsam mit der Wohnbauselbsthilfe gewann. Die Planungsleistung stammt vom Architekturbüro Schnetzer Kreuzer aus Bregenz.

Der entscheidende Mehrwert des Projekts ist, neben der Schaffung von Wohnraum, die Realisierung eines praxisorientieren Forschungsprojekts. Die zwei Baukörper wurden in der Kubatur nahezu ident geplant – jedoch in zwei verschiedenen Bauweisen. Baukörper A ist ein konventioneller Massivbau. Die Erdgeschossaußenwände, die Wohnungstrennwände und das Treppenhaus wurden alle aus Stahlbeton gebaut. Die Außenwände in den Obergeschossen sind aus Hochlochziegeln, die Fassade ist ein Wärmedämmverbundsystem mit Polystyrol-Dämmung. Baukörper B wurde in Holz-Hybridbauweise realisiert: Die Außenwände bestehen aus Holz-Tafelbau mit hinterlüfteter Holzschalung, die Geschossdecken aus Holz-Massivbau und das Treppenhaus sowie die Wohnungstrennwände bestehen aus Stahlbeton.

Mithilfe dieses Versuchsobjekts konnte die Konkurrenzfähigkeit des Holzbaus im Vergleich zu konventionellen Gebäuden untersucht werden. Der Kostenvergleich ergab, dass zur Bauzeit die Holz-Beton-Hybridbauweise etwas teurer in der Errichtung war als der Massivbau. Auch die Vorgaben zu Statik und Brandschutz waren mit dem Massivbau wesentlich leichter zu erreichen als mit dem Holz-Hybridbau – hier wurde vonseiten des Forschungsprojekts die sehr strengen Vorgaben für den Holzbau kritisiert. Die Bauzeit jedoch war aufgrund des hohen Vorfertigungsgrads und der trockenen Bauweise beim Baukörper B 30 – 40% kürzer als beim Baukörper A. Die Vorteile aufgrund der Vorfertigung zeigten sich zudem in der Ausführungsqualität und der geringeren Witterungsabhängigkeit während der Bauphase. Im Bereich Gebäudeökobilanz schnitt der Holzbau wenig überraschend deutlich besser ab als der konventionelle Bau. Dies hatte auch eine deutlich höhere Fördersumme der Vorarlberger Wohnbauförderung zur Folge. Die Untersuchung der Kund:innenpräferenzen ergab, dass für die Mieter:innen und Käufer:innen die Bauweise des Gebäudes eine verschwindend geringe Relevanz bei der Wahl der Wohnungen hatte. Insgesamt resümierten die Verfasser:innen der Studie, dass mehrgeschossige Wohnbauten mit einem erhöhten Holzanteil auf Dauer ein höheres Potenzial haben als Massivbauten – besonders aufgrund ihrer größeren Flexibilität, der hohen Vorfertigung, einer besseren Wohnqualität und aus ökologischen Aspekten.[149]

149 Siehe: Rhomberg Bau GmbH, „Innovationsprojekt Wolfurt Lerchenstraße".



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

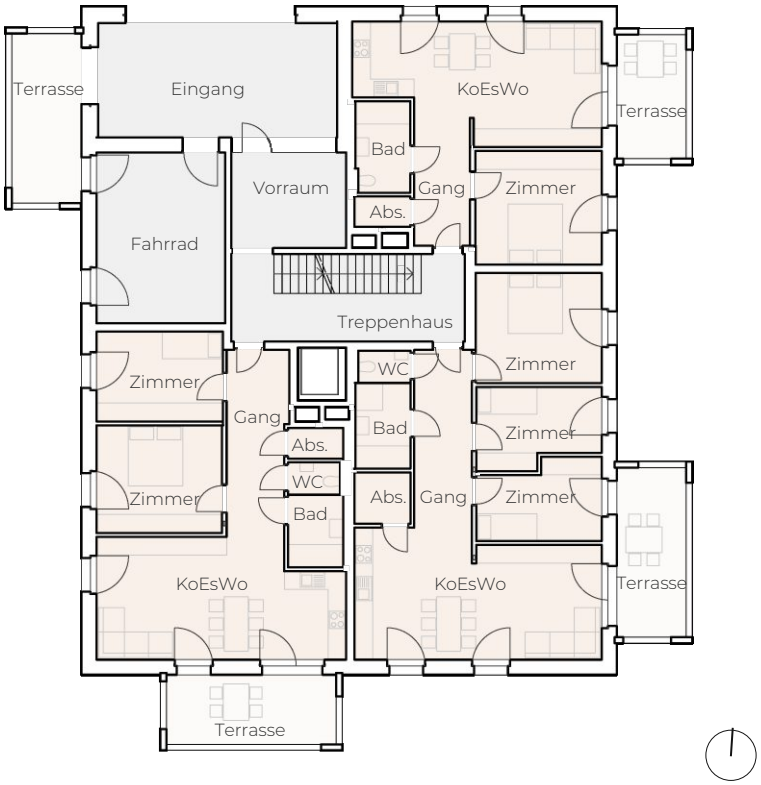



Abb. 36: Erdgeschoss-Grundriss. Maßstab 1:250. Orientierung nach Bestandshaus A. Eigene Darstellung.

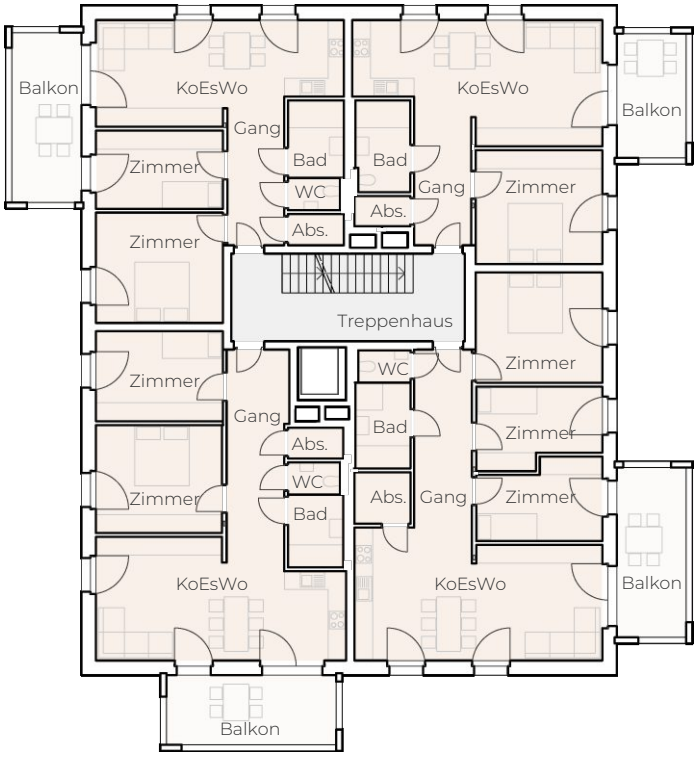



Abb. 37: Regelgeschoss-Grundriss. Maßstab 1:250. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Die Gebäude

Bei den zwei Gebäuden handelt es sich um allseitig freistehende Kuben mit Flachdach. Sie sind unterkellert und mit einer gemeinsamen Tiefgarage verbunden. Beide Baukörper wurden fünfgeschossig geplant. Aufgrund der städtebaulichen Situation musste ein Gebäude – der Massivbau – um ein Stockwerk reduziert werden. Für die Forschungsarbeit wurde der Massivbau weiterhin als fünfgeschossig betrachtet, seine Daten wurden rechnerisch korrigiert. Im Sinne der Vergleichbarkeit schließt sich die Verfasserin diesem Vorgehen an. Auch in dieser Thesis wird für alle Gebäude die gleiche, höhere Geschossanzahl angenommen. Da sich die Tiefgarage über beide Gebäude erstreckt, kann sie nicht klar einem Bau zugeordnet werden. Für diese Betrachtung wird deshalb pro Gebäude genau die Hälfte der Tiefgarage mitbetrachtet.

## Grundrisse

In jedem Gebäude befinden sich 19 Wohneinheiten, die als Vierspänner über ein zentrales Treppenhaus erschlossen werden. Davon sind fünf Zwei-Zimmer-Wohneinheiten mit 60 m² Wohnnutzfläche, neun Drei-Zimmer-Wohneinheiten mit 80 m² Wohnnutzfläche sowie fünf Vier-Zimmer-Wohneinheiten mit 90 m² Wohnnutzfläche. Alle Wohneinheiten sind übereck angeordnet – die in den Hausecken liegenden Wohnräume können somit zweiseitig belichtet werden. Zudem verfügt jede Wohnung über einen privaten Balkon. Die Sanitärräume und Küchen sind alle an der mittleren Längswand ausgerichtet. Durch diese sehr wirtschaftliche Anordnung ist es möglich, mit nur zwei Steigleitungen für das gesamte Gebäude auszukommen. Aufgrund der innenliegenden Sanitärräume kann die teure Fassadenfläche effizient genutzt werden – mit einer Belichtungstiefe von etwa 4 m werden die Aufenthaltsräume trotz einer Fensterfläche von nur etwa 21 % gut belichtet. Insgesamt können die Wohnungen als kompakt, aber hochwertig geschnitten beschrieben werden.

## Tragwerksentwurf

Wie bereits die Grundrisse ist auch die Statik der Gebäude effizient organisiert. Alle vertikalen lastabtragenden Elemente liegen übereinander. Die Decken sind einachsig entlang in Richtung der schmalen Gebäudeseite gespannt (siehe Abb. 38). Zur Lastabtragung werden die Außenwände, die Treppenhaus- und Wohnungstrennwände sowie eine untergeordnete Achse in der Ebene der Innenwände herangezogen. Die untergeordnete Achse dient dazu, die Decken zu Durchlaufträgern zu machen – sie besteht im Massivbau aus Stahlstützen und Unterzügen und im Haus B aus Brettsperrholz. Im Bereich der Tiefgarage lösen sich einige der lastabtragenden Scheiben in Stützen und Unterzüge auf. Die Gründung erfolgt als Bodenplatte unter der Tiefgarage. Lediglich im Eingangsbereich springt die Thermische Hülle nach innen. Die Lastabtragung wird jedoch nicht unterbrochen und die tragenden Wände sind allseitig wärmegedämmt, sodass eine thermische Entkoppelung vermieden werden kann. Abgesehen hiervon gibt es im Gebäude weder thermische noch statische Vor- oder Rücksprünge. Die Balkone sind selbsttragend und vorgestellt.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

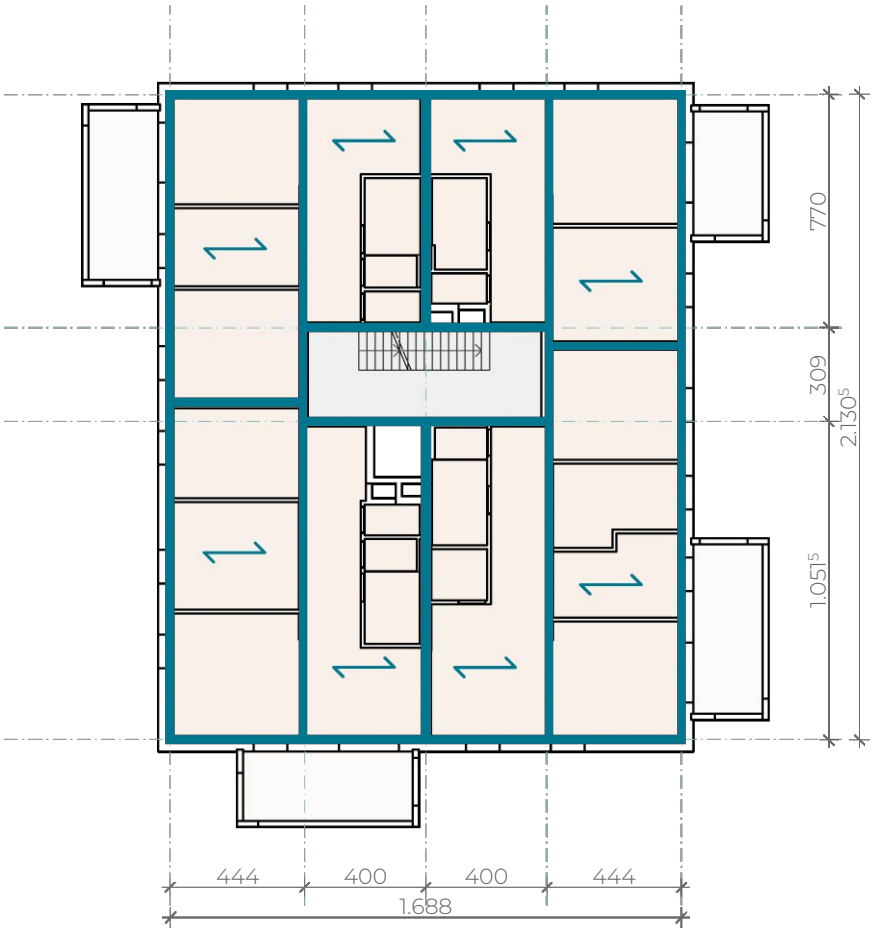



Abb. 38: Konzeptzeichnung Tragwerk. Alle farblich markierten Wände sind tragend. Maßstab 1:250. Eigene Darstellung.

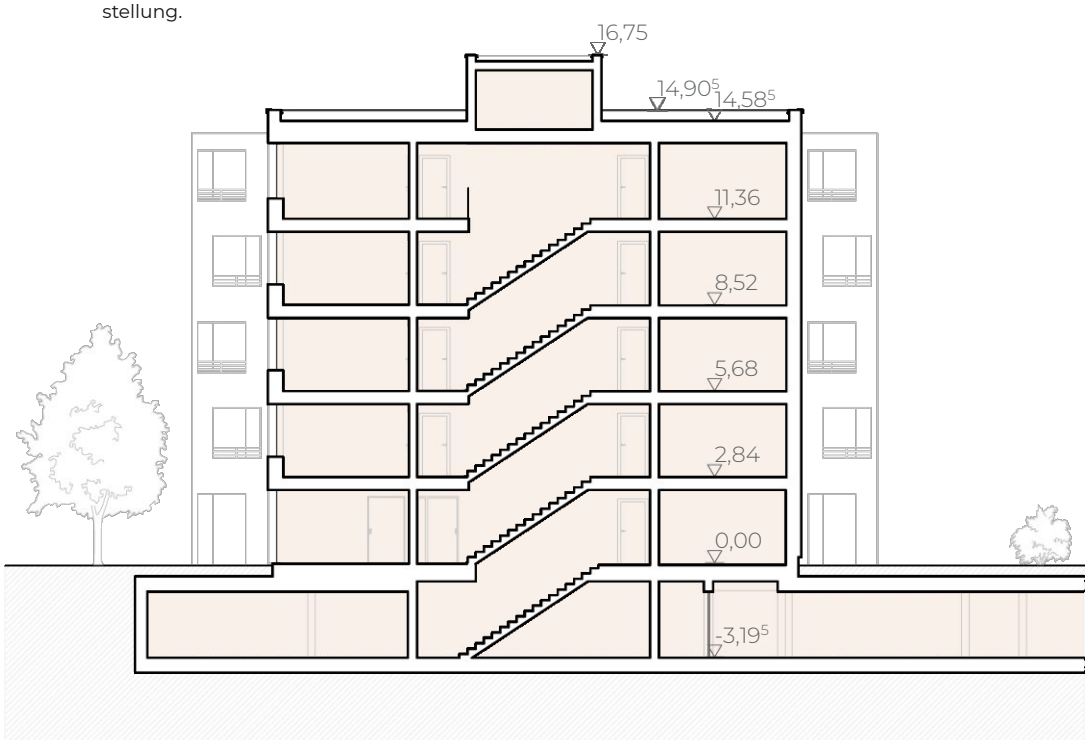



Abb. 39: Konzeptueller Schnitt durch den Erschließungs-Kern. Maßstab 1:250. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.





Abb. 40: Unten: Luftbildaufnahme des Quartiers. Quelle: Google Earth



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



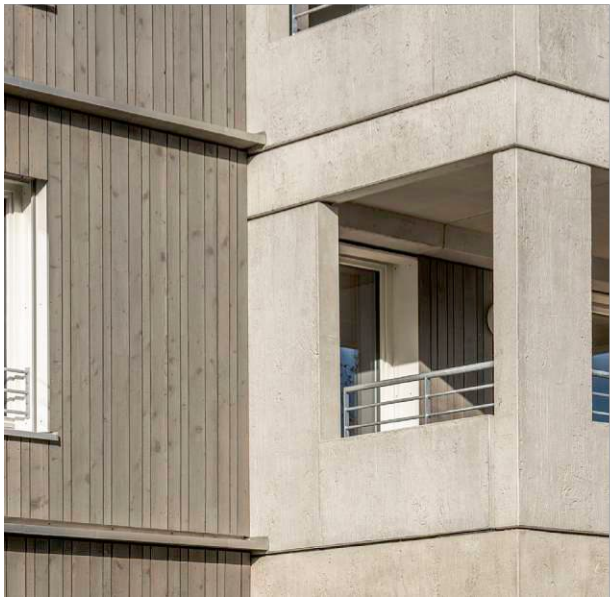




Abb. 41: Alle weiteren Abbildungen: Außenaufnahmen der Gebäude Lerchenstraße 25 und Flurstraße 16. Fotos: Weissengruber



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 42: Außenaufnahme nach der Fertigstellung von Haus A. Flurstraße 16, 6922 Wolfurt. Foto: Weissengruber.

# BESTANDSHAUS A: MASSIVBAU KONVENTIONELL

## DIE WIRTSCHAFTLICHE BAUWEISE

Das Bestandshaus A repräsentiert den Status Quo der Bauwirtschaft. Wenn – wie es im Objektbau oft der Fall ist – die Wertschöpfung oberstes Ziel ist, erfolgt die Bauweise meist vergleichbar zu Haus A. Üblich ist eine Konstruktion aus mineralischen Materialien – Ziegeln und besonders Beton - da sie kostengünstig, etabliert und in fast jeder Situation gleich anzuwenden sind. Als Fügetechniken kommen besonders nasse Verbindungen und Klebeverbindungen zum Einsatz, da sie wenig Präzision erfordern. Die Dämmung erfolgt häufig unter Verwendung besonders kostengünstiger erdölbasierter Stoffe wie EPS und XPS, insbesondere in Kombination mit einem Wärmedämmverbundsystem für die Fassade.

Obwohl das Haus A nur viergeschossig realisiert wurde, wurde es mit fünf Geschossen geplant und wird - um mit dem Gebäude B vergleichbar zu sein - auch in der Auswertung als solches betrachtet.



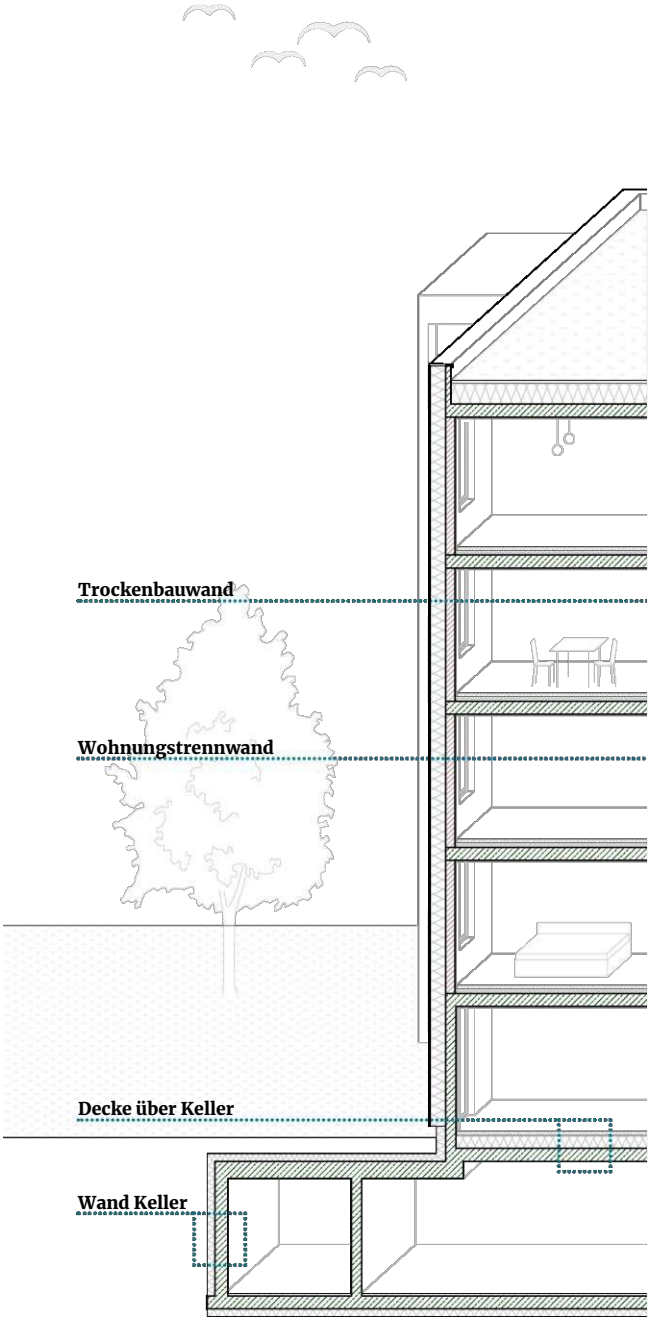
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Die Konstruktion

Das Tragwerk von Haus A besteht fast ausschließlich aus Stahlbeton in Ortbetonbauweise: Der komplette Keller, das Erdgeschoss, alle Decken sowie das Treppenhaus und die Wohnungstrennwände wurden in Stahlbeton ausgeführt. Neben der vertikalen und horizontalen Lastabtragung kann der Stahlbeton als ungerichtetes, statisch hochleistungsfähiges Material auch ohne weitere Maßnahmen die Aussteifung des Gebäudes übernehmen. Durch den Einsatz von fast nur einem Material können die Anschlüsse sehr leicht ausgeführt werden. Allerdings bringt der Stahlbeton, besonders als Ortbeton, auch große Massen mit sich. Aufgrund der nötigen Überdeckung der Stahl-Bewehrung sind alle tragenden Elemente zwischen 20 und 25 cm dick.

Die Außenwände der Obergeschosse werden durch Hochlochziegel getragen – mit einem 18 cm starken Aufbau. Der Wechsel von Beton zu Ziegel hat neben der etwas schlankeren Wand mehrere Gründe. Zum einen haben Hochlochziegel bessere Dämmeigenschaften, erreichen also eine etwas höhere Energieeffizienz in der Nutzung. Außerdem sind sie als diffusionsoffeneres Bauteil bei den Bewohner:innen beliebter und schlicht günstiger in der Herstellung.

Im konventionellen Haus A werden keine expliziten Maßnahmen ergriffen, um die Stoffkreisläufe des der Konstruktion zu schließen. Die Materialien werden so hergestellt und verbaut, wie es aktuell am Bau üblich ist. Das bedeutet, dass bei den Massivbaustoffen keinerlei Rezyklat verwendet wird und keine Zusatzmaßnahmen zur Treibhausgasreduktion der Baustoffe ergriffen werden. Das bedeutet auch, dass die Verbindungen der Konstruktion nicht ohne Zerstörung und schweres Gerät gelöst werden können. Der Stahlbeton wird vor Ort über die Bewehrung verbunden und durch das Abbinden des Zements irreversibel. Die Ziegel werden mit einem Mörtel vermauert, der härter als die Steine selbst ist und demnach keinen Rückbau zulässt.






TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

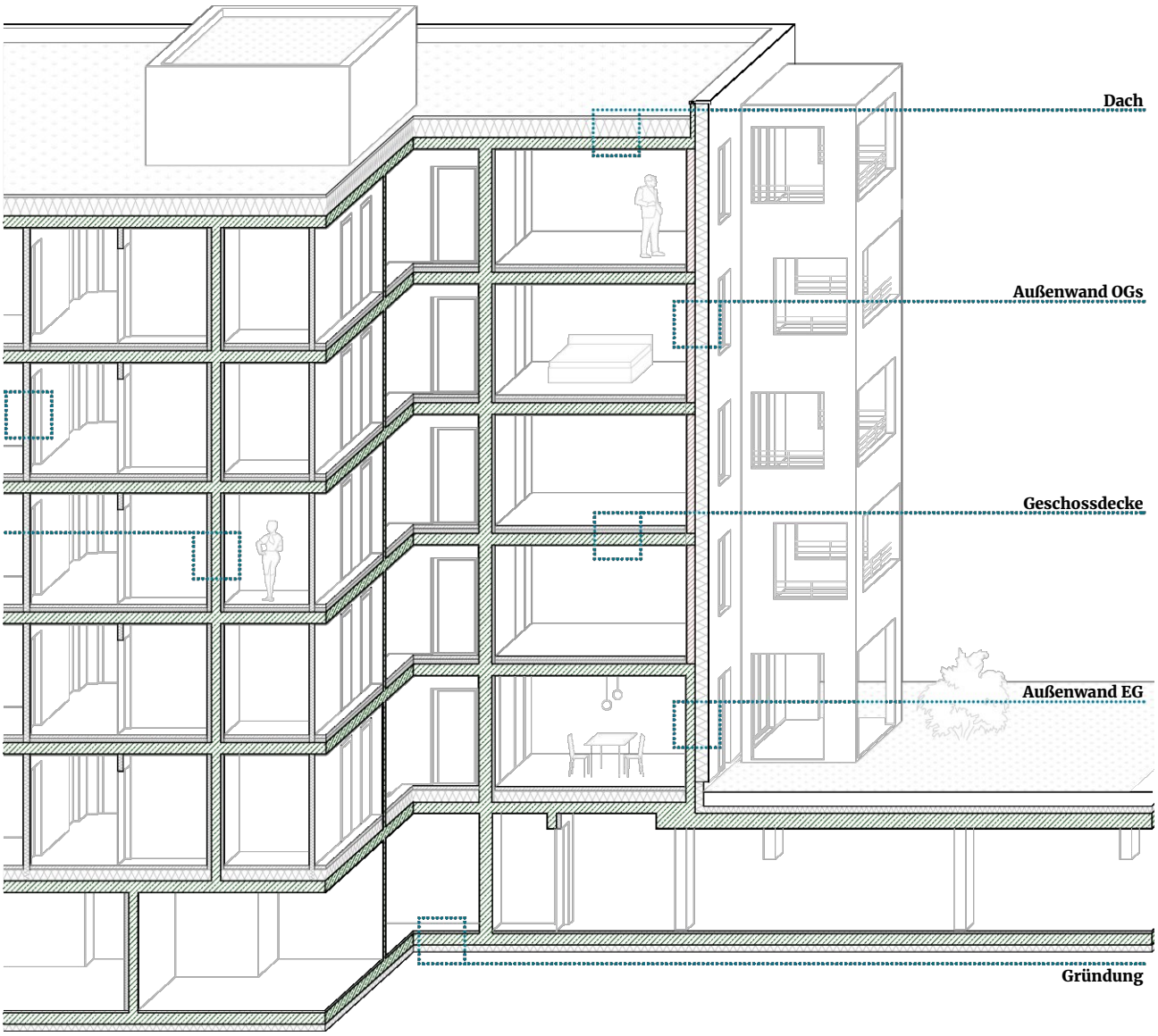



Abb. 43: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Haus A. Die hervorgehobenen Aufbauten werden im folgenden Kapitel genauer dargestellt. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

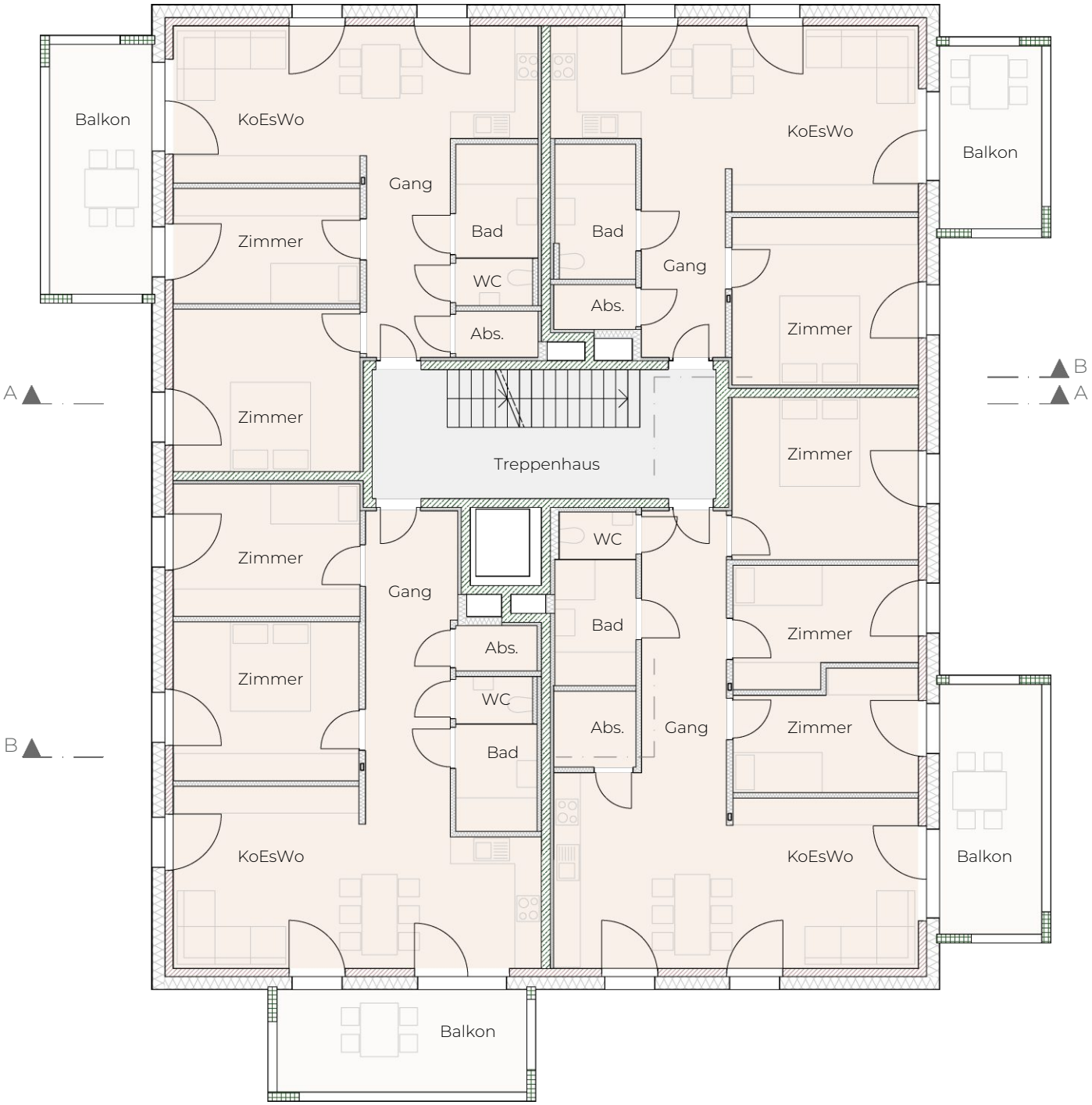



Abb. 44: Regelgrundriss von Haus A. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

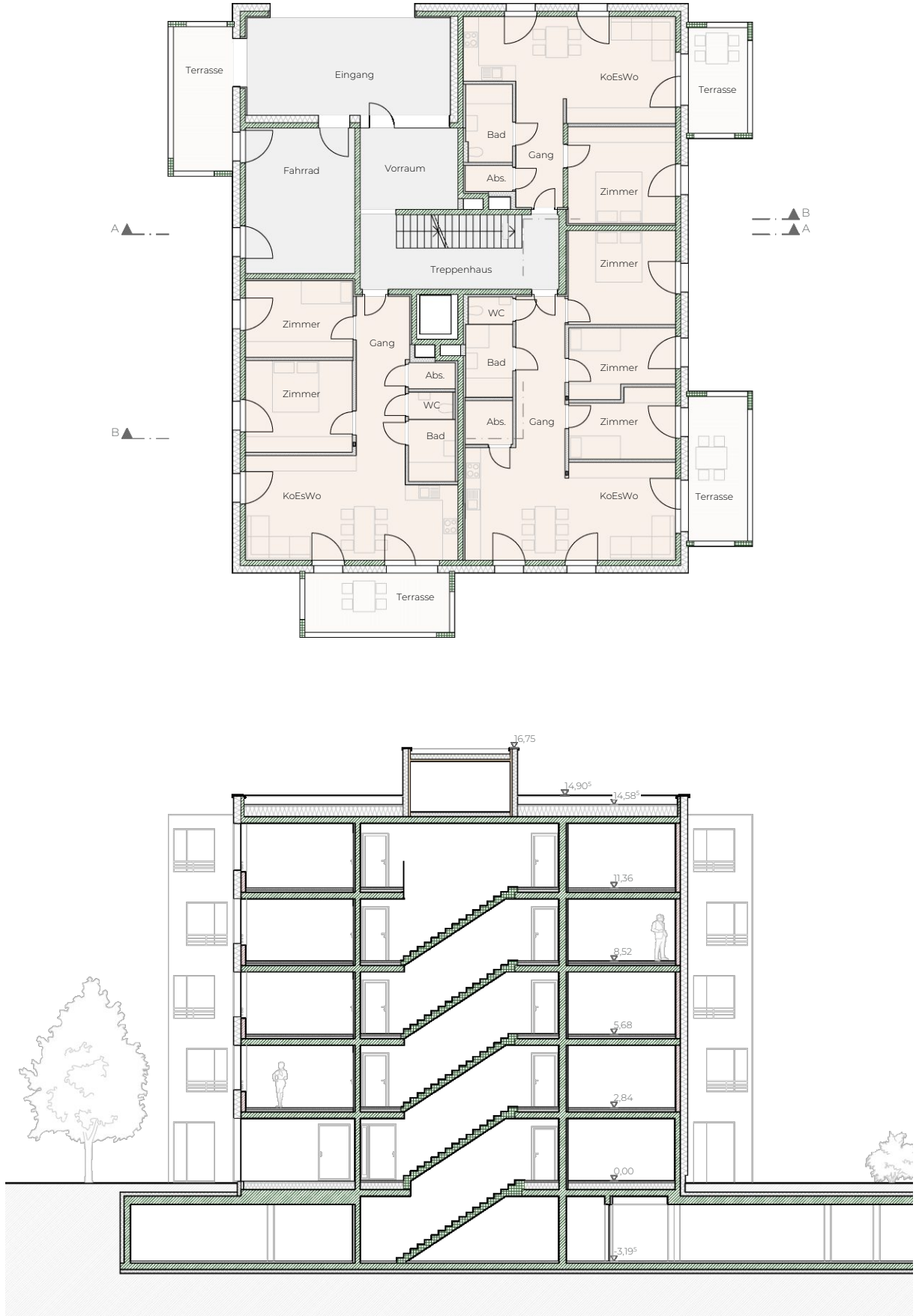



Abb. 45: oben: Erdgeschossgrundriss, unten: Schnitt A - A von Haus A, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Die Aufbauten

Aufbauend auf der Konstruktion, die im vorigen Kapitel vorgestellt wurde, werden nun die Standardaufbauten der konventionellen Bauweise vorgestellt. Der dreidimensionale Schnitt (Abb. 43) gibt eine Übersicht über alle Bauteile, die nun detaillierter vorgestellt werden.

Die Verbindungsmittel im konventionellen Bau sind einerseits meist einfach und erfordern wenig Fachkennnisse, sind dadurch aber selten im Nachhinein anpassbar oder gar rückbaubar. Dies gilt nicht nur für die Konstruktion, sondern auch für den Ausbau des Gebäudes. Fast alle Verbindungen sind nass: das Gießen von Beton und Estrich, das Mauern mit Mörtel und Klebeverbindungen, zum Beispiel von Bodenbelägen oder Fassaden. Sie kommen in fast jedem Standardaufbau von Haus A vor. Neben der Irreversibilität, die die meisten nassen Verbindungen gemein haben, bedeutet diese Bauweise auch eine wesentlich längere Bauzeit. Schließlich gehen sie stets mit einer Trocknungszeit einher.

## Keller

Sowohl die Keller-Wände als auch die Bodenplatte sind in Stahlbeton ausgeführt. Als Perimeterdämmung sind nicht alle Dämmstoffe geeignet. Unter den Kunststoffdämmungen ist nur Extrudiertes Polystyrol (XPS) witterungsbeständig genug für den Einsatz als erdberührtes Bauteil. Dieses kann eine äußert geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,027 W/mK erreichen,[150] sodass die Kelleraußenwand bei nur 10 cm Dämmstärke einen U-Wert von 0,25 W/m²K hat. Abgedichtet wird der Keller als schwarze Wanne – das heißt er ist allseitig mit einer Bitumenbahn ummantelt. Hinzu kommt beim Kellerboden ein Fußbodenaufbau, der die Abdichtung schützt. Ein Zementestrich auf einer Trennlage und Trittschalldämmung schafft die ebene Oberfläche, auf der der Bodenbelag aus Fliesen aufgebracht wird.

## Außenwand

Mit seiner hohen Rohdichte ist Beton in vielerlei Hinsicht hochleistungsfähig. Gute Wärmedämmeigenschaften gehören bei einer Wärmeleitfähigkeit von 2,3 W/mK allerdings nicht zu seinen Stärken. Hochlochziegel sind hier mit ihrer porösen Struktur und geringeren Dichte klar im Vorteil. So erreichen die Obergeschossaußenwände bei 2 cm schlankerem Aufbau dennoch einen besseren U-Wert (0,10 W/m²K) als das Erdgeschoss mit tragenden Stahlbetonwänden (0,10 W/m²K). Die größte Dämmleistung übernimmt in beiden Fällen das Wärmedämmverbundsystem (WDVS) aus Expandiertem Polystyrol (EPS) und einer Fassadenhaut aus Silikonharzputz. Im Gegensatz zu einem Mineralwolle-WDVS kann dieses System dank der sehr leichten erdölbasierten EPS-Dämmung und der dünnen Putzschicht allein durch eine Verklebung auf die Konstruktion aufgebracht werden. EPS-Wärmedämmverbundsysteme zählen zu den günstigsten und gleichzeitig dämmstärksten Fassaden am Markt. Mit Anhaftungen sowohl vom Fassadenkleber als auch vom Putz können sie im Rückbau nicht sortenrein ausgebaut werden. Doch erdölbasierte Dämmstoffe werden ohnehin ausschließlich energetisch verwertet.[151] Innen wurden die Beton- und die Ziegelwand mit Gips verputzt. Dadurch entsteht eine gleichmäßig makellose Oberfläche und die Schlitzungen, die für die Elektroinstallation in den Außenwänden vorgenommen werden, können verborgen werden.

## Trockenbau

Die Wände innerhalb der Wohnungen werden in Haus A alle als Trockenbauwände ausgeführt. Diese sind leicht, schnell zu errichten und können unabhängig vom Tragraster positioniert werden.

150 Ein Beispielprodukt ist: Austrotherm, „XPS Premium P“.

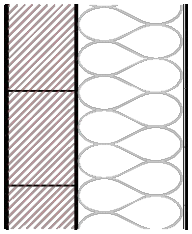
151 Siehe: Hillebrandt u. a., Atlas Recycling, 86.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Haus A: Außenwand OGs

*Bauteilfläche: 933,5 m² (4,9%)*

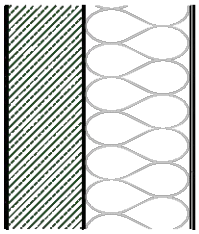


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 5 | Gipsputz |
| 180 | Hochlochziegel |
| 5 | Kleber, mineralisch |
| 280 | EPS, geklebt |
| 8 | Silikonharzputz |
| **478** | |

**U-Wert: 0,10** W/m²K

## Haus A: Außenwand EG

*Bauteilfläche: 242,1 m² (3,3%)*

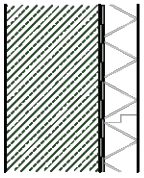


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 5 | Gipsputz |
| 200 | Stahlbeton |
| 5 | Kleber, mineralisch |
| 280 | EPS, geklebt |
| 8 | Silikonharzputz |
| **498** | |

**U-Wert: 0,11** W/m²K

## Haus A: Außenwand Keller

*Bauteilfläche: 662,7 m² (10,5%)*

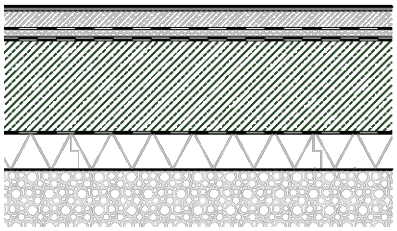


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 250 | Stahlbeton |
| 10 | Aluminium-Bitumen-Bahn |
| 100 | XPS, verklebt |
| **360** | |

**U-Wert: 0,25** W/m²K

## Haus A: Gründung

*Bauteilfläche: 782,8 m² (17,2%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Fliesen |
| 50 | Zementestrich |
| | PE-Folie |
| 20 | EPS-TSDM |
| 5 | Aluminium-Bitumenbahn |
| 250 | Stahlbeton |
| | PE-Folie |
| 100 | XPS |
| | Kapillarbrechende Schicht |
| **435** | |

**U-Wert: 0,22** W/m²K



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die Konstruktion aus dünnen Blech-Profilen wird schallentkoppelt montiert. Der Zwischenraum kann für Installationen genutzt werden und ist ansonsten mit Glaswolle ausgefacht. Außen ist die Trockenbauwand beidseitig mit Gipskartonplatten beplankt. Nach der Geschossdecke hat die Trockenbauwand in Haus A die zweitgrößte Bauteilfläche, aber aufgrund ihres geringen Gewichts macht sie nur 1,5 % der gesamten Gebäudemasse aus.

## Wohnungstrennwand

Die Wohnungstrennwände und die Wände des Treppenhauses werden zur Lastabtragung und Aussteifung genutzt und dementsprechend in Stahlbeton ausgeführt. Als Trennelemente zweier Nutzungseinheiten haben sie Schallschutzanforderungen - laut OIB-Richtlinie 5 eine Mindestschallpegeldifferenz von 50 dB – zu erfüllen.[152] Für das Treppenhaus als Fluchtweg gelten zudem erhöhte Anforderungen an das Brandverhalten von Oberflächen. Im mineralischen Massivbau können sowohl der Schallschutz als auch die Nichtbrennbarkeit von Oberflächen problemlos gewährleistet werden – die Treppenhauswand kann trotz höherer Ansprüche genauso ausgeführt werden wie die normalen Wohnungstrennwände.

Die 20 cm dicke Stahlbetonwand wird auf der Sichtseite mit Gips verputzt, um Spuren der Verarbeitung zu überdecken und eine ebene weiße Oberfläche zu erhalten. Auf der anderen Seite erhöht eine Trockenbauwand als Vorsatzschale den Schallschutz.

## Geschossdecke

Die Geschossdecke wird von einer 25 cm dicken Stahlbetonschicht getragen und unterseitig mit einem Gipsputz verspachtelt. Der Bodenaufbau besteht aus einem Zementestrich mit integrierter Fußbodenheizung – laut Harald Hutter der Firma Rhomberg Bau die üblichste Form der Raumkonditionierung im Wohnbau in Vorarlberg.[153] Darüber wird der Bodenbelag verlegt – Klebeparkett in den Aufenthaltsräumen und Fliesen in den Nassräumen. Unter dem Estrich und der Trennlage ist neben der EPS-Trittschalldämmung eine weitere EPS-Lage, die als Installationsebene dient. Die Geschossdecke hat mit der Stahlbeton-Decke und dem Estrich zwei Schichten an nassen Verbindungen. Beide benötigen eine mehrwöchige Trocknungszeit, was den Bauablauf enorm beeinflusst. Gleichzeitig sorgen beide schweren biegesteifen Scheiben und die dazwischenliegende Trittschalldämmung für einen sehr guten Schallschutz.

**Sondersituation: Decke über Keller**
Die unterste Geschossdecke, die Decke über dem Keller, weicht von den anderen Decken geringfügig ab. Zum Keller, einem unbeheizten Raum, wird eine zusätzliche Dämmschicht aus EPS benötigt. Die Installationsebene wird hier auch mit EPS, allerdings mit einem Recycling-Granulat ausgeführt. Dieses Granulat kann die Installationsleitungen deutlich fugenloser umschließen und somit eine bessere Dämmleistung erreichen als zugeschnittene Plattenstoffe. Zum Keller hin ist die Decke nicht verputzt.

## Dach

Das Dach ist als ein konventionelles Warmdach ausgeführt. Über der Konstruktion aus 25 cm starkem Stahlbeton wird eine bituminöse Dampfsperre vollflächig verschweißt, die ein Eindringen des Wasserdampfs in die Dämmschicht verhindert. Die Dämmung besteht auch beim Dach aus Expandiertem Polystyrol. Darüber wiederum ist die kunststoffbasierte Dichtungsebene angebracht, welche die wasserführende Schicht bildet. Um sie vor Versprödung durch direkte Sonneneinstrahlung und eine Beschädigung durch Windsog zu schützen, ist darüber eine 6 cm starke Kiesschüttung angebracht. Das Entwässerungsgefälle wird durch eine Gefälledämmung erreicht. Da die Entwässerung nicht weiter thematisiert wird, wird das Material zur Vereinfachung in seiner durchschnittlichen Höhe von 10 cm weiterbetrachtet.

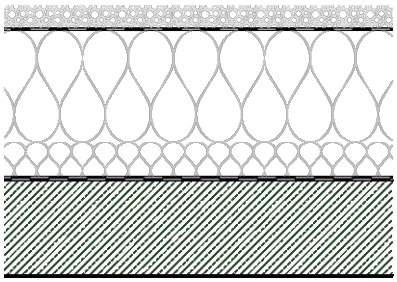
152 Zu den rechtlichen Anforderungen siehe Absatz 2.3 OIB, *OIB-Richtlinie 5. Schallschutz.*
153 Harald Hutter von Rhomberg Bau im persönlichen Interview, digital, am 02.06.2023.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Haus A: Dach

*Bauteilfläche: 338,2 m² (6,6%)*

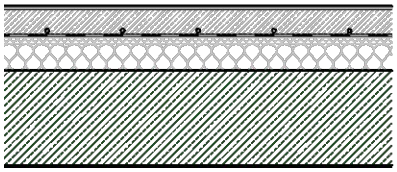


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 60 | Schüttung Kies |
| 2 | Abdichtung |
| 300 | EPS |
| 0 - 200 | EPS Gefälledämmung |
| 5 | Dampfsperre, vollflächig verschweißt |
| 250 | Stahlbeton |
| 5 | Gipsputz |
| **722** | |

**U-Wert: 0,08** W/m²K

## Haus A: Geschossdecke

*Bauteilfläche: 1.552,6 m² (36,7%)*

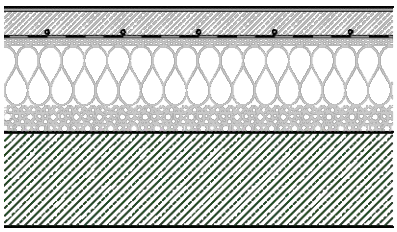


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klebeparkett |
| 70 | Zementestrich, Fließestrich incl. Fußbodenheizung |
| | PE-Folie |
| 20 | EPS-TSDM, lose verlegt |
| 70 | EPS: Installationsebene |
| 250 | Stahlbeton |
| 5 | Gipsputz |
| **425** | |

**$L_{n,w}$: 35 dB**

## Variante 1: Decke über Keller

*Bauteilfläche: 308,4 m² (7,3%)*

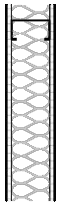


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klebeparkett |
| 70 | Zementestrich, Fließestrich incl. Fußbodenheizung |
| | PE-Folie |
| 20 | EPS-TSDM |
| 160 | EPS, lose verlegt |
| 70 | EPS Recycling-Granulat: Installationsebene |
| 250 | Stahlbeton |
| **580** | |

**U-Wert: 0,13** W/m²K

## Haus A: Trockenbauwand

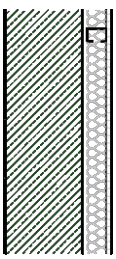
*Bauteilfläche: 1.186,5 m² (1,5%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 12,5 | Gipskarton |
| 100 | Blech-Profile, verschraubt |
| | dazwischen: Glaswolle, gesteckt |
| 12,5 | Gipskarton |
| **125** | |

## Haus A: Wohnungstrennwand

*Fläche: 917,7 m² (12,1%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 5 | Gipsputz |
| 200 | Stahlbeton |
| 12,5 | Luftschicht |
| 50 | Blech-Profil, freistehend |
| | dazwischen: Glaswolle, gesteckt |
| 12,5 | Gipskarton |
| **280** | |

**$R_w$: 65 dB**



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Die Kreislauffähigkeit

Wie bereits mehrfach angedeutet, ist die nasse Bauweise des Massivbaus sehr nachteilig für die Kreislauffähigkeit des Gebäudes. Die Verbindung der Bauteile wurde durch Abbinden des Betons und des Mauermörtels erreicht – ein nach aktuellem Stand der Technik irreversibler Vorgang. Aufgrund dieser Bauweise besteht sehr wenig Potenzial, dass einzelne Konstruktions-Bauteile wiederverwendet werden können. Hinzu kommt die Vermischung, beziehungsweise Verklebung unterschiedlicher Baustoffe miteinander. Der Putz auf dem Beton sowie der WDVS-Kleber auf den Ziegeln und der Bodenbelag auf dem Estrich sind alle nicht (mit angebrachtem Arbeitsaufwand) rückstandsfrei zu entfernen. Im folgenden Kapitel werden unter Zuhilfenahme des Urban Mining Indexes das Kreislaufpotenzial und das Treibhauspotenzial jedes Standardaufbaus ermittelt und die Verwertungswege der einzelnen Materialien aufgezeigt.

## Gründung

Der Bodenaufbau der Gründung von Haus A besteht aus einigen, nicht mehr zerstörungsfrei voneinander lösbaren Bauteilschichten. Die Fliesen, die EPS-Trittschalldämmung und die Dichtungsbahn haben eine Nutzungsdauer von 50 Jahren, wodurch neben diesen auch der Estrich einmal ausgetauscht werden muss. Die Beton-Bodenplatte hat, obwohl sie nicht ausgetauscht wird, mit beinahe 70% den weitaus größten Masse-Anteil an diesem Bauteil.

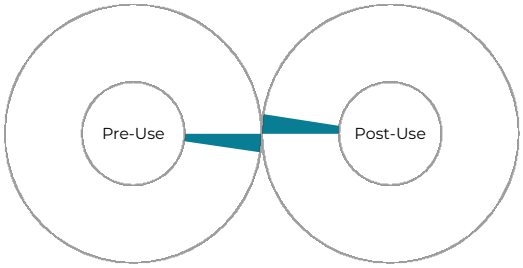
Aufgrund der Vielzahl der schwer voneinander lösbaren Schichten fällt das Kreislaufpotenzial gering aus. Beton und Zementestrich könnten gemeinsam als Bauschutt verwertet werden. Eine sortenreine Rückgewinnung ist allerdings aufgrund der mehreren Trennlagen nicht möglich. Während sich die Dämmstoffe und die Bitumenbahn zu großen Teilen wieder aus dem Schutt zurückgewinnen lassen, bleibt der Bauschutt stark verschmutzt – sowohl aufgrund der Klebereste von Bitumen, Trennlage und Perimeterdämmung als auch aufgrund einer kaum vermeidbaren Vermischung mit dem Baugrund. Die mineralischen Materialien werden also gemeinsam als Bauschutt stark verschmutzt deponiert. Die Kunststoffe, die einigermaßen sortenrein rückgewonnen werden können, werden energetisch verwertet. Die Bitumenbahn kann, sofern sie einigermaßen sortenrein ist, teilweiße recycelt werden. Einzig die Stahl-Armierung des Betons hat ein sehr gutes Kreislaufpotenzial. Bewehrungsstahl kann bis zu 100% aus Recycling-Stahl bestehen. Da Metall-Recycling nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich sehr günstig ist, wird in der Regel der gesamte Bewehrungsstahl sortenrein wiedergewonnen und einem Recycling zugeführt. Der Stahl macht allerdings nur einen geringen Masse-Anteil an den Aufbauten aus. Das Kreislaufpotenzial beträgt insgesamt nur 2,5%.

| **Gründung** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *782,8 m²* | Belag Fliesen | 1 | 46,0 | 5,3% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| *12,1* | *17,2%* | Zementestrich | 1 | 180,0 | 20,6% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,1% | Kunststoffe |
| | | EPS-TSDM | 1 | 11,0 | 1,3% | Kunststoffe |
| | | Aluminium-Bitumenbahn | 1 | 11,0 | 1,3% | Bitumengemisch |
| | | Beton | | 600,0 | 68,8% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,3% | Stahl, Scherenschrott |
| | | PE-Folie | | 0,4 | 0,1% | Kunststoffe |
| | | XPS | | 3,0 | 0,3% | Kunststoffe |
| | | **Gesamt** | | **871,9** | | |

Abb. 46: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Gründung. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



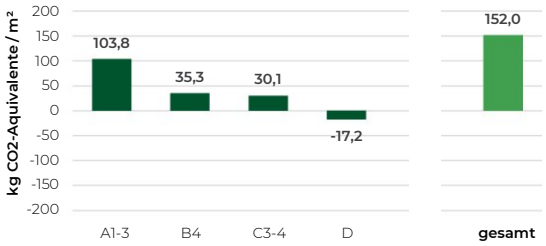
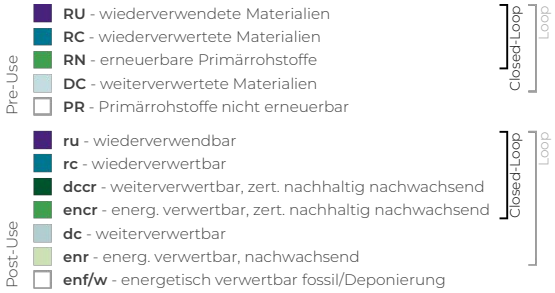




Abb. 47: Gründung Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Das Treibhauspotenzial ist wenig überraschend bei der Beton-Herstellung besonders hoch. Doch auch der Zementestrich und die erdölbasierten Dämmstoffe tragen wesentlich zum Treibhauspotenzial bei. Mit einem GWP im Lebenszyklus von 152 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter hat die Gründung eine sehr ungünstige Klimabilanz.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 6,2 | 6,2 | 0,2 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 16,5 | 16,5 | 1,4 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 9,9 | 9,9 | 13,2 | -6,3 |
| | | | | 100% | | 13% | | | | | 87% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,0 | 0,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 9,6 | 0,0 | 11,8 | -5,0 |
| 0% | 2% | 0% | 0% | 98% | 0% | 2% | 0% | 0% | 0% | 0% | 98% | 103,8 | 35,3 | 30,1 | -17,2 |
| | | | | | | | | | | | UMI total: 2,5% | GWP total: | | | 152,0 |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

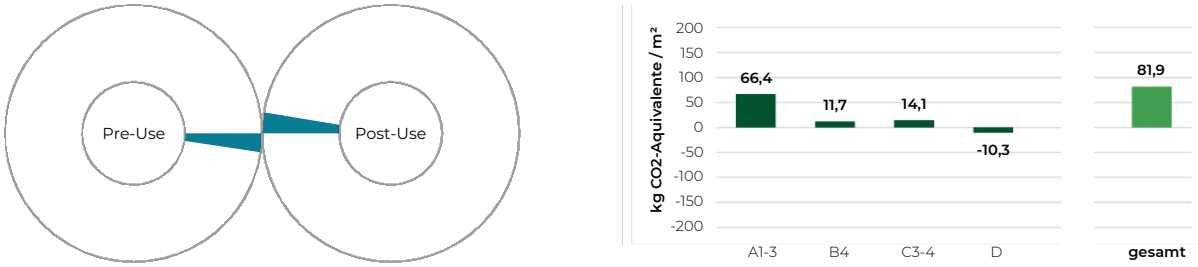
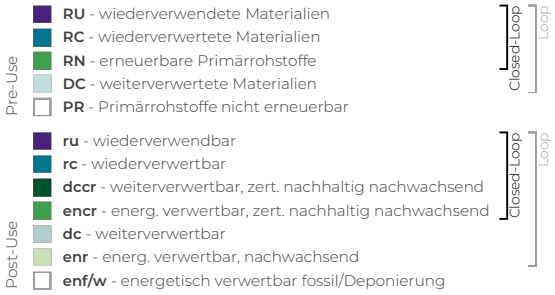



Abb. 48: Keller-Außenwand Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand Keller

Die Bauteilschichten der Keller-Außenwand kommen auch in der Gründung vor. Die Außenwand kommt allerdings mit deutlich weniger Schichten aus. Auch hier müssen die Dichtungsbahn und die Perimeterdämmung nach 50 Jahren getauscht werden. Das Kreislaufpotenzial der Materialien ist analog zur Gründung und beträgt gleichermaßen insgesamt nur 2,5%.

Obwohl in Kellerwand und Gründung pro Quadratmeter die gleiche Menge an Beton und Perimeterdämmung verbaut ist, ist das GWP der Gründung über den Lebenszyklus fast doppelt so hoch – wegen der Vielzahl der zusätzlichen Schichten und deren Austausch. Die Keller-Außenwand hat ein Treibhauspotenzial im Lebenszyklus von 81,9 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter.




| Außenwand Keller | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *662,7 m²* | Beton | | 600,0 | 94,9% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| *Masseanteil* | *10,5%* | Bewehrung | | 15,0 | 2,4% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Aluminium-Bitumenbahn | 1 | 11,0 | 1,7% | Bitumengemisch |
| | | XPS | 1 | 6,0 | 0,9% | Kunststoffe |
| | | **Gesamt** | | **632,0** | | |

| Außenwand EG | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *242,1 m²* | Gipsputz | | 5,3 | 1,0% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| *Masseanteil* | *3,3%* | Beton | | 480,0 | 88,4% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 12,0 | 2,2% | Stahl, Scherenschrott |
| | | EPS, geklebt | 1 | 16,8 | 3,1% | Kunststoffe |
| | | Silikonharzputz | 1 | 28,8 | 5,3% | Baumischabfall |
| | | **Gesamt** | | **542,9** | | |

Abb. 49: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Außenwand Keller und Erdgeschoss.. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

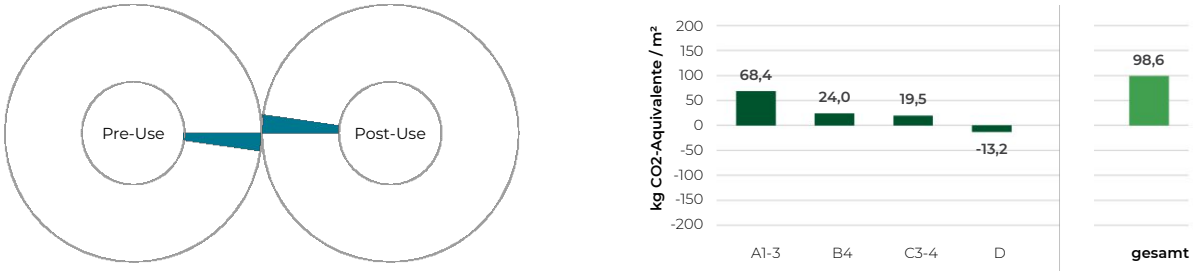



Abb. 50: Außenwand EG Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand EG

Die Erdgeschoss-Außenwand besteht wie die Untergeschoss-Wände aus Stahlbeton, welcher den weitaus größten Masse-Anteil ausmacht. Alle Verbindungen sind nass oder geklebt ausgeführt, wodurch auch hier kein zerstörungsfreier und sortenreiner Rückbau möglich ist.

Das Wärmedämmverbundsystem aus geklebten und gedübelten EPS-Dämmplatten und einem Silikonharzputz hat eine längere Nutzdauer als gemeinhin angenommen wird. Es muss nach 50 Jahren und somit einmal im Lebenszyklus getauscht werden. Die innere Oberfläche, der Gipsputz, kann den gesamten Lebenszyklus überdauern. Im End of Life kann die Dämmung thermisch verwertet werden. Klebereste des WDVS und besonders die Reste des Gipsputz verschmutzen den Beton, wodurch sein Verwertungspotenzial drastisch reduziert wird. Gipsputz, Beton und der außenliegende Silikonharzputz landen alle als unreiner Bauabfall auf der Deponie. Einzig der Bewehrungsstahl kann hochwertig recycelt werden. Insgesamt ist das Kreislaufpotenzial mit 2% ähnlich schlecht wie jenes der Untergeschossbauteile.

Beim Treibhauspotenzial in der Herstellung verursacht wiedermals der Beton die meisten Emissionen. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet ist jedoch die EPS-Dämmung aufgrund des Austausches noch $CO_2$-intensiver. Mit 98,6 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter ist das GWP der Erdgeschoss-Außenwand sogar höher als jenes der Keller-Wand.

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 10,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | 13% | | | | | 87% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 9,6 | 9,6 | 11,8 | -5,0 |
| 0% | 2% | 0% | 0% | 98% | 0% | 3% | 0% | 0% | 0% | 0% | 97% | 66,4 | 11,7 | 14,1 | -10,3 |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | 2,5% | **GWP total:** | | | 81,9 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 35,6 | 0,0 | 1,2 | -4,3 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 18,5 | 18,5 | 17,9 | -8,9 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 5,5 | 5,5 | 0,4 | 0,0 |
| 0% | 2% | 0% | 0% | 98% | 0% | 2% | 0% | 0% | 0% | 0% | 98% | 68,4 | 24,0 | 19,5 | -13,2 |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | 2,0% | **GWP total:** | | | 98,6 |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

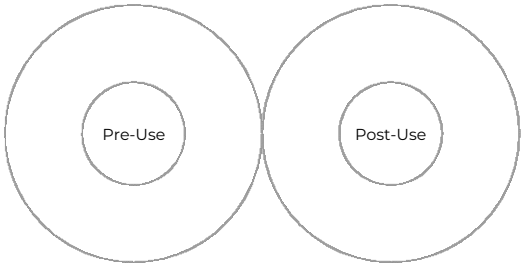




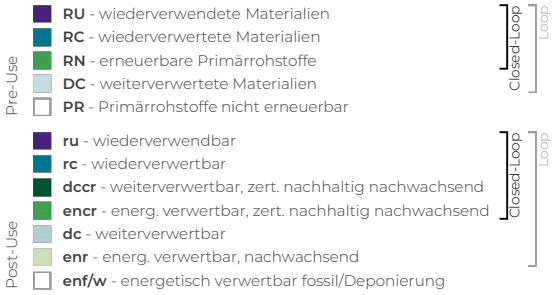


Abb. 51: Obergeschoss-Außenwand Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand OGs

Die Obergeschosswände sind ident aufgebaut wie die Erdgeschosswände, außer dass Hochlochziegel anstatt Stahlbeton die Tragschicht bilden. Der drastischste Unterschied zu den Erdgeschosswänden besteht darin, dass das Gewicht pro Quadratmeter Bauteil fast gedrittelt wird. Das Kreislaufpotenzial fällt jedoch vergleichbar bescheiden aus. Die Hochlochziegel können mit den Anhaftungen des WDVS-Klebers und des Gipsputzes gleichermaßen nicht weiterverwertet werden. Da kein Bewehrungsstahl benötigt wird, gibt es überhaupt kein Material mit einem Kreislaufpotenzial – der UMI beträgt für die Obergeschoss-Außenwände 0%.

Das Treibhauspotenzial der Hochlochziegel ist deutlich geringer als das des Betons. Da zudem auch die Armierung wegfällt, ist das GWP mit 76,2 kg $CO_2$-Eq/m² geringer als bei den Erdgeschosswänden. Die Obergeschoss-Außenwände nehmen mit einem Volumenanteil von 16,9% deutlich mehr Raum am Gesamtgebäude ein als die Außenwände des EGs mit 4,6%.




| Außenwand OGs | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *933,5 m²* | Gipsputz | | 5,3 | 2,5% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| *Masseanteil* | *4,9%* | Hochlochziegel | | 155,7 | 75,4% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | EPS, geklebt | 1 | 16,8 | 8,1% | Kunststoffe |
| | | Silikonharzputz | 1 | 28,8 | 13,9% | Baumischabfall |
| | | **Gesamt** | | **206,6** | | |
| **Trockenbauwand** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *1.186,5 m²* | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 35,6% | Gips, sortenrein |
| *Masseanteil* | *1,5%* | Blech-Profile | 1 | 5,1 | 10,5% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Glaswolle, gesteckt | 1 | 9,0 | 18,3% | KMFs |
| | | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 35,6% | Gips, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **49,1** | | |

Abb. 52: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Außenwand OGs und Trockenbauwand. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

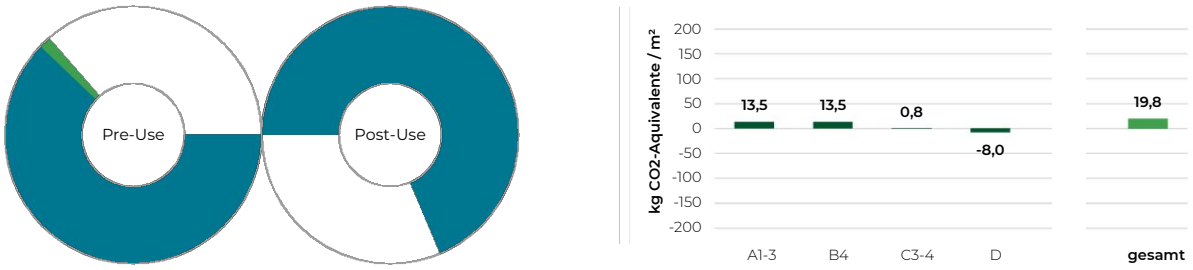



Abb. 53: Trockenbauwand Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Trockenbauwand

Die konventionelle Trockenbauwand hat ein erstaunlich hohes Kreislaufpotenzial. Auch wenn der Rückbau der Ständerkonstruktion in der Regel nicht zerstörungsfrei erfolgt, so doch immerhin recht sortenrein. Die Nutzungsdauer der Dämmung beträgt 50 Jahre und die der Gipskartonplatten 60 Jahre. Da ein Ausbau ohne Zerstörung der anderen Komponenten schwer möglich ist, wird also die gesamte Konstruktion nach 50 Jahren einmal getauscht. Dennoch ist die Masse im Lebenszyklus enorm gering. Die beidseitige Beplankung macht mit 70% den größten Masse-Anteil aus.

Gipskarton besteht standardmäßig bereits zu einem großen Teil aus Recyclingmaterial: den REA-Gipsen als Nebenprodukt aus der Energiegewinnung und einem geringen Anteil rezyklierter Baugipse. Hinzu kommen die Karton-Kaschierungen, die aus Altpapier und damit aus einem nachwachsenden Rohstoff bestehen. Der Gips in Gipskartonplatten ist sortenrein, zudem lässt sich der Karton sehr leicht entfernen. So ist das Recycling-Potenzial von Gipskarton heute schon sehr hoch – es beträgt 69%. Die Glaswolle besteht ebenfalls bereits überwiegend aus Rezyklat. Da sie nur zwischen die Konstruktion gesteckt ist, kann sie sehr sortenrein gewonnen werden. Ihr technisches Recyclingpotenzial ist hoch, wird aber durch fehlende Infrastruktur etwas geschmälert – es liegt dennoch bei immerhin 48%. Die Stahlblech-Konstruktion hat als metallisches Material ein uneingeschränktes Recyclingpotenzial. Die feinen Blech-Profile bestehen allerdings – anders als Bewehrungsstahl – nur zu einem Drittel aus Altmetallen. Insgesamt ist das Kreislaufpotenzial der Trockenbauwände aufgrund von Recycling sowohl im Pre-Use als auch im Post-Use sehr hoch: Es beträgt 66%.

Das meiste Treibhausgas in der Herstellung wird durch die Metall-Konstruktion freigesetzt, wobei die Wiederverwertung zu großen Vorteilen außerhalb der Systemgrenze führt. Insgesamt beträgt das GWP 19,8 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter.

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 20,3 | 0,0 | -1,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 18,5 | 18,5 | 17,9 | -8,9 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 5,5 | 5,5 | 0,4 | 0,0 |
| 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 44,9 | 24,0 | 16,6 | -9,2 |
| | | | | **UMI total:** | | | | | | | 0,0% | **GWP total:** | | | 76,2 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 6,2 | 6,2 | 0,0 | -8,0 |
| | 70% | | | 30% | | 48% | | | | | 52% | 4,0 | 4,0 | 0,2 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| 0% | 62% | 1% | 0% | 36% | 0% | 69% | 0% | 0% | 0% | 0% | 31% | 13,5 | 13,5 | 0,8 | -8,0 |
| | | | | **UMI total:** | | | | | | | 66,0% | **GWP total:** | | | 19,8 |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

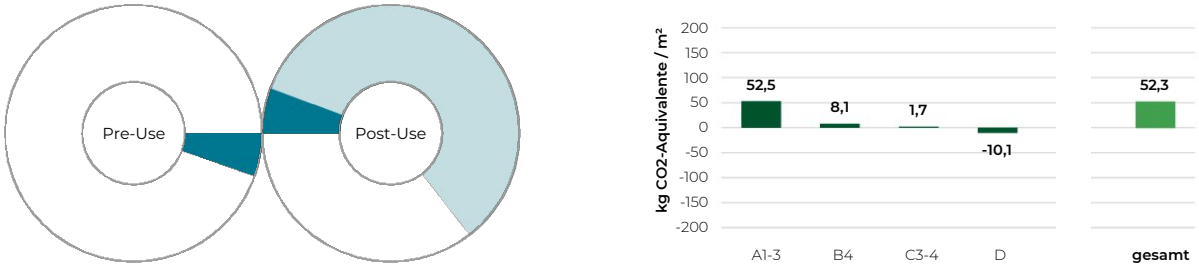


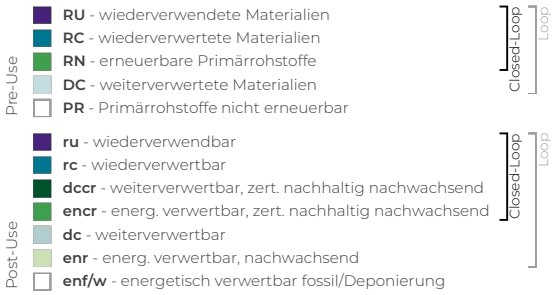

Abb. 54: Wohnungstrennwand Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Wohnungstrennwand

Die Wohnungstrennwand mit der Beton-Wand einerseits und der Trockenbau-Vorsatzschale andererseits erreicht ein mäßiges Kreislaufpotenzial von 20%. Die einzelnen Bestandteile wurden bereits bei der EG-Außenwand und im Trockenbau diskutiert.

Der Trockenbau wird einmal ausgetauscht, die Betonwand mit Gipsputz überdauert den gesamten Lebenszyklus. Da die Ständerwand im Gegensatz zum Wärmedämmverbundsystem rückstandsfrei rückgebaut werden kann, erfährt diese Beton-Wand weniger Verschmutzung als die Erdgeschoss-Außenwand. Die Rückstände des Gipsputz verhindern auch bei der Wohnungstrennwand eine hochwertige Verwertung des Betons, jedoch kann er als Bauschutt, gering verschmutzt zumindest Großteils einem Downcycling zugeführt werden. Mit über 90% Masse-Anteil überwiegt er die anderen Bauteilschichten bei weitem. Deren Kreislaufpotenzial – sehr gute Recyclingwerte für den Trockenbau und die Bewehrung, kein Potenzial für den Gipsputz – fällt nur geringfügig ins Gewicht. Da Downcycling als minderwertiger Verwertungsweg nur zur Hälfte in den UMI gerechnet wird, fällt dieser mit 20% dennoch nicht sehr hoch aus.

Das Treibhauspotenzial im Lebenszyklus beträgt 52,3 kg $CO_2$-Eq/m² und ist zum überwiegenden Teil auf die emissionsintensive Herstellung von Beton und der Stahl-Armierung zurückzuführen.




| Wohnungstrennwand | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *917,7 m²* | Gipsputz | | 5,3 | 1,0% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| *Masseanteil* | *12,1%* | Beton | | 480,0 | 91,8% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 12,0 | 2,3% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Blech-Profile | 1 | 3,7 | 0,7% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Glaswolle, gesteckt | 1 | 4,5 | 0,9% | KMFs |
| | | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 3,3% | Gips, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **523,0** | | |
| **Geschossdecke** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *1.552,6 m²* | Belag Klebeparkett | 3 | 16,6 | 1,8% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *36,7%* | Zementestrich, Fußbodenheizung | 1 | 294,0 | 31,3% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | EPS-TSDM | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | EPS | 1 | 1,5 | 0,2% | Kunststoffe |
| | | Beton | | 600,0 | 63,9% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,1% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Gipsputz | | 5,3 | 0,6% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **938,3** | | |

Abb. 55: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Wohnungstrennwand und Geschossdecke. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

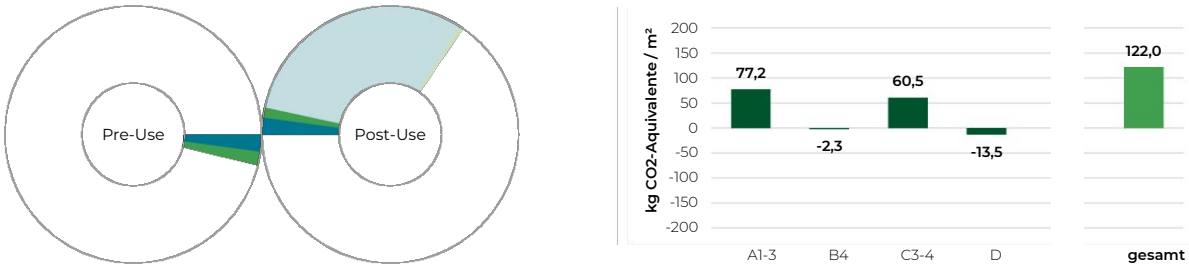



Abb. 56: Geschossdecke Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Geschossdecke

Die Geschossdecke ist das flächenmäßig größte Bauteil in Haus A – sie hat einen Volumenanteil am Gesamtgebäude von 25,1%. Mit dem verklebten Bodenbelag, dem Verbund von Nassestrich und Fußbodenheizung und dem gipsverputzten Stahlbeton gestaltet sich auch bei der Decke ein sortenreiner, zerstörungsfreier Rückbau als praktisch unmöglich.

Mit 50 bzw. 60 Jahren Nutzungsdauer verlangen Trittschalldämmung und Estrich einen gemeinsamen Austausch im Lebenszyklus. Der Bodenbelag mit einer Nutzungsdauer von 25 Jahren muss sogar dreimal ausgetauscht werden. Seine Masse im Lebenszyklus ist trotz des mehrfachen Austauschs mit weniger als 2% anteilig gering. Das Klebeparkett besteht hauptsächlich aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz. Aufgrund der Verklebung bleibt im EoL nur eine energetische Verwertung.[154] Der Zementestrich kann nur deponiert werden. Die Klebereste des Belags, die Trennfolie und besonders die Fußbodenheizung sorgen dafür, dass er nur als Bauschutt, stark verschmutzt ausgebaut werden kann. Geschützt von der Trennfolie lässt sich die Dämmung sortenrein rückbauen, aber als erdölbasiertes Material wird sie dennoch nur energetisch verwertet. Der Beton mit Gipsputzresten kann teilweise weiterverwertet werden. Dank der Stahlarmierung ist wenigstens ein kleiner Teil der Geschossdecke wiederverwertet und wiederverwertbar. Insgesamt ist das Kreislaufpotenzial mit 11,5% gering. Das Treibhauspotenzial im Lebenszyklus ist mit 122,0 kg $CO_2$-Eq/m² hoch. Der Estrich, der einmal ausgetauscht wird, verursacht noch vor Beton und Stahl-Armierung die meisten Emissionen.

154 Drei Viertel der österreichischen Wälder verfügen über ein Nachhaltigkeitszertifikat – siehe Variante 2. Basierend darauf werden alle Holzprodukte in dieser Arbeit zu 75% als zertifiziert nachwachsend angenommen. Dies ist im Post-Use entscheidend: Drei Viertel des ParkettsHolzes im Parkett werden als energetisch verwertbar, zertifiziert nachhaltig nachwachsend (encr) und das andere Viertel als energetisch verwertbar, nachwachsend (enr) gewertet.

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | 64% | | 36% | 35,6 | 0,0 | 1,2 | -4,3 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 4,5 | 4,5 | 0,0 | -5,8 |
| | 70% | | | 30% | | 48% | | | | | 52% | 2,0 | 2,0 | 0,1 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| **0%** | **5%** | **0%** | **0%** | **95%** | **0%** | **6%** | **0%** | **0%** | **59%** | **0%** | **36%** | **52,5** | **8,1** | **1,7** | **-10,1** |
| | | | | | | | | | | | **UMI total:** | | | | **20,0%** |
| | | | | | | | | | | | | **GWP total:** | | | **52,3** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 94% | | 6% | | | | 71% | | 24% | 6% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 23,8 | 23,8 | 2,4 | -0,1 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 1,0 | 1,0 | 2,0 | -1,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 3,3 | 3,3 | 7,0 | -3,4 |
| | | | | 100% | | | | | 48% | | 52% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **2%** | **2%** | **0%** | **96%** | **0%** | **2%** | **0%** | **1%** | **31%** | **0%** | **66%** | **77,2** | **-2,3** | **60,5** | **-13,5** |
| | | | | | | | | | | | **UMI total:** | | | | **11,5%** |
| | | | | | | | | | | | | **GWP total:** | | | **122,0** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

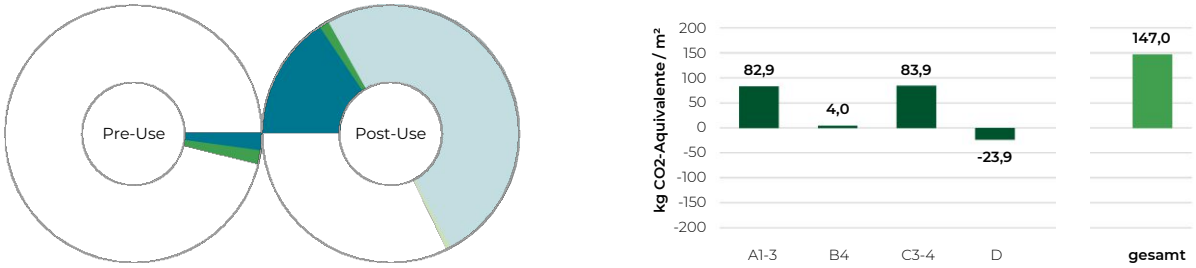
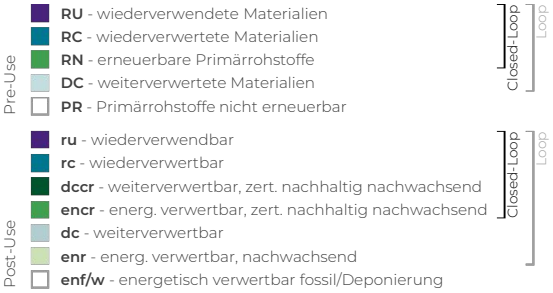



Abb. 57: Decke zu Keller Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Decke zu Keller

Die Decke zum Keller weicht von der Geschossdecke insofern ab, als dass eine zusätzliche Dämmschicht und EPS-Recyclinggranulat verwendet, aber auf die Verputzung der Unterseite verzichtet wird. Das Recyclinggranulat wird im EoL zwar auch thermisch verwertet, aber es besteht aus immerhin 23% rezyklierten Rohstoffen. Ohne den Gipsputz kann der Beton sortenrein rückgewonnen werden. Dadurch kann er vollständig verwertet werden – zu 21% für Recycling und zu 79% im Downcycling. Da der Beton den größten Masse-Anteil hat, ändert sich dadurch der UMI wesentlich: Er beträgt für die Decke zum Keller 23%.

Während die EPS-Dämmung das Kreislaufpotenzial kaum beeinflusst, zeichnet sie sich im Treibhauspotenzial deutlich ab. Das GWP im Lebenszyklus ist mit 147,0 kg $CO_2$-Eq/m² deutlich höher als jenes der Geschossdecke – was allein an der dickeren EPS-Dämmschicht liegt.




| Dach | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *338,2 m²* | Schüttung Kies | | 108,0 | 13,9% | Wiederverwendung |
| *Masseanteil* | *6,6%* | Abdichtung, geklebt | 3 | 8,0 | 1,0% | Kunststoffe |
| | | EPS | 1 | 18,0 | 2,3% | Kunststoffe |
| | | EPS-Gefälledämmung | 1 | 6,0 | 0,8% | Kunststoffe |
| | | Aluminium-Bitumenbahn, verschweißt | 1 | 11,0 | 1,4% | Bitumengemisch |
| | | Beton | | 600,0 | 77,3% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,6% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Gipsputz | | 5,3 | 0,7% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **776,3** | | |

| Decke zu Keller | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *308,4 m²* | Belag Klebeparkett | 3 | 16,6 | 1,8% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *7,3%* | Zementestrich, Fußbodenheizung | 1 | 294,0 | 31,4% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | EPS-TSDM | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | EPS | 1 | 3,5 | 0,4% | Kunststoffe |
| | | EPS-RCgranulat, zementgeb. | 1 | 1,5 | 0,2% | Kunststoffe |
| | | Beton | | 600,0 | 64,1% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,1% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **936,5** | | |

Abb. 58: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Dach und Decke zu Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

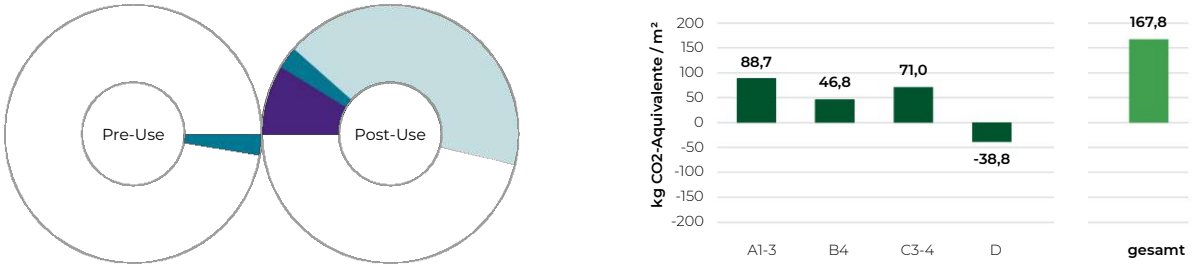



Abb. 59: Dach Haus A: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Dach

Die unteren Bauteilschichten des Daches entsprechen denen der Geschossdecke. Der mit Putzanhaftungen verschmutzte Beton kann nur teilweise weiterverwertet werden, während der Bewehrungsstahl aus Rezyklat besteht und wiederverwertet wird. Abweichend ist der Rest des Bauteils: Die EPS-Dämmung des Flachdachs, die zwei Abdichtungsebenen und die Kiesschüttung als Witterungsschutz. Die bituminöse Dampfsperre und die Dämmung müssen nach 50 Jahren und somit einmal getauscht werden. Die kunststoffbasierte Dichtungsbahn hat nur eine Lebenserwartung von 30 Jahren, muss als dreifach ausgewechselt werden. Die lose Kiesschüttung kann die gesamte Lebenszeit über im Gebäude verbleiben. Als loses Auflager ist sie zerstörungsfrei lösbar und kann während des Austauschs der darunterliegenden Schichten verschoben oder anderswo zwischengelagert werden. Auch hat sie ein hohes Potenzial, im EoL wieder verwendet zu werden. Das Kreislaufpotenzial des Dachs beträgt 17,5%. Der Wert differiert zwischen Pre- und Post-Use. Außer der Bewehrung bestehen alle Materialien bei Einbau aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen. Im Rückbau haben die mineralischen Materialien sowie das Bitumen mindestens ein teilweises Verwertungspotenzial.

Das Dach hat pro Quadratmeter das höchste Treibhauspotenzial aller Aufbauten in Haus A: 167,8 kg $CO_2$-Eq/m². In der Herstellung ist Beton am energieintensivsten. Aufgrund des (mehrfachen) Austauschs fallen auch die EPS-Dämmung und die Kunststoffdichtungsbahn beim GWP wesentlich ins Gewicht.

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | 63% | | | | 37% | | 0% | 0,3 | 0,0 | 1,5 | -0,4 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 8,6 | 25,8 | 27,2 | -13,6 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 14,3 | 14,3 | 30,0 | -14,6 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 4,8 | 4,8 | 10,0 | -4,9 |
| | | | | 100% | | 13% | | | | | 87% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | 48% | | 52% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **3%** | **0%** | **0%** | **97%** | **9%** | **3%** | **0%** | **0%** | **42%** | **0%** | **46%** | **88,7** | **46,8** | **71,0** | **-38,8** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **17,5%** | **GWP total:** | | | **167,8** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 94% | | 6% | | | | 71% | | 24% | 6% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 23,8 | 23,8 | 2,4 | -0,1 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 1,0 | 1,0 | 2,0 | -1,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 7,6 | 7,6 | 16,0 | -7,8 |
| | 23% | | | 77% | | | | | | | 100% | 2,0 | 2,0 | 14,5 | -6,1 |
| | | | | 100% | | 21% | | | 79% | | 0% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **2%** | **2%** | **0%** | **96%** | **0%** | **16%** | **0%** | **1%** | **51%** | **0%** | **32%** | **82,9** | **4,0** | **83,9** | **-23,9** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **23,0%** | **GWP total:** | | | **147,0** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Auswertung

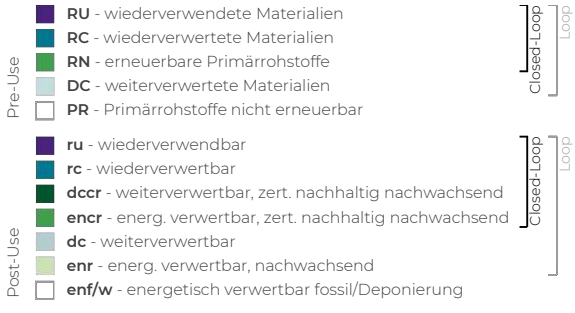
Der konventionelle Massivbau von Bestandshaus A ist insgesamt nur wenig kreislauffähig. Standardmäßig enthalten nur wenige der konventionellen Baustoffe bereits Sekundärmaterialien – besonders nicht die konstruktiven Baustoffe Beton und Ziegel, die mit hoher Rohdichte signifikant ins Gewicht fallen. Nur untergeordnete Materialien wie Metalle, Gipsbaustoffe und die Glaswolle im Innenausbau erhalten standardmäßig in relevantem Umfang Rezyklat. Hinzu kommen die meist nassen Verbindungen inclusive Verklebungen und irreversiblen Stoffverbünden, die eine sortenreine Rückgewinnung der Materialien im Abbruch enorm beeinträchtigt. 82% der Gebäudemasse fällt im EoL als Bauschutt und Baumischabfall an – mit sehr geringem Verwertungspotenzial. Nur die Trockenbauwand ist in größerem Maße zirkulär – mit 1,5% hat die Leichtbau-Konstruktion aber nur einen untergeordneten Anteil an der Gebäudemasse.

So ist es wenig verwunderlich, dass der Urban Mining Index für das gesamte Bestandshaus A sehr schlecht ausfällt. Beim Einbau sind nur 4% des Gebäudes zirkulär. Im Post-Use werden besonders dann bessere Werte erzielt, wenn der Beton sauber genug rückgewonnen werden kann, um ihn wieder- oder weiterzuverwerten. Auf das Downcycling allein entfallen 25%. Da dies als minderwertiger Verwertungsweg nur zur Hälfte in den Urban Mining Index eingerechnet wird, beträgt das gesamte Post-Use Potenzial lediglich 18%. Sowohl vor Einbau als nach Nutzungsende fallen die meisten Baustoffe in die Kategorie „nicht kreislauffähig“. Das Kreislaufpotenzial für das gesamte Gebäude beläuft sich auf nur 11%.

Die $CO_2$-Bilanz von Bestandshaus A ist mit 631 Tonnen $CO_2$-Äquivalente im Lebenszyklus sehr hoch. Ein erheblicher Teil daran entfällt auf die Herstellung von Stahlbeton. Die beiden Bauteile, bei denen kein Beton verbaut wurde – die Trockenbauwand und die gemauerte Obergeschoss-Außenwand – weisen verhältnismäßig geringe Emissionen auf. Jedoch ist kein Bauteil auch nur annähernd $CO_2$-neutral. Eine Klimaneutralität des Bestandshauses A ist in weiter Ferne.

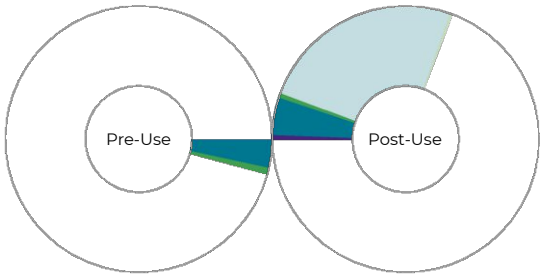
| Masseanteil: | |
|---|---|
| Keller | 27,7% |
| Außenwand Beton | 3,3% |
| Außenwand Ziegel | 4,9% |
| tragende Wände | 12,1% |
| Trockenbau | 1,5% |
| Decken | 43,9% |
| Dach | 6,6% |

Abb. 60: Haus A: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude.. Eigene Darstellung.



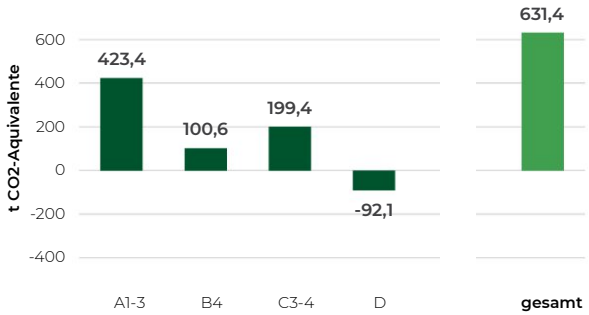



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| | | | |
|---|---|---|---|
| Wiederverwendung | 0% | Wiederverwendung | 1% |
| Wiederverwertung | 3% | Wiederverwertung | 5% |
| Erneuerbare Rohstoffe | 1% | Weiterverwertung z.N. | 0% |
| Weiterverwertung | 0% | Energetische Verwertung z.N. | 1% |
| nicht kreislauffähig | 96% | Weiterverwertung | 25% |
| | | Energetische Verwertung | 0% |
| | | nicht kreislauffähig | 69% |
| Pre-Use | 4% | Post-Use | 18% |
| **UMI gesamt** | **11%** | | |

Abb. 61: Haus A: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.




GWP [tCO2Eq.]

| | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
|---|---|---|---|---|
| | 423,4 | 100,6 | 199,4 | -92,1 |
| **GWP total** | | | | **631,4** |

Abb. 62: Haus A: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

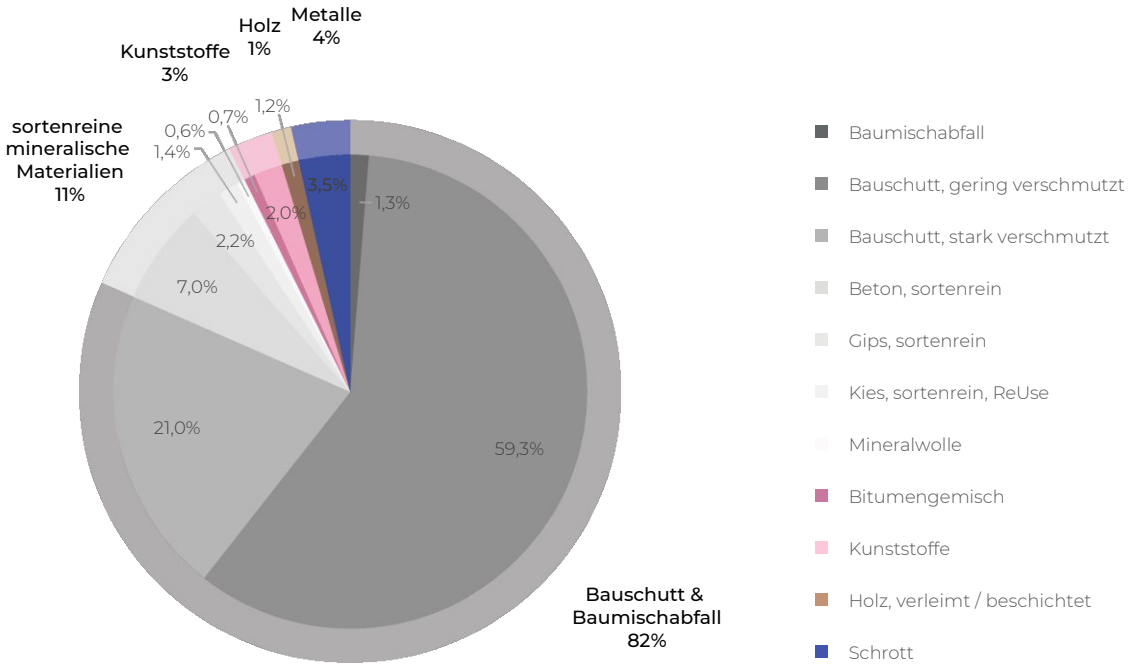



Abb. 63: Haus A: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Kreislaufgerecht Bauen jetzt.

Mit einer sehr geringen Zirkularität, einer großen Menge an verschmutztem Abfall und hohen Treibhausgasemissionen kann also gesagt werden, dass die konventionelle Bauweise so schlecht ist wie ihr Ruf. Diese Bauweise ist eindeutig linear organisiert.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 64: Außenaufnahme nach der Fertigstellung von Haus B. Lerchenstraße 25, 6922 Wolfurt. Foto: Weissengruber.

# BESTANDSHAUS B: HOLZ-BETON-HYBRIDBAUWEISE

## DIE KONVENTIONELLE HOLZ-BAUWEISE

Wenn im mehrgeschossigen Bauen mit einer Holzbauweise geworben wird, handelt es sich oftmals tatsächlich um eine Holz-Beton-Hybridkonstruktion, so auch in Bestandshaus B. Haus B repräsentiert daher die konventionelle Holzbauweise. Bauteile, die aus Gründen des Brand- und Schallschutzes nur unter erhöhtem Aufwand mit Holz realisiert werden können, werden stattdessen aus Beton gefertigt. Die Gebäudehülle wiederum wird mit Holz ausgeführt, da dies günstigere Wärmedämmeigenschaften hat. Dank der Holzfassade lässt sich die Materialität der Gebäudehülle auch im Außenraum ablesen. In der Farbgebung und durch die vorgestellten Betonfertigteil-Balkone werden die Häuser A und B optisch zusammengefasst. Die beiden Gebäude sind im Grundriss fast ident. Lediglich die Ausrichtung und damit die Balkonanordnung sowie die Erdgeschossnutzung variieren. Um einen idealen Vergleich zu ermöglichen, wurde in dieser Arbeit die Konstruktion von Haus B an den Grundriss von Haus A angepasst.



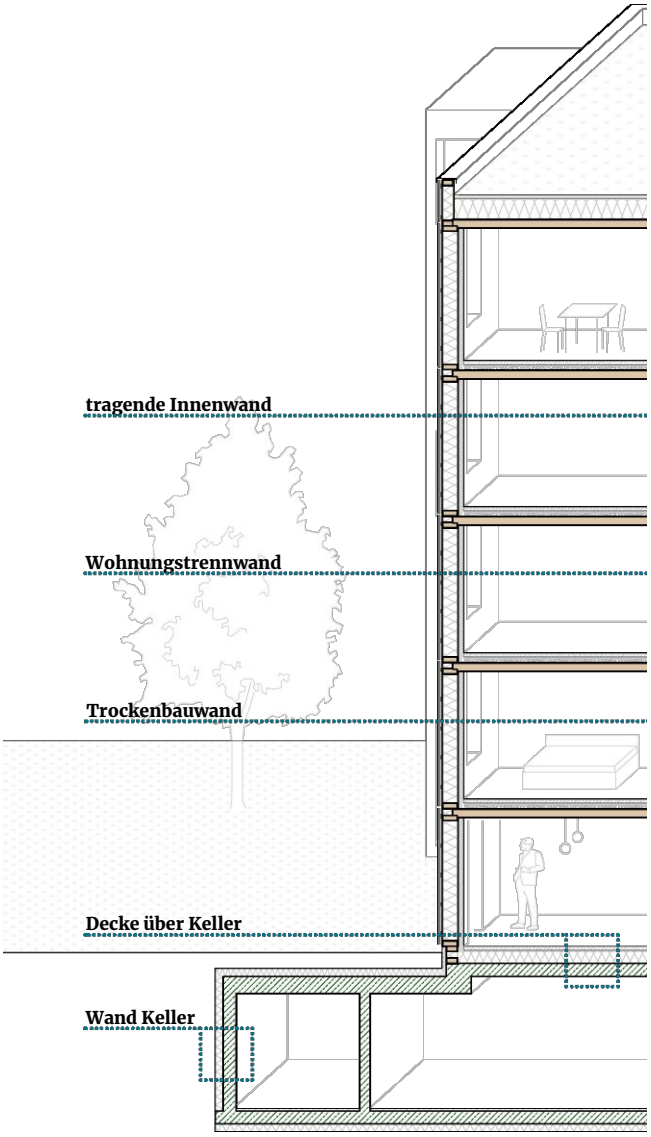
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Die Konstruktion

Die Beton-Bauteile in Haus B – der gesamte Keller, die Wohnungstrennwände und das Treppenhaus – sind im Prinzip ident zu jenen von Haus A. Sie dienen, besonders das Treppenhaus, neben der Lastabtragung auch zur Aussteifung des Gebäudes. Grundsätzlich wäre es sowohl statisch als auch baurechtlich genauso möglich, die Obergeschossbauteile komplett aus Holz zu errichten. Im Fluchttreppenhaus wird allerdings eine Nichtbrennbarkeit der Oberflächen verlangt – was für den an sich schon teureren Holzbau eine zusätzliche Verkleidung der Konstruktion bedeuten würde. Und der Schallschutz von Holzwänden erreicht meist nur dann die gesetzlichen Vorgaben, wenn das Holz beidseitig mit einer Vorsatzschale verkleidet ist. Die Mehraufwände und -kosten einer Holzkonstruktion auf sich zu nehmen, obwohl das Holz nicht als Sichtoberfläche zu erkennen wäre, war die Firma Rhomberg nicht bereit.

Sichtbar belassen sind allerdings die Unterseiten der Geschossdecken. Diese bestehen aus mit Hartholzdübeln fixierten Brettstapelelementen – einem regionalen Produkt des Rhomberg-eigenen Zimmereibetriebs Sohm Holzbautechnik[155] – und einer OSB-Beplankung zur Aussteifung. Als gerichtete Konstruktion spannen die Decken entlang der kurzen Gebäudeseite und werden neben den Außen- und Wohnungstrennwänden zusätzlich auf tragenden Brettsperrholzwänden gelagert. Dadurch ergibt sich ein vorteilhaftes Tragraster von etwa 4 Metern. Die Decken können als Durchlaufträger schlank ausgeführt werden – die Brettstapeldecke ist inclusive OSB-Platte weniger als 18 cm hoch. Die Brettsperrholzwände innerhalb der Wohnungsgrundrisse sind auf Abbrand dimensioniert und sichtbelassen. Die Außenwände wurden als vorgefertigter Holztafelbau ausgeführt. Sie kamen bereits inclusive vormontierter Fenster und Fassade aus einer gestrichenen Holz-Vorsatzschale auf die Baustelle. Dieser im Holzbau übliche hohe Vorfertigungsgrad ermöglicht eine schnelle, qualitätvolle und wetterunabhängigere Bauweise – laut Rhomberg Bau kann so die Bauzeit um 30-40% verkürzt werden.[156]

Dieser Vorteil spiegelt sich auch in den Kosten wider. In Vorarlberg, wo aufgrund des West-Ost-Gefälles der Kostenunterschied von Holz- und Massivbau per se nicht so hoch ist wie in Wien, konnte laut Harald Hutter 2019 ein optimal geplanter, Holzbau gleichpreisig zu einem funktionsäquivalenten Massivbau ausgeführt werden. Ein weiterer entscheidender Vorteil für den Holzbau in Vorarlberg im Vergleich zu Wien sind brandschutztechnische Erleichterungen der Vorgaben der OIB 2-Richtlinie in der Vorarlberger Bautechnikverordnung. Hier müssen „frei stehende, an mindestens drei Seiten auf eigenem Grund oder von Verkehrs-




155 Zum Produkt siehe: Sohm HolzbauTechnik GmbH, „DiagonalDübelholz“.

156 Siehe: Rhomberg Bau GmbH, „Innovationsprojekt Wolfurt Lerchenstraße“, 9.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

flächen für die Brandbekämpfung von außen zugänglichen Wohngebäude der Gebäudeklasse 5 mit nicht mehr als sechs oberirdischen Geschossen“ – in diese Kategorie fällt das Fallbeispiel – nur eine Feuerwiderstandsdauer von 60 anstatt 90 Minuten nachweisen.[157] Die Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen werden nicht herabgesetzt.

157 Siehe: § 11, Abs. 2, Bautechnikverordnung Vorarlberg

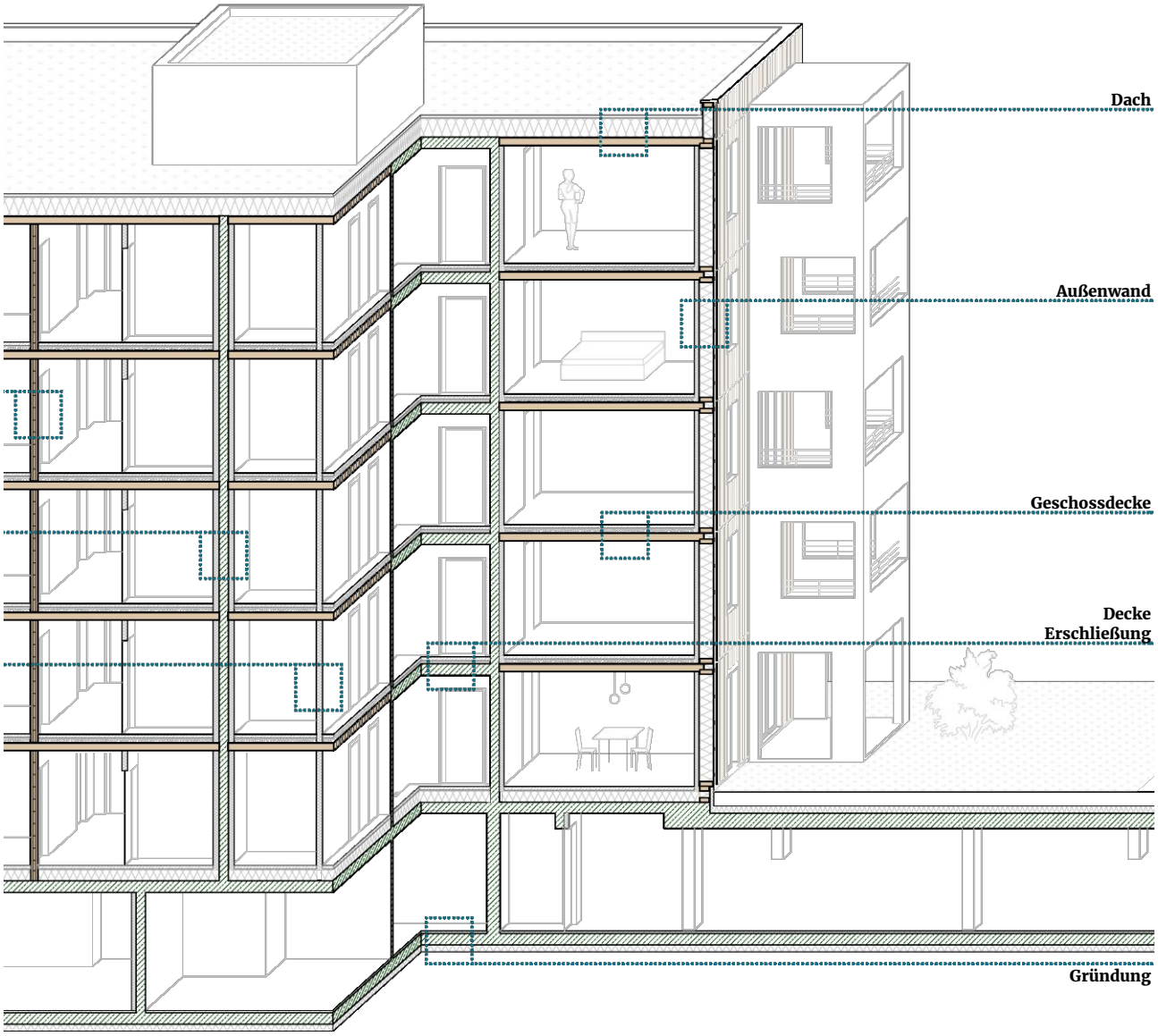



Abb. 65: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Haus B. Die hervorgehobenen Aufbauten werden im folgenden Kapitel genauer dargestellt.. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

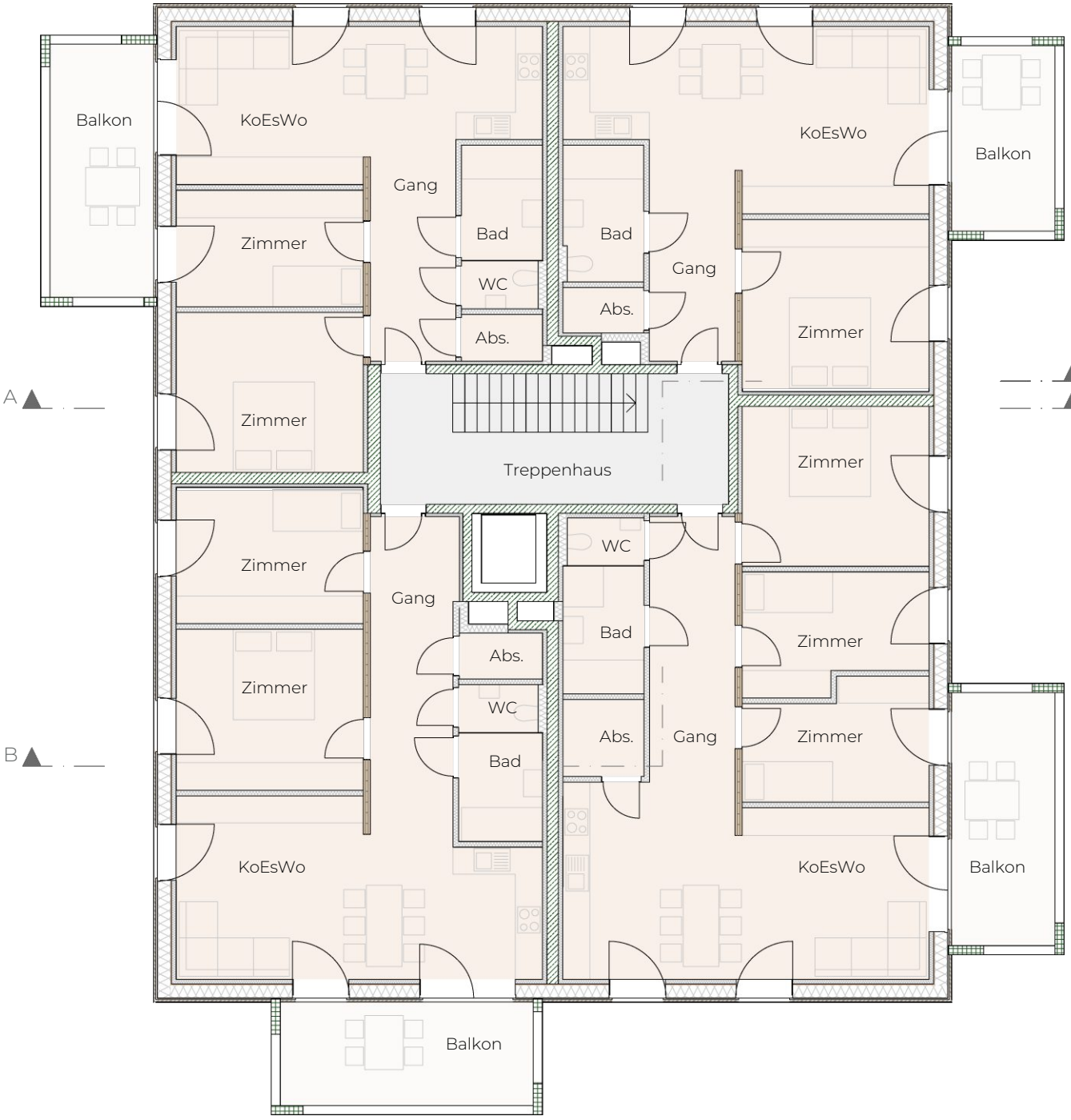



Abb. 66: Regelgrundriss von Haus B. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

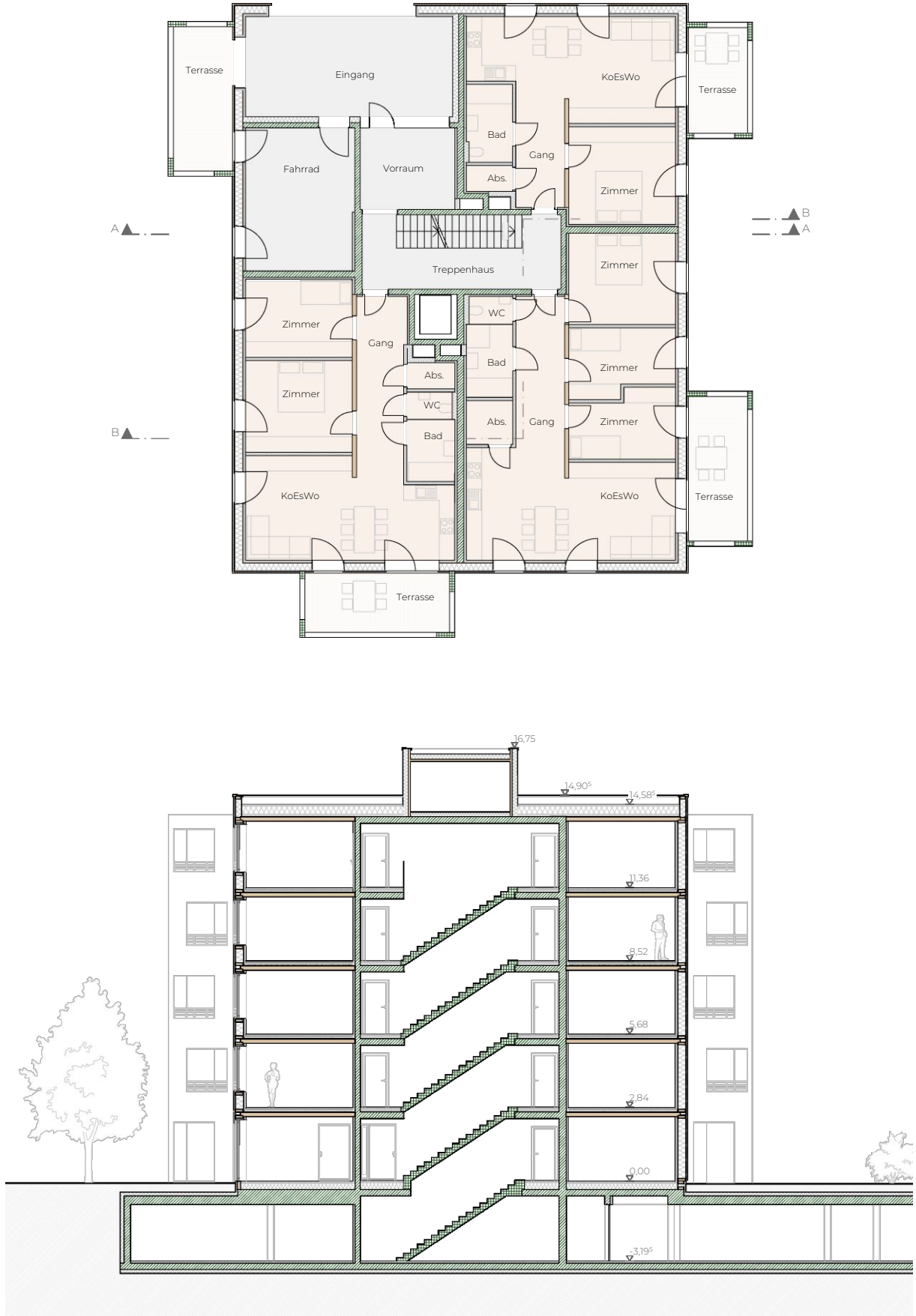



Abb. 67: oben: Erdgeschossgrundriss, unten: Schnitt A - A von Haus B, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Die Aufbauten

In diesem Kapitel werden alle Standardaufbauten mit ihren Bauteilflächen und Kennwerten vorgestellt. Einen Überblick über die vorgestellten Bauteile liefert der dreidimensionale Schnitt (Abb. 65). Als Hybridbau kommen bei Haus B verschiedene Verbindungstechniken zum Einsatz. Die betonierten Bauteile sind Großteils ident zu jenen in Haus A. Hier kommen primär nasse Verbindungen zum Einsatz. Die vorgefertigten Holzbauelemente werden traditionell trocken gefügt und verschraubt. Sie können meist zumindest einigermaßen zerstörungsfrei ausgebaut werden. Dennoch wird auch bei den hölzernen Geschossdecken mit dem Zementestrich eine nasse Verbindung verwendet. Nachfolgend werden erst die Holzbauteile und dann die betonierten Aufbauten vorgestellt.

## Keller

Sowohl Keller-Wände als auch die Bodenplatte sind ident zum konventionellen Bau und in Stahlbeton ausgeführt. Für die Perimeterdämmung wird das erdölbasierte Extrudierte Polystyrol (XPS) verwendet, welches recht witterungsbeständig und mit einer äußert geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,027 W/mK sehr leistungsfähig ist. Das XPS wird bei den Wänden auf die bituminöse Abdichtung der Schwarzen Wanne geklebt und unter der Bodenplatte lose verlegt. Der Boden hat über der Abdichtung einen klassischen Aufbau mit schallentkoppeltem Estrich und Fliesenbelag.

## Außenwand

Die Tafelbauwand besteht aus 28 cm dicken Vollholzrahmen und wird mit einer innenliegenden OSB-Beplankung ausgesteift. Diese dient gleichzeitig als Dampfbremse. Der Zwischenraum ist mit mineralbasierter Glaswolle-Dämmung ausgefacht und wird außen durch eine Holzfaserplatte, welche die winddichte Ebene bildet, verschlossen. Da Holz günstige Wärmedämmeigenschaften hat, kann mit diesem Aufbau ein U-Wert von 0,10 W/m²K erreicht werden. Außen wird die hinterlüftete Holz-Fassade auf einer Latten-Unterkonstruktion angeschraubt. Innen ist eine zusätzliche Schicht als Installationsebene eingebaut (Aufbau siehe Trockenbauwand). So können Elektroinstallationen verlegt werden, ohne das Risiko die Dampfbremse zu durchdringen. Die Hölzer und Holzwerkstoffe werden miteinander verschraubt und vernagelt. Die Verklebung der Beplankungen erfolgt mit einem einfach abziehbaren Klebeband. Die Glaswolle wird allein durch Stecken zwischen der Konstruktion gehalten. Mit moderatem Arbeitsaufwand ist es theoretisch möglich, alle Bauteile wieder sauber zurückzubauen.

## Trockenbauwand

Die Trockenbauwände sind in beiden Bestandsbauten gleich aufgebaut. Die Ständer-Konstruktion aus dünnen Blech-Profilen wird schallentkoppelt montiert. Der Zwischenraum kann für Installationen genutzt werden und ist mit Glaswolle ausgefacht. Außen erfolgt eine Beplankung aus Gipskarton.

## Tragende Innenwand

Anders als bei Haus A gibt es in diesem Gebäude tragende Wände innerhalb der Nutzeinheiten. Diese tragenden Innenwände bestehen nur aus maßgefertigten, 16 cm dicken Brettsperrholzplatten, die bereits werkseits mit den passenden Türöffnungen versehen wurden. Da die Wände als tragende Holz-Sichtbauteile auf Abbrand dimensioniert wurden, ist nur etwa die Hälfte des Holz-Querschnitts statisch relevant.[158]

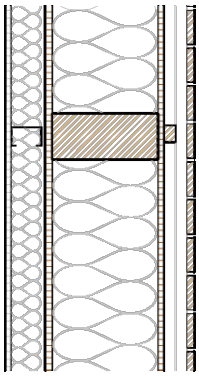
158 Annahme: Abbrandrate von 0,7 mm/min multipliziert mit der Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten ergibt eine Dicke von 4,2 cm pro Wandseite. Ergo verbleiben nach dem Abbrand 7,6 cm als Tragstruktur. Nach: Kaufmann, Krötsch, und Winter, Atlas Mehrgeschossiger Holzbau, 75.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Haus B: Außenwand

*Bauteilfläche: 1.144,5 m² (3,5%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 15 | Gipskarton |
| 80 | Metallprofil freistehend<br>dazwischen: Glaswolle |
| 10 | Luftschicht |
| 18 | OSB, luftdicht verklebt |
| 280 | Fichte Vollholz (280/80)<br>dazwischen: Glaswolle |
| 15 | Holzfaserplatte, winddicht verklebt |
| 30 | Konterlattung (30/45) |
| 50 | Lattung vertikal Fichte gestrichen |
| **498** | |

**U-Wert: 0,10** W/m²K

## Haus B: Innenwand tragend

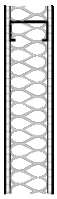
*Bauteilfläche: 277,7 m² (0,7%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 160 | Brettsperrholz, Fichte, lasiert |
| **160** | |

## Haus B: Trockenbauwand

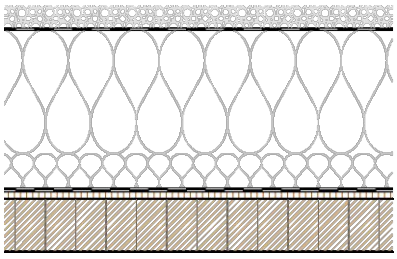
*Bauteilfläche: 908,9 m² (1,4%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 12,5 | Gipskarton |
| 100 | Blech-Profile, verschraubt<br>dazwischen: Glaswolle, gesteckt |
| 12,5 | Gipskarton |
| **125** | |

## Haus B: Dach

*Bauteilfläche: 338,2 m² (2,4%)*

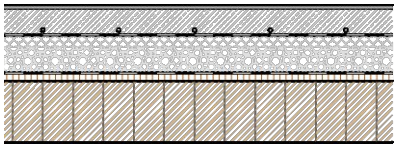


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 60 | Schüttung Kies |
| 2 | Abdichtung |
| 300 | EPS |
| 0 - 200 | EPS Gefälledämmung |
| 5 | Dampfsperre, lose verlegt |
| 18 | OSB, genagelt |
| 140 | Brettstapelholz, diagonal gedübelt |
| **625** | |

**U-Wert: 0,07** W/m²K

## Haus B: Geschossdecke

*Bauteilfläche: 1.335,0 m² (27,2%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klebeparkett |
| 70 | Zementestrich, Fließestrich incl. Fußbodenheizung<br>PE-Folie |
| 30 | Glaswolle-TSDM, lose verlegt |
| 70 | Splitt-Schüttung, zementgebunden |
| 18 | OSB-Platte, genagelt |
| 160 | Brettstapelholz, diagonal gedübelt |
| **358** | |

**$L_{n,w}$: 48 dB**



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Wohnungstrennwand

Wie im Kapitel Konstruktion ausgeführt, sind die Wände zwischen den Wohneinheiten und zum Treppenhaus mit Beton errichtet. Mit Beton können die Anforderung, dass die Oberfläche im Treppenhaus nichtbrennbar sein muss, sowie der Mindestschallschutz recht unaufwändig erreicht werden. Der Aufbau der Wand ist dabei analog zu Haus A. Die 20 cm dicke Stahlbetonwand wird auf der Sichtseite mit Gips verputzt. Auf der anderen Seite erhöht eine Trockenbauwand als freistehende Vorsatzschale den Schallschutz.

## Geschossdecke

Die Geschossdecke besteht Fichten-Brettstapelholzelementen, die mit einer diagonalen Verdübelung aus Buche metall- und nahezu leimfrei verbunden werden, und ist oberseitig zur weiteren Aussteifung mit einer OSB-Platte beplankt. Da die Unterseite der Holzkonstruktion sichtbar ist, wurde auch die Decke auf Abbrand dimensioniert.[159] Mit der geringeren Masse hat die Holzdecke schwierige Voraussetzungen für den Schallschutz. Deshalb wurde in Haus B die Ebene für Elektroinstallationen direkt oberhalb der Konstruktion, nicht mit Dämmung, sondern mit einer Splitt-Schüttung aufgefüllt. Diese wirkt als Masseschicht dem Schwingen der Holzdecke entgegen und verbessert somit den Schallschutz. Um die Lage des Splitts zu sichern, ist er leicht zementgebunden. Darüber folgt analog zu Haus A ein Zementestrich mit integrierter Fußbodenheizung auf Trittschalldämmung und Trennlage sowie ein geklebter Parkettbelag. Trotz Masse-Feder-Masse-Aufbau aus Nassestrich, der Trittschalldämmung aus Glaswolle und der Holzdecke samt Splitt-Schüttung erreicht die Geschossdecke rechnerisch nur gerade so den maximal zulässigen Trittschallpegel von 48 dB.[160]

**Sondersituation: Decke im Treppenhaus**
Die horizontalen Bauteile der Erschließung werden mit Stahlbeton konstruiert. Der Aufbau gleicht der Geschossdecke von Haus A. Über der unterseitig verputzten Stahlbeton-Decke liegen eine ausgedämmte Installationsebene und die Trittschalldämmung aus EPS. Dann folgt der Zementestrich mit Fußbodenheizung und der Belag.

**Sondersituation: Decke über Keller**
Zum Keller hin ist der Deckenaufbau ebenfalls ident zu Haus A. Eine zusätzliche Dämmschicht sowie die Verwendung von EPS-Granulat für die Installationsebene schützen thermisch vor dem unbeheizten Untergeschoss. Somit wird ein U-Wert von 0,13 W/m²K erreicht. Zu den Nebenräumen im Keller hin kann auf ein Verputzen der 25 cm starke Beton-Decke verzichtet werden.

## Dach

Das Dach wird zwar anders konstruiert als beim Bestandshaus A, hat aber den selben thermischen Aufbau. Es ist ebenfalls als ein konventionelles Warmdach ausgeführt. Die bituminöse Dampfsperre, die das Aufsteigen von Wasserdampf verhindert, wird über der Holzkonstruktion lose verlegt. Als Dämmung wird beim Dach EPS verwendet, das eine geringere Wärmeleitfähigkeit als die Glaswolle der Außenwände hat. Auch das Entwässerungsgefälle wird durch eine EPS-Gefälledämmung erreicht. Darüber ist die kunststoffbasierte Dichtungsebene angebracht, welche die wasserführende Schicht bildet. Die 6 cm starke Kiesschüttung darüber schützt sie vor direkter Sonneneinstrahlung und Windsog. Die Konstruktion des Daches gleicht jener der Geschossdecken, kann aber aufgrund des geringeren Lasteintrags 2 cm dünner ausgeführt werden. Insgesamt erreicht der Dachaufbau somit 62,5 cm – er ist fast 10 cm schlanker als der Beton-Aufbau.

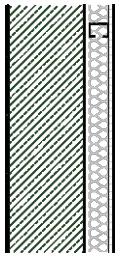
159 Ebd. Bei einer einseitigen Brandbelastung ist also von einem Abbrand von 4,2 cm auszugehen.
160 Zu den rechtlichen Anforderungen siehe: Absatz 2.5 OIB, *OIB-Richtlinie 5. Schallschutz.*



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Haus B: Wohnungstrennwand

*Fläche: 917,7 m² (14,7%)*

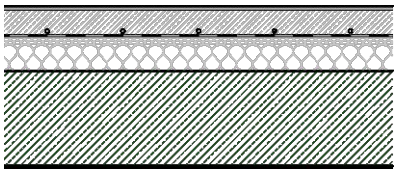


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 5 | Gipsputz |
| 200 | Stahlbetont |
| 12,5 | Luftschicht |
| 50 | Blech-Profil, freistehend<br>dazwischen: Glaswolle, gesteckt |
| 12,5 | Gipskarton |
| **280** | |

**$R_w$: 65 dB**

## Haus B: Decke Erschließung

*Bauteilfläche: 217,6 m² (6,4%)*

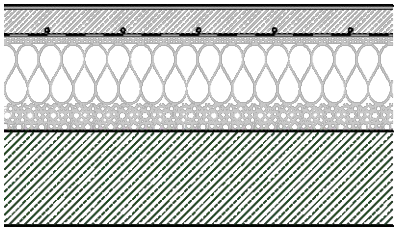


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Fliesen |
| 70 | Zementestrich, Fließestrich incl. Fußbodenheizung<br>PE-Folie |
| 20 | EPS-TSDM, lose verlegt |
| 70 | EPS: Installationsebene |
| 250 | Stahlbeton |
| 5 | Gipsputz |
| **425** | |

**$L_{n,w}$: 35 dB**

## Haus B: Decke über Keller

*Bauteilfläche: 308,4 m² (9,1%)*

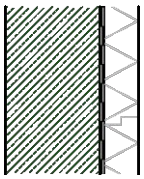


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klebeparkett |
| 70 | Zementestrich, Fließestrich incl. Fußbodenheizung<br>PE-Folie |
| 20 | EPS-TSDM |
| 160 | EPS, lose verlegt |
| 70 | EPS Recycling-Granulat: Installationsebene |
| 250 | Stahlbeton |
| **580** | |

**U-Wert: 0,13** W/m²K

## Haus B: Außenwand Keller

*Bauteilfläche: 662,7 m² (13,1%)*

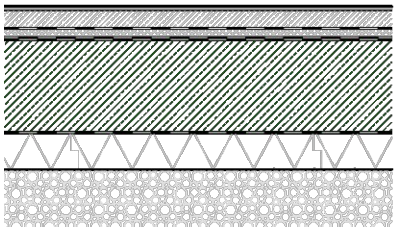


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 250 | Stahlbeton |
| 10 | Aluminium-Bitumen-Bahn |
| 100 | XPS, verklebt |
| **360** | |

**U-Wert: 0,25** W/m²K

## Haus B: Gründung

*Bauteilfläche: 782,8 m² (21,4%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Fliesen |
| 50 | Zementestrich<br>PE-Folie |
| 20 | EPS-TSDM, lose verlegt |
| 5 | Aluminium-Bitumenbahn |
| 250 | Stahlbeton<br>PE-Folie |
| 100 | XPS<br>Kapillarbrechende Schicht |
| **435** | |

**U-Wert: 0,22** W/m²K



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

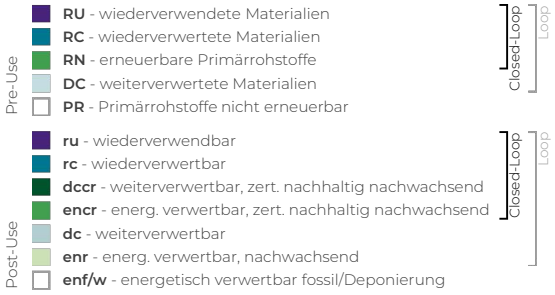
# Die Kreislauffähigkeit

Das Kreislaufpotenzial von Haus B ist von seiner hybriden Bauweise geprägt. Die mögliche Zirkularität der untersuchten Standardaufbauten differiert wesentlich, abhängig davon, ob sie mit Holz oder Beton konstruiert wurden. Nachfolgend werden mithilfe des Urban Mining Indexes das Kreislaufpotenzial sowie das Treibhauspotenzial jedes Standardaufbaus ermittelt und die Verwertungswege der einzelnen Materialien aufgezeigt. Die Bauteile von Haus B, die im Aufbau ident zu Haus A sind, erreichen logischerweise denselben Urban Mining Index.

## Gründung

Die Gründung von Haus B gleicht exakt der von Haus A. Fliesen, Estrich, Trittschalldämmung und die Dichtungsbahn werden nach 50 Jahren einmal getauscht. Aufgrund der vielen nicht sortenrein lösbaren Schichten müssen Beton und Zementestrich gemeinsam als Bauschutt stark verschmutzt deponiert werden. Die Kunststoffe werden thermisch verwertet, während die Bitumenbahn unter bestimmten Bedingungen teilweise recycelt werden kann. Die Stahlarmierung hat ein Kreislaufpotenzial von 100%, da sie bereits aus Altmetall besteht und wieder vollständig rezykliert werden kann. Der Urban Mining Index für den gesamten Aufbau beträgt nur 2,5%.

Zum GWP tragen besonders der Beton, der Estrich und die erdölbasierten Dämmstoffe bei. Mit 152 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter ist das Treibhauspotenzial recht hoch.




| Gründung | | Bauteilschicht | Austauschhäufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *782,8 m²* | Belag Fliesen | 1 | 46,0 | 5,3% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| *Masseanteil* | *21,4%* | Zementestrich | 1 | 180,0 | 20,6% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,1% | Kunststoffe |
| | | EPS-TSDM | 1 | 11,0 | 1,3% | Kunststoffe |
| | | Aluminium-Bitumenbahn | 1 | 11,0 | 1,3% | Bitumengemisch |
| | | Beton | | 600,0 | 68,8% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,3% | Stahl, Scherenschrott |
| | | PE-Folie | | 0,4 | 0,1% | Kunststoffe |
| | | XPS | | 3,0 | 0,3% | Kunststoffe |
| | | **Gesamt** | | **871,9** | | |

Abb. 68: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Gründung. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

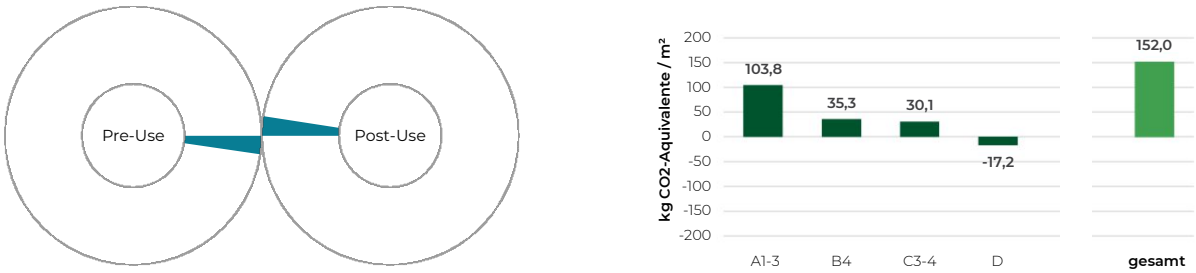



Abb. 69: Gründung Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 6,2 | 6,2 | 0,2 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 16,5 | 16,5 | 1,4 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 9,9 | 9,9 | 13,2 | -6,3 |
| | | | | 100% | | 13% | | | | | 87% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,0 | 0,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 9,6 | 0,0 | 11,8 | -5,0 |
| 0% | 2% | 0% | 0% | 98% | 0% | 2% | 0% | 0% | 0% | 0% | 98% | 103,8 | 35,3 | 30,1 | -17,2 |
| | | | | | UMI total: | | | | | | 2,5% | GWP total: | | | 152,0 |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

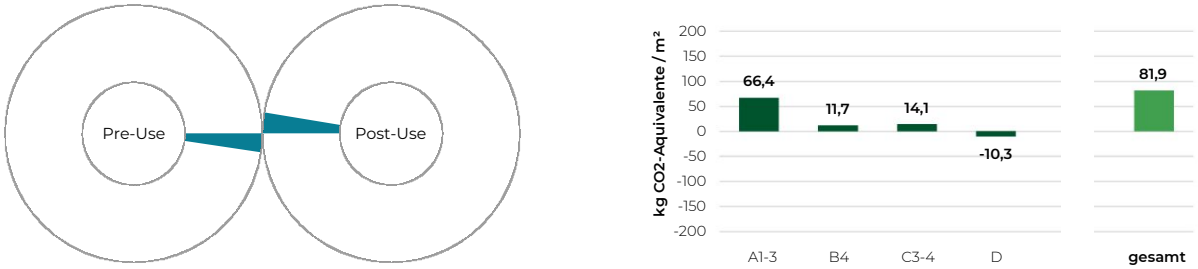



Abb. 70: Außenwand Keller Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand Keller

Auch die Keller-Außenwand ist ident mit der von Haus A. Dichtungsbahn und Perimeterdämmung werden einmal im Lebenszyklus getauscht. Der Beton wird deponiert, die Dämmung energetisch verwertet, die Bitumenbahn kann teilweise und die Bewehrung komplett rezykliert werden. Das Kreislaufpotenzial beträgt wie jenes der Gründung nur 2,5%.

Mit wesentlich weniger Bauteilschichten als die Gründung erreicht die Außenwand auch ein deutlich geringeres GWP von 81,9 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter. Besonders die Herstellung von Beton sowie Herstellung und energetische Verwertung des XPS schlagen sich in dem dennoch hohen Wert nieder.

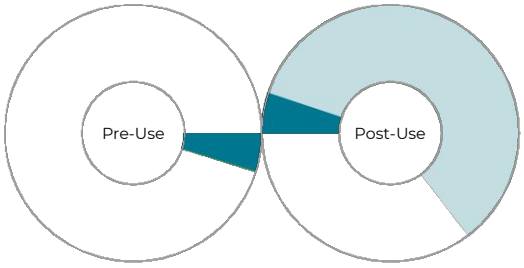
| **Außenwand Keller** | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *662,7 m²* | Beton | | 600,0 | 94,9% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| *Masseanteil* | *13,1%* | Bewehrung | | 15,0 | 2,4% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Aluminium-Bitumenbahn | 1 | 11,0 | 1,7% | Bitumengemisch |
| | | XPS | 1 | 6,0 | 0,9% | Kunststoffe |
| | | **Gesamt** | | **632,0** | | |

| **Wohnungstrennwand** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *917,7 m²* | Gipsputz | | 5,3 | 0,8% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| *Masseanteil* | *14,7%* | Beton | | 600,0 | 92,9% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 15,0 | 2,3% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Blech-Profile | 1 | 3,7 | 0,6% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Glaswolle, gesteckt | 1 | 4,5 | 0,7% | KMFs |
| | | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 2,7% | Gips, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **646,0** | | |

Abb. 71: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Keller-Außenwand & Wohnungstrennwand. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



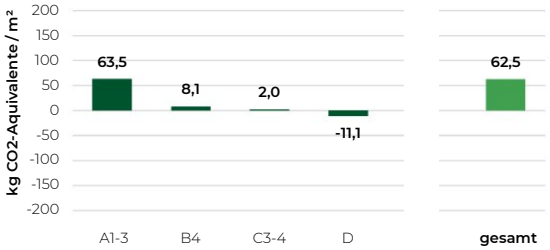
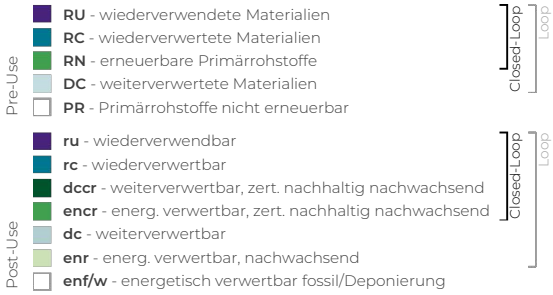




Abb. 72: Wohnungstrennwand Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Wohnungstrenn- & Treppenhauswand

Als Holz-Beton-Hybridbau sind die tragenden Innenwände von Haus B ident zu denen von Haus A aus Stahlbeton. So ergibt sich auch hier ein mäßiges Kreislaufpotenzial von 20%.

Während die Vorsatzschale im Lebenszyklus einmal ersetzt wird, müssen Stahlbeton und Putz nicht ausgetauscht werden. Aufgrund des nicht rückstandsfrei lösbaren Gipsputzes ist der Betonbruch im EoL gering verschmutzt und kann nur teilweise weiterverwertet werden. Der Gipsputz bleibt auch verunreinigt – er kann nur auf der Deponie entsorgt werden. Die Bewehrung hat mit Rezyklierung ein hundertprozentiges Kreislaufpotenzial. Auch die vorgesetzte Trockenbauwand hat recht viel Kreislaufpotenzial, wie in nachfolgenden Kapiteln noch weiter ausgeführt wird. Mit Beton und der Stahl-Armierung ist das Treibhauspotenzial in der Herstellung recht hoch: 62,5 kg $CO_2$-Eq/m².




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 10,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | 13% | | | | | 87% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 9,6 | 9,6 | 11,8 | -5,0 |
| **0%** | **2%** | **0%** | **0%** | **98%** | **0%** | **3%** | **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **97%** | **66,4** | **11,7** | **14,1** | **-10,3** |
| | | | | | | | | | | | **2,5%** | **GWP total:** | | | **81,9** |
| | | | | **UMI total:** | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | 64% | 36% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 10,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 4,5 | 4,5 | 0,0 | -5,8 |
| | 70% | | | 30% | | 48% | | | | | 52% | 2,0 | 2,0 | 0,1 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| **0%** | **5%** | **0%** | **0%** | **95%** | **0%** | **5%** | **0%** | **0%** | **59%** | **0%** | **35%** | **63,5** | **8,1** | **2,0** | **-11,1** |
| | | | | | | | | | | | **20,0%** | **GWP total:** | | | **62,5** |
| | | | | **UMI total:** | | | | | | | | | | | |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

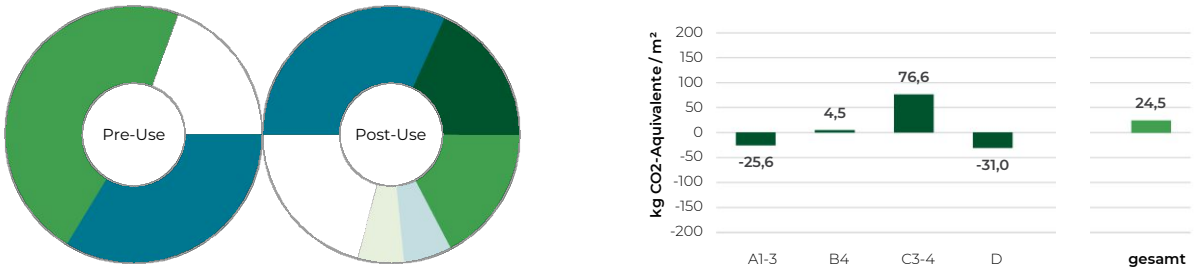



Abb. 73: Außenwand Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand

Die Außenwand von Haus B in Holztafelbauweise hat den bisher besten UMI. Der Aufbau ist mit einer Masse im Lebenszyklus von etwa 100 kg pro Quadratmeter sehr leicht, beträgt aber 23% des Gebäudevolumens. Dabei werden alle Schichten außer die Konstruktion – die Fichtenständer und die aussteifende OSB-Platte – einmal ausgetauscht. Auch die Holz-Fassade kann bei guter Wartung 50 Jahre überdauern und muss nur einmal ausgewechselt werden. Vorteilhaft ist, dass sich alle Materialien wieder sortenrein, nahezu zerstörungsfrei lösen lassen, da sie primär geschraubt, gesteckt (Dämmung) und genagelt werden.

Wenig überraschend besteht die Außenwand zu fast 50% aus erneuerbaren Primärrohstoffen. Aufgrund der Leichtigkeit der Konstruktion und mit dem einmaligen Austausch fallen auch die leichten Glasfaser-Dämmstoffe und die Gipskartonplatte ins Gewicht, die mit 70% bzw. 64% hohe Rezyklat-Anteile haben. Diese sowie die Blech-Profile der Vorsatzschale können aufgrund der sortenreinen Rückgewinnung im EoL zu großen Teilen wiederverwertet werden. Der UMI der Holzbaustoffe wirkt auf den ersten Blick komplexer als er ist. Die Vollhölzer bestehen im Pre-Use logischerweise aus 100% erneuerbaren Primärrohstoffen. Die Holzwerkstoffe – OSB-Platte und Holzwerkstoffplatte – hingegen bestehen auch anteilig aus Leim, der kein erneuerbarer Rohstoff ist. Im Post-Use werden alle Holzbaustoffe entweder gedowncycelt oder energetisch verwertet. Da pauschal angenommen wird, dass alle Holzbaustoffe zu 75% aus zertifiziert nachhaltigem Anbau stammen,[161] teilt sich der angenommene Verwertungsweg dementsprechend auf: Auf Downcycling (dccr) bzw. energetische Verwertung (encr) zertifiziert nachhaltiger nachwachsender Rohstoffe und anderes Downcycling (dc) sowie energetische Verwertung (enr) nicht zertifizierter nachwachsender Rohstoffe. Die energetische Verwertung des Leims aus den Holzbaustoffen wird zudem als energetische Verwertung von nicht nachwachsenden Rohstoffen eingeordnet. Weiters unterscheidet sich das Downcyclingpotenzial nach Abfallfraktion – naturbelassene Hölzer haben ein größeres Weiterverwertungspotenzial als verleimte oder beschichtete Hölzer – und nach Einbausituation. So ist das Weiterverwertungspotenzial für das unbehandelte Konstruktionsvollholz mit 80% am höchsten, da mit vergleichsweise wenig Arbeitsaufwand großformatige Hölzer rückgebaut werden können. Die ebenfalls naturbelassene Unterkonstruktion der Fassade besteht aus vielen, öfters verschraubten kleinen Latten, die nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 64% einem Downcycling zugeführt werden. Hier ist es eher realistischer,

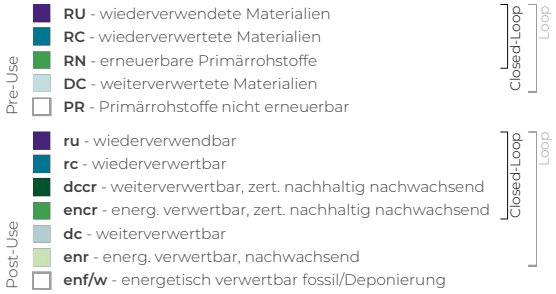
161 Diese Annahme ist eine Vorwegnahme der Erkenntnisse aus der Recherche zu Variante 2. Siehe Variante 2, Konstruktion.

| Außenwand | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.144,5 m²* | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 21,0 | 21,3% | Gips, sortenrein |
| *Masseanteil* | *3,5%* | Blech-Profile | 1 | 4,3 | 4,4% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Glaswolle, gesteckt | 1 | 5,8 | 5,8% | KMFs |
| | | OSB-Platte, verschraubt | | 10,8 | 11,0% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | Fichte, Vollholz | | 13,3 | 13,5% | Holz, naturbelassen |
| | | Glaswolle, gesteckt | 1 | 20,2 | 20,5% | KMFs |
| | | Holzfaser-Platte, verschraubt | 1 | 5,1 | 5,2% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | Lattung | 1 | 3,8 | 3,9% | Holz, naturbelassen |
| | | Lattung Fassade, gestrichen | 1 | 14,3 | 14,5% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | **Gesamt** | | **98,5** | | |

Abb. 74: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Gründung und Keller-Außenwand. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



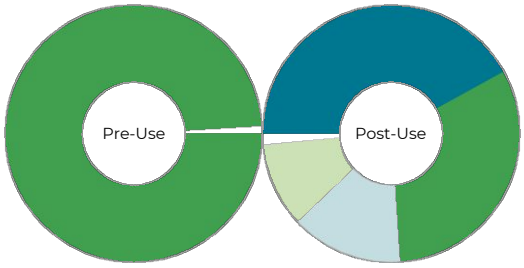

dass sie mit der beschichteten Fassade gemeinsam energetisch verwertet werden, da ein Rückbau mehr Aufwand bedeutet. Die Holzwerkstoffplatten werden etwa zu 70% weiterverwertet – als großformatige Platten lassen sie sich mit moderatem Aufwand zurückbauen, aber aufgrund der Leimanteile ist ihr Verwertungspotenzial geringer als das der naturbelassenen Hölzer. Mit einem hohen Kreislaufpotenzial sowohl im Pre- als auch im Post-Use erreicht die Außenwand von Haus B einen sehr guten Urban Mining Index von 77%.

Dank der kohlenstoffspeichernden Eigenschaft von Holz hat die Außenwand in der Herstellung eine negative Treibhausgasbilanz. Da das im Holz gebundene $CO_2$ bei einer energetischen Verwertung wieder freigesetzt wird, ist der Wert in der Entsorgungsphase besonders hoch. Über den gesamten Lebenszyklus ergibt das GWP so 24,5 kg $CO_2$-Eq/m².

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 0,6 | 0,6 | 0,1 | 0,0 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 5,2 | 5,2 | 0,0 | -3,4 |
| | 70% | | | 30% | | 48% | | | | | 52% | 2,9 | 2,9 | 0,1 | 0,0 |
| | | 89% | | 11% | | | 53% | 20% | 18% | 7% | 3% | -9,9 | 0,0 | 15,6 | -4,0 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -20,2 | 0,0 | 22,7 | -9,8 |
| | 70% | | | 30% | | 48% | | | | | 52% | 11,7 | 11,7 | 0,3 | 0,0 |
| | | 94% | | 6% | | | 50% | 22% | 17% | 7% | 5% | -2,2 | -2,2 | 7,1 | -1,9 |
| | | 100% | | 0% | | | 48% | 27% | 16% | 9% | 0% | -2,9 | -2,9 | 6,5 | -1,4 |
| | | 100% | | 0% | | | | 75% | | 25% | 0% | -10,8 | -10,8 | 24,3 | -10,5 |
| **0%** | **34%** | **47%** | **0%** | **19%** | **0%** | **32%** | **18%** | **17%** | **6%** | **6%** | **21%** | **-25,6** | **4,5** | **76,6** | **-31,0** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **77,0%** | **GWP total:** | | | **24,5** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



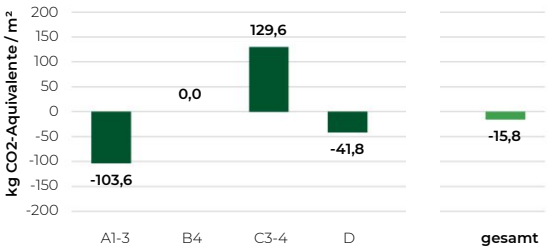




Abb. 75: tragende Innenwand Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Brettsperrholzwand

Die Brettsperrholzwand, die innerhalb der Wohnungen eine sekundäre lastabtragende Ebene bildet, hat ein noch besseres Kreislaufpotenzial als die Außenwand. Sie besteht lediglich aus einem lasierten, vorgefertigten Brettsperrholzelement, welches dank einer Nutzungsdauer von 100 Jahren nicht ausgetauscht werden muss.

Brettsperrholz enthält einen Leimanteil von etwa 1% - der Anteil erneuerbarer Primärrohstoffe im Bauteil ist also bei 99%. Die Einstofflichkeit und die Verbindung an angrenzende Bauteile mit Schrauben erlauben einen sortenreinen, zerstörungsfreien Rückbau. Theoretisch wäre also sogar eine Wiederverwendung denkbar, aber da die ausgefrästen Öffnungen individuell bemessen und sehr projektspezifisch sind, ist dies eher auszuschließen. Laut UMI-Tool wird es mit einer Wahrscheinlichkeit von 56% weiterverwertet und ansonsten verbrannt. Hinzu kommt die Annahme, dass drei Viertel des Holzes zertifiziert nachhaltig sind. Insgesamt ergibt sich so ein UMI von 92,5% – die BSH-Wand ist fast vollständig kreislauffähig.

Das Treibhauspotenzial ist in der Herstellung negativ, da das Holz im Wachstum $CO_2$ bindet. Auch auf den gesamten Lebenszyklus ergibt sich mit -15,8 kg $CO_2$-Eq/m² ein negatives GWP. Indem das Holz in der energetischen Verwertung andere Brennstoffe substituiert und indem durch Downcycling das immanente $CO_2$ nicht freigesetzt wird, werden im Modul D hohe Vorteile außerhalb der Systemgrenze angerechnet.

| **BSH Wand** | | Bauteilschicht | Austauschhäufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *277,7 m²* | Brettsperrholz, Fichte, lasiert | | 76,0 | 100,0% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *0,7%* | **Gesamt** | | **76,0** | | |
| **Trockenbauwand** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *908,9 m²* | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 35,6% | Gips, sortenrein |
| *Masseanteil* | *1,4%* | Blech-Profile | 1 | 5,1 | 10,5% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Glaswolle, gesteckt | 1 | 9,0 | 18,3% | KMFs |
| | | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 35,6% | Gips, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **49,1** | | |

Abb. 76: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, BSH-Wand und Trockenbauwand. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

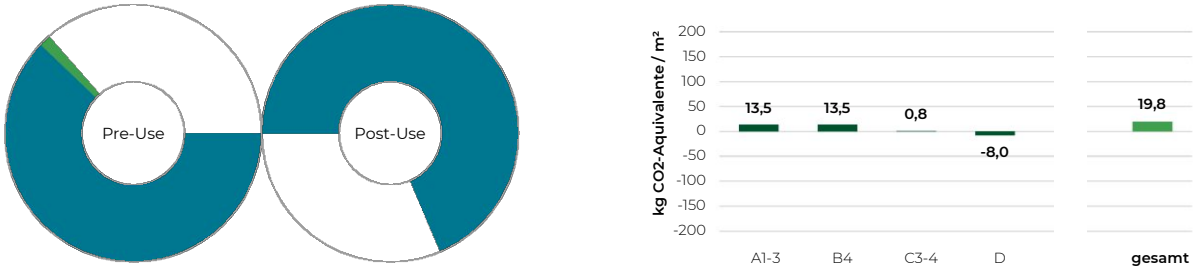


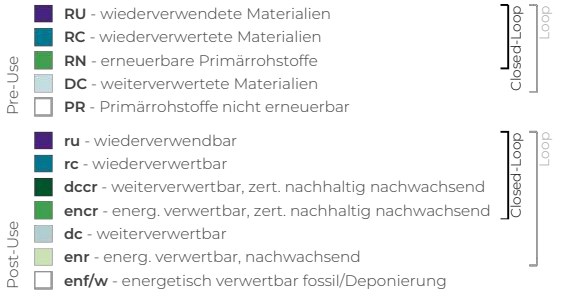

Abb. 77: Trockenbauwand Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Trockenbauwand

In Haus B wird dieselbe Trockenbauwandkonstruktion verwendet wie in Haus A. Diese muss einmal im Gebäudelebenszyklus ausgetauscht werden, ist allerdings recht leicht und sortenrein rückbaubar.

Die Materialien Gipskarton, Glaswolle und Stahl-Blech haben sowohl vor als auch nach Einsatz im Gebäude ein gutes Kreislaufpotenzial. Die Gipskartonplatte mit REA-Gipsen, 5% rezyklierter Baugipse und der Kaschierung aus Kartonage erreicht im Pre-Use einen UMI von 66%. Aufgrund der Sortenreinheit des Materials ist das Recyclingpotenzial nach Rückbau mit 69% ebenfalls recht hoch. Die Glaswolle aus durchschnittlich 70% Altglas hat dank der sortenreinen Rückgewinnung im Post-Use auch ein Recyclingpotenzial von fast 50%. Die Blech-Unterkonstruktion, die als metallisches Material praktisch uneingeschränkt rezykliert werden kann, besteht auch bereits ab Herstellung aus einem Drittel Rezyklat. Insgesamt erreicht die Trockenbauwand aufgrund von Recycling sowohl im Pre-Use als auch im Post-Use mit 66% einen guten UMI.

Das GWP ist mit 19,8 kg $CO_2$-Äquivaltente pro Quadratmeter eher gering. Die Blech-Profile sind in der Herstellung am $CO_2$-intensivsten, erreichen aber aufgrund der Wiederverwertung Vorteile außerhalb der Systemgrenze. Auf den gesamten Lebenszyklus betrachtet trägt die Glaswolle damit noch mehr zum GWP bei.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| 99% | | | 99% | 1% | | | 42% | 32% | 14% | 11% | 1% | -103,6 | 0,0 | 129,6 | -41,8 |
| **0%** | **0%** | **99%** | 0% | **1%** | **0%** | **0%** | **42%** | **32%** | 14% | 11% | **1%** | **-103,6** | **0,0** | **129,6** | **-41,8** |
| | | | | **UMI total:** | | | | | | | **92,5%** | **GWP total:** | | | **-15,8** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 6,2 | 6,2 | 0,0 | -8,0 |
| | 70% | | | 30% | | 48% | | | | | 52% | 4,0 | 4,0 | 0,2 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| **0%** | **62%** | **1%** | 0% | **36%** | **0%** | **69%** | **0%** | **0%** | 0% | 0% | **31%** | **13,5** | **13,5** | **0,8** | **-8,0** |
| | | | | **UMI total:** | | | | | | | **66,0%** | **GWP total:** | | | **19,8** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

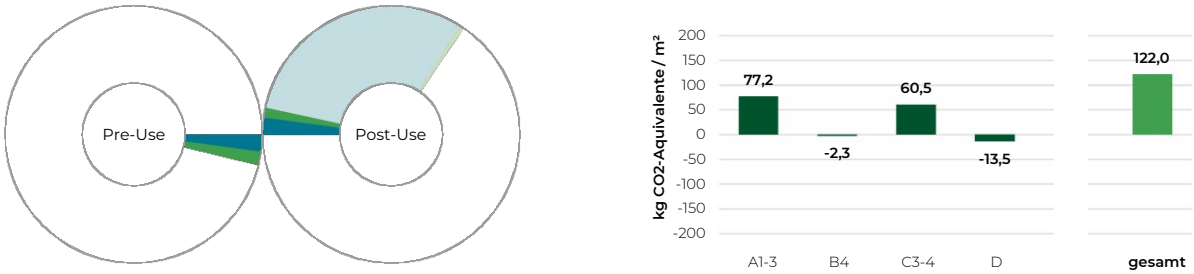



Abb. 78: Decke Erschließung Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Decke Erschließung

Auch die Decke im Erschließungskern ist mit Stahlbeton ausgeführt. Sie gleicht im Aufbau der Geschossdecke von Haus A, macht aber nur etwa 15% von deren Fläche aus. Ihr Bodenaufbau aus EPS-Trittschalldämmung und Zementestrich mit integrierter Fußbodenheizung muss in den 100 Jahren Betrachtungszeitraum einmal getauscht werden; der Belag aus Klebeparkett mit einer Nutzungsdauer von 25 Jahren sogar dreimal. Die nasse Ausführung von Tragstruktur und Fußbodenaufbau macht einen sortenreinen, zerstörungsfreien Rückbau praktisch unmöglich.

Das Klebeparkett kann im Rückbau nur rausgerissen werden; mit den Kleberesten ist lediglich eine energetische Verwertung möglich. Der Zementestrich geht einen kaum mehr lösbaren Verbund mit der Fußbodenheizung ein und kann als stark verschmutzter Bauschutt nur deponiert werden.

Unter der Trennfolie lässt sich die Dämmung gut rückbauen, aber erdölbasierte Dämmstoffe landen auch sortenrein in der energetischen Verwertung. Der Beton mit Gipsputzresten kann teilweise weiterverwertet werden. Dank der Stahlarmierung ist wenigstens ein kleiner Teil der Geschossdecke wiederverwertet und wiederverwertbar. Insgesamt ist das Kreislaufpotenzial mit 11,5% gering.

Mit 122,0 kg $CO_2$-Eq/m² hat die Beton-Decke ein großes Treibhauspotenzial. Mehr noch als der Beton trägt der einmal auszutauschende Zementestrich dazu bei.

| **Decke Erschließung** | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *217,6 m²* | Belag | 3 | 16,6 | 1,8% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *6,4%* | Zementestrich, Fußbodenheizung | 1 | 294,0 | 31,3% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | EPS-TSDM | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | EPS | 1 | 1,5 | 0,2% | Kunststoffe |
| | | Beton | | 600,0 | 63,9% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,1% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Gipsputz | | 5,3 | 0,6% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **938,3** | | |

| **Decke zu Keller** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *308,4 m²* | Belag Klebeparkett | 3 | 16,6 | 1,8% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *9,1%* | Zementestrich, Fußbodenheizung | 1 | 294,0 | 31,4% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | EPS-TSDM | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | EPS | 1 | 3,5 | 0,4% | Kunststoffe |
| | | EPS-RCgranulat, zementgeb. | 1 | 1,5 | 0,2% | Kunststoffe |
| | | Beton | | 600,0 | 64,1% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,1% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **936,5** | | |

Abb. 79: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Decken Erschließung und zu Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

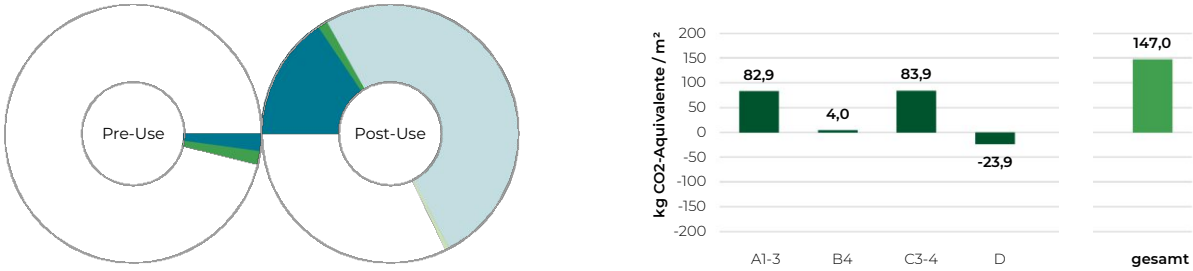
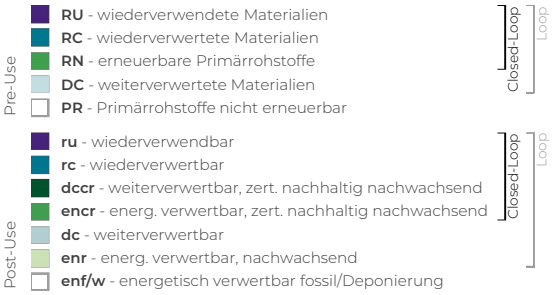



Abb. 80: Decke zu Keller Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Decke zu Keller

Auch die Decke zum Keller baut auf Stahlbeton. Sie gleicht der Decke Erschließung, abgesehen von einer zusätzlichen Dämmschicht und dem Verzicht auf eine unterseitige Verputzung. Ohne diesen Gipsputz kann der Beton im Wesentlichen sortenrein abgebrochen werden. Dadurch ist er vollständig verwertbar – zu 21% für Recycling und zu 79% im Downcycling. Da der Beton-Anteil fast zwei Drittel der Bauteil-Masse ausmacht, wird dadurch der UMI wesentlich verbessert. Wie auch bei Haus A wird bei der Decke zum Keller neben konventioneller EPS-Dämmung ein Recyclinggranulat verwendet, das zu 25% aus wiederverwertetem Material besteht. Im EoL wird die gesamte erdölbasierte Dämmung energetisch verwertet.

Während die EPS-Dämmung das Kreislaufpotenzial kaum beeinflusst, zeichnet sie sich im Treibhauspotenzial deutlich ab. Fast allein dadurch ändert sich das GWP im Vergleich zur Erschließungs-Decke um 25 kg $CO_2$-Eq/m² auf 147,0 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 94% | | 6% | | | | 71% | | 24% | 6% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 23,8 | 23,8 | 2,4 | -0,1 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 1,0 | 1,0 | 2,0 | -1,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 3,3 | 3,3 | 7,0 | -3,4 |
| | | | | 100% | | | | | 48% | | 52% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **2%** | **2%** | **0%** | **96%** | **0%** | **2%** | **0%** | **1%** | **31%** | **0%** | **66%** | **77,2** | **-2,3** | **60,5** | **-13,5** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **11,5%** | **GWP total:** | | | **122,0** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 94% | | 6% | | | | 71% | | 24% | 6% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 23,8 | 23,8 | 2,4 | -0,1 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 1,0 | 1,0 | 2,0 | -1,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 7,6 | 7,6 | 16,0 | -7,8 |
| | 23% | | | 77% | | | | | | | 100% | 2,0 | 2,0 | 14,5 | -6,1 |
| | | | | 100% | | 21% | | | 79% | | 0% | 44,5 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **2%** | **2%** | **0%** | **96%** | **0%** | **16%** | **0%** | **1%** | **51%** | **0%** | **32%** | **82,9** | **4,0** | **83,9** | **-23,9** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **23,0%** | **GWP total:** | | | **147,0** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

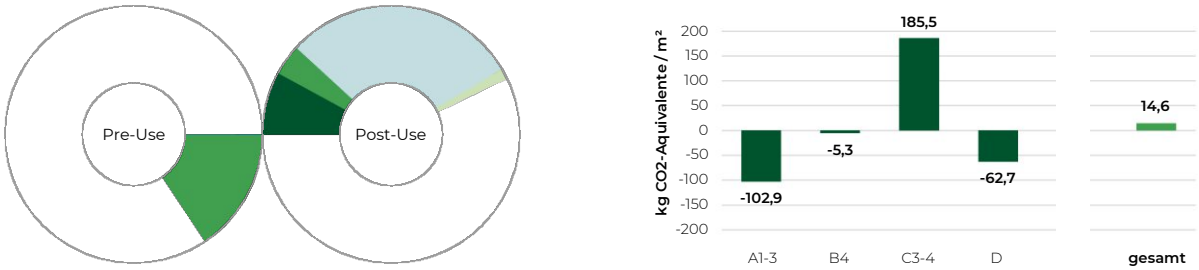



Abb. 81: Geschossdecke Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Geschossdecke

Die übrigen Geschossdecken in Haus B sind mit Brettstapelholz gebaut. Während dies den Urban Mining Index des Bauteils gar nicht so viel verbessert, reduziert sich das Treibhauspotenzial drastisch. Der Fußbodenaufbau ist mit Klebeparkett und Zementestrich inclusive Fußbodenheizung auf Trennlage teils ident mit den beiden vorherigen, hat aber eine Trittschalldämmung aus Glaswolle und eine zementgebundene Schüttung. Von einem einmaligen Austausch des gesamten Bodenaufbaus muss ausgegangen werden. Das Parkett wird dreimal getauscht.

Während die Brettstapelholzdecke und OSB-Beplankung als Trockenbau überwiegend sortenrein und zerstörungsfrei ausgebaut werden können, ist dies bei der zementgebundenen Schüttung nur bedingt und beim Estrich und Bodenbelag nicht möglich. Da die Tragstruktur nur etwa 13% der Masse ausmacht, fällt ihr gutes Kreislaufpotenzial kaum ins Gewicht. Die Brettstapeldecke mit Hartholzdübel kann auf Leim und auf Stahlverbindungen verzichten, besteht also komplett aus nachwachsenden Rohstoffen. Als unbehandeltes, leicht ausbaubares Vollholz kann sie zu etwa 80% weiterverwertet werden. Die OSB-Platte hat lediglich aufgrund des Leims einen geringen Anteil nicht erneuerbarer Primärrohstoffe. Mit 70% erreicht auch sie ein gutes Downcycling-Potenzial. Unter der Annahme, dass 75% des Holzes aus zertifiziert nachhaltigen Quellen stammen, erreicht die Holzkonstruktion auch gute Post-Use Werte. Wie bereits erläutert, kann der Estrich nur deponiert werden. Die Splitt-Schüttung lässt sich aufgrund der Zementgebundenheit nicht wiederverwenden, für sie ist das wahrscheinlichste Szenario ein Downcycling. Die Glaswolle mit recht guten Kreislaufeigenschaften fällt aufgrund ihrer geringen Masse kaum ins Gewicht. Der UMI der Geschossdecke beträgt also insgesamt 21,5% und ist „nur“ um 10% besser als jener der konventionellen Betondecke. Das Treibhauspotenzial hingegen ist um den Faktor acht geringer. Das GWP in der Herstellung ist negativ: Auf den gesamten Lebenszyklus gerechnet beträgt es 14,6 kg $CO_2$-Eq/

| Geschossdecke | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.335,0 m²* | Belag Klebeparkett | 3 | 16,6 | 2,5% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *27,2%* | Zementestrich, Fußbodenheizung | 1 | 294,0 | 45,2% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,1% | Kunststoffe |
| | | Glaswolle-TSDM | 1 | 0,4 | 0,1% | KMFs |
| | | Splitt-Schüttung, zementgebunden | 1 | 252,0 | 38,8% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | OSB-Platte | | 10,8 | 1,7% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | Brettstapelholz, Hartholzdübel | | 76,0 | 11,7% | Holz, naturbelassen |
| | | **Gesamt** | | **650,3** | | |
| *Bauteilfläche* | *338,2 m²* | Schüttung Kies | | 108,0 | 47,3% | Splitt, sortenrein |
| *Masseanteil* | *2,4%* | Abdichtung, verklebt | 3 | 8,0 | 3,5% | Kunststoffe |
| | | EPS | 1 | 18,0 | 7,9% | Kunststoffe |
| | | EPS-Gefälledämmung | 1 | 6,0 | 2,6% | Kunststoffe |
| | | Aluminium-Bitumenbahn | 1 | 11,0 | 4,8% | Bitumengemisch |
| | | OSB-Platte | | 10,8 | 4,7% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | Brettstapelholz, Hartholzdübel | | 66,5 | 29,1% | Holz, naturbelassen |
| | | **Gesamt** | | **228,3** | | |

Abb. 82: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Geschossdecke und Dach. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

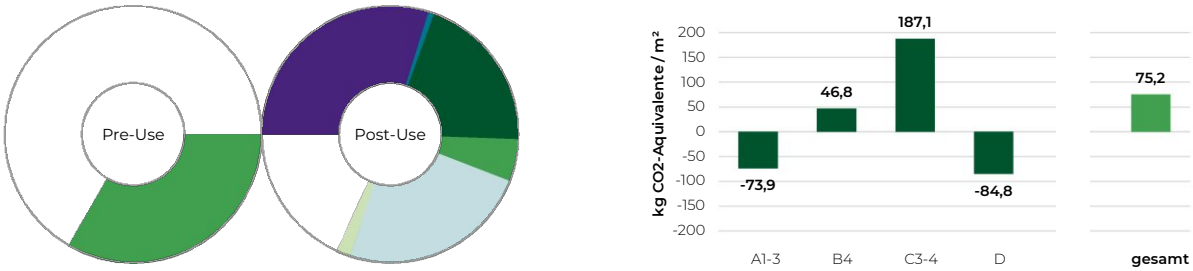



Abb. 83: Dach Haus B: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

m². Besonders durch die Brettstapeldecke kann viel $CO_2$ gebunden werden. Die Splitt-Schüttung, die als schweres Bauteil den UMI wesentlich beeinflusst, hat ein sehr geringes Treibhauspotenzial.

## Dach

Das Dach wird wie die Geschossdecke von Brettstapelholz und einer OSB-Beplankung getragen. Ohne dessen Schallschutzanforderungen kann es aber wesentlich leichter ausgeführt werden, was das Kreislaufpotenzial positiv beeinflusst. Die Konstruktionsbauteile erreichen beim Dach ein Drittel des Masse-Anteils. Dass sie einen sehr guten UMI haben, kann im vorhergehenden Kapitel nachgelesen werden. Der Dachaufbau, eine Kunststoffabdichtung, die Dämmung und die bituminöse Dampfbremse, muss im Lebenszyklus ausgetauscht werden; die Abdichtung sogar dreifach. Dennoch fällt ihr sehr geringes Kreislaufpotenzial aufgrund ihrer kleinen Masse kaum ins Gewicht. Lediglich die Bitumenbahn kann zum Teil recycelt werden. Da sie bei einem Holzbau nur lose verlegt und nicht verschweißt wird, kann sie leicht rückgebaut werden, was ihr Recyclingpotenzial im Vergleich zu Haus A verbessert. Der Witterungsschutz aus einer Kiesschüttung besteht aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen. Aufgrund des sortenreinen Rückbaus kann er sehr leicht wiederverwendet werden. Insgesamt beträgt der UMI des Daches von Haus B 51%.

Das Treibhauspotenzial fällt höher aus als jenes der Geschossdecke. Der $CO_2$-speichernden Brettstapeldecke stehen die EPS-Dämmung und die Abdichtung mit einem großen GWP entgegen. So beträgt der Gesamtwert im Lebenszyklus 75,2 kg $CO_2$-Eq/m².

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 94% | | 6% | | | | 71% | | 24% | 6% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 23,8 | 23,8 | 2,4 | -0,1 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | 70% | | | 30% | | 48% | | | | | 52% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | 70% | | 30% | 0,0 | 0,0 | 1,7 | -0,5 |
| | | 89% | | 11% | | | 53% | 20% | 18% | 7% | 3% | -2,8 | 0,0 | 4,3 | -2,2 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -115,5 | 0,0 | 129,6 | -56,2 |
| **0%** | **0%** | **16%** | **0%** | **84%** | **0%** | **0%** | **8%** | **4%** | **30%** | **1%** | **57%** | **-102,9** | **-5,3** | **185,5** | **-62,7** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **21,5%** | **GWP total:** | | | **14,6** |
| | | | | 100% | 63% | | | | | 37% | 0% | 0,3 | 0,0 | 1,5 | -0,4 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 8,6 | 25,8 | 27,2 | -13,6 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 14,3 | 14,3 | 30,0 | -14,6 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 4,8 | 4,8 | 10,0 | -4,9 |
| | | | | 100% | | 16% | | | | | 84% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | | 89% | | 11% | | | 53% | 20% | 18% | 7% | 3% | -2,8 | 0,0 | 4,3 | -2,2 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -101,0 | 0,0 | 113,4 | -49,2 |
| **0%** | **0%** | **33%** | **0%** | **67%** | **30%** | **1%** | **20%** | **5%** | **24%** | **2%** | **18%** | **-73,9** | **46,8** | **187,1** | **-84,8** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **51,0%** | **GWP total:** | | | **75,2** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Auswertung

Der anteilige Holzbau wirkt sich positiv auf die Zirkularität von Bestandshaus B aus. So sind alle Bauteile mit einer Holz-Konstruktion in der Herstellung klimapositiv. Zudem ermöglicht die trockene Bauweise im Holzbau einen sortenreinen Rückbau fast aller Materialien. Mit den Außenwänden, den Obergeschossdecken und den untergeordneten BSH-Wänden entspricht der flächenmäßige Anteil der Holzbauteile etwa dem der Betonbauteile. Aufgrund der deutlich geringeren Masse fällt Holz jedoch in der Gesamtbetrachtung nur geringfügig ins Gewicht. Der Masseanteil der Außenwand beträgt zum Beispiel nur 3,5% des Gebäudes. Trotz der Hybridbauweise entfallen nur 8% der Wertstoffe auf Hölzer.

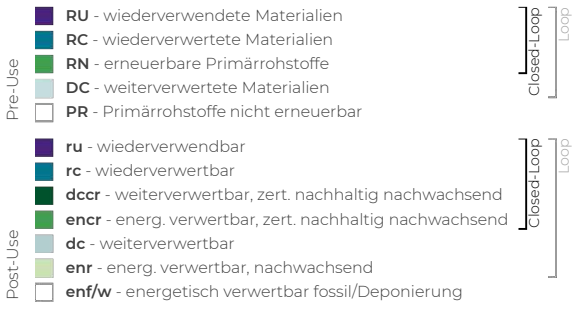
Dieser Anteil spiegelt sich auch in den erneuerbaren Primärrohstoffen im Pre-Use und anteilig in den zertifiziert nachhaltigen erneuerbaren Primärrohstoffen im Post-Use wider. Da der Holzbau zudem vermehrt relativ zirkuläre Materialien wie Glaswolle und Gipskarton einsetzt, ergibt sich auch ein Rezyklat-Anteil von 4%. Die überwiegende Masse von 88% besteht bei Einbau dennoch aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen. Darunter fallen besonders die Beton-Bauteile, die aufgrund der meist nassen Verbindungen inclusive Verklebungen und irreversiblen Stoffverbünden im EoL kaum sortenrein rückgewonnen werden können. Mit 76% besteht der größte Teil der Abfallfraktionen aus verschmutztem Bauschutt – mit nur eingeschränktem Verwertungspotenzial. So erfahren zumindest 24% ein Downcycling, aber fast ein Drittel des Gebäudes ist im EoL nicht kreislauffähig. Der UMI von Bestandshaus B beläuft sich auf 18%.

Das Treibhauspotenzial für das gesamte Gebäude beträgt 389,1 Tonnen $CO_2$-Äquivalente im Lebenszyklus. In der Herstellung ist das GWP dank des kohlenstoffspeichernden Holzes fast klimaneutral.

Dass Bestandshaus B fünfgeschossig und mit sichtbelassenen Holzbauteilen in dieser Form ausgeführt werden kann, liegt allein an den Brandschutzerleichterungen in Vorarlberg. In Wien könnte diese Bauweise nur bis vier Geschosse ausgeführt werden; und auch in Vorarlberg ist sind maximal sechs Geschosse zulässig. Diese Bauform ist also in ihrer Einsetzbarkeit limitiert. Der Holzanteil der Hybridkonstruktion wirkt sich jedoch positiv auf die Kreislauffähigkeit auf: auf die stoffliche Zirkularität und mehr noch auf das Treibhauspotenzial.

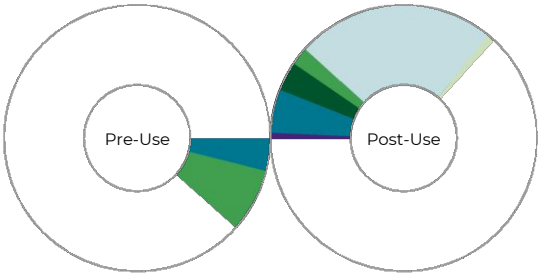
| Masseanteil: | |
|---|---|
| Keller | 34,6% |
| Außenwand | 3,5% |
| Tragende Wände | 15,4% |
| Trockenbau | 1,4% |
| Decken Holz | 27,2% |
| Decke Beton | 15,5% |
| Dach | 2,4% |

Abb. 84: Haus B: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude. Eigene Darstellung.



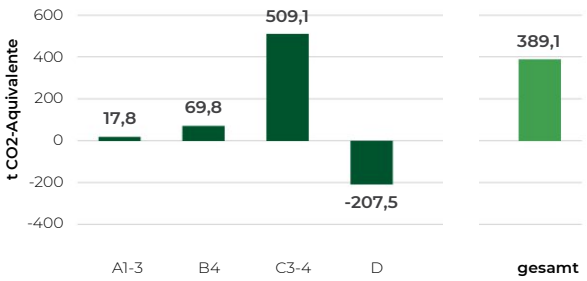



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| | | | |
|---|---|---|---|
| Wiederverwendung | 0% | Wiederverwendung | 1% |
| Wiederverwertung | 4% | Wiederverwertung | 5% |
| Erneuerbare Rohstoffe | 8% | Weiterverwertung z.N. | 4% |
| Weiterverwertung | 0% | Energetische Verwertung z.N. | 2% |
| nicht kreislauffähig | 88% | Weiterverwertung | 24% |
| | | Energetische Verwertung | 1% |
| | | nicht kreislauffähig | 63% |
| Pre-Use | 12% | Post-Use | 24% |
| **UMI gesamt** | **18%** | | |

Abb. 85: Haus B: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.




GWP [tCO2Eq.]

| | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
|---|---|---|---|---|
| | 17,8 | 69,8 | 509,1 | -207,5 |
| **GWP total** | | | | **389,1** |

Abb. 86: Haus B: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

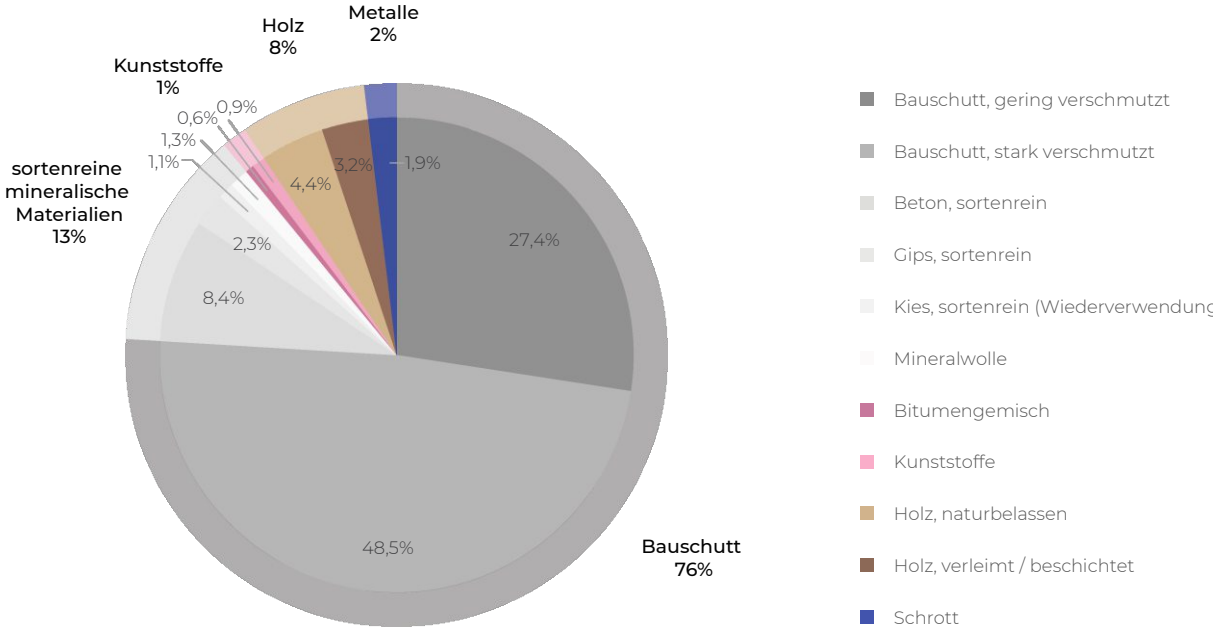



Abb. 87: Haus B: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 5

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Variante 1: Mineralischer Massivbau 113
Variante 2: natürliche Bauweise 155
Variante 3: Systembauweise 205

# DIE VARIANTEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Kreislaufgerecht Bauen jetzt.

In diesem Kapitel werden aufbauend auf den drei eingangs identifizierten Strategien zur Etablierung einer Kreislauwirtschaft alternative Gebäudeentwürfe für das Fallbeispiel entwickelt. Jeder dieser Ansätze wird anhand eines eigenen Gebäudeentwurf auf die aktuell bestmögliche Weise umgesetzt. Indem die Zirkularität dieser Gebäude ermittelt und verglichen wird, zeigt sich, welche Strategie aktuell das größte Potenzial für eine Kreislaufführung hat. Die drei Gebäudevarianten werden anhand der selben Kubatur, Funktion und Nutzung entwickelt – nach den folgenden Zielsetzungen bezüglich Material und Bauweise:

Variante 1 ist eine Optimierung der konventionellen, mineralischen Massivbauweise, angelehnt am Bestandhaus A. Durch möglichst viel Wieder- und Weiterverwertung werden die Stoffströme im technischen Kreislauf geschlossen. Die Baustoffe sind mineralischen, metallischen und fossilen Ursprungs.

Variante 2 strebt eine ökologische Bauweise an und orientiert sich an Bestandshaus B. Mit schadstofffreien und natürlichen Baustoffen, besonders aus nachwachsenden Quellen, wird das Gebäude möglichst im biotischen Kreislauf geführt.

Variante 3 setzt als Systembau auf Modularität und lösbare Fügetechnik. Durch möglichst viel Wiederverwendung soll das Gebäude im Kreislauf gehalten werden, dabei ist die Wahl der Materialität zweitrangig.

In den Kapiteln zu den jeweiligen Varianten werden zuerst konkrete Kriterien festgelegt, die die einzelnen Ansätze voneinander abgrenzen und aufgrund deren die Bauweisen gewählt werden. Da die Tragstruktur meist sowohl bezogen auf die Masse als auch auf das Volumen den größten Anteil eines Gebäudes ausmacht sowie großen Einfluss auf die Materialität und Verbindungsmittel des Ausbaus hat, wird sie in jeder Variante als erstes festgelegt. Diese Entscheidung erfolgt auf Grundlage einer tiefgreifenden Recherche der Potenziale verschiedener Bauweisen und Materialien innerhalb der jeweiligen Strömung. Als Informationsgrundlage dienen primär frei geführte Interviews mit Expert:innen aus der Baubranche. Die hiermit gewonnenen Erkenntnisse werden durch eine Literaturrecherche ergänzt. Nachdem die grundlegende Struktur einer Variante feststeht, werden die weiteren Schichten und Aufbauten im Kapitel Ausbau bestimmt. Verschiedene Ansätze und Materialien werden mittels Produkt- und Literaturrecherche auf ihre Eignung für die Bauaufgabe und ihr Kreislaufpotenzial verglichen, bevor diskursiv die einzelnen Aufbauten festgelegt werden. Da das gewählte Bewertungstool Urban Mining Index die Gebäude anhand ihrer Bauteilschichten untersucht, liegt ein entscheidender Fokus auf der Entwicklung der Standardaufbauten. Nachdem die gesamten Aufbauten aller Varianten festgelegt sind, erfolgt auch hier die Bemessung des Kreislaufpotenzials analog zu den Bestandsbauten.

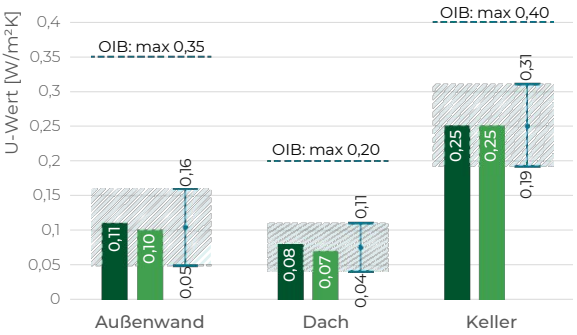
### Funktionsäquivalenz

Damit die Kreislauffähigkeit der verschiedenen Gebäude tatsächlich miteinander verglichen werden kann, müssen ihre anderen Eigenschaften möglichst ident sein – dadurch können sie aus der Betrachtung ausgeklammert werden. Aus diesem Grund wurde ein konkretes Fallbeispiel aus Versuchsaufbau gewählt – indem immer der selbe Standort mit dem selben Grundriss und der selben Nutzung untersucht wird, sind bereits viele Parameter gleichgesetzt. Andere Aspekte, besonders jene, die Bauweise und Material betreffen, können dennoch variieren. Zur Definition eines Anspruchs an diese Funktionen dienen die Bestandsbauten als Orientierung, die schließlich auch Teil des Vergleichs sind. Als Mindestanforderung an die Tragstruktur gilt, dass alle Bauweisen für fünf Geschosse tragend eingesetzt werden können. Selbstverständlich müssen alle Gebäude die rechtlichen Vorgaben einhalten – besonders hervorzuheben ist hier der Brandschutz. Die erreichten Schallschutzwerte der Bestandsbauten differieren stark, deshalb werden auch hier die Vorgaben der OIB-Richtlinie als Mindestanforderung festgelegt. Beim Wärmeschutz hingegen übertreffen beide Bestandsbauten die rechtlichen Anforderungen deutlich. Hier sind, möglichst gleiche Werte zu erreichen. Um nicht jedes Produkt direkt auszuschließen, wird eine geringe zulässige Varianz festgelegt: Von den besseren Wärmeschutzwerten der Bestandsbauten soll im Vergleich zu den Vorgaben der OIB-Richtlinie höchstens um 15% abgewichen werden. Die zulässige Varianz ist in Abbildung 88 dargestellt. Die Werte für Schall- und Wärmeschutz werden mit der Software ArchiPhysik errechnet.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 88: Die U-Werte der Bestandsbauten übertreffen die Vorgaben der OIB-Richtlinie deutlich. Die zulässige Varianz der neuen Entwürfe ist eine Abweichung um 15% von den Bestands-Werten im Verhältnis zu den OIB-Werten (blau hinterlegte Felder). Eigene Darstellung.




## Systemgrenzen

Die Untersuchung von fünf Gebäuden auf ihre Kreislauffähigkeit im Lebenszyklus ist umfangreich. Zur Nachvollziehbarkeit des Vergleichs müssen die Grenzen der Betrachtung klar festgelegt werden.

**Status Quo**
Der Kreislaufwirtschaft wird aktuell viel Aufmerksamkeit geschenkt. Dank neuer Gesetzgebung und Forschung ist nicht nur zu hoffen, sondern anzunehmen, dass sich die Kreislauffähigkeit vieler Produkte und Bauweisen in der absehbaren Zukunft deutlich verbessert. Diese Arbeit kann sich aber nur auf den Status Quo, den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik beziehen. Bei der Prognose, wie zirkulär der Rückbau der Gebäude in 100 Jahren sein wird, können also nur die heutigen Möglichkeiten angenommen werden, auch wenn davon auszugehen ist, dass sich die Techniken und Voraussetzungen innerhalb des nächsten Jahrhunderts westlich ändern werden. Bei diesem Vergleich geht es vielmehr um eine Analyse des Status Quo als um eine korrekte Prognose der Zukunft.

**Das Gebäude**
Die Kreislauffähigkeit wird nicht nur durch die Entscheidung bestimmt, wie gebaut wird, sondern mindestens zu gleichen Teilen dadurch, ob und was gebaut wird. Diese Arbeit befasst sich jedoch nicht damit, ob das gebaute Fallbeispiel die richtige Nutzung am richtigen Ort darstellt. Auch auf Gebäudeteil-Ebene ist die Frage der Angemessenheit sinnvoll. So können Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit einer Tiefgarage kritisch hinterfragt werden. Das Ziel der Arbeit ist allerdings eine vergleichende Untersuchung eines typischen Wohnhauses der Gebäudeklasse 5. Eine Kombination aus rechtlichen Anforderungen und Anforderungen der Nutzer:innen führt dazu, dass derartige Gebäude aktuell meist eine Tiefgarage haben. Deshalb und um die Vergleichbarkeit mit dem bestehenden Fallbeispiel aufrecht zu erhalten, werden weder die Tiefgarage noch andere Gebäudefunktionen abgeändert.

**Wirtschaftlichkeit und Kosten**
In der freien Marktwirtschaft ist die Wirtschaftlichkeit ein wesentlicher Faktor bei der Frage, ob sich Bauweisen in der Masse durchsetzen. Am Beispiel der großen Preisturbulenzen im Zuge der Corona-Krise zeigt sich jedoch, dass Kosten und Wirtschaftlichkeit enorm dynamisch und abhängig von äußeren Faktoren sind. Aufgrund dieser Veränderlichkeit und wegen geringer Datenlage lassen sich die Kosten und damit die Wirtschaftlichkeit von Konstruktionen und Bauten nur sehr bedingt vorhersagen. Daher wird von einer Ermittlung der Errichtungskosten der verschiedenen Gebäude abgesehen. Um dennoch in die Wirtschaftlichkeit in gewisser Weise zu beachten, werden ausschließlich Produkte und Bauweisen verwendet, die heute am Markt verfügbar sind. Es wird angenommen, dass Produkte, die am Markt bestehen, nicht nur alle gesetzlichen und gebrauchstypischen Anforderungen erfüllen, sondern auch in einem wirtschaftlichen Rahmen realistisch anwendbar sind. Auch in der Systematik des Urban Mining Indexes wird die Wirtschaftlichkeit als Faktor zur Umsetzungswahrscheinlichkeit gewisser Rückbaumaßnahmen indirekt beachtet.

**Treibhauspotenzial**
Zur Ermittlung des Treibhauspotenzials der Gebäude wird auf Umweltproduktdeklarationen zurückgegriffen. Diese neutral geprüften Daten stellen Allgemeinwerte dar, sind also vorteilhaft, weil sie nicht an explizite Produkte gebunden sind. Allerdings berücksichtigen sie dadurch auch keine konkreten Umstände. So werden nicht die tatsächlich benötigten Transportwege und dadurch verursachten Emissionen abgebildet, sondern durchschnittliche, übliche Transportwege. Auch bei den Modulen C und D können nur diejenigen Verwertungswege korrekt angezeigt werden, die aktuell schon bemessen sind.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.





Abb. 89: Links: Baufeld D22 in der Seestadt Aspern, Wien, Clemens Kirsch Architektur (2017). Foto: Hafenscher
Abb. 90: Rechts: Wohnungsbau 2226 Graf, Dornbirn, Baumschlager Eberle (2020). Foto: Baumschlager Eberle Architekten

# VARIANTE 1: MINERALISCHER MASSIVBAU

## DEN KONVENTIONELLEN MASSIVBAU WEITERENTWICKELN

In dieser Variante wird untersucht, wie kreislauffähig ein Wohngebäude sein kann, wenn es als mineralischer Massivbau und mit den konventionellen, in der Baupraxis erprobten Verbindungstechniken errichtet wird. Wenn die Stoffströme innerhalb des etablierten Systems geschlossen werden können, lässt sich ihre Anwendung leicht auf eine Vielzahl von Projekten skalieren. Der Fokus liegt also auf der Schließung der Stoffströme von mineralischen Materialien durch Wieder- und Weiterverwertung, auf Sortenreinheit und auf einer Vor-Ort-Bauweise. Referenzprojekte für diese Strömung gibt es bereits einige. Baumschlager Eberle Architekten haben mehrere Gebäude nach dem Prinzip 2226 errichtet – dank einer ausgeklügelten massiven Bauweise konnten Haustechnik und Bauteilschichten eingespart werden. In der Seestadt Aspern wurde von Clemens Kirsch Architektur ein geförderter Wohnbau mit einstofflicher mineralischer Außenwand errichtet. Auch die Stadt Wien fördert kreislaufoptimierten Massivbau: Für die MA 48 wird erstmals ein öffentliches Gebäude mit Recyclingbeton errichtet.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kriterien

Als eine Optimierung des mineralischen Massivbaus setzt dieser Ansatz besonders auf konventionelle mineralische Materialien wie Beton, Ziegel und mineralische Dämmstoffe. Auch andere nicht-biotische Materialien wie Metalle und Kunststoffe werden in Betracht gezogen. Lehm als nicht etablierter mineralischer Baustoff wird in dieser Variante ausgeklammert. Innerhalb dieses konventionellen Materialkanons werden diejenigen Baustoffe und Bauweisen herausgesucht, welche Stand heute das größte Kreislaufpotenzial haben, indem sie sowohl bereits aus wiederverwertetem Material bestehen als auch für eine Wieder- und Weiterverwertung geeignet sind. Auch die Verbindungstechniken und die Bauweise erfolgen in der Logik des konventionellen mineralischen Massivbaus: Eine Vor-Ort-Bauweise mit nassen Verbindungen. Indem von der aktuell üblichen Verarbeitungsweise auf der Baustelle nicht wesentlich abgewichen wird, ist dieser Ansatz besonders leicht in die Baupraxis zu übersetzen. Orientierung für das, was konventionell ist, bietet das Bestandshaus A. Seine Tragstruktur und Aufbauten werden im Prinzip nachempfunden, aber die Materialien und Baustoffe auf Optimierung des Kreislaufpotenzials hin untersucht.

Bei der Auswahl möglichst geeigneter Materialien und Bauweisen ist besonders ihre Eignung für die Bauaufgabe entscheidend: Anforderungen an Wärmeschutz, Schallschutz, Brandschutz, Tragfähigkeit müssen erfüllt werden. Zudem ist neben der eigenen Zirkularität der Baustoffe auch wichtig, eine Beeinträchtigung der Sortenreinheit und Schadstofffreiheit anderer Bauteilschichten zu vermeiden. Von den geeigneten Baustoffen wird jenes Produkt gewählt, welches das größte Kreislaufpotenzial erreicht. Falls die Betrachtung der Kreislauffähigkeit keine eindeutige Entscheidung erbringt, wird das Produkt mit dem geringeren Treibhauspotenzial gewählt.

Für jede Bauteilschicht wird basierend auf Recherche und Erfahrungswerten eine Vorauswahl an Baustoffen getroffen, welche grundsätzlich geeignet sind. Diese Arbeit bemüht sich um eine möglichst umfängliche Betrachtung der in Frage kommenden Materialien. Da der Baustoffmarkt jedoch sowohl regional als auch zeitlich sehr dynamisch ist, kann kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Materialien

| konventionelle Materialien: | mineralische Materialien | Metalle | fossile Materialien |
|---|---|---|---|
| | Beton, Ziegel, Gips, mineralische Dämmstoffe | Stahl (Stahlbeton) Bleche | fossile Dämmstoffe Folien |

## Fügetechnik

| konventionelle Verbindungs-techniken | „nasse Verbindungen“ | „trockene Verbindungen“ im Ausbau |
|---|---|---|
| | gießen, mörteln, verputzen | Stichwort Trockenbau |

## Angestrebte Kreislaufführung

wieder- und weiterver-wertete Baustoffe →  → höchstmögliches Wieder- und Weiteverwer-tungspotenzial

## Maßnahmen zur Steigerung der Zirkularität

möglichst Sortenreinheit & Störstofffreiheit
Verzicht auf Stoffvermischungen
Suffizienz

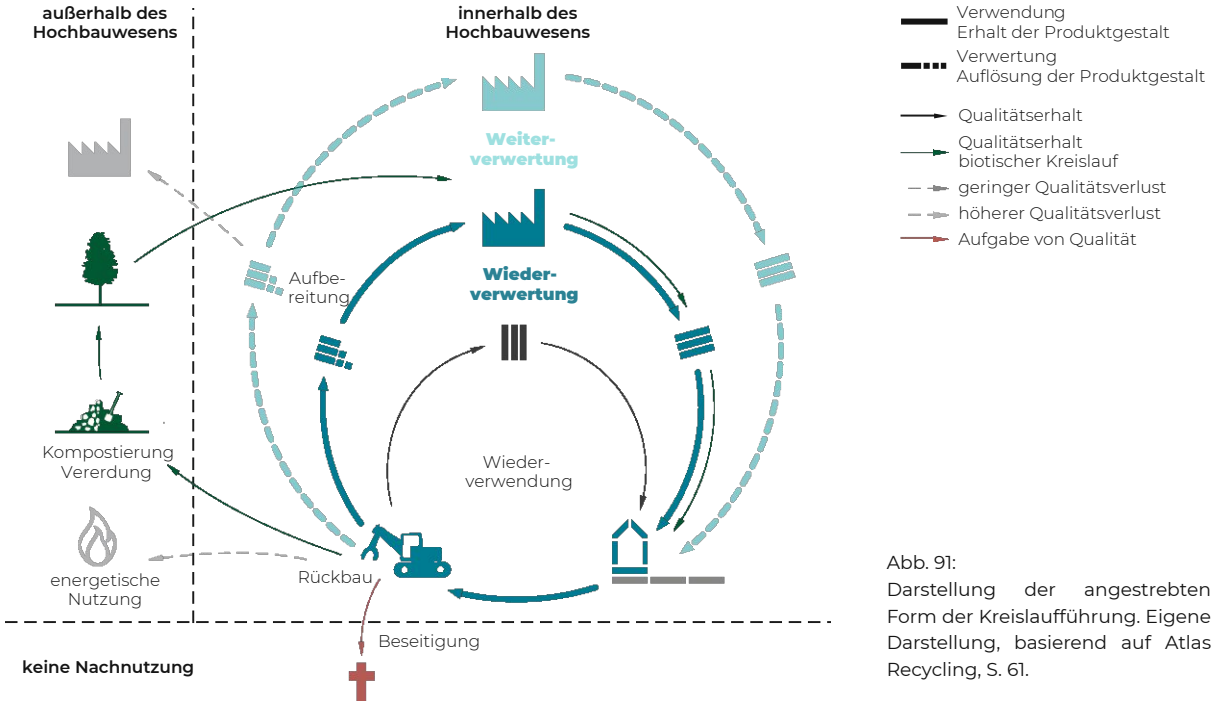



Abb. 91:
Darstellung der angestrebten Form der Kreislaufführung. Eigene Darstellung, basierend auf Atlas Recycling, S. 61.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Konstruktion

Die in Österreich gängigsten mineralischen Massivbauweisen bestehen aus Stahlbeton und Ziegelmauerwerk. Deshalb werden die neuesten Entwicklungen zur Ressourcenschonung bei diesen beiden Bauweisen nachfolgend recherchiert und deren Kreislaufpotenzial evaluiert. Darauf basierend folgt eine Entscheidung, welche Baustoffe die Konstruktion in dieser Variante bilden.

## Beton

Stahlbeton ist in mehreren Hinsichten ein hochleistungsfähiges Material. Er kann sowohl in statisch anspruchsvollen als auch in erd- und wasserberührten Situationen eingesetzt werden und ist durch seine plastische Verformbarkeit neben guten brand- und schallschutztechnischen Eigenschaften nahezu universal verwendbar. Zudem verfügt er über eine hohe technische Nutzdauer. Gleichzeitig jedoch ist seine Herstellung aufgrund des Bindemittels Zement enorm energieintensiv und durch den großvolumigen Einsatz von Kies und Sand ressourcenintensiv.[162] Um diese nachteilige Klimabilanz zu verbessern, sind in der Branche gegenwärtig nachfolgend genauer beschriebene Entwicklungen im Gange.

**Recycling-Beton**

Ein Ansatz, die Nachhaltigkeit von Beton zu erhöhen, ist das Schließen der Stoffkreisläufe auf Materialebene. Diesbezüglich sind besonders die zwei Hauptbestandteile Zuschlag und Bindemittel zu betrachten.

Beton-Zuschläge bestehen in der konventionellen Herstellung aus meist regional abgebautem Kies und Sand. Lokal betrachtet stehen diese Abbaugebiete in Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen wie Landwirtschaft oder Trinkwassergewinnung. Wie bereits im Kapitel Status Quo beschrieben, führt global betrachtet die enorme Nachfrage nach Betonzuschlägen zu Sandmangel und Raubbau – mit fatalen Folgen für Ökosysteme. Bei Recycling-Betonen werden diese Zuschläge teilweise oder ganz mit aufbereiteten Baurestmassen substituiert. Je nach Expositionsklasse und Druckfestigkeit des Betons unterscheidet sich das Potenzial zum Einsatz von Recyclingzuschlägen. Im Anhang E der ÖNORM B 4710-1 wird der Anteil der rezyklierten Zuschläge für Österreich festgelegt.[163] Auch wenn die Werte der Norm nicht bindend sind, stellen sie laut Hans-Jürgen Zeiler von der Firma Wopfinger Transportbeton in etwa die aktuell marktreifen technischen Möglichkeiten österreichischer Betonhersteller:innen dar.[164] Die im Fallbeispiel hauptsächlich eingesetzten Expositionsklassen XC1 und XC2 könnten also zu 38% Recyclinggesteinskörnung verwenden. Ein Beton besteht freilich nicht nur aus Zuschlägen – wobei sie der Masse nach mit etwa 85% die weitaus größte Komponente eines durchschnittlichen Betons sind. Auf den gesamten Beton betrachtet lassen sich demnach laut Norm nur 32% der Masse aus Rezyklat herstellen.

Da die Baurestmassen vor ihrer Verwendung als Recycling-Zuschläge aufwendig aufbereitet werden müssen, sind sie aktuell teurer als Primärrohstoffe. Die Firma Wopfinger kann diesen Preisnachteil ausgleichen, indem sie für die Entgegennahme und Verwertung von Baurestmassen Geld verlangt. Weil diese Kosten für die Entsorger:innen geringer sind als die Kosten einer Deponierung, ist das Geschäft auch für sie lohnenswert. Durch diese Einnahmen ist es möglich, dass der Recycling-Beton gleichpreisig angeboten werden kann wie der gleichwertige konventionelle Beton. Interessanterweise entscheiden sich trotz finanzieller Gleichberechtigung immer noch viele Kund:innen des Unternehmens für den konventionellen Beton, da das Vertrauen in Recycling-Produkte in Teilen der Bevölkerung noch nicht ausreichend gegeben ist.[165] Gleichzeitig zeigt dieses Beispiel auf, dass schon heute hochwertige Baurestmassen ohne Verunreinigungen finanziell vorteilhaft sind. Wenn in Zukunft die Kosten für Deponierungen und die Nachfrage nach Recycling-

162 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 70.

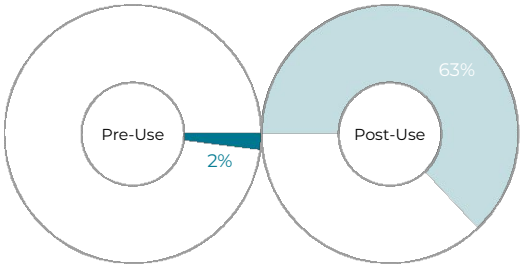
163 Siehe: Austrian Standards Institute, „OENORM B 4710-1:2018 01 01. Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität. Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton", 151.

164 Persönliches Interview mit Zeiler, Hans-Jürgen und Ramprecht, Philip von Wopfinger Transportbeton GmbH, digital, am 14.04.2023.

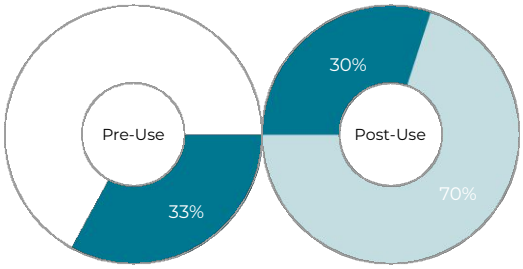
165 Persönliches Interview mit Zeiler, Hans-Jürgen und Ramprecht, Philip von Wopfinger Transportbeton GmbH, digital, am 14.04.2023.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




*Stahlbetonwand ohne Recycling-Zuschläge und mit Gipsputz*




*Stahlbetonwand mit Recycling-Zuschlägen und ohne Verschmutzungen*

Abb. 92: Das Kreislaufpotenzial einer 20 cm dicken Stahlbetonwand lässt sich durch den Einsatz von Recycling-Zuschlägen und einen sortenrein trennbaren Einbau deutlich verbessern. Links: Eine Stahlbetonwand ohne Recycling-Zuschläge mit geringen Verschmutzungen (z.B. Gipsputz) erreicht nur ein sehr geringes Kreislaufpotenzial von 17%. Rechts: Eine Stahlbetonwand mit 38% Recycling-Zuschlägen und ohne Verschmutzungen erreicht einen UMI von 49%. Eigene Darstellung.

| Materialbezeichnung der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß ÖNORM B 3140 | Gesteinskörnung | Expositionsklassen | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | X0[a] | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XF1 | XF2[b] | XF3[b] | XF4[b] | XD1 | XD2 | XD3[b] | XW1 | XW2 | XA1[c] | XA2 | XA3 | XM1 | XM2 | XM3 |
| | | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| RB-A1 | Grob | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 30 | 30 | 30 | 50 | 30 | 30 | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| | Fein[d] | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 15 | 15 | 15 | 25 | 15 | 15 | 25 | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Korngemisch[d] | 38 | 38 | 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| RB-A2 | Grob | 50 | 50 | 50 | 50 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Fein[d] | 25 | 25 | 25 | 25 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Korngemisch[d] | 38 | 38 | 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| RG-A3 | Grob | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 30 | 30 | 30 | 50 | 30 | 30 | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| | Fein[d] | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 15 | 15 | 15 | 25 | 15 | 15 | 25 | 25 | 25 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| | Korngemisch[d] | 38 | 38 | 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| RH-B | Grob | 50[e] | 35[e] | 35[e] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Fein[d] | 25[e] | 20[e] | 20[e] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Korngemisch[d] | 38[e] | 25[e] | 25[e] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

[a] Ein erhöhter Austausch ist zulässig:bei den Typen RB-A1, RB-A2 und RG-A3:
– bis zu 100 % bei groben Gesteinskörnungen bei Beton ≤ C16/20,
– bis zu 100 % bei feinen Gesteinskörnungen und Korngemischen bei Beton ≤ C8/10,
– bis zu 75 % bei feinen Gesteinskörnungen und Korngemischen bei Beton ≤ C12/15;
bei Typ RH-B:
– bis zu 75 % bei groben Gesteinskörnungen bei Beton ≤ C16/20,
– bis zu 75 % bei feinen Gesteinskörnungen und Korngemischen bei Beton ≤ C8/10,
– bis zu 70 % bei feinen Gesteinskörnungen und Korngemischen bei Beton ≤ C12/15.

[b] Die rezyklierte Gesteinskörnung darf nur verwendet werden, wenn der ursprüngliche Beton nachweislich auch dieser Expositionsklasse entsprochen hat.

[c] Bei treibendem Angriff (XAT) ist die Zugabe nicht zulässig.

[d] Bei Betonen mit GK ≤ 8 mm und mit rezyklierten Gesteinskörnungen sind diese maximal zulässigen Zugabemengen um 50 % zu reduzieren.

[e] Nur bei Anwendung im Trockenen und den weiteren Einschränkungen gemäß E.1 (9).

Abb. 93: ÖNORM B 4710-1: Tabelle E.3 — Grenzwerte für den Austausch von natürlichen Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Expositionsklassen (in Masse-%). ÖNORM B 4710-1, S. 151.

*Wie sehr regulative Vorgaben den Markt beeinflussen können, zeigt das Beispiel Schweiz. In der Stadt Zürich sowie in den meisten Kantonen wird der vorrangige Einsatz von Recycling-Beton empfohlen, sofern dieser im Umkreis von 25 km zulieferbar ist. Aufgrund dieser Vorgabe kann Recycling-Beton sogar teurer angeboten werden als konventioneller Beton. Zudem sind Schweizer Beton-Hersteller:innen aufgrund des Erfahrungsvorsprungs dazu in der Lage, deutlich höhere Anteile an Beton-Zuschlägen ohne Qualitätsverlust zu substituieren. Eine verbindliche Empfehlung der Öffentlichen Hand würde voraussichtlich auch in Österreich die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten beschleunigen.*[162]

162 Siehe: Katerusha, „Einsatz von Recycling-Beton fördern: D versus CH“.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Zuschlägen steigt, wird sich dieser ökonomische Vorteil voraussichtlich noch wesentlich ausbauen.

Eine Kritik an Recycling-Betonen ist, dass aktuell beim Einsatz von Recycling-Zuschlägen der nötige Zementanteil höher ist als bei Zuschlägen aus Primärrohstoffen. Die aus dem üblichen Recycling-Verfahren stammenden gebrochenen Körner haben einen höheren Hohlraumgehalt als runde Körner aus dem Kiesabbau, was einen größeren Bindemittelanteil erfordert.[166] Durch eine bessere Aufbereitung und feinstufigere Differenzierung der Korngrößen im Recyclingprozess kann dieser Mehranteil laut Philip Ramprecht jedoch fast zur Gänze reduziert werden.[167]

**Beton-Recycling**

Ein Recycling von Betonbruch ist schon deshalb sinnvoll, weil er einen so großen Teil an den aktuellen Abbruchmassen ausmacht. Dieses Material muss möglichst gut wieder- oder weiterverwertet werden, um eine Deponierung zu verhindern. Grundsätzlich ist die Verwertungsquote von mineralischen Baurestmassen mit rund 90% (Stand 2019) sehr gut, in der Kategorie der Hochbau-Restmassen mit nur etwa 40% jedoch unterdurchschnittlich. Das seit diesem Jahr geltende Deponieverbot für Betonbruch wird diese Quote voraussichtlich positiv beeinflussen, nimmt aber verunreinigtes Material aus.[168] Zudem beinhalten diese Quoten jegliche Art an Verwertung: Hochbau-Restmassen werden überwiegend im Straßenbau und zur Hinterfüllung, also im Downcycling, verwertet. Der Anteil an Betonbruch, der wieder für Recyclingbeton verwertet wird, ist derzeit sehr gering.[169]

Recycling-Gesteinskörnungen für Beton bestehen auch zum überwiegenden Teil aus Altbeton. Dieser kann stofflich fast vollständig wiederverwertet werden – allerdings mit der wesentlichen Voraussetzung einer sortenreinen Trennbarkeit. Je weniger Fremdbestandteile der Betonbruch enthält, desto geeigneter ist er für eine Wiederverwertung. Besonders kritisch sind Störstoffe, die die Festigkeitsentwicklung von Beton beeinflussen – zum Beispiel Gips. Der hohe Sulfatgehalt dieses Materials kann zu einem Sulfattreiben im Beton führen.

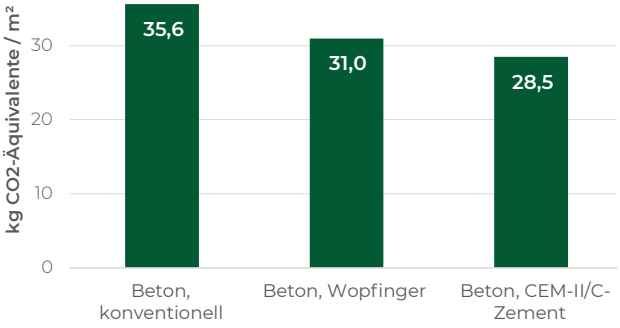



Abb. 94: Vergleich des Treibhauspotenzials in der Herstellung (A1-3) einer 20 cm dicken Betonwand (ohne Bewehrung). Eigene Berechnung & Darstellung.

Auch Materialmixe und Verklebungen, zum Beispiel von bituminösen Abdichtungen oder einem Wärmedämmverbundsystem, können problematisch sein.[170] Ein sortenreiner Einbau von Beton erhöht also seine technische Verwertbarkeit und damit die Chance auf eine möglichst hochwertige Kreislaufführung enorm. Für sortenreinen Betonbruch prognostiziert der Urban Mining Index einen Wiederverwertungsanteil von 30% und eine Weiterverwertung des restlichen Materials - dabei wird auch mitgedacht, dass die Zuschläge nur in Teilen aus Rezyklat substituiert werden können. Bei einer Schadstoff-Verunreinigung durch zum Beispiel Gips ist keine Wiederverwertung möglich – es wird eine Weiterverwertung von lediglich 63% des Materials und eine Deponierung des Rests angenommen.[171]

**Bewehrungsstahl**

Der Verbund aus Stahl und Beton ist aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften unproblematisch. Beton und Bewehrungsstahl lassen sich relativ einfach voneinander trennen.[172] Da Stahl-Recycling nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich günstig ist, wird der Armierungsstahl in den meisten Einbausituationen vollständig wiedergewonnen und einem Recycling zugeführt. Stahl ist das weltweit meist-recycelte Material und zählt zu den wenigen Baustoffen, die sich unbegrenzt oft ohne Qualitätsverlust wiederverwerten lassen.[173] Da schon viel Stahlschrott in Verwendung ist, kann bei der Herstellung von Bewehrungsstahl ausschließ-

166 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 19.

167 Persönliches Interview mit Zeiler, Hans-Jürgen und Ramprecht, Philip von Wopfinger Transportbeton GmbH, digital, am 14.04.2023.

168 Siehe: §7.14, Deponieverordnung 2008, Fassung 2021.

169 Siehe: Trebut und Pfefferer, *Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen*, 21.

170 Siehe: Biscoping, Bosold, und Brunner, „Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung“, 7–8.

171 Daten aus dem UMI-Tool.

172 Siehe: Biscoping, Bosold, und Brunner, „Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung“, 7.

173 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 68.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

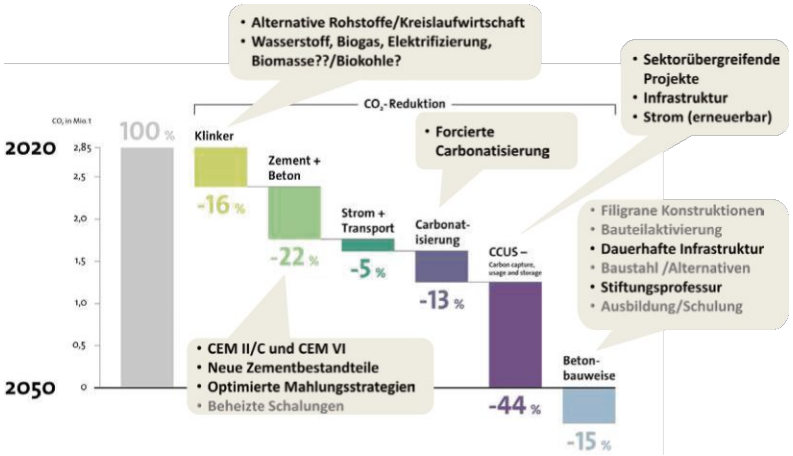



Abb. 95:
Zielvorgabe der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie, wie die Betonherstellung bis 2050 klimaneutral werden soll. In dieser Arbeit werden die zwei ersten, bereits marktgängigen Schritte betrachtet: Die Klinkerreduktion und der Einsatz von CEM II/C Zement. Darstellung: VÖZ.

lich Recyclingmaterial verwendet werden. Stahlbewehrungen haben also eine hohe Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Kreislaufführung. Obwohl das GWP von Stahlbauteilen beim Einsatz von Rezyklat nahezu halbiert wird, ist die Herstellung des Materials immer noch sehr energieintensiv.[174]

**$CO_2$-reduzierter Beton**

Für die fatale Ökobilanz von Betonen sind jedoch nicht primär die Zuschläge entscheidend, sondern das Bindemittel Zement. Die Zementherstellung, besonders das Mahlen des Zements und der Brennvorgang bei über 1 400°C, ist enorm energieintensiv: Die Zementproduktion allein ist für etwa 8% des globalen jährlichen Kohlenstoffdioxidausstoßes verantwortlich.[175] Die rasant steigenden Energiekosten aufgrund der Inflation, der $CO_2$-Steuer und der Taxonomie sowie die zunehmende Sensibilisierung der Bevölkerung für ökologische Nachhaltigkeit bewegen Hersteller:innen dazu, intensiv zur Reduktion der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen zu forschen. Speziell der Anteil des gebrannten Klinkers wird möglichst reduziert und durch alternative Roh- und Reststoffe kompensiert.[176] Dabei entfällt nur ein Drittel der Emissionen bei der Klinkerproduktion auf die benötigten Brennstoffe. Der größere Teil der Emissionen ist prozessbedingt – er entsteht aufgrund der chemischen Reaktion des Kalks im Brennprozess und lässt sich nicht durch eine Elektrifizierung der Herstellung vermeiden. Langfristig versucht die Zementindustrie – auch durch Kohlenstoffspeicherung – klimaneutral zu werden.[177] Aktuell erreichte Einsparungen erfolgen auf zwei unterschiedliche Wege. Es gibt einen brancheninternen Wettbewerb zwischen Betontechnolog:innen, die durch neue Betonrezepturen und feiner differenzierte Zuschläge den Bindemittelanteil reduzieren, und Zementproduzent:innen, die im Zement selbst den $CO_2$-Gehalt senken.

Die Firma Wopfinger Transportbeton ist österreichische Vorreiterin für den ersten Weg. Sie bietet einen „Ökobeton“ an, der mittels günstiger Betonrezeptur bis zu 13% weniger Treibhausgasemissionen in der Herstellung verursacht als derzeit übliche Betone.[178]

Eine wesentliche Verbesserung vonseiten der Zementhersteller:innen wurde durch die Entwicklung des CEM II/C-Zements erreicht. Indem der Klinkeranteil im Zement teilweise durch andere, weniger energieintensiv hergestellte Bestandteile wie Hüttensand und Kalkstein substituiert wird, kann bei deutlicher Reduktion der Herstellungsenergie dieselbe technische Leistungsfähigkeit erreicht werden. Im Hochbau kann der CEM II/C-Zement in allen üblichen Einsatzgebieten angewandt werden. Er erreicht eine $CO_2$-Einsparung von bis zu 25%.[179] Auf den ganzen Beton bezogen entspricht das einer Reduktion der Emissionen in der Herstellung von 20%.[180]

Der $CO_2$-reduzierte Beton kann – unabhängig vom Verfahren zur $CO_2$-Reduktion – auch mit dem Einsatz von Recycling-Zuschlägen kombiniert werden.

174 Siehe: Forum Nachhaltiges Bauen, „Ökobilanz Stahl“.

175 Siehe: BauNetz, „Betonherstellung und Klimaschutz“.

176 Für eine ausführlichere Beschreibung der Forschungsbemühungen zur Energiereduktion in der Betonherstellung siehe: Trebut und Pfefferer, *Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen*, 29–31.

177 Siehe: Spaun, „Kolloquium 2023 ‚Forschung & Entwicklung für Zement und Beton‘“.

178 Siehe: Wopfinger Transportbeton, „Ökobeton-K“.

179 Siehe; Dyckerhoff, „Dyckerhoff erhält als erster deutscher Hersteller die Zulassung für CEM II/C-Zement“.

180 Annahme: 80% des $CO_2$-Ausstoßes bei der Betonherstellung sind auf Zement zurückzuführen.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Im Gegensatz zu den Zuschlägen kann der Zement allerdings nicht aufbereitet und wiederverwertet werden – sein Abbinden ist nach Stand der Forschung irreversibel. Und trotz der Forschung zur Klinkerreduktion kann man den Zement grundsätzlich im Beton nicht substituieren.[181] Es ist also nicht möglich, Beton als Ganzes auf hohem Niveau im Stoffkreislauf zu führen. Der effizientesten Aufbereitung von Abbruchbeton zu neuem Zuschlag steht immer der Einsatz von Zement als Primärrohstoff gegenüber. Gerade dieser Baustoff verursacht den Großteil des Global Warming Potentials von Beton und schmälert somit die Ressourceneffizienz weiter.

**Zusammenfassung**
Stahlbeton ist aufgrund seiner Leistungsfähigkeit für viele Bauaufgaben heute unersetzlich. Aus diesem Grund sollte die Forschung und Optimierung des Baustoffs weiter vorangetrieben werden, um die negativen Klimaauswirkungen zu minimieren. Trotz Verbesserungen ist Stahlbeton immer noch ein sehr energieintensiver Baustoff mit begrenzter Zirkularität und sollte mit Bedacht eingesetzt werden.

Die Recherche zeigt, dass es bereits Betone mit deutlich optimierter Ressourceneffizienz am Markt gibt. Wie in Abbildung 92 zu erkennen ist, kann das Kreislaufpotenzial dadurch im Vergleich zu heute üblichen Betonen und Einbausituationen deutlich verbessert werden. Im Pre-Use kann der Anteil an Rezyklat klar gesteuert werden – für das Fallbeispiel können 38% Rezyklat eingesetzt werden. Für das Post-Use Verwertungspotenzial ist die Einbausituation und damit die Sortenreinheit, besonders die Minimierung von Gips- und Klebeanhaftungen des Betons, im EoL entscheidend für eine hochwertige Kreislaufführung. Der Verbund des Betons mit Stahl schmälert die Zirkularität nicht. Die Bewehrung selbst ist komplett kreislauffähig und kann sortenrein vom Beton getrennt werden. Durch den Einsatz von CEM II/C-Zement lässt sich aktuell das meiste GWP in der Herstellung einsparen.

## Ziegelmauerwerk

**Verwertungswege**
Wenn in einschlägiger Literatur von wiederverwendetem Ziegelmauerwerk die Rede ist, dann handelt es sich dabei stets um alte Vollziegel und Fassadenklinker. Aufgrund ihrer Kompaktheit und Robustheit sind sie verhältnismäßig leicht lösbar und sehr langlebig; dürfen bei einem Wiedereinbau jedoch nur nichttragend, zum Beispiel als Verblender, eingesetzt werden.[182] Die heutzutage üblicherweise als tragendes Mauerwerk verwendeten Hochlochziegel haben aufgrund ihrer Kammerstruktur und Porosität äußerst günstige Wärmedämmeigenschaften, sind deshalb aber so zerbrechlich, dass sie im Rückbau nicht beschädigungsfrei vom Mörtel gelöst werden können. Als hochwertiger Verwertungsweg bleibt daher nur die Weiterverarbeitung zu Recycling-Ziegelsplitt. Sortenreines Ziegelrezyklat kann in mehreren Bereichen weiterverwendet oder -verwertet werden: als Recycling-Betonzuschlag, in der Zementindustrie, als Schüttmaterial, Pflanzensubstrat oder Terrazzozuschlag. Ist aufgrund von Verunreinigungen keine Weiterverwertung möglich, wird Ziegelabbruch als mineralischer Bauschutt deponiert.[183]

> *„Ziegel-Hochbau-Restmassen sind in gewissen Regionen eine „Mangelware“ (Verwendung Zementindustrie, Bodensubstrate, Dachsubstrate, Zuschlagstoff, Hinterfüllung, Kabelsand, ...), sodass keine Mengen für Einsatz in der Produktion übrig sind.“*[184]

Bisher gibt es keine Beispiele, bei welchen in relevantem Umfang tragfähige Ziegel aus Rezyklat hergestellt wurden. Dafür gibt es mehrere Gründe: Die Tonanteile im Ziegel gehen während des Brennvorgangs eine irreversible Verbindung ein – dadurch sind Ziegel witterungsbeständiger als ungebrannte Lehmsteine, aber das Material kann nicht replastiziert werden. Die Firma Wienerberger ist jedoch dazu in der Lage, alle Ziegelabfälle, die in der Produktion anfallen, als Ziegelmehl wieder der Rohstoffmischung beizufügen. Dass dies nicht in größerem Umfang – zum Beispiel mit Baustellenbruch – geschieht, liegt laut Norbert Prommer vom Verband Österreichischer Ziegelwerke daran, dass

181 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 70.

182 Siehe: Trebut und Pfefferer, *Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen*, 32. Zu Beispielen für die Wiederverwendung von Ziegeln siehe: GXN, *Circle House. Denmarks first circluar housing project*, 34; Küpfer und Fivet, *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion*, 84.

183 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 69; Achatz u. a., *KreislaufBAUwirtschaft*, 25–26.

184 Schriftliches Interview mit Prommer, Norbert vom Verband Österreichischer Ziegelwerke, am 13.03.2023 und 19.06.2023.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.





Abb. 96: Links: 2226, Lustenau, Baumschlager Eberle (2013). Foto: Baumschlager Eberle Architekten
Abb. 97: Rechts: Wohnungsbau 2226 Graf, Dornbirn, Baumschlager Eberle (2020). Foto: Baumschlager Eberle Architekten

für Ziegel-Abbruchmassen genügend Nachfrage als Downcycling-Produkt bestehe.[185]

Hochlochziegel haben ein deutlich geringeres Treibhauspotenzial in der Herstellung als Beton, der Brennvorgang der Ziegel bei etwa 1000 °C ist dennoch sehr energieintensiv. Um hier Ressourcen zu schonen und die bisher fossilen Energieträger abzulösen, baut die Wienerberger Österreich GmbH bis 2024 das erste elektrisch und mit regenerativer Energie betriebene Hochloch-Ziegelwerk weltweit. Laut Herr Pommer kann damit das GWP in der Herstellung um 90% reduziert werden.[186]

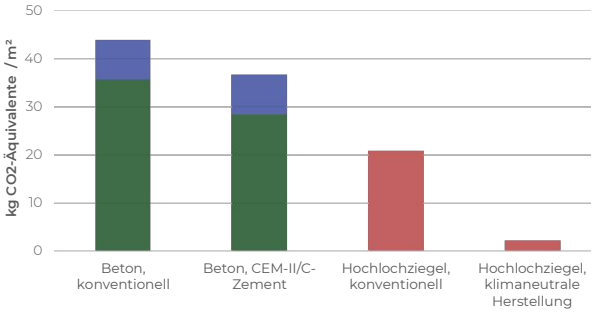



Abb. 98:
Vergleich des Treibhauspotenzials in der Herstellung (A1-3) einer 20 cm dicken mineralischen Wand. Bei den Beton-Konstruktionen wird die Bewehrung hinzugerechnet (blau). Eigene Berechnung und Darstellung.

Ziegelmauerwerk ist also per se nicht kreislauffähig. Positiv zu bewerten ist, dass Ziegel-Restmassen meist nicht deponiert, sondern einer zweiten Verwendung zugeführt werden. Dennoch ist die Ziegelindustrie überwiegend linear: Die Materialien stammen aus eigens angelegten Gruben – die technisch mögliche Nutzung von Baustellenaushüben wird aufgrund des Mehraufwands kaum praktiziert – und enden meist nach dem zweiten Nutzungsende in der Deponierung. Doch da der Hauptrohstoff Lehm weltweit in großen Massen verfügbar ist und zumindest aktuell genügend Nachfrage für eine Nachnutzung des Materials besteht, ist diese Art der linearen Nutzung weniger problematisch als die von Beton. Selbst ohne die neue elektrisch betriebene Herstellung fällt das Global Warming Potential geringer aus als das von Beton. Eine monolithische Bauweise ist vorzuziehen, um das Recyclingpotenzial zu erhöhen, denn für eine hochwertige Verwertung als Beton-Zuschlag gelten die selben hohen Anforderungen an Sortenreinheit und Störstofffreiheit wie für Betonbruch.

185 Schriftliches Interview mit Prommer, Norbert vom Verband Österreichischer Ziegelwerke, am 13.03.2023 und 19.06.2023.

186 Schriftliches Interview mit Prommer, Norbert vom Verband Österreichischer Ziegelwerke, am 13.03.2023.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



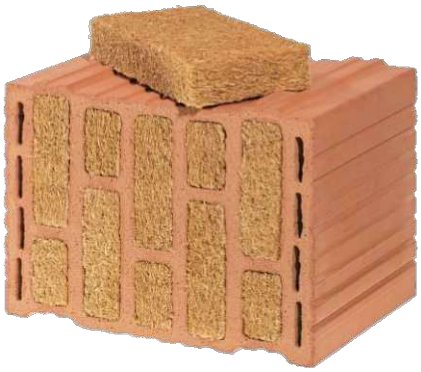


Abb. 99: Links: Abbruch von Mauerziegel mit Dämmstofffüllung aus Mineralwolle-Stecklingen. Die Füllungen sind durch Formschluss in den Kammern und Lochungen fixiert. Dadurch lassen sich Ziegel und Dämmstoff im Recycling leicht trennen. Foto: Bundesverband Ziegel.

Abb. 100: Rechts: Mauerziegel mit Dämmstofffüllung aus Holzfaser-Stecklingen. Das Prinzip des losen Formschlusses der Stecklinge im Ziegel gilt für alle Dämmmaterialien gleichermaßen. Foto: Schaller.

**Einsatzmöglichkeiten**

Hochlochziegel haben aufgrund der geringen Rohdichte und der Kammerstruktur einerseits gute Wärmedämmeigenschaften, schneiden dadurch aber andererseits im Schallschutz eher schlecht ab. Trennwände zwischen zwei Nutzungseinheiten werden deshalb im Mauerwerksbau üblicherweise entweder zweischalig ausgeführt, was einen erheblichen Flächenverlust bedeutet oder mit Beton verfüllt, wodurch eine sortenreine Rückbaubarkeit praktisch unmöglich wird.[187] Auch für Zugbeanspruchungen, besonders als horizontale Bauteile, sind Ziegelprodukte ungeeignet. Es existieren zwar Systeme für flache Ziegeldecken, jedoch stets im Verbund mit zugbelastbaren Materialien. Meistens kommen Fertigteilträger aus Stahlbeton zum Einsatz.[188] Im Sinne der Sortenreinheit ist auch diese Lösung kritisch zu betrachten.

Gemäß ihrer Materialeigenschaften sind Hochlochziegel am besten für vertikale Strukturen und als thermische Hülle geeignet. Hier sind einstoffliche Bauweisen möglich, die ein hohes Potenzial zur sortenreinen Rückgewinnung aufweisen.

**Monolithische Ziegelwand**

Um die Außenwände des Fallbeispiels in monolithischem Ziegelmauerwerk auszuführen und dabei vergleichbare Wärmedämmwerte zu erreichen, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Entweder wird das Mauerwerk einschalig ausgeführt und die Ziegelhohlräume mit zusätzlicher Wärmedämmung gefüllt oder es erfolgt eine zweischalige Ausführung, wobei die innere Mauerwerks-Schicht mit höheren Druckfestigkeitswerten die Lastabtragung übernimmt und die äußere Schicht durch ihre porösere Struktur und mehr Lufteinschlüsse die Wärmedämmleistung erhöht.

Die zweitgenannte Möglichkeit, die Wände mit einem zweischaligen Ziegelmauerwerk zu bauen, ist für die Kreislauffähigkeit und Sortenreinheit des Ziegels am günstigsten. Das bekannte Haus 2226 in Lustenau, Vorarlberg von Baumschlager Eberle ist ein Musterbeispiel für diese Bauweise. Dieses Gebäude kann komplett auf Heizung und Kühlung verzichten, da es aufgrund der hohen Masse und massiven Bauweise von sich aus ein gutes, gleichmäßiges Raumklima halten kann. Zu beachten sind jedoch zwei Dinge: Es handelt sich um einen Bürobau. Das heißt, dass in der Nutzungsphase viele Leute gleichzeitig im Haus sind, die mit ihrer Körperwärme und Computern die Luft erwärmen und dass keine hohe Wohlfühltemperatur wie in privaten Badezimmern erreicht werden muss. Weiterhin sind die Wände des Gebäudes 75 cm dick, was einen enormen Verlust an Nutzfläche bedeutet. Konkret am Fallbeispiel würde man im Vergleich zu den realisierten Gebäuden 93 m² Nutzfläche verlieren. Dies kommt dem Verlust einer gesamten Wohnung gleich – ein Verlust, der von Bauträger:innen kaum mitgetragen werden würde. Baumschlager Eberle haben mit dem Prinzip des Haus 2226 auch Wohnbauten errichtet. Aufgrund des höheren Heizaufwands, der geringeren Nutzungsdichte und der Rentabilität wurden hier jedoch 50 cm dicke mit Wärmedämmung gefüllte Ziegel verwendet.[189] Die-

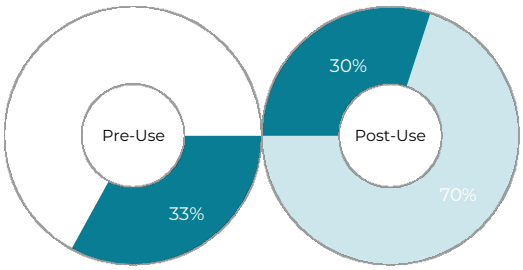
187 Siehe: Achtziger u. a., *Mauerwerk Atlas*, 190–94.

188 Siehe: Baukobox, „Ziegeldecken".

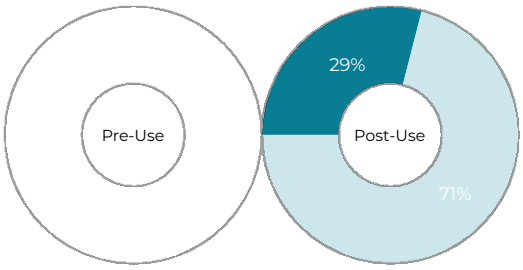
189 Siehe: Aicher, „2226 revisited", 7.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




*Stahlbetonwand mit Recycling-Zuschlägen und ohne Verschmutzungen*




*Mauerwerkswand aus Hochlochziegeln und ohne Verschmutzungen*

Abb. 101: Im Gegensatz zu Beton können Ziegel aktuell nicht mit zirkulären Materialien hergestellt werden. Links: 20 cm dicke, saubere Stahlbetonwand mit 38% Recycling-Zuschlägen. Rechts: 20 cm dicke, saubere Hochlochziegel-Wand. Eigene Darstellung.

se Variante ist für das Fallbeispiel also wesentlich realistischer.

Eine Wand aus mit Dämmstoff gefüllten Hochlochziegeln kann bei vergleichbarer Dicke nahezu denselben Wärmedämmwert erreichen wie die Außenwand aus Hochlochziegeln und einem Wärmedämmverbundsystem in Haus A. Dabei verweilt die durch den Ziegel vor Witterung geschützte Wärmedämmung den gesamten Gebäudelebenszyklus im Gebäude, während das WDVS getauscht werden muss. Auch der Putz hält länger, da er direkt auf eine mineralische, tragende Schicht aufgetragen werden kann.[190] Durch diese monolithische Konstruktion wird die Gewinnung von reinem Ziegelsplitt im Abbruch wesentlich erleichtert, sodass ein deutlich größerer Anteil des Abbruchs hochwertig rezykliert werden kann als bei Haus A, bei dem die Klebereste und Befestigungsdübel der Dämmung eine Trennung erschweren.

**Zusammenfassung**
Die Ziegelproduktion ist aktuell sehr linear. Es werden keine relevanten Mengen an Sekundärrohstoffen für die Herstellung der Ziegel verwendet. Im Post-Use kann das Material somit auch nicht in die Ziegelproduktion zurückgeführt werden. Eine andere hochwertige Verwertung ist aber der Einsatz als Betonzuschlag. Da hierfür ist die selbe Sortenreinheit wie für Betonbruch nötig ist, liegt ein großes Potenzial in der monolithischen Ziegelbauweise. Positiv ist, dass durch die Elektrifizierung der Ziegelproduktion und den Bezug des Stroms aus erneuerbaren Quellen das Treibhauspotenzial enorm gesenkt werden kann.

190 Schriftliches Interview mit Prommer, Norbert vom Verband Österreichischer Ziegelwerke, am 13.03.2023.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Fazit und Entscheidung

Aktuell ist weder für Stahlbeton noch für Ziegel eine geschlossene Kreislaufführung möglich. Mit entsprechender Materialwahl und der Möglichkeit einer sortenreinen Rückgewinnung kann das Verwertungs-Potenzial beider Baustoffe allerdings deutlich erhöht werden. Wie in Abbildung 101 zu sehen ist, erreicht eine 20 cm dicke Wand aus Stahlbeton mit Recycling-Zuschlägen ein geringfügig höheres Kreislaufpotenzial als eine solche Wand aus Hochlochziegeln – wohlgemerkt ohne weitere Funktionen wie eine Wärmedämmung. In Bezug auf die Reduktion des Treibhauspotenzials gibt es für beide Materialien beträchtliche Fortschritte. Beim Beton ist die Entwicklung des CEM II/C-Zements die vielversprechendste. Die Ziegelproduktion kann durch die Elektrifizierung der Herstellung noch größere Verbesserungen erzielen. Die 20 cm dicke Wand aus derart produziertem Ziegelmauerwerk hat ein über 90% geringeres Treibhauspotenzial in der Herstellung als die Stahlbetonwand mit CEM II/C-Zement.

Da das Kriterium sortenreine Rückbaubarkeit für eine Wiederverwertung beider Baustoffe essenziell ist, ist unter den weiteren Zielsetzungen konventionelle, nasse Bauweise und Erfüllung der Funktionsäquivalenz die geeignete Kombination dieser zwei Bauweisen recht eindeutig. Schallschutzbeanspruchten Innenbauteile, Decken und der erdberührte Keller könnten aus Ziegel praktisch nur im Verbund mit anderen Materialien realisiert werden, wodurch eine Wiederverwertung ausgeschlossen wird. Aus Stahlbeton sind diese Bauteile einstofflich realisierbar. Eine Außenwand mit den gesetzten Anforderungen an den Wärmeschutz kann hingegen in Ziegelbauweise einstofflich erfolgen, aber mit Stahlbeton nur in Kombination mit einer (in der Regel geklebten) Wärmedämmung.[191] Basierend auf diesen Erkenntnissen werden also alle tragenden Bauteile in Variante 1 aus Beton mit Recycling-Zuschlägen und CEM II/C-Zement geplant, abgesehen von der Außenwand, wo wärmedämmgefüllte Hochlochziegel verwendet werden. Dank der hervorragenden Brandschutzeigenschaften beider Baustoffe beeinflussen die erhöhten Brandschutzansprüche des Fluchttreppenhauses die Bauweise nicht. Auf eine Verputzung der mineralischen Oberflächen mit Gips, wie es in Haus A ausgeführt wurde, wird in dieser Variante verzichtet, da dieser einen Störstoff für die Verwertung darstellt. Im Sinne der Suffizienz wird die Kellerabdichtung aus WU-Beton, also als Weiße Wanne, geplant. Durch das Vermeiden eines vielschichtigen Aufbaus und einer Verklebung der Abdichtung ist im Rückbau eine sortenreine Gewinnung der Stoffgruppen wesentlich wahrscheinlicher. Die Bauweisen klassische Ortbetonbauweise und Vermauerung mit Dünnbettmörtel werden dem konventionellen Haus A nachempfunden, um die aktuell übliche Bauausführung abzubilden.

191 Monolithische Außenwände aus Beton erfolgen in der Regel mit Leichtbeton. Dieser erreicht jedoch nur Wärmedämmwerte von etwa 0,50 W/m2K, also deutlich schlechter als die Anforderungen. Deshalb wurde diese Thematik in der Arbeit nicht weiter behandelt. Für weitere Informationen siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 105.



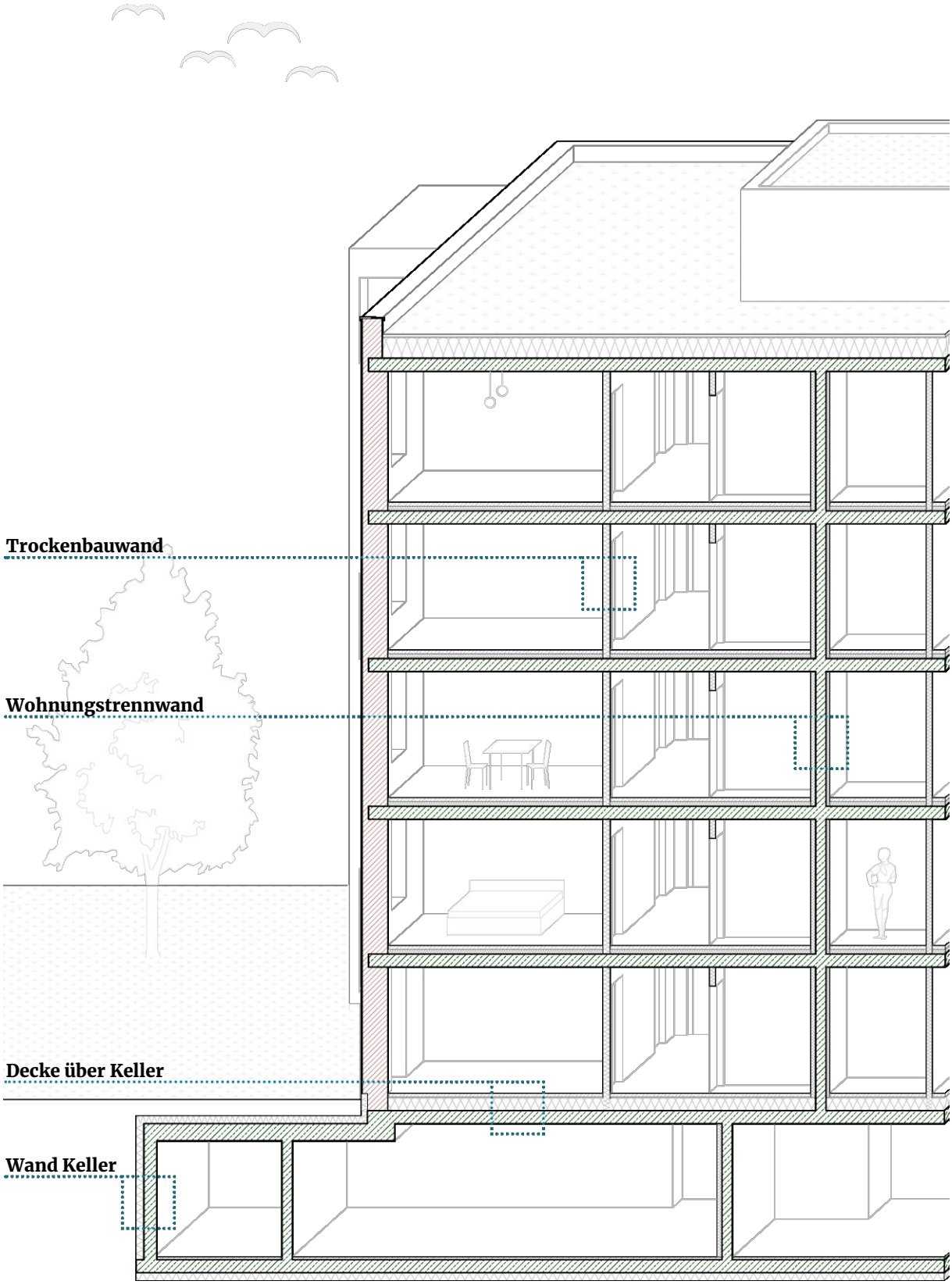
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

| | Ziegelmauerwerk, sortenrein rückbaubar | Stahlbeton, sortenrein rückbaubar |
|---|---|---|
| **Außenwand + Wärmeschutz** | **ja** als monolithisches Ziegelmauerwerk | **nein** Verklebung der Wärmedämmung nötig |
| **Innenwand + Schallschutz + Brandschutz** | **nein** Schallschutz durch Füllung der Ziegel mit Beton | **ja** kein Gips-Putz |
| **horizontale Bauteile** | **nein** Verbund mit zugbelastbaren Bauteilen nötig | **ja** kein Gips-Putz |
| **erdberührte Bauteile** | **nein** nicht wasserundurchlässig | **ja** mittels WU-Beton |

Abb. 102: Eignung der untersuchten Bauweisen für entscheidende Gebäudefunktionen. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.






TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

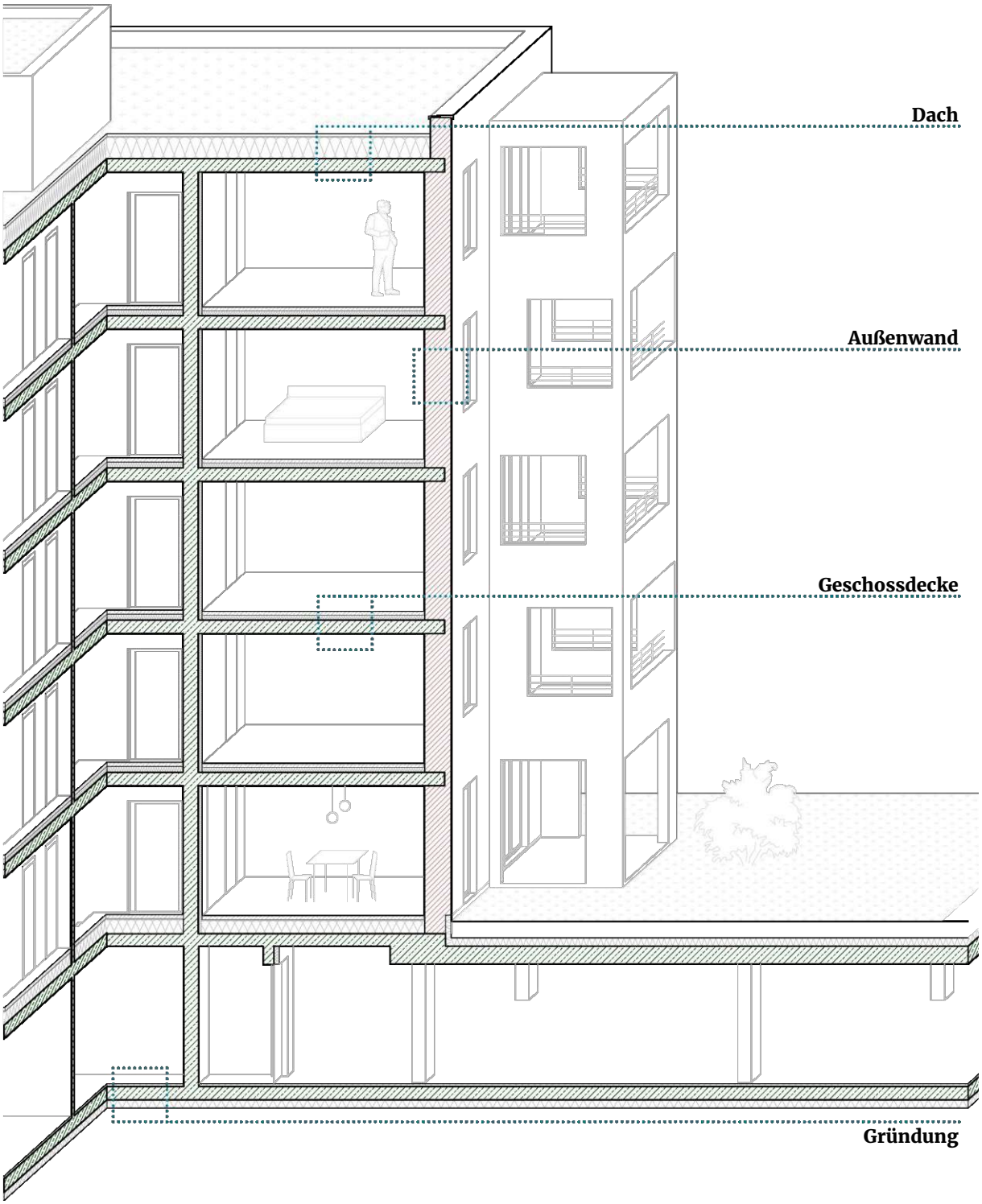



Abb. 103: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Variante 1. Die hervorgehobenen Aufbauten werden im folgenden Kapitel genauer dargestellt. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

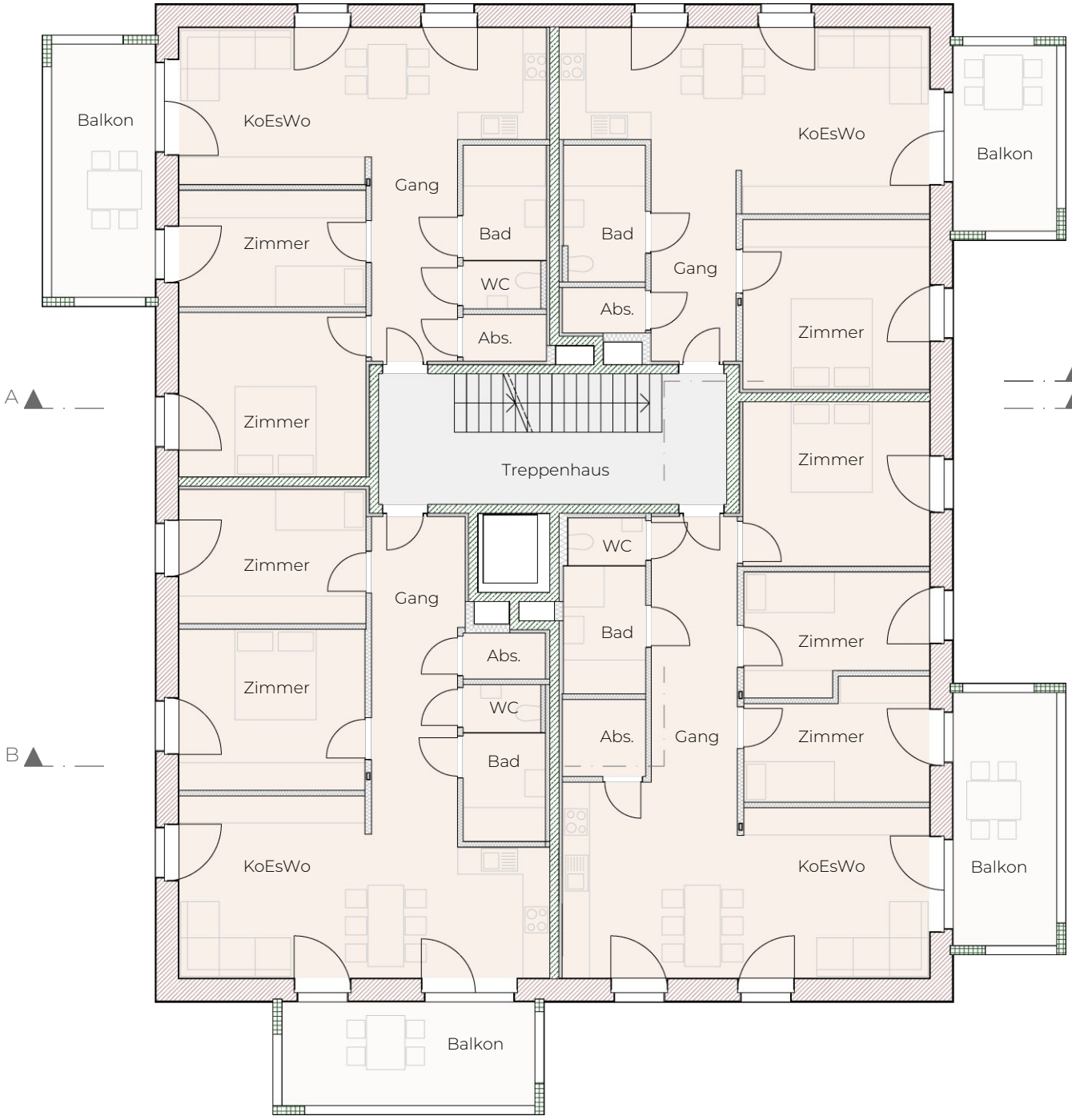



Abb. 104: Regelgrundriss von Variante 1. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

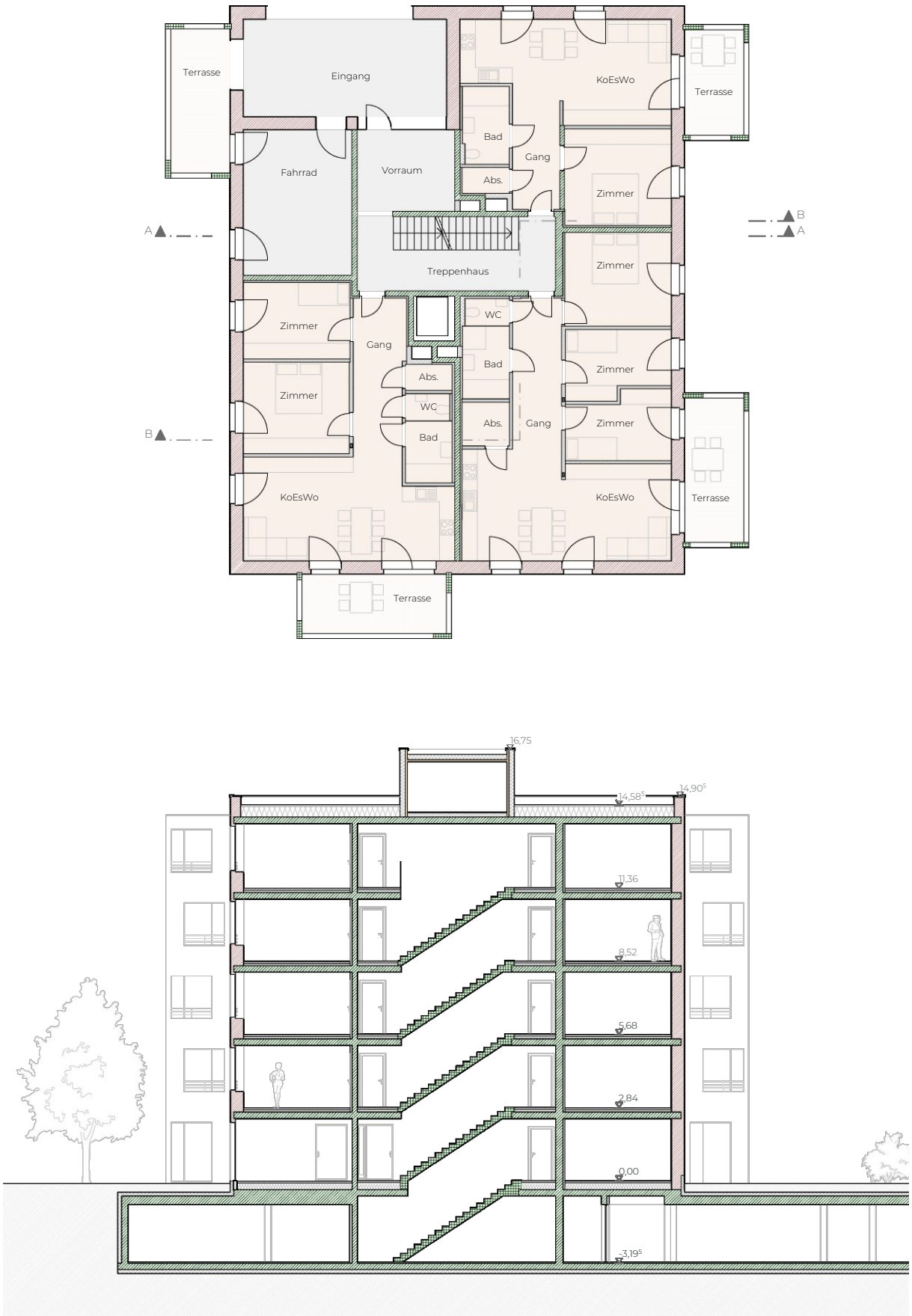



Abb. 105: oben: Erdgeschossgrundriss, unten: Schnitt A - A von Variante 1, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Aufbauten

Nachdem die Konstruktion festgelegt wurde, werden nachfolgend die Ausbau-Materialien bestimmt. Auch hier gelten die eingangs festgelegten Kriterien zur Baustoffwahl. Systematisch wird der Aufbau jedes einzelnen Bauteils bestimmt, indem nacheinander aller Bauteilschichten auf eine höchstmögliche Zirkularität geprüft werden.

## Gründung

Wie im Kapitel Konstruktion bereits festgelegt, wird der Keller in Variante 1 als Weiße Wanne ausgeführt, um die Verklebung mit einer Abdichtung zu verhindern. Auch für den WU-Beton werden Recycling-Zuschläge und CEM-II/C Zement verwendet. Im Sinne der Suffizienz wird auf einen innenseitigen Putz verzichtet.

**Belag**
Um die Sortenreinheit des Betons nicht zu beeinträchtigen, wird der Bodenaufbau aus Zementestrich, also einem Material mit dem selben Verwertungsweg ausgeführt. Indem er als Verbundestrich ausgeführt, also ohne Trennlage direkt auf die Bodenplatte gegossen, und auf Sicht belassen wird, entstehen keine Materialmischungen. Als ebenfalls zementgebundenes, sortenreines mineralisches Material kann er gemeinsam mit der Beton-Bodenplatte rückgebaut und verwertet werden.

**Perimeterdämmung**
Für die Perimeterdämmung kommen nur zwei Baustoffe in Frage: Schaumglas und XPS. Schaumglas besteht zu etwa 70% aus Altglas. Der Dämmstoff ist sehr robust und druckbeständig, kann also im Perimeterbereich eingesetzt werden. Die Dämmleistung im Feuchtbereich erhält er jedoch nur, wenn er bituminös oder mit Kaltkleber verklebt wird, was eine Verwertung unmöglich macht.[192] Idealerweise erfolgt also eine außenliegende Abdichtung gegen Feuchtigkeit.[193] Obwohl dies im Perimeterbereich in der Regel nicht möglich ist, ist dieser Dämmstoff aufgrund des Recyclinganteils und der deutlich geringeren Treibhausgasemissionen in der Kreislaufwirtschaft dem XPS vorzuziehen. Die bisher verhältnismäßig schlechten Dämmeigenschaften haben sich durch neue Produktentwicklungen wesentlich verbessert, sodass mittlerweile auch Lambdawerte von 0,036 W/mK erreicht werden.[194]

Der erdölbasierte Dämmstoff XPS (extrudiertes Polystyrol) ist aufgrund des geringen Preises und der sehr guten Dämmleistung weit verbreitet. Im EoL werden Dämmstoffe aus fossilen Quellen aktuell ausschließlich energetisch verwertet. Dabei kam es zuletzt aufgrund des als Schadstoff deklarierten und 2018 verbotenen Flammschutzmittel HBCDD zu erheblichen Schwierigkeiten. Mittlerweile ist es technisch möglich, kunststoffbasierte Dämmstoffe zu recyclen,[195] was jedoch aufgrund der mangelnden Infrastruktur und der geringen Kosten des Primärmaterials praktisch nicht praktiziert wird. Das Kreislaufpotenzial dieser Dämmstoffe ist also aktuell mit null zu bewerten.[196]

Die geringfügig schlechtere Wärmeleitfähigkeit von Schaumglas ist ob seines deutlich höheren Kreislaufpotenzials in Kauf zu nehmen. Für einen identen Wärmeschutz ist ein minimal dickerer Dämmaufbau von 5 cm nötig.[197] Die Kanten der Schaumglasplatten müssen bituminös verklebt werden, um ein Eindringen von Wasser in die Dämmung zu verhindern. Dadurch wird das Wiederverwertungspotenzial eingeschränkt, aber eine Weiterverwertung bleibt weiterhin möglich.

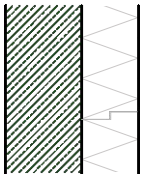
192 Zum Verwertungspotenzial von Schaumglasplatten, siehe: e-genius, „Schaumglas".
193 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 90.
194 Ein Beispielprodukt ist: Foamglas, „T3+".
195 Zum Forschungsprojekt EPS-Recycling siehe: Schlummer u. a., „Recycling of Flame Retarded Waste Polystyrene Foams (EPS and XPS) to PS Granules Free of Hexabromocyclododecane (HBCDD)".
196 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 86.
197 Annahme: XPS mit $\lambda$ von 0,27 W/m²K und Schaumglas mit $\lambda$ von 0,41 W/m²K. Dies entspricht den aktuell leistungsstärksten Dämmstoffen für diesen Einsatzbereich.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 1: Außenwand Keller

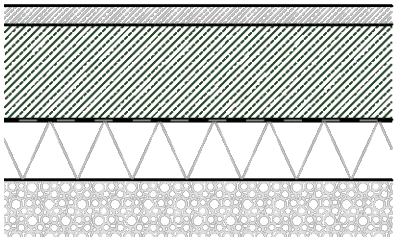
*Bauteilfläche: 662,7 m² (10,5%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 250 | Stahlbeton, WU, (38% Recycling-Zuschläge) mit CEM II/C-Zement, Ortbeton |
| 150 | Schaumglasplatten, bituminös verklebt |
| **400** | **U-Wert: 0,25** W/m²K |

## Variante 1: Gründung

*Bauteilfläche: 782,8 m² (14,5%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 50 | Zementestrich, geschliffen |
| 250 | Stahlbeton, WU, (38% Recycling-Zuschläge) mit CEM II/C-Zement |
| | PE-Folie |
| 150 | Schaumglasplatten, bituminös verklebt |
| | Kapillarbrechende Schicht |
| **450** | **U-Wert: 0,23** W/m²K |

| | Schaumglas | XPS |
|---|---|---|
| **Eignung** als Perimeterdämmung | **ja** | **ja** |
| Wärmeleitfähigkeit λ | 0,036 - 0,054 | 0,027 - 0,040 |
| **Eignung** Wärmeschutz | **ja** selber U-Wert wie XPS bei 5 cm dickerem Aufbau | **ja** |
| Pre-Use | 70% Recycling | 100% nicht erneuerbarer Primärrohstoff (Erdöl) |
| Post-Use (bituminöse Verklebung) | 100% Deponierung | 100% energetische Verwertung |
| **UMI** | **35%** | 0% |

Abb. 106:
Vergleich geeigneter Perimeterdämmstoffe. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Außenwand

Im vorigen Kapitel wurde festgelegt, für die Außenwand von Variante 1 dämmstoffgefüllte Hochlochziegel zu verwenden. Ziegel mit integrierter Dämmung werden mit unterschiedlichen Dämmstoffen angeboten. Unabhängig vom Material werden die Dämmstoffe als passgenaue Stecklinge in die Kammern der Hochlochziegel eingebracht. Da sie nur geklemmt und nicht verklebt werden, lassen sie sich im EoL mit moderatem Aufwand recht sortenrein vom Ziegel trennen. Die dämmstoffgefüllten Ziegel werden mittels Prall- oder Backenbrecher zerkleinert und anschließend durch eine Windsichtung in die Bestandteile sortiert.[198] Der Ziegelbruch wird dabei sehr rein, während in den Dämmstoffen minimale Ziegelpartikel zurückbleiben.

Als Verfüllmaterial werden Mineralfasern, Perlite, Holzfasern und fossile Dämmstoffe angeboten. Da Füllungen aus fossilen Dämmstoffen sowohl kreislaufwirtschaftlich recht uninteressant sind[199] als auch wenig Marktanteil haben, werden sie nachführend nicht weiter betrachtet. Die anderen Dämmstoffe unterscheiden sich in ihrer Dämmleistung nur marginal. Holzfasergefüllte Ziegel werden bisher nur in Dicken bis 42,5 cm angeboten, weshalb sie mit einem U-Wert von nur 0,18 W/m²K nicht die Zielsetzung der Funktionsäquivalenz erreichen. Während die Holzfaserfüllung in der Regel energetisch verwertet wird, nimmt die Firma Rockwool ihre Mineralfaser-Stecklinge zurück und verwertet diese weiter. Laut Herrn Emhee von der Wienerberger-Tochterfirma Schlagmann Poroton, welche Hochlochziegel mit allen drei Dämmstofffüllungen anbietet, werden deren gebrauchte Perlitfüllungen auch in Teilen für neue Stecklinge wiederverwertet. Ein weiterer Vorteil der Perlitfüllung ist, dass das aufgeblähte Vulkanmineral als mineralischer Feststoff keinen Störstoff im Ziegelbruch darstellt, falls keine Windsichtung vorgenommen werden kann. Die beiden Materialien können auch gemeinsam weiterverwertet werden. Die dadurch garantierte sortenfreie Rückgewinnung des Ziegels ist aufgrund des deutlich höheren Masseanteils entscheidender als das Kreislaufpotential der Dämmung. Daher wird die Perlitfüllung verwendet.

Der Anmerkung von Dr. Riegler-Floors im Atlas Recycling nach muss für eine einstoffliche Mauerwerksbauweise auch der Putz ein mineralisches Material sein. Wie bereits erläutert, ist die Verwendung von Gips zu vermeiden, da dieses weichere Material sich nur aufwändig vom Ziegel trennen lässt und für die Weiterverwendung als Beton-Zuschlag ein Störstoff ist.[200] Zementöse und kalkhaltige Putze sind deutlich härter, wodurch eine Ablösung vom Ziegelbruch leichter ist. Vor allem aber stellen sie keinen Störstoff für die Wiederverwertung dar. Deshalb werden für die Außenwand analog zu den Empfehlungen der Ziegelhersteller ein Kalkputz und ein leicht wärmedämmender Leichtmörtelputz vorgesehen.

198 Für eine weiterführende Beschreibung des Verfahrens, siehe: Müller u. a., „Entwicklungen zum Recycling von Ziegeln und Ziegelmauerwerk (Teil 1)“. Das Verfahren funktioniert analog für alle weiteren Dämmstoffe.

199 Auf das Kreislaufpotenzial von erdölbasierten Dämmstoffen wird bei der Diskussion des Dach-Aufbaus genauer eingegangen.

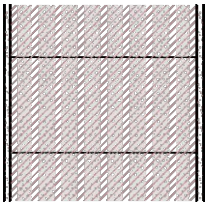
200 Dies wurde im Kapitel Konstruktion bereits ausgeführt. Siehe außerdem: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 69, 104.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 1: Außenwand

*Bauteilfläche: 1.175,6 m² (11,7%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 15 | Kalkputz |
| 490 | Hochlochziegel (55 Vol.%), vermörtelt, mit Perlitfüllung (45 Vol.%) |
| 20 | Leichtmörtelputz |
| **525** | |

**U-Wert: 0,16** W/m²K

| | Hochlochziegel mit Mineralfaserfüllung | Hochlochziegel mit Perlitfüllung | Hochlochziegel mit Holzfaserfüllung |
|---|---|---|---|
| Beispielprodukt | Porotherm 50 W.i. Objekt Plan | Poroton S8 49,0 Perlit | Poroton H8 Objektziegel |
| **Eignung**<br>Standsicherheit 5 Geschosse? | **ja** | **ja** | **ja** |
| Wärmedurchgangskoeffizient verputzt (Herstellerangabe)<br>innen: 1,5 cm Kalkputz (λ = 0,6 W/mK)<br>außen: 2,0 cm Leichtmörtelputz (λ = 0,4 W/mK) | 0,15 W/m²K | 0,16 W/m²K | 0,18 W/m²K |
| **Eignung**<br>Wärmeschutz: max. 0,16 W/m²K | **ja** | **ja** | **nein** |
| **Störstoff für Ziegelverwertung** | **ja** | **nein** | **ja** |
| Pre-Use | 60% Rezyklat | 100% Primärrohstoff: geblähtes Vulkanmineral | 100% erneuerbarer Primärrohstoff: Holz |
| Post-Use<br>Sortenreine Trennbarkeit mittels Windsichtung des Ziegelbruchs | 100% Wiederverwertung (Herstellerrücknahme) | 20% Wiederverwertung<br>Rest: Weiterverwertung mit Ziegelbruch | 100% energetische Verwertung (ereneuerbarer Rohstoff) |
| **UMI** | **80%** | **30%** | **75%** |

Abb. 107: Vergleich verschiedener dämmstoffgefüllter Hochlochziegel. Alle Produkte sind statisch geeignet für den mehrgeschossigen Objektbau. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Trockenbauwand

Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft ist es grundsätzlich zu begrüßen, die nichttragenden Innenwände und Vorsatzschalen als Trockenbaukonstruktionen zu errichten. Mit wenig Masse und Standardlösungen können leicht rückbaubare Wände errichtet werden, die den Ansprüchen an Robustheit und Schallschutz genügen.

**Trockenbauplatten**
Die standardmäßig eingesetzten Trockenbauplatten sind Gipskartonplatten, also mit Karton kaschierte Platten aus reinem Gips. Dieser Gips besteht im deutschsprachigen Raum bisher zu 40% aus Primärmaterialien. 60% sind sogenannte REA-Gipse und fallen als Nebenprodukte in Kohlekraftwerken an. Mit dem deutschen „Kohleausstieg" versiegt diese Quelle jedoch in naher Zukunft. Da reiner Gips sich fast ohne Qualitätsverlust unbegrenzt recyceln lässt, erhält diese Ressourcenquelle nun vermehrt Aufmerksamkeit. Ab dem 01.01.2026 gilt in Österreich ein Deponieverbot für Gips[201], was dem Recycling weiter Aufschwung geben soll. Laut Rigips Austria beträgt dort der Rezyklatanteil bei neuen Platten bereits 5%.[202] Der Firma ETEX gelingt in Großbritannien bereits ein Rezyklatanteil von über 18%.

Die immer öfters verwendeten und wesentlich robusteren Gipsfaserplatten sind genauso wie Calciumsulfatestrich und Putzgips aufgrund der Vermischung mit anderen Bestandteilen für das Recycling bisher gänzlich ungeeignet.[203] Gipskartonplatten sind ihnen also möglichst vorzuziehen.

**Unterkonstruktion**
Für die Unterkonstruktion einer Trockenbauwand gibt es unter den nicht-biotischen Materialien keine gängigen Alternative zu Stahlblechprofilen. Im Gegensatz zu Stahl-Bewehrungen werden Bleche aktuell nur zu kleinen Teilen aus rezykliertem Altmetall hergestellt.[204] Obwohl diese Profile aus universal einsetzbaren Elementen bestehen, gibt es dafür aktuell keinen ReUse Markt oder Hersteller:innenrücknahme-Konzepte. Theoretisch ist ein Wiedereinsatz durchaus möglich, da die Elemente lediglich verschraubt werden, aber aufgrund des großen Arbeitsaufwands und der sehr günstigen Primärmaterialien wird dies nicht praktiziert. Zudem gibt es für Metallschrott eine sehr gute Verwertungsinfrastruktur. Metall kann praktisch unbegrenzt oft ohne Qualitätsverlust wiederverwertet werden – es ist also von einem vollständigen Recycling auszugehen.

**Dämmstoff**
Für die Dämmung in einer Trockenbauwand kommt aus baupraktischen Gründen nur ein weicher Matten-Werkstoff in Frage, der sich um die Elektroinstallationsleitungen herumschmiegen kann. Unter den konventionellen Baustoffen sind künstlich hergestellte Mineralfasern (KMFs) dafür geeignet. Sie sind die am häufigsten eingesetzten Dämmstoffe im deutschsprachigen Raum, da sie sowohl im Wärme- als auch im Brand- und Schallschutz hervorragende Werte erzielen. Im Gegensatz zu alten Mineralfasern stehen heute hergestellte Produkte nicht im Verdacht, krebserregend zu sein. Im eingebauten Zustand sind sie baubiologisch unbedenklich. Bei der Verarbeitung können die Fasern jedoch Reizungen von Haut, Augen und Atemwegen verursachen, weshalb ein möglichst staubarmer Ein- und Ausbau und eine Entsorgung in staubdichten Verpackungen vorzusehen sind.[205] KMFs gliedern sich in Mineral- und Glaswolle, die durchschnittlich zu 60% bzw. 70% aus Altmaterialien bestehen können. Bei sortenreinem Ausbau wird genutzte Mineralwolle von der deutschen Firma Rockwool kostenpflichtig zurückgenommen und wiederverwertet. Für Glaswolle ist dies technisch auch möglich, es fehlt jedoch bisher die Infrastruktur. Werden die KMFs nicht sortenrein rückgewonnen, zum Beispiel aufgrund von Putz- und Kleberanhaftungen eines WDVS, bleibt als Entsorgungsweg nur die Deponierung.[206] Mit dem Deponieverbot ab Ende 2026 wird der Ausbau einer Recyclinginfrastruktur aber voraussichtlich vorangetrieben.[207] Da bei einer Trockenbauwand die Dämmung nur gesteckt wird, ist hier eine sortenreine Rückgewinnung einfach. Dank des Angebots der Herstellerrücknahme erreicht die Mineralwolle bezogen auf den gesamten Lebenszyklus ein größeres Kreislaufpotenzial als die Glaswolle, weshalb sie verwendet wird.

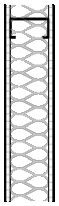
201 Siehe: Österreichischer Baustoff- Recycling Verband, „Baustoff-Recycling ist die erste Wahl!"
202 Siehe: Rigips Austria, „Nachhaltigkeit".
203 Siehe: Harder, „Gips – Ein knapper Rohstoff?"
204 Siehe: Forum Nachhaltiges Bauen, „Ökobilanz Stahl".
205 Zu arbeitsschutzrechtlichen Maßnahmen siehe: WKO (Wirtschaftskammer Österreich), „Umgang mit künstlichen Mineralfasern (KMF) im Bauwesen".
206 Siehe: Vogdt u. a., „Leitfaden Recyclingpotential von Mineralwolle", 19–21.
207 Siehe: Österreichischer Baustoff- Recycling Verband, „Baustoff-Recycling ist die erste Wahl!"



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 1: Trockenbauwand

*Bauteilfläche: 1.186,5 m² (1,5%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 12,5 | Gipskarton, verschraubt |
| 100 | Blech-Profile, verschraubt<br>dazwischen: Mineralwolle, gesteckt |
| 12,5 | Gipskarton, verschraubt |
| **125** | |

| | Gipskartonplatte | Gipsfaserplatte |
|---|---|---|
| Eigenschaften | normale Stabilität<br>nur spezielle Platten für Spritzwasserbereich | große Stabilität<br>für Spritzwasserbereich geeignet |
| **Eignung** als Trockenbauplatte | **ja** | **ja** |
| **Pre-Use** | 34% Primärrohstoff<br>64% REA-Gips + Rezyklate<br>2% Karton aus Altpapier<br>(erneuerbarer Primärrohstoff) | 33% Primärrohstoff<br>49% REA-Gips + Rezyklate<br>18% Zellulose aus Altpapier<br>(erneuerbarer Primärrohstoff) |
| **Post-Use**<br>nicht zerstörungsfreier, aber sortenreiner Rückbau | 69% Recycling, leichte sortenreine Trennbarkeit<br>Rest Deponierung | Verbundbaustoff:<br>Deponierung |
| UMI | 68% | 34% |

Abb. 108: Vergleich verschiedener konventioneller Trockenbauplatten. Daten nach Herstellerangaben.. Eigene Darstellung.

| | Glaswolle | Mineralwolle |
|---|---|---|
| **Eignung** als Trockenbaudämmung | **ja**<br>guter Schallschutz<br>gute Verarbeitbarkeit | **ja**<br>guter Schallschutz<br>gute Verarbeitbarkeit |
| **Pre-Use** | 70% Recycling | 60% Recycling |
| **Post-Use**<br>sortenreine Rückgewinnung | 48% Wiederverwertung<br>Rest: Deponierung | 96% Wiederverwertung<br>(Herstellerrücknahme) |
| UMI | 59% | 78% |

Abb. 109: Vergleich mineralischer Trockenbaudämmungen. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Wohnungstrennwand

Die Wohnungstrennwände dienen neben der Raumbildung, Lastabtragung und Aussteifung auch der Schall-Abtrennung unterschiedlicher Nutzungseinheiten. Für einen komfortablen Schallschutz und zur Montage von Elektroinstallationen werden die Betonwände um eine einseitige Vorsatzschale ergänzt. Diese Vorsatzschale in Trockenbauweise kann mit den selben Baustoffen geplant werden, wie die freistehenden Trockenbauwände. Die für Treppenhäuser geltenden erhöhten Anforderungen an das Brandverhalten von Oberflächen können im mineralischen Massivbau ohne weitere Maßnahmen bewerkstelligt werden.

Beton-Oberflächen werden im Wohnbereich üblicherweise – so auch bei den Bestandsbauten – mit Gips verputzt, um eine gleichmäßige Sichtoberfläche zu schaffen und ihre raumklimatischen Eigenschaften zu verbessern. Diese Gipsschicht verschlechtert das Recyclingpotenzial des Betons allerdings erheblich, da sie einen Störstoff für die Wiederverwertung ist und sich kaum sortenrein lösen lässt. Gips enthält große Mengen an Sulfaten, also Salzen, die beim Kontakt mit Wasser aufquellen und so zu einem Sulfattreiben in neuem Beton führen können. Ist der Sulfatgehalt im Betonbruch aufgrund von Gipsresten zu hoch, kann das Material nicht als Recyclingzuschlag für Beton verwendet werden. Auch die Gips-Fraktion kann trotz des hohen Recyclingpotenzials von sortenreinem Material nicht verwertet werden, da beim Abschlagen des Putzes die Vermengung mit Betonabplatzungen unvermeidbar ist.[208] Besser eignen sich für Beton unproblematische oder leicht lösbare Putze wie Kalkputz oder Lehmputz. Im Sinne der Suffizienz wird auf eine Verputzung des Betons zur Gänze verzichtet, da sie bauphysikalisch nicht notwendig ist. Sowohl die Wohnungstrennwände als auch die Deckenunterseiten werden in Sichtbeton ausgeführt.

## Geschossdecke

Die Tragstruktur der Decken besteht aus Stahlbeton mit Recycling-Zuschlägen und CEM II/C-Zement. Die Unterseite wird, wie soeben diskutiert, auf Sicht belassen. Zu klären ist noch der Bodenaufbau.

**Estrich**

Laut Herr Hutter von der Firma Rhomberg Bau stellen Fußbodenheizungen in Kombination mit einem Nassestrich den aktuellen Komfortstandard im Wohnbau in Vorarlberg dar.[209] Nassestriche schaffen eine ebene, belastbare Fläche bei sehr guten Schallschutzeigenschaften. Ein sortenreiner, gar zerstörungsfreier Rückbau ist allerdings mit den eingegossenen Heizungsrohren, der PE-Trennlage und einem oftmals verklebten Bodenbelag nicht möglich. In dieser Variante wird dennoch ein Nassestrich eingebaut, da er den üblichen Anwendungsfall darstellt und um das vorhandene Verbesserungspotenzial aufzuzeigen.

Für den Einsatz als nass ausgeführter Heizestrich im Wohnbereich sind zwei Estricharten üblich: Zementestrich und Calciumsulfatestrich. Wie der Name schon sagt, bindet der Zementestrich mithilfe von Zement ab. Dadurch ist er besonders robust und feuchtebeständig. Calciumsulfatestrich bindet mithilfe von Wasser zu Gips ab. Er ist also wasserlöslich, aber hat eine wesentlich kürzere Trocknungszeit als Zementestrich. In privaten Badezimmern kann er nur unter Umständen eingesetzt werden, ansonsten ist er bei Wohnnutzungen gleichermaßen geeignet.[210] Auch bezogen auf den Schallschutz sind die beiden Estrich-Arten bei identer Rohdichte gleichwertig zu betrachten. Ein Einsatz von Rezyklaten ist bei beiden Baustoffen aktuell nicht üblich, zudem ist laut dem deutschen Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) die Deponierung für beide Estricharten momentan stets der übliche Verwertungsweg.[211] Bei selber Performance und gleich schlechtem Kreislaufpotenzial wird das Global Warming Potential der beiden Baustoffe als Entscheidungsgrundlage herangezogen. Mit 30% geringerem Treibhauspotenzial in der Herstellung enthält der Calciumsulfatestrich deut-

208 Siehe: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, „Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft“, 29.

209 Harald Hutter von Rhomberg Bau im persönlichen Interview, digital, am 02.06.2023.

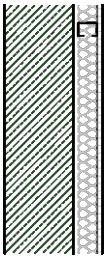
210 Siehe: BauNetz, „Fachwissen Estriche“.

211 Im Bewertungssystem nachhaltiges Bauen werden die üblichen Verwertungswege aller Estricharten verglichen. Eine Deponierung ist momentan für alle Nassestriche der übliche Verwertungsweg. Siehe: WECOBIS. Ökologisches Baustoffinformationssystem, „Calciumsulfatestrich“.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 1: Wohnungstrennwand *Fläche: 883,0 m² (11,4%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 200 | Stahlbeton (38% Recycling-Zuschläge) mit CEM II/C-Zement, Ortbeton |
| 12,5 | Luft |
| 50 | Blech-Profil, freistehend, verschraubt dazwischen: Mineralwolle, gesteckt |
| 12,5 | Gipskarton, verschraubt |
| **275** | |

**$R_w$: 65 dB**

| | Zementestrich | Calciumsulfatestrich |
|---|---|---|
| **Eigenschaften** | große Robustheit<br>Trocknungszeit 20-30 Tage | normale Robustheit, wasserlöslich<br>Trocknungszeit 3-5 Tage |
| **Eignung**<br>als Heizestrich | **ja** | **ja** |
| Pre-Use | 100% nicht erneuerbare Primärrohstoffe | 100% nicht erneuerbare Primärrohstoffe |
| Post-Use<br>keine sortenreine Rückgewinnung möglich | Deponierung | Deponierung |
| **UMI** | **0%** | **0%** |
| **GWP (A1-3)**<br>1 m² Estrich, Dicke: 0,07 m | **23,8 kg CO2-Äq.** | **15,7 kg CO2-Aq.** |

Abb. 110: Vergleich von für die Ausführung mit Fußbodenheizung geeigneten Nassestricheben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

lich weniger graue Energie als der Zementestrich,[212] weshalb er in dieser Variante – außer in den Badezimmern – verwendet wird.

**Trittschalldämmung**
Unter der Trennlage des Estrichs kann die Trittschalldämmung lose verlegt und somit im EoL sortenrein rückgewonnen werden. Bauphysikalisch sind Künstliche Mineralfasern vergleichbar gut geeignet wie Kunststoff-Dämmungen. Da KFMs aus Rezyklat bestehen und besonders für Mineralwolle bereits eine Wiederverwertungsinfrastruktur besteht, Kunststoffdämmungen hingegen komplett linear verwertet werden, wird Mineralwolle aufgrund ihres hohen Kreislaufpotenzials als Trittschalldämmung verwendet. Mit der lose verlegten Trittschalldämmung, dem Calciumsulfatestrich und der Stahlbetondecke erreicht der gesamte Bodenaufbau somit einen sehr guten Schallschutz mit einem Norm-Trittschallpegel von 35 dB.

**Belag**
Analog zu den Bestandsbauten wird Mehrschichtparkett als Bodenbelag gewählt. Dieser wird allerdings nicht verklebt, sondern mittels Klickparkett schwimmend verlegt. Klickparkett hat eine etwas kürzere technische Nutzdauer als verklebtes Parkett, lässt sich aber zerstörungs- und rückstandsfrei wieder ausbauen.[213] Da Oberbodenbeläge im privaten Wohnbereich oftmals nicht aufgrund von Alterungserscheinungen, sondern aus ästhetischen Gründen getauscht werden, ist die nutzungsfreundliche Rückbaubarkeit hierbei das wichtigere Kriterium.

**Sondersituation Decke über Keller**
Der soeben festgelegte Deckenaufbau wird – abgesehen von einer Varianz in den Bodenbelägen – überall eingesetzt. Abweichend ist nur die unterste Geschossdecke. Zum Keller, einem unbeheizten Raum, wird eine zusätzliche Dämmschicht benötigt. Dank der soeben beschriebenen guten Eigenschaften wird auch hier Mineralwolle verwendet, die – lose verlegt eingebaut – im EoL wiederverwertet werden kann. Mit einer zusätzlichen Schicht aus Mineralwolle kann der selbe Wärmeschutz erreicht werden wie in Haus A, bei welchem EPS verwendet wurde.

212 Eigene Berechnung basierend auf den Daten von ÖkobauDat. Siehe: ÖkobauDat, „Prozess-Datensatz: Calciumsulfat-Fließestrich und Konventioneller Calciumsulfatestric“; ÖkobauDat, „Prozess-Datensatz: Estrichmörtel-Zementestrich“.

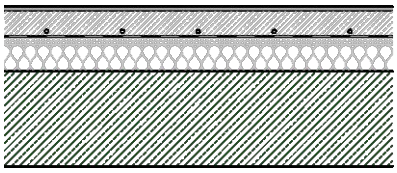
213 Siehe: Bricoflor, „Parkett – verkleben oder schwimmend verlegen?“



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 1: Geschossdecke

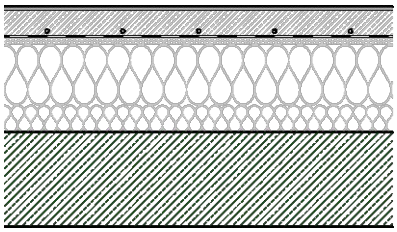
*Bauteilfläche: 1.552,6 m² (36,5%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klickparkett |
| 70 | Calciumsulfatestrich, Fließestrich incl. Fußbodenheizung<br>PE-Folie, lose verlegt |
| 20 | Mineralwolle-TSDM, lose verlegt |
| 70 | Mineralwolle (Installationsebene), lose verlegt |
| 250 | Stahlbeton (38% Recycling-Zuschläge)<br>mit CEM II/C-Zement, Ortbeton |
| **425** | **$L_{n,w}$: 35 dB** |

## Variante 1: Decke über Keller

*Bauteilfläche: 308,4 m² (7,4%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klickparkett |
| 70 | Calciumsulfatestrich, Fließestrich incl. Fußbodenheizung<br>PE-Folie, lose verlegt |
| 20 | Mineralwolle-TSDM |
| 160 | Mineralwolle, lose verlegt |
| 70 | Mineralwolle: Installationsebene |
| 250 | Stahlbeton (38% Recycling-Zuschläge)<br>mit CEM II/C-Zement |
| **580** | **U-Wert: 0,13 W/m²K** |

| | Glaswolle | Mineralwolle | EPS |
|---|---|---|---|
| Eigenschaften | etwas höhere dynamische Steifigkeit | | höhere Druckbelastbarkeit |
| **Eignung** als Trittschalldämmung | **ja** | **ja** | **ja** |
| Pre-Use | 70% Recycling | 60% Recycling | 100% nicht erneuerbarer Primärrohstoff (Erdöl) |
| Post-Use (sortenreine Rückgewinnung) | 48% Wiederverwertung<br>Rest: Deponierung | 96% Wiederverwertung<br>(Herstellerrücknahme) | 100% energetische Verwertung |
| **UMI** | 59% | **78%** | 0% |

Abb. 111: Vergleich konventioneller Trittschalldämmungen. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




Abb. 112: Zusammenstellung verschiedener mineralischer und fosiller Dämmstoffe. Von links nach rechts: Mehrere Künstliche Mineralfasern, Schaumglasplatte, EPS-Dämmstoff und XPS-Dämmstoff.

## Dach

Das Flachdach wird – wie bereits in den bestehenden Bauten – als konventionelles Warmdach ausgeführt. Die Überlegung, aus Suffizienzgründen einen Umkehrdach-Aufbau zu verwenden, welcher nur mit einer anstatt zwei abdichtenden Ebenen auskommt, wurde verworfen, weil dort die Wahl der Dämmungen sehr eigeschränkt und im Sinne der Kreislaufwirtschaft unzufriedenstellend ist. Da die Dämmungen stehendem Wasser ausgesetzt sind, können faktisch nur das erdölbasierte XPS oder bituminös verklebte, nicht mehr sortenrein rückgewinnbare Schaumglasplatten eingesetzt werden. Bei einem konventionellen Warmdach kann die Wärmedämmung lose verlegt und somit im EoL leicht sortenrein rückgewonnen werden. Um dies zu ermöglichen, wird eine Abdichtungsbahn aus kunststoffbasiertem EPDM gewählt, welche im Gegensatz zu Bitumen ohne Verklebung an der Dämmung verlegt werden kann.[214] Die Lagersicherung gegen Windsog erfolgt mit einer Kiesauflage. Dieses lose Material besteht zwar meist aus Primärmaterialien, kann aber als sortenrein und zerstörungsfrei rückbaubares, beständiges Material einfach wiederverwendet werden. Die Dampfsperre unterhalb der Dämmebene beeinflusst deren Rückbaubarkeit nicht. Hier wird Bitumen verwendet, da es sich im Gegensatz zu anderen Kunststoffabdichtungen teilweise wiederverwerten lässt.[215]

**Dämmung**

Als Dämmstoff kommt eine Vielzahl von nichtbiotischen Dämmstoffen in Frage. Schaumglas hat zwar eine gute Eignung zur Wiederverwertung, ist aber wegen der etwas höheren Wärmeleitfähigkeit ungünstiger als die anderen Baustoffe. Diese erreichen alle ähnlich hervorragende Dämmwerte, weshalb anhand des Kreislaufpotenzials entschieden wird. Wie bereits anhand der Perimeterdämmungen ausgeführt, werden Dämmstoffe aus fossilen Quellen aktuell trotz vorhandener Recyclingtechnologie ausschließlich energetisch verwertet. Das einzige EPS-Recycling-Werk befindet sich in den

214 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 93.

215 Siehe: Hillebrandt u. a., 93.

**Künstlich Erzeugte Mineralfasern**

| | Glaswolle | Mineralwolle | Schaumglas |
|---|---|---|---|
| Wärmeleitfähigkeit λ | 0,031 - 0,045 | 0,031 - 0,045 | 0,036 - 0,054 |
| **Eignung** Wärmeschutz | **ja** | **ja** | **(ja)** |
| Pre-Use | 70% Recycling | 60% Recycling | 70% Recycling |
| Post-Use (sortenreine Rückgewinnung) | 48% Wiederverwertung Rest: Deponierung | 96% Wiederverwertung (Herstellerrücknahme) | 41% Wiederverwertung Rest: Weiterverwertung |
| **UMI** | **59%** | **78%** | **70%** |

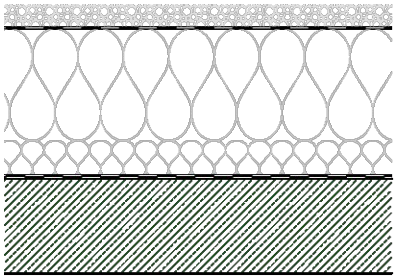
Abb. 113: Vergleich konventioneller Dachdämmungen. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 1: Dach

*Bauteilfläche: 338,2 m² (6,6%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 60 | Schüttung Kies, lose verlegt |
| 2 | Abdichtung EPDM, lose verlegt |
| 300 | Mineralwolle, lose verlegt |
| 0 - 200 | Mineralwolle Gefälledämmung |
| 5 | Dampfsperre, Aluminium-Bitumenbahn, zweilagig, an Beton verschweißt |
| 250 | Stahlbeton (38% Recycling-Zuschläge) mit CEM II/C-Zement |
| **525** | |

**U-Wert: 0,08** W/m²K

Niederlanden[216] – ein Transport von Österreich ist sowohl ökonomisch unrealistisch als auch aufgrund der Transportemissionen ökologisch zu hinterfragen. Aktuell ist die Verwertung dieser Dämmstoffe also komplett linear.[217] Wie bereits erläutert, ist die Kreislaufführung von Künstlichen Mineralfasern bereits deutlich etablierter. Besonders Mineralwolle erreicht in sortenreinem Zustand eine hohe Zirkularität bei gleichzeitig guten Dämmeigenschaften, weshalb sie auch als Dachdämmung verwendet wird.

216 Für mehr Informationen zu diesem Recycling-Werk siehe: „PSLoop. Circular Economy."

217 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 86.

**kunststoffbasierte Dämmstoffe**

| EPS | XPS |
|---|---|
| 0,031 - 0,042 | 0,027 - 0,040 |
| **ja** | **ja** |
| 100% Primärrohstoff: Erdöl | 100% Primärrohstoff: Erdöl |
| 100% energetische Verwertung | 100% energetische Verwertung |
| **0%** | **0%** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kreislauffähigkeit

Nachdem alle Standardaufbauten von Variante 1 festgelegt wurden, folgt nun eine Analyse ihrer Kreislauffähigkeit. Als massive Bauweise mit primär nassen Verbindungen hat Variante 1 wenig Potenzial, zerstörungsfrei rückgebaut zu werden. Da jedoch der Fokus dieser Strategie nicht auf der Wiederverwendung von Bauteilen, sondern auf einer Wiederverwertung der Baustoffe liegt, ist ein Abbruch mit Zerstörung hinnehmbar, solange die Baustoffe sortenrein gesammelt werden. Beim Ermitteln der Aufbauten wurde auf die Vermeidung von Materialmischungen und vielschichtigen Verbünden geachtet. Auch eine möglichst hohe Zirkularität und ein geringes Treibhauspotenzial der einzelnen Materialien wurde angestrebt.

Wie hoch der Anteil einer mineralischen Bauweise ist, der durch Wieder- und Weiterverwertung im Kreislauf gehalten werden kann, wird nachfolgend mithilfe der Bewertungssystematik des Urban Mining Index ermittelt.

## Gründung

Die Gründung von Variante 1 lässt sich nicht zerstörungsfrei rückbauen, erreicht aber aufgrund der deutlich geringeren Materialvielfalt eine größere Sortenreinheit als der konventionelle Aufbau. Indem der Beton wasserundurchlässig ausgeführt wird, kann auf die Abdichtungsbahn und damit auf einen Austausch verzichtet werden. Auch der Zementestrich, der ohne Belag und Trennlage direkt auf den Beton gegossen wird, kann so den gesamten Lebenszyklus überdauern. In 100 Jahren Betrachtungszeitraum muss somit keine Bauteilschicht ausgewechselt werden.

Der Beton hat als Gründungsbauteil die Expositionsklasse XC2. Damit können laut ÖNORM 4710-1 38% der Zuschläge aus Recycling-Material bestehen. Bezogen auf die Gesamtmasse des Betons[218] entspricht das einem Rezyklatanteil von 32%. Im EoL können der Zementestrich und der Beton gemeinsam verwertet werden. Ohne nichtmineralische Störstoffe ist das Material recht sortenrein. Nur die Trennfolie unter dem Beton bildet einen Fremdkörper – selbst die Schaumglasdämmung verunreinigt als mineralischer Baustoff den Bauschutt nicht wirklich. Da beim Abbruch eines erdberührten Bauteils eine Vermengung mit Erdmaterial kaum zu verhindern ist, fällt der Beton- und Estrichbruch in die Kategorie Bauschutt gering verschmutzt. Aufgrund des technisch aufwendigeren Rückbaus einer Bodenplatte beträgt das Downcycling-Potenzial nur 48%. Beton und Estrich machen gemeinsam fast 95% der Masse des Bauteils aus. Die vollständig zirkuläre Sahl-Armierung, die Trennlage und die Schaumglasdämmung fallen kaum ins Gewicht. Der UMI der Gründung beträgt 28%. Auch wenn dieser Wert nicht hervorragend ist, kann zumindest fast die Hälfte der Baumasse vor einer Deponierung bewahrt werden.

Für den Beton wird CEM II/C-Zement eingesetzt, der im Vergleich zum aktuell üblichen Zement um 25% reduzierte Treibhausgasemissionen in der

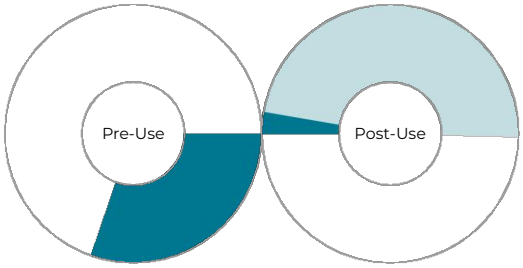
218 Annahme: Die Zuschläge machen etwa 85% der Masse eines typischen Betons aus.

| **Gründung** | | Bauteilschicht | Austauschhäufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *782,8 m²* | Zementestrich als Verbundestrich | | 105,0 | 14,1% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| *Masseanteil* | *14,5%* | Beton, WU | | 600,0 | 80,6% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,7% | Stahl, Scherenschrott |
| | | PE-Folie | | 0,4 | 0,1% | Kunststoffe |
| | | Schaumglasplatten, bituminös verklebt | | 19,2 | 2,6% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **744,6** | | |

Abb. 114: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Gründung. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



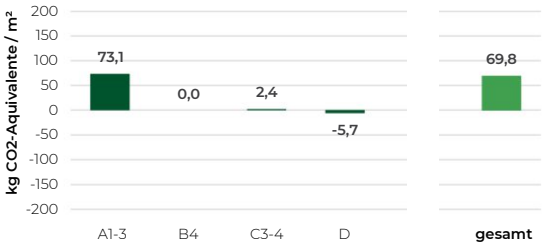
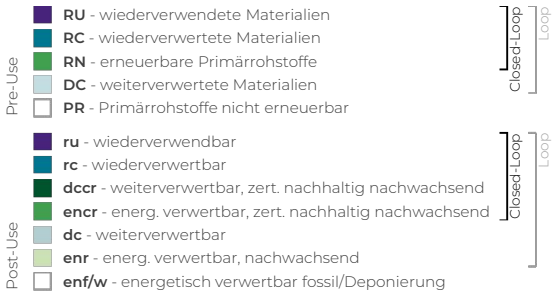




Abb. 115: Gründung Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

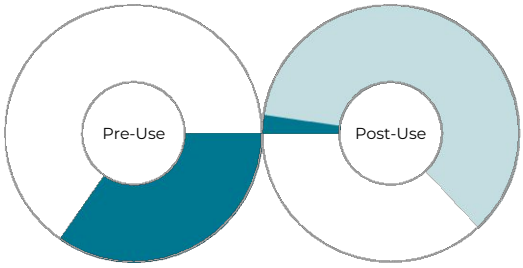
Herstellung hat. Für einen WU-Beton muss gleichzeitig mehr Zement eingesetzt werden, damit eine höhere Dichtigkeit des Materials erreicht wird. Damit bleibt das GWP in der Herstellung für den Beton hoch. Besonders da auf den Austausch von Bauteilschichten verzichtet werden kann, ist das Gesamt-GWP mit 69,8 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter über den Lebenszyklus für ein Gründungsbauteil moderat.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | 48% | | 52% | 6,2 | 0,0 | 0,2 | 0,0 |
| | 32% | | | 68% | | | | | 48% | | 52% | 39,4 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,0 | 0,7 | -0,3 |
| | 70% | | | 30% | | | | | 0% | | 100% | 13,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **30%** | **0%** | **0%** | **70%** | **0%** | **3%** | **0%** | **0%** | **45%** | **0%** | **52%** | **73,1** | **0,0** | **2,4** | **-5,7** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **28,0%** | **GWP total:** | | | **69,8** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



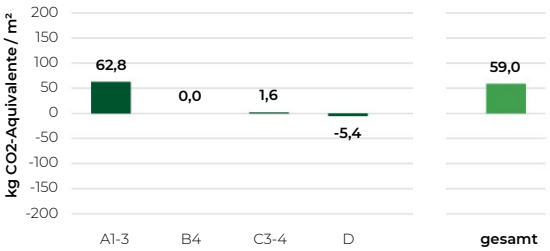




Abb. 116: Außenwand Keller Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand Keller

Die Keller-Außenwand von Variante 1 besteht abgesehen vom Estrich und der Trennlage aus denselben Materialien wie die Gründung. Die Schaumglasplatten, die für ein Dämmmaterial besonders witterungsbeständig sind, müssen im Lebenszyklus genauso wenig getauscht werden wie der Stahlbeton. Das Pre-Use Kreislaufpotenzial der Baustoffe ist ident wie bei der Gründung. Lediglich beim Verwertungspotenzial von Beton im EoL gibt es eine Abweichung: Die dünnere und vertikal ausgerichtete Keller-Außenwand lässt sich laut UMI eher so abbrechen, dass sie verwertet werden kann. Deshalb ist das Weiterverwertungspotenzial der Beton-Wand mit 64% etwas höher als jenes der Gründung. So ergibt sich ein Kreislaufpotenzial von 33,5%.

Weil im Vergleich zur Gründung der Estrich wegfällt, hat die Außenwand ein etwas geringeres GWP von 59,0 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter.

| **Außenwand Keller** | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *662,7 m²* | Beton, WU | | 600,0 | 94,8% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| *Masseanteil* | *10,5%* | Bewehrung | | 15,0 | 2,4% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Schaumglasplatten, bituminös verklebt | | 18,0 | 2,8% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **633,0** | | |
| **Außenwand** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *1.175,6 m²* | Kalkputz | | 21,0 | 5,3% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| *Masseanteil* | *11,7%* | Hochlochziegel, elektrifizierte Herstellung | | 336,1 | 84,2% | Ziegel, sortenrein |
| | | Perlit-Füllung, gesteckt | | 19,8 | 5,0% | Perlit, sortenrein |
| | | Leichtmörtelputz | | 22,0 | 5,5% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **398,9** | | |

Abb. 117: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Außenwand und Außenwand Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

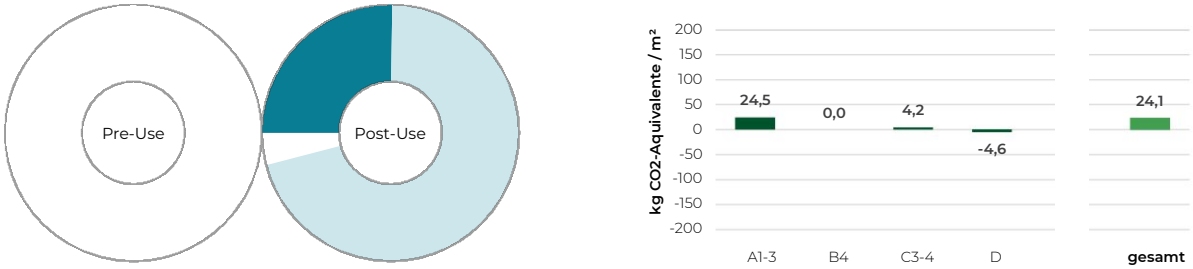
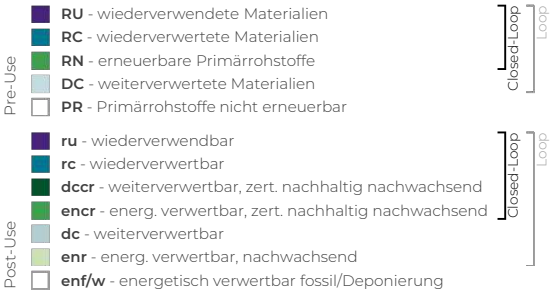



Abb. 118: Außenwand Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand

Mit einer rein mineralischen Bauweise erreicht die Außenwand von Variante 1 ein passables Kreislaufpotenzial. Alle Schichten sind so dauerhaft, dass kein Austausch stattfinden muss. Im Abbruch ist es möglich, die gesamte Konstruktion als Bauschutt gering verschmutzt zu verwerten, was primär ein Downcycling bedeutet. Ein sortenreiner Rückbau kann besonders für die Ziegel und die Perlitfüllung gelingen, wodurch auch eine hochwertige Wiederverwertung möglich ist. Im Post-Use müssen so nur 4% der Konstruktion deponiert werden. Im Pre-Use allerdings sind alle Materialien zu 100% nicht erneuerbare Primärrohstoffe. Der UMI von 30,5% wird also allein durch die guten Verwertungsmöglichkeiten im EoL erreicht.

Mit einer elektrifizierten Herstellung der Ziegel und Strom aus nachhaltigen Quellen kann deren GWP in der Herstellung um 90% reduziert werden. Dadurch sind sie auf den Lebenszyklus betrachtet sogar das Bauteil in der Außenwand mit den geringsten Emissionen. Für eine mineralische Bauweise ist das Gesamt-GWP von 24,1 kg $CO_2$-Eq./m² gering.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 32% | | | 68% | | | | | 64% | | 36% | 39,4 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 10,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 70% | | | 30% | | | | | 0% | | 100% | 13,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **35%** | **0%** | **0%** | **65%** | **0%** | **2%** | **0%** | **0%** | **61%** | **0%** | **37%** | **62,8** | **0,0** | **1,6** | **-5,4** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **33,5%** | **GWP total:** | | | **59,0** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 100% | | | | | 64% | | 36% | 2,9 | 0,0 | 0,4 | 0,0 |
| | | | | 100% | | 29% | | | 71% | | 0% | 3,5 | 0,0 | 2,7 | -3,8 |
| | | | | 100% | | 20% | | | 80% | | 0% | 10,6 | 0,0 | 0,3 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | 64% | | 36% | 7,5 | 0,0 | 0,8 | -0,8 |
| **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **100%** | **0%** | **25%** | **0%** | **0%** | **71%** | **0%** | **4%** | **24,5** | **0,0** | **4,2** | **-4,6** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **30,5%** | **GWP total:** | | | **24,1** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

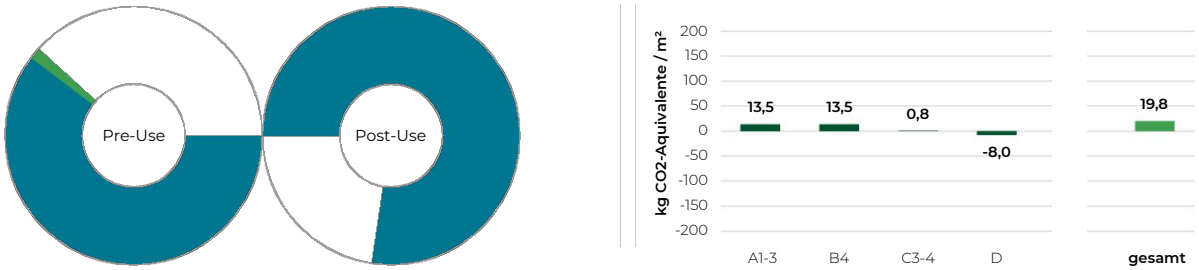



Abb. 119: Trockenbauwand Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Trockenbauwand

Die Trockenbauwand in Variante 1 ist fast ident zu jener der Bestandsgebäude A und B. So erreicht auch sie ein recht hohes Kreislaufpotenzial. Alle verbauten Schichten haben eine Nutzungsdauer von 50 bis 60 Jahren. Da zwar ein sortenreiner, aber nicht ein zerstörungsfreier Rückbau möglich ist, wird also die gesamte Konstruktion einmal im Lebenszyklus getauscht.

Die beidseitige Gipskarton-Beplankung als schwerstes Material macht etwa 70% der Masse aus. Mit dem hohen Rezyklatanteil aus REA-Gipsen, rezyklierten Baugipsen und der zellulosebasierten Kaschierung sowie einem hohen Wiederverwertungspotenzial von 69% erreicht sie eine hohe Kreislauffähigkeit. Da auch die anderen Bestandteile – die Stahl-Unterkonstruktion und die Mineralwolle – sowohl in relevanten Mengen aus Rezyklat bestehen als auch eine gute Aussicht auf Wiederverwertung haben, ist auch die Gesamtbilanz der Wand sehr positiv. Es gelingt eine weitreichende Schließung der Stoffkreisläufe durch hochwertige Verwertung. Der UMI der gesamten Trockenbauwand beträgt 69,5%.

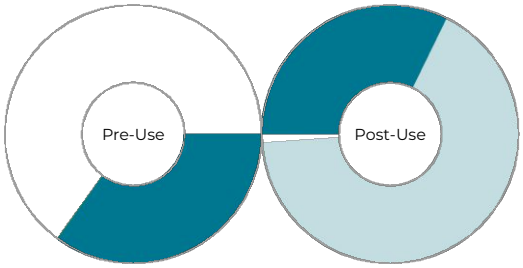
Da die Stahl-Konstruktion zu Teilen aus Primärmaterialien besteht, welche durch ihr Recycling die energieaufwändige Gewinnung anderer Primärstähle substituieren, erhält sie große Gutschriften in Modul D. Das Treibhauspotenzial ist gering, obwohl die gesamte Konstruktion einmal ausgetauscht wird. Es beträgt für den Lebenszyklus 19,8 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter.

| **Trockenbauwand** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.186,5 m²* | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 35,6% | Gips, sortenrein |
| *Masseanteil* | *1,5%* | Blech-Profile | 1 | 5,1 | 10,5% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Mineralwolle, gesteckt | 1 | 9,0 | 18,3% | Herstellerrücknahme |
| | | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 35,6% | Gips, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **49,1** | | |
| **Wohnungstrennwand** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *883,0 m²* | Beton | | 480,0 | 92,7% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| *Masseanteil* | *11,4%* | Stahl-Armierung | | 12,0 | 2,3% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Blech-Profile | 1 | 3,7 | 0,7% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Mineralwolle, gesteckt | 1 | 4,5 | 0,9% | Herstellerrücknahme |
| | | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 3,4% | Gips, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **517,7** | | |

Abb. 120: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Trockenbauwand & Wohnungstrennwand. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



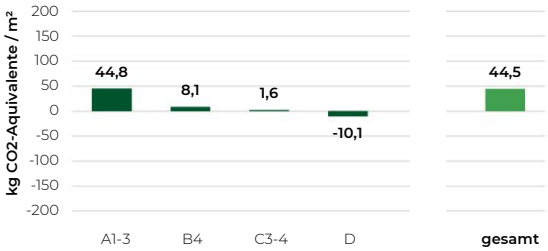



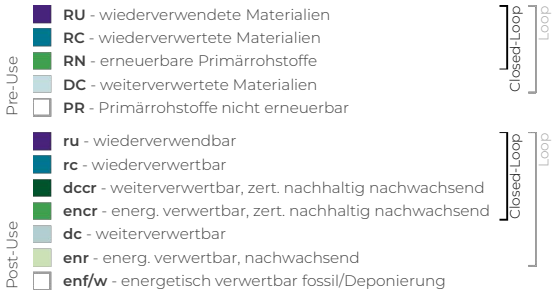

Abb. 121: Wohnungstrennwand Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Wohnungstrennwand

Die Wohnungstrennwand aus $CO_2$-reduziertem Recycling-Stahlbeton als Sichtbauteil und einer einseitigen Trockenbau-Vorsatzschale ist ebenfalls mehr als zur Hälfte zirkulär. Die Elemente der Vorsatzschale müssen einmal im Gebäudelebenszyklus ausgetauscht werden, fallen aber bei einem gemeinsamen Masse-Anteil von 5% kaum ins Gewicht.

Als Beton der Expositionsklasse XC1 kann die Wand wie auch die erdberührten Bauteile laut Norm mit 38% Recycling-Zuschlägen errichtet werden. Da der Beton nicht nur aus Zuschlägen besteht, ist der Recyclinganteil des gesamten Baustoffes bei 32%. Weil auch alle anderen Schichten in Teilen aus wiederverwerteten Rohstoffen bestehen, beträgt der Recyclinganteil des gesamten Bauteils im Pre-Use immerhin 35%. Auch im Post-Use wird ein ähnlicher Prozentsatz wiederverwertet. Der Beton, der – nachdem die Bewehrung entfernt wurde – sortenrein rückgewonnen werden kann, hat so ein sehr hohes Verwertungspotenzial. Der nicht-rezyklierbare Anteil kann zumindest einem Downcycling zugeführt werden. Nur ein Prozent des gesamten Wandaufbaus kann im EoL überhaupt nicht verwertet werden. Der UMI der Wohnungstrennwand beträgt 50,5%.

Durch den Einsatz von CEM II/C Zement sinkt das GWP des Betons in der Herstellung um ein Fünftel. Dennoch ist er das emissionsintensivste Bauteil. Das GWP des gesamten Aufbaus beträgt 44,5 kg $CO_2$-Eq./m².




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 6,2 | 6,2 | 0,0 | -8,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 4,0 | 4,0 | 0,2 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| **0%** | **60%** | **1%** | **0%** | **38%** | **0%** | **77%** | **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **23%** | **13,5** | **13,5** | **0,8** | **-8,0** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **69,5%** | **GWP total:** | | | **19,8** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 32% | | | 68% | | 28% | | | 72% | | 0% | 28,5 | 0,0 | 1,2 | -4,3 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 4,5 | 4,5 | 0,0 | -5,8 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 2,0 | 2,0 | 0,1 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| **0%** | **35%** | **0%** | **0%** | **65%** | **0%** | **32%** | **0%** | **0%** | **67%** | **0%** | **1%** | **44,8** | **8,1** | **1,6** | **-10,1** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **50,5%** | **GWP total:** | | | **44,5** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

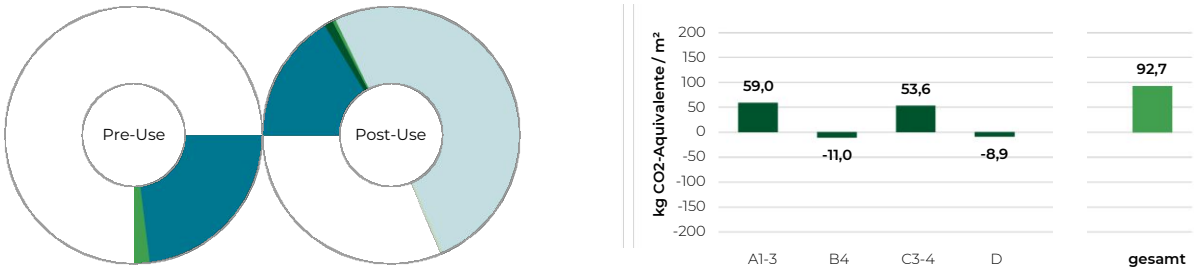



Abb. 122: Geschossdecke Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Geschossdecke

Die Geschossdecke ist mit ihrem nass ausgeführten Aufbau nicht zerstörungsfrei rückbaubar, aber zumindest ein Teil der Materialien kann sortenrein rückgewonnen und verwertet werden. Der Fußbodenaufbau aus Trittschalldämmung und Calciumsulfatestrich muss im Betrachtungszeitraum einmal getauscht werden, der Bodenbelag als exponiertes Bauteil sogar dreimal. Ohne die Verklebung kann das Parkett in Teilen weiterverwertet werden, ansonsten erfolgt eine energetische Verwertung. Da angenommen wird, dass drei Viertel des Holzes zertifiziert nachhaltig sind, wird in der Verwertung weiters unter dccr/encr und dc/enr unterschieden. Der Calciumsulfatestrich kann besonders wegen der integrierten Fußbodenheizung nicht sortenrein rückgebaut werden. Als Bauschutt stark verschmutzt wird er deponiert. So beträgt sein Kreislaufpotenzial im Lebenszyklus 0%. Unter der Trennlage kann die zu 60% aus Recycling-Mineralien bestehende Mineralwolle-Dämmung sortenrein rückgebaut werden, sodass sie für eine Herstellerrücknahme und eine fast vollständige Wiederverwertung geeignet ist. Neben dem stets sehr kreislauffähigen Bewehrungsstahl erreicht auch der Beton gute Werte. Als XC1-Beton kann er mit einem Rezyklatanteil von 32% ausgeführt werden. Ohne Verputzung ist eine sortenreine Rückgewinnung möglich. So liegt sein Recyclingpotenzial bei 21% – der Rest wird weiterverwertet. Insgesamt bestehen zwar immer noch drei Viertel der Geschossdecke aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen, aber immerhin kann im EoL bei fast 70% eine Deponierung vermieden werden. Der UMI beträgt 34%.

Mit dem Einsatz von CEM-II/C Zement wird das Treibhauspotenzial des Betons verringert. Er hat somit sogar ein etwas geringeres GWP im Lebenszyklus als der Calciumsulfatestrich, der aufgrund seines Austauschs doppelt Emissionen verursacht. Alle Schichten gemeinsam haben ein Treibhauspotenzial von 92,7 kg $CO_2$-Eq./m².

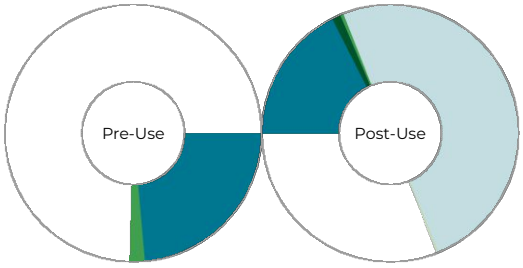
| **Geschossdecke** | | **Bauteilschicht** | **Austauschhäufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.552,6 m²* | Belag Klickparkett | 3 | 19,0 | 2,0% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *36,5%* | Calciumsulfatestrich, Fußbodenheizung | 1 | 294,0 | 31,2% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | Mineralwolle-TSDM, lose verlegt | 1 | 1,8 | 0,2% | Herstellerrücknahme |
| | | Mineralwolle, lose verlegt | 1 | 6,3 | 0,7% | Herstellerrücknahme |
| | | Beton | | 600,0 | 63,7% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,1% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **941,5** | | |
| **Decke zu Keller** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *308,4 m²* | Belag Klickparkett | 3 | 19,0 | 2,0% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *7,4%* | Calciumsulfatestrich, Fußbodenheizung | 1 | 294,0 | 30,8% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | PE-Folie | 1 | 0,4 | 0,0% | Kunststoffe |
| | | Mineralwolle-TSDM, lose verlegt | 1 | 1,8 | 0,2% | Herstellerrücknahme |
| | | Mineralwolle, lose verlegt | 1 | 20,7 | 2,2% | Herstellerrücknahme |
| | | Beton | | 600,0 | 62,8% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,1% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **955,9** | | |

100%

Abb. 123: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Geschossdecke & Decke zu Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



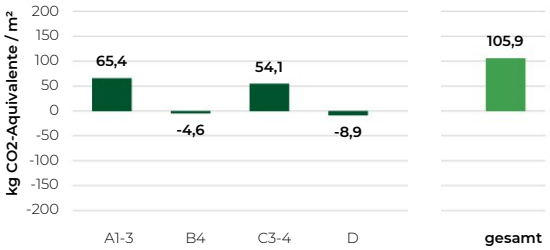
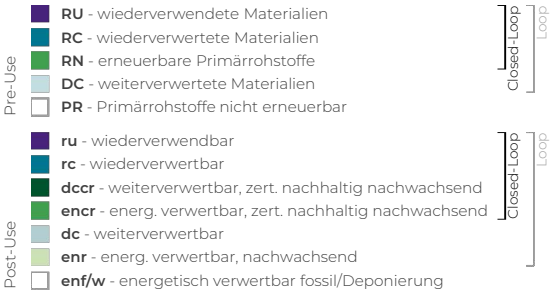




Abb. 124: Decke zu Keller Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Decke zu Keller

Zum Keller hin wird die Geschossdecke lediglich um eine dickere Dämmschicht ergänzt. Da die verwendete Mineralwolle ein recht hohes Kreislaufpotenzial hat, aber nur einen geringen Masse-Anteil ausmacht, ändert sich der UMI minimal zum Besseren: Er beträgt für die Decke zum Keller 34,5%.

Im Global Warming Potential schlägt sich die Dämmschicht ebenfalls nur geringfügig nieder. Das Treibhauspotenzial ist im Vergleich zur Geschossdecke um 13,3 kg höher. Es beträgt für den gesamten Lebenszyklus 105,9 kg $CO_2$-Eq./m².




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 94% | | 6% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 15,7 | 15,7 | 4,4 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 0,8 | 0,8 | 0,0 | 0,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 2,8 | 2,8 | 0,2 | 0,0 |
| | 32% | | | 68% | | 21% | | | 79% | | 0% | 35,6 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **23%** | **2%** | **0%** | **75%** | **0%** | **16%** | **1%** | **0%** | **51%** | **0%** | **31%** | **59,0** | **-11,0** | **53,6** | **-8,9** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **34,0%** | **GWP total:** | | | **92,7** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 94% | | 6% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 15,7 | 15,7 | 4,4 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,7 | 0,7 | -0,3 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 0,8 | 0,8 | 0,0 | 0,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 9,2 | 9,2 | 0,6 | 0,0 |
| | 32% | | | 68% | | 21% | | | 79% | | 0% | 35,6 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **24%** | **2%** | **0%** | **75%** | **0%** | **18%** | **1%** | **0%** | **50%** | **0%** | **31%** | **65,4** | **-4,6** | **54,1** | **-8,9** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **34,5%** | **GWP total:** | | | **105,9** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

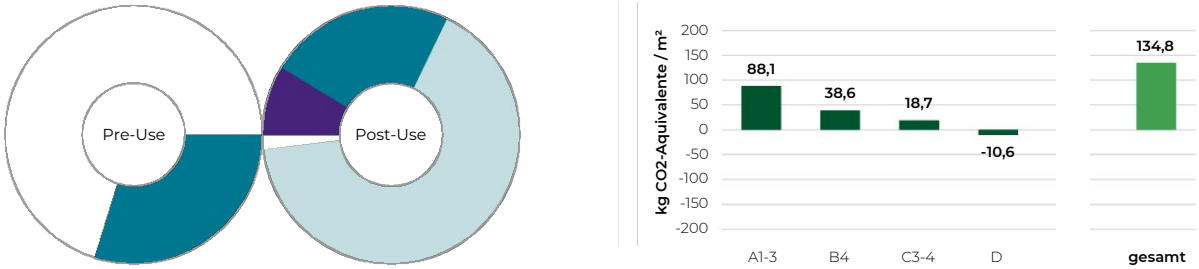



Abb. 125: Dach Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Dach

Im Prinzip ähnelt der Dachaufbau dem der Kellerdecke – eine unverputzte Recycling-Stahlbeton-Decke unter einer Mineralwolledämmung. Anders als beim Keller kommen beim Dach zwei Dichtungsebenen und eine Kiesauflage hinzu. Die wasserführende Schicht, die EPDM-Abdichtung, sowie die Dämmung und die bituminöse Dampfsperre müssen mit einer Nutzungsdauer von 50 Jahren einmal ausgetauscht werden.

Die schwere Kiesauflage besteht zwar aus Primärmaterialien, kann aber als sortenrein und zerstörungsfrei rückbaubares, beständiges Material voraussichtlich wiederverwendet werden. Die lose zwischen den Dichtungsebenen liegende Mineralwolle hat ein noch höheres Recyclingpotenzial, wohingegen für die Kunststoffbahn nur eine thermische Verwertung in Frage kommt. Indem die Aluminium-Bitumenbahn nur punktweise auf die Betondecke geschweißt wird, ist ihr Rückbau leichter, sodass sie eher wiederverwertet werden kann als bei einer vollflächigen Verschweißung. Der Beton, der zu 32% aus Recycling-Zuschlägen besteht, kann sortenrein rückgebaut und in Teilen einer Wiederverwertung zugeführt werden. Der UMI für die gesamte Konstruktion beträgt 47,5%.

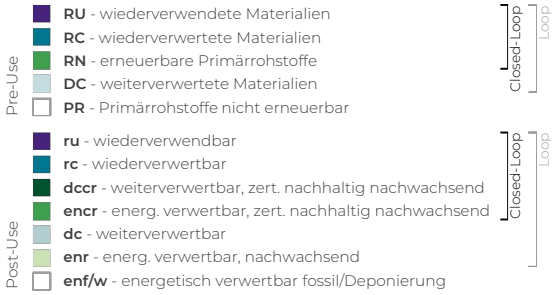
Der Beton schlägt sich trotz $CO_2$-reduziertem Zement im GWP nieder, ebenfalls die Kunststoffabdichtung und die Mineralwolle-Dämmung. Das GWP des gesamten Aufbaus ist mit 134,8 kg $CO_2$-Eq./m² hoch.

| **Dach** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *338,2 m²* | Schüttung Kies | | 108,0 | 13,9% | Wiederverwendung |
| *Masseanteil* | *6,6%* | Abdichtung EPDM, lose verlegt | 1 | 4,0 | 0,5% | Kunststoffe |
| | | Mineralwolle | 1 | 27,0 | 3,5% | Herstellerrücknahme |
| | | Mineralwolle-Gefälledämmung | 1 | 9,0 | 1,2% | Herstellerrücknahme |
| | | Aluminium-Bitumenbahn, punktgeschw | 1 | 11,0 | 1,4% | Bitumengemisch |
| | | Beton | | 600,0 | 77,0% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,6% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **779,0** | | |

Abb. 126: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Dach und Decke zu Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | 63% | | | | 37% | | 0% | 0,3 | 0,0 | 1,5 | -0,4 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 8,4 | 8,4 | 13,6 | -4,8 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 21,1 | 21,1 | 1,2 | 0,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 7,0 | 7,0 | 0,2 | 0,0 |
| | | | | 100% | | 18% | | | | | 82% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | 32% | | | 68% | | 21% | | | 79% | | 0% | 35,6 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **30%** | **0%** | **0%** | **70%** | **9%** | **23%** | **0%** | **0%** | **66%** | **0%** | **2%** | **88,1** | **38,6** | **18,7** | **-10,6** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **47,5%** | **GWP total:** | | | **134,8** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Auswertung

Das Ziel der Variante 1 war das Schließen der Stoffströme auf Rohstoff- und Materialebene innerhalb der etablierten mineralischen Massivbauweise. Die Recherche ergab, dass für alle gängigen mineralischen Baustoffe bereits deutliche Verbesserungen möglich sind. Während das Recycling von Metallen schon länger etabliert ist, erleben Betone mit Recycling-Zuschlägen, Gips-Recycling und das Recycling von künstlichen Mineralfasern samt Herstellerrücknahme-Angeboten aktuell einen starken Aufwind. Dazu trägt neben der Ressourcenverknappung besonders das beschlossene Deponieverbot für all diese Stoffe bei. Ziegel sind aktuell nicht zirkulär – sie können im EoL allerdings zur Herstellung von Recycling-Beton verwertet werden. Notwendige Bedingungen für eine hochwertige Verwertung all dieser Stoffe sind die sortenreine Rückgewinnung und die Schadstofffreiheit. Mit schichtreduzierten und einstofflichen Bauweisen – wie dem Einsatz von WU-Beton als Kellerabdichtung und der vollständig mineralischen Außenwand – kann auf Kunststoff-Abdichtungen, Verklebungen und irreversible Materialvermischungen verzichtet werden. Mit 97 Masse-% können fast alle Funktionen des Gebäudes mit mineralischen Baustoffen erfüllt werden. Auch minimale Eingriffe wie der Verzicht auf Gipsputz und auf eine Verklebung der Dachabdichtung mit den Dämmstoffen haben sehr positiven Einfluss auf die Zirkularität dieser Bauweise. Da mineralische Materialien meist sehr dauerhaft sind, können nicht nur Materialvermischungen, sondern auch benötigte Austauschzyklen minimiert werden. Mit 57% kann mehr als die Hälfte des Gebäudes sortenrein rückgewonnen werden.

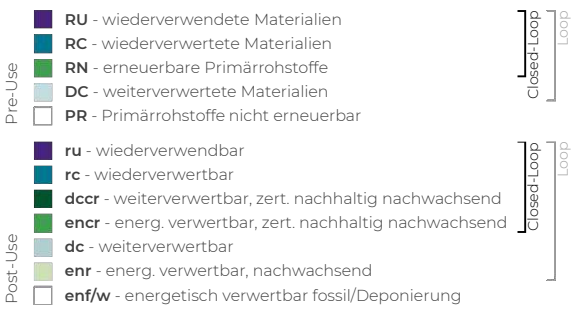
Gerade bei den konstruktiven und massereichen Baustoffen Beton und Ziegel ist die Kreislaufführung aufgrund der chemischen Veränderung im Herstellungsprozess aktuell nur eingeschränkt möglich. Die Materialien lassen sich nicht replastifizieren und können in gebrochener Form nur anteilig hochwertig Primärrohstoffe substituieren. So können trotz der hohen Sortenreinheit nur 17% des Gebäudes wiederverwertet werden. Der Großteil wird dem Downcycling zugeführt, sodass zumindest der Anteil an Deponieabfällen gering ausfällt. Da derzeit bei Betonen nur ein Drittel und bei Ziegeln keinerlei Sekundärrohstoffe eingesetzt werden können, beträgt der Anteil zirkulärer Materialien im Pre-Use nur 26%. Insgesamt ergibt sich so ein Urban Mining Index von 37%.

Das Treibhauspotenzial im Lebenszyklus beträgt für das gesamte Gebäude 407,0 Tonnen $CO_2$-Äquivalente. Durch den Einsatz $CO_2$-reduzierter Zemente bei Beton und eine Elektrifizierung des Brennvorgangs bei Ziegeln können die Emissionen deutlich reduziert werden. Hinzu kommen die Minimierung der Materialschichten und der Austauschhäufigkeit, die sich auch auf das GWP positiv auswirken.

Der Ansatz, bei grundsätzlicher Beibehaltung der etablierten Bauweise den Stoffkreislauf auf Materialebene zu schließen, ist nicht nur für die großen Baufirmen interessant, die dadurch keine Prozesse umstellen müssten. Diese Bauweise kann leicht realisiert und skaliert werden, da keine strukturellen Umschulungen der Fachkräfte nötig sind – dies führt zu einem sehr schnellen Impact. Zudem sind der mineralischen Bauweise dank hervorragender Eigenschaften bezüglich der Tragfähigkeit sowie dem Schall- und Brandschutz kaum Grenzen in der Anwendung gesetzt. Mit einer technisch stark beschränkten Kreislauffähigkeit und hohem GWP bleibt die mineralische Massivbauweise jedoch trotz deutlicher Verbesserungen im Wesentlichen linear strukturiert.

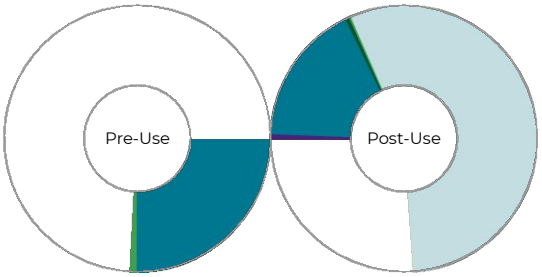
| Masseanteil: | |
|---|---|
| Keller | 25,0% |
| Außenwand | 11,7% |
| Tragende Wände | 11,4% |
| Trockenbau | 1,5% |
| Geschossdecke | 36,5% |
| Decke EG | 7,4% |
| Dach | 6,6% |

Abb. 127: Variante 1: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude. Eigene Darstellung.



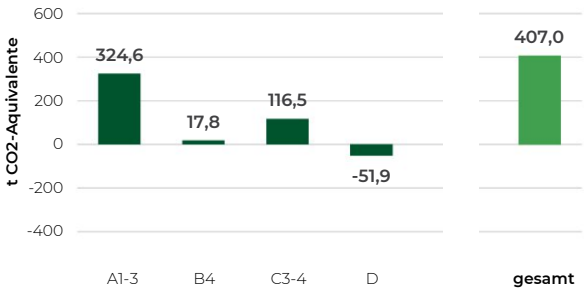



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| | | | |
|---|---|---|---|
| Wiederverwendung | 0% | Wiederverwendung | 1% |
| Wiederverwertung | 25% | Wiederverwertung | 17% |
| Erneuerbare Rohstoffe | 1% | Weiterverwertung z.N. | 0% |
| Weiterverwertung | 0% | Energetische Verwertung z.N. | 0% |
| nicht kreislauffähig | 74% | Weiterverwertung | 55% |
| | | Energetische Verwertung | 0% |
| | | nicht kreislauffähig | 26% |
| Pre-Use | 26% | Post-Use | 66% |
| **UMI gesamt** | **37%** | | |

Abb. 128: Variante 1: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses.. Eigene Darstellung.




GWP [tCO2Eq.]

| | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
|---|---|---|---|---|
| | 324,6 | 17,8 | 116,5 | -51,9 |
| **GWP total** | | | | **407,0** |

Abb. 129: Variante 1: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

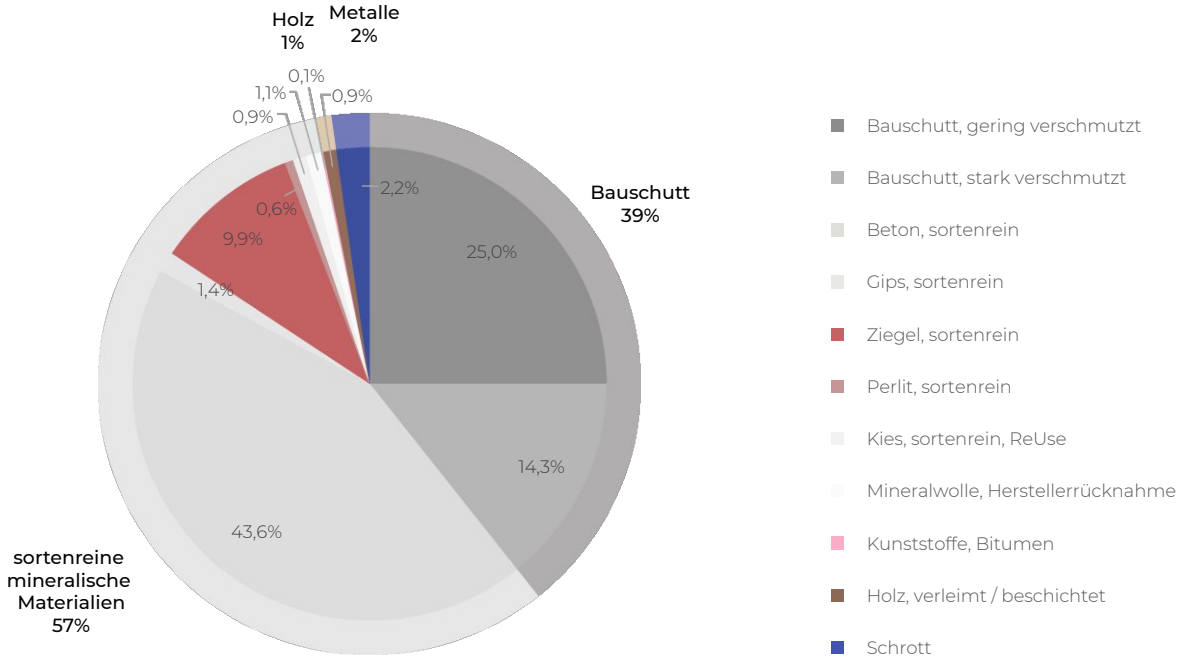



Abb. 130: Variante 1: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.







Abb. 131: Links: Gemeindezentrum St. Gerold, Cukrowicz Nachbaur Architekten (2008). Foto: Schiess
Abb. 132: Rechts oben und unten: Forschungshaus 2.0 in Bad Aibling, Florian Nagler Architekten (2023). Foto: Schels.

# VARIANTE 2: NATÜRLICHE BAUWEISE

## HOLZ-LEHM-HYBRIDBAU

Das Schließen der Stoffströme im natürlichen Kreislauf von Wachstum, Nutzung, Zersetzung und Regeneration ist der ursprüngliche Metabolismus, in dem ohne das Eingreifen von Menschen alle Ressourcen geführt werden. In dieser Variante wird das Kreislaufpotenzial einer natürlichen Bauweise untersucht, die im End of Life zurück in den biologischen Kreislauf geführt werden kann. Dafür sind primär schadstofffreie, nachwachsende Rohstoffe wie unbehandeltes Holz, aber auch natürliche mineralische Materialien wie Lehm geeignet.

Beispiele für eine natürliche Bauweise sind das Forschungshaus 2.0 von Florian Nagler Architekten, das aus einem Holz-Lehm-Hybridtragwerk besteht, und das Gemeindehaus St. Gerold von Cukrowicz Nachbaur Architekten, das auf eine leimfreie Holzbauweise und biologische Dämmstoffe setzt.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kriterien

„Materialien, die dem natürlichen Kreislauf entnommen werden, müssen entweder so verarbeitet und genutzt werden, dass sie ohne Störstoffe in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden können (z. B. durch Kompostierung), oder sie müssen dauerhaft in geschlossenen technischen Kreisläufen geführt werden.“[219]

Das Ziel dieser Bauweise ist, einen möglichst großen Anteil an Baustoffen aus natürlichen Quellen zu erreichen und diese in ihrer ursprünglichen Qualität zu verbauen, sodass sie im EoL zurück in den biologischen Kreislauf geführt werden können. Es werden nicht nur biotische Materialien, also nachwachsende Rohstoffe, in Betracht gezogen, sondern auch andere Baustoffe wie Lehm, die ohne synthetische Beimengungen verbaut und in sortenreiner Form in die Natur zurückgeführt werden können.[220] Hierfür ist eine zerstörungsfreie Lösbarkeit nicht bei jedem Material von Relevanz. Entscheidend ist eine Vermeidung von Vermischungen mit synthetischen Baustoffen.

Die Anforderungen der Bauaufgabe werden nicht zur Gänze aus diesen Stoffen erfüllt werden können. Oberstes Kriterium bei der Materialwahl ist stets die Eignung für die jeweilige Einbausituation – also ein Erfüllen der technisch-funktionalen Ansprüche. Falls keine unbehandelten Baustoffe aus dem biologischen Kreislauf dafür geeignet sind, werden auch behandelte Baustoffe aus dem biologischen Kreislauf betrachtet. Als letzte Option werden synthetische Produkte gewählt, wobei eine Beeinträchtigung der anderen Stoffe zu vermeiden ist.

Im Sinne einer Ressourceneffizienz wird auch für diese Materialien eine möglichst lange Nutzung auf gleichbleibendem Qualitätsniveau angestrebt. Eine Wiederverwendung oder -verwertung ist einer Nutzung mit Qualitätsverlust wie Kaskadennutzung oder Vererdung also vorzuziehen. Die Kompostierung als Rückgabe der gebundenen Nährstoffe wird im Urban Mining Index auch als Wiederverwertung betrachtet.[221] Im Pre-Use sind neben dem Einsatz nachwachsender Rohstoffe auch Recycling-Produkte erstrebenswert, sofern sie in den biologischen Kreislauf zurückgeführt werden können.

Für jede Gebäudefunktion und Bauteilschicht wird basierend auf Recherche und Erfahrungswerten eine Vorauswahl an Baustoffen getroffen, welche grundsätzlich geeignet sind. Diese Arbeit bemüht sich um eine möglichst umfängliche Betrachtung der in Frage kommenden Materialien, aber da sich der Baustoffmarkt regional und zeitlich schnell verändern kann, kann kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden.

219 Rosen, *Urban Mining Index*, 22.

220 Auch Hoffmann verortet die Verwendung und Vererdung von lokalem Lehm im biologischen Kreislauf. Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 44.

221 Siehe: Rosen, *Urban Mining Index*, 22.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Materialien

**aus dem biologischen Kreislauf:**

**biotische Materialien**
nachwachsende Rohstoffe, z.B:
Holz, Stroh, Wolle, Hanf

**naturbelassene mineralische Materialien**
Lehm
Kies, Sand (ungebunden)

## Fügetechnik

**möglichst Verzicht auf Fremdstoffe**

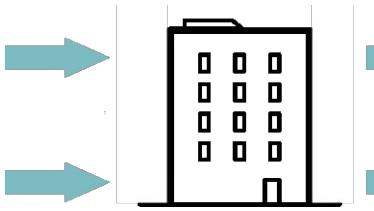
**Lehm: nasse Verbindung**
mörteln, verputzen mit selbem Baustoff

**Holz: trockene Verbindung**
monomaterielle Verbindung

## Angestrebte Kreislaufführung

**nachwachsende Rohstoffe**

**naturbelassene mineralische Materialien**



**Wiederverwendung**
**Kompostierung & Vererdung**
**(Wiederverwertung)**
**Kaskadennutzung**

**Wiederverwertung**
**Weiterverwertung**
**Vererdung**

## Maßnahmen zur Steigerung der Zirkularität

**möglichst Sortenreinheit & Schadstofffreiheit**
**Verzicht auf synthetische Stoffe**

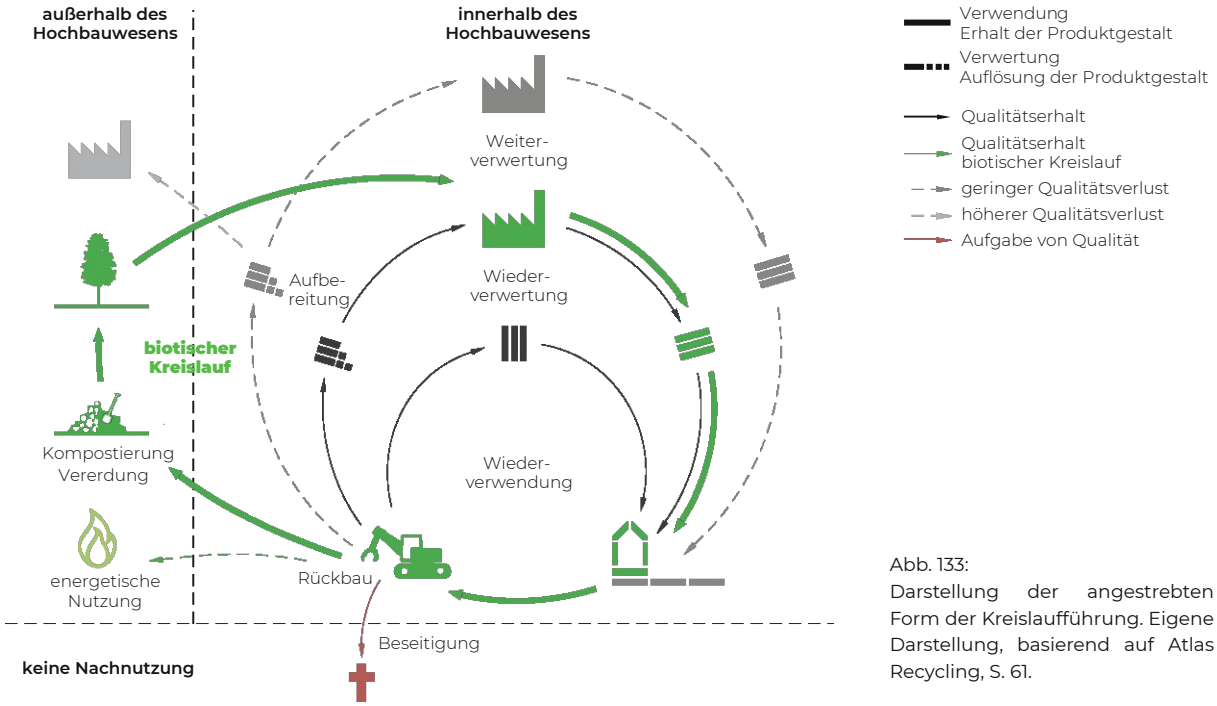



Abb. 133:
Darstellung der angestrebten Form der Kreislaufführung. Eigene Darstellung, basierend auf Atlas Recycling, S. 61.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Konstruktion

Zur Entwicklung eines Tragwerks aus möglichst naturbelassenen Materialien lohnt sich ein Blick auf traditionelle Bautechniken. Abgesehen von Sonderbauten aus Naturstein dominiert in der vernakulären Architektur Mitteleuropas der Holz-Skelettbau als Bauform – zur Verbesserung des Innenraumklimas und des Brandschutzes oftmals in Kombination mit Lehm.[222]

Auch heute kommt als tragender Baustoff unter den biotischen Materialien beim mehrgeschossigen Bauen nur Holz in Frage. Der Einsatz von Lehm als konstruktives Bauteil erlebt aktuell eine Renaissance. Inwiefern die Kombination dieser zwei Materialien für die Konstruktion dieser Variante geeignet ist, wird nachfolgend diskutiert. Zunächst werden die Potenziale des Holzbaus betrachtet, bevor die Entwicklungen im Lehmbau und seine Eignung für diese Bauaufgabe evaluiert werden. Basierend auf diesen Überlegungen wird das Tragwerk dieser Variante festgelegt.

## Holzbau

**Nachhaltiger Anbau**

Holz ist in mehrfacher Hinsicht ein für die Kreislaufwirtschaft sehr geeignetes Baumaterial. Als meistverwendeter nachwachsender Rohstoff und Teil des biologischen Kreislaufs ist sein Stoffstrom von Natur aus geschlossen. Eine dauerhafte und vollständige Kreislaufführung gelingt jedoch nur, wenn nicht mehr Holz dem Wald entnommen wird, als nachhaltig wieder nachwachsen kann. Dieser Grundsatz wurde bereits im 18. Jahrhundert von Hans Carl von Carlowitz formuliert und gilt als Begründung des Nachhaltigkeitsbegriffs.[223] Dieses Handeln ist deshalb so entscheidend, da Hölzer im Vergleich zu anderen biotischen Baustoffen eine sehr lange Wachstumsphase haben – die hierzulande meistverwendete Bauholzart, die Fichte, wächst erst nach 80 bis 100 Jahren auf eine für Bauholz nutzbare Größe heran.[224] Heute ist eine nachhaltige Waldbewirtschaftung in Österreich gesetzlich verpflichtend – darüber hinaus sind drei Viertel der österreichischen Waldfläche mit dem PEFC-Siegel für zertifizierte Nachhaltigkeit ausgezeichnet.[225] Zudem wächst in Österreich, das noch vor Deutschland das flächenbezogen holzreichste Land Europas ist, der Waldbestand seit Jahren an. Eine deutsche Modellrechnung aus dem Jahr 2015 belegt, dass dort bereits mit einem Drittel des jährlich nachhaltig geernteten Holzes alle Neubauten in Holzbauweise errichtet werden könnten.[226] Schlussfolgernd können also Bedenken, dass in Österreich nachhaltig nicht genug Holz zum Bauen verfügbar sei, ausgeräumt werden.

**Holz als $CO_2$-Speicher**

Doch Holz spielt nicht nur als Baumaterial eine bedeutende Rolle: Indem der Wald $CO_2$ aus der Atmosphäre bindet, trägt er einen wichtigen Teil im Kampf gegen den Klimawandel bei. In der energetischen Verwertung, wo rund die Hälfte des geernteten Holzes direkt landet, wird der in einem jahrzehntelangen Prozess gebundene Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre freigesetzt. Um diese Treibhausgase nachhaltig aus der Atmosphäre binden, muss mehr Holz möglichst langfristig stofflich genutzt werden – zum Beispiel als Tragstruktur im Hausbau. Ein Gebäude aus Holz stellt somit einen temporären Kohlenstoffspeicher dar.[227]

*„Der Atmosphäre ist es recht egal, ob das freigesetzte $CO_2$ von Holz oder von Erdöl kommt."*[228]

**Verwertungswege**

Unbehandeltes Holz kann kompostiert werden, wodurch wertvolle Nährstoffe zurück in den biologischen Kreislauf gelangen. Weil der Kompostierungsprozess bei Hölzern verhältnismäßig lange

222 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 42–46.

223 Siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*, 13.

224 Siehe: naturkalender.at, „Fichte".

225 Das PEFC-Siegel (**P**rogramme for the **E**ndorsement of **F**orest **C**ertification-Siegel) ist eine von der Holzindustrie verliehene Zertifizierung für besonders nachhaltige Forstwirtschaft. Siehe: PEFC Austria, „Anteil PEFC-Zertifizierter Waldbewirtschaftung in Österreich"; proHolz Austria, „Der Wald wächst".

226 Siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*.

227 Siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, 23.

228 Persönliches Interview mit Höfferl, Bernd von pro:Holz Austria, digital, am 03.05.2023.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

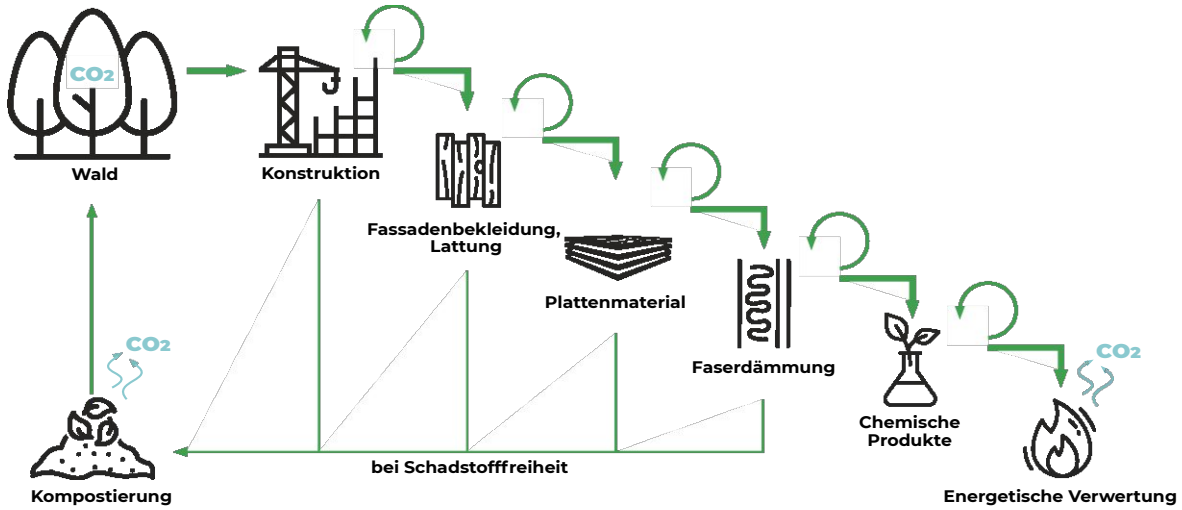



Abb. 134: Kaskadische Nutzungswege von Holz. Solange das Holz störstoffrei bleibt, ist eine Kompostierung möglich. Ansonsten bleibt nur die energetische Verwertung, die möglichst lange hinauszuzögern ist.. Eigene Darstellung.

dauert und zudem große Mengen an Altholz anfallen, spielt dieser Verwertungsweg in der Praxis jedoch eine sehr untergeordnete Rolle.[229]

Das übliche Verwertungsszenario für Altholz ist aktuell leider die direkte energetische Verwertung. Dadurch – wie auch durch eine Kompostierung – wird das im Holz gebundene $CO_2$ wieder freigesetzt. Nur durch eine weiterhin stoffliche Verwertung bleibt das $CO_2$ über den Gebäudelebenszyklus hinweg gebunden.

Bisher werden nur etwa 20% des Holzes aus Gebäuden stofflich verwertet, – fast ausschließlich als Weiterverwertung zur Spanplattenproduktion[230] – da laut Bernd Höfferl von Pro:Holz Austria die finanziellen Anreize für eine stoffliche Verwertung bisher zu gering sind.[231] Diese Kaskadennutzung, also das Hintereinanderschalten stofflicher Verwertungsarten, ist nicht nur ressourceneffizient, sondern verlängert den Zeitraum, in dem der Kohlenstoff im Holz gebunden bleibt und ist somit in mehrfacher Hinsicht ökologisch sinnvoll.[232] Wesentliche Kriterien für die stoffliche Verwertbarkeit von Holz sind die Schadstofffreiheit, Sortenreinheit und einfache Rückbaubarkeit. Besonders auf chemischen Holzschutz sollte unbedingt verzichtet werden, da dieser jegliche Weiterverwertung ausschließt. Aktuell beeinträchtigen Anteile von synthetischen Leimen, zum Beispiel von KLH oder Spanplatten, eine kaskadische Nutzung kaum. Durch eine perspektivisch differenziertere Sortierung der Althölzer und verschärfte Regeln bezüglich der Schadstofffreiheit könnte sich dies jedoch ändern. Mit dem Einsatz möglichst naturbelassener Hölzer und durch die Reduktion stofffremder Verbindungsmittel wie Metall und Leim besteht das größte Potenzial einer zukünftigen Verwertung auf hoher Qualitätsstufe. Zur Erhöhung der Ressourceneffizienz ist nicht nur ein höherer Anteil an stofflicher Verwertung von Altholz anzustreben, sondern auch das Durchlaufen mehrerer Kaskadenstufen und die Wiederverwendung der Produkte auf ihrer jeweiligen Stufe.[233] Der Einsatz von Holz in der Tragkonstruktion sollte stets die oberste Kaskade sein. Für eine möglichst lange Weiternutzung ist deshalb besonders bei der Konstruktion auf einen möglichst geringen Fremdstoffanteil – also synthetische Leime und Metallverbindungen – zu achten.

**Einsatzmöglichkeiten**

Dank seiner Materialeigenschaften ist Holz vielseitig einsetzbar. Es ist bezogen auf seine Masse sehr stark belastbar und kann Zug-, Druck und Biegekräfte aufnehmen. Es kann also für horizontale und vertikale Konstruktionen, genauso wie als Dämmung und Fassade verwendet werden. Eine Schwachstelle ist die Durchfeuchtung, weshalb sich im Holzbau keine erdberührten Bauteile ausführen

229 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 61.

230 Siehe: Hillebrandt u. a., 65.

231 Persönliches Interview mit Höfferl, Bernd von pro:Holz Austria, digital, am 03.05.2023.

232 Siehe: Böhmer u. a., *Effiziente Nutzung von Holz: Kaskade versus Verbrennung*, 87–89; Laut einem Report des Umweltbundesamt ist die Kaskadennutzung auch volkswirtschaftlich vorteilhaft, da die Wertschöpfungskette verlängert wird. Siehe hierzu: Böhmer u. a., 90.

233 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 48, 65.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 135: Brettstapelelement wird mit Hartholzdübel leimfrei verbunden. Foto: Holzbau Sutter.



Abb. 136: Bretter werden mittels Schwalbenschwanz leimfrei zu einer Diagonalplatte gefügt. Foto: GFM

lassen und bewitterte Elemente stets hinterlüftet sein sollten. Die geringe Dichte, weswegen Holz ein recht gut dämmendes Material ist, birgt Nachteile im Bereich Schallschutz. Durch das Einbringen zusätzlicher Massen oder schallentkoppelter Schichten ist dieser jedoch zu bewerkstelligen.[234] Auch die geringe thermische Masse ist ein übliches Problem bei Holzbauten, besonders wenn eine Leichtbauweise gewählt wird. Der Brandschutz, besonders die geforderte Nichtbrennbarkeit von Oberflächen im Bereich des Fluchtwegs, schränkt den Einsatz von Holz ein.

Der Holzbau unterscheidet sich in zwei prinzipiell unterschiedliche Bauweisen: der Holzmassivbau und das Bauen mit stabförmigen Elementen. Im Atlas Mehrgeschossiger Holzbau werden für beide Prinzipien Bauweisen vorgestellt, die aufgrund ihrer leimfreien Fügetechnik ein hohes Potenzial für eine hochwertige Kreislaufführung haben (siehe Abb. 138 und 139). Während massives Bauen eine höhere Tragfähigkeit und Scheibenwirkung aufweist, ist es auch mit wesentlich höherem Materialaufwand verbunden. Dieser Materialaufwand sollte nur in Kauf genommen werden, wenn er statisch oder bauphysikalisch notwendig ist, da ein hoher Nutzungsdruck auf dem Material lastet.[235] Im Holzmassivbau wurde in der jüngeren Vergangenheit einige Systeme entwickelt, die durch monomaterielle Fügeteile auf Leim- und Metallverbindungen verzichten können. Besonders Brettstapelelemente, die durch Hartholzdübel oder geometrisches Ineinandergreifen der Bretter zusammengehalten werden, eignen sich gut. Sie erreichen im horizontalen Einsatz bei einachsiger Ausrichtung auch geringere Aufbauhöhen, also einen geringeren Materialbedarf, als Kreuzlagenhölzer.[236] Die Aussteifung dieser Elemente durch Massivholz-Diagonalplatten anstatt einer OSB-Beplankung reduziert den Leimbedarf weiters. Hier gibt es bereits Lösungen, die durch zimmermannsmäßige Verbindungen der Platten auch den Einsatz von Nagelverbindungen reduzieren können.[237] Somit können Holzmassivelemente nahezu sortenrein und unbehandelt hergestellt werden.

Die aus stabförmigen Elementen bestehenden Holzskelett- und Holztafelbauweise setzen Holz nur in dem Maß ein, wie es benötigt wird. Bei üblichen Einbausituationen können naturbelassene Vollhölzer verwendet werden, die durch Schraub- oder zimmermannsmäßige Verbindungen leicht rückgebaut werden können. Bei der Tafelbauweise kann in den Zwischenräumen der Ständer bereits Dämmung integriert und somit Wandstärke reduziert werden, was sie gemeinsam mit einem hohen Vorfertigungsgrad und der effizienten Materialnutzung zur wirtschaftlichsten Holzbauweise und besonders geeignet für den Einsatz als thermische Hülle macht.[238] Auch hier kann eine Aussteifung mit Massivholz-Diagonalplatten erfolgen. Indem die Ständer durchgehend verbaut, also nicht durch den Rähm unterbrochen werden, erreicht die Tafelbauweise ohne Setzungs-Probleme auch eine vielgeschossige Belastbarkeit. Als horizontale stabförmige Elemente kommen Balkendecken in Frage, die durch eine Brettschalung ebenfalls leimfreie ausgeführt werden können.

234 Für Standardaufbauten und ihrer Schallschutzeigenschaften siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*, 117–19.

235 Zu Kohlenstoffspeicher versus Ressourceneffizienz in der Konstruktion siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, 26.

236 Siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, 64.

237 Ein Beispielprodukt ist: Massivholz Junker, „GFM-Diagonalplatte"; Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 49.

238 Persönliches Interview mit Höfferl, Bernd von pro:Holz Austria, digital, am 03.05.2023. Aussage bezogen auf das Fallbeispiel Lerchenstraße.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

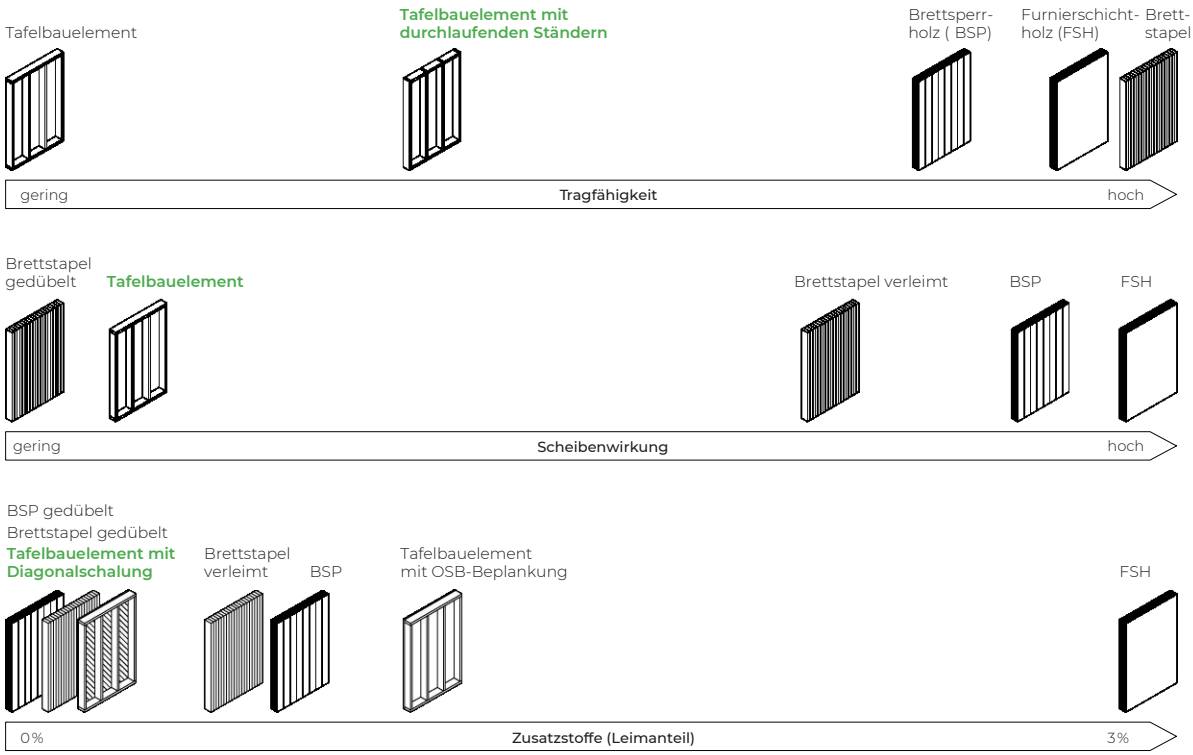



Abb. 137: Vergleich vertikaler Holzbauelemente auf deren Tragfähigkeit, Aussteifung und Leimanteil. In Grün ist die gewählte Bauweise hervorgehoben. Eigene Darsellung nach Atlas Mehrgeschossiger Holzbau, S. 64.

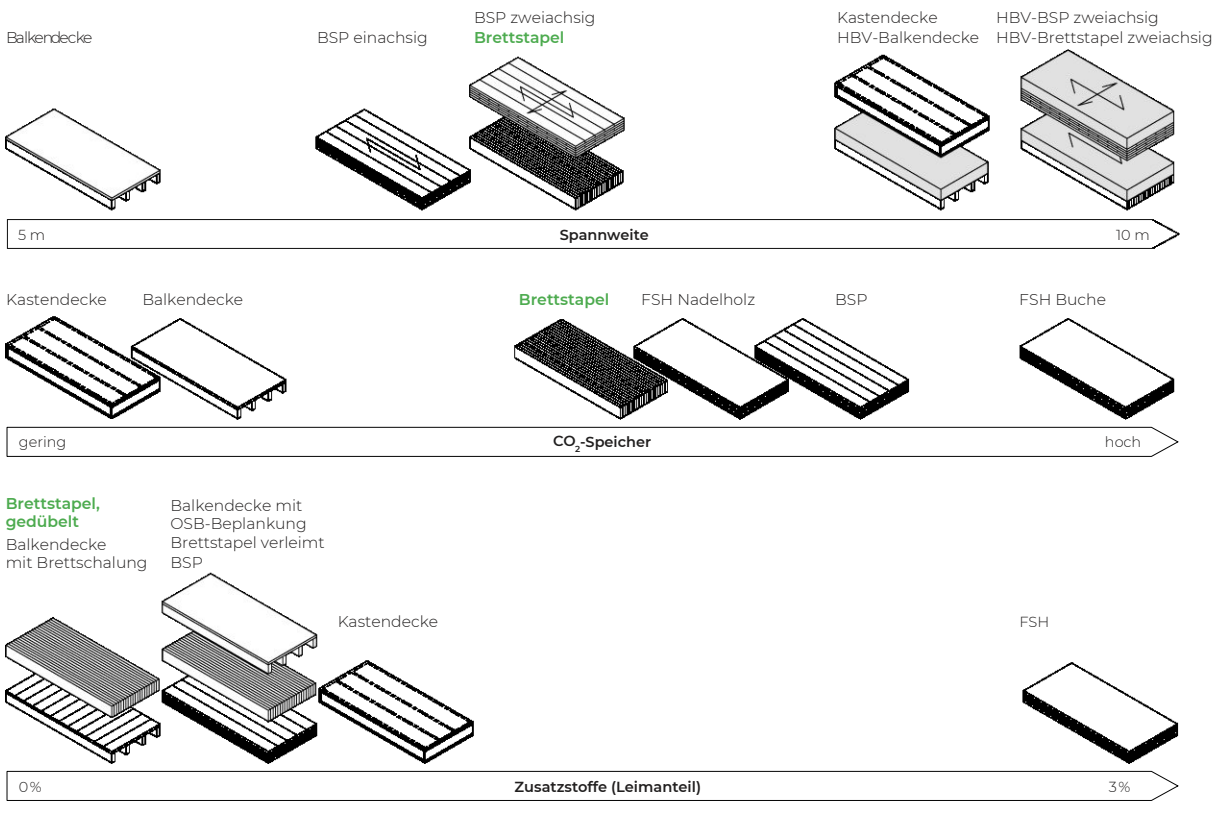



Abb. 138: Vergleich horizontaler Holzbauelemente auf deren Spannweite, CO2-Bindung und Leimanteil. In Grün ist die gewählte Bauweise hervorgehoben. Eigene Darsellung nach Atlas Mehrgeschossiger Holzbau, S. 65.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

**Brandschutz**
Bei Holz als brennbarem Material ist stets auch der Brandschutz zu beachten. In Vorarlberg gelten diesbezüglich gewisse Erleichterungen zu den Vorgaben der OIB-Richtlinie 2. Laut der Vorarlberger Bautechnikverordnung müssen „frei stehende, an mindestens drei Seiten auf eigenem Grund oder von Verkehrsflächen für die Brandbekämpfung von außen zugänglichen Wohngebäude der Gebäudeklasse 5 mit nicht mehr als sechs oberirdischen Geschossen“ – in diese Kategorie fällt das Fallbeispiel – nur eine Feuerwiderstandsdauer von 60 anstatt 90 Minuten nachweisen.[239] Die Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen werden jedoch nicht herabgesetzt.

Ein Feuerwiderstand von 60 Minuten lässt sich bei Sichtbauteilen in Holz gut erreichen, indem die Bauteile auf Abbrand dimensioniert werden. Flächige Elemente haben hier den Vorteil, dass nur eine Seite vor einem Brand geschützt werden muss, wohingegen stabförmige Elemente allseits überdimensioniert werden müssen.[240] Zum Brandverhalten innerhalb von Wohneinheiten gibt es keine Vorgaben, wodurch hier sichtbelassene Holzkonstruktionen zulässig sind. In Treppenhäusern fordert die OIB-Richtlinie 2 jedoch den Einsatz von nichtbrennbaren Oberflächen (A2).[241] Hier kann Holz nur eingesetzt werden, wenn es mit einem nichtbrennbaren Material bekleidet ist.

**Zusammenfassung**
Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft ist sehr gut geeignet für die Kreislaufwirtschaft, wobei auf einen möglichst ressourcenschonenden und fremdstofffreien Einsatz zu achten ist. Um eine direkte thermische Verwertung des Altholzes zu vermeiden, ist eine vielstufige Kaskadennutzung anzustreben. Dafür sind besonders die konstruktiven Bauteile möglichst naturbelassen, ohne schwer lösbare Zusätze wie Leim und Metallverbindungen, auszuführen.

Sowohl in der Massivbauweise als auch bei stabförmigen Konstruktionen existieren dafür bereits Lösungen. Unter den Deckensystemen sind gerichtete Aufbauten wesentlich naturbelassener herzustellen (zum Beispiel als Balkendecke oder Brettstapeldecke) als ungerichtete Systeme, wo hauptsächlich verleimtes Brettsperrholz in Frage kommt. Wenn die Decken sichtbar belassen werden, was aufgrund der Einstofflichkeit vorteilhaft ist, hat die Brettstapeldecke als flächiges Element gegenüber der Balkendecke Vorteile im Brandschutz. Bei den Wandkonstruktionen, besonders bei der die thermischen Hülle, ist eine Leichtbaukonstruktion zielführender, da sie die Dämmung in die Konstruktionsebene integrieren kann.

75% des österreichischen Holzes stammt aus zertifiziert nachhaltigem Anbau. Für die Bemessung des Urban Mining Index, wo bei nachwachsenden Rohstoffen die zertifizierte Nachhaltigkeit relevant ist, wird daher pauschal bei Holzprodukten immer angenommen, dass 75% aus zertifiziert nachhaltigen Quellen stammen.

239 Siehe: § 11, Abs. 2, Bautechnikverordnung Vorarlberg

240 Annahme: Abbrandrate von 0,7 mm/min multipliziert mit der Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten ergibt eine Dicke von 4,2 cm pro Sichtseite. Nach: Kaufmann, Krötsch, und Winter, Atlas Mehrgeschossiger Holzbau, 75.

241 Siehe: OIB, *OIB-Richtlinie 2. Brandschutz*, Tabelle 1a.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




Abb. 139: Materialität und schematische Herstelltechnik der drei gängigen Lehmbautechniken für tragendes Mauerwerk. Darstellung: TERRA Award - Pauline Sémon.

## Lehmsteine

Der weltweit in großen Mengen verfügbare natürliche Rohstoff Lehm ist eines der ältesten Baumaterialien der Menschheitsgeschichte. Auch im deutschsprachigen Raum wurde Lehm in verschiedenen Anwendungsformen bis in die 1950er Jahre als tragender Baustoff verwendet. Mit der Verbreitung neuer industrieller und vermeintlich haltbarerer Baustoffe wie Stahlbeton und gebrannter Ziegel verlor ungebrannter Lehm massiv an Bedeutung. In jüngster Zeit jedoch rückt das Material unter Bautätigen wieder ins Zentrum des Interesses – besonders aufgrund seiner sehr günstigen ökologischen und bauklimatischen Eigenschaften.[242] In Deutschland gab es jüngst große Fortschritte in der Reglementierung von Lehmbaustoffen, weshalb sich ein Blick ins Nachbarland lohnt – schließlich können auch internationale Normen als Ausschreibungsgrundlage verwendet werden.

### Lehmbautechniken

Aufgrund des jahrzehntelangen Desinteresses ist Lehmbau heute im Vergleich zu den anderen verbreiteten Baumethoden sehr rückständig im Bezug auf die industrialisierte Herstellung. Viele Prozesse sind wenig maschinalisiert und normiert – durch den großen Anteil an Handarbeit und Sonderlösungen sind Lehmkonstruktionen trotz der enorm geringen Materialkosten oft ein Luxusprodukt.

*„Aufgrund einiger aufregender Bauvorhaben wird der Stampflehmbau in der Baufachöffentlichkeit deutlich wahrgenommen. Die tatsächliche Verbreitung ist jedoch gering, was mit den hohen Erstellungskosten zusammenhängt.“*[243]

Die drei wesentlichen Techniken zur Errichtung einer tragenden Lehmwand unterscheiden sich in ihrer Verbreitung und Skalierbarkeit sehr: Lehmwellerbau spielt in Mitteleuropa im Neubau faktisch keine Rolle. Aufgrund des großen Arbeitsaufwands, keiner Möglichkeit zur Vorfertigung und langer Trocknungszeiten wird er höchstens bei Sanierungen und Eigenbauprojekten verwendet. Stampflehmbau, welcher durch die Firma Lehm-Ton-Erde von Martin Rauch enorm zur Popularität von Lehmarchitektur beigetragen hat, wird im deutschsprachigen Raum besonders aufgrund seiner ästhetischen Qualitäten geschätzt, weshalb er meist als Sichtbauteil ausgebildet wird. Die damit verbundene anspruchsvolle Herstellung verursacht sehr hohe Kosten und wird hauptsächlich bei repräsentativen Bauwerken in Kauf genommen. Die dritte Technik, tragendes Lehmsteinmauerwerk hat laut Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert, einem der führenden deutschsprachigen Lehmbauexpert:innen, das größte Potenzial, auch in der breiten Masse Anwendung zu finden.[244] Die Lehmsteine werden heute schon von einigen Firmen in größerem Stil produziert und können analog zu anderen Steinen vermauert werden. Die deutsche Norm DIN 18940 ermöglicht es seit 2023, bis zu 5 Geschosse aus tra-

242 Siehe: Schroeder, *Lehmbau*, V–VI, 19–21.

243 Röhlen und Ziegert, *Lehmbau-Praxis*, 177.

244 Persönliches Gespräch mit Prof. Dr.-Ing. Christoph Ziegert, im Rahmen einer Diskussionsrunde des Vereins Young Earth Builders, Wien, 25.01.2023.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 140: Die Lehmsteine der Firma Conclay werden wie Kalksandsteine im Großformat und mittels Versetzhilfe vermauert. Foto: Lehmbaustoffe Conclay



Abb. 141: Tragendes Lehmsteinmauerwerk und Holz-Ringbalken. Forschungshäuser 2.0, Bad Aibling, Florian Nagler Architekten und ZRS Ingenieure. Foto Schels.

gendem Lehmsteinmauerwerk normkonform zu realisieren.[245]

Die mitteldeutsche Firma Kimm Baustoffe ist mit ihrer Sparte Lehmbaustoffe Conclay eines der Unternehmen, die sich aktuell mit industriell gefertigten Lehmsteinen am Markt etablieren wollen. Die Firma, die eigentlich auf Schüttgut-, Beton- und Kalksandsteinprodukte spezialisiert ist, kann aus ihrer eigenen Kiesgrube den Lehm für die Steine gewinnen und nutzt ihre Kalksandsteinanlage zur Produktion der formgepressten Lehmsteine. Da der Lehm oberhalb des Kiesabbaugebiets liegt, ist er für Conclay ein Nebenprodukt, und indem er mit der Abwärme ihrer anderen Produkte getrocknet wird, benötigt er fast keine Energie in der Herstellung.[246]

*„Die Baustoffpreise werden maßgeblich von den Energiepreisen bei der Herstellung, den Rohstoffpreisen und der $CO_2$-Bepreisung beeinflusst. Hier ist der Lehm klar im Vorteil: keine energieintensiven Bindemittel mit Kalk und Zement, kaum Energie bei der Herstellung notwendig, kaum $CO_2$-Freisetzung in der Produktion.“*[247]

**Einsatzmöglichkeiten**

Mit der Entwicklung immer größerer Formate und eines Lehm-Dünnbettmörtels können die Lehmsteine auf der Baustelle fast genauso gehandhabt werden wie andere Mauerwerksbaustoffe. Einer der entscheidenden Vorteile von reinen Lehmbauten, die gute Replastizierbarkeit, ist gleichzeitig jedoch eine der größten Herausforderungen: Lehmmauerwerk verliert bei Kontakt mit Wasser schnell an Druckfestigkeit und damit Tragfähigkeit. Lehmbauten sind also unbedingt bei Bau und Nutzung vor Wasser zu schützen. Auch wenn es Beispiele für bewitterte und erdberührte tragende Bauteile aus Lehm gibt, entspricht dies nicht den Materialeigenschaften. Zudem ist Lehmmauerwerk – wie auch das Ziegelmauerwerk – primär auf Druckbelastung und somit vertikale Bauteile ausgelegt. Forschungsprojekte, Lehm in Kombination mit zugbelastbaren Bauteilen (meist Holz), auch für Decken einzusetzen, stehen noch an den Anfängen.[248]

Die DIN 18940 bringt große Erleichterungen für den Lehmbau. Gleichzeitig bleiben wesentliche Anforderungen. So muss ein tragendes Lehmsteinmauerwerk für das Fallbeispiel mindestens 24 cm dick sein und darf höchstens über fünf Geschosse eingesetzt werden. Grund dafür ist, dass Lehmsteine nur eine begrenzt hohe Druckfestigkeit erreichen können. Außerdem sind laut Norm – wie bei gemauerten Konstruktionen üblich – „unter oder in jeder Deckenebene [...] folgende Aussteifungselemente anzuordnen: Ringanker in Verbindung mit einer Deckenscheibe oder Ringbalken auf allen tragenden Wänden. Geeignet sind Ziegel-U-Schalen mit Ortbetonergänzung, [Ortbetonringbalken] oder Ringbalken aus Holz.“[249]

245 Die exakte Begrenzung ist eine maximale Höhe von 13 m OKF. Für Gebäude mit nicht mehr als 3,25 m durchschnittlicher Geschosshöhe, also auch das Fallbeispiel, sind somit 5 Geschosse möglich. Siehe: Deutsches Institut für Normung, „DIN 18940:2023-06. Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung“, 5.

246 Schriftliches Interview mit Dipl.-Ing. Susanne Fröhlich von der Firma Kimm GmbH & Co. KG, 11.05.2023

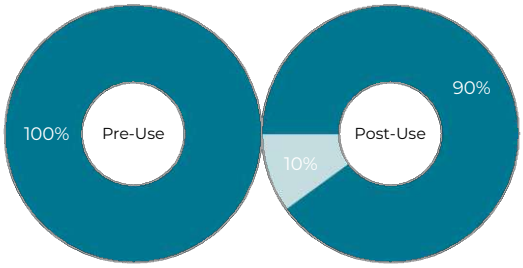
247 Schriftliches Interview mit Dipl.-Ing. Susanne Fröhlich von der Firma Kimm GmbH & Co. KG, 11.05.2023

248 Zu nennen sind die Forschungsprojekte Timber Earth Slab der TU München und Minimal Mineral der UdK Berlin sowie das Bauprojekt Hortus in Kooperation mit Lehm.Ton.Erde. Siehe: Technische Universität München, „Timber Earth Slab“; Universität der Künste Berlin, „Minimal Mineral“; Huber u. a., „Holz-Lehm-Decken Swiss Made“.

249 Deutsches Institut für Normung, „DIN 18940:2023-06. Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung“, 10.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




*Mauerwerkswand aus Lehmsteinen und ohne Verschmutzungen*

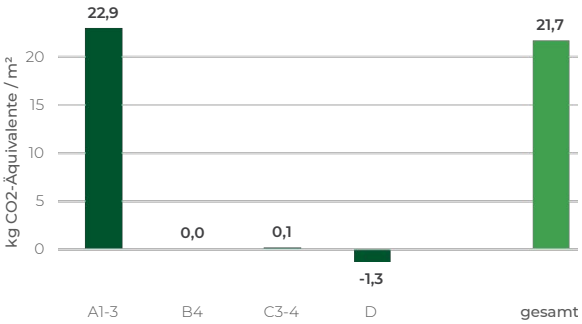



Abb. 142: Kreislaufpotenzial und Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus einer 20 cm dicken, sauberen tragenden Lehmsteinwand. Der Lehm ist ein Nebenprodukt aus der Kiesgewinnung und deshalb als Nebenprodukt recycelt. . Eigene Darstellung.

Lehm hat hervorragende baubiologische Eigenschaften. Er kann die Luftfeuchte in Innenräumen auf natürliche Art regulieren und sogar Schadstoffe binden. Die Feuchteabgabe hat im Sommer einen kühlenden Effekt und verhindert im Winter zu trockene Heizungsluft. Diese Eigenschaft führt neben der als thermische Speichermasse geeigneten hohen Rohdichte, die mit 2200 kg/m³ vergleichbar mit Beton ist, zu besonders angenehmen Raumklimata in Lehmbauten.[250] Die hohe Rohdichte führt zudem zu vergleichbar guten Schallschutzeigenschaften wie Beton. Als mineralischer Baustoff ist Lehm ohne Beigabe von biologischen Fasern nicht brennbar. Eine 24 cm dicke Wand erreicht die Feuerwiderstandsklasse F60.[251]

**Verwertungswege**

Die Potenziale der Kreislauffähigkeit sind bei allen Lehmbaustoffen sehr hoch. Eine Vielzahl an historischen Bauten belegt, dass Lehmkonstruktionen bei fachgerechtem Einsatz mehrere Hundert Jahre überdauern können. In der deutschen Norm sind chemische, nicht reversible Stabilisatoren, also Beimischungen von Zement oder anderen synthetischen Stoffen verboten und verringern laut Christoph Ziegert zudem die statische Performance.[252] Lehmbaustoffe ohne diese Stabilisatoren sind unbegrenzt kreislauffähig – durch Beifügen von Wasser wird das Material wieder plastisch und kann mit minimalem Energieaufwand in einen neuen Baustoff geformt werden. Da es sich bei Lehm um reversibel gebundenes Erdmaterial mit höchstens organischen Zusätzen handelt, kann es theoretisch vor Ort wieder vererden. Wenn eine Deponierung unvermeidlich ist, kann die Kategorie Erdaushub angestrebt werden anstatt der wesentlich teureren Kategorie Baumischabfall.[253] Im Pre-Use ist Lehm aus der Grube faktisch ein nicht erneuerbarer Primärrohstoff. Da aktuell alle etablierten Lehmbaustoff-Firmen ihren Rohstoff aus ohnehin anfallendem Abraum von Kiesgruben beziehen, sind diese Produkte als Recycling-Stoffe anzusehen.[254] Wie in Abb. 143 zu sehen ist, erreicht eine Lehmsteinwand, die sortenrein rückgebaut werden kann, ein fast hundertprozentiges Kreislaufpotenzial.

**Zusammenfassung**

Unter den tragenden Lehmbautechniken ist Mauerwerk am geeignetsten für den breiten Einsatz. Das geringe Treibhauspotenzial, die baubiologischen Vorteile und die sehr günstigen Kreislaufeigenschaften sind Argumente für tragende Lehmsteine, deren Gewicht in Zukunft eher zu- als abnehmen wird.

Zu beachten sind die Wasserlöslichkeit, die das Einsatzspektrum einerseits einschränkt, aber andererseits die Rückbaubarkeit enorm vereinfacht, sowie das große Gewicht, welches wiederum als thermische Speichermasse vorteilhaft ist. Die Nichtbrennbarkeit und ein guter Schallschutz machen es besonders geeignet für tragende Innenwände.

250 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 208.

251 Siehe: Deutsches Institut für Normung, „DIN 18940:2023-06. Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung“, 22.

252 Vortrag von Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert: „Lehmbau volle Kraft voraus“, von TU Wien und Netzwerk Lehm eV, Wien, 24.01.2023.

253 Persönliches Interview mit M.Sc. Simon Breidenbach von der Firma Claytec GmbH & Co KG, digital, vom 01.06.2023.

254 Persönliches Interview mit M.Sc. Simon Breidenbach von der Firma Claytec GmbH & Co KG, digital, vom 01.06.2023.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Fazit & Entscheidung

Holz und Lehm sind beides Materialien mit einem sehr hohen Kreislaufpotenzial und ergänzen sich gut in ihren Eigenschaften. Holz mit seiner für das Gewicht sehr hohen Zug- und Druckbelastbarkeit eignet sich hervorragend für die Außenwände und Decken. Lehm als nichtbrennbarer Massivbaustoff kann als Innenwandkonstruktion die thermische Masse und ein gutes Raumklima stellen. Fast die gesamte Tragkonstruktion lässt sich aus reinen Holz- und Lehmbauteilen fertigen.

Der Tragwerksentwurf des Fallbeispiels, der bereits eine Holz-Hybridbauweise berücksichtigt, lässt sich auch in dieser Variante übernehmen. Grundsätzlich ließen sich alle oberirdischen konstruktiven Bauteile aus Holz fertigen. Der erforderliche Schall- und Brandschutz, besonders im Fluchttreppenhaus, lässt sich mit Holz jedoch nur durch einen vielschichtigen Aufbau und die Zuhilfenahme einer nichtbrennbaren Oberfläche erreichen. Das Lehmsteinmauerwerk, das ein enorm hohes Kreislaufpotenzial hat, erfüllt diese Anforderungen allein mit einer 24 cm dicken sortenreinen Wand. Deshalb werden die tragenden Innenwände aus Lehmsteinmauerwerk ausgeführt.

Für die Außenwand wird eine Holztafelbauweise gewählt. Hier kann die Dämmung formschlüssig in die Konstruktionsebene gefügt werden und muss nicht, wie bei Massivbauweisen, außen geklebt werden. Dies erhöht die Sortenreinheit von Konstruktions- und Dämmmaterial. Als Deckenkonstruktion wird eine mit Hartholzdübeln gefügte Brettstapeldecke mit einer Diagonalschalung als Aussteifung gewählt, da sie erstens fast komplett ohne stofffremde Verbindungsmittel auskommt und zweitens als Massivbauteil besser für die Überdimensionierung auf Abbrand geeignet ist als eine Balkendecke. Um den Brandschutzanforderungen zu genügen, muss sie im Treppenhaus beplankt werden.

Die sekundäre tragende Achse in den Wohnungen, die zur Reduktion der Spannweite nötig ist und im Bestandshaus B aus Brettsperrholz besteht, wird in dieser Variante in eine Skelettkonstruktion aus Vollholz-Träger und Stützen aufgelöst (siehe Abb. 143). Dadurch kann der Ressourceneinsatz reduziert und auf Leimholz verzichtet werden. Auch für den Ringbalken, der laut Norm für das Lehmsteinmauerwerk benötigt wird, wird Vollholz verwendet, was zusätzlich den Anschluss der Holzdecken erleichtert. Mit einer Ummantelung aus Lehmputz kann der geforderte Brandwiderstand im Treppenhaus erreicht werden.[255] Da Lehm ein sehr weiches Material ist, kann der Träger zum Erlangen einer kraftschlüssigen Verbindung schlicht auf die Lehmsteinmauer festgeschraubt werden.[256]

Für die Ausbildung erdberührter Bauteile sind beide Materialien nicht geeignet, denn beide sind nicht feuchtebeständig. Für die Errichtung eines Kellers ist Stahlbeton praktisch alternativlos. Da in der vorigen Variante bereits eine kreislaufoptimierte Konstruktion des Kellers mit Stahlbeton ermittelt wurde, erfolgt die Konstruktion der Untergeschoss-Bauteile hier analog.

255 Siehe: Liblik, Just, und Küppers, „Eigenschaften von Lehmputzen für den Brandschutz von Holzkonstruktionen".

256 Diese einfache Verbindung schlägt auch Martin Rauch in seinem Grundlagenwerk „Gebaute Erde" über Konstruieren mit Lehm vor. Siehe Anschluss Stampflehm und Überlager: Rauch, *Gebaute Erde. Gestalten & Konstruieren mit Stampflehm*, 97.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

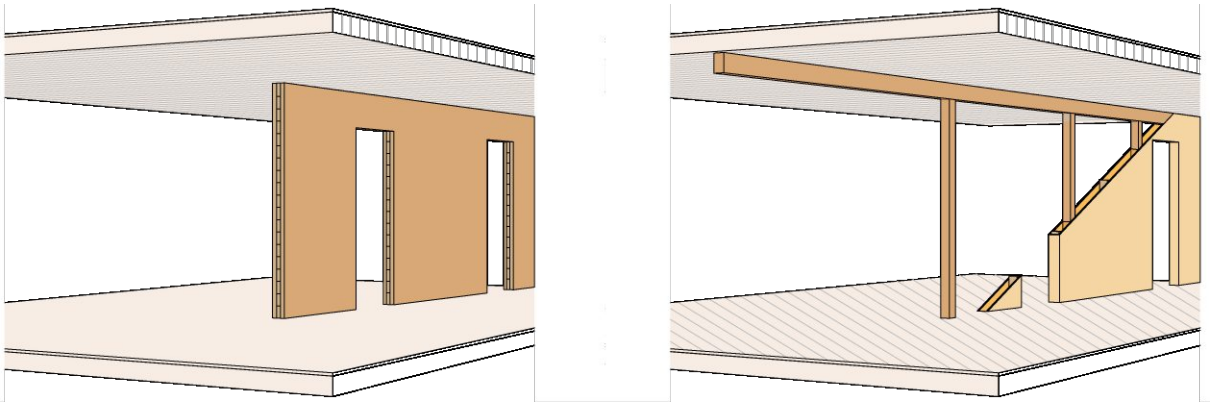


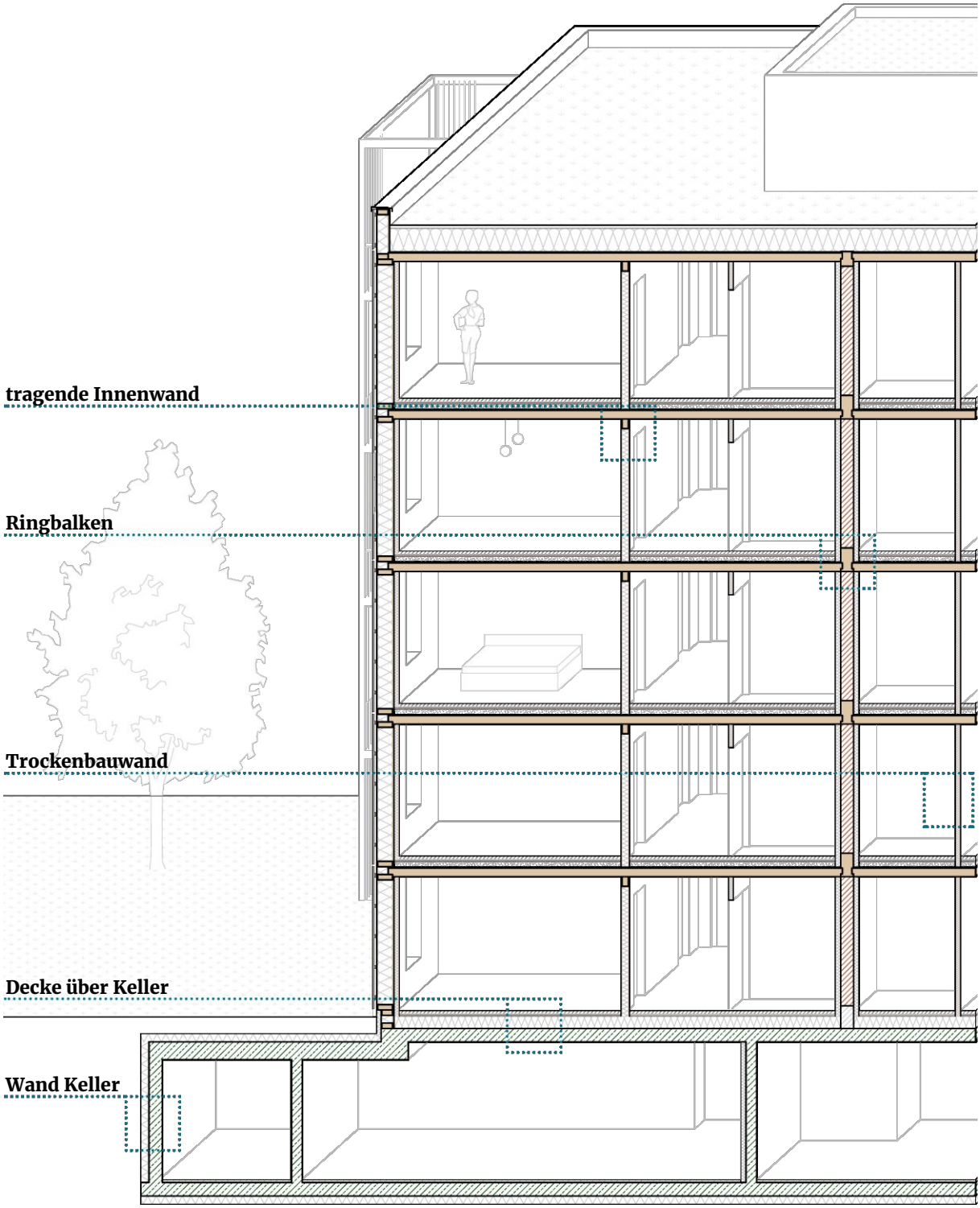
Abb. 143: Schemaaufbau der tragenden Wohnungs-Innenwand. Vergleich Tragstruktur von Haus B (links) und Variante 2 (rechts). In Variante 2 wird nicht nur Holzmasse eingespart, sondern auch die Flexibilität des Grundrisses wesentlich erhöht und auf leimbelastetes Holz verzichtet. Eigene Darstellung.

| | Holzkonstruktion, Leim- & Nagelfrei | Lehmsteinmauerwerk, sortenrein rückbaubar |
|---|---|---|
| **Außenwand + Wärmeschutz** | **ja**<br>als Tafelbau<br>(Dämmung nur gesteckt) | **nein**<br>Verklebung der Wärmedämmung nötig |
| **Innenwand + Schallschutz** | **ja**<br>mit zusätzlichen Maßnahmen | **ja**<br>24 cm Wandstärke |
| **horizontale Bauteile** | **ja**<br>Brettstapelholz mit Holzdübeln besonders effizient | **nein**<br>nicht zugbelastbar |
| **Brandschutz** | **nein**<br>Oberfläche brennbar<br>--> Kapselung notwendig | **ja**<br>sofern frei von biologischen Fasern |
| **erdberührte Bauteile** | **nein**<br>nicht feuchteresistent | **nein**<br>nicht feuchteresistent |

Abb. 144: Eignung der untersuchten Bauweisen für entscheidende Gebäudefunktionen. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.






TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

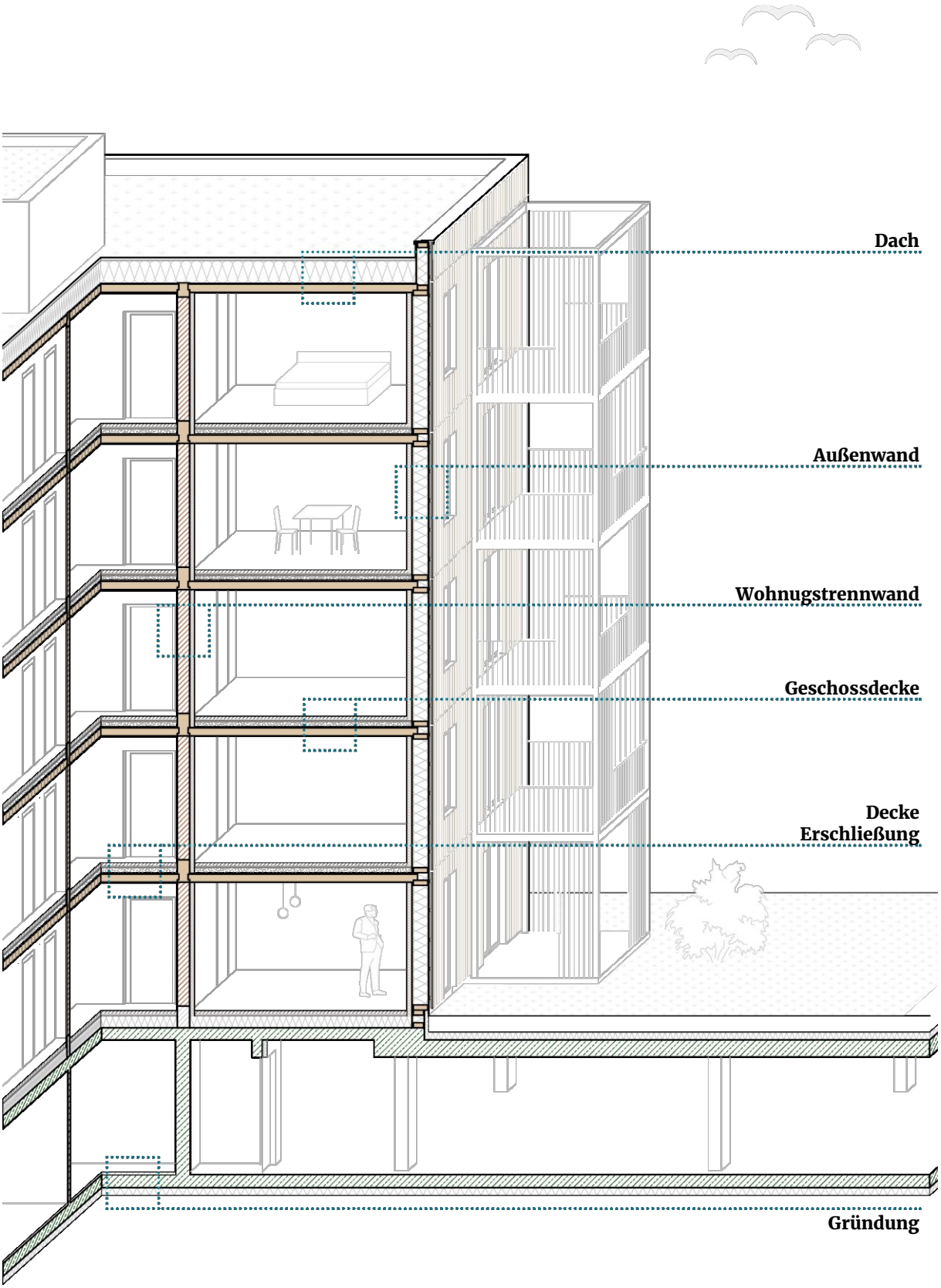



Abb. 145: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Variante 2. Die hervorgehobenen Aufbauten werden im folgenden Kapitel genauer dargestellt.. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

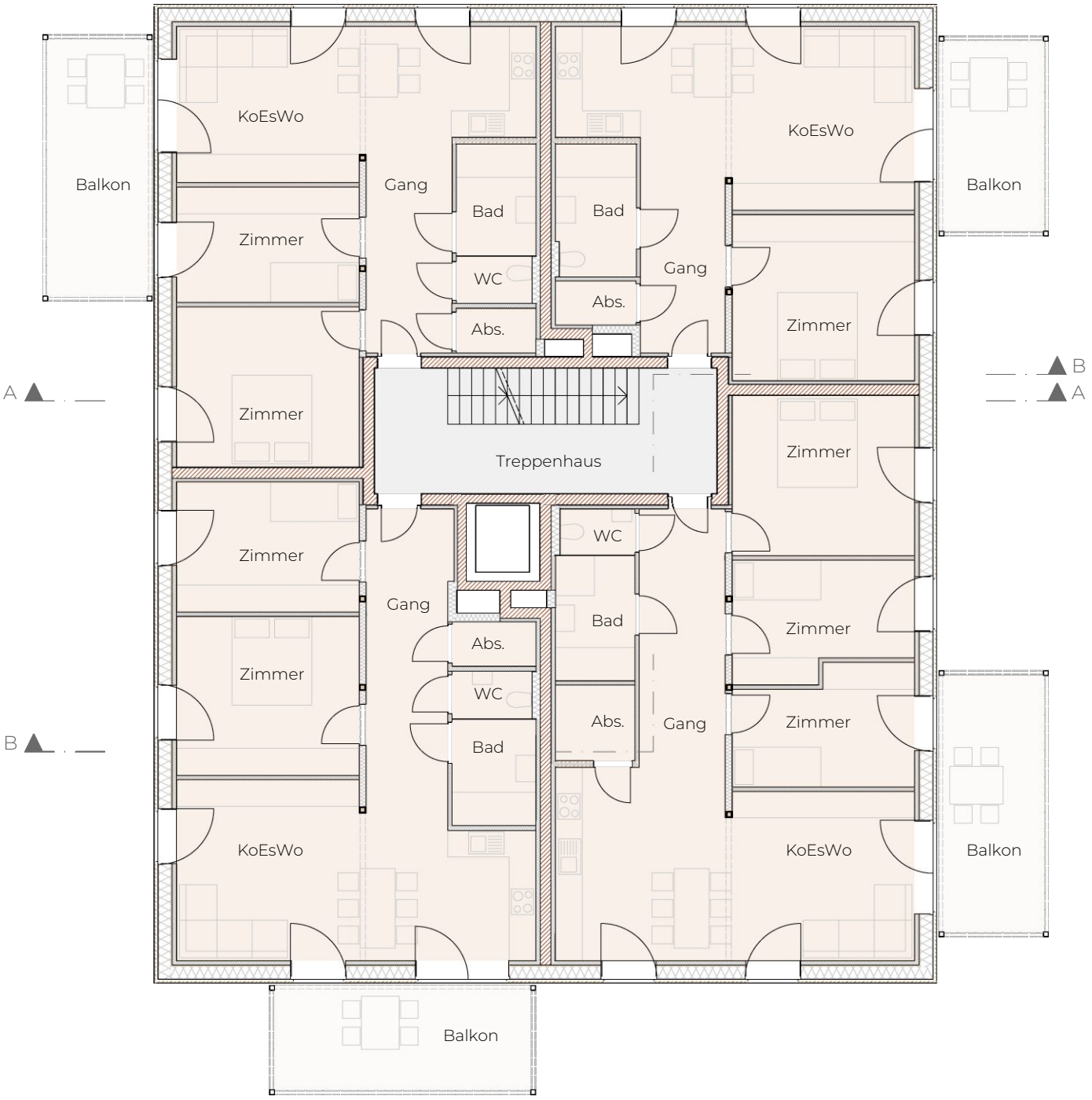



Abb. 146: Regelgrundriss von Variante 2. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

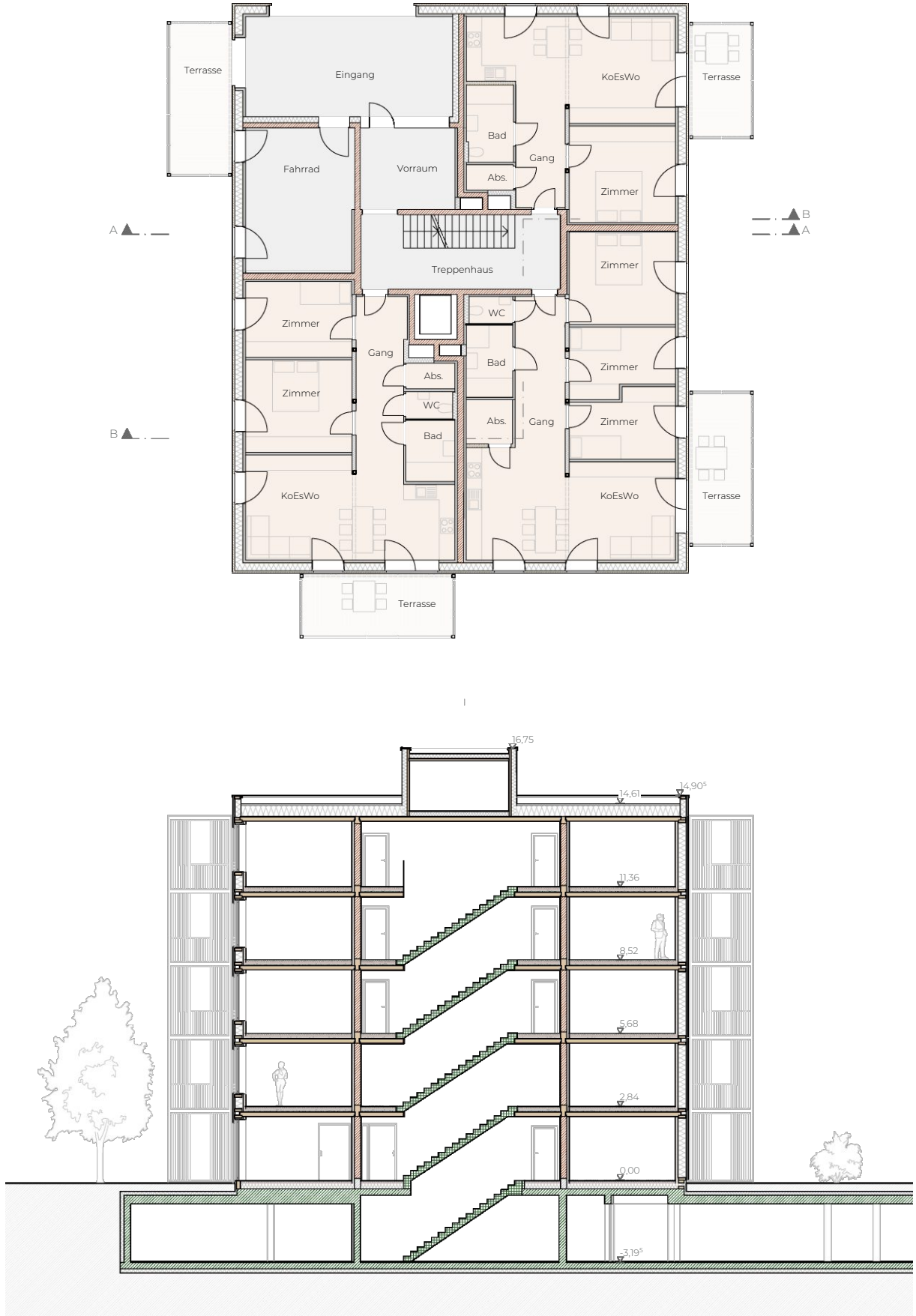



Abb. 147: oben: Erdgeschossgrundriss, unten: Schnitt A - A von Variante 2, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Aufbauten

Basierend auf der Auswahl der Konstruktionsmaterialien werden als nächstes die Standardaufbauten festgelegt. Die Materialien und Bauweisen, die noch nicht durch die Konstruktion festgelegt wurden, werden anhand der zu Beginn bestimmten Kriterien in einem vergleichenden Diskurs ermittelt.

## Keller

Wie soeben erläutert, können erdberührte tragende Bauteile für ein Gebäude dieser Größe nur mit Stahlbeton ausgeführt werden. Da bereits in Variante 1 ein größtmögliches Kreislaufpotenzial für die Keller-Bauteile ermittelt wurde, erfolgt hier der Aufbau analog.

## Außenwand

**Brandschutz**
Im Holztafelbau der Außenwand lässt sich der thermische Schutz sehr leicht bewerkstelligen, indem der Ständerzwischenraum ausgedämmt wird. Da diese Dämmstoffe mechanisch gut gehalten und vor der Witterung geschützt sind, besteht hier eine Vielzahl an möglichen Dämmmaterialien. Biologische Dämmstoffe sind dank ihrer Diffusionsoffenheit äußerst gut geeignet. Um biologische Dämmstoffe in der Außenwand verwenden zu können, muss allerdings der Brandschutz beachtet werden. Im Gegensatz zur Feuerwiderstandsdauer werden die Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen nicht durch die Vorarlberger Bautechnikverordnung herabgesetzt.[257] Bei der vorgehängten Holzfassade gilt also Punkt 1.2 der Tabelle 1a in der OIB-Richtlinie 2. Damit in der Gebäudeklasse 5 mit höchstens 6 oberirdischen Geschossen eine Fassade in Holz oder Holzwerkstoffen hergestellt werden kann, muss die Dämmschicht in A2 ausgeführt werden. Um dennoch eine Dämmung aus biologischen Faserstoffen verwenden zu können, kann laut Brandverhütungsstelle Vorarlberg die Brandausbreitung von Fassade in die Konstruktion anderweitig unterbunden werden.[258] Dies kann durch eine außenseitige Beplankung der Holzrahmenkonst-

257 Siehe: § 11, Abs. 2, Bautechnikverordnung Vorarlberg
258 Telefonische Auskunft der Brandverhütungsstelle Vorarlberg am 04.01.2024

| | **Stroh-Einblasdämmung** | **Zellulose-Einblasdämmung** | **Flachs Dämmmatten** |
|---|---|---|---|
| Brandschutz | E | E (bis 100 mm B) | E |
| **Eignung**<br>Wärmeleitfähigkeit λ | **nein**<br>0,058 W/mK | **ja**<br>0,039 W/mK | **ja**<br>0,038 W/mK |
| Inhaltsstoffe | 100% Stroh | 90% Tageszeitungspapier<br>10% anorganische Mineralsalze (borfrei) | 91% Flachsfasern<br>9% Biopolymere (Stützfaser)<br>(kompostierbar) |
| Pre-Use | 100% erneuerbarer Primärrohstoff | 90% Recycling Zeitungspapier | 91 % erneruerbarer Primärrohstoff |
| Verwertungs-potenzial | kompostierbar | kompostierbar, wiederverwendbar | kompostierbar |
| Post-Use | 70% Wiederverwendung<br>30% enregetische Verwertung | 70% Wiederverwendung<br>30% enregetische Verwertung | 68% Wiederverwertung<br>31% enregetische Verwertung |
| **UMI** | **93%** | **88%** | **87%** |

Abb. 148: Vergleich ausgewählter ökologischer Dämmstoffe. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 149: Zusammenstellung verschiedener ökologischer Dämmstoffe. Links: Zellulose-Einblasdämmung, Mitte: Hanf-Dämmplatte, Rechts: Schafswolle-Dämmung

ruktion mit einem nichtbrennbaren Material in A2 erfolgen. Hier sind Gipsfaserplatten trotz ihres ungünstigen Recyclingpotenzials praktisch alternativlos, da sie als einziges Trockenbau-Plattenmaterial sowohl als nichtbrennbar gelten als auch für den witterungsgeschützten Außenraum geeignet sind (siehe Abb. 152). Zumindest sind sie diffusionsoffen und aufgrund der Verschraubung im Rückbau leicht sortenrein trennbar. Durch eine Verklebung der Plattenstöße mit leicht lösbaren Klebebändern können die Gipsfaserplatten die winddichte Ebene bilden. An die Dämmung zwischen den Holzrahmen gelten somit keine weiteren Anforderungen bezüglich des Bandverhaltens mehr.

**Dämmstoffe**

In Abbildung 149 werden gängige biologische Faserdämmstoffe verglichen. Mit Ausnahme von der Stroh-Einblasdämmung können alle Stoffe recht vergleichbare Werte bezüglich der Wärmeleitfähigkeit erreichen. Alle ausgewählten Dämmstoffe sind baubiologisch unbedenklich und biologisch abbaubar bzw. leicht trennbar. So ist eine Kompostierung als hochwertiger Entsorgungsweg für alle Dämmstoffe möglich, wobei laut Urban Mining Index eine energetische Nutzung Verwertungsweg darstellt. Die Einblasdämmstoffe punkten mit bereits erprobter Wiederverwendungsmöglichkeit. Sie können nach Nutzungsende wieder durch die selbe Öffnung ausgesaugt werden, in die sie hineingeblasen

| **Hanf Dämmmatten** | **Holzfaser Dämmmatten** | **Holz-Einblasdämmung** | **Schafwolle Dämmmatten** |
|---|---|---|---|
| E E | E | E E | E |
| **(ja)** 0,043 W/mK | **ja** 0,038 W/mK | **ja** 0,040 W/mK | **ja** 0,040 W/mK |
| 66% Hanffasern 22% Jutefasern 9% biopolymere Stützfaser 4% Soda als Brandschutz | 89% Holzfaser 5% Flammschutzmittel Ammoniumsalze 6% textile Bindefaser | 97% Holzfaser 2% Flammschutzmittel Molke 1% Soda Pilzschutz | 98% Schafwolle 2% Kunststoff als Stützfaser, leicht trennbar |
| 87 % erneruerbarer Primärrohstoff | 89 % erneruerbarer Primärrohstoff | 99 % erneruerbarer Primärrohstoff | 98 % erneruerbarer Primärrohstoff |
| kompostierbar, Herstellerrücknahme | kompostierbar | kompostierbar, wiederverwendbar | kompositerbar, Herstellerrücknahme |
| 97% Wiederverwertung 3% enregetische Verwertung (Herstellerrücknahme) | 70% Wiederverwertung 30% enregetische Verwertung | 70% Wiederverwendung 30% enregetische Verwertung | 100% Wiederverwertung (Herstellerrücknahme) |
| **93%** | **87%** | **98%** | **99%** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

wurden. Für Hanf- und Schafwolle werden Herstellerrücknahmen angeboten, sodass diese wiederverwendet werden können.[259] Größere Differenzen gibt es in der Materialherkunft. Auch für biologische Materialien gilt der Grundsatz der Ressourceneffizienz. Da mehrere der vorgestellten Dämmstoffe aus Nebenprodukten hergestellt werden können, ist die Flächeninanspruchnahme durch den Anbau von Primärrohstoffen vermeidbar.

So gibt es zum Beispiel eine Holzeinblasdämmung am Markt, die ihr Dämmmaterial aus Abfällen lokaler Sägewerke bezieht.[260] Mit dem ebenfalls biologischen Flammschutzmittel Molke besteht die Dämmung fast ausschließlich aus erneuerbaren Quellen, sodass das Produkt fast komplett zirkulär ist. Aufgrund dieses hohen Kreislaufpotenzials und der recht guten Wärmeleitfähigkeit wird diese Holz-Einblasdämmung als Dämmstoff für die Außenwand gewählt.

**Innere Beplankung**
Die innenseitige Beplankung erfolgt, wie bereits im Kapitel Konstruktion beschrieben, durch aussteifende, durch eine Schwalbenschwanzverbindung gefügte Massivholz-Diagonalplatten. Diese Lösung kommt ohne Leim und mit wenig metallischen Verbindungsmitteln aus, hat aber im Vergleich zu einer OSB-Platten-Beplankung den Nachteil, dass sie nicht als Dampfbremse fungieren kann. Innen wird deshalb eine zusätzliche Dampfbremse eingefügt, die aus Kraftpapier und einem Kunststoffgewebe besteht. Sie muss im EoL thermisch verwertet werden, aber besteht immerhin anteilig aus nachwachsenden Quellen.[261] Die innenliegende Vorsatzschale schützt die Dampfbremse vor Beschädigungen durch Nutzer:innen (z.B. beim Befestigen eines Bilds an der Wand) und ermöglicht die einfache Montage von Elektroinstallationen. Die verwendeten Materialien werden im Kapitel Trockenbauwand diskutiert.

**Fassade**
Aufgrund der Diffusionsoffenheit, der Vorfertigung und der Material-Suffizienz wird auch bei Variante 2 analog zu Bestandshaus B eine Fassadenhaut aus hinterlüfteter Holzlattung verwendet. Da die Fassade ohne Dachüberstand bewittert ist und auf chemischen Holzschutz aus Prinzip verzichtet wird, ist die technische Nutzdauer der Fassade begrenzt. Bei einer einwandfreien Verarbeitung – einer durchgehenden Hinterlüftung, Tropfkanten und dem Vermeiden von stehendem Wasser – kann die Fassade im hiesigen Klima dennoch mehrere Jahrzehnte überdauern. Geschossweise umlaufende Blechschürzen beugen nicht nur dem Brandüberschlag vor, sondern bieten mit ihren Tropfkanten auch einen gewissen konstruktiven Witterungsschutz.[262] Die Dauerhaftigkeit der eingesetzten Hölzer ist von untergeordneter Relevanz, aber nicht komplett bedeutungslos. Deshalb wird in Variante 2, im Gegensatz zur gestrichenen Fichtenfassade aus Bestandshaus B, unbehandeltes Lärchenholz als Lattung verwendet, welches auch ohne zusätzlichen Schutz etwas dauerhafter als die Fichte ist.[263]

259 Beispielprodukte sind: Tobias Tumfart GmbH, „Schafwoll-Dämmmatte"; Thermo Hanf, „Thermo Hanf Combi Jute".

260 Das Beispielprodukt ist: Baufritz, „Holz Hobelspan-Dämmung"; Bau EPD GmbH, „Umwelt-Produktdeklaration Hobelspandämmung Baufritz", 5.

261 Ein Beispielprodukt ist: Isocell, „ÖKO NATUR Dampfbremse fadenverstärkt".

262 Siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*, 85.

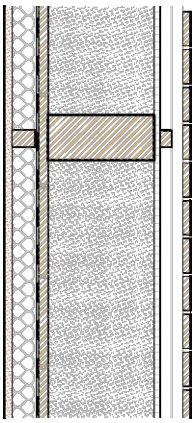
263 Siehe: Pfabigan, „Es kommt drauf an".



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 2: Außenwand

*Bauteilfläche: 1.144,5 m² (5,9%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 22 | Lehmbauplatte |
| 60 | Holzkonstruktion, freistehend<br>dazwischen: Schafswolle, gesteckt |
| 10 | Luftschicht<br>Dampfbremse Kraftpapier |
| 30 | Diagonalplatte aussteifend, leimfrei, Fichte |
| 280 | Fichte Vollholz (280/80)<br>dazwischen: Holzfaser-Einblasdämmung |
| 15 | Gipsfaserplatte, winddicht verklebt |
| 30 | Konterlattung (30/45) |
| 30 | Lattung (30/45) |
| 20 | Lattung vertikal Lerche unbehandelt |
| **507** | **U-Wert: 0,13** W/m²K |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

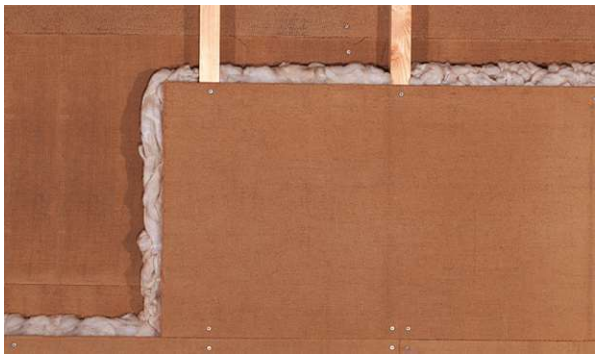




Abb. 150: Vergleich ausgewählter ökologischer Dämmstoffe. Daten nach Herstellerangaben.

## Trockenbau

Trockenbau-Ständerwände erzeugen mit geringem Materialeinsatz Raumabschlüsse, erreichen einen guten Schallschutz und erlauben Elektroinstallationen in der Zwischenebene, weshalb sie im Geschosswohnungsbau standardmäßig eingesetzt werden. Sie können heute schon komplett aus ökologischen Produkten realisiert werden:

**Unterkonstruktion**
Eine Unterkonstruktion aus unbehandeltem Fichtenholz ist recht üblich und technisch gleichwertig mit einer Metallkonstruktion. Als unbehandeltes Holz kann die Unterkonstruktion im EoL hochwertig kaskadisch weitergenutzt werden.

**Trockenbauplatte**
Wie bereits in Variante 1 ausgeführt, haben gipsbasierten Trockenbauplatten zwar ein hohes technisches Recyclingpotenzial, sind aber in der Praxis nicht in den biologischen Kreislauf zurückführbar. Mit alternativen Plattenwerkstoffen kann ein wesentlich größeres Kreislaufpotenzial erzielt werden. Besonders Lehmbauplatten haben sich als Alternative zu gipsbasierten Trockenbauplatten bereits etabliert. Die Kombination aus dem replastizierbaren Bindemittel Lehm und biologischen Faserstoffen ermöglicht verschiedene Plattentypen mit teils sehr guten Schall- und Brandschutzwerten.[264] Im Spritzwasserbereich sowie im witterungsgeschützten Außenraum sind Lehmbauplatten aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit ungeeignet. Strohbauplatten sind insofern vorteilhaft, da sie rein aus gepresstem

264 Beispielprodukte sind: Claytec Lehmbaustoffe, „Lehm-Trockenputzplatte"; Levita, „Lehmbauplatte schwer". Für eine optimale Kreislaufführung ist darauf zu achten, keine glasfaserverstärkten Platten zu wählen, da dies als Fremdstoff das Recycling und die Vererdung behindert.

| | Gipskartonplatte |
|---|---|
| **Eignung** als Trockenbauplatte: Dicke | **ja**<br>12,5 mm |
| **witterungsgeschützter Außenraum** | **nein** |
| **Brandschutz** | **A2** |
| Inhaltsstoffe | 95% Gips<br>2% Karton |
| **biologischer Kreislauf?** | **nein**<br>Recycling oder Deponierung |
| Pre-Use | 34% Primärrohstoff<br>64% REA-Gips + Rezyklate<br>2% erneuerbarer Primärrohstoff |
| Post-Use | 69% Recycling<br>Rest Deponierung |
| **UMI** | **68%** |

Abb. 151: Vergleich ausgewählter Trockenbauplatten. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 2: Trockenbauwand

*Bauteilfläche: 908,9 m² (4,4%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 22 | Lehmbauplatte |
| 80 | Holz-Konstruktion<br>dazwischen: Schafswolle, gesteckt |
| 22 | Lehmbauplatte |
| **124** | |

Stroh hergestellt und ab gewissen Plattenstärken sogar als Massivbauteil verwendet werden können, sind aber mit einer Dicke ab 38 mm für den herkömmlichen Trockenbau nicht praxistauglich.[265] Dank des hohen Kreislaufpotenzials wird in dieser Variante die „schwere Lehmbauplatte“ gewählt, die fast ausschließlich aus Lehm besteht, was zudem hervorragende Schall- und Brandschutzeigenschaften zur Folge hat.

**Dämmung**

Als Dämmmaterial für die Ausfachung der innenliegenden Vorsatzschale werden Schafwolle Dämmmatten gewählt (siehe Abb. 149): Als Mattenware sind sie für diese Nutzung wesentlich praxistauglicher als eine Einblasdämmung. Da Schafzucht in Mitteleuropa primär für die Fleischproduktion betrieben wird, aber Schafe aufgrund des Tierwohls dennoch geschoren werden müssen, fallen hierzulande jährlich große Mengen an für die Textilproduktion ungeeigneter Schafswolle an. Dieses Nebenprodukt hat feuchteregulierende Eigenschaften, bindet Schadstoffe und ist bei trockenem, UV-geschütztem Einsatz hochalterungsbeständig.[266] Aufgrund der großen Dauerhaftigkeit besteht bei Schafswolle auch die Möglichkeit einer Wiederverwendung – mehrere Firmen bieten eine Herstellerrücknahme an.[267] Somit sind nicht nur die raumklimatischen Eigenschaften, sondern auch das Kreislaufpotenzial von Schafswolle sehr hoch, weshalb dieses Material zur Ausfachung aller Trockenbauwände verwendet wird.

265 Ein Beispielprodukt ist: Istraw, „Panels“.

266 Siehe: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., „Schafwolle“.

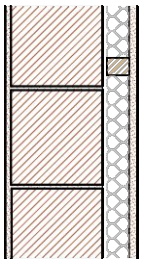
267 Siehe: Tobias Tumfart GmbH, „Der nachhaltige Produkt-Lebenszyklus“.

| Gipsfaserplatte | schilfarmierte Lehmbauplatte | schwere Lehmbauplatte | Strohbauplatte |
|---|---|---|---|
| **ja**<br>12,5 mm | **ja**<br>20 mm | **ja**<br>22 mm | **nein**<br>min. 38 mm |
| **ja** | **nein** | **nein** | **nein** |
| **A2** | **B1** | **A1** | **E** |
| 82% Gips<br>18% Zellulose | 60% Lehm, Ton, Perlite<br>40% Schilf, Hanf, Jutegewebe | 90% Lehm, Ton<br>10% Holzfaser, Jutegewebe | 98% reines Stroh<br>2% Karton aus Altpapier |
| **nein**<br>Deponierung | **ja**<br>kompostierbar,<br>vererdbar | **ja**<br>vererdbar | **ja**<br>kompostierbar |
| 33% Primärrohstoff<br>49% REA-Gips + Rezyklate<br>18% erneuerbarer Primärrohstoff | 60% Recycling<br>40% erneuerbarer Primärrohstoff | 90% Recycling<br>10% erneuerbarer Primärrohstoff | 100% erneuerbarer Primärrohstoff |
| Verbundbaustoff:<br>Deponierung | 11% Wiederverwertung<br>89% Weiterverwertung | 90% Wiederverwertung<br>10% Weiterverwertung | 68% Wiederverwertung<br>31% Weiterverwertung |
| **34%** | **78%** | **98%** | **92%** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 2: Wohnungstrennwand *Fläche: 1.125,9 m² (22,0%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 15 | Lehmputz |
| 240 | tragendes Lehmsteinmauerwerk |
| 10 | Luftschicht |
| 60 | Holz-Konstruktion<br>dazwischen: Schafswolle, gesteckt |
| 22 | Lehmbauplatte |
| **347** | |

**$R_w$: 68 dB**

## Wohnungstrennwand

Wie bereits im Kapitel Konstruktion beschrieben, wird eine 24 cm dicke Lehmsteinwand als Wohnungstrennwand eingesetzt. Prinzipiell kann die Lehmsteinwand mit jedem üblichen Putzmaterial verspachtelt werden, aber da eine rückstandsfreie Trennung von Putz und Stein kaum möglich ist und nur sortenreiner Lehm wiederverwertet werden kann, ist ein Lehmputz die logische Wahl. Der Lehmputz, die Lehmsteine und der ebenfalls aus Lehm bestehende Mörtel können als Verbund rückgebaut und hochwertig verwertet werden.

Die Lehmsteinwand hat annähernd gleiche Schalldämm-Werte wie die Stahlbetonwand in den Bestandsbauten. Um einen gleichwertigen Komfort zu erreichen, wird auch die Lehmwand mit einer zusätzlichen freistehenden Vorsatzschale ausgeführt. Hier kann der selbe Aufbau wie bei den freistehenden Trockenbauwänden angewandt werden. Mit diesem minimal dickeren Aufbau kann sogar eine Schallpegeldifferenz von 66 dB und damit ein geringfügig besserer Wert als bei der konventionellen Bauweise erreicht werden.

## Geschossdecke

**Estrich**

Nassestriche bestehen stets aus mineralischen Stoffgemischen, die einen kaum mehr sortenrein lösbaren Stoff-Verbund eingehen und daher für eine Rückführung in den biologischen Kreislauf äußerst ungeeignet sind. Mit Trockenestrichen kann ein irreversibler Stoff-Verbund vermieden werden – deshalb ist dieses System aus kreislauftechnischer Sicht den Nassestrichen vorzuziehen. Trockenestriche werden als vorgefertigte Plattenelemente trocken verlegt und verschraubt – dadurch können sie im EoL leicht sortenrein rückgewonnen werden und haben ein hohes Wiederverwendungspotenzial. Gerade im Holzbau sind sie zudem sinnvoll, da sie keinen Feuchteeintrag in die trockene Bauweise bringen und den schnellen Bauablauf nicht mit Trocknungszeiten behindern.

Die sortenreine Rückgewinnung ist natürlich nur dann zielführend, wenn der Trockenestrich nicht selbst ein Verbundbaustoff (z.B. Gipsfaserplatten) ist. Im biologischen Bauen sind zwei Trockenestrich-Systeme mit integrierter Fußbodenheizung etabliert, die dem selben Prinzip folgen. Die Systemplatten werden mit Nut-Feder-Verbindungen trocken verlegt und enthalten bereits Einfräsungen zur Aufnahme der Heizungsrohre. Das eine System besteht aus Holzfaserdämmplatten und einem Aluminium-Wärmeleitblech. Das andere System besteht aus zementgebundenen Lavasplitt-Platten.[268]

Das erstgenannte System erreicht mit seinen zwei leicht trennbaren und für sich genommen sehr zirkulären Komponenten Holz und Stahl ein deutlich besseres Kreislaufpotenzial. Das zweite System, das aufgrund des Zementanteils nicht im biologischen Kreislauf geführt werden kann, hat aber aufgrund der wesentlich größeren Masse deutliche Vorteile im Schallschutz. Während das Trockenestrichsystem der Firma Lithotherm schon auf eine Masse-Schüttung von 10 cm angewiesen ist, um den Mindestschallschutz zu erreichen, hat das Holzfaser-System beim selben Aufbau immer noch einen Trittschallpegel von 57 dB. Damit ist dieses Pro-

268 Die beiden Produkte sind: WEM, „Bodenheizung System 30"; Lithotherm, „Fußbodenheizung".



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

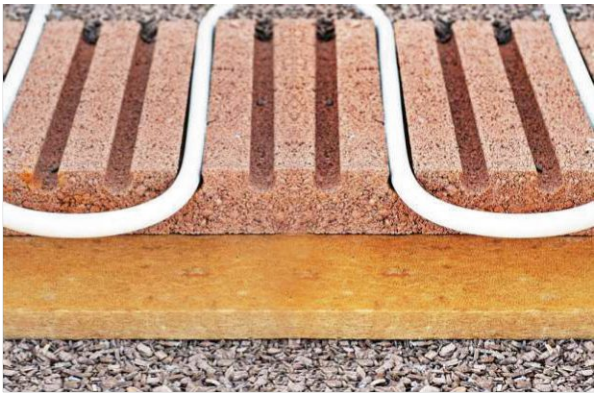



Abb. 152: Trockenestrich-Systeme mit integrierter Fußbodenheizung. Links: Holzfaser-Dämmplatten mit Wärmeleitblech. Rechts: Zementgebundene Lavasplittplatten.

dukt für den Geschosswohnungsbau aktuell ungeeignet.[269] Die Lavasplitt-Platten hingegen können laut der Studie „Trockenestriche optimiert für den tieffrequenten Trittschallschutz" erhöhte Anforderungen an den tieffrequenten Trittschallschutz erfüllen und in ihrer Leistung mit Nassestrichen konkurrieren.[270] Um den Schallschutz-Anforderungen zu entsprechen, werden in dieser Variante die Lavasplitt-Platten als Estrich verwendet. Ein Bodenbelag, zum Beispiel ein Mehrschichtparkett, kann mit einem dünnen Trittschalldämm-Kork schwimmend auf den Trockenestrich verlegt werden.

**Trittschall**

Als Trittschalldämmung wird eine 30 mm starke Hanfplatte gewählt, da sie als einziger biologischer Dämmstoff sowohl bezogen auf den Schallschutz als auch aufgrund einer für den Einsatz unter Trockenestrichen benötigten erhöhten Druckstabilität sehr gute Werte erzielt.[271] Andere biologische Trittschalldämmstoffe wie Holzfasermatten und Kork-Platten erreichen ähnlich gute Zirkularitätswerte,

269 Eigene Berechnung mittels ArchiPhysik anhand des gewählten Standardaufbaus. Annahme: Dynamische Steifigkeit Trittschalldämmung 17 MN/mm³.

270 Siehe: Ackermann, „Trockenestriche optimiert für tieffrequenten Trittschallschutz".

271 Ein beispielhaftes Produkt ist: Thermo Hanf, „Ökologische Trittschalldämmung".

| | Holzfaserdämmplatten mit Wärmeleitblech | zementgebundene Lavasplitt-Platten |
|---|---|---|
| Rohdichte (kg/m³) | 408 | 1400 |
| **Eignung** Trittschallschutz bei identem Aufbau | **nein**<br>57 dB | **ja**<br>48 dB |
| **Eignung**<br>als Heizestrich | **ja** | **ja** |
| **Inhaltsstoffe** | Holzfaserplatte (Bindemittel: holzeigenes Lignin)<br>Stahlblech | Lavasplitt & Zement |
| Pre-Use | 75% erneuerbarer Primärrohstoff<br>9% Recycling<br>16% nicht erneuerbarer Primärrohstoff | 100% nicht erneuerbare Primärrohstoffe |
| Post-Use<br>sortenreine Rückgewinnung | 25% Recycling<br>49% Downcycling<br>26% energetische Verwertung | 29% Wiederverwendung<br>71% Downcycling |
| **UMI** | **87%** | **32%** |

Abb. 153: Vergleich ausgewählter Trockenestrich-Systeme mit integrierter Fußbodenheizung. Daten nach Herstelleranga-ben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

| | Hanf Dämmmatten | Holzfaser Dämmmplatten | Kork |
|---|---|---|---|
| **Eignung** Trittschall<br>SD-Wert [MN/mm³] | **ja**<br>17 (bei 30 mm) | **(ja)**<br>30 (bei 30 mm) | **nein**<br>33 (bei 100 mm) |
| Inhaltsstoffe | 87% Hanffasern<br>9% Biopolymer-Stützfaser<br>4% Soda als Brandschutz | 98% Holzfaser<br>2% Leim | 100% Kork |
| Pre-Use | 87 % erneuerbarer Primärrohstoff | 98 % erneuerbarer Primärrohstoff | 100 % erneuerbarer Primärrohstoff |
| Verwertungswege | kompostierbar, Herstellerrücknahme | - | kompostierbar |
| Post-Use | 97% Wiederverwertung<br>3% enregetische Verwertung (Herstellerrücknahme) | 70% Wiederverwertung<br>30% enregetische Verwertung | 68% Wiederverwertung<br>31% enregetische Verwertung |
| **UMI** | **93%** | **97%** | **92%** |

Abb. 154: Vergleich ausgewählter biologischer Trittschall-Dämmplatten. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

aber eine deutlich ungünstigere dynamische Steifigkeit.[272]

Die benötigte Masseschüttung wird – im Gegensatz zu Bestandshaus B - ungebunden über einer Rieselschutzpappe eingebracht. Mit Pappwaben kann die Schüttung fixiert werden – ein sortenreiner Rückbau und die Wiederverwendung der Schüttung ist somit möglich.[273] Eine schwere Lehmbauplatte oberhalb der Schüttung schafft eine plane Fläche für den Estrich und zusätzliche thermische Masse für den Schallschutz.

**Sondersituation Decke über Keller**

Die unterste Geschossdecke, die Decke über dem Keller, kann nicht aus Holz konstruiert werden. Sie wird wie alle Untergeschoss-Bauteile aus Recycling-Beton mit CEM-II/C Zement hergestellt. Hinzu kommt eine Dämmebene, die vor dem unbeheizten Untergeschoss schützt. Hier werden Holzfaserdämmstoffe – analog zum Dach – verwendet, da sie als nachwachsenden Rohstoffen eine recht gute Dämmleistung erzielen und der Druckbelastung standhalten. Im Abschnitt Dach wird genauer auf die Dämmung eingegangen.

**Sondersituation Decke im Treppenhaus**

Im Kapitel Konstruktion wurde bereits angeführt, dass im Treppenhaus die Nichtbrennbarkeit der Oberflächen vorgeschrieben ist. Während die Lehmwand diese Anforderung ohne weitere Maßnahmen erfüllt, muss die Holzdecke, die in den Wohnungen unterseitig auf Sicht belassen ist, mit einem nichtbrennbaren Material bekleidet werden. Die im Trockenbau eingesetzte Lehmbauplatte, die einen Brandschutz von A1 erreicht, ist dafür bestens geeignet. Durch eine flächige, einlagige Beplankung mit dieser Platte kann also der Brandschutz erreicht werden.

Eine Fluchtwegtreppe aus Holz, die ebenfalls mit einem nichtbrennbaren Material beplankt sein müsste, lässt sich technisch kaum bewerkstelligen. Der Treppenlauf selbst wird also als Beton-Fertigteil gefertigt.

272 Beispielprodukte sind GUTEX Thermofloor und Ziro Corctherm 040.

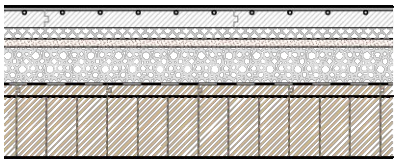
273 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 54.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 2: Geschossdecke

*Bauteilfläche: 1.335,0 m² (19,9%)*

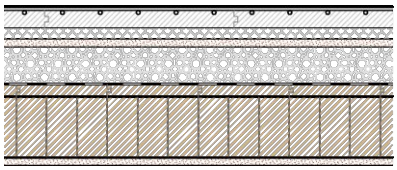


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klickparkett inc. Kork-Auflage |
| 45 | Litotherm Trockenestrich-Elemente incl. Fußbodenheizung |
| 30 | Hanf-TSDM |
| 22 | Lehmbauplatte |
| 100 | Splitt-Schüttung, in Wabenstruktur Rieselschutz, Kraftpapier |
| 30 | Diagonalplatte aussteifend, leimfrei, Fichte |
| 160 | Brettstapelholz Fichte, diagonal gedübelt |
| **397** | |

**$L_{n,w}$: 48 dB**

## Variante 2: Decke Erschließung

*Bauteilfläche: 217,6 m² (3,7%)*

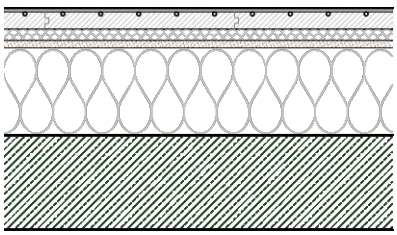


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klickparkett inc. Kork-Auflage |
| 45 | Litotherm Trockenestrich-Elemente incl. Fußbodenheizung |
| 30 | Hanf-TSDM |
| 22 | Lehmbauplatte |
| 100 | Splitt-Schüttung, in Wabenstruktur Rieselschutz, Kraftpapier |
| 30 | Diagonalplatte, leimfrei, Fichte |
| 160 | Brettstapelholz Fichte, diagonal gedübelt |
| 22 | Lehmbauplatte |
| **419** | |

**$L_{n,w}$: 48 dB**

## Variante 2: Decke über Keller

*Bauteilfläche: 308,4 m² (8,1%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klickparkett |
| 45 | Litotherm Trockenestrich-Elemente incl. Fußbodenheizung |
| 30 | Hanf-TSDM |
| 22 | Lehmbauplatte zur Lastverteilung |
| 230 | Holzfaser Dämmmatten |
| 250 | Stahlbeton (38% Recycling-Zuschläge) mit CEM II/C-Zement |
| **587** | |

**U-Wert: 0,13** W/m²K



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Dach

Auch in dieser Version wird das Flachdach als konventionelles Warmdach ausgeführt, um eine sortenreine Rückgewinnung der Dämmstoffe zu ermöglichen. Als Abdichtungen und Dampfsperren sind synthetische Stoffe aktuell alternativlos.[274] Deshalb wird hier auf die bereits diskutierten Produkte aus Variante 1 zurückgegriffen: Eine EPDM-Abdichtungsbahn, die nicht auf der Dämmung verklebt wird, und eine Dampfsperre aus Bitumen, welches beim Holzbau lose verlegt werden kann. Die Schutzschicht aus losem, sortenreinem Kies ist genauso gut biologisch rückführbar wie der Lehm und zudem sehr gut für eine Wiederverwendung geeignet.



Abb. 155: Verlegung einer Holzwolledämmung mit Gefälledämmung.

Beim Flachdach bestehen besondere Anforderungen an das Dämmmaterial. Selbst bei nicht genutzten Dachflächen wird eine erhöhte Druckstabilität benötigt, damit das Dach zu Wartungszwecken begehbar ist. Hierfür ist nach Wissensstand der Autorin bisher nur ein Produkt aus nachwachsenden Rohstoffen am Markt, eine Dämmung aus Holzfasern. Als einziges biologisches Produkt, was zudem einen passablen Wärmeschutz erreicht, wird sie in dieser Variante eingesetzt. Allerdings enthält sie neben Holz- und textilen Bindefasern auch 5% Flammschutzmittel, weshalb sie im EoL nicht kompostierbar ist.[275]

274 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 92–93.

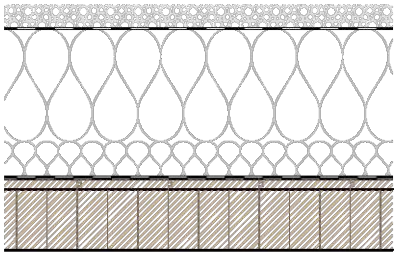
275 Ein Produktbeispiel ist: Gutex, „Thermoflat". Die Dämmung erreicht eine Wärmeleitfähigkeit von 0,042 W/mK. Der Wärmedurchgang des gesamten Dachaufbaus verschlechtert sich dadurch im Vergleich zu der im Fallbeispiel eingesetzten EPS-Dämmung lediglich von 0,07 auf 0,09 W/m²K.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 2: Dach

*Bauteilfläche: 338,2 m² (2,5%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 60 | Schüttung Kies |
| 2 | Abdichtung, EPDM-Folie |
| 300 | Holzwolle |
| 0 - 200 | Holzwolle Gefälledämmung |
| 5 | Dampfsperre, Bitumen, lose verlegt |
| 30 | Diagonalplatte aussteifend, leimfrei, Fichte |
| 140 | Brettstapelholz, diagonal gedübelt |
| **637** | |

**U-Wert: 0,09** W/m²K



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kreislauffähigkeit

Aufbauend auf die Definition aller Standardaufbauten von Variante 2 erfolgt nun die Analyse ihrer Kreislauffähigkeit. Die natürliche Bauweise besteht zu großen Teilen aus nachwachsenden Rohstoffen und natürlichen, also nicht synthetisch gefügten, mineralischen Materialien. Mit dem Holzbau und dem Trockenestrich erfolgen viele Anschlüsse in trockener, reversibler Bauweise. Auch der Lehmbau ist zwar nicht zerstörungsfrei lösbar, aber sehr gut wiederverwertbar. Es ist anzunehmen, dass sich diese Umstände sehr positiv auf die Kreislauffähigkeit von Variante 2 auswirken. Gleichzeitig können mit dem betonierten Keller, der Gipsfaser-Beplankung der Außenwand und den Abdichtungsfolien nicht nur natürliche Baustoffe verwendet werden.

Wie hoch dennoch das Potenzial einer Kreislaufführung innerhalb des biologischen Metabolismus ist, wird im folgenden Kapitel mithilfe des Urban Mining Index ermittelt.

## Gründung

Die Gründung ist in Variante 2 genauso ausgeführt wie in Variante 1. Die Anzahl der Schichten ist gering, fast alle Materialien sind mineralischen Ursprungs. Aufgrund der Ausführung als Weiße Wanne kann auf eine Abdichtungsbahn und damit auf eine Materialvermischung und einen aufwendigen Austausch verzichtet werden.

Der Beton wird als Recyclingbeton mit CEM-II/C Zement ausgeführt. In der Expositionsklasse XC2 können 38% der Zuschläge durch Rezyklat ersetzt werden. Sie machen etwa 85% der gesamten Beton-Masse aus – insgesamt beträgt der Anteil wiederverwerteten Materials im Beton also 32%. Der als Verbundestrich ausgeführte Zementestrich kann gemeinsam mit dem Beton abgebrochen werden. Die somit hohe Sortenreinheit wird hauptsächlich dadurch gemindert, da beim Abbruch einer Bodenplatte eine Vermischung mit Erdmaterial schwer verhindert werden kann. Trotz der schwierigen Bedingungen kann immerhin für die Hälfte des Bauschutts ein Downcycling angenommen werden. Aufgrund des hohen wirtschaftlichen Anreizes kann für die Stahl-Bewehrung stets ein vollständiger sortenreiner Rückbau und Recycling angenommen werden. Die Schaumglasplatten, die fast zu drei Vierteln aus rezykliertem Altglas bestehen, haben bei sortenreinem Rückbau gute Aussichten wiederverwertet zu werden. Aufgrund der bauphysikalisch notwendigen bituminösen Verklebung ist dies bei der Gründung allerdings nicht möglich, sodass nur eine Deponierung bleibt. Das Kreislaufpotenzial der gesamten Konstruktion summiert sich auf 28%.

Durch den Einsatz von $CO_2$-reduziertem Zement einerseits und den erhöhten Zementbedarf andererseits ist das GWP des Betons etwa 10% geringer als das des konventionellen Betons in den Häusern A und B. Einen größeren Einfluss auf das Treibhauspotenzial hat der Verzicht auf komplexe Bauteilschichten. So ist das gesamte GWP im Lebenszyklus mit 69,8 kg $CO_2$-Eq./m² mehr als halbiert im Vergleich zu den konventionellen Häusern A und B.

| **Gründung** | | Bauteilschicht | Austauschhäufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *782,8 m²* | Zementestrich als Verbundestrich | | 105,0 | 14,1% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| *Masseanteil* | *17,6%* | Beton, WU | | 600,0 | 80,6% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,7% | Stahl, Scherenschrott |
| | | PE-Folie | | 0,4 | 0,1% | Kunststoffe |
| | | Schaumglasplatten, verklebt | | 19,2 | 2,6% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **744,6** | | |

Abb. 156: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Gründung. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

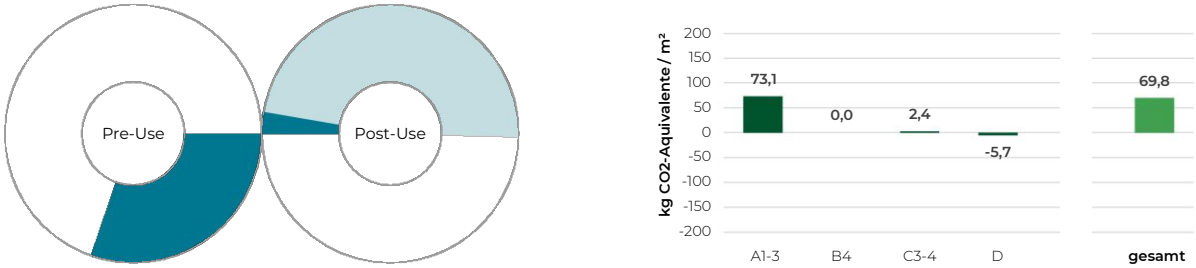
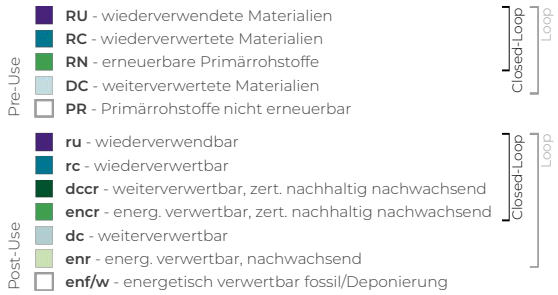



Abb. 157: Gründung Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | 48% | | 52% | 6,2 | 0,0 | 0,2 | 0,0 |
| | 32% | | | 68% | | | | | 48% | | 52% | 39,4 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,0 | 0,7 | -0,3 |
| | 70% | | | 30% | | | | | | | 100% | 13,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **30%** | **0%** | **0%** | **70%** | **0%** | **3%** | **0%** | **0%** | **45%** | **0%** | **52%** | **73,1** | **0,0** | **2,4** | **-5,7** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **28,0%** | **GWP total:** | | | **69,8** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

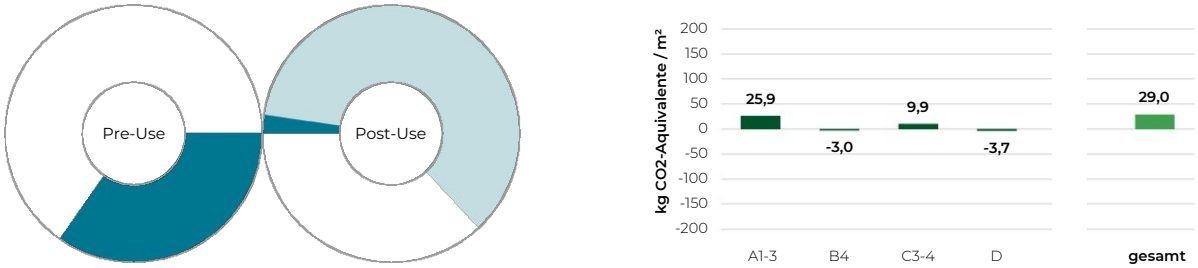



Abb. 158: Außenwand Keller Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand Keller

Die Keller-Außenwand ist weitgehend gleich aufgebaut wie die Gründung, allerdings ohne Estrich und Trennlage. Weil sich die Beton-Wand leichter abbrechen lässt, als die mit dem Estrich dickere Gründungsplatte, hat sie ein höheres Potenzial weiterverwendet werden zu können. Insgesamt ist der UMI der Keller-Außenwand so etwas besser: Er beträgt 33,5%.

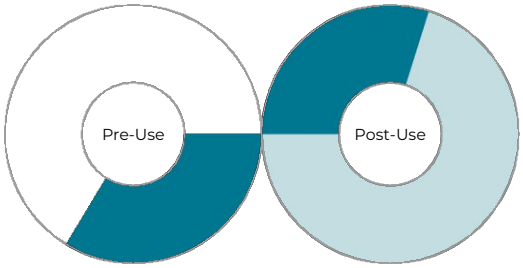
Auch die Kelleraußenwand ist als $CO_2$-reduzierter WU-Beton in XC2 ausgeführt. Das geringere Treibhauspotenzial ist auf den Wegfall des Estrichs und in geringem Ausmaß auf den geringeren Bewehrungsanteil und die wegfallende PE-Folie zurückzuführen. Es beträgt 59,0 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter.

| **Außenwand Keller** | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *662,7 m²* | Beton, WU | | 600,0 | 94,8% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| *Masseanteil* | *12,6%* | Bewehrung | | 15,0 | 2,4% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Schaumglasplatten, verklebt | | 18,0 | 2,8% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **633,0** | | |
| **Wand Keller** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *214,6 m²* | Beton | | 480,0 | 97,6% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| *Masseanteil* | *3,2%* | Stahl-Armierung | | 12,0 | 2,4% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **492,0** | | |

Abb. 159: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Außenwand und Innenwand Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



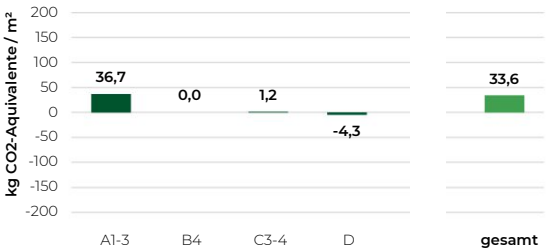
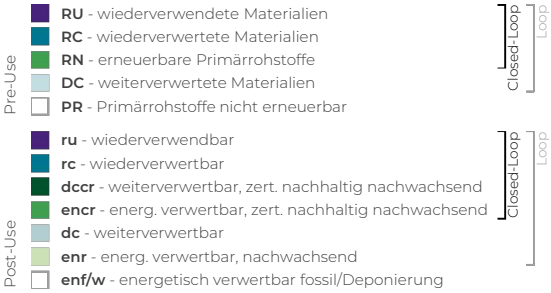




Abb. 160: Wand Keller Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Innenwand Keller

Die Keller-Innenwand besteht rein aus Stahlbeton. Ein Austausch des robusten Materials muss im Lebenszyklus nicht stattfinden. Mit Recycling-Zuschlägen im Beton und Recycling-Stahl wird insgesamt ein Rezyklatanteil von 34% erreicht. Da die Wand ohne weitere Anhaftungen sehr leicht sortenrein rückbaubar ist, kann im Post-Use fast dieselbe Menge recycelt werden. Der Rest kann im Downcycling weiterverwertet werden. Insgesamt wird so ein guter UMI von 49,5% erreicht.

Der Beton mit CEM-II/C-Zement und der Stahl erreichen zusammen ein GWP im Lebenszyklus von 33,6 kg $CO_2$-Eq/m².




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 32% | | | 68% | | | | | 64% | | 36% | 39,4 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 10,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 70% | | | 30% | | | | | | | 100% | 13,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **35%** | **0%** | **0%** | **65%** | **0%** | **2%** | **0%** | **0%** | **61%** | **0%** | **37%** | **62,8** | **0,0** | **1,6** | **-5,4** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **33,5%** | **GWP total:** | | | **59,0** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 32% | | | 68% | | 28% | | | 72% | | 0% | 28,5 | 0,0 | 1,2 | -4,3 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **34%** | **0%** | **0%** | **66%** | **0%** | **30%** | **0%** | **0%** | **70%** | **0%** | **0%** | **36,7** | **0,0** | **1,2** | **-4,3** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **49,5%** | **GWP total:** | | | **33,6** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

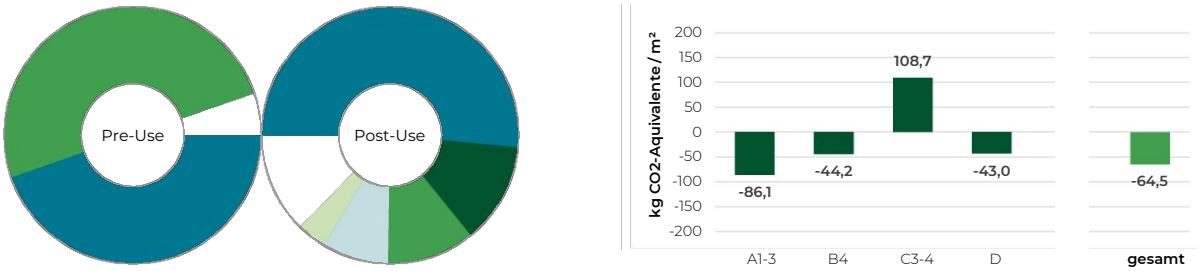



Abb. 161: Außenwand Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand

Die Außenwand von Variante 2 erreicht ein deutlich höheres Kreislaufpotenzial als die erdberührten Bauteile. Ein Grund dafür ist, dass sich die einzelnen Schichten des Holztafelbaus wieder sortenrein, nahezu zerstörungsfrei lösen lassen, da sie primär geschraubt, genagelt, gesteckt und eingeblasen werden. So ist auch der Austausch der einzelnen Materialien im Lebenszyklus gut möglich. Außer der Konstruktion aus Fichtenrahmen und der aussteifenden Diagonalplatte werden alle Schichten einmal ausgewechselt. Selbst die naturbelassene Lerchenfassade erreicht bei guter Wartung eine Nutzungsdauer von 50 Jahren.

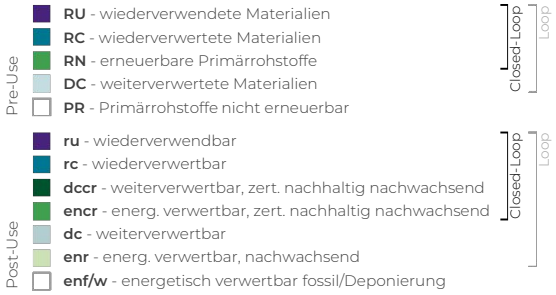
Die relativ leichte Holz-Konstruktion ist – auch weil sie nicht ausgetaucht werden muss – mit 16% Masse-Anteil im Lebenszyklus nicht das gewichtigste Bauteil für den UMI. Wie auch die unbehandelte Fassade und die Unterkonstruktion der Vorsatzschale besteht sie aus Vollholz, also zu 100% aus einer nachwachsenden Ressource. So fallen alle Holz-Bauteile der Außenwand auch im Rückbau in die Kategorie Holz, naturbelassen. Der leimfreie und nahezu metallfreie Aufbau der Primärkonstruktion und Vorsatzschale ermöglicht einen sortenreinen Rückbau. Das Potenzial für eine hochwertige kaskadische Nutzung ist mit 80% sehr hoch – der Rest wird energetisch verwertet. Wie im Rechercheteil diskutiert, wird angenommen, dass 75% der Holzbaustoffe aus zertifiziert nachhaltigem Anbau stammen. Dadurch differenziert sich die Bewertung weiters in dccr/encr für den zertifiziert nachhaltigen Anteil und dc/enr für den Rest. Die Unterkonstruktion der Fassade ist aufgrund ihrer Kleinteiligkeit aufwendiger zurückzubauen – ihr Downcycling-Potenzial ist mit 64% etwas geringer. Hier ist es eher wahrscheinlich, dass sie mit der Fassade gemeinsam energetisch verwertet werden, da ein Rückbau mehr Aufwand bedeutet. Die Dampfbremse aus zweilagigem Kraftpapier mit dazwischenliegendem reisfesten Kunststoffgewebe besteht zwar überwiegend aus nachhaltigen Rohstoffen, aber aufgrund des Materialverbunds kommt im EoL nur eine thermische Verwertung in Frage. Auch die Schafswolle stammt aus erneuerbaren Quellen – abgesehen von der Kunststoff-Stützfaser. Dank der großen Alterungsbeständigkeit und der Herstellerrücknahme ist sie fast vollständig kreislauffähig. Die Holz-Einblasdämmung ist die schwerste Bauteilschicht unter den biotischen Materialien. Die Einblasdämmung hat ein hohes Recycling-Potenzial, da sie wieder leicht abgesaugt und für einen neuerlichen Einsatz aufbereitet werden kann. Ist dies nicht möglich, bleibt

| **Außenwand** | | Bauteilschicht | Austauschhäufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.144,5 m²* | Lehmbauplatte, Vorsatzschale | 1 | 70,4 | 41,0% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| *Masseanteil* | *5,9%* | Holzständer | 1 | 5,7 | 3,3% | Holz, naturbelassen |
| | | Schafswolle, gesteckt | 1 | 2,3 | 1,3% | Herstellerrücknahme |
| | | Dampfbremse Kraftpapier | 1 | 0,3 | 0,2% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Fichte Diagonalplatte, verschraubt | | 14,3 | 8,3% | Holz, naturbelassen |
| | | Fichte, Vollholz | | 13,3 | 7,7% | Holz, naturbelassen |
| | | Holz-Einblasdämmung | 1 | 25,2 | 14,7% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Gipsfaserplatte, verschraubt | 1 | 27,0 | 15,7% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | Lattung | 1 | 3,8 | 2,2% | Holz, naturbelassen |
| | | Lattung Lerche natur | 1 | 9,5 | 5,5% | Holz, naturbelassen |
| | | **Gesamt** | | **171,7** | | |

Abb. 162: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Außenwand. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




eine energetische Verwertung. Die zwei primär mineralischen Baustoffe, die 22 mm starke, schwere Lehmbauplatte und die Gipsfaserplatte stellen – auch aufgrund des einmaligen Austauschs – mehr als die Hälfte der Bauteilmasse. Die Lehmbauplatte besteht aus einem geringen Anteil biotischer Faserstoffe, die hauptsächlich als rückseitige Armierung dienen. Der Lehm, der als Abfallprodukt der Kieswerke als Rezyklat gesehen wird, kann somit annähernd sortenrein rückgewonnen und hochwertig wiederverwertet werden. Auch die Gipsfaserplatte enthält mit Zellulosefasern erneuerbare Primärrohstoffe. Die Hälfte der Platte besteht aus Rezyklat – REA-Gipsen und wiederverwerteten Baugipsen. Da diese zwei Komponenten aber unlösbar verbunden sind, muss das Material deponiert werden.

Wenig überraschend besteht die Außenwand zur Hälfte aus erneuerbaren Primärrohstoffen. Der Wert ist nicht höher, da die lehm- und gipsbasierten mineralischen Plattenbaustoffe so stark ins Gewicht fallen. Da auch die Lehmbauplatte einen sehr hohen Rezyklatanteil hat, sind nur 5% der Pre-Use Baustoffe nicht zirkulär. Das Verwertungspotenzial im EoL ist sehr differenziert. Während die Lehmbauplatte und die Dämmstoffe ein hohes Wiederverwertungspotenzial haben, werden die anderen biotischen Materialien kaskadisch oder energetisch genutzt. Insgesamt wird ein UMI von 86,5% erreicht.

Mit dem großen Anteil an kaum bearbeiteten biologischen Faserstoffen erreich die Außenwand eine sehr gute Klimabilanz. Die Schafswolle als nicht weit verbreitetes Dämmmaterial hat bisher keine EPD auf ÖkobauDat, weshalb auf ein Datensatz aus dem Baubook zurückgegriffen wurde.[276] Auch bei der molkegetränkten Holz-Einblasdämmung als Spezialprodukt wird auf die Hersteller-EPD zurückgegriffen.[277] Das Treibhauspotenzial der Gesamtkonstruktion ist nicht nur in der Herstellung, sondern im gesamten Lebenszyklus negativ und beträgt -64,5 kg $CO_2$-Eq/m².

276 Zum Datensatz siehe: baubook, „Schafwolle Isolena".

277 Diese EPDs schlagen für die Entsorgung der Dämmstoffe allein eine energetische Verwertung vor. Da in dieser Betrachtung auch eine anteilige Wiederverwertung angenommen wird, wurden die Werte für C3+4 und D rechnerisch korrigiert. Zum Datensatz siehe: Bau EPD GmbH, „Umwelt-Produktdeklaration Hobelspandämmung Baufritz".

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 90% | 10% | | 0% | | 90% | | | 10% | | 0% | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -4,3 | -4,3 | 9,7 | -2,1 |
| | | 98% | | 2% | | 98% | | | | | 2% | 1,4 | 1,4 | 0,0 | 0,0 |
| | | 95% | | 5% | | | | 71% | | 24% | 5% | -0,1 | -0,1 | 0,5 | -0,2 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -21,7 | 0,0 | 24,3 | -10,5 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -20,2 | 0,0 | 22,7 | -9,8 |
| | | 99% | | 1% | | 70% | | 23% | | 8% | 0% | -30,0 | -30,0 | 19,0 | -7,7 |
| | 49% | 18% | | 33% | | | | | | | 100% | 3,2 | 3,2 | 0,2 | 0,0 |
| | | 100% | | 0% | | | 48% | 27% | 16% | 9% | 0% | -2,9 | -2,9 | 6,5 | -1,4 |
| | | 100% | | 0% | | | | 75% | | 25% | 0% | -11,6 | -11,6 | 25,9 | -11,2 |
| **0%** | **45%** | **50%** | **0%** | **5%** | **0%** | **48%** | **13%** | **11%** | **8%** | **4%** | **16%** | **-86,1** | **-44,2** | **108,7** | **-43,0** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **86,5%** | **GWP total:** | | | **-64,5** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

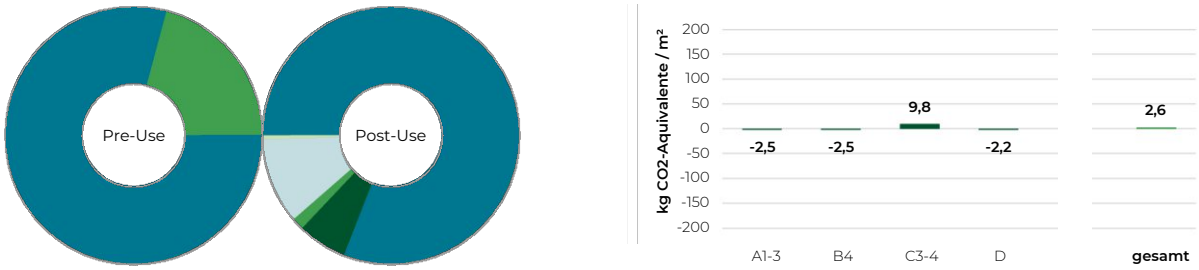



Abb. 163: Trockenbauwand Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Trockenbauwand

Die Trockenbauwand aus Holzständern und einer Lehmbauplatten-Beplankung muss wie die konventionelle Trockenbauwand einmal im Lebenszyklus getauscht werden. Die Nutzungsdauer für Lehmbauplatte und Schafswolle beträgt 50 Jahre und bedingt den Austausch.

Die Beplankung stellt allein fast 90% der Bauteil-Masse. Biologische Faserstoffe machen in Form von Holzfaser-Zuschlägen und einer Kaschierung aus Jutegewebe nur 10% der Lehmbauplatten aus. Der Lehm selbst als Nebenprodukt zählt als Rezyklat. Im Post-Use ist ein Recycling besonders des Lehm-Anteils technisch sehr gut möglich. Wie bereits im vorigen Kapitel ausgeführt, kann die Vollholz-Unterkonstruktion zu einem Großteil weiterverwertet werden. Die Schafswolle, die ein erneuerbarer Rohstoff, aber mit einer Kunststoff-Stützfaser kombiniert ist, ist sehr dauerhaft. Mehrere herstellenden Firmen bieten eine Rücknahme und Wiederverwertung ihrer Schafswolle an, sodass sie als sehr kreislauffähig angesehen werden kann. Das Gesamt-Kreislaufpotenzial ist mit 97% enorm hoch. Dies liegt hauptsächlich am Lehm, weshalb 80% der Verwertung auf Recycling entfällt.

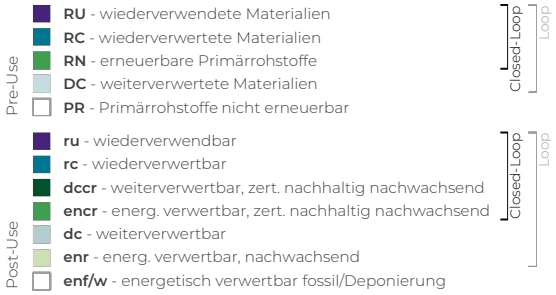
Zudem benötigen die Lehmbauplatten sehr wenig Energie im Lebenszyklus, da sie aus fast unbehandeltem Material bestehen und keinen Brennvorgang benötigen. Selbst die Schafswolle, die in der Herstellung mehrfach gewaschen werden muss, verursacht mehr Emissionen. So ist das GWP der Trockenbauwand mit 2,6 kg $CO_2$-Eq/m² im Lebenszyklus sehr gering.

| **Trockenbauwand** | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *908,9 m²* | Lehmbauplatte, Vorsatzschale | 1 | 70,4 | 44,0% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| *Masseanteil* | *4,4%* | Holzständer | 1 | 16,4 | 10,3% | Holz, naturbelassen |
| | | Schafswolle, gesteckt | 1 | 2,9 | 1,8% | Herstellerrücknahme |
| | | Lehmbauplatte, Vorsatzschale | 1 | 70,4 | 44,0% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **160,1** | | |

Abb. 164: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Trockenbauwand. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 90% | 10% | | 0% | | 90% | | | 10% | | 0% | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -4,3 | -4,3 | 9,7 | -2,1 |
| | | 98% | | 2% | | 98% | | | | | 2% | 1,7 | 1,7 | 0,0 | 0,0 |
| | 90% | 10% | | 0% | | 90% | | | 10% | | 0% | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **79%** | **21%** | **0%** | **0%** | **0%** | **81%** | **6%** | **2%** | **11%** | **1%** | **0%** | **-2,5** | **-2,5** | **9,8** | **-2,2** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **97,0%** | **GWP total:** | | | **2,6** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

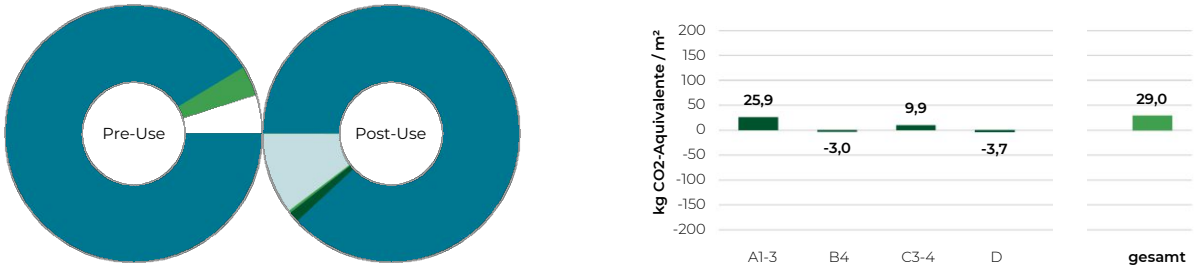



Abb. 165: Wohnungstrennwand OGs Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Wohnungstrennwand

Die Wohnungstrennwand, die 14% des Gebäudevolumens ausmacht, ist nahezu vollständig kreislauffähig. Mit fast 98% besteht der größte Masse-Anteil aus den Lehmsteinen, dem Lehmputz und der Lehm-Trockenbauplatte. Erstere können den gesamten Betrachtungszeitraum überdauern, während die Vorsatzschale einmal ausgetauscht wird.

Entscheidend für das hohe Kreislaufpotenzial ist, dass der Rohstoff Lehm als Nebenprodukt bei der Kiesgewinnung als Recycling-Material angesehen wird. Die Steine und ihr Mörtel sind aus reinem Erdmaterial, dem Lehmputz werden geringfügig biologische Faserstoffe hinzugefügt. Im EoL ist dies vernachlässigbar – beide Schichten gemeinsam können als sortenreiner Lehm zurückgewonnen und dank der Replastizierbarkeit und Alterungsbeständigkeit des Materials leicht wiederverwertet werden. Selbes gilt für die Trockenbauplatte, die sich als Vorsatzschale leicht sortenrein zurückgewinnen lässt. Das hohe Kreislaufpotenzial der Holz-Ständerkonstruktion und Schafswolle-Dämmung wurde im vorigen Kapitel bereits ausführlich erläutert. Der Urban Mining Index für den gesamten Aufbau beträgt 95,0%.

Auch das Treibhauspotenzial fällt mit nur 29,0 kg $CO_2$-Eq/m² im Lebenszyklus günstig aus. Hauptemittent ist das Lehmsteinmauerwerk. Laut Susanne Fröhlich erreicht die Firma Conclay, die mit sehr trockenem Lehm und einem Formpressverfahren arbeitet und dadurch wesentlich weniger Energie für die Trocknung benötigt, einen deutlich günstigeren Wert.[278] Da dazu allerdings keine Daten vorliegen, wird auf die für ein Strangpressverfahren entwickelte Muster-EPD des deutschen Dachverbands Lehm zurückgegriffen.

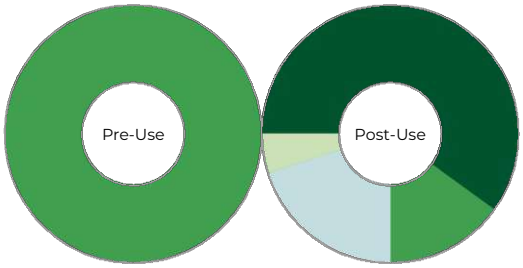
278 Schriftliches Interview mit Dipl.-Ing. Susanne Fröhlich von der Firma Kimm GmbH & Co. KG, 11.05.2023 und Dachverband Lehm eV, „Muster-Umweltproduktdeklaration. Lehmsteine nach DIN 18945".

| | | Bauteilschicht | Austauschhäufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Wohnungstrennwand** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *1.125,9 m²* | Lehmputz | | 33,0 | 5,1% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| *Masseanteil* | *22,0%* | Lehmsteinmauerwerk | | 528,0 | 81,6% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| | | Holzständer | 1 | 13,7 | 2,1% | Holz, naturbelassen |
| | | Schafswolle, gesteckt | 1 | 2,2 | 0,3% | Herstellerrücknahme |
| | | Lehmbauplatte, Vorsatzschale | 1 | 70,4 | 10,9% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **647,2** | | |
| **Ringbalken** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *0,105 m²* | Vollholz, Fichte | | 49,9 | 100,0% | Holz, naturbelassen |
| *Masseanteil* | *0,0%* | **Gesamt** | | **49,9** | | |
| **tragende Innenwand** | | | | | | |
| *Stückzahl* | *48* | Stütze Vollholz Fichte, 120/120 | | 16,9 | 62,2% | Holz, naturbelassen |
| *Masseanteil* | *0,0%* | Unterzug Vollholz Fichte, 120/180 | | 10,3 | 37,8% | Holz, naturbelassen |
| | | **Gesamt** | | **27,2** | | |

Abb. 166: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Wohnungstrennwand, tragende Innenwand und Ringbalken. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



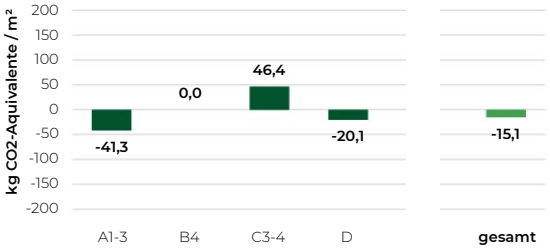




Abb. 167: Tragende Innenwand Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Tragende Innenwand & Ringbalken

Die tragende Innenwand und der Ringbalken bestehen beide aus unbehandelten Vollholzelementen, die sich als Stabtragwerk leicht rückbauen lassen. So erreichen sowohl die Stützen als auch der Unterzug ein gleich hohes Potenzial für eine kaskadische Nutzung wie die Rahmenkonstruktion der Außenwand: 80%. Gleichzeitig wird angenommen, dass 75% der Holzbaustoffe aus zertifiziert nachhaltigem Anbau stammen. Da bereits das Pre-Use Potenzial für die reinen Holzbaustoffe 100% beträgt, wird für beide Bauteile ein hervorragender UMI von 94% erreicht. Die reinen Vollholzkonstruktionen sind klimapositiv. Die tragende Innenwand bindet im Lebenszyklus 15,1 kg $CO_2$Eq pro Laufmeter und der massivere Ringbalken 27,7 kg $CO_2$Eq. Als aufgelöste Konstruktionen fallen beide Bauteile im Bezug auf die Gesamtkonstruktion kaum ins Gewicht – selbst zusammengerechnet erreichen sie weniger als 1% der Gebäudemasse.

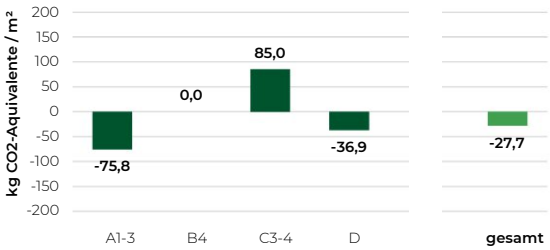
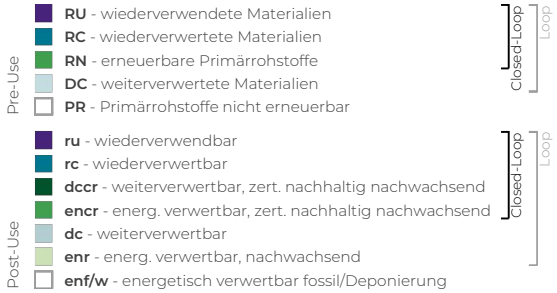



Abb. 168: Ringbalken Variante 2: Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 3% | | 97% | | 90% | | | 10% | | 0% | 1,4 | 0,0 | 0,0 | -0,1 |
| | 100% | | | 0% | | 90% | | | 10% | | 0% | 27,5 | 0,0 | 0,1 | -1,5 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -4,3 | -4,3 | 9,7 | -2,1 |
| | | 98% | | 2% | | 98% | | | | | 2% | 1,3 | 1,3 | 0,0 | 0,0 |
| | 90% | 10% | | 0% | | 90% | | | 10% | | 0% | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **91%** | **4%** | **0%** | **5%** | **0%** | **88%** | **1%** | **0%** | **10%** | **0%** | **0%** | **25,9** | **-3,0** | **9,9** | **-3,7** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **95,0%** | **GWP total:** | | | **29,0** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -75,8 | 0,0 | 85,0 | -36,9 |
| **0%** | **0%** | **100%** | **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **60%** | **15%** | **20%** | **5%** | **0%** | **-75,8** | **0,0** | **85,0** | **-36,9** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **94,0%** | **GWP total:** | | | **-27,7** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -25,7 | 0,0 | 28,9 | -12,5 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -15,6 | 0,0 | 17,5 | -7,6 |
| **0%** | **0%** | **100%** | **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **60%** | **15%** | **20%** | **5%** | **0%** | **-41,3** | **0,0** | **46,4** | **-20,1** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **94,0%** | **GWP total:** | | | **-15,1** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

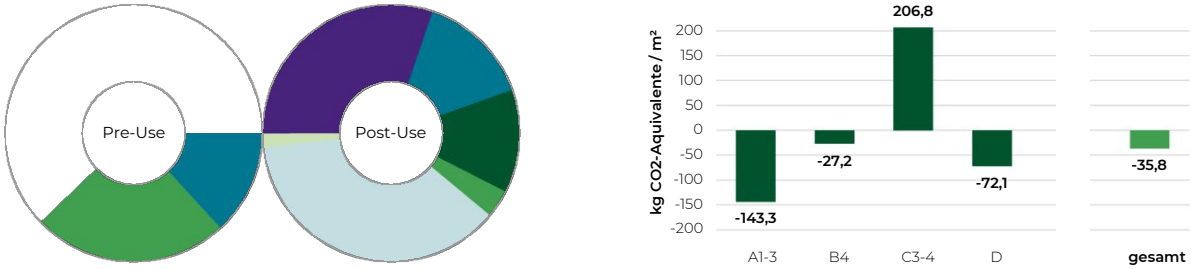



Abb. 169: Geschossdecke Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Geschossdecke

Die Geschossdecke in Variante 2 ist mehr als zur Hälfte kreislauffähig – bei einer sehr guten Klimabilanz. Die Konstruktion aus mit Holzdübeln gefügtem Brettstapelholz und einer zimmermannsmäßig gefügten Diagonalplatte ist leim- und nahezu metallfrei. Aufgrund der trockenen Ausführung des Bodenaufbaus sind alle Schichten lösbar verbunden – großteiles allein durch Auflast – wodurch fast alle Materialien sortenrein und zerstörungsfrei rückgebaut werden können. Der Fußbodenaufbau muss im Lebenszyklus einmal getauscht werden; das Klickparkett sogar dreimal.

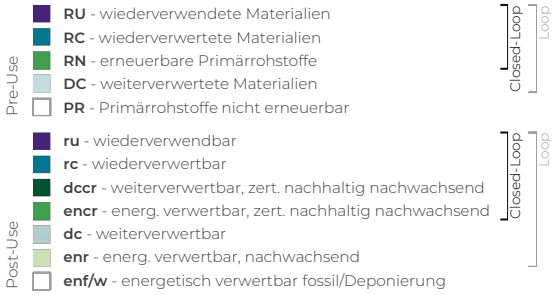
Die tragenden Bauteile, die Brettstapeldecke und die aussteifende Diagonalschalung, überdauern den gesamten Betrachtungszeitraum. Als unbehandelte Hölzer bestehen beide zu 100% aus einem nachhaltigen Rohstoff und zählen dank der einstofflichen Verbindungen beide im EoL als Holz, naturbelassen. Schalung und Stapeldecke können gemeinsam mit wenig Aufwand sortenrein rückgebaut werden, sodass sie ein sehr hohes Weiterverwertungspotenzial von 80% erreichen. Da angenommen wird, dass 75% des Holzes aus zertifiziert nachhaltigen Quellen stammen, ist das Post-Use Potenzial somit sehr gut. Die 10 cm hohe Splitt-Schüttung macht mehr als ein Drittel der Gesamtmasse aus. Sie besteht zwar aus Primärrohstoffen, kann aber, da sie ungebunden eingebracht wird, leicht abgesaugt und wiederverwendet werden. So kann sie auch beim allfälligen Austausch des Bodenaufbaus direkt wieder eingebracht werden. Die Kartonwaben und der Rieselschutz aus Kraftpapier, die die Schüttung in ihrer Position halten, bestehen überwiegend aus Zellulose. Da der Rieselschutz ein Verbundmaterial ist und aufgrund der geringen Menge werden sie keinem Downcycling, sondern einer energetischen Verwertung zugeführt. Die Trittschalldämmung besteht neben Hanf aus Kunststoff-Stützfasern und Soda. Dank der Herstellerrücknahme kann sie fast vollständig wiederverwertet werden. Die zementgebundenen Lavasplitt-Platten des Trockenestrichs aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen können problemlos wiederverwendet werden, da sie sehr dauerhaft, modular und zerstörungsfrei ausbaubar sind. Weil es sich aber um ein sehr spezielles Bauteil handelt, muss angenommen werden, dass nicht immer Nachfrage nach einer Wiederverwendung besteht und auch ein großer Teil des Estrichs weiterverwertet wird. Das Treibhauspotenzial des Estrichs wurde unter Absprache mit dem Hersteller basierend auf einer EPD für Betonsteine be-

| **Geschossdecke** | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.335,0 m²* | Belag Klickparkett | 3 | 19,0 | 3,8% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *19,9%* | Trocken-Estrich | 1 | 126,0 | 25,4% | sortenreiner Rückbau |
| | | Hanf-TSDM, lose verlegt | 1 | 7,8 | 1,6% | Herstellerrücknahme |
| | | Lehmbauplatte | 1 | 70,4 | 14,2% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| | | Splitt-Schüttung, lose | | 180,0 | 36,3% | Splitt, sortenrein |
| | | Karton-Waben | 1 | 2,1 | 0,4% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Rieselschutz | 1 | 0,3 | 0,1% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Fichte Diagonalplatte | | 14,3 | 2,9% | Holz, naturbelassen |
| | | Brettstapelholz, Hartholzdübel | | 76,0 | 15,3% | Holz, naturbelassen |
| | | **Gesamt** | | **495,8** | | |

Abb. 170: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Geschossdecke. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




rechnet.[279] Die 22 mm dicke Lehmbauplatte enthält nur einen kleinen Teil an biologischen Faserstoffen. Da somit der Lehm nahezu sortenrein verbaut ist, kann sie leicht recycelt werden. Aufgrund des hohen Gewichts bilden sich primär die mineralischen Materialien im UMI ab. Trotz der vielen biologischen Baustoffe sind mehr als 60% der Masse nicht erneuerbare Primärrohstoffe. Immerhin der größte Verwertungsweg ist noch vor Downcycling die Wiederverwendung. Der UMI beträgt 59,0%.

Das Global Warming Potential ähnelt jenem der Außenwand. Mit vielen kohlenstoffspeichernden Bauteilen, besonders der Bettstapeldecke, ist das GWP in der Herstellung negativ. In der Entsorgung (Modul C3-4) wird bei Hölzern die energetische Verwertung und Freisetzung des gebundenen $CO_2$s angenommen. Da erstens durch diese Verwertung aktuell noch fossile Brennstoffe subsituiert werden und zweitens auch eine stoffliche Verwertung, die diese Freisetzung aufschiebt, prognostiziert wird, werden große Vorteile außerhalb der Systemgrenze angerechnet. Im Lebenszyklus ist somit das Kreislaufpotenzial mit -35,8 kg $CO_2$-Eq/m² negativ.

279 Die verwendete Umweltproduktdeklaration lautet: Institut für Bauen und Umwelt e.V. und Bundesverband Leichtbeton e.V., „EPD Mauersteine aus Leichtbeton mit Trass-Zement - Vollstein schwer".

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 94% | | 6% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | 29% | | | | 71% | | 0% | 3,4 | 3,4 | 0,1 | 0,0 |
| | | 87% | | 13% | | 97% | | | | 3% | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | 0,0 |
| | 90% | 10% | | 0% | | 90% | | | 10% | | 0% | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| | | | | 100% | 63% | | | | 37% | | 0% | 0,4 | 0,0 | 1,7 | -0,5 |
| | 100% | | | 0% | | | | | | 100% | 0% | -0,7 | -0,7 | 3,7 | -1,3 |
| | | 95% | | 5% | | | | | | 95% | 5% | -0,1 | -0,1 | 0,5 | -0,2 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -21,7 | 0,0 | 24,3 | -10,5 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -115,5 | 0,0 | 129,6 | -56,2 |
| **0%** | **13%** | **25%** | **0%** | **62%** | **30%** | **14%** | **13%** | **4%** | **37%** | **2%** | **0%** | **-143,3** | **-27,2** | **206,8** | **-72,1** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **59,0%** | **GWP total:** | | | **-35,8** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

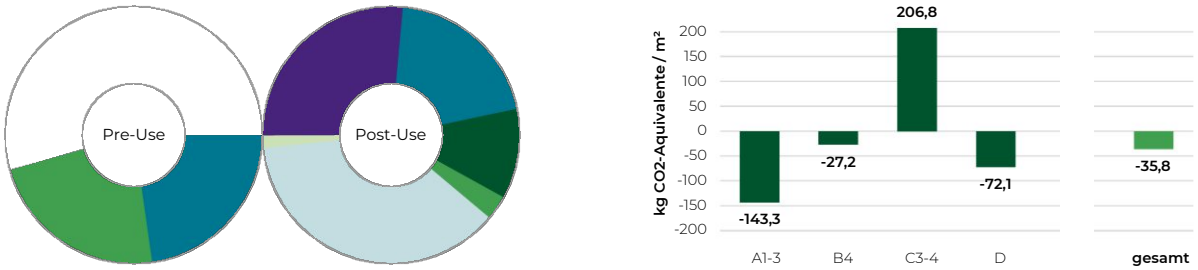
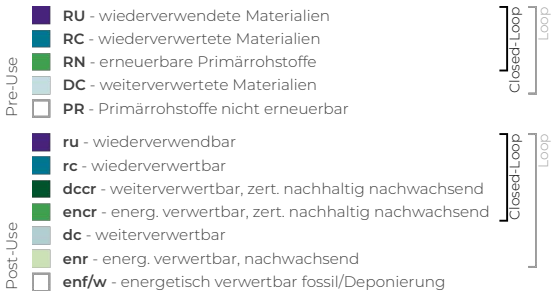



Abb. 171: Decke Erschließung Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Decke Erschließung

Die Decke der Erschließung ist ident aufgebaut wie die Geschossdecke inclusive deren Austauschhäufigkeit und Kreislaufpotenzial. Die entscheidende Abweichung ist die unterseitige Beplankung der Brettstapelholzdecke mit einer Lehmbauplatte, welche 12% der Bauteilmasse ausmacht und einmal im Lebenszyklus ausgetauscht werden muss.

Da die Lehmbauplatte nicht lose verlegt oder als Vorsatzschale eingesetzt wird, sondern überkopf direkt auf die Brettstapeldecke geschraubt wird, hat sie ein geringeres Potenzial für eine sortenreine Rückgewinnung als die anderen Lehmbauplatten. So wird die Wahrscheinlichkeit einer Wiederverwertung nur mit 62% anstatt mit 90% angenommen. Da ihre Zirkularität dennoch höher ist als der Durchschnitt der Geschossdecke, verbessert sich der UMI auf 63,0%. Aufgrund der enorm energiearmen Herstellung zeichnet sie sich im Treibhauspotenzial im Lebenszyklus fast überhaupt nicht ab. Das GWP der Decke ist mit -35,7 kg $CO_2$-Eq/m² nur minimal höher.




| Decke Erschließung | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *217,6 m²* | Belag | 3 | 19,0 | 3,4% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *3,7%* | Trocken-Estrich | 1 | 126,0 | 22,3% | sortenreiner Rückbau |
| | | Hanf-TSDM, lose verlegt | 1 | 7,8 | 1,4% | Herstellerrücknahme |
| | | Lehmbauplatte | 1 | 70,4 | 12,4% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| | | Splitt-Schüttung, lose | | 180,0 | 31,8% | Splitt, sortenrein |
| | | Karton-Waben | 1 | 2,1 | 0,4% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Rieselschutz | 1 | 0,3 | 0,0% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Fichte Diagonalplatte | | 14,3 | 2,5% | Holz, naturbelassen |
| | | Brettstapelholz, Hartholzdübel | | 76,0 | 13,4% | Holz, naturbelassen |
| | | Lehmbauplatte, verschraubt | 1 | 70,4 | 12,4% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **566,2** | | |

| Decke zu Keller | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *308,4 m²* | Belag Klickparkett | 3 | 19,0 | 2,2% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *8,1%* | Trocken-Estrich | 1 | 126,0 | 14,4% | sortenreiner Rückbau |
| | | Hanf-TSDM, lose verlegt | 1 | 7,8 | 0,9% | Herstellerrücknahme |
| | | Lehmbauplatte | 1 | 70,4 | 8,0% | Lehmbaustoffe, sortenrein |
| | | Holzfaser-Dämmung, lose verlegt | 1 | 33,1 | 3,8% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Beton | | 600,0 | 68,5% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,3% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **876,3** | | |

Abb. 172: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Decke Erschließung und Decke zu Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

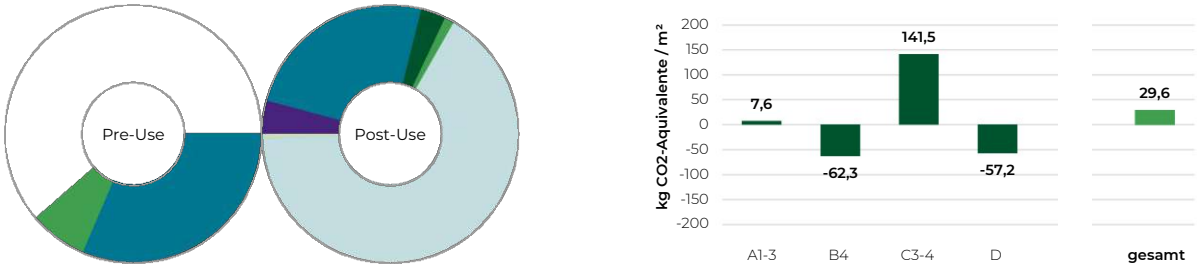



Abb. 173: Decke zu Keller Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Decke zu Keller

Auch die Decke über dem Keller hat einen sehr ähnlichen Fußbodenaufbau. Hinzu kommt eine Dämm-Ebene und eine Decke aus Stahlbeton-Ortbeton, weg fällt die Schüttung samt Rieselschutz und Waben. Die Dämmung aus Holzfasern muss wie der Fußbodenaufbau einmal ausgewechselt werden. Sie enthält neben Holfasern auch textile Bindefasern und 5% Flammschutzmittel, weshalb sie nicht komplett aus nachwachsenden Rohstoffen besteht und in die Abfallfraktion Holz, verleimt / beschichtet fällt. Da sie zwischen Trittschallplatte und Beton ohne weitere Befestigung verlegt wird, ist sie sortenrein rückbaubar. Mit 70% hat sie ein gutes Weiterverwertungspotenzial. Wie bei nahezu allen Holzbaustoffen erfolgt alternativ eine energetische Verwertung. Der Beton erreicht mit den Recycling-Zuschlägen ein Pre-Use Kreislaufpotenzial von 32%. Ohne weitere Anhaftungen kann er im EoL leicht sortenrein abgebrochen werden. Er kann in Teilen hochwertig und ansonsten als Downcycling weiteverwertet werden. Der UMI ist mit 52,5% etwas schlechter als jener der anderen Decken, was auf die begrenzte hochwertige Verwertbarkeit des Betons zurückzuführen ist.

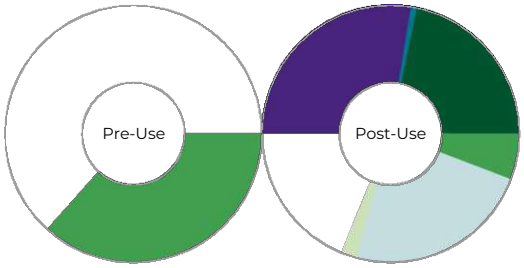
Trotz der hohen $CO_2$-Bindung der Holfaser-Dämmung ist dieser Deckenaufbau weder in der Herstellung noch im gesamten Lebenszyklus klimapositiv. Mit 29,6 kg $CO_2$-Eq/m² ist der Wert für eine Betondecke dennoch sehr gut.

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 94% | | 6% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | 29% | | | | 71% | | 0% | 3,4 | 3,4 | 0,1 | 0,0 |
| | | 87% | | 13% | | 97% | | | | 3% | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | 0,0 |
| | 90% | 10% | | 0% | | 90% | | | 10% | | 0% | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| | | | | 100% | 63% | | | | 37% | | 0% | 0,4 | 0,0 | 1,7 | -0,5 |
| | 100% | | | 0% | | | | | | 100% | 0% | -0,7 | -0,7 | 3,7 | -1,3 |
| | | 95% | | 5% | | | | | | 95% | 5% | -0,1 | -0,1 | 0,5 | -0,2 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -21,7 | 0,0 | 24,3 | -10,5 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -115,5 | 0,0 | 129,6 | -56,2 |
| | 90% | 10% | | 0% | | 62% | | | 38% | | 0% | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **23%** | **23%** | **0%** | **54%** | **26%** | **20%** | **11%** | **3%** | **37%** | **1%** | **0%** | **-143,3** | **-27,1** | **206,9** | **-72,1** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **63,0%** | **GWP total:** | | | **-35,7** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 94% | | 6% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| | | | | 100% | 29% | | | | 71% | | 0% | 3,4 | 3,4 | 0,1 | 0,0 |
| | | 87% | | 13% | | 97% | | | | 3% | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | 0,0 |
| | 90% | 10% | | 0% | | 90% | | | 10% | | 0% | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| | | 95% | | 5% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -35,9 | -35,9 | 92,9 | -48,4 |
| | 32% | | | 68% | | 21% | | | 79% | | 0% | 35,6 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **31%** | **7%** | **0%** | **61%** | **4%** | **25%** | **3%** | **1%** | **66%** | **0%** | **0%** | **7,6** | **-62,3** | **141,5** | **-57,2** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **52,5%** | **GWP total:** | | | **29,6** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



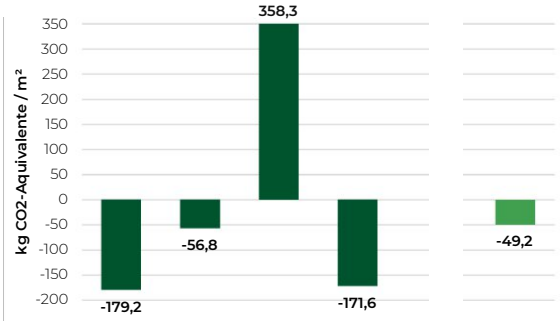




Abb. 174: Dach Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Dach

Das Dach besteht aus derselben Konstruktion wie die Geschossdecke: Brettstapelholz und Diagonalplatte. Da das Dach insgesamt wesentlich leichter ist, fällt die Konstruktion im Verhältnis zum gesamten Bauteil wesentlich mehr ins Gewicht. Vollständig aus erneuerbaren Quellen und mit einem guten Weiterverwendungspotenzial ist ihr Kreislaufpotenzial sehr gut. Dampfsperre, Dämmung und Abdichtung müssen im Betrachtungszeitraum ein Mal ausgetauscht werden. Die Holzfaserdämmung wurde im Kapitel Decke zu Keller bereits diskutiert – ihr UMI ist nur geringfügig schlechter als jener der Konstruktion. Die bituminöse Dampfsperre kann in Teilen recycelt werden. Da die Wahrscheinlichkeit dafür von der sortenreinen Rückbaubarkeit abhängt, kann sie in dieser Variante, wo sie nur lose auf der Holzdecke verlegt wird, gut abschneiden. Die EPDM-Abdichtung hat als Kunststoff-Material trotz der sortenreinen Rückbaubarkeit kein zirkuläres Verwertungspotenzial. Die Kiesauflage als sortenrein und zerstörungsfrei rückbaubares, beständiges Material hingegen kann wiederverwendet werden. Insgesamt ergibt sich ein Kreislaufpotenzial von 52,5%.

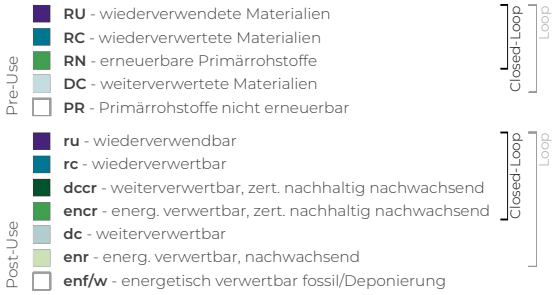
Mit fast ausschließlich biotischen Baustoffen erreicht das Dach eine sehr gute Klimabilanz. Die $CO_2$-speichernde Funktion der vielen Holzbaustoffe kann die hohen Emissionen der Abdichtung bei Weitem ausgleichen. Selbst über den gesamten Lebenszyklus speichert das Bauteil mit −49,2 kg $CO_2$-Eq/m² deutlich mehr Treibhausgasemissionen als es verursacht.

| **Dach** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *338,2 m²* | Schüttung Kies | | 108,0 | 43,8% | Splitt, sortenrein |
| *Masseanteil* | *2,5%* | Abdichtung EPDM, lose verlegt | 1 | 4,0 | 1,6% | Kunststoffe |
| | | Holzfaser-Dämmung | 1 | 33,0 | 13,4% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Holzfaser-Gefälledämmung | 1 | 10,0 | 4,1% | bio. Faserstoffe, kompostierbar |
| | | Aluminium-Bitumenbahn, lose verlegt | 1 | 11,0 | 4,5% | Bitumengemisch |
| | | Fichte Diagonalplatte | | 14,3 | 5,8% | Holz, naturbelassen |
| | | Brettstapelholz, Hartholzdübel | | 66,5 | 27,0% | Holz, naturbelassen |
| | | **Gesamt** | | **246,8** | | |

Abb. 175: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Dach. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | 63% | | | | 37% | | 0% | 0,3 | 0,0 | 1,5 | -0,4 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 8,4 | 8,4 | 13,6 | -4,8 |
| | | 95% | | 5% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -51,6 | -51,6 | 157,2 | -81,8 |
| | | 95% | | 5% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -15,6 | -15,6 | 47,6 | -24,8 |
| | | | | 100% | | 16% | | | | | 84% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -21,7 | 0,0 | 24,3 | -10,5 |
| | | 100% | | 0% | | | 60% | 15% | 20% | 5% | 0% | -101,0 | 0,0 | 113,4 | -49,2 |
| **0%** | **0%** | **37%** | **0%** | **63%** | **28%** | **1%** | **22%** | **6%** | **23%** | **2%** | **19%** | **-179,2** | **-56,8** | **358,3** | **-171,6** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **52,5%** | **GWP total:** | | | **-49,2** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Auswertung

Bauen mit natürlichen Materialien war bis vor der Industriellen Revolution vor etwa 200 Jahren für viele Aufgaben alternativlos. Die Recherche ergab, dass aktuell vielfach ein Rückgriff moderner industrieller Fertigungstechniken auf diese traditionellen Baustoffe und Fügungen stattfindet – durch das Wiedererstarken zimmermannsmäßiger und einstofflicher Verbindungen im Holzbau, durch die industrielle Herstellung von Lehmsteinen und durch die Wiederentdeckung alter Baustoffe wie Stroh, Hanf oder Wolle. Dank dieser Entwicklungen ist es möglich, die gesamte Obergeschoss-Konstruktion naturbelassen – also frei von synthetischen Stoffen und nahezu ohne metallische Verbindungen – zu realisieren. Die zwei konstruktiven Materialien Holz und Lehm ergänzen sich hierbei gut. Das leichte, zugbelastbare Holz ist für thermische Bauteile und Decken hervorragend geeignet und als erneuerbarer Rohstoff aus überwiegend zertifiziert nachhaltigem Anbau sehr zirkulär. Lehm, der neben thermischer Masse über hervorragende Schall- und Brandschutz-Eigenschaften verfügt, ist für den Innenbereich geeignet und dank seiner Replastifizierbarkeit ebenfalls nahezu uneingeschränkt zirkulär. Im Ausbau existieren bereits eine Vielzahl an Dämmstoffen, Trockenbauplatten und Belägen aus nachwachenden und natürlichen Rohstoffen, die bei sehr guter Kreislauffähigkeit vergleichbar funktionstauglich sind wie konventionelle Produkte.

Drei wesentliche Schwächen schränken die Einsetzbarkeit dieser Bauweise ein. Erstens muss bei Hölzern und biologischen Faserstoffen stets der Brandschutz beachtet werden, weshalb eine Kapselung der Außenwand mit Gipsfaserplatten nötig war. Zweitens müssen für die Abdichtung, Dampfsperre und Dampfbremse Kunststoffe verwendet werden. Und drittens sind diese Materialien nicht feuchtebeständig, weshalb für alle erdberührten Bauteile auf Beton und andere mineralische Materialien zurückgegriffen wurde. Da die Holzkonstruktion mit 9% Masseanteil sehr leicht ist, fallen der Keller und die ebenfalls betonierte Erdgeschossdecke mit gemeinsam mehr als 40% deutlich ins Gewicht.

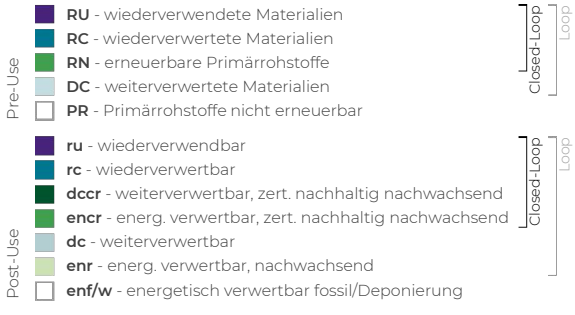
Trotz Recycling-Beton erreichen die erdberührten Bauteile ein wesentlich geringeres Kreislaufpotenzial als die Obergeschoss-Bauteile aus naturbelassenen Materialien. Die Außenwand, Trockenbauwand und Wohnungstrennwand sind fast vollständig zirkulär. Der schwere Lehm, aus dem fast ein Drittel des Gebäudes besteht, zeichnet sich im UMI mit hohen Wiederverwertungswerten sowohl im Pre-Use als auch im Post-Use ab. Hölzer und andere biologische Faserstoffe erreichen gemeinsam nur 12%. Der hohe Anteil von 45% an nicht erneuerbaren Primärrohstoffen in der Errichtung inkludiert auch die losen Splitt-Schüttungen auf der Geschossdecke und dem Dach, welche im EoL hochwertig verwertet werden können. Insgesamt sind so im Gebäudelebensende nur 15% nicht zirkulär und das Kreislaufpotenzial der gesamten Variante 2 beträgt beachtliche 61%.

Während die nachwachsenden Rohstoffe im Kreislaufpotenzial wenig ins Gewicht fallen, beeinflussen sie dank ihrer $CO_2$-bindenden Eigenschaften das GWP enorm positiv. Sie können die großen Herstellungs-Emissionen des Betons mehr als ausgleichen. Lehm, der kaum Energie in der Herstellung benötigt, spielt beim GWP eine untergeordnete Rolle. Mit -249,7 t $CO_2$-Eq. ist das Gebäude in der Herstellung eine großer Kohlenstoffspeicher. Selbst im gesamten Lebenszyklus ist Variante 2 mit -2,3 t $CO_2$-Eq. klimaneutral.

Sowohl bei der stofflichen Kreislaufführung als auch bei der $CO_2$-Bilanz schneiden Lehm, Holz und andere natürliche Baustoffe sehr gut ab. Wie hoch deren Potenzial ist, verdeutlicht eine Betrachtung,

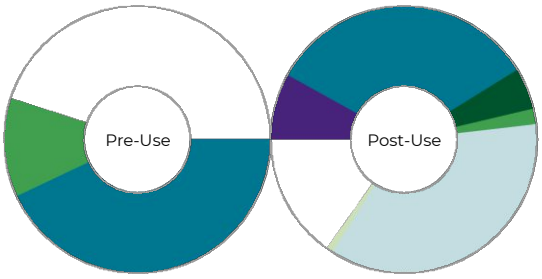
| Masseanteil: | |
|---|---|
| Keller | 33,4% |
| Außenwand | 5,9% |
| Tragende Wände | 22,0% |
| Trockenbau | 4,4% |
| Decken Holz | 23,7% |
| Decke EG Beton | 8,1% |
| Dach | 2,5% |

Abb. 176: Variante 2: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude. Eigene Darstellung.






TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| | | | |
|---|---|---|---|
| Wiederverwendung | 0% | Wiederverwendung | 8% |
| Wiederverwertung | 43% | Wiederverwertung | 33% |
| Erneuerbare Rohstoffe | 12% | Weiterverwertung z.N. | 5% |
| Weiterverwertung | 0% | Energetische Verwertung z.N. | 2% |
| nicht kreislauffähig | 45% | Weiterverwertung | 36% |
| | | Energetische Verwertung | 1% |
| | | nicht kreislauffähig | 15% |
| Pre-Use | 55% | Post-Use | 66% |
| **UMI gesamt** | **61%** | | |

Abb. 177: Variante 2: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.




GWP [tCO2Eq.]

| | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
|---|---|---|---|---|
| | -249,7 | -136,8 | 638,0 | -253,7 |
| **GWP total** | | | | **-2,3** |

Abb. 178: Variante 2: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

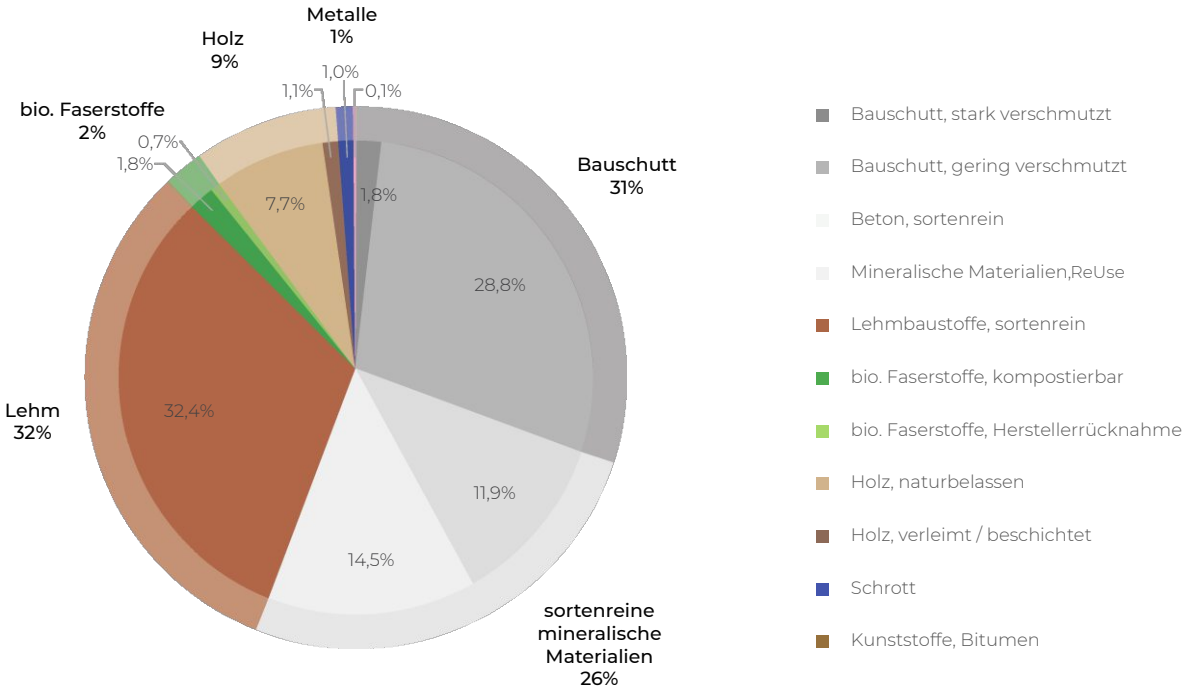



Abb. 179: Variante 2: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet. Eigene Darstellung.



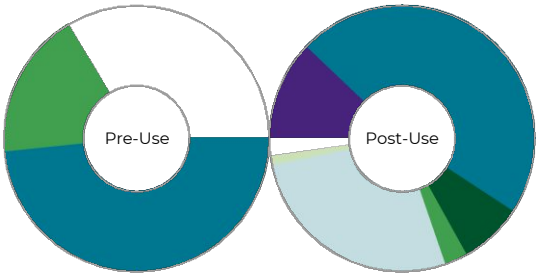
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

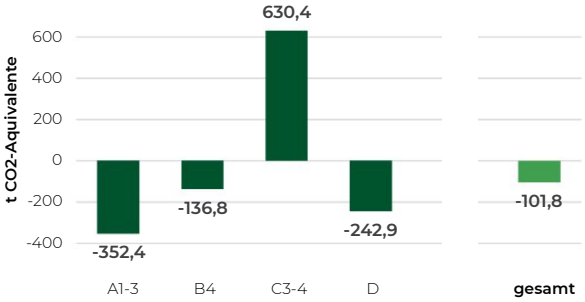
bei der der Keller – nicht aber die Erdgeschoss-Decke – ausgeklammert ist. Dann steigt das Kreislaufpotenzial auf 75%, wobei im EoL nur 2% nicht kreislauffähig sind. Mit einem Treibhauspotenzial von -101,8 t $CO_2$-Eq. ist das Gebäude sogar im Lebenszyklus eine Kohlenstoffsenke.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die natürliche Bauweise eine sehr hohe Zirkularität bei minimalen Umweltbelastungen erreicht. Insbesondere im Holzbau und bei den Ausbauprodukten sind bereits etablierte Fügetechniken und Produkte verfügbar. Die Errichtung von fünfgeschossigen Gebäuden reizt jedoch die rechtlichen Grenzen dieser Bauweise aus. Im Lehmbau ist dies nur knapp zulässig und wurde erst 2023 basierend auf einer deutschen Norm ermöglicht. Der Holzbau profitiert wiederum von den Brandschutzerleichterungen in Vorarlberg. Mit nur vier Geschossen – und idealerweise ohne betonierten Keller – kann so jedoch überall in Österreich sehr zirkulär gebaut werden.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| | | | |
|---|---|---|---|
| Wiederverwendung | 0% | Wiederverwendung | 12% |
| Wiederverwertung | 48% | Wiederverwertung | 47% |
| Erneuerbare Rohstoffe | 18% | Weiterverwertung z.N. | 8% |
| Weiterverwertung | 0% | Energetische Verwertung z.N. | 3% |
| nicht kreislauffähig | 34% | Weiterverwertung | 27% |
| | | Energetische Verwertung | 1% |
| | | nicht kreislauffähig | 2% |
| Pre-Use | 66% | Post-Use | 84% |
| **UMI gesamt** | **75%** | | |

GWP [tCO2Eq.]

| | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
|---|---|---|---|---|
| | -352,4 | -136,8 | 630,4 | -242,9 |
| **GWP total** | | | | **-101,8** |

Abb. 180: Variante 2: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial, wenn der Keller aus der Betrachtung ausgeklammert wird. . Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.







Abb. 181: Links: Circle House Demonstrator, Kopenhagen, GXN (2018). Foto: Jersø.
Abb. 182: Rechts oben: Temporäres Parlament, Wien, WGA ZT mit Lukas Lang Building Technologies (2017-2023). Foto: Hörbst
Abb. 183: Rechts unten: Studentenheim WOODIE, Hamburg, Kaufmann Bausysteme (2023). Foto: Kaufmann Bausysteme.

# VARIANTE 3: SYSTEMBAUWEISE

## VORFERTIGUNG & WIEDERVERWENDUNG

Die Systembauweise, die auf industrialisierter Standardisierung und Vorfertigung aller Bauteile basiert und ein modulares Baukastensystem verwendet, zeigt ein großes Potenzial für die Bauteilwiederverwendung. Durch die Verwendung vieler serienmäßig gleicher, reversibel verbundener Elemente in einem Gebäude können diese leicht zurückgebaut und in anderer Form neu kombiniert, sprich wiederverwendet werden. Das Kreislaufpotenzial der Systembauweise sowie der mögliche Einsatz von ReUse Bauteilen und zirkulären Geschäftsmodellen, insbesondere im Ausbau, werden in dieser Variante untersucht.

Beispiele für eine Systembauweise sind der Circle House Demonstrator von GXN in Kopenhagen, der mit einer Beton-Systembauweise errichtet wurde, das Holz-System von Lukas Lang Building Technologies und die Holz-Modulbauweise von Kaufmann Bausysteme.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kriterien:

Die Bauteilwiederverwendung und eine modulare Bauweise werden in politischen Zielsetzungen als wichtiger Baustein zur Kreislaufführung am Bau genannt. Indem ganze Elemente in ihrer originellen stofflichen Gestalt und für eine gleichwertige Nutzung wieder eingesetzt werden, können – so die Idee – dank wegfallender Verwertungswege Energie und Ressourcen bestmöglich geschont werden. Diese Variante strebt also eine geschlossene Kreislaufführung durch die Wiederverwendung möglichst vieler Bauteile sowohl im Pre- als auch im Post-Use an.

Eingangs wurde bereits erklärt, dass der Markt für eine Wiederverwendung konstruktiver Bauteile aktuell noch sehr eingeschränkt ist. Doch indem jetzt schon entsprechend geplant wird, steigt zumindest in Zukunft das Potenzial für eine Wiederverwendung der Bauteile und Elemente. Entscheidend dafür ist die Möglichkeit einer zerstörungsfreien De- und Remontage – mittels trockener, leicht lösbarer und zugänglicher Verbindungen. Eine modulare Bauweise, die mit einem hohen Grad an werkseitiger Vorfertigung bauseits auf eine schnelle, einfache Fügung gesamter Bauteile angewiesen ist, hat hierfür besonders hohes Potenzial. Zudem erhöht laut Dr. Falk Schneemann der Einsatz serieller Elemente und einer geringen Anzahl unterschiedlicher Details das Wiederverwendungspotenzial.[280] In dieser Variante wird deshalb eine Systembauweise mit möglichst demontablen Verbindungsdetails angestrebt.

Wo es bereits heute möglich ist, wird der Einsatz wiederverwendeter (ReUse) Bauteile angestrebt – besonders durch die Nutzung neuer Geschäftsmodelle wie Bauteilbörsen und Rücknahmevereinbarungen. Hierfür ist die Materialwahl zweitrangig. Entscheidend sind geeignete Angebote und die Eignung zur Wiederverwendung dank zerstörungsfreier Montage. Ist keine Wiederverwendung möglich, so wird zumindest eine Kreislaufführung durch Wiederverwertung angestrebt.

Da diese Variante eine konsequente Umsetzung einer Systembauweise anstrebt, wird zuerst mittels vergleichender Recherche existierender Bausysteme eine hierfür geeignete Bauweise ausgewählt. Basierend auf dieser Bauweise erfolgen sowohl die Ausführung der Konstruktion als auch der Ausbau-Elemente. Nur, wo der Systembau an seine Grenzen kommt oder eine Materialwahl die Kompatibilität der Bauweise nicht beeinflusst, werden alternative Lösungen diskutiert. Auch hierfür wird eine möglichst umfängliche Betrachtung der in Frage kommenden Baustoffe angestrebt. Gerade im Bereich der Bauteilwiederverwendung ist der Markt jedoch sehr volatil, sodass nur eine Momentaufnahme der vorhandenen Lösungen möglich ist.

280 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 54.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

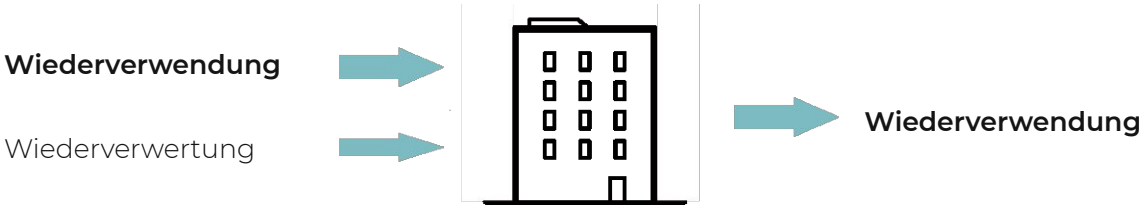
## Materialien

| für Vorfertigung geeignet | Konstruktion | Ausbau |
|---|---|---|
| | Holz, Stahl, Beton | Herstellerrücknahme / Leasing, materialunabhängig |

## Fügetechnik

| Design für De- & Remontage | trockene, gut lösbare Verbindungen | Standardisierung / Modularität |
|---|---|---|
| | Schrauben, Stecken, Einhängen, loses Auflager, ... | Geringe Anzahl verschiedener Details, Redundanz |

## Angestrebte Kreislaufführung




## Bedingungen

möglichst hohe Vorfertigung und Systembauweise

zerstörungsfreie De-&Remontage möglicht vieler Elemente

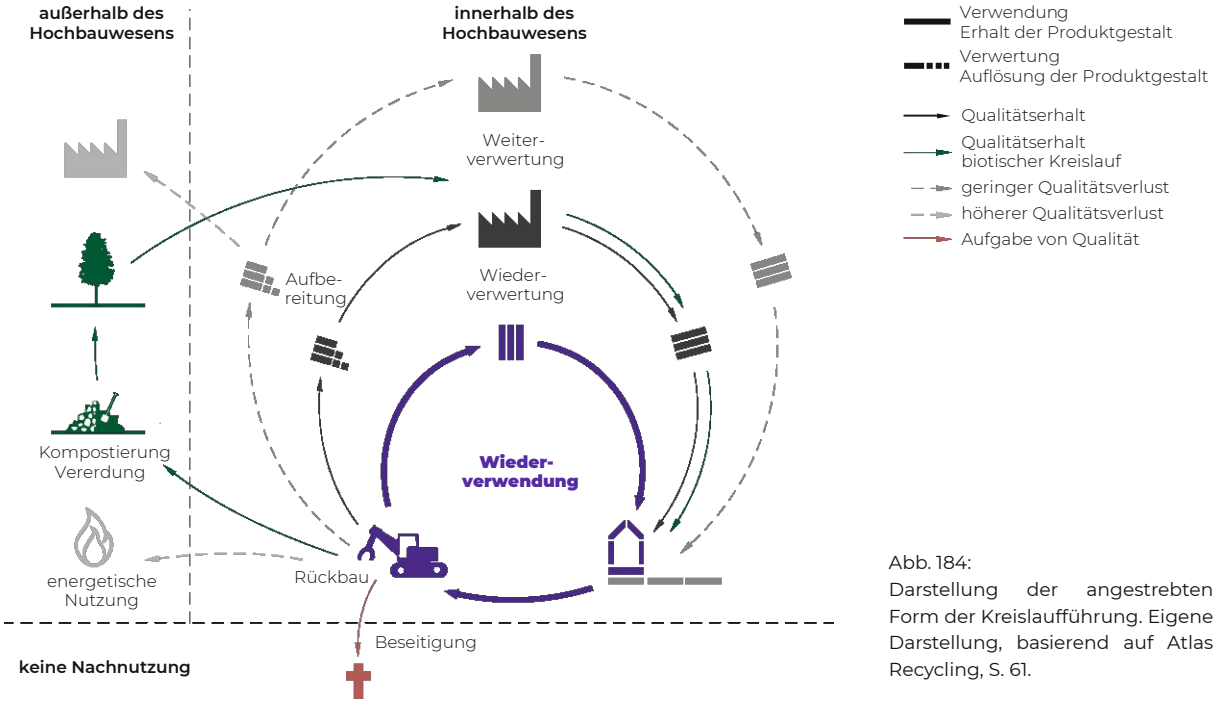



Abb. 184:
Darstellung der angestrebten Form der Kreislaufführung. Eigene Darstellung, basierend auf Atlas Recycling, S. 61.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Konstruktion

Selbst Leuchtturmprojekte für die Bauteilwiederverwendung wie das K.118 vom Baubüro InSitu (Abb. 187) und das Projekt RoofKIT des Karlsruher Institut für Technologie (Abb. 186) bestehen nicht zur Gänze aus Altmaterial. Hauptsächlich bei den konstruktiven Bauteilen wurde auch hier auf Primärmaterialien zurückgegriffen.[281] Dies zeigt, dass selbst bei Vorzeigeprojekten die Verwendung von ReUse Bauteilen im Bereich der Tragstruktur an ihre Grenzen kommt. Die Bauteilwiederverwendung wird aktuell hauptsächlich bei Fassaden, Fenstern, Belägen und anderen Ausbauprodukten praktiziert und ist mit viel Sammlungs-Aufwand und Sonderlösungen bei der Detail-Ausbildung verbunden.[282] Die Abbildung 188 zeigt, dass bei der größten Bauteilbörse für ReUse Bauteile fast ausschließlich untergeordnete Ausbau-Materialien und Ausstattungs-Gegenstände angeboten werden – und keinerlei konstruktive Bauteile.

> *„Dabei war die Bauteiljagd die längste Planungsphase […].“*[283]

Dass eine Konstruktion aus wiederverwendeten Bauteilen im Geschosswohnungsbau eingesetzt wird, ist also aktuell sehr unwahrscheinlich. Deshalb ist das Ziel dieser Variante, ein Gebäude zu entwerfen, das leicht dekonstruiert und in der Zukunft wiederverwendet werden kann.

Um das Potenzial einer Wiederverwendung von Bauteilen zu erhöhen, nennt Dr. Falk Schneemann einige grundlegende Konstruktionsprinzipien. Die wichtigste Eigenschaft ist die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Demontage, erreicht durch lösbare Verbindungsmittel und leistungsfähige Knotenpunkte. Hinzu kommt die Modularität: Durch serielles Einsetzten weniger gleicher, möglichst nutzungsneutraler Elemente entstehen Flexibilität und eine sehr geringe Anzahl unterschiedlicher Details. Dazu gehört auch die Trennung verschiedener Funktionen auf Bauteilebene. Indem die verschiedenen Bauteilschichten wie Tragwerk, thermische Hülle und Abdichtung voneinander unabhängig sind, können sie in einem anderen Szenario komplett neu kombiniert werden.[284]

Der Systembau, also das Bauen mit vorgefertigten Bauteilen oder Modulen, auch Baukastenprinzip genannt, ist dafür besonders gut geeignet. Der hohe Grad an Vorfertigung verlangt eine schnelle, also simple Fügetechnik vor Ort und die serielle Bauweise führt zu repetitiven Details. Zudem wirkt sich auch die hohe Menge an gleichen Bauteilen gut auf das Wiederverwendungspotenzial aus. Aus diesem Grund ist es zielführender, mit bereits existierenden Systemen zu bauen, als für jede Bauaufgabe ein neues Fügesystem zu entwickeln. So könnten in Zukunft nach dem Baukastenprinzip Bauteile aus verschiedenen Gebäuden neu zusammengefügt werden. Deshalb werden in dieser Arbeit die Potenziale bereits vorhandener, auf Wiederverwendung ausgelegter Bauweisen diskutiert, bevor ein für diese Bauaufgabe geeignetes System übernommen wird.

Anhand umgesetzter Leuchtturmprojekte im Bereich Wohnbau werden drei grundsätzlich geeigneter Systembauweisen erkannt: Beton Fertigteile, wie sie im Circle House (Abb. 182) eingesetzt wurden, sowie zwei Holz-Fertigteilbauweisen, die Modulbauweise am Beispiel Woodie vom Architekturbüro Sauerbruch Hutton (Abb. 184) und die Holz-Skelettbauweise der Firma Lukas Lang (Abb. 183). Nachfolgend werden beide Baustoffe und alle drei Bauweisen auf ihre Eignung zum wiederverwendbaren Bauen untersucht, bevor sich auf eine Systembauweise festgelegt wird.

281 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 59–60.
282 Siehe: Kromoser u. a., *Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien*, 36–37.
283 Beschreibung des Bauprozesses des K.118. Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 59.
284 Siehe: Hebel und Wappner, 54.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 185:
Das RoofKIT der Fakultät für Architektur des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde als Siegerprojekt des internationalen Hochschulwettbewerbs Solar Decathlon 2021/22 in Wuppertal ausgezeichnet. Durch Wiederverwendung, Wiederverwertung, biobasierte Materialien und sortenrein rückbaubaren Fügungen ist das Gebäude nach eigenen Angaben zu 100 % kreislaufgerecht gestaltet. Wie die Innenaufnahme zeigt, wurde für die Konstruktion offensichtlich neues Holz verwendet. Foto: Zooey Braun.

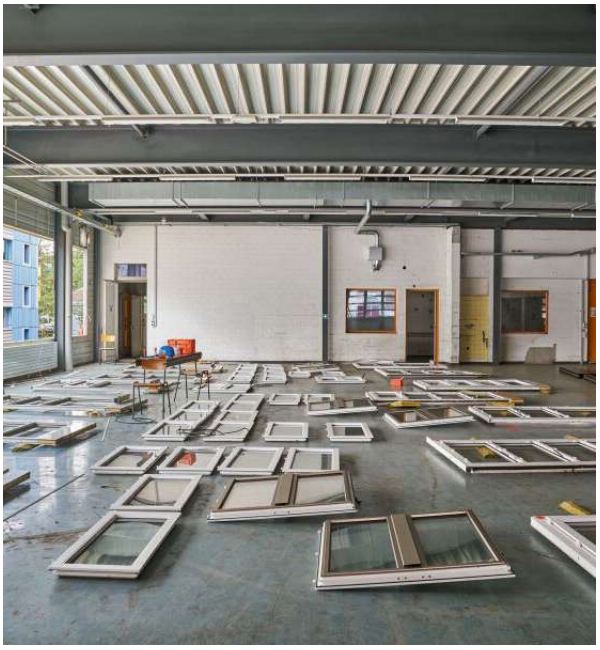


Abb. 186:
Das K.118 - die Aufstockung der Kopfbau Halle 118 in Winterthur (2021) besteht laut Planer:innen, dem Baubüro InSitu, zu 70% aus gebrauchten Materialien und Bauteilen. Dies konnte durch eine lange Planungs- und Bauteilsammelphase ermöglicht werden. Auf dem Foto sind die gesammelten ReUse Fenster zu sehen. In der Konstruktion, besonders den Holzrahmen der Außenwand, mussten auch Primärrohstoffe verwendet werden. Foto: Foto: Werner Knuesel.

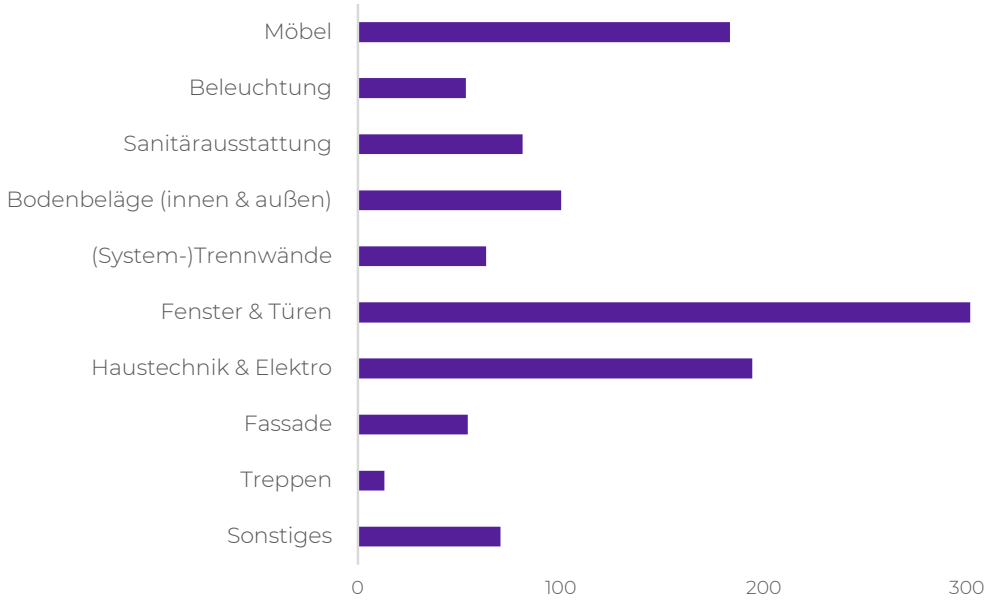



Abb. 187: Angebotene ReUse Produkte nach Kategorien im Online-Shop der größten Bauteilbörse im deutschsprachigen Raum Concular. Stand: 21.04.2024. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Beton-Fertigteile

Das Konzept, Stahlbeton-Fertigteile so zu verbauen, dass sie beschädigungsfrei demontierbar sind und nach dem Rückbau eines Gebäudes wiederverwendet werden können, scheint allein aufgrund der sehr großen Dauerhaftigkeit von Beton naheliegend. Es gibt einige wenige realisierte Bauprojekte, die sich dieser Aufgabe gestellt haben[285] – allen voran das ***Circle House*** von Vandkusten, Lendager Arkitekter und 3XN in Dänemark (siehe Abb. 182 und 189). Das Konzept ist in allen Projekten gleich und simpel: Die Beton-Fertigteile werden über vormontierte Metall-Elemente reversibel verbunden, also geschraubt oder eingehängt. Der Stoß wird mit einem lösbaren Mörtel verschlossen. Im Rückbau wird erst der Mörtel und dann die Metall-Verbindung wieder gelöst.

Die Verbindungstechniken für das Circle House wurden von GXN gemeinsam mit der Firma Peikko entwickelt: lösbare Verbindungen für Stützen, Wände, Decken und Träger. Die meisten dieser Lösungen sind jedoch noch in der Entwicklungsphase und wurden bisher nur in Prototypen wie dem Circle House eingesetzt. Sowohl in Praxistauglichkeit als auch in Wirtschaftlichkeit gibt es große Unterschiede unter den Verbindungen.



Abb. 188: Der Circle House Demonstrator im Rohbau. Er wurde aus Betonfertigteilen gebaut mit dem Anspruch auf Wiederverwendung. Foto: Jersø.

Fertigteil-Stützen sind am Markt bereits ein gängiges Produkt und werden oftmals mittels einer Kopfplatte verschraubt – bisher in der Regel, um sie lotrecht ausrichten zu können. Diesen Prozess reversibel zu gestalten, bedarf nur geringer Eingriffe – in Abbildung 190 wird das Vorgehen schematisch beschrieben. Der entscheidende Entwicklungsfortschritt ist, dass ein Mörtel verwendet wird, der sich in Sekunden mit einem Hochdruckreiniger wieder entfernen lässt.[286] Nur geringfügige Mehraufwände und die große Stückzahl gleicher Bauteile, die meist eine standardisierte Höhe haben, führen zu einem hohen Wiederverwendungspotenzial.[287]

285 Siehe: Küpfer und Fivet, *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion*, 100–105. Fallstudie XIX (Circle House Vandkusten, Lendager Arkitekter und 3XN in Dänemark), XX (Wohngebäude CiWoCo von GAAGA in den Niederlanden) und XXI (ein temporäres Gerichtsgebäude von cepezed in den Niederlanden).

286 Siehe: Peikko Group Corporation, „Ist die Baubranche bereit für den Umstieg? Peikko und die Kreislaufwirtschaft, Praktische Überlegungen", 10–17.

287 Persönliches Interview mit Ertl, Reinhard, Business Development Manager bei Peikko Austria, digital, am 30.03.2023

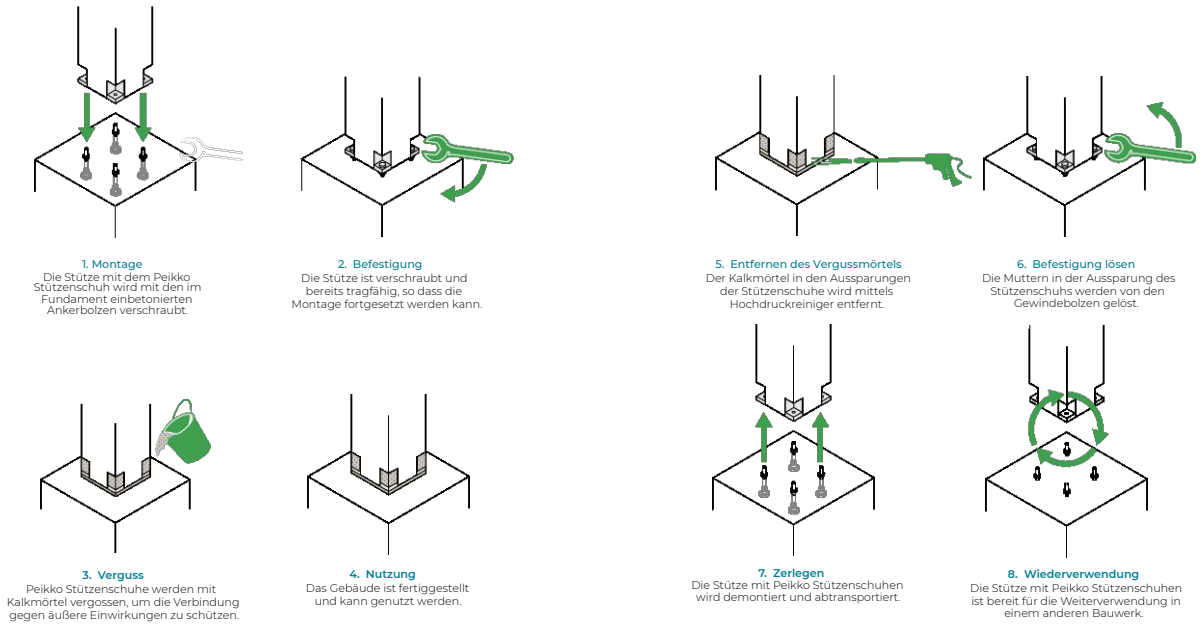



Abb. 189: Schemazeichnung einer Montage und Demontage des Peikko Stützenschuhs. Eigene Darstellung nach Peikko White Paper: Ist die Baubranche bereit für den Umstieg?, S. 7.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

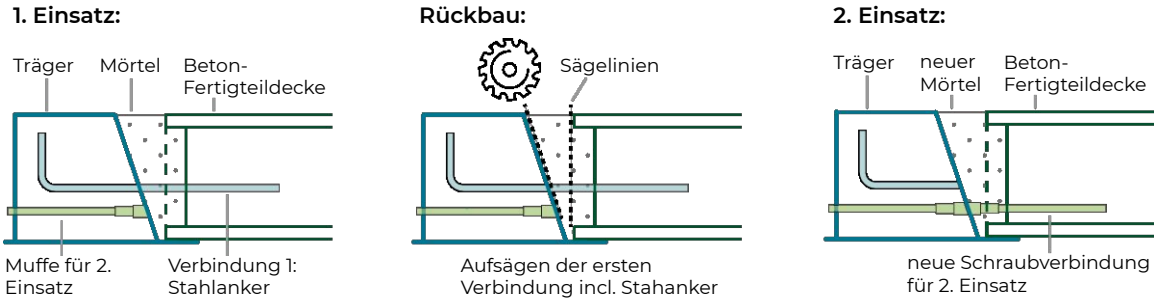



Abb. 190: Schemazeichnung einer Montage, Demontage und Wiederverwendung einer Beton-Fertigteildecke. Eigene Darstellung.

*„Eine Erkenntnis ist, dass man die vertikalen Strukturen, also die Stützen, relativ rasch wieder verwenden kann, weil die Konstruktionshöhe einigermaßen standardisiert ist […]. Aber mit Deckenteilen wird es recht spannend, weil die Spannweite alles andere als standardisiert ist. Es gibt kaum zwei gleiche Bauwerke mit gleicher Spannweite – damit kann man vorgefertigte Elemente einfach direkt wegwerfen."*[288]

Wesentlich schwieriger gestaltet sich der Anschluss horizontaler Bauteile. Während Träger und Stütze auch mit einer Stahl-Schraubverbindung gefügt werden können, muss die Decke aus Brandschutz-Gründen „nass" an den Träger angeschlossen werden. Die Stahl-Verbindungsstücke werden also ausbetoniert, inclusive einer für einen Zweiteinsatz relevanten Muffe. Diese Fuge samt Stahlteil muss beim Rückbau aufgesägt und gereinigt werden, bevor für einen neuerlichen Einbau zusätzliche Stahlteile benötigt werden. Anscheinend führt dieses System dennoch zu Einsparungen von Kosten und GWP, doch selbst Herr Ertl stellt die Praxistauglichkeit dieser Konstruktion in Frage.[289]

*„Also prinzipiell haben wir gesehen, dass es möglich ist, mit reinen Betonfertigteilen zu bauen. Wenn man nur die Rückbaubarkeit betrachtet, dann geht das. Wenn man auch den $CO_2$-Fußabdruck im Lebenszyklus betrachtet, ist es sicher sinnvoll, auch die Materialien zu diskutieren. […] Es gibt vor allem im Bereich der Decke, der horizontalen Bauteile, noch „space to improve" […]."*[290]

Aufgrund des großen Gewichts von Beton-Elementen ist ihr Transport teuer und emissionsintensiv. Eine Wiederverwendung ist also nur im sehr nahen Umfeld der Rückbaustelle vertretbar.[291] Die von Peikko entwickelten Stahlbeton-Fertigteilstützen können aufgrund der simplen Lösung und der Standardisierung von Deckenhöhen sinnvoll sein. Jedoch sind die Anbindungen weiterer, besonders flächiger, aussteifender Bauteile aktuell vielleicht technisch möglich, aber mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden. Aufgrund dessen liegt das Einsatzgebiet der Stützen eher im industriellen Hallenbau.

**Fazit**

Eine Fertigteilbauweise aus Beton ist für das Fallbeispiel Lärchenstraße aktuell nicht geeignet. Besonders das große Gewicht und die schwer lösbaren Verbindungen sprechen gegen dieses System. Eine echte, realistische Wiederverwendbarkeit ist bei der Bauweise des Circle House in Frage zu stellen. Zudem lassen sich Beton-Elemente nur unter viel Aufwand nachträglich bearbeiten, zum Beispiel kürzen. Sie sind also eher für Bauteile geeignet, die sehr standardisiert vorkommen, wie die Stützen im Industriebau oder Fertigteiltreppen.

288 Persönliches Interview mit Ertl, Reinhard, Business Development Manager bei Peikko Austria, digital, am 30.03.2023

289 Siehe: Peikko Group Corporation, „Dismount and Reuse of Precast Concrete Frame", 8–15. und Persönliches Interview mit Ertl, Reinhard, Business Development Manager bei Peikko Austria, digital, am 30.03.2023.

290 Persönliches Interview mit Ertl, Reinhard, Business Development Manager bei Peikko Austria, digital, am 30.03.2023

291 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 70.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Holz-Fertigteile

Holz ist Beton in Sachen Systembau deutlich voraus. Vorfertigung und Wiederverwendung hat im Zimmereihandwerk eine lange Tradition. Schließlich besteht Holz von Natur aus aus einzelnen Elementen, die miteinander gefügt werden müssen. Bereits im Mittelalter wurden Holz-Fachwerkhäuser regelmäßig auseinandergebaut, transloziert und neu errichtet.[292] Die im modernen Holzbau meist verbreitetsten Verbindungsmittel, die Schraube und zimmermannsmäßige Verbindungen, lassen sich mit wenig Aufwand wieder lösen. Zudem lässt sich Holz auch im eingebauten Zustand noch leicht bearbeiten. Im Gegensatz zu Stahlbeton-Fertigteilen lassen sich Holzelemente einfach, schadensfrei und individuell kürzen oder einpassen.[293] Zudem gibt es bereits eine erprobte Möglichkeit ist, Altholz wieder neu zu tragenden Holzelementen zu fügen.[294] Seine um das Fünffache geringere Rohdichte und der meist geringere Materialbedarf führen zu wesentlich erleichtertem Transportaufwand.

*„Holz und Holzwerkstoffe eignen sich wegen ihrer einfachen Bearbeitbarkeit, der Fügetechnik und vor allem aufgrund des geringen Transportgewichts der Elemente und Raumzellen besonders gut zur Vorfertigung großer Bauelemente und Gebäudeteile.“*[295]

**Modulbauweise**

In der Vorfertigung und dem Systembau kann die Logik des Holzbaus unterschiedlichen Prinzipien folgen. Die Vorfertigung stabförmiger Elemente ist die einfachste Form. Hier werden neben der Konfektionierung besonders die Verbindungspunkte bereits werkseits gefertigt. Dass stabförmige Elemente erst auf der Baustelle gefügt werden, kann auch das Transportvolumen wesentlich schmälern. Flächige Elemente werden am häufigsten vorgefertigt – auch die Wände und Decken in Haus B und Variante 2 kommen zumindest teilvorgefertigt auf die Baustelle. Heute ist es möglich und üblich, bereits Fenster, Türen und die Fassade werkseits zu montieren – lediglich der Elementstoß muss oft bauseits ausgeführt werden. Die komplexeste Form der Vorfertigung ist die Modulbauweise. Hier werden ganze Raumzellen, die meist aus Brettsperrholzelementen bestehen, fast komplett bezugsfertig auf die Baustelle geliefert – teils sind sogar schon Möbel installiert. Diese wohl schnellste Bauweise bedarf allerdings nicht nur eines großen Transportvolumens, sondern auch eines großen Materialeinsatzes. Wegen der Schall- und Brandschutzanforderungen werden die Wände und Decken meist als doppelte Konstruktion ausgeführt.[296]



Abb. 191: Das Studentenwohnheim WOODIE im Bauzustand. Die einzelnen Module werden als allseitig geschlossene Boxen übereinander gestapelt, was einen hohen Materialbedarf und eine geringe Flexibilität der Konstruktion bedingt. Foto: Senectus GmbH.

Beispielhaft für die Modulbauweise ist das Studentenwohnheim Woodie in Hamburg von Kaufmann Bausysteme (siehe Abb. 184 und 192). Gerade bei Bauaufgaben mit vielen kleinen, gleichen Einheiten wie Wohnheimen oder Hotels wird diese Bauweise eingesetzt. Für eine Punkthaus-Struktur wie im Fallbeispiel ist diese Bauweise schlecht geeignet. Die Raumzellen, die als geschlossene Boxen funktionieren, lassen wenig Veränderung zu. Meist sind alle Bauteile statisch relevant, dabei raumbildend und oftmals sogar noch Sichtoberflächen. Eine Änderung der Grundrisse ist höchstens innerhalb der einzelnen Module möglich, neue Nutzungskonfigurationen müssen sich diesem sehr groben Raster unterordnen.[297] Da die einzelnen Raummodule bauseits meist lediglich gestapelt und zur Lagesicherung verschraubt werden, ist eine zerstörungsfreie Demontage und Wiederverwendung ganzer Module durchaus denkbar. Aufgrund der mangelnden Flexibilität und fehlenden Funktionstrennung der Bauweise kommt jedoch nur ein sehr gleichartiger Einsatz in Frage.

292 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 133.

293 Persönliches Interview mit Höfferl, Bernd von pro:Holz Austria, digital, am 03.05.2023.

294 Mit verleimten Keilzinkenverbindungen können Althölzer zu Endloslamellen gefügt und zum Beispiel zu Brettschichtholzbalken weiterverarbeitet werden. Klinge und Roswag-Klinge, „Holz – ein zirkulärer Baustoff“, 5.

295 Kaufmann, Krötsch, und Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*, 142.

296 Siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, 145–47.

297 Siehe: proHolz Austria, „Bauen mit Raummodulen“.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

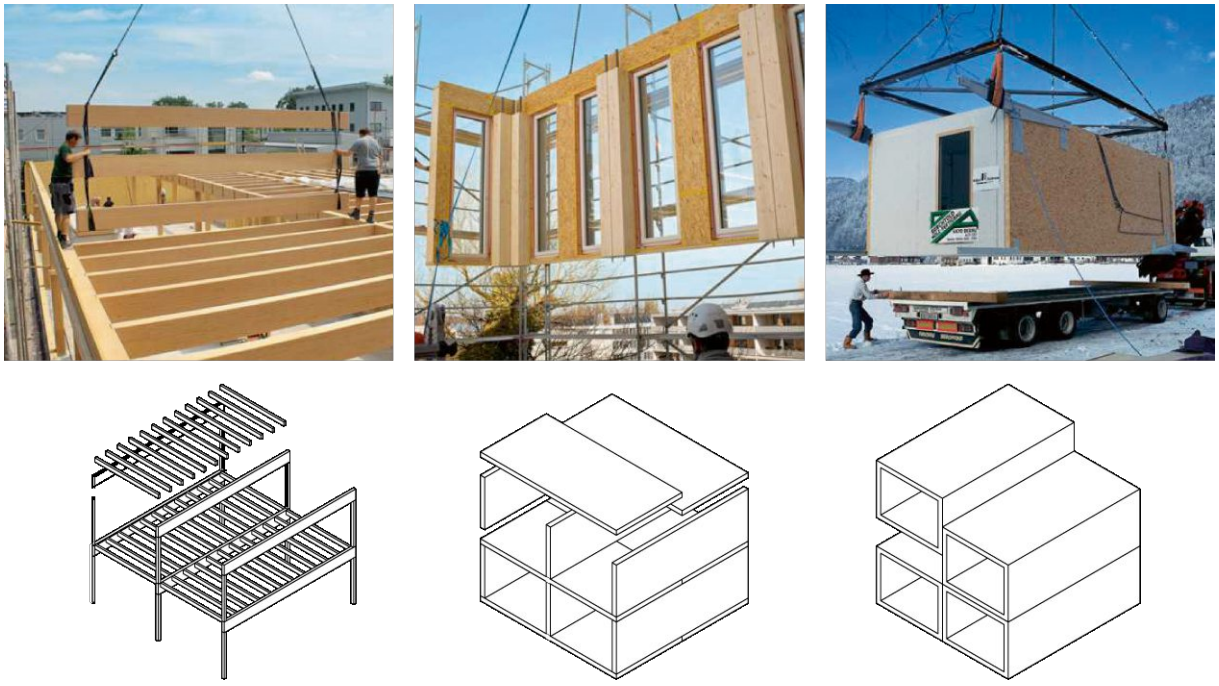



Abb. 192: Die verschiedenen Prinzipien der Vorfertigung im Holzbau: Schemazeichnung und Praxisbeispiel. Darstellung nach Atlas Mehrgeschossiger Holzbau, S. 139.

**Skelettkonstruktion**

Größtmögliche Flexibilität und Ressourceneffizienz wird bei der Skelettbauweise erreicht. Um eine Wohnnutzung zu ermöglichen, muss diese allerdings noch mit aussteifenden, raumbildenden und dämmenden Elementen ergänzt werden. Eine Kombination aus tragenden, stabförmigen und trennenden, flächigen Elementen verspricht also das größtmögliche Kreislaufpotenzial. Tatsächlich sehen auch ZRS Architekten Ingenieure eine mit reversiblen Verbindungen ausgeführte Holzskelettbauweise mit aussteifendem Kern und nichttragender Holzfassade als reversibelste Holzbauweise an.[298]

Dieses Prinzip macht sich die Firma Lukas Lang Building Technologies zu eigen, die ihren Systembau bereits auf Wiederverwendung ausrichtet. Sie baut auf eine Skelettbauweise mit einem Grundraster von 1,4 auf 1,4 Meter, die unabhängig von Ausbau und thermische Hülle steht. Die Stützen, die meist aus Brettstapelholz und bei großen Lasteinträgen aus Stahl sind, kommen mit vormontierten Stahlknoten auf die Baustelle. Daran wird ein Trägerrost aus Brettstapelelementen, welche bis zu 4 Rasterfelder weit spannen können, befestigt. Dazwischen eingehängte Füllelemente bilden die Geschossdecken. Die 1,4 Meter breiten Fassadenelemente in Holzrahmenbau sind der Tragkonstruktion über Stahlanker vorgehängt. Die Ausbildung der Gebäudeecken erfolgt analog mit 0,6 Meter breiten Eck-Elementen. Die Geschosshöhe ist im Wohnungsbau auf 3,04 Meter normiert, was eine lichte Raumhöhe von 2,6 Metern ergibt. Im Sinne der Flexibilität gibt es keine tragenden Wände. Die Aussteifung des reinen Skelettbaus erfolgt vertikal über Stahlauskreuzungen und horizontal über die Füllelemente zwischen dem Trägerrost.

Mit nur sehr wenigen Details und Elementen sind so sehr unterschiedliche Raumkonfigurationen möglich. Diese Systemkomponenten sind im Kern in jedem Gebäude gleich – nur die Materialien und Oberflächen variieren nach Vorlieben und Vorgaben. Die Gebäude von Lukas Lang sind darauf ausgerichtet, wieder auseinandergebaut und in neuer Form wiederverwendet zu werden. Tatsächlich sind bereits Elemente im Umlauf, die schon im fünften Gebäude eingesetzt werden. Laut Alexander Szymoniuk, Verkaufsleiter bei Lukas Lang Building Technologies, haben die Bauteile auch nach mehreren Jahren des Einbaus kaum Gebrauchserscheinungen. Das System Lukas Lang wird für Schulen, Kindergärten und Büros angewandt, die oft als Übergangsbauten errichtet werden und hohem Veränderungsdruck unterliegen. Seit der Einführung der EU-Taxonomie ist mittlerweile aber Wohnbau die größte Sparte von Lukas Lang. Große

298 Siehe: Klinge und Roswag-Klinge, „Holz – ein zirkulärer Baustoff“, 8.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 193: Explosionszeichnung der Konstruktion des temporären Parlaments. Die Konstruktion von Lukas Lang ist ein Baukastensystem weniger, vielseitig kombinierbarer Elemente. Grafik: Lukas Lang Building Technologies.

Immobilienunternehmen, die kreislauffähige und taxonomiekonforme Gebäude in ihr Portfolio aufnehme wollen, setzen dazu auf dieses System.[299] Der Leichtbau, der essenziell für die gute Umbaufähigkeit ist, bringt allerdings Nachteile im Wohnkomfort. Der für Wohnnutzungen vorgegebene Mindestschallschutz kann jedoch laut Herstellerangaben trotz Leichtbauweise erfüllt werden.

Grundsätzlich lässt sich ein komplettes Gebäude mit diesem Systembau errichten. Kleinere Bauten werden oft sogar mit Schraubfundamenten gegründet, wodurch eine Versiegelung des Baugrunds vermieden werden kann. Bei vielen größeren Bauten wird jedoch Beton für die Gründung, einen allfälligen Keller und erforderlichenfalls auch für den Treppenhauskern verwendet.

Wie die meisten Holzbauten hat die gesamte Konstruktion einen Brandwiderstand von R60. Damit ist es in den meisten Teilen Österreichs nicht zulässig, mit diesem System fünfgeschossig zu bauen. Eine aufwendige Kapselung der Holzbauteile würde die Rückbaubarkeit und damit das Konzept wesentlich beeinträchtigen. Nur aufgrund der Brandschutzerleichterungen in Vorarlberg kommt die Bauweise für die Gebäude in der Lerchenstraße in Frage. Statisch ist ein fünfgeschossiger Bau problemlos möglich. Indem in den unteren Geschossen vermehrt Stahlstützen verwendet werden, kann das System auf höheren Lasteintrag reagieren. Auch dann bleibt der größte Anteil der Konstruktion in Holz – meist 60-80 %.

Große Gebäudevolumen sind vorteilhaft für die Wiederverwendung. Je höher die Stückzahl der Elemente, desto wirtschaftlicher ist nicht nur die erste Errichtung, sondern auch Demontage, Qualitätskontrolle und Neuerrichtung. Lukas Lang bietet eine Herstellerrücknahme nach vertraglich festgelegter Standzeit an, aber es gibt auch Beispiele, wo die Bauherr:innen selbst die Demontage, Qualitätskontrolle und Remontage ihrer Häuser organisiert haben. Die firmeninternen Erfahrungen zur Wiederverwendbarkeit der Bauteile waren bisher sehr positiv. Das Tragwerk war auch nach Jahren in der Regel makellos – bisher musste noch kein tragendes Bauteil für den Zweitgebrauch ausgemustert werden. Selbst sichtbare Holzoberflächen im Innenraum waren meist in sehr gutem Zustand.

Ein wesentlicher Nachteil dieses Systems sowie aller Systembauten ist die mangelnde Flexibilität, sich der Umgebung anzupassen. Sobald das System maßgenau an eine Grundstücksform oder topographische Begebenheit angepasst wird, verliert es an Modularität. Die Bauteile, die dafür sonderangefertigt werden müssen, haben kaum Potenzial, in einer anderen Bauaufgabe wiederverwendet zu werden. Für eine gute Wiederverwendbarkeit muss das System immer eingehalten werden.[300]

299 Persönliches Gespräch mit Kilian Mattitsch, Leiter Planung bei Lukas Lang Building Technologies, telefonisch, am 24.03.2024.

300 Persönliches Gespräch mit Alexander Szymoniuk, Verkaufsleiter bei Lukas Lang Building Technologies, telefonisch, am 14.09.2023



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 194: Innenaufnahmen von Gebäuden, die mit dem Systembau von Lukas Lang errichtet wurden. Links: Rohbau-Zustand - zu erkennen sind die vielen identen Elemente. Rechts: fertiger Ausbau. Fotos: Lukas Lang Building Technologies.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Fazit und Entscheidung

Beton ist für den wiederverwendbaren Systembau aktuell nicht geeignet. Im Bereich Industriebau besteht hier Potenzial, aber ausgereifte Techniken für den Wohnbau gibt es momentan nicht. Das große Gewicht, die schwer lösbaren Verbindungen und die kaum vorhandene nachträgliche Bearbeitbarkeit sprechen gegen dieses Material.

Holzbau hingegen ist sehr gut geeignet. Allein die Materialeigenschaften, dass Holz wesentlich leichter als Beton ist, Holverbindungen materialbedingt meist lösbar gestaltet werden und das Material jederzeit noch leicht bearbeitbar bleibt, bringen ihm wesentliche Vorteile für den Systembau. Unter den Holzbautechniken ist eine Mischung aus tragender Skelettkonstruktion und vorgehängten flächigen Elementen aufgrund der großen Flexibilität und nutzungsneutralen Bauteile die mit dem höchsten Wiederverwendungspotenzial. Eine Holz-Modulbauweise ist theoretisch auch wiederverwendbar, aber aufgrund der mangelnden Flexibilität nicht für jeden Bautyp anwendbar – so auch nicht für den Punkthaus-Typ des Fallbeispiels.

Das Bausystem der Firma Lukas Lang Building Technologies ist nach dem ersteren Prinzip aufgebaut – und spezialisiert auf Bauteilwiederverwendung. Deshalb und da das System für den Einsatz im Fallbeispiel geeignet ist, wird diese Variante nach dem Prinzip von Lukas Lang entwickelt. Um die Vorteile der Systembauweise optimal zu nutzen, werden möglichst alle Aufbauten im Lukas Lang System errichtet – auch der Innenausbau. Nur innerhalb des Systems und bei Baustoffen, die nicht systementscheidend sind, werden im Kapitel Ausbau verschiedene Möglichkeiten abgewogen.

Eine Schwäche des Systembaus, die auf alle vorgestellten Bauweisen zutrifft, ist die mangelnde Anpassbarkeit an individuelle Situationen. So lässt sich das 1,4 m-Raster des Lukas-Lang-Systems nicht exakt auf die Dimensionen der Bestandshäuser anwenden. Da der Bebauungsplan in der Lerchenstraße allerdings in einem Wettbewerb und Dialog mit der Gemeinde entwickelt wurde, ist es plausibel, dass auch eine geringfügig abweichende Kubatur genehmigt worden wäre. Diese Variante weicht also zugunsten des Bausystems deutlich mehr von den Bestandsgrundrissen ab als die vorherigen Varianten. Damit das Grundrissraster perfekt ausgeführt werden kann, ist die Grundfläche 10 m² größer als bei den Bestandsbauten und aufgrund der höheren Geschosshöhe ist das Gebäude 94 cm höher.

Das Tragwerk der Obergeschosse folgt konsequent dem Systembau, ist also komplett in lineare Elemente aufgelöst. Die Stahl- und Holzstützen sind mit leistungsstarken Stahl-Knotenpunkten versehen, an die der Trägerrost aus 20 x 30 cm starken Brettstapelholzelementen sowie die vorgefertigte Fassade eingehängt werden. Auch die vertikale Aussteifung aus Stahl-Zugseilen wird an den Knotenpunkten befestigt. Die horizontale Aussteifung erfolgt über Brettsperrholzelemente, die zwischen den Trägerrost (ebenfalls mittels Stahlverbindungen) eingehängt werden.

Abweichend vom System ist lediglich die Erschließung. Während der Brandschutz in den Wohneinheiten durch Überdimensionierung der Holz-Bauteile auf Abbrand erfüllt werden kann, erfordert auch für Variante 3 die vorgeschriebene Nichtbrennbarkeit der Oberflächen im Treppenhaus eine Sonderlösung. Oftmals erfolgt deshalb auch bei Holzbauten die Errichtung des Treppenhauskerns in Ortbeton-Bauweise – zuungunsten der Vorfertigung und Rückbaubarkeit. In dieser Variante wird im Sinne der Wiederverwendung eine komplett elementierte Lösung gewählt, die das Konstruktionsraster des Systembaus beibehält. Die Stützen des Systembaus bilden auch hier die Tragstruktur. Sie werden, wie auch die Wände, durch eine Vorsatzschale aus nichtbrennbaren Materialien vor Brandeinwirkungen geschützt. Für die Treppenläufe selbst, für die ebenfalls der Anspruch einer Nichtbrennbarkeit gilt, sind Betonfertigteile baupraktisch alternativlos. Um eine Kapselung der Decke zu vermeiden, welche nur vor Ort und außerhalb des Systems erfolgen könnte, werden auch hier Betonfertigteile verwendet. Diese können die Brand- und Schallschutzanforderungen wesentlich leichter erfüllen und mit werkseits vormontierten Befestigungen maßgenau an die Holzkassetten angeschlossen werden. So wird das Bausystem nur bedingt unterbrochen und aufgrund der trockenen Stahl-Verbindung lassen sich auch die Betonelemente zerstörungsfrei rückbauen. Der einzige Bruch mit dem Grundraster ist zur Einpassung des Aufzugs nötig. Im Sinne einer trockenen, reversiblen Montage wird ein vorgefertigter Aufzugsschacht in Brettsperrholz verwendet.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Auch der Keller kann nicht im System errichtet werden. Es gibt bisher keine etablierte Bauweise eines Kellers mit reversiblen Vollfertigteilen.[301] So wird auch in Variante 3 auf die kreislaufoptimierte Konstruktion eines Ortbeton-Kellers entsprechend der ersten Variante zurückgegriffen.

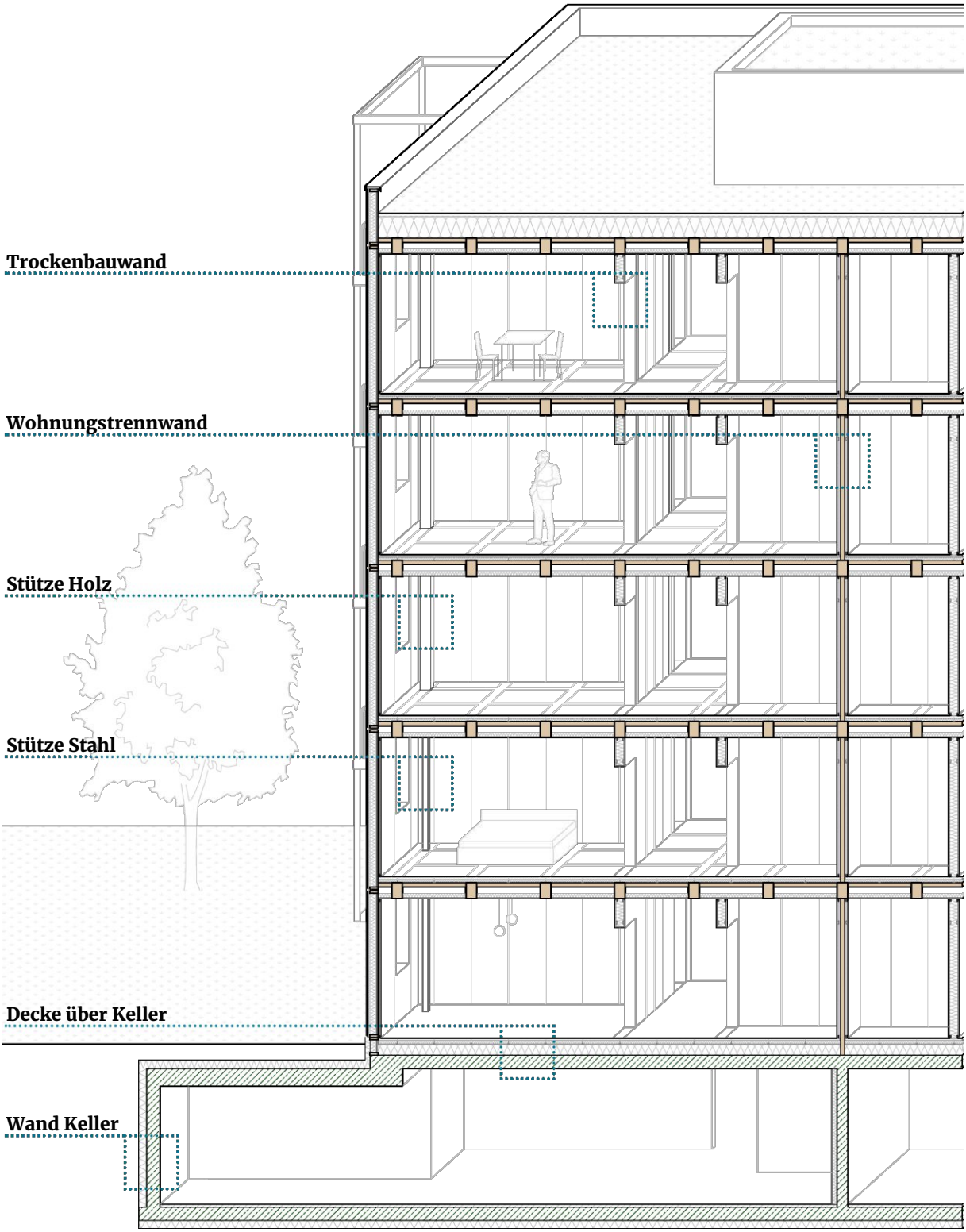
| | Holz-Systembau<br>Lukas Lang | Holz-Modulbau<br>Kaufmann Bausysteme | Beton-Systembau<br>Peikko |
|---|---|---|---|
| **Lösbare Verbindungen** | **ja**<br>Metallverbindungen simpel | **ja**<br>Veschraubungen | **(ja)**<br>enorm aufwendig |
| **Tragwerk** | **Skelettbau** | **Massivbau** | **Mischsystem** |
| **serielle Bauweise / Vorfertigung** | **ja** | **ja** | **ja** |
| **nutzungsneutrale Bauteile / Funktionstrennung** | **ja** | **nein**<br>Statik, Oberfläche, Raumbildung | **nein**<br>Statik, Oberfläche, Raumbildung |
| **Material nachbearbeitbar** | **ja** | **ja** | **(ja)**<br>enorm aufwendig |
| **Brandschutz** | **(ja)**<br>durch Kapselung | **(ja)**<br>durch Kapselung | **ja** |
| **erdberührte Bauteile** | **nein**<br>nicht feuchteresistent | **nein**<br>nicht feuchteresistent | **nein**<br>nicht als Vollfertigteile |

Abb. 195: Eignung der untersuchten Bauweisen für entscheidende Gebäudefunktionen. Eigene Darstellung.

301 Firmen, die mit Kellern aus Fertigteilen werben, verwenden lediglich in Teilen Halbfertigteile. Auf eine Ortbeton-Bodenplatte und eine Fügung der Elemente mittels Ortbeton kann auch hier nicht verzichtet werden, wodurch sie genauso wenig reversibel sind wie eine reine Ortbetonbauweise. Siehe: Systembau Eder, „Fertigkeller aus Beton".



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.






TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

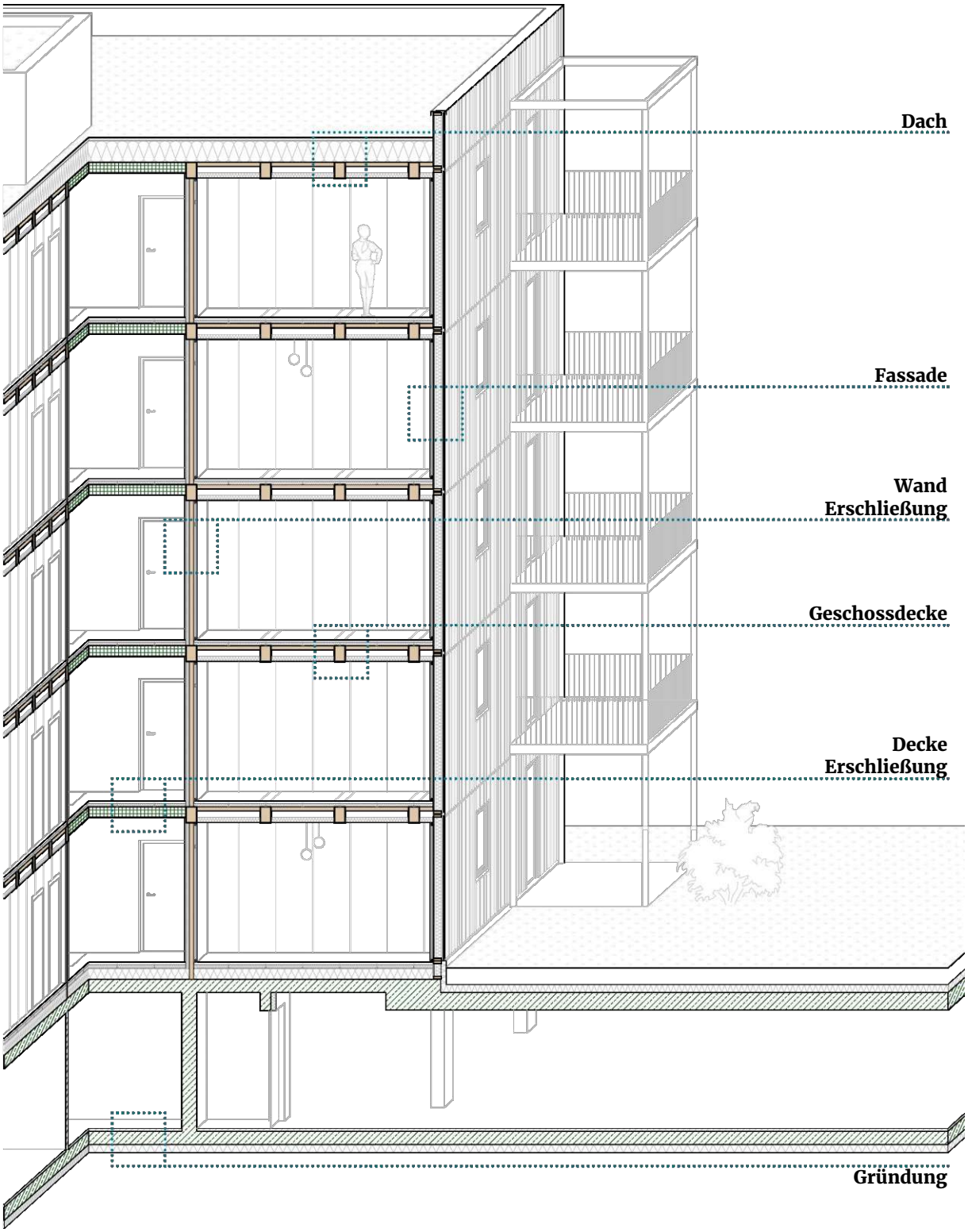



Abb. 196: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Variante 3. Die hervorgehobenen Aufbauten werden im folgenden Kapitel genauer dargestellt.. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

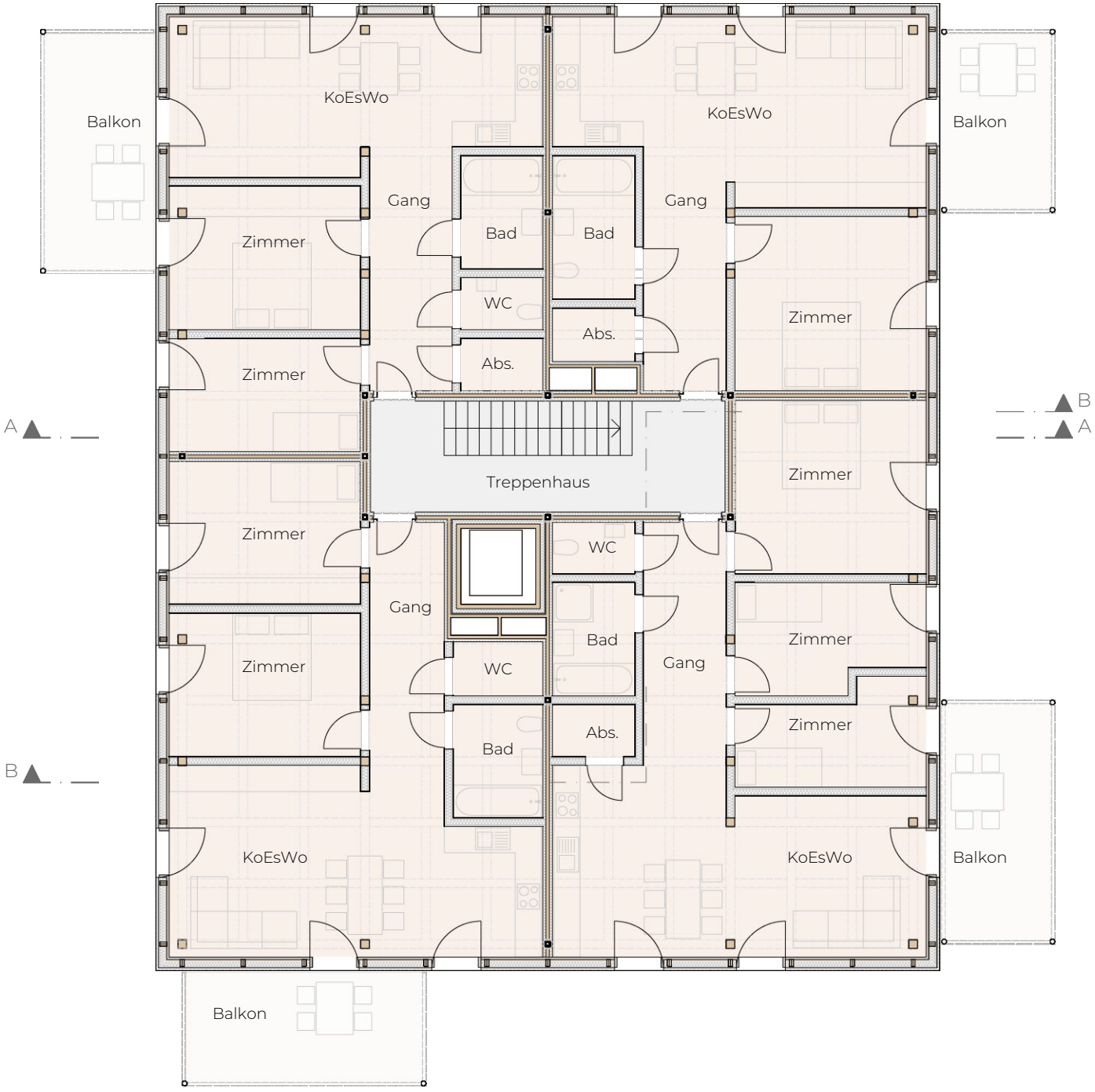



Abb. 197: Regelgrundriss von Variante 3. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

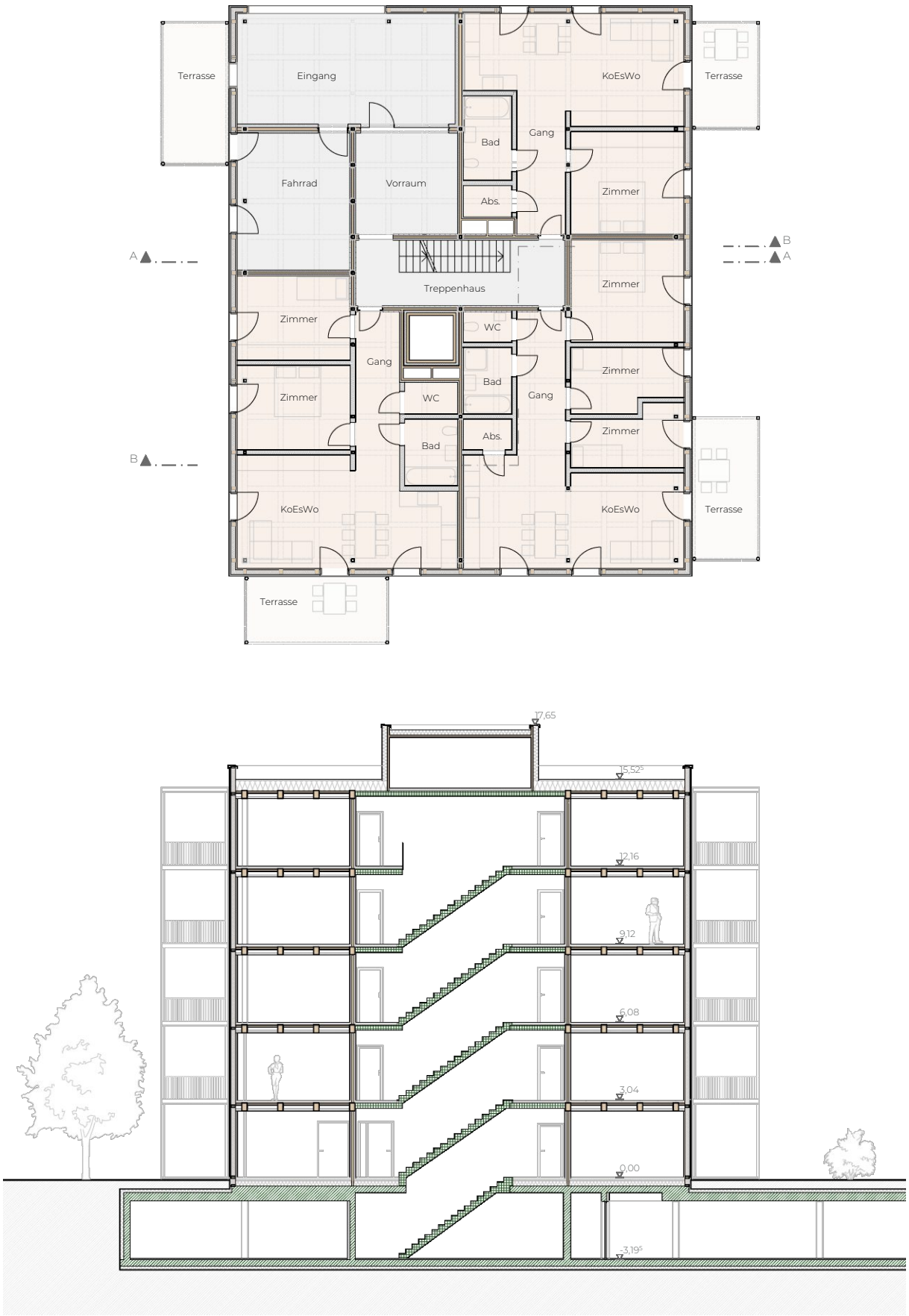



Abb. 198: oben: Erdgeschossgrundriss, unten: Schnitt A - A von Variante 3, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Ausbau

Auch im Ausbau wird auf die Bauweise von Lukas Lang zurückgegriffen. Die Systemaufbauten werden detaillierter vorgestellt und wo nötig und möglich, mit weiteren Bauteilen ergänzt oder optimiert. Während für die Kompatibilität besonders die Verbindungspunkte im Systembau ausgeführt werden müssen, können die Materialien und Oberflächen nach Vorlieben und Zielsetzung variieren.

## Keller

Wie bereits erläutert, können erdberührte tragende Bauteile für ein Gebäude dieser Größe nur mit Ortbeton ausgeführt werden. Da bereits in Variante 1 ein größtmögliches Kreislaufpotenzial für die Keller-Wände ermittelt wurde, erfolgt hier der Aufbau analog. Der gesamte Beton wird mit Recycling-Zuschlägen und CEM-II/C Zement gefertigt. Die Abdichtung erfolgt als weiße Wanne und gedämmt wird mit Schaumglasplatten. Auch die tragenden Innenwände im Keller und die Erdgeschossbodenplatte werden analog gefertigt.

## Fassade

Die vorgehängte Holzrahmen-Fassade des Bausystems ist standardmäßig 30 cm dick und besteht aus Elementen von 3,04 m Höhe und 1,4 m Breite. Wie das Gesamtsystem besteht auch das Fassadenelement aus einzelnen Funktionsschichten, die lösbar verbunden sind. Die Holzrahmenkonstruktion als technischer Kern ist in jedem Gebäude gleich. Für das Dämmelement, die Fassade und die Innenansicht bietet Lukas Lang jedoch eine Reihe von Optionen an, die individuell ausgewählt werden können. Der technische Kern besteht aus einem schlanken Fichtenholzrahmen (Dimensionen der Vollhölzer: 4,5 x 15 cm), der mit einer als Dampfbremse fungierenden OSB-Platte beplankt ist. Auch die Ausbildung der Elementstöße, bestehend aus einer KMF-Dämmung und einer Elastomer-Dichtung, ist am Kern befestigt und standardmäßig gleich.

**Dämmung**
Für das Dämmelement werden drei verschiedene Aufbauten angeboten: Ein Vakuumisolierpaneel mit zusätzlicher Mineralwolledämmung, ein Mineralwolle-Isolierpaneel und ein klassischer diffusionsoffener Aufbau mit Holzwerkstoffplatte als äußerer Beplankung und Mineralwolle-Ausfachung. Da das Wandelement für eine Außenwand verhältnismäßig schmal ist, erreicht nur der Aufbau mit Vakuumisolierpaneel einen mit den Bestandsgebäuden vergleichbaren U-Wert von 0,14 W/m²K (siehe Abb. 200), weshalb dieser in Version 3 eingesetzt wird.

Wie der Name sagt, dämmt ein Vakuumisolierpaneel dank eines Vakuums. Ein als Stützkern dienender pulverförmiger Dämmstoff (z. B. pyrogene Kieselsäure) wird im energie- und kostenintensiven Herstellungsprozess mehrlagig mit luftdichten, metallbedämpften Kunststofffolien ummantelt. Da eine Beschädigung der Folien zum Versagen des

| | Vakuumisolierpaneel | Mineralwolle | MW Isolierpaneel |
|---|---|---|---|
| Wärmeleitfähigkeit λ | 0,004 - 0,008 | 0,031 - 0,045 | 0,031 - 0,045 |
| **Eignung** Wärmeschutz | **ja** U-Wert 0,14 W/m²K | **nein** U-Wert 0,22 W/m²K | **nein** U-Wert 0,20 W/m²K |
| Pre-Use | 0% Primärrohstoff (Quarzsan | 60% Recycling | 64% Recycling |
| Post-Use (sortenreine Rückgewinnung) | 89% Wiederverwertung 11% Downcycling (Folien) (Herstellerrücknahme) | 96% Wiederverwertung (Herstellerrücknahme) | 4 % Wiederverwertung |
| **UMI** | **47%** | **78%** | **34%** |

Abb. 199: Vergleich ausgewählter Dämmstoffe. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 200: Einhängung eines Fassadenelements.. Foto: Lukas Lang Building Technologies.

Dämmstoffes führt, müssen Vakuumisolierpaneele sehr gut vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden. Dann erreichen sie allerding hervorragende Dämmwerte mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,004-0,008 W/mK.[302] Werkseits unter geschützten Bedingungen in das Außenwandelement eingebaut, ist die Vakuumdämmung vor Beschädigungen sicher, wodurch von einer technischen Nutzdauer von 50 Jahren ausgegangen werden kann.[303] Wird ein Fassadenelement wiederverwendet, kann die Dämmung mit einer Wärmesonde im eingebauten Zustand auf Intaktheit geprüft werden. Im EoL kann das teure Stützmaterial wiederverwendet werden, die Folien erfahren ein Downcycling.[304]

**Außenhaut**

Die Außenhaut ist mit Metallkonsolen vorgehängt und hinterlüftet. Dieses System erlaubt einen sehr leichten und beschädigungsfreien Austausch der Außenansicht, da sie verdeckt verschraubt ist. Da mit dieser Verbindung und der vorgegebenen Elementgröße die Kompatibilität aller Außenhaut-Elemente unabhängig des Materials möglich ist, können unterschiedliche Oberflächen verwendet werden. Standardmäßig werden von Lukas Lang horizontale und vertikale Holzschalungen sowie eine Plattenverkleidung angeboten.

Wie in Abb. 188 zu sehen ist, ist die Fassadenhaut eine Bauteilschicht, für die ReUse Produkte angeboten werden – wofür sie sich gut eignet, da an die vorgehängte Fassadenhaut keine bauphysikalischen Anforderungen gelten. Auf der Bauteilbörse Concular werden Pfosten-Riegel-Fassaden,

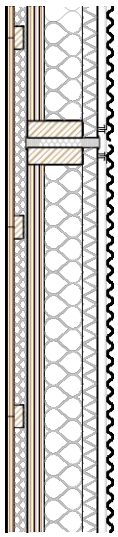
302 Siehe: BauNetz, „Vakuumisolationspaneele".

303 Siehe: Zelger u. a., *Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen*, 155.

304 Siehe: e-genius, „Vakuumdämmung".

## Variante 3: Fassade

*Bauteilfläche: 1.261,0 m² (7,1%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 19 | Spanplatte, beschichtet |
| 30 | Holz-UK, auf Metallschiene, entkoppelt |
| | dazwischen: Zellulose-Dämmmatten |
| 10 | Luft |
| | Rahmenkonstruktion Fichte Vollholz (150/45) |
| 18 | dazwischen: OSB-Platte, luftdicht verklebt |
| 12,5 | Gipskarton |
| 12 | Holz-Weichfaserplatte |
| 7,5 | Luft |
| 100 | Mineralwolle |
| 40 | Vakuumisolierpaneel |
| | 25mm Element-Fuge: Elastomer-Dichtung (25) |
| | Mineralwolle (120) |
| | Elastomer-Dichtung (25) |
| 35 | Metall-Konsole, therm. entkoppelt |
| 18 | ReUse Stahl Wellblech, 1 mm stark |
| **302** | **U-Wert: 0,14** W/m²K |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 201: Projekt K.118 von Baubüro InSitu: Demontage der Fassade von ihrem ersten Einsatzort. Foto: Werner Knuesel.



Abb. 202: Fassadenelemente, z.B. dieses Wellblech, sind einige der Produkte, die regelmäßig bei ReUse Plattformen angebotne werden. Quelle: Concular

Natursteinplatten-Fassaden und Blech-Fassaden angeboten. Für diese Einbausituation kommen nur letztere in Frage. Bleche sind sehr gut geeignet, weil sie leicht zu verarbeiten, robust und dauerhaft sind und aus dem Industriebau recht oft anfallen. So besteht auch die Fassade des K.118 aus dem Aluminium-Trapezblech einer ehemaligen Druckerei.[305] Hinzu kommt ihr sehr hohes Recyclingpotenzial im EoL. Dadurch ist das Kreislaufpotenzial einer Blechfassade sogar höher als das der Holzschalung, weshalb in dieser Variante eine ReUse Blechfassade gewählt wird.

Ob tatsächlich ReUse Bauteile aus einer Bauteilbörse eingesetzt werden können, ist sehr vom regional vorhandenen Angebot abhängig. Gerade deshalb ist eine Unterkonstruktion vorteilhaft, die auf verschiedene Außenhaut-Materialien reagieren kann – sodass bei nicht vorhandenem Angebot auch die Holzschalung verwendet werden kann.

Die innere Schicht des Wandelements besteht aus einer bauseits montierten freistehenden Vorsatzschale. Ihr Prinzip wird im Kapitel Trockenbau genauer erläutert.

Sehr vorteilhaft an diesem gesamten Schichtenaufbau ist, dass die einzelnen Elemente wieder zerstörungsfrei voneinander getrennt werden können, wodurch der Austausch einzelner Bauteile sowie ein sortenreiner Rückbau leicht möglich sind. Dank des Vakuumpaneels und der Funktionstrennung von Tragenden Stützen und dämmender Außenwand kann mit einem äußerst schlanken Bauteil ein sehr passabler U-Wert von 0,14 W/m²K erreicht werden.

305 Siehe: Hebel und Wappner, *Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik*, 59–60.

| | Holzschalung | Plattenwerkstoff (HPL) | ReUse Wellblech |
|---|---|---|---|
| Inhaltsstoffe | 100% Holz | 60% Zellulose<br>40% Phenol- und Melaminharz | 100% feuerverzinkter Stahl |
| Pre-Use | 100% erneuerbarer Primärrohstoff | 60% erneuerbarer Primärrohstoff | 100% Wiederverwendung |
| Post-Use<br>excl. Wiederverwendung | 100% energetische Verwertung | 100% energetische Verwertung | 100% Recycling |
| **UMI** | **94%** | **56%** | **100%** |

Abb. 203: Vergleich ausgewählter Fassadenmaterialien. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abb. 204: Tragwerk im Rohbau. Foto: Lukas Lang Building Technologies



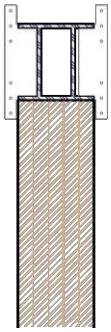
Abb. 205: Nahaufnahme des Verbindungsknotens. Foto: Lukas Lang Building Technologies

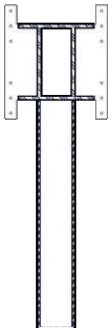
## Stützen

Die vorgefertigten Stützen bestehen aus einem stabförmigen Baustoff, Stahl oder Holz, und einem Knotenpunkt. Die Stahlstützen sind sehr leistungsfähig und mit einem Rechteckhohlprofil von 10 x 10 cm recht schlank. Sie werden aufgrund der größeren Belastbarkeit im Erdgeschoss und ersten Obergeschoss eingesetzt. Zudem werden sie aufgrund des schlankeren Querschnitts im Bereich der Wohnungstrenn- und Treppenhauswände verwendet. Die 20 cm dicken, quadratischen Brettschichtholzstützen haben ein geringeres Treibhauspotenzial, dafür allerdings auch eine geringere Tragfähigkeit und ein größeres Volumen als die Stahlstützen. Das Volumen ist Großteiles dadurch begründet, dass sie – wie auch die Holzbalken – auf Abbrand dimensioniert sind. Sie werden eingesetzt, wo auf die Stahlstützen verzichtet werden kann.

Die vertikale Aussteifung der Konstruktion – bestehend aus schlanken Stahl-Zugseilen, die an den Knotenpunkten angeschlossen werden – kann im Zwischenraum der Trockenbauwände gespannt werden. Eine Zusätzliche Aussteifung erfolgt über die Brettsperrholzelemente in den Wohnungstrennwänden.

### Variante 3: Stützen





| Höhe [mm] | HOLZ: | Stückzahl: 66 (0,2%) |
|---|---|---|
| 2740 | Brettsperrholz, Fichte, lasiert 200/200 | |
| 300 | Stahlknoten, Anschlüsse in 14 Richtungen | |
| **3040** | | |

| Höhe [mm] | STAHL: | Stückzahl: 114 (0,4%) |
|---|---|---|
| 2740 | Rechteckhohlprofil, Stahl, brandschutzbeschichtung 100/100/5 | |
| 300 | Stahlknoten, Anschlüsse in 14 Richtungen | |
| **3040** | | |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Trockenbau

Auch die Trockenbauwände unterliegen dem strikten Grundrissraster von 1,4 x 1,4 Metern. Sie können jedoch auch im halben Rastermaß, also im 0,7 Meter-Rhythmus, errichtet werden. Trotz dieser Differenzierung des Rasters kann mit dem Systembau der Raum nicht immer ideal genutzt werden.

Der Trockenbau steht auf dem Bodenaufbau – wird also nicht auf den Rohboden hinuntergeführt. Dadurch entstehen Nachteile im Schallschutz, aber Vorteile in der Flexibilität – die Wände können mit sehr geringem Aufwand verschoben werden. Die Konstruktion der Trockenbauwände besteht aus an Boden und Decke montierten Metallschienen, zwischen denen Holzunterkonstruktionen eingefädelt und eingespannt werden. Außen werden Werkstoffplatten verschraubt und der Zwischenraum mit Dämmung gefüllt. Diese Konstruktion erlaubt nicht nur einen sehr leichten Rückbau, da die Holzständerkonstruktion lediglich gesteckt ist, sie hat auch aufgrund der zwei freistehenden Konstruktionen gute Schallschutzeigenschaften.

### Trockenbauplatten

Für einen beschädigungsfreien Rückbau und Wiedereinsatz kommen nur Platten mit einer erhöhten Robustheit in Frage – nicht also poröse Gipskarton- oder Lehmbauplatten. Lukas Lang setzt Gipsfaser- Span- und Dreischichtplatten ein. Für reine Trockenbauplatten gibt es nach Wissensstand der Autorin aktuell keine ReUse Angebote. Da für eine mögliche Wiederverwendung auch das



Abb. 206: Montage der Trockenbauwände. Foto: Lukas Lang Building Technologies

Aussehen, also die Robustheit gegenüber mechanischen Beschädigungen, relevant ist, scheidet die Dreischichtplatte aus Weichholz aus. Die Spanplatte zählt zu den wenigen Holzprodukten, die heute schon aus Altholz produziert werden – sie hat mit ca. 70% einen sehr hohen Rezyklatanteil.[306] Insgesamt ist sie deutlich kreislauffähiger als die Gipsfaserplatte, weshalb sie als Trockenbauplatte gewählt wird.

### Dämmstoff

Im Lukas Lang System erfolgt die Trockenbau-Dämmung mit Mineralwolle. Da sie jedoch erst bauseits eingebracht wird, also nicht notwendiges Element des Systembaus ist, kann hier auch ein anderes Material gewählt werden.

306 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 65.

| | Gipsfaserplatte | Spanplatte beschichtet | 3-Schichtplatte, natur |
|---|---|---|---|
| **Inhaltsstoffe** | 82% Gips<br>18% Zellulose | 90% Holzspäne<br>5 – 10% Leim<br>Beschichtung: Zellulose, Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz | Nadelholz (Fichte, Douglasie)<br>1 % Leim (Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz) |
| **Rohdichte** | ca. 900 kg/m³ | 400 - 850 kg/m³ | ca. 450 kg/m³ |
| **Eignung**<br>Robustheit | **ja** | **ja** | **(ja)**<br>Oberfläche anfällig für Beschädigung |
| Pre-Use | 33% Primärrohstoff<br>49% REA-Gips + Rezyklate<br>18% erneuerbarer Primärrohstoff | 70% Recycling<br>20% erneuerbarer Primärrohstoff | 99% erneuerbarer Primärrohstoff |
| Post-Use<br>excl. Wiederverwendung | Verbundbaustoff:<br>Deponierung | 66% Downcycling<br>31% energetische Verwertung | 66% Downcycling<br>31% energetische Verwertung |
| **UMI** | 34% | **87%** | **92%** |

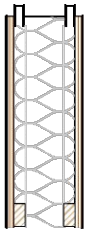
Abb. 207: Vergleich ausgewählter Trockenbauplatten. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 3: Trockenbauwand

*Bauteilfläche: 1.184,9 m² (3,3%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 19 | Spanplatte, beschichtet |
| 30 | Holz-UK, auf Metallschiene, entkoppelt |
| 102 | Zellulose-Dämmmatten |
| 30 | Holz-UK, auf Metallschiene, entkoppelt |
| 19 | Spanplatte, beschichtet |
| **200** | |

Neben Mineralwolle, das zu einem großen Teil aus zementgebundenem Altmaterial besteht, gibt es noch weitere Trockenbau-Dämmstoffe mit noch höherem Recycling-Anteil. So werden in Österreich Jute-Dämmstoffe angeboten, die überwiegend aus ausgedienten Kaffeesäcken bestehen.[307] Zellulose-Dämmmatten, die aus bereits mehrfach verwertetem Zeitungspapier bestehen, erreichen einen noch höheren Sekundärrohstoff-Anteil. Alle drei Materialien erreichen vergleichbar gute Schalldämmwerte[308] und ein ähnliches Kreislaufpotenzial. Tatsächlich erreichen die Mineralwolle und die Zellulosedämmung im UMI-Tool einen gleichermaßen hohen Wert. Da letztgenannte als mehrfach wiederverwerteter erneuerbarer Rohstoff aber ein deutlich besseres Treibhauspotenzial im Lebenszyklus erreicht, wird die Zellulose Dämmung für den Trockenbau gewählt.

Wichtig ist dabei der Einsatz eines borfreien Dämmmaterials. Bor, das in biologischen Faserdämmungen oft als Flamm- und Insektenschutzmittel verwendet wird, kommt in geringen Mengen auch in der Natur vor, gilt allerdings laut der europäischen Chemikalienverordnung als „Substance of Very High Concern". Es ist anzunehmen, dass borhaltige Dämmungen in Zukunft als Problemstoffe angesehen und aufwendig entsorgt werden müssen.[309]

307 Ein Beispielprodukt ist: Reichel & Naar GmbH, „Dämmjute".

308 Alle drei Materialien erreichen „mittlere" Schalldämmwerte. Siehe: Verbraucherzentrale NRW, „Dämmstoff.Navi".

309 Siehe: Hillebrandt u. a., *Atlas Recycling*, 88.

| | Mineralwolle-Dämmmatten | Zellulose-Dämmmatten | Jute Dämmmatten |
|---|---|---|---|
| **Eignung** als Trockenbaudämmung | **ja**<br>guter Schallschutz<br>gute Verarbeitbarkeit | **ja**<br>guter Schallschutz<br>gute Verarbeitbarkeit | **ja**<br>guter Schallschutz<br>gute Verarbeitbarkeit |
| Inhaltsstoffe | 60% zementgebundene Re-Use Fasern<br>2% Formaldehydharze als Bindemittel | 90% Tageszeitungspapier<br>10% anorganische Mineralsalze (borfrei) | 85% Recycling-Jutefasern<br>11% biopolymere Stützfaser<br>4% Soda als Brandschutz |
| Pre-Use | 60% Recycling | 90% Recycling Zeitungspapier | 85% Recycling Kaffeesäcke |
| Post-Use | 96% Wiederverwertung (Herstellerrücknahme) | 47% Recycling<br>37% Energetische Verwertung | 41% Recycling<br>42% Energetische Verwertung |
| **UMI** | **78%** | **78%** | **74%** |
| **GWP** im Lebenszyklus* | **41,4** | **-10,6** | **11,1**** |

* Betrachtungszeit 50 Jahre, Module: A1-3, B4, C3-4, D, Daten ÖkobauDat.

** Für reine Jute-Dämmung lag keine EPD vor, weshalb auf die EPD einer Hanf-Jute-Dämmung zurückgegriffen wurde.

Abb. 208: Vergleich ausgewählter Trockenbauplatten. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Wohnungstrennwand

Die Wohnungstrennwände sind gleich aufgebaut wie die Trockenbauwände, abgesehen von einer zusätzlichen Masseschicht in der Mitte. Um die erhöhten Schallschutzanforderungen für Wohnungstrennwände erfüllen zu können, wird eine Brettsperrholzwand als Masseschicht zwischen den beiden freistehenden Vorsatzschalen der Trockenbauwand eingebaut. Im Gegensatz zu den Trockenbauwänden wird diese bis auf den Rohboden hinuntergeführt, um den Luftschallübertrag über den Bodenaufbau zu unterbinden.

Da die Lastabtragung über die Stützen erfolgt, können die Wohnungstrennwände sehr schlank ausgeführt werden. Um eine direkte Schallübertragung zu vermeiden, werden im Bereich der Wohnungstrennwände ausschließlich die schlankeren Stahlstützen verwendet, welche beidseitig von den Vorsatzschalen umschlossen werden.

**Sondersituation Wand zu Erschließung**
Um die geforderte Nichtbrennbarkeit der Oberflächen im Treppenhaus zu erreichen, reicht nicht nur ein Austausch der Spanplatte (Brandklasse D) gegen die Gipsfaserplatte (Brandklasse A2), denn es muss ein komplett fugenloser Einbau stattfinden. Deshalb wird im Bereich des Treppenhauses nicht die Vorsatzschale nach Lukas Lang verbaut, sondern eine konventionelle Lösung analog zu Variante 1. Mit einer Metallständerkonstruktion und Gipskartonbeplankung können nicht nur die Wand, sondern auch alle Anschlusspunkte sicher vor Brand gekapselt werden.

## Aufzug

Für das Sonderbauteil Aufzug sind ein Bruch mit dem Grundrissraster und eine Lösung außerhalb des Bausystems nötig. Um die Vorteile der Bauweise, nämlich die trockenen und reversiblen Verbindungen sowie die schnelle, maßgenaue Errichtung dank Vorfertigung, auch beim Aufzugsschacht zu nutzen, wird dieser aus Brettsperrholz geplant – zur Schallentkoppelung als zweischalige Konstruktion. Er erreicht damit nicht nur eine höhere Maßgenauigkeit als ein Aufzug in Ortbeton, was für den Systembau sehr entscheidend ist; die Anschlüsse von Holz zu Holz lassen sich auch deutlich einfacher gestalten als von Holz zu Ortbeton.[310] Zudem lassen sich mit den wesentlich leichteren Holzmodulen bis zu drei Stockwerke am Stück vorfertigen, sodass der Schacht nur aus zwei Teilen zusammengefügt werden muss. In Orientierung am Kampa Verwaltungsgebäude in Aalen genügt zur Brandsicherheit eine Brandschutz-Beplankung der äußeren Schale und eine Ausdämmung des Zwischenraums dem nichtbrennbaren Dämmstoff Mineralwolle.[311] Als Sonderbauteil hat der Aufzugsschacht wenig Potenzial zur Wiederverwendung, doch mit dem Einsatz nur geringfügig behandelter nachwachsender Rohstoffe kann das Material zumindest kaskadisch genutzt werden.



Abb. 209: Kampa Verwaltungsgebäude, Aalen, DE von Florian Nagler Architekten (2014). Der Brettsperrholz-Aufzugsschacht wurde als dreigeschossiges Element eingebracht. Foto: Peters Fotodesign

310 Referenzen für den Einsatz eines Aufzugsschachts aus Brettsperrholz sind zum Beispiel das Post Quadrat Graz von P.Good Architekten aus 2021 und das Kampa Verwaltungsgebäude in Aalen, DE von Florian Nagler Architekten aus 2014.

311 Der Aufbau orientiert sich am Holz-Aufzug des Kampa Verwaltungsgebäudes in Aalen von Florian Nagler Architekten. Siehe: Kaufmann, Krötsch, und Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*, 207.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 3: Wohnungstrennwand

*Fläche: 338,8 m² (1,6%)*

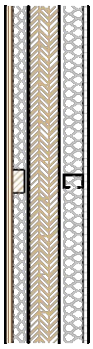


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 19 | Spanplatte, beschichtet |
| 30 | Holz-UK, auf Metallschiene, entkoppelt<br>dazwischen: Zellulose-Dämmmatten |
| 11 | Luftschicht |
| 80 | Brettsperrholz |
| 11 | Luftschicht |
| 30 | Holz-UK, auf Metallschiene, entkoppelt<br>dazwischen: Zellulose-Dämmmatten |
| 19 | Spanplatte, beschichtet |
| **200** | |

**$R_w$: 55 dB**

## Variante 3: Wand zu Erschließung

*Fläche: 492,7 m² (1,5%)*

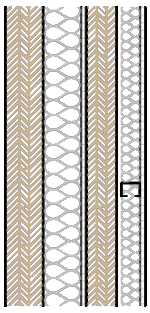


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 19 | Spanplatte, beschichtet |
| 30 | Holz-UK, auf Metallschiene, entkoppelt<br>dazwischen: Zellulose-Dämmmatten |
| 11 | Luftschicht |
| 80 | Brettsperrholz |
| 12,5 | Luftschicht |
| 50 | Blech-Profil, freistehend<br>dazwischen: Mineralwolle |
| 12,5 | Gipskarton |
| **215** | |

**$R_w$: 55 dB**

## Variante 3: Aufzug

*Bauteilfläche: 157,2 m² (0,9%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 100 | Aufzugsschacht Brettsperrholz |
| 100 | Mineralwolle, getackert |
| 12,5 | Gipskartonplatte, feuerschutz |
| 80 | Treppenhauswand Brettsperrholz |
| 12,5 | Luftschicht |
| 50 | Blech-Profil, freistehend<br>dazwischen: Mineralwolle, gesteckt |
| 12,5 | Gipskarton feuerschutz |
| **368** | |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Geschossdecke

Die Geschossdecken werden von einem Trägerrost aus 20 x 30 cm starken Brettsperrholzelementen getragen, die an den Knotenpunkten der Stützen mittels Steck- und Schraubverbindungen fixiert sind. Zwischen den Trägern auf Stahlhaken eingehängte Brettsperrholzelemente bilden die Tragschicht und die horizontale Aussteifung. Von unten werden die Gefache der Konstruktion mit Gipsfaserplatten geschlossen und der Zwischenraum mit Dämmung gefüllt. So werden nicht nur die Metallverbindungen und Elektroinstallationen verblendet, sondern auch Schall- und Brandschutz erhöht. Da die Gipsfaserplatte sowohl maßgenau sein muss als auch der Brandverhütung dient, ist ein Neuprodukt alternativlos. Für die Dämmung wird – wie beim Trockenbau – die von Lukas Lang eingesetzte Mineralwolle durch eine Zellulosematte ersetzt.

Als Bodenaufbau setzt Lukas Lang auf Doppelböden. Dieser wohl modularste Fußbodenaufbau wird primär im Bürobau eingesetzt. Unter den auf Stahlstützen aufgeständerten Doppelbodenplatten können Haustechnik- und Elektroinstallationen frei verlegt werden und sind jederzeit zugänglich. Der Schallschutz gestaltet sich bei einem Doppelboden jedoch schwierig.[312] Laut dem Doppelbodenhersteller Lindner werden ihre Produkte wegen zu geringem Schallschutz selten im Wohnbau eingesetzt.[313] Mit einer Schallentkoppelung der Doppelbodenstützen aus Elastomerauflagern, Mineralwolle-Schallabsorptionsdämmstoff im Bodenzwischenbereich und einer Hohldeckenkonstruktion gelingt es Lukas Lang nach eigenen Angaben dennoch, den Schallschutzanforderungen für horizontale Bauteile im Wohnbau zu genügen.[314] Um von dieser Garantie nicht abzuweichen, wird dieser Aufbau samt Materialität so übernommen.

Der große Vorteil von Doppelböden ist neben der kurzen Bauzeit und der Wartungsfreundlichkeit die zerstörungsfreie Rückbaubarkeit des gesamten Fußbodens inclusive Haustechnikinstallation. Eine Firma bietet bereits wiederaufbereitete Doppelbodenkonstruktionen und Rücknahmevereinbarungen an, sodass Doppelböden komplett zirkulär ausgeführt werden können.[315] Diese können auch mit systemintegriertem Parkett-Oberboden errichtet werden. Auch wenn die Rücknahmevereinbarung nicht für den Oberboden gilt, so sind reibungslose



Abb. 210: Doppelböden werden auf Stahlstützen hochgeständert, um darunter eine frei Leitungsführung zu ermöglichen. Darstellung: Lindner GmbH

Schnittstellen und ein beschädigungsfreier Einbau zumindest garantiert. Der Doppelboden steht direkt auf dem Rohboden, also dem Trägerrost und den dazwischen eingehängten 8 cm starken Brettsperrholz-Platten.

**Sondersituation Decke über Keller**
Die Erdgeschossdecke muss – wie der Keller – in Recycling-Beton mit CEM-II/C Zement ausgeführt werden. Zudem wird zum unbeheizten Untergeschoss eine zusätzliche Dämmebene benötigt. Hier wird das selbe, druckstabile Material wie für das Dach verwendet – Mineralwolle. Eine Gipsfaserplatte dient dem Zweck, die Punktlasten des Doppelbodens gut auf der Dämmung auszugleichen.

**Sondersituation Decke im Treppenhaus**
Wie im Kapitel Konstruktion diskutiert, werden für die Treppen und Decken im Treppenhaus Beton-Fertigteile eingesetzt, welche Brand- und Schallschutzanforderungen wesentlich leichter erfüllen und mit werkseits vormontierten Befestigungen maßgenau an die Holzkassetten angeschlossen werden können. Über diese Konstruktion kann der selbe Bodenaufbau geführt werden wie bei den restlichen Geschossdecken.

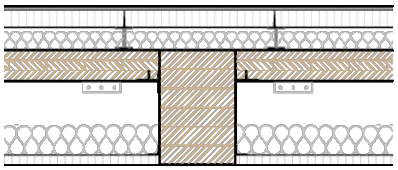
312 Siehe: BauNetz, „Doppelböden“.
313 Telefonische Auskunft durch Lindner-Fachberater am 11.01.2024.
314 Angabe laut Alexander Szymoniuk, Verkaufsleiter bei Lukas Lang Building Technologies, schriftlich, am 17.01.2024.
315 Die Firma Lindner bietet mit der Produktreihe LOOP wiederverwertete Doppelbodenplatte mit Herstellerrücknaheregelung an. Siehe: Lindner Group, „LOOP Prime. Aufbereitete Doppelböden mit höchstem Anspruch an Nachhaltigkeit“.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 3: Geschossdecke

*Bauteilfläche: 1.372,2 m² (13,6%)*

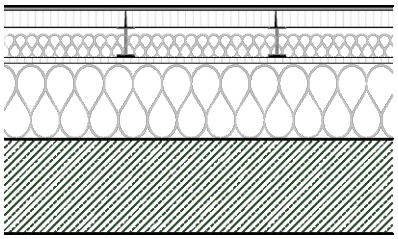


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klickparkett |
| 45 | ReUse Doppelbodenplatten |
| 60 | Stelzlager Blech, Elastomerauflager<br>dazwischen: Mineralwolle<br>Trägerrost Fichte Vollholz (300/200) |
| 80 | dazwischen: BSP Fichte, eingehängt |
| 125 | Luft |
| 80 | Zellulose-Dämmmatten |
| 15 | Gipsfaserplatte |
| **387** | |

**$L_{n,w}$: 48 dB**

## Variante 3: Decke über Keller

*Bauteilfläche: 396,0 m² (14,3%)*

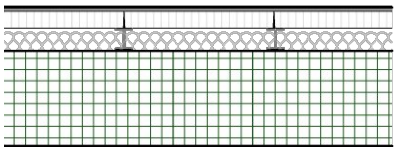


| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klickparkett |
| 45 | ReUse Doppelbodenplatten |
| 80 | Stelzlager Blech, Elastormerauflager:<br>dazwischen: Mineralwolle |
| 15 | Gipsfaserplatte zur Lastverteilung |
| 200 | Mineralwolle |
| 250 | Stahlbeton (38% Recycling-Zuschläge)<br>mit CEM II/C-Zement |
| **600** | |

**U-Wert: 0,14** W/m²K

## Variante 3: Decke Erschließung

*Bauteilfläche: 79,8 m² (2,3%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 10 | Belag Klickparkett |
| 45 | ReUse Doppelbodenplatten |
| 60 | Stelzlager Blech, Elastomerauflager<br>dazwischen: Mineralwolle |
| 200 | STB-Fertigteil (38% Recycling-Zuschläge)<br>mit CEM II/C-Zement |
| **387** | |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Dach

Die Dachabdichtung ist eine der wenigen Bauteilschichten, die nicht modular ausgeführt werden können. Schließlich müssen die wasserführende und die dichtende Schicht fugenlos ausgebildet werden. Auf die Tragkonstruktion in Systembauweise wird also bauseits ein konventioneller Aufbau verlegt. Aufgrund der bereits in der Variante 1 diskutierten Vorteile wird das Haus mit einem konventionellen Warmdach gedeckt. Auch die Wahl der Dichtungen, eine EPDM-Abdichtungsbahn, die nicht auf der Dämmung verklebt wird, und eine Dampfsperre aus Bitumen, welches beim Holzbau lose verlegt werden kann, wurden bereits in Variante 1 diskutiert.

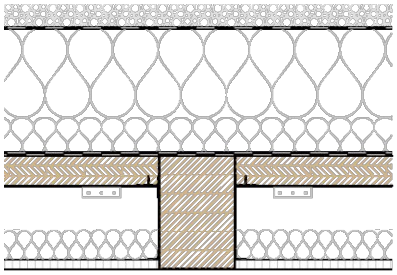
Die Dämmung erfolgt im Lukas Lang System mit EPS. Dieses Material ist sehr preiswert, aber aktuell gar nicht zirkulär. Ein Vergleich mit den bisher gewählten Dämmstoffen Mineralwolle und Holzfasern zeigt, dass erstere als nachwachsender Rohstoff eine minimal höhere Kreislauffähigkeit hat, aber unter dem Aspekt Wiederverwertung die Mineralwolle deutlich besser abschneidet. Deshalb wird die bereits für die Außenwände und im Bodenaufbau eingesetzte Mineralwolle auch hier verwendet. Dank der Holz-Bauweise und den kassettenartigen Zwischenräumen im Trägerrost, die aufgrund der Lufteinschlüsse dämmend wirken, hat die Decke einen guten thermischen Schutz. Es genügt eine 6 cm geringere Wärmedämmschicht als bei den anderen Gebäuden, um einen U-Wert von 0,07 W/m²K zu erreichen.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Variante 3: Dach

*Bauteilfläche: 352,4 m² (4,1%)*



| Dicke [mm] | Bauteilschicht |
|---|---|
| 60 | Schüttung Kies |
| 2 | Abdichtung, EPDM-Folie |
| 240 | Mineralwolle |
| 0 - 200 | Mineralwolle Gefälledämmung |
| 5 | Dampfsperre, Bitumen, lose verlegt |
| | Trägerrost Fichte Vollholz (300/200) |
| 80 | dazwischen: BSP Fichte, eingehängt |
| 125 | Luft |
| 80 | Zellulose-Dämmmatten |
| 15 | Gipsfaserplatte |
| **707** | |

**U-Wert: 0,07** W/m²K

| | EPS | Mineralwolle | Holzfasern |
|---|---|---|---|
| **Eignung**<br>Wärmeleitfähigkeit λ | **ja**<br>0,031 - 0,042 W/mK | **ja**<br>0,031 - 0,045 W/mK | **(ja)**<br>0,038 W/mK |
| Pre-Use | 100% Primärrohstoff: Erdöl | 60% Wiederverwertung | 89 % erneruerbarer Primärrohstoff |
| Post-Use (sortenreine Rückgewinnung) | 100% energetische Verwertung | 96% Wiederverwertung (Herstellerrücknahme) | 70% Weiterverwertung<br>29% enregetische Verwertung |
| **UMI** | 0% | **78%** | **87%** |

Abb. 211: Vergleich ausgewählter Dämmstoffe. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kreislauffähigkeit

Der Systembau setzt primär auf die Wiederverwendbarkeit der Bauteile, enthält mit der Holzkonstruktion aber auch eine große Menge nachwachsender Rohstoffe. Beides sehr gute Voraussetzungen für ein hohes Kreislaufpotenzial. Gleichzeitig wurden auch hochkomplexe und für den Wohnbau unübliche Materialien wie das Vakuumisolierpaneel und der Doppelboden verbaut. Wie hoch das Potenzial für eine Kreislaufführung des Systembaus ist, wird im folgenden Kapitel analysiert.

## Kreislaufpotenzial der Elemente

Der Systembau von Lukas Lang ist so konzipiert, dass die einzelnen Elemente und Unter-Elemente wiederverwendet werden können, was bereits mehrfach geschieht. Für Bauteile in tadellosem Zustand bietet die Firma Rückkaufoptionen an. Das Maß, wie wahrscheinlich eine Wiederverwendung dieser Bauteile ist, kann mit dem UMI – der auf Materialien und konventionelle Bauweisen spezialisiert ist – nicht erfasst werden. Deswegen wurde in dieser Arbeit unter Rücksprache mit dem Lukas Lang Team die Logik des Urban Mining Indexes eigenständig auf die Elemente der Systembauweise erweitert. Bisher sind nicht viele ReUse Produkte von Lukas Lang im Umlauf, weshalb konservativ angenommen wurde, dass keines der Bauteile bereits wiederverwendete Elemente enthält.

Nachfolgend wird das Wiederverwendungspotenzial der vollständigen Elemente im Post-Use betrachtet. Die Verwertungsmöglichkeiten für die einzelnen verbauten Baustoffe werden in der Untersuchung der Standardaufbauten diskutiert. Das Potenzial für eine Wiederverwendung setzt sich aus den Faktoren Wert und Arbeit sowie aus dem Material-Loop-Potenzial, welches die technische Möglichkeit einer Wiederverwendung im Best-Case-Szenario darstellt, zusammen. Der Faktor Wert ist bei den konstruktiven Bauteilen, die viel Material pro Arbeitsschritt bringen, besonders hoch. Der Faktor Arbeit ist für alle Elemente sehr gut – schließlich ist ein effizienter Rückbau Teil des Baukonzepts. Lediglich Sichtoberflächen müssen mit mehr Vorsicht behandelt werden und sind deshalb etwas arbeitsintensiver. Das Material-Loop-Potenzial ist bei den konstruktiven Bauteilen am höchsten, die sehr robust sind und vielfach durch Bekleidungen von äußeren Umwelteinwirkungen abgeschirmt werden. Laut Lukas Lang sind die Konstruktionsbauteile meist auch nach langem Einsatz in hervorragendem Zustand. Die Bauteile mit hohen Gebrauchseinwirkungen – zum Beispiel der Bodenaufbau und die Fassade – haben ein kleines Material-Loop-Potenzial, da hier irreversible Beschädigungen oder Abnutzungen wahrscheinlicher sind.

Das Produkt aller drei eben genannten Faktoren ergibt das Wiederverwendungspotenzial. Allerdings übersteigt diese Untersuchung als Langzeitbetrachtung die Erfahrungen von Lukas Lang bei Weitem. Einerseits sind höhere Material-Abnutzungen anzunehmen und andererseits besteht die Gefahr

| Element | Anteil ReUse & Recycling Bauteile | Faktor Wert | Faktor Arbeit | Material-Loop-Potenzial |
|---|---|---|---|---|
| Fassade - Technischer Kern | 0% | 1 | 1 | 0,8 |
| Fassade - Außenansicht | 0% | 0,6 | 1 | 0,2 |
| Fassade - Dämmpaneel | 0% | 0,6 | 1 | 0,2 |
| Fassade - Innenansicht | 0% | 0,6 | 0,8 | 0,8 |
| Stütze Stahl + Aussteifung | 0% | 1 | 1 | 0,8 |
| Stütze Holz | 0% | 1 | 1 | 0,8 |
| Trockenbauwand | 0% | 0,8 | 0,8 | 0,6 |
| Trennwand - Brettsperrholz | 0% | 0,8 | 0,8 | 0,6 |
| Geschossdecke - Konstruktion | 0% | 1 | 1 | 0,8 |
| Geschossdecke - Abhängung | 0% | 0,8 | 0,8 | 0,2 |
| Geschossdecke - Bodenaufbau | 0% | 0,9 | 1 | 0,2 |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

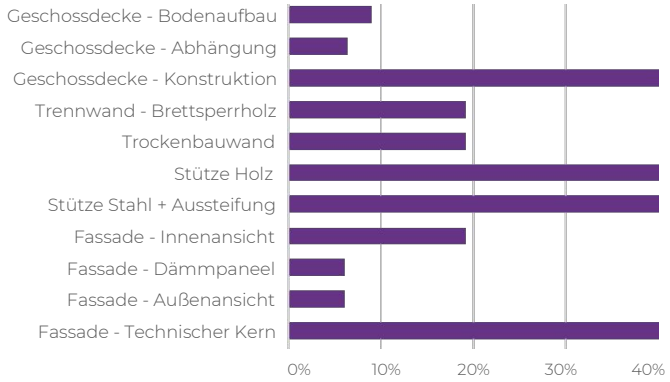



Abb. 212:
Wiederverwendungspotenzial der einezelnen Elemente des Systembaus. Eigene Darstellung.

einer rechtlichen, ästhetischen oder funktionalen Obsoleszenz der Bauteile. Diese Risiken werden pauschal auf 50% geschätzt. Das heißt, dass sich die Wahrscheinlichkeit einer Wiederverwendung auf lange Sicht halbiert. Dieser „Zeit-Faktor" ergibt multipliziert mit dem Wiederverwendungspotenzial direkt die Wiederverwendungswahrscheinlichkeit im Lebenszyklus.

So ergibt sich für die Konstruktion das höchste Wiederverwendungspotenzial von 40%, da sie sowohl robust als auch werterhaltend ist. Die Trockenbau-Wände erreichen etwa 19%, da sie als Sichtoberflächen bedingt von Abnutzungen betroffen sind, aber aufgrund des Stecksystems sehr leicht rückgebaut werden können. Am schlechtesten schneiden die Oberflächen ab, die von viel mechanischer Einwirkung betroffen sind, wie Fassade und Bodenaufbau, sowie die sehr empfindlichen Bauteile, nämlich die Vakuumdämmung.

Das Kreislaufpotenzial der Elemente fließt in die Betrachtung der Standard-Aufbauten mit ein. Als hochwertiger Verwertungsweg wird die Wiederverwendung der Elemente priorisiert. Der Anteil, zu dem keine Wiederverwendung möglich ist, wird so behandelt, dass die einzelnen Baustoffe des Elements getrennt verwertet werden.

Für die Berechnung des Treibhauspotenzials der Wiederverwendung wird unter Rückgriff auf das Paper „Rechenregeln für ReUse Produkte" des deutschen Instituts für Bauen und Umwelt angenommen, dass ab dem Gebrauchsende der ersten Nutzung bereits die Herstellung des Sekundärprodukts beginnt. Schließlich wird an diesem Schnittpunkt der Kreis der Wiederverwendung geschlossen. Unter der Annahme, dass die Module C und D der aktuellen Verwendung bereits wieder Teil der nächsten Nutzung sind, wird ab da kein GWP für das Bauteil mehr angerechnet.[316] Dies gilt selbstverständlich anteilig nach dem jeweiligen Wiederverwendungspotenzial: Zum Beispiel werden bei 40% ReUse die Module C und D um 40% weniger angerechnet.

316 Zur Berechnung des Kreislaufpotenzials für ReUse Produkte siehe: Institut für Bauen und Umwelt e.V., „Anhang ReUse: Rechenregeln für ReUseProdukte".

| Wiederverwendungs-potenzial direkt | Zeit-Faktor: 100 Jahre | **Wiederverwendungs-potenzial im Lebenszyklus** |
|---|---|---|
| 80% | 50% | 40% |
| 12% | 50% | 6% |
| 12% | 50% | 6% |
| 38% | 50% | 19% |
| 80% | 50% | 40% |
| 80% | 50% | 40% |
| 38% | 50% | 19% |
| 38% | 50% | 19% |
| 80% | 50% | 40% |
| 13% | 50% | 6% |
| 18% | 50% | 9% |

Abb. 213:
Die Tabelle stellt die Ermittlung des Wiederverwendungspotenzials der einzelnen Elemente des Systembaus dar. Die Daten sind eigene Schätzungen basierend auf eine Gespräch mit Alexander Szymoniuk, Verkaufsleiter bei Lukas Lang Building Technologies. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

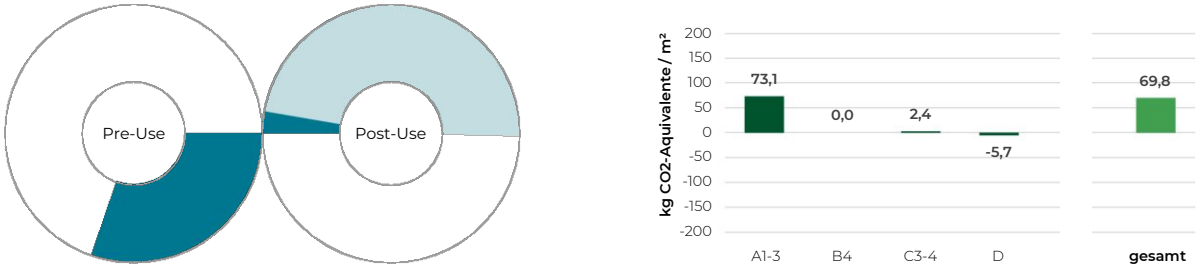



Abb. 214: Gründung Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Gründung

Auch in Variante 3 wird die Gründung, die 26,7% der Gebäudemasse ausmacht, gleich ausgeführt wie in den Varianten 1 und 2. Indem die Komplexität des Aufbaus gering gehalten wird, können die einzelnen Materialien eher sortenrein wiedergewonnen werden.

Im Beton wird ein Teil der Zuschläge mit Rezyklat kompensiert. Orientiert man sich an der Norm, so sind 32% der Gesamtmasse realistisch. Beton und Zementestrich können gemeinsam abgebrochen werden. Da der Ausbau des Gründungsbauteils anspruchsvoll ist, kann nicht damit gerechnet werden, dass er komplett sortenrein gelingt. Mit der potenziellen Vermischung mit Erdmaterial kann aber trotzdem ein Downcyclingpotenzial von 48% angenommen werden. Dank des praktisch unendlichen Kreislaufpotenzials vieler Metalle kann der Bewehrungsstahl komplett aus Rezyklat hergestellt werden und wieder vollständig in den technischen Kreislauf zurückgeführt werden. Die Schaumglasplatten, die fast zu drei Vierteln aus rezykliertem Altglas bestehen, haben bei sortenreinem Rückbau gute Aussichten wiederverwertet zu werden. Aufgrund der bauphysikalisch notwendigen bituminösen Verklebung bleibt allerdings nur eine Deponierung. Das Kreislaufpotenzial der gesamten Konstruktion erreicht 28%.

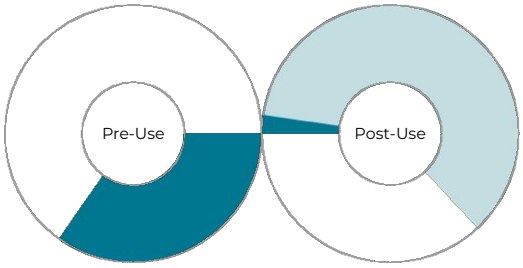
Der WU-Beton hat einerseits einen erhöhten Zementbedarf und wird anderseits mit dem $CO_2$-reduzierten CEM-II/C Zement hergestellt. Insgesamt ist er so emissionsarmer als der Beton in den Häusern A und B, aber durch ihn entstehen dennoch die Hälfte aller Treibhausgasemissionen im Bauteil. Das GWP der Gründung beträgt 69,8 kg $CO_2$-Eq./m².

| **Gründung** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *782,8 m²* | Zementestrich als Verbundestrich | | 105,0 | 14,1% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| *Masseanteil* | *26,7%* | Beton, WU | | 600,0 | 80,6% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,7% | Stahl, Scherenschrott |
| | | PE-Folie | | 0,4 | 0,1% | Kunststoffe |
| | | Schaumglasplatten, verklebt | | 19,2 | 2,6% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **744,6** | | |
| **Außenwand Keller** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *662,7 m²* | Beton, WU | | 600,0 | 94,8% | Bauschutt, gering verschmutzt |
| *Masseanteil* | *19,2%* | Bewehrung | | 15,0 | 2,4% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Schaumglasplatten, verklebt | | 18,0 | 2,8% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | **Gesamt** | | **633,0** | | |

Abb. 215: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Gründung und Außenwand Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



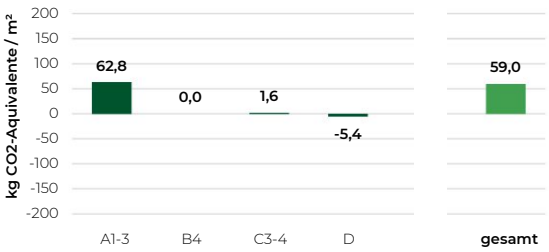
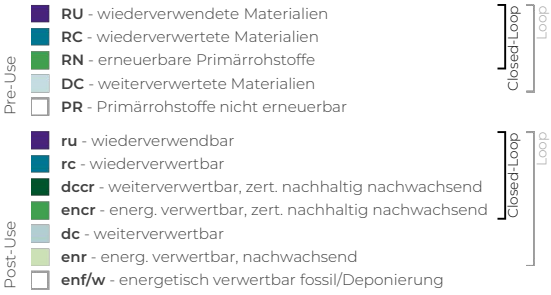




Abb. 216: Außenwand Keller Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Außenwand Keller

Bei Außenwand des Kellers fallen im Vergleich zur Gründung nur der Estrich und die Trennfolie weg. Zudem wird bei den Wandbauteilen grundsätzlich weniger Bewehrung benötigt als bei den Decken. Bessere Ausbaubedingungen führen zu einem größeren Downcyclingpotenzial der Beton-Wand. Insgesamt ist der UMI der Keller-Außenwand so etwas besser: Er beträgt 33,5%.

Auch die Kelleraußenwand ist als $CO_2$-reduzierter WU-Beton in XC2 ausgeführt. Das geringere Treibhauspotenzial ist auf den Wegfall des Estrichs und in geringem Ausmaß auf den geringeren Bewehrungsanteil und die wegfallende PE-Folie zurückzuführen. Es beträgt 59,0 kg $CO_2$-Äquivalente pro Quadratmeter.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | | | | | 48% | | 52% | 6,2 | 0,0 | 0,2 | 0,0 |
| | 32% | | | 68% | | | | | 48% | | 52% | 39,4 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,7 | 0,0 | 0,7 | -0,3 |
| | 70% | | | 30% | | | | | | | 100% | 13,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **30%** | **0%** | **0%** | **70%** | **0%** | **3%** | **0%** | **0%** | **45%** | **0%** | **52%** | **73,1** | **0,0** | **2,4** | **-5,7** |
| | | | | | | | | | | | **28,0%** | **GWP total:** | | | **69,8** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 32% | | | 68% | | | | | 64% | | 36% | 39,4 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 10,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 70% | | | 30% | | | | | | | 100% | 13,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **35%** | **0%** | **0%** | **65%** | **0%** | **2%** | **0%** | **0%** | **61%** | **0%** | **37%** | **62,8** | **0,0** | **1,6** | **-5,4** |
| | | | | | | | | | | | **33,5%** | **GWP total:** | | | **59,0** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | | | | | |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

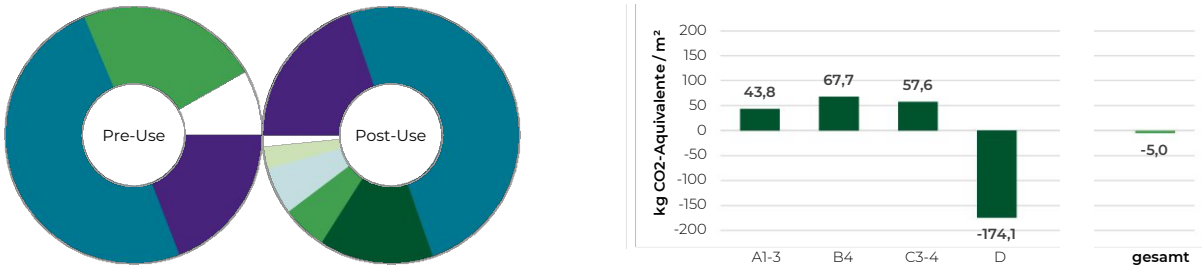



Abb. 217: Fassade Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Fassade

Die elementierte Fassade von Variante 3 besteht aus sehr vielen Schichten und hat dennoch ein sehr gutes Kreislaufpotenzial. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass sie aus mehreren Untereinheiten besteht, die sich systematisch zerstörungsfrei lösen lassen und potenziell wiederverwendet werden können. Abgesehen von der ReUse-Blech-Fassade, die mit 40 Jahren Nutzungsdauer zweimal ausgewechselt werden muss, erreichen alle Bauteile eine Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren, müssen also nur einmal ausgetauscht werden. Die Konstruktion, der Fichtenrahmen samt OSB-Beplankung und die Metall-Vorhängung benötigen keine Auswechslung.

In der Fassade werden neben Vollhölzern für den Holzrahmen und die Unterkonstruktion der Innenansicht auch viele Holzwerkstoffe verwendet: die OSB- und die Holzwerkstoffplatte im technischen Kern und die beschichtete Spanplatte als Innenansicht. Die Holzwerkstoffe enthalten neben nachhaltigen Rohstoffen auch Leim, Kunstharze und sonstige nicht erneuerbare Primärrohstoffe. Die Spanplatte ist zudem der einzige Holzwerkstoff, der mit 70% Altholz schon systematisch aus Rezyklat hergestellt wird. Als naturbelassene Hölzer haben die Holzständer der Innenansicht und der Konstruktions-Vollholzrahmen mit 80% das größte Potenzial für eine kaskadische Weiterverwertung. Mit 70 bzw. 66% sind die Plattenwerkstoffe im Sortenreinen Rückbau jedoch nur geringfügig ungünstiger. Die Metall-Elemente, die Blech-Fassade, der Stahl-Anker zur Aufhängung des Elements und die Befestigungsschienen der Innenansicht, können stets gut rezykliert werden. Hinzu kommt, dass das Wellblech der Fassadenhaut bereits ein Sekundärbauteil ist, welches mit fast 20% den größten Masse-Anteil hat. Sowohl die Zellulose- als auch die Mineralwolle-Dämmung erreichen sehr gute Wiederverwertungswerte sowohl im Pre-

| **Fassade** | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.261,0 m²* | **Innenansicht:** | | | | |
| *Masseanteil* | *7,1%* | Spanplatte, gesteckt, geschraubt | 1 | 21,6 | 17,7% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | Holzständer | 1 | 5,1 | 4,2% | ReUse / Holz, naturbelassen |
| | | Metall-Schiene | 1 | 0,9 | 0,8% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | Zellulose-Dämmmatten, gesteckt | 1 | 3,6 | 2,9% | ReUse / bio. Fasern, kompostierbar |
| | | **technischer Kern:** | | | | |
| | | Fichte, Vollholz | | 6,6 | 5,4% | ReUse / Holz, naturbelassen |
| | | Stahl-Anker, gesteckt, geschraubt | | 2,1 | 1,7% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | OSB-Platte, verschraubt | | 9,6 | 7,8% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | Gipskarton, verschraubt | 1 | 15,5 | 12,7% | ReUse / Gips, sortenrein |
| | | Holz-Weichfaserplatte, verschraubt | 1 | 3,6 | 3,0% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | **Dämmpaneel:** | | | | |
| | | Mineralwolle, gesteckt | 1 | 8,0 | 6,5% | ReUse / Herstellerrücknahme |
| | | Vakuumisolierpaneel, geklemmt | 1 | 14,1 | 11,5% | ReUse / Herstellerrücknahme |
| | | **Außenhaut:** | | | | |
| | | Metall-UK | 2 | 7,5 | 6,1% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | Metall-Fassade ReUse | 2 | 23,4 | 19,2% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | **Element-Stoß:** | | | | |
| | | Elastomer-Dichtung | 1 | 0,3 | 0,3% | Kunststoffe |
| | | Mineralwolle | 1 | 0,3 | 0,2% | Herstellerrücknahme |
| | | **Gesamt** | | **122,1** | | |

Abb. 218: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Fassade. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

als auch im Post-Use. Auch das Vakuumisolierpaneel hat überraschend gute Kreislaufeigenschaften, obwohl es zur Gänze aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen besteht. Der Stützkern aus pyrogener Kieselsäure hat technisch und aufgrund des hohen Materialpreises eine sehr hohe Aussicht auf Recycling. Die Folien werden gedowncycelt, sodass keinerlei Müll entsteht. Die Elastomer-Dichtung, die die Elementstöße abdeckt, wird als fossiles Material energetisch verwertet und hat damit als einziges Material in der Außenwand von Variante 3 gar kein Kreislaufpotenzial.

Dank dem System-Aufbau besteht neben der Verwertung der einzelnen Materialien auch die Möglichkeit, die Untereinheiten als Ganzes wiederzuverwenden. Dies gilt nur nicht für den Elementstoß, der als einziges nicht zerstörungsfrei ausgebaut werden kann. Die Außenhaut jedoch könnte wiederverwendet werden – vermutlich nur dann, wenn das gesamte Element wiederverwendet wird. Als Bauteil mit der kürzesten Nutzungsdauer ist ihre Wiederverwendungswahrscheinlichkeit gering. Das Dämmpaneel mit dem VIP wird aufgrund seiner Beschädigungsanfälligkeit vermutlich auch nur dann wiederverwendet, wenn der Schutz aufgrund der Fassade erhalten bleibt. Die Innenansicht jedoch muss keine technischen Ansprüche erfüllen. Sofern sie den ästhetischen Ansprüchen noch genügt, ist bei ihr eine Wiederverwendung denkbar. Der technische Kern ist allseits umschlossen und somit am Besten vor Außeneinwirkungen geschützt. Dadurch ist er am alterungsbeständigsten und am ehesten wiederverwendbar. Die Möglichkeit auf Wiederverwendung verbessert den UMI der Außenwand nochmals, aber selbst wenn die Materialien alle einzeln stofflich verwertet werden würden, wäre er sehr gut. Er beträgt 93%.

Das Treibhauspotenzial wird überwiegend durch das Vakuumisolierpaneel bestimmt. Dessen Herstellung ist enorm energieintensiv – besonders die Gewinnung des Siliziumoxids – weshalb die Herstellung und der Austausch (wenn das VIP gewechselt wird) hohe Zahlen aufweisen. Da dieses Material wiederverwertet werden und somit die Energie, neues Siliziumoxid herzustellen eingespart werden kann, werden hohe Vorteile außerhalb der Systemgrenze angerechnet.[317] Im gesamten Lebenszyklus betrachtet, ist das VIP somit nicht sehr klimaschädlich. Das hohe Wiederwendungspotenzial vieler Bauteilschichten wirkt sich auch positiv auf das GWP aus, da bei einer Wiederverwendung der Rückbau bereits als Herstellung des nächsten Bauteils zählt. So wird auch für die Herstellung des ReUse Blechs der Außenhaut die Entsorgungsphase (Modul C) herangezogen.[318] Insgesamt wird so ein negatives Treibhauspotenzial im Lebenszyklus von -5,0 kg $CO_2$-Eq./m² erreicht.

317 Es wird Szenario 1 „Materielles Recycling des Stützkerns" angenommen. Siehe: ÖkobauDat, „Prozess-Datensatz: Vakuumisolationspaneel Vacupor".

318 Zum Datensatz siehe: ÖkobauDat, „Prozess-Datensatz: Stahl-Feinblech (0,3-3,0 mm)".

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 70% | 20% | | 10% | 19% | | 40% | 19% | 13% | 6% | 2% | -13,7 | -13,7 | 28,4 | -4,4 |
| | | 100% | | 0% | 19% | | 48% | 12% | 16% | 4% | 0% | -3,9 | -3,9 | 3,8 | -1,5 |
| | 37% | | | 63% | 19% | 81% | | | | | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | -0,6 |
| | 90% | | | 10% | 19% | 38% | | | | 30% | 13% | -2,2 | -2,2 | 4,1 | -1,1 |
| | | 100% | | 0% | 40% | | 36% | 9% | 12% | 3% | 0% | -10,0 | 0,0 | 6,7 | -2,9 |
| | 35% | | | 65% | 40% | 60% | | | | | 0% | 2,1 | 0,0 | 0,0 | -0,3 |
| | | 89% | | 11% | 40% | | 32% | 12% | 11% | 4% | 2% | -9,9 | 0,0 | 9,3 | -2,4 |
| | 64% | 2% | | 34% | 40% | 60% | | | | | 0% | 1,4 | 1,4 | 0,2 | 0,0 |
| | | 94% | | 6% | 40% | | 30% | 14% | 10% | 5% | 2% | -1,7 | -1,7 | 3,0 | -1,6 |
| | 60% | | | 40% | 6% | 90% | | | | | 4% | 6,2 | 6,2 | 0,2 | 0,0 |
| | | | | 100% | 6% | 84% | | | 10% | | 0% | 67,5 | 67,5 | 1,4 | -122,7 |
| | 37% | | | 63% | 6% | 94% | | | | | 0% | 6,0 | 12,1 | 0,0 | -3,6 |
| 100% | | | | 0% | 6% | 94% | | | | | 0% | 0,1 | 0,2 | 0,1 | -32,8 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 0,3 | 0,3 | 0,3 | -0,2 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 |
| **19%** | **49%** | **23%** | **0%** | **8%** | **20%** | **50%** | **14%** | **6%** | **6%** | **3%** | **2%** | **43,8** | **67,7** | **57,6** | **-174,1** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **93,0%** | **GWP total:** | | | **-5,0** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

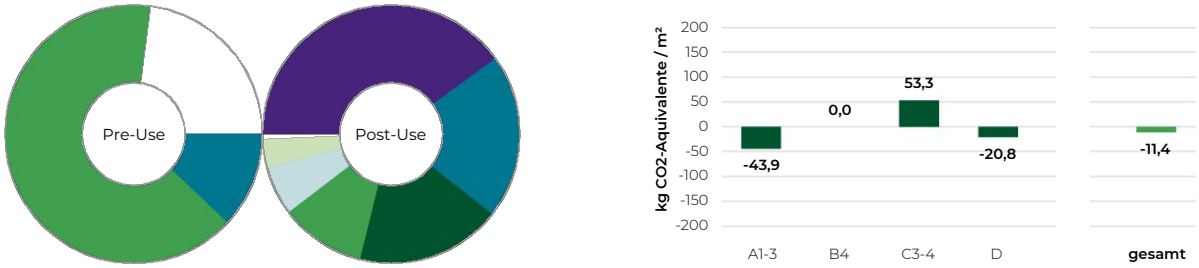



Abb. 219: Stütze Holz Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Stütze Holz

Als robustes Konstruktionsbauteil kann die Holzstütze nicht nur den Betrachtungszeitraum überdauern, sondern hat auch eine vergleichsweise hohe Wahrscheinlichkeit, wiederverwendet zu werden. Schließlich lässt sich die auf Abbrand überdimensionierte Brettsperrholz-Stütze allein durch Schleifen von den meisten üblichen Abnutzungserscheinungen befreien.

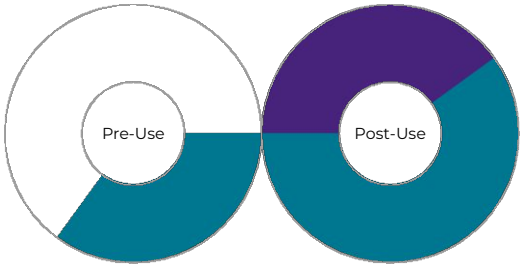
Die Stützen als nicht flächige Elemente werden nicht in Quadratmetern, sondern mit ihrer Stückzahl erfasst. Die Holzstütze wird im Gebäude 66 mal verbaut. Mit dem verleimten Brettsperrholz und dem Stahl-Knoten kann ein sehr gutes Kreislaufpotenzial von 84,5% erreicht werden. Im GWP halten sich die die energieintensive Stahl-Herstellung das Speicherungspotenzial des Holzes in etwa die Waage. Die Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus betragen -11,4 kg $CO_2$-Eq./Stütze.

| **Stütze Holz** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Stückzahl* | *66* | Brettsperrholz | | 52,1 | 65,7% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| *Masseanteil* | *0,2%* | Stahl-Knoten | | 27,2 | 34,3% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **79,3** | | |
| **Stütze Stahl** | | | | | | |
| *Stückzahl* | *114* | Rechteckhohlprofil | | 44,7 | 62,2% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| *Masseanteil* | *0,4%* | Stahl-Knoten | | 27,2 | 37,8% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **71,9** | | |
| **Aussteifung vertikal** | | | | | | |
| *Stückzahl* | *50* | Aussteifung vertikal | | 8,6 | 100,0% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| *Masseanteil* | *0,0%* | **Gesamt** | | **8,6** | | |

Abb. 220: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Stützen Holz und Stahl und Aussteifung. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



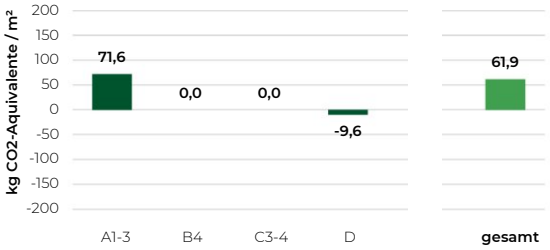




Abb. 221: UMI der Stütze Stahl und Aussteifung von Variante 3 sowie Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Stütze Stahl & Aussteifung

Die Stahl-Stütze wird im Gebäude fast doppelt so oft verwendet wie die Holz-Stütze, nämlich 114-mal. Dennoch ist ihr Anteil an der gesamten Gebäudemasse mit 0,4% nur wenig höher. Die ebenfalls metallische vertikale Stahlseil-Auskreuzung ist im Bezug auf die gesamte Gebäudemasse fast vernachlässigbar. Mit rein metallischen Materialien ist das Kreislaufpotenzial von Stütze und Aussteifung im EoL in jedem Fall 100%. Da für die Formteile nur anteilig Altmetalle verwendet werden, ist der Gesamt-UMI mit 67,5% schlechter als jener der Holz-Stütze.

Mit der energieintensiven Stahl-Produktion ist auch die Klimabilanz trotz Vorteile außerhalb der Systemgrenze deutlich ungünstiger. Pro Stütze beträgt das GWP 61,9 kg $CO_2$-Eq. Für die wesentlich leichtere Aussteifung beträgt das GWP 7,4 kg $CO_2$-Eq. pro Auskreuzung.

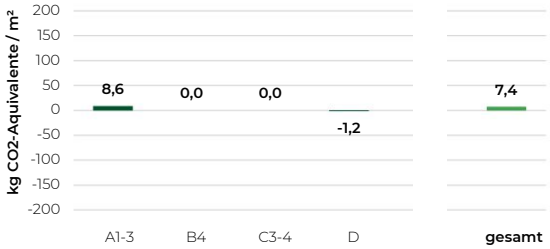
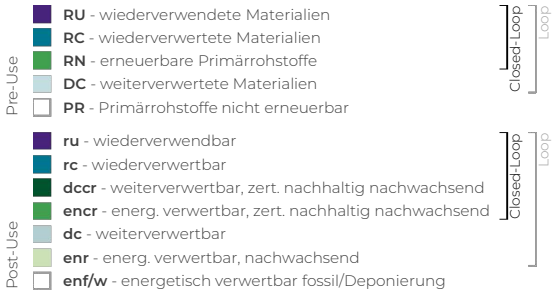



Abb. 222: Aussteifung Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 99% | | 1% | 40% | | 28% | 16% | 9% | 5% | 1% | -71,0 | 0,0 | 53,3 | -17,2 |
| | 35% | | | 65% | 40% | 60% | | | | | 0% | 27,1 | 0,0 | 0,0 | -3,6 |
| **0%** | **12%** | **65%** | **0%** | **23%** | **40%** | **21%** | **18%** | **11%** | **6%** | **4%** | **1%** | **-43,9** | **0,0** | **53,3** | **-20,8** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **86,0%** | **GWP total:** | | | **-11,4** |
| | 35% | | | | 40% | 60% | | | | | 0% | 44,5 | 0,0 | 0,0 | -6,0 |
| | 35% | | | 65% | 40% | 60% | | | | | 0% | 27,1 | 0,0 | 0,0 | -3,6 |
| **0%** | **35%** | **0%** | **0%** | **65%** | **40%** | **60%** | **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **71,6** | **0,0** | **0,0** | **-9,6** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **67,5%** | **GWP total:** | | | **61,9** |
| | 35% | | | 65% | 40% | 60% | | | | | 0% | 8,6 | 0,0 | 0,0 | -1,2 |
| **0%** | **35%** | **0%** | **0%** | **65%** | **40%** | **60%** | **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **0%** | **8,6** | **0,0** | **0,0** | **-1,2** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **67,5%** | **GWP total:** | | | **7,4** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

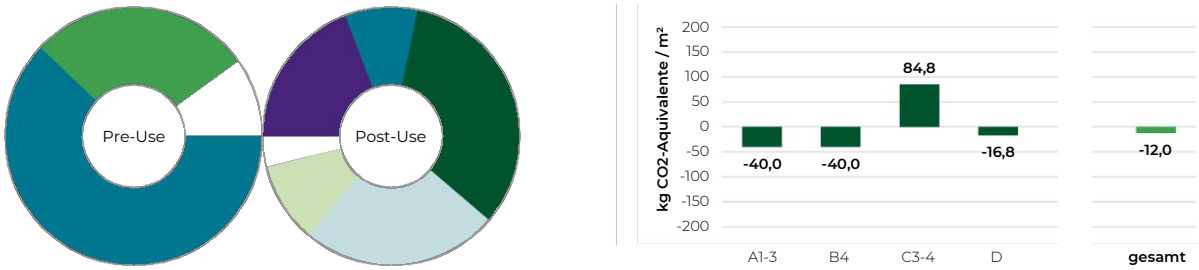



Abb. 223: Trockenbauwand Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Trockenbauwand

Die Trockenbauwand besteht aus zwei identen biegeweichen Vorsatzschalen. Diese entsprechen der Innenansicht der Außenwand, wurden also im vorigen Kapitel bereits kurz diskutiert. Innerhalb des Betrachtungszeitraum muss die gesamte Wand einmal ausgetauscht werden. Als zerstörungsfrei auseinanderbaubares Element im Systembau kann die Trockenbauwand vollständig wiederverwendet werden. Das Wiederverwendungspotenzial wird mit 19% angenommen.

Doch auch die Materialien an sich haben ein sehr günstiges Kreislaufpotenzial. Die beiden Spanplatten machen gemeinsam mehr als 60% der der gesamten Bauteilmasse aus. Für die Herstellung der Späne wird zu 70% Industrierestholz verwendet. Damit sind Spanplatten eines der wenigen Holzbauteile, die schon standardmäßig die kaskadische Verwertung von Holz nutzen. Dass sie bereits aus Altholz bestehen, behindert eine weitere Verwertung im Post-Use nicht. Mit 10% haben sie allerdings auch einen hohen Leimanteil, sie erreichen dennoch ein Downcyclingpotenzial von 66%. Die Holzständer, die aus unbehandeltem Vollholz bestehen, lassen sich noch besser weiterverwerten. Die Metallschienen kann recycelt werden und die Zellulosedämmung wird kompostiert oder energetisch verwertet. Während die Dämmung bereits aus 90% Alt-Material besteht, ist der Rezyklatanteil bei dem Metall mit 37% geringer. Insgesamt beträgt das Kreislaufpotenzial der Trockenbauwand 88,0%.

Das Treibhauspotenzial der Wand ist mit 1-12,0 kg $CO_2$-Eq./m² klimapositiv. Die Holzbaustoffe speichern $CO_2$. Zudem werden durch den hohen Anteil der Wiederverwendung im EoL viele Vorteile, aber auch Belastungen in den nächste Nutzungszyklus übertragen.

| **Trockenbauwand** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.081,1 m²* | Spanplatte, gesteckt, geschraubt | 1 | 21,6 | 32,0% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| *Masseanteil* | *3,3%* | Holzständer | 1 | 5,1 | 7,6% | ReUse / Holz, naturbelassen |
| | | Metall-Schiene | 1 | 0,9 | 1,4% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | Zellulose-Dämmmatten, gesteckt | 1 | 12,2 | 18,1% | ReUse / bio. Fasern, kompostierbar |
| | | Holzständer | 1 | 5,1 | 7,6% | ReUse / Holz, naturbelassen |
| | | Metall-Schiene | 1 | 0,9 | 1,4% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | Spanplatte, gesteckt, geschraubt | 1 | 21,6 | 32,0% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | **Gesamt** | | **67,5** | | |
| **Aufzug** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *157,2 m²* | Brettsperrholz | | 47,5 | 38,4% | Holz, verleimt / beschichtet |
| *Masseanteil* | *0,9%* | Mineralwolle, getackert | | 3,6 | 2,9% | Herstellerrücknahme |
| | | Gipskarton, auf BSH verschraubt | | 8,8 | 7,1% | Gips, sortenrein |
| | | Brettsperrholz | | 38,0 | 30,8% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | Blech-Profile | 1 | 3,7 | 3,0% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Mineralwolle, gesteckt | 1 | 4,5 | 3,6% | Herstellerrücknahme |
| | | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 14,2% | Gips, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **123,6** | | |

Abb. 224: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Trockenbauwand und Aufzug.. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

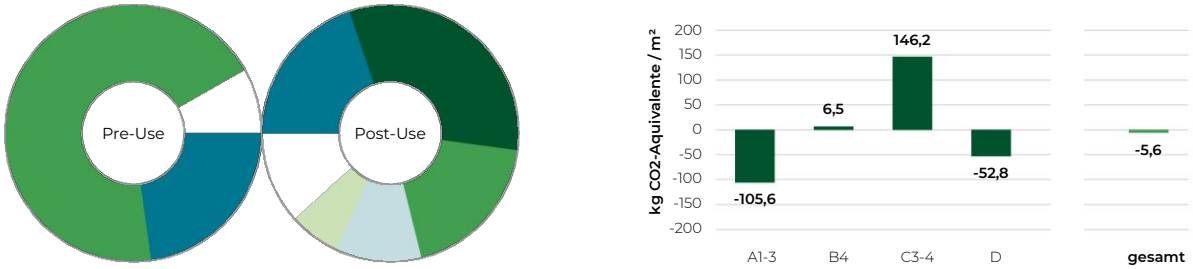


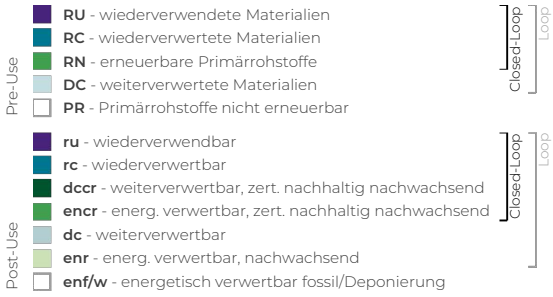

Abb. 225: Konstruktion Aufzug Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Aufzug

Der Aufzug mit seinen zwei recht kreislauffähigen Brettsperrholz-Schichten erreicht auch ohne die Option auf eine Wiederverwendung ein recht hohes Kreislaufpotenzial. Diese Materialien müssen im Betrachtungszeitraum nicht ausgetauscht werden, lediglich die äußere Vorsatzschale erfährt eine Auswechslung.

Das Brettsperrholz macht etwa 70% der Bauteilmasse aus. Als verleimtes Material besteht es nicht zur Gänze aus nachwachsenden Rohstoffen, es erreicht dennoch ein Downcyclingpotenzial von 63%. Mit drei Viertel des Holzes aus zertifiziert nachwachsenden Quellen ist das Kreislaufpotenzial somit sehr hoch. Die Mineralwolle, die nur gesteckt bzw. getackert ist und sortenrein rückgewonnen werden kann, erreicht mit 60% Altmaterial und einer Herstellerrücknahme ähnliche Werte. Die Gipskartonplatten sind als leicht rückbaubare Vorsatzschale ebenfalls recht kreislauffähig. Die innenseitige Brandschutzbeplankung jedoch, die flächig auf das Brettsperrholz geschraubt wird, ist deutlich aufwendiger rückzubauen, sodass ihr Wiederverwertungspotenzial geringer ausfällt. Insgesamt kann dennoch ein Kreislaufpotenzial von 83,5% erreicht werden.

Dank des Brettsperrholzes ist die Treibhausgasbilanz negativ: Sie beträgt -5,6kg $CO_2$-Eq./m².




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 70% | 20% | | 10% | 19% | | 40% | 19% | 13% | 6% | 2% | -13,7 | -13,7 | 28,4 | -4,4 |
| | | 100% | | 0% | 19% | | 48% | 12% | 16% | 4% | 0% | -3,9 | -3,9 | 7,0 | -1,5 |
| | 37% | | | 63% | 19% | 81% | | | | | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | -0,6 |
| | 90% | | | 10% | 19% | 38% | | | | 30% | 13% | -7,3 | -7,3 | 13,9 | -3,8 |
| | | 100% | | 0% | 19% | | 48% | 12% | 16% | 4% | 0% | -3,9 | -3,9 | 7,0 | -1,5 |
| | 37% | | | 63% | 19% | 81% | | | | | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | -0,6 |
| | 70% | 20% | | 10% | 19% | | 40% | 19% | 13% | 6% | 2% | -13,7 | -13,7 | 28,4 | -4,4 |
| **0%** | **62%** | **28%** | 0% | **10%** | **19%** | **9%** | **33%** | **14%** | **11%** | **10%** | **4%** | **-40,0** | **-40,0** | **84,8** | **-16,8** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **88,0%** | **GWP total:** | | | **-12,0** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 99% | | 1% | | | 47% | 27% | 16% | 9% | 1% | -64,7 | 0,0 | 81,0 | -26,1 |
| | 60% | | | 40% | | 0% | | | | | 100% | 3,6 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 49% | | | | | 51% | 0,8 | 0,0 | 0,2 | 0,0 |
| | | 99% | | 1% | | | 47% | 27% | 16% | 9% | 1% | -51,8 | 0,0 | 64,8 | -20,9 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 4,5 | 4,5 | 0,0 | -5,8 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 2,0 | 2,0 | 0,1 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| **0%** | **19%** | **69%** | 0% | **12%** | **0%** | **20%** | **32%** | **19%** | **11%** | **6%** | **12%** | **-105,6** | **6,5** | **146,2** | **-52,8** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **83,5%** | **GWP total:** | | | **-5,6** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

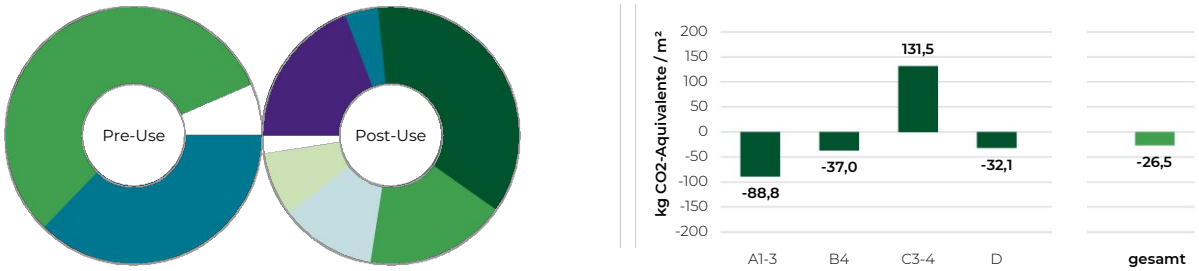



Abb. 226: Wohnungstrennwand Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Wohnungstrennwand

Mit nur einer zusätzlichen Brettsperrholz-Schicht ähnelt die Wohnungstrennwand der Trockenbauwand sehr. Diese muss im Lebenszyklus nicht ausgetauscht werden, stellt aber dennoch 40% der Bauteil-Masse. Da auch die Wohnungstrennwand beschädigungsfrei und sortenrein rückgebaut werden kann, bleiben das Wiederverwendungspotenzial der Gesamtkonstruktion sowie die UMIs der einzelnen Materialien gleich. Das Brettsperrholz besteht abgesehen von der Verleimung aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz. Als verleimtes Altholz, das sich aber leicht zurückbauen lässt, erreicht es ein Weiterverwertungspotenzial von 63%. Insgesamt ist es damit etwas besser als die anderen Materialien, wodurch sich der UMI auf 90,5% erhöht.

Im Gegensatz zu den Spanplatten ist das BSH auch im Lebenszyklus ein $CO_2$-Speicher. Es verbessert das Gesamt-GWP auf -26,5 kg $CO_2$-Eq./m².

| **Wohnungstrennwand** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *338,8 m²* | Spanplatte, gesteckt, geschraubt | 1 | 21,6 | 21,5% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| *Masseanteil* | *1,6%* | Holzständer | 1 | 5,1 | 5,1% | ReUse / Holz, naturbelassen |
| | | Metall-Schiene | 1 | 0,9 | 0,9% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | Zellulose-Dämmmatten, gesteckt | 1 | 3,6 | 3,6% | ReUse / bio. Fasern, kompostierbar |
| | | Brettsperrholz | | 38,0 | 37,8% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | Holzständer | 1 | 5,1 | 5,1% | ReUse / Holz, naturbelassen |
| | | Metall-Schiene | 1 | 0,9 | 0,9% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | Zellulose-Dämmmatten | 1 | 3,6 | 3,6% | ReUse / bio. Fasern, kompostierbar |
| | | Spanplatte, gesteckt, geschraubt | 1 | 21,6 | 21,5% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | **Gesamt** | | **100,5** | | |

| **Wand Erschließung** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *335,5 m²* | Spanplatte, gesteckt, geschraubt | 1 | 21,6 | 22,7% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| *Masseanteil* | *1,5%* | Holzständer | 1 | 5,1 | 5,4% | ReUse / Holz, naturbelassen |
| | | Metall-Schiene | 1 | 0,9 | 1,0% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | Zellulose-Dämmmatten, gesteckt | 1 | 3,6 | 3,8% | ReUse / bio. Fasern, kompostierbar |
| | | Brettsperrholz | | 38,0 | 40,0% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | Blech-Profile | 1 | 3,7 | 3,9% | Stahl, Scherenschrott |
| | | Mineralwolle, gesteckt | | 4,5 | 4,7% | Herstellerrücknahme |
| | | Gipskarton, Vorsatzschale | 1 | 17,5 | 18,4% | Gips, sortenrein |
| | | **Gesamt** | | **95,0** | | |

Abb. 227: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Wohnungstrennwand und Wand Erschließung. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

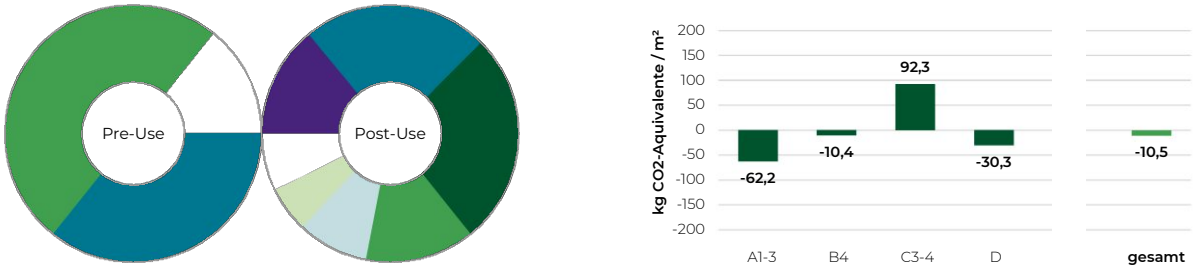


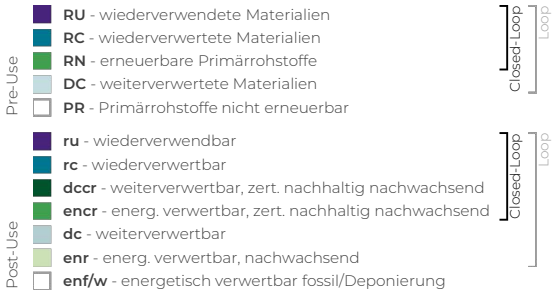

Abb. 228: Wand Erschließung Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Wand Erschließung

Die Wand zur Erschließung weicht wiederum nur geringfügig von der Wohnungstrennwand ab. Es wird lediglich eine Vorsatzschale in konventioneller Bauweise anstatt im Lukas Lang System errichtet. Diese lässt sich nicht so leicht zerstörungsfrei rückbauen und ist damit nicht wiederverwendbar.

Die drei Materialien der Vorsatzschale Stahlblech, Mineralwolle und Gipskarton bestehen bereits zu einem Gutteil aus Rezyklat und können im EoL zu noch höheren Anteilen recycelt werden. Sie sind dennoch ein wenig weniger kreislauffähig als die restliche Konstruktion. Der UMI fällt auf 85,5%.

Als nicht-biologische Materialien schmälern diese neuen Schichten auch die Treibhausgasbilanz ein wenig. Besonders wegen des Stahlblechs steigt das GWP auf immer noch klimapositive -10,5 kg $CO_2$-Eq./m².




| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | 70% | 20% | | 10% | 19% | | 40% | 19% | 13% | 6% | 2% | -13,7 | -13,7 | 28,4 | -4,4 |
| | | 100% | | 0% | 19% | | 48% | 12% | 16% | 4% | 0% | -3,9 | -3,9 | 7,0 | -1,5 |
| | 37% | | | 63% | 19% | 81% | | | | | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | -0,6 |
| | 90% | | | 10% | 19% | 38% | | | | 30% | 13% | -2,2 | -2,2 | 4,1 | -1,1 |
| | | 99% | | 1% | 19% | | 38% | 22% | 13% | 7% | 1% | -51,8 | 0,0 | 52,4 | -16,9 |
| | | 100% | | 0% | 19% | | 48% | 12% | 16% | 4% | 0% | -3,9 | -3,9 | 7,0 | -1,5 |
| | 37% | | | 63% | 19% | 81% | | | | | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | -0,6 |
| | 90% | | | 10% | 19% | 38% | | | | 30% | 13% | -2,2 | -2,2 | 4,1 | -1,1 |
| | 70% | 20% | | 10% | 19% | | 40% | 19% | 13% | 6% | 2% | -13,7 | -13,7 | 28,4 | -4,4 |
| **0%** | **37%** | **56%** | **0%** | **7%** | **19%** | **4%** | **36%** | **18%** | **12%** | **8%** | **2%** | **-88,8** | **-37,0** | **131,5** | **-32,1** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **90,5%** | **GWP total:** | | | **-26,5** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 70% | 20% | | 10% | 19% | | 40% | 19% | 13% | 6% | 2% | -13,7 | -13,7 | 28,4 | -4,4 |
| | | 100% | | 0% | 19% | | 48% | 12% | 16% | 4% | 0% | -3,9 | -3,9 | 7,0 | -1,5 |
| | 37% | | | 63% | 19% | 81% | | | | | 0% | 1,2 | 1,2 | 0,0 | -0,6 |
| | 90% | | | 10% | 19% | 38% | | | | 30% | 13% | -2,2 | -2,2 | 4,1 | -1,1 |
| | | 99% | | 1% | 19% | | 38% | 22% | 13% | 7% | 1% | -51,8 | 0,0 | 52,4 | -16,9 |
| | 37% | | | 63% | | 100% | | | | | 0% | 4,5 | 4,5 | 0,0 | -5,8 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 2,0 | 2,0 | 0,1 | 0,0 |
| | 64% | 2% | | 34% | | 69% | | | | | 31% | 1,6 | 1,6 | 0,3 | 0,0 |
| **0%** | **36%** | **50%** | **0%** | **14%** | **14%** | **23%** | **27%** | **14%** | **9%** | **6%** | **7%** | **-62,2** | **-10,4** | **92,3** | **-30,3** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **85,5%** | **GWP total:** | | | **-10,5** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

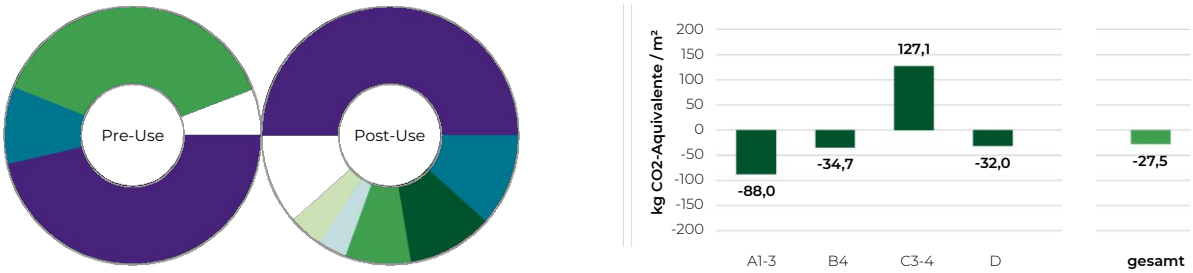



Abb. 229: Geschossdecke Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Geschossdecke

Wie die Außenwand besteht auch die Geschossdecke aus mehreren Untereinheiten, die sich zerstörungsfrei auseinander bauen und wiederverwenden lassen. Dadurch und dank besonders kreislauffähiger Materialien wird ein sehr guter UMI erreicht.

Die Konstruktion aus Brettsperrholz-Trägern, -Einhängungen und Stahl-Verbindungsmitteln überdauert den gesamten Betrachtungszeitraum. Die Hölzer und das Metall sind per se schon sehr kreislauffähige Materialien, aber als allseitig geschützte modulare Konstruktion hat diese Untereinheit als Ganzes auch eine relativ hohe Wiederverwendungswahrscheinlichkeit von 40%. Die Abhängung aus einer Gipsfaserplatte und Zellulose-Dämmung wird in Teilen aufgrund von Elektro-Bohrungen – zum Beispiel für Beleuchtung – für eine Wiederverwendung ausgeschlossen. Während die Zellulose-Dämmung als biotischer Sekundär-Baustoff kompostierbar oder energetisch verwertbar ist, kann die Gipsfaserplatte als Verbundbaustoff nur deponiert werden.

Auch der Bodenaufbau kann in Teilen wiederverwertet werden. Das Klickparkett, das die wohl größte Beanspruchung in der Nutzung erfährt, sowie die Mineralwolle können nicht wiederverwendet werden. Anders verhält es sich mit den Doppelbodenplatten und ihrer Schallentkoppelung. Die modular aufgebauten Doppelbodenplatten werden bereits als ReUse Produkt eingebaut. Neben einer Wiederverwendung im Lukas Lang System können sie auch an die herstellende Firma zurückgegeben und wiederaufbereitet werden – sie erreichen ein ReUse Potenzial von 80%. Da sie fast die Hälfte der Bauteil-Masse im Lebenszyklus stellen, wird dadurch der Gesamt-UMI sehr positiv beeinflusst. Er beträgt für die Geschossdecke 89,5%.

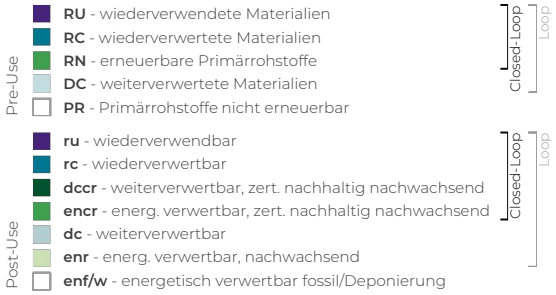
Für die ReUse Doppelbodenplatten liegt noch keine passende EPD vor, da Gebrauchtprodukte aktuell noch außerhalb der Logik von EPDs liegen. In Absprache mit der herstellenden Firma wurden stattdessen die Module C1-3, die Rückbau, Transport und Aufbereitung im EoL beschreiben, als Module A1-3, also die Herstellung angenommen. Unter der Annahme, dass die Module C1-3 der aktuellen Ver-

| **Geschossdecke** | | **Bauteilschicht** | **Austausch-häufigkeit (in 100 a)** | **Masse im Lebenszyklus [kg/m²]** | **Masse-Anteil** | **Abfallfraktion** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *1.372,2 m²* | **Bodenaufbau:** | | | | |
| *Masseanteil* | *13,6%* | Belag Klickparkett | 3 | 19,0 | 8,8% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | Doppelbodenplatten incl. Stützen | 1 | 100,0 | 46,4% | ReUse / Herstellerrücknahme |
| | | Elastomerauflager | 1 | 0,1 | 0,0% | ReUse / Kunststoffe |
| | | Mineralwolle, lose verlegt | 1 | 4,8 | 2,2% | Herstellerrücknahme |
| | | **Konstruktion:** | | | | |
| | | Trägerrost Fichte natur | | 34,2 | 15,9% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | BSP-Einhängungen | | 27,7 | 12,9% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | Stahl-Verbindungen | | 3,9 | 1,8% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | **Abhängung:** | | | | |
| | | Zellulose-Dämmmatten | 1 | 9,6 | 4,5% | ReUse / bio. Fasern, kompostierbar |
| | | Gipsfaserplatte | 1 | 16,4 | 7,6% | ReUse / Bauschutt |
| | | **Gesamt** | | **215,7** | | |

Abb. 230: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Geschossdecke. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




wendung bereits wieder Teil der nächsten Nutzung sind, wird ab da kein GWP für das Produkt mehr angerechnet.[319] Das Treibhauspotenzial fällt für das Produkt somit sehr gering aus. Dank der vielen verbauten Holzwerkstoffe kann ein geringes Gesamt-GWP von -27,5 kg $CO_2$-Eq./m² erreicht werden.

319 Als Grundlage wurde die EPD für Nicht-ReUse Doppelböden verwendet. Zur Berechnung des Kreislaufpotenzials für ReUse Produkte siehe: Institut für Bauen und Umwelt e.V., „Anhang ReUse: Rechenregeln für ReUseProdukte"; Institut für Bauen und Umwelt e.V. und Lindner, „EPD Doppelbodensystem Typ Nortec".

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 94% | | 6% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| 100% | | | | 0% | 80% | 14% | | | | | 6% | 0,3 | 0,3 | 2,4 | -0,5 |
| | | | | 100% | 9% | | | | | | 91% | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 0,4 | 0,4 | 1,7 | -0,5 |
| | | 99% | | 1% | 40% | | 21% | 22% | 7% | 7% | 2% | -46,6 | 0,0 | 35,0 | -11,3 |
| | | 99% | | 1% | 40% | | 21% | 22% | 7% | 7% | 2% | -37,8 | 0,0 | 28,4 | -9,2 |
| | 35% | | | | 40% | 60% | | | | | | 10,4 | 0,0 | 0,0 | -3,7 |
| | 90% | | | 10% | 6% | 44% | | | | 35% | 15% | -5,8 | -5,8 | 12,6 | -3,5 |
| | 49% | 18% | | 33% | 6% | | | | | | 94% | 1,4 | 1,4 | 0,1 | 0,0 |
| **46%** | **10%** | **38%** | **0%** | **6%** | **50%** | **12%** | **11%** | **8%** | **4%** | **4%** | **12%** | **-88,0** | **-34,7** | **127,1** | **-32,0** |
| | | | | **UMI total:** | | | | | | | **89,5%** | **GWP total:** | | | **-27,5** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

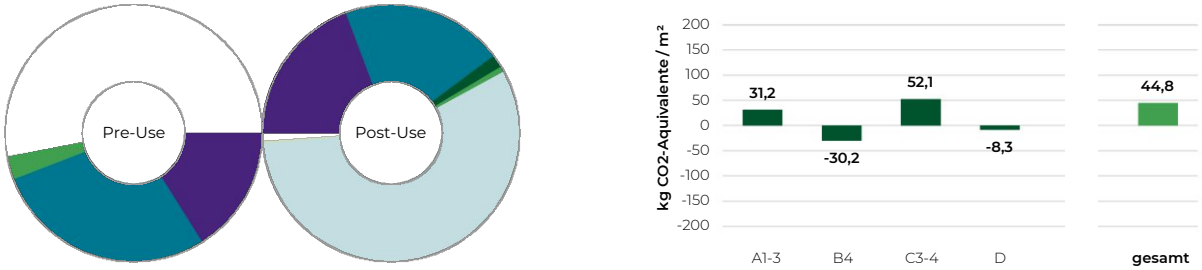



Abb. 231: Decke Erschließung Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Decke Erschließung

Die Decke im Erschließungskern hat denselben Bodenaufbau wie die Geschossdecke – samt dessen Kreislaufpotenzial. Die Konstruktion aus einem Stahlbeton-Fertigteil hingegen ist weniger kreislauffähig und verschlechtert somit die Gesamtperformance des Bauteils.

Als robustes Element muss die Konstruktion selbstverständlich im Lebenszyklus nicht ausgetauscht werden. Da sie in der Dimensionierung an den Systembau angepasst ist und mit Stahlverbindungen genauso gut zerstörungsfrei ausbaubar ist wie die Geschossdecke, könnte auch sie trotz hohem Gewicht mit etwas Wahrscheinlichkeit in einem anderen Gebäude wiederverwendet werden. Alternativ können der Beton mit Recyclingzuschlägen und die Bewehrung aus Altmetall wieder- bzw. Teile des Betons weiterverwertet werden. Der Gesamt-UMI der Erschließungs-Decke ist mit 58,5% deutlich geringer als jener der Geschossdecke.

Da Stahlbeton trotz CEM-II/C Zement wesentlich energieintensiver in der Herstellung als die Brettsperrholzkonstruktion ist, verschlechtert sich das GWP auf 44,8 kg $CO_2$-Eq./m².

| **Decke Erschließung** | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *79,8 m²* | **Bodenaufbau:** | | | | |
| *Masseanteil* | *2,3%* | Belag | 3 | 19,0 | 3,1% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | Doppelbodenplatten incl. Stützen | 1 | 100,0 | 16,1% | ReUse / Herstellerrücknahme |
| | | Elastomerauflager | 1 | 0,1 | 0,0% | ReUse / Kunststoffe |
| | | Mineralwolle, lose verlegt | 1 | 4,8 | 0,8% | Herstellerrücknahme |
| | | **Konstruktion:** | | | | |
| | | Beton-Fertigteil | | 480,0 | 77,2% | ReUse / Beton, sortenrein, bewehrt |
| | | Stahl-Armierung | | 18,0 | 2,9% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **621,9** | | |
| **Decke zu Keller** | | | | | | |
| *Bauteilfläche* | *396,0 m²* | **Bodenaufbau:** | | | | |
| *Masseanteil* | *14,3%* | Belag Klickparkett | 3 | 19,0 | 2,4% | Holz, verleimt / beschichtet |
| | | Doppelbodenplatten incl. Stützen | 1 | 100,0 | 12,7% | ReUse / Herstellerrücknahme |
| | | Elastomerauflager | 1 | 0,1 | 0,0% | ReUse / Kunststoffe |
| | | Mineralwolle, lose verlegt | 1 | 6,4 | 0,8% | Herstellerrücknahme |
| | | **Dämmung:** | | | | |
| | | Gipsfaserplatte zur Lastverteilung | 1 | 27,0 | 3,4% | Bauschutt, stark verschmutzt |
| | | MIneralwolle | 1 | 16,0 | 2,0% | Herstellerrücknahme |
| | | **Konstruktion:** | | | | |
| | | Beton | | 600,0 | 76,1% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| | | Stahl-Armierung | | 20,0 | 2,5% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | | **788,5** | | |

Abb. 232: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Decke Erschließung und Decke zu Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

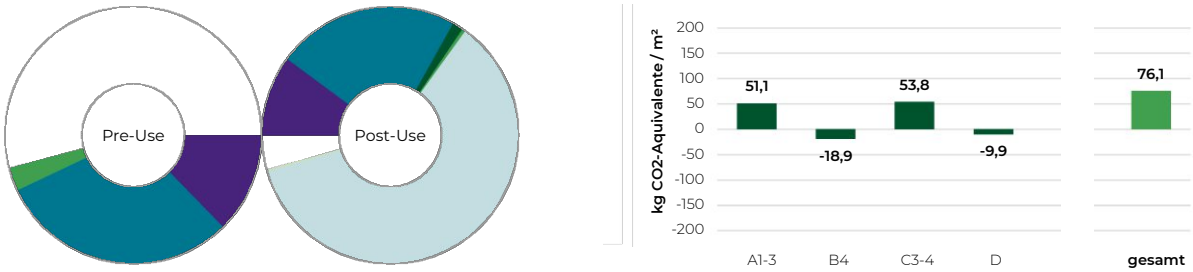



Abb. 233: Decke zu Keller Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Decke zu Keller

Auch die Decke über dem Keller verfügt über den selben Bodenaufbau und wird von Stahlbeton getragen. Da es sich dabei nicht um ein Fertigteil handelt und somit kein zerstörungsfreier Ausbau möglich ist, ist eine Wiederverwendung ausgeschlossen. Auch die Dämmung, die bei der Decke zum Keller hinzukommt, wird als KMF nicht transloziert werden.

Trotz Recycling-Zuschlägen und einer sortenreinen Rückgewinnung hat der Beton, der mehr als drei Viertel der Bauteilmasse ausmacht, im Vergleich zu den anderen Schichten das drittschlechteste Kreislaufpotenzial. Noch ungünstiger schneidet neben den vernachlässigbaren Elastomerauflagern nur die Gipsfaserplatte ab, die zwar mit Recycling-Gipsen und Zellulose hergestellt wird, aber im Post-Use nur deponiert werden kann. So ist das Gesamt-UMI der Decke über dem Keller mit 55,5% noch ein etwas schlechter als das der Erschließungs-Decke.

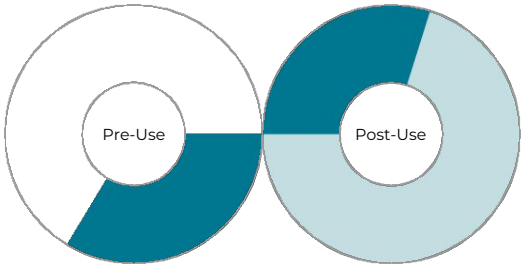
Die Stahlbetondecke ist dicker als die Fertigteile in der Erschließung, hat deshalb mit mehr Beton und Stahl auch ein größeres GWP. Auch die Mineralwolle-Dämmung trägt zur schlechteren Klimabilanz bei. So ergibt sich ein Treibhauspotenzial von 76,1 kg $CO_2$-Eq./m².

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | 94% | | 6% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| 100% | | | | 0% | 80% | 14% | | | | | 6% | 0,3 | 0,3 | 2,4 | -0,5 |
| | | | | 100% | 9% | | | | | | 91% | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 0,4 | 0,4 | 1,7 | -0,5 |
| | 32% | | | 68% | 8% | 19% | | | 73% | | 0% | 28,5 | 0,0 | 1,1 | -3,9 |
| | 100% | | | 0% | 8% | 92% | | | | | 0% | 12,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **16%** | **28%** | **3%** | **0%** | **53%** | **19%** | **21%** | **2%** | **1%** | **57%** | **0%** | **1%** | **31,2** | **-30,2** | **52,1** | **-8,3** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **58,5%** | **GWP total:** | | | **44,8** |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 94% | | 6% | | | 53% | 21% | 18% | 7% | 2% | -10,4 | -31,1 | 46,9 | -3,3 |
| 100% | | | | 0% | 80% | 14% | | | | | 6% | 0,3 | 0,3 | 2,4 | -0,5 |
| | | | | 100% | 9% | | | | | | 91% | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 0,5 | 0,5 | 2,3 | -0,7 |
| | 49% | 18% | | 33% | | | | | | | 100% | 3,2 | 3,2 | 0,3 | 0,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 8,1 | 8,1 | 0,4 | 0,0 |
| | 32% | | | 68% | | 21% | | | 79% | | 0% | 35,6 | 0,0 | 1,5 | -5,4 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 13,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **13%** | **30%** | **3%** | **0%** | **54%** | **10%** | **23%** | **1%** | **1%** | **61%** | **0%** | **4%** | **51,1** | **-18,9** | **53,8** | **-9,9** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **55,5%** | **GWP total:** | | | **76,1** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



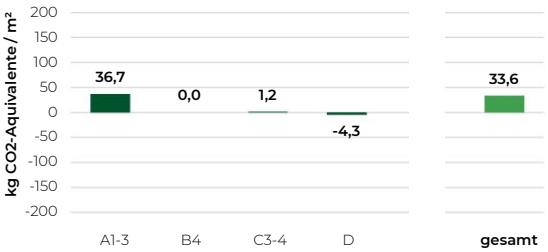
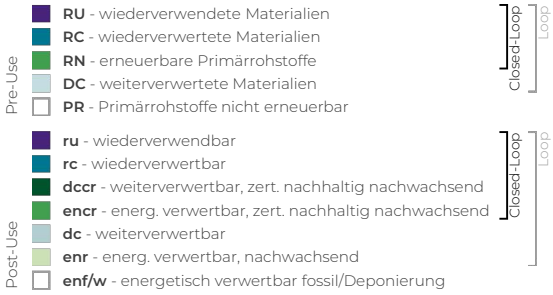




Abb. 234: Wand Keller Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Wand Keller

Die Kellerwand ist gleich aufgebaut wie die Kellerwand in Variante 2. Als reine Stahlbetonwand verwendet sie wie alle Betone in der Variante 3 Alt-Metall, Recycling-Zuschläge und CEM-II/C Zement. Als somit nach Kreislaufkriterien bestmögliche Beton-Bauweise ist sie mit einem UMI von 49,5% fast zur Hälfte kreislauffähig. Das Treibhauspotenzial beträgt 33,6 kg $CO_2$-Eq./m².




| Dach | | Bauteilschicht | Austausch-häufigkeit (in 100 a) | Masse im Lebenszyklus [kg/m²] | Masse-Anteil | Abfallfraktion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *352,4 m²* | **Dämmung:** | | | | |
| *Masseanteil* | *4,1%* | Schüttung Kies | | 108,0 | 42,6% | Splitt, sortenrein |
| | | Abdichtung EPDM, lose verlegt | 1 | 4,0 | 1,6% | Kunststoffe |
| | | Mineralwolle | 1 | 29,7 | 11,7% | Herstellerrücknahme |
| | | Mineralwolle-Gefälledämmung | 1 | 9,0 | 3,5% | Herstellerrücknahme |
| | | Bitumenbahn, lose verlegt | 1 | 11,0 | 4,3% | Bitumengemisch |
| | | **Konstruktion:** | | | | |
| | | Trägerrost Fichte natur | | 34,2 | 13,5% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | BSP-Einhängungen | | 27,7 | 10,9% | ReUse / Holz, verleimt/beschichtet |
| | | Stahl-Verbindungen | | 3,9 | 1,5% | ReUse / Stahl, Scherenschrott |
| | | **Abhängung:** | | | | |
| | | Zellulose-Dämmmatten | 1 | 9,6 | 3,8% | ReUse / bio. Fasern, kompostierbar |
| | | Gipsfaserplatte | 1 | 16,4 | 6,5% | ReUse / Bauschutt |
| | | **Gesamt** | | **253,6** | | |

| Innenwand Keller | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Bauteilfläche* | *214,6 m²* | Beton | 480,0 | 97,6% | Beton, sortenrein, bewehrt |
| *Masseanteil* | *4,8%* | Stahl-Armierung | 12,0 | 2,4% | Stahl, Scherenschrott |
| | | **Gesamt** | **492,0** | | |

Abb. 235: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Dach und Innenwand Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

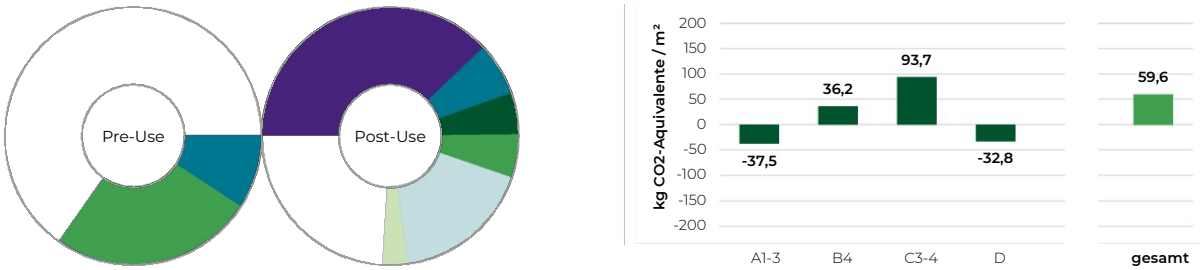



Abb. 236: Dach Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

## Dach

Das Dach gleicht in der Konstruktion und Untersicht der Geschossdecke. Das sehr gute Kreislaufpotenzial der Konstruktion, das sich aus der Kreislauffähigkeit der einzelnen Komponenten und dem Wiederverwendungspotenzial des gesamten Elements zusammensetzt, ist aufgrund der Leichtigkeit des Aufbaus nicht allein entscheidend. Die Konstruktion macht nur etwa ein Viertel der Masse im Lebenszyklus aus, während auf den Dach-Aufbau fast zwei Drittel des Gewichts entfallen. Dieser schneidet etwas schlechter ab: Die Mineralwolle aus 60% Alt-Mineralien und mit Herstellerrücknahme ist sehr kreislauffähig, aber die Kunststoffabdichtung gar nicht und die bituminöse Dampfsperre nur sehr eingeschränkt. Mit einer losen Verlegung des Bitumens auf der Konstruktion wird zumindest deren Wiederverwendung nicht eingeschränkt. Die Schüttung kann zwar in großen Teilen wiederverwendet werden, ist aber wie die beiden Abdichtungen ein nicht erneuerbarer Primärrohstoff. Mit insgesamt 50,0% ist das Kreislaufpotenzial des Dachs per se nicht schlecht, im Vergleich zur Geschossdecke aber fast halbiert.

Weil die emissionsintensivsten Materialien, die Abdichtung und die Mineralwolle im Lebenszyklus ausgetauscht werden und deshalb mehrfach zu Buche schlagen, ist deren Treibhauspotenzial recht hoch. Die im Lebenszyklus klimapositive Konstruktion kann diese Baustoffe nur bedingt ausgleichen. Das Gesamt-GWP beträgt 59,6 kg $CO_2$-Eq./m².

| Pre-Use | | | | | Post-Use | | | | | | | GWP [kgCO2Eq./m²] in 100 a | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RU | RC | RN | DC | PR | ru | rc | dccr | encr | dc | enr | enf/w | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
| | | | | 100% | 63% | | | | 37% | | 0% | 0,3 | 0,0 | 1,5 | -0,4 |
| | | | | 100% | | | | | | | 100% | 8,4 | 8,4 | 13,6 | -4,8 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 23,2 | 23,2 | 1,3 | 0,0 |
| | 60% | | | 40% | | 96% | | | | | 4% | 7,0 | 7,0 | 0,4 | 0,0 |
| | | | | 100% | | 16% | | | | | 84% | 2,0 | 2,0 | 0,8 | 0,0 |
| | | 100% | | 0% | 40% | | 22% | 23% | 7% | 8% | 1% | -46,6 | 0,0 | 35,0 | -11,3 |
| | | 99% | | 1% | 40% | | 21% | 22% | 7% | 7% | 2% | -37,8 | 0,0 | 28,4 | -9,2 |
| | 35% | | | | 40% | 60% | | | | | | 10,4 | 0,0 | 0,0 | -3,7 |
| | 90% | | | 10% | 6% | 44% | | | | 35% | 15% | -5,8 | -5,8 | 12,6 | -3,5 |
| | 49% | 18% | | 33% | 6% | | | | | | 94% | 1,4 | 1,4 | 0,1 | 0,0 |
| **0%** | **9%** | **25%** | **0%** | **65%** | **38%** | **7%** | **5%** | **5%** | **18%** | **3%** | **24%** | **-37,5** | **36,2** | **93,7** | **-32,8** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **50,0%** | **GWP total:** | | | **59,6** |
| | 32% | | | 68% | | 28% | | | 72% | | 0% | 28,5 | 0,0 | 1,2 | -4,3 |
| | 100% | | | 0% | | 100% | | | | | 0% | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **0%** | **34%** | **0%** | **0%** | **66%** | **0%** | **30%** | **0%** | **0%** | **70%** | **0%** | **0%** | **36,7** | **0,0** | **1,2** | **-4,3** |
| | | | | | **UMI total:** | | | | | | **49,5%** | **GWP total:** | | | **33,6** |



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Auswertung

Im Gegensatz zur Bauteilwiederverwendung ist der Systembau bereits etabliert – aufgrund der Vorteile der Vorfertigung und der verkürzten Bauzeit. Am zirkulärsten unter den Systembauweisen erweist sich eine reversibel gefügte Skelettkonstruktion mit funktionaler Schichtentrennung und nichttragenden raumbildenden Elementen. Holz (in Kombination mit Stahl) ist dank seines geringeren Gewichts und seiner leichten Bearbeitbarkeit als Baustoff besser geeignet als Beton. Die Systembauweise wird dann am effizientesten genutzt, wenn möglichst alle Bauteile in ihrer Logik errichtet werden.

Allerdings weist die modulare Bauweise gewisse Einschränkungen auf. Während der beim Holzbau kritische Brandschutz durch Kapselung und die Verwendung nichtbrennbarer Materialien innerhalb des Bausystems erfüllt werden kann, steht die Realisierung einer durchgehenden Gebäudeabdichtung im Widerspruch zum Prinzip des trockenen Fügens fertiger Elemente vor Ort. Der Anschluss der Fassadenelemente und insbesondere der Dachaufbau müssen bauseits ausgeführt werden. Vor allem jedoch kann der Keller nicht in der Systembauweise realisiert werden – hier ist nur eine Ausführung in Ortbetonbauweise möglich. Im Vergleich zur äußerst leichten Bauweise des aufgelösten Holz-Systembaus macht dieser Keller mit mehr als 50 % der Gesamtmasse des Gebäudes einen erheblichen Anteil aus.

Die Bauteilwiederverwendung beschränkt sich derzeit auf wenige Produktgruppen und Sonderlösungen. Im Einbau konnten somit nur zwei ReUse Produkte verbaut werden – die jedoch immerhin 10% des Kreislaufpotenzials im Einbau ausmachen. Wie hoch die Wiederverwendung im EoL ausfällt, ist schwer zu kalkulieren. Besonders bei der Wiederverwendung von konstruktiven Bauteilen besteht die Gefahr einer rechtlichen oder technischen Obsoleszenz. Zur Wiederverwendung geeignet (in Abb. 241 gestrichelt dargestellt) sind 34% des Gebäudes – das sind fast alle Bauteile abgesehen vom Keller. Eine vorsichtige Prognose nimmt 13% tatsächliche Wiederverwendung an. Da die Hauptbestandteile des Systembaus, Stahl und Holz, auch als Baustoffe sehr zirkulär sind und da eine reversible Verbindung nicht nur für eine Wiederverwendung, sondern auch für eine sortenreine Rückgewinnung der Baustoffe vorteilhaft ist, fällt der UMI mit 55% trotz des großen Masse-Anteils des Kellers gut aus.

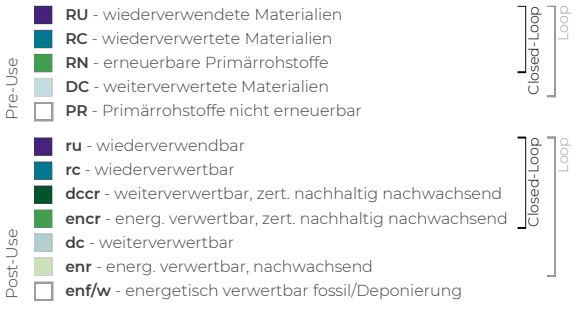
Dank der vielen verbauten nachwachsenden Rohstoffe – Hölzer und andere biologische Faserstoffe ergeben zusammen 18% der Gebäudemasse - ist das Treibhauspotenzial in der Errichtung mit -54,4 t $CO_2$-Eq. negativ. Auch in der Lebenszyklusbetrachtung fällt das GWP mit 91,9 t $CO_2$-Eq. gut aus. Beton, Stahl und Verbundbaustoffe, wie das Vakuumisolierpaneel, verursachen hohe Emissionen in der Herstellung. Gleichzeitig können bei einer Wiederverwendung die möglichen Emissionen der Entsorgungsphase bereits dem nächsten Nutzungszyklus zugeschrieben werden.

Wie groß das Kreislaufpotenzial der Systembauweise tatsächlich ist, zeigt eine Betrachtung, wo der Ortbeton-Keller (nicht aber die ebenfalls betonierte Erdgeschoss-Decke) ausgeklammert ist. Die $CO_2$-Bilanz ist dann mit -9,0 t $CO_2$-Eq. auch im Lebenszyklus negativ. Vor allem aber verbessert sich das Kreislaufpotenzial deutlich – auf 75%. In der Entsorgungsphase ist die Wiederverwendung der größte Verwertungsweg und mehr als zwei Drittel des Gebäudes wären zur Wiederverwendung geeignet.

Insgesamt ist der reversible Systembau ein sehr vielversprechender Ansatz in Richtung Kreislaufbauwirtschaft. Durch die überwiegend reversiblen

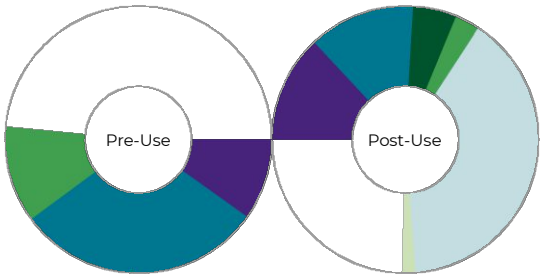
| Masseanteil: | |
|---|---|
| Keller | 50,8% |
| Außenwand | 7,1% |
| Stützen | 0,6% |
| Innenwände | 7,3% |
| Decken Holz | 13,6% |
| Decken Beton | 16,6% |
| Dach | 4,1% |

Abb. 237: Variante 3: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude. Eigene Darstellung.



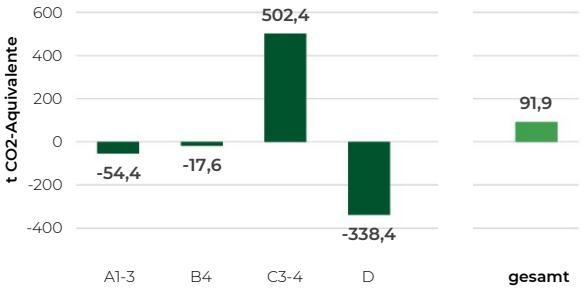



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| | | | |
|---|---|---|---|
| Wiederverwendung | 10% | Wiederverwendung | 13% |
| Wiederverwertung | 30% | Wiederverwertung | 13% |
| Erneuerbare Rohstoffe | 12% | Weiterverwertung z.N. | 5% |
| Weiterverwertung | 0% | Energetische Verwertung z.N. | 3% |
| nicht kreislauffähig | 48% | Weiterverwertung | 40% |
| | | Energetische Verwertung | 2% |
| | | nicht kreislauffähig | 25% |
| Pre-Use | 52% | Post-Use | 55% |
| **UMI gesamt** | **53%** | | |

Abb. 238: Variante 3: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.




GWP [tCO2Eq.]

| | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
|---|---|---|---|---|
| | -54,4 | -17,6 | 502,4 | -338,4 |
| **GWP total** | | | | **91,9** |

Abb. 239: Variante 3: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses.. Eigene Darstellung.

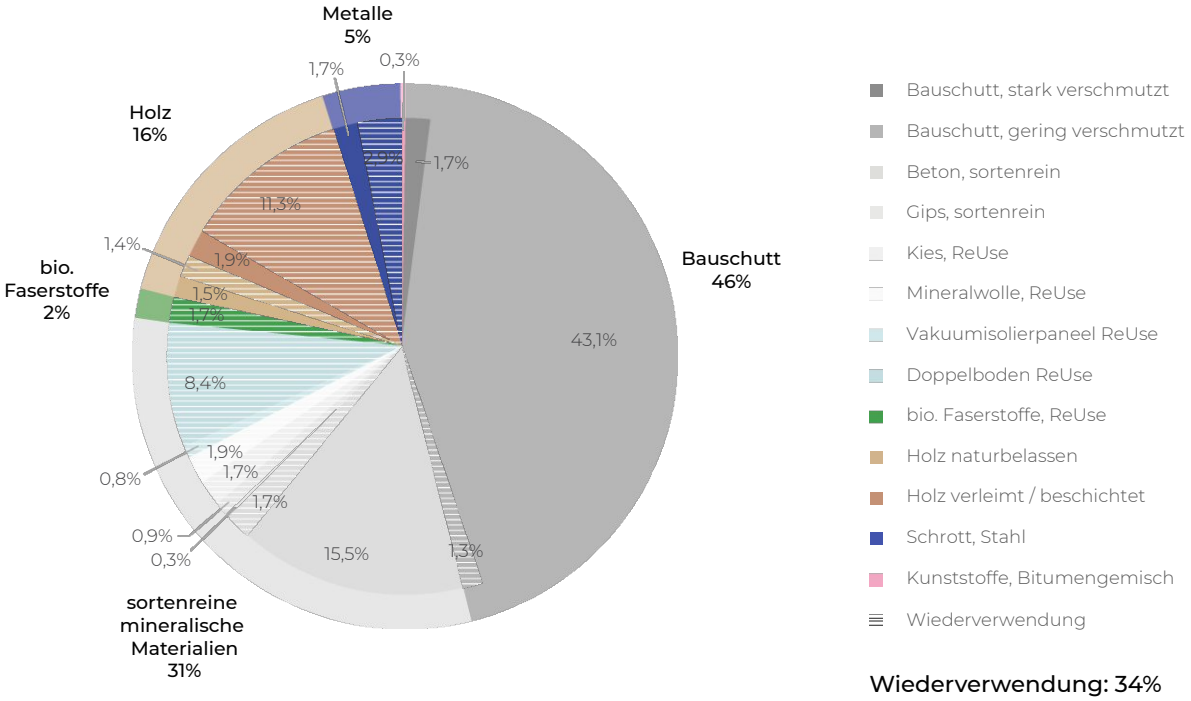



Abb. 240: Variante 3: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet.. Eigene Darstellung.

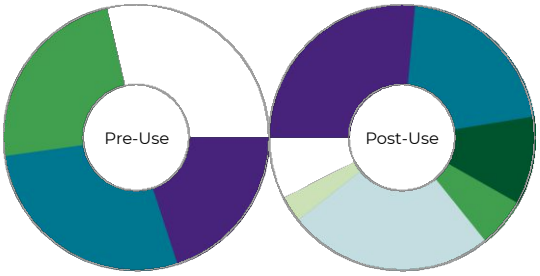


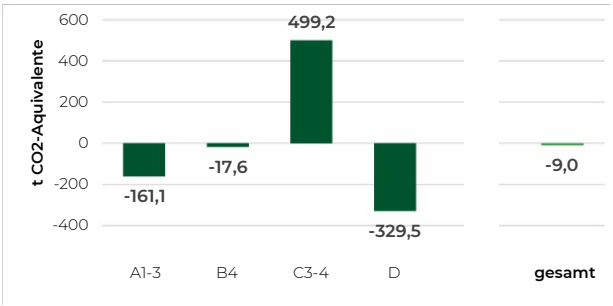
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Verbindungen von Konstruktion und Ausbau ergeben sich nicht nur im Rückbau, sondern bereits bei Nutzungsänderungen und Austäuschen Vorteile. Gleichzeitig entstehen dadurch teils komplexe Aufbauten und eine effiziente Umsetzung ist nur dann möglich, wenn keine äußeren Zwänge eine Abweichung vom System erfordern. Dem sehr hohen Maß an Vorfertigung und einer kurzen Bauzeit steht die geringe thermische Masse dieser Bauweise gegenüber – trotz Versicherung des Herstellers ist die Gebäudeperformance bezüglich sommerlicher Überhitzung und Schallschutz kritische zu hinterfragen. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass dank der Metall-Verbindungen eine Kombination oder der Austausch verschiedener Materialien möglich ist. Die Kombination mit Holz wirkt sich positiv auf die Zirkularität und die $CO_2$-Bilanz aus, beschränkt jedoch die Anwendbarkeit dieser Bauweise aufgrund strengerer Brandschutzvorschriften außerhalb von Vorarlberg auf Gebäude mit maximal vier Geschossen. In der Bauteilwiederverwendung liegt noch erhebliches Potenzial für die Kreislaufwirtschaft. Wenn in Zukunft mehr ReUse Bauteile verfügbar sind, kann der Anteil an Wiederverwendung bereits in der Errichtungsphase weiter steigen.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.




| | | | |
|---|---|---|---|
| Wiederverwendung | 20% | Wiederverwendung | 26% |
| Wiederverwertung | 28% | Wiederverwertung | 21% |
| Erneuerbare Rohstoffe | 24% | Weiterverwertung z.N. | 11% |
| Weiterverwertung | 0% | Energetische Verwertung z.N. | 6% |
| nicht kreislauffähig | 29% | Weiterverwertung | 25% |
| | | Energetische Verwertung | 3% |
| | | nicht kreislauffähig | 8% |
| Pre-Use | 71% | Post-Use | 78% |
| **UMI gesamt** | **75%** | | |

GWP [tCO2Eq.]

| | A1-3 | B4 | C3-4 | D |
|---|---|---|---|---|
| | -161,1 | -17,6 | 499,2 | -329,5 |
| **GWP total** | | | | **-9,0** |

Abb. 241: Variante 3: Kreislaufpotenzial und Treibhausgaspotenzial, wenn der Keller aus der Betrachtung ausgeklammert wird.. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Kreislaufgerecht Bauen jetzt.

Im folgenden Kapitel werden die bisher gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und die verschiedenen Ansätze zur Steigerung der Zirkularität in der Baubranche miteinander verglichen. So wird die eingehend gestellte Forschungsfrage Wie kann heute schon kreislauffähig gebaut werden? beantwortet.

### Der Status Quo – die konventionellen Bauweisen

Zu Beginn dieser Arbeit wurde dargelegt, wie sehr das lineare Wirtschaften die globalen Ressourcen ausbeutet. Der enorme Rohstoffverbrauch, die Verknappung von Materialressourcen und das große Abfallaufkommen sind dramatische Symptome dafür, dass die aktuelle Wegwerfgesellschaft die Regenerationskapazität der Erde deutlich überschreitet. Das Bauwesen als ressourcen- und abfallintensivste Branche trägt entscheidend dazu bei. Um zu untersuchen, wie unnachhaltig die aktuell übliche Baupraxis ist, wurden in dieser Arbeit zuerst zwei konventionelle Bauweisen auf ihre Zirkularität untersucht.

Die konventionelle Massivbauweise am Beispiel des Bestandshauses A besteht aus den etablierten mineralischen Materialien Beton, Ziegel und Gips, erdölbasierten Dämmstoffen und Metall. Standardmäßig werden nahezu keine zirkulären Materialien verbaut. Aufgrund der Verklebungen, Folien und Putze endet der Großteil des Gebäudes als verschmutzter Bauschutt. Mit sehr geringer Zirkularität und hohen Treibhausgasemissionen ist die konventionelle Massivbauweise ein Musterbeispiel für lineares Wirtschaften.

Die ebenfalls konventionelle Holz-Beton-Hybridbauweise des Bestandshauses B erreicht lediglich ein geringfügig höheres Kreislaufpotenzial, jedoch ein deutlich verbessertes GWP. Ein großer Teil des Gebäudes besteht aus mineralischen Baustoffgemischen: Insbesondere der Beton im Erschließungskern und im Keller sowie die zementgebundene Schüttung und der Estrich in den Geschossdecken. Diese Baustoffe zeichnen sich durch ihre geringe Kreislauffähigkeit aus. Aufgrund ihres großen Gewichts überwiegen sie die für sich genommen recht zirkuläre Holzbauweise deutlich.

Die zu Beginn dieser Arbeit aufgestellte Annahme, dass die aktuell üblichen Bauweisen nahezu keinerlei Kreislauffähigkeit erreichen und die globalen Ressourcen ausbeuten, kann somit bestätigt werden. Diese Baupraxis ist enorm unnachhaltig und ihre Transformation hin zu einem zirkulären Wirtschaften angesichts der fortschreitenden Klimakrise und der Endlichkeit globaler Ressourcen unabdingbar.

### Die Ansätze zur Kreislaufoptimierung

Lösungen aufzuzeigen, wie bereits jetzt kreislauffähiger gebaut werden kann, ist Untersuchungsgegenstand dieser Diplomarbeit. Basierend auf einer umfangreichen Recherche wurden drei Strategien identifiziert, wie ein Schließen der Stoffströme auf Bauteil- und Materialebene schon heute umgesetzt werden kann. In einer anwendungsorientierten Untersuchung wurden diese auf ihre Einsetzbarkeit und besonders ihr Kreislaufpotenzial hin analysiert. Das Kernergebnis ist, dass jeder einzelne der Ansätze zur Erhöhung der Zirkularität in der Architektur deutlich besser abschneidet als die Bestandsbauten. Dabei variiert das Maß der erreichten Kreislaufführung sowie die technischen, rechtlichen und baupraktischen Einsatzmöglichkeiten der jeweiligen Varianten.

Im ersten Ansatz wurden Verbesserungsmöglichkeiten im Rahmen der mineralischen Massivbauweise untersucht. Ziel war das technische Schließen der Stoffkreisläufe auf Materialebene innerhalb der etablierten mineralischen Bauweise. Diese hat den Vorteil, dass sie sich für alle Teile des Gebäudes anwenden lässt. Dank hervorragender Schall- und Brandschutz- sowie statischer Eigenschaften gibt es auch für den Einsatz bei größeren Gebäudevolumina baurechtlich wenig Einwände. Jedoch ist die potenzielle Zirkularität der zwei Hauptbestandteile Beton und Ziegel materialbedingt begrenzt, da ihre Herstellungsprozesse nach Stand der Technik irreversibel sind. Besonders im Vergleich zum ebenfalls mineralischen Bestandshaus A zeigt sich, wie sehr allein durch Suffizienz, Reduktion von Materialverbünden und den Einsatz möglichst kreislauffähiger Produkte die Kreislaufbilanz verbessert wer-



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

**Haus A**
*konventioneller Massivbau*

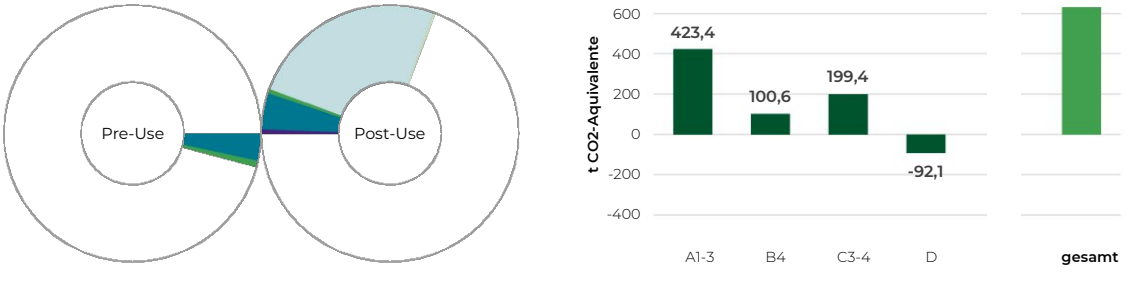



Abb. 242: Bestandshaus A - konventionelle Massivbauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

**Haus B**
*Holz-Beton-Hybridbau*

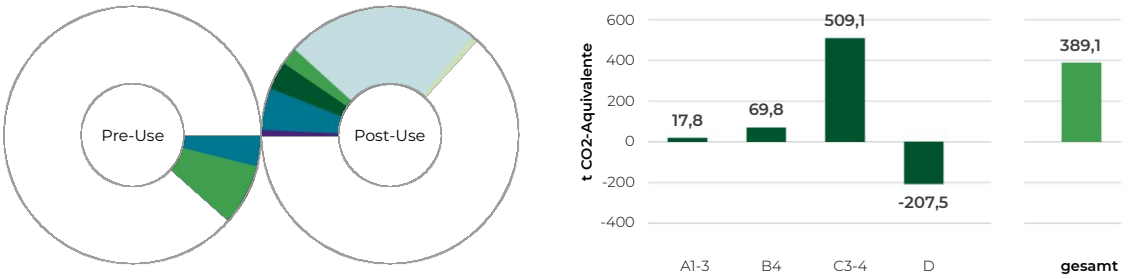



Abb. 243: Bestandshaus B - Holz-Beton-Hybridbauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

**Variante 1**
*mineralischer Massivbau*

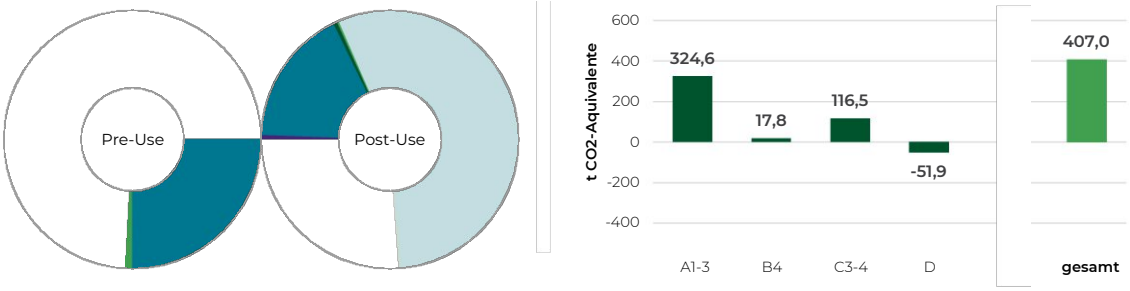



Abb. 244: Variante 1 - mineralische Massivbauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

**Variante 2**
*natürliche Bauweise*

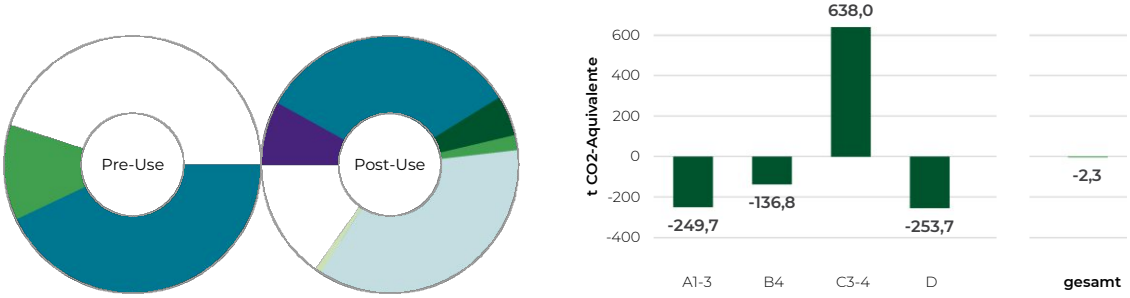



Abb. 245: Variante 2 - natürliche Holz-Lehm-Hybridbauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

**Variante 3**
*Systembauweise*

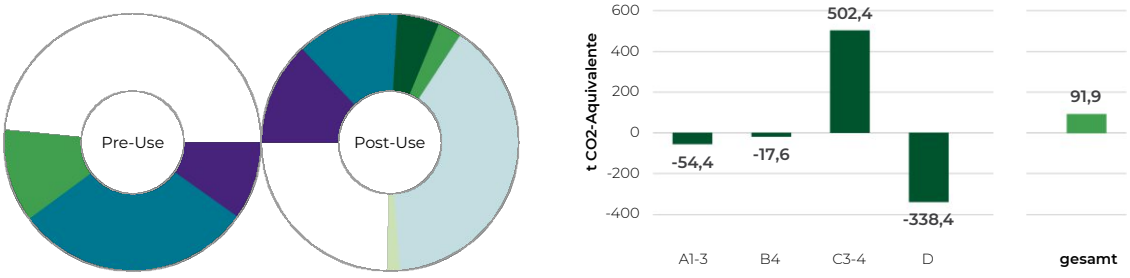



Abb. 246: Variante 3 - Systembauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

den kann. Während bei Haus A nur 11% der Stoffe zirkulär sind, sind es in Variante 1 immerhin 37%. Dabei sind viele Maßnahmen, zum Beispiel der Einsatz von Recycling-Beton, nicht nur bautechnisch, sondern auch ökonomisch leicht zu realisieren. Mit der $CO_2$-reduzierten Herstellung von Beton und Ziegel sowie durch die Einsparung von Bauteilschichten lassen sich im Vergleich zu Bestandshaus A mehr als 200 t $CO_2$-Äquivalente im Lebenszyklus einsparen. Somit erreicht die mineralische Massivbauweise ein vergleichbares GWP wie die Holz-Beton-Hybridbauweise – obwohl fast kein kohlenstoffspeicherndes Material verbaut wurde. Dem Schließen der Stoffströme auf Material- und Rohstoffebene innerhalb des technischen Kreislaufs sind Grenzen gesetzt. Dennoch ist bei sortenreiner Rückgewinnung und dank neuer Entwicklungen zum Stoffrecycling eine signifikante Verbesserung zur konventionellen Bauweise möglich.

Variante 2 setzt auf den Einsatz natürlicher Baustoffe, die wieder in den Naturkreislauf zurückgeführt werden können. Dieses Schließen der Stoffströme im biologischen Kreislauf, welches anhand der Holz-Lehm-Hybridbauweise untersucht wurde, ist theoretisch nahezu vollständig möglich. Jedoch limitieren Brandschutzauflagen für den Holzbau, die begrenzte statische Belastbarkeit von Lehm und die mangelnde Feuchteresistenz beider Materialien eine konsequente Umsetzbarkeit und Skalierbarkeit dieser Bauweise. Die Umsetzung eines Bauwerks mit fünf Geschossen ist das aktuell realisierbare Maximum dieser Bauweise und ist und nur dank der Brandschutzerleichterungen in Vorarlberg möglich. Aufgrund der mangelnden Feuchteresistenz von Holz und Lehm mussten in Variante 2 die erdberührten Bauteile mit Beton und die Abdichtung mit Kunststoff-Folien ausgeführt werden. Abgesehen davon lässt sich jedoch nahezu das gesamte Haus aus unbehandelten, in die Natur rückführbaren Baustoffen realisieren. Dank des hohen ökologischen Bewusstseins in der Bevölkerung wird bereits jetzt eine große Auswahl an Produkten und technischen Lösungen für eine schadstofffreie und sortenrein natürliche Architektur angeboten. Kritisch zu betrachten ist, dass gerade im Holzbau das Potenzial einer stofflichen Nachnutzung – einer hochwertigen Kaskadennutzung unbehandelter Althölzer – bisher nicht ausreichend ausgeschöpft wird. Da im Urban Mining Index die Kaskadennutzung und die energetische Verwertung nachwachsender Rohstoffe gleich gewertet werden, wird dies in der Auswertung nicht abgebildet. Die Variante 2 mit primär biotischen und natürlichen mineralischen Baustoffen erreicht trotz des Beton-Kellers eine Kreislauffähigkeit von 61% und eine Klimaneutralität im Lebenszyklus. Mit dem Schließen der Stoffströme im biotischen Kreislauf lässt sich also bereits heute eine enorm hohe Zirkularität erreichen.

In Variante 3 wurde das Potenzial der Kreislaufführung und Wiederverwendung möglichst vieler Elemente untersucht. Da die Bauteilwiederverwendung im Gegensatz zum Bauen mit natürlichen Baustoffen noch nicht in der breiten Anwendung etabliert ist, konnten im dritten Ansatz nur wenig ReUse Elemente verbaut werden. Daher wurde in dieser Variante neben der direkten Bauteilwiederverwendung auch der Systembau untersucht, der besonders geeignet für eine zukünftige Wiederverwendung ist. Die Holz-Systembauweise der Firma Lukas Lang, die als zirkulärste Systembau-Lösung aus der Recherche hervorging, ist in der Anwendung ähnlich eingeschränkt wie die Holz-Lehm-Hybridbauweise der Variante 2. Während der Systembau die Kombination verschiedener Materialien und somit die Erfüllung der Brandschutzvorgaben ermöglicht, lässt sich eine Bauwerksabdichtung in modularer Bauweise nicht umsetzen. Daher muss neben der Dachhaut besonders der Keller bauseits ausgeführt werden. Abgesehen davon kann das gesamte Gebäude mit vorgefertigten, reversibel gefügten Elementen errichtet werden. Neben der Möglichkeit der Bauteilwiederverwendung hat diese Bauweise viele weitere Vorteile: Nicht nur profitiert sie von einer sehr kurzen Bauzeit und einer hohen Flexibilität des Grundrisses während der Nutzung, auch die leichte sortenreine Trennbarkeit aller Materialien im Rückbau wird gewährleistet. Angesichts der sehr leichten Bauweise muss jedoch die Gebäudeperformance von Variante 3 hinsichtlich des Schallschutzes und der sommerlichen Überhitzung trotz gegenteiliger Versicherung der Hersteller:innen kritisch hinterfragt werden. Die Systembauweise mit Bauteilwiederverwendung ist trotz des Beton-Kellers über 50% zirklulär und erreicht mit etwa 90 t $CO_2$-Äquivalente im Lebenszyklus ein gutes Global Warming Potential. Da ReUse Geschäftsmodelle noch selten und die Angebote bei Bauteilbörsen auf wenige Produktgruppen limitiert sind, lässt sich eine Kreislaufführung allein durch Wiederverwendung aktuell nicht realisieren. Mit mehr Herstellerrücknahme-Angeboten – wie den in der Variante 3 vorgestellten Doppelbodenplatten der Firma Lindner – könnte das große Potenzial der Bauteilwiederverwendung in Zukunft besser ausgeschöpft und ReUse-Produkte in die normale Baupraxis integriert werden.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

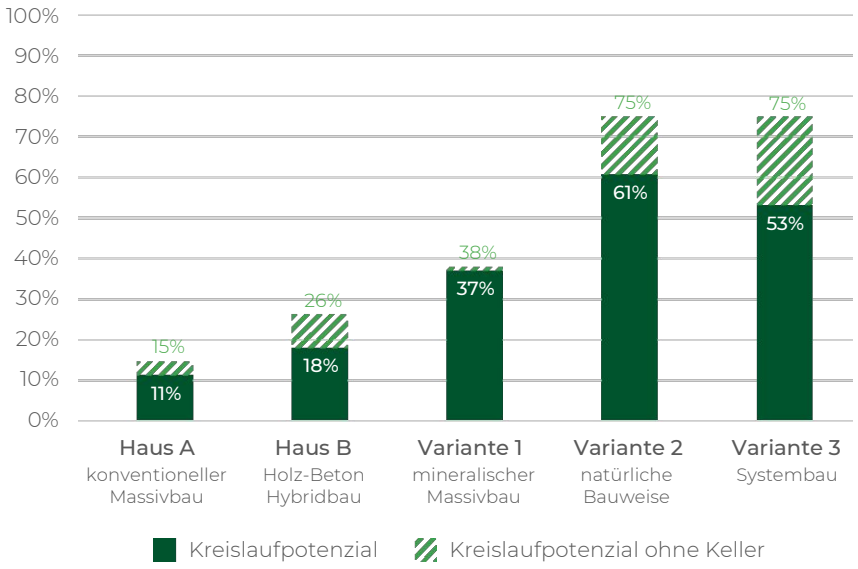



Abb. 247: Vergleich der Kreislauffähigkeit der verschiedenen Bauweisen mit dem Urban MIning Index. Kreislaufpotenzial der Bauweisen in originaler Ausführung mit Keller (dunkelgrün) und alternativ ohne Keller (hellgrün gestrichelt). Eigene Darstellung.

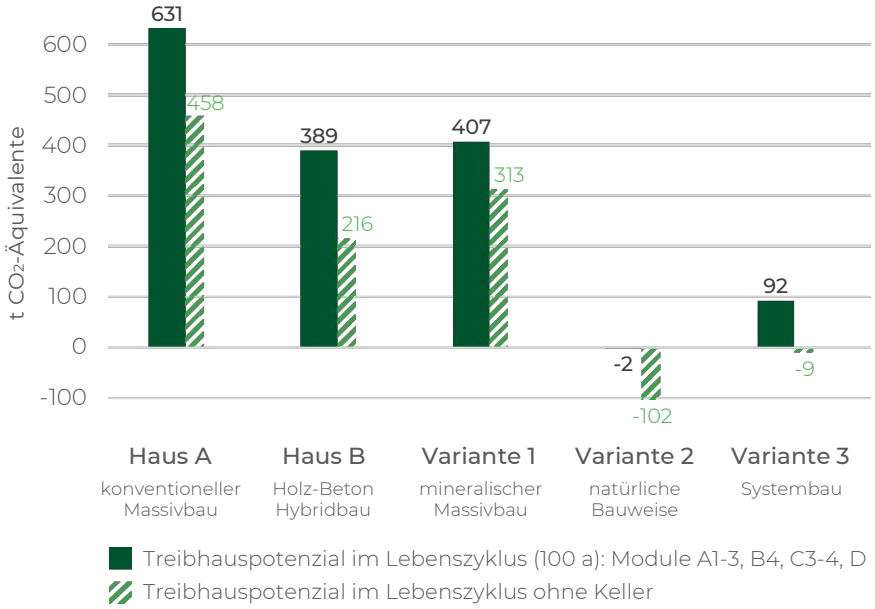



Abb. 248: Vergleich des Treibhauspotenzials im Lebenszyklus der verschiedenen Bauweisen. Betrachtungszeitraum 100 Jahre und betrachtete Module: A1-3, B4, C3-4 und D. Treibhauspotenzial der Bauweisen in originaler Ausführung mit Keller (dunkelgrün) und alternativ ohne Keller (hellgrün gestrichelt). Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Verzicht auf eine Unterkellerung

Da im verwendeten Bewertungstool, dem Urban Mining Index, eine Gewichtung der verschiedenen Materialien nach Masse stattfindet, fällt der wenig zirkuläre Ortbeton-Keller im Leichtbau der Variante 3 deutlich mehr ins Gewicht als beim Hybridbau der Variante 2. Um das Kreislaufpotenzial dieser beiden Bauweisen besser vergleichen zu können, wurde eine zusätzliche Betrachtung der Gebäude exklusive des Kellers durchgeführt (siehe Abb. 248). Der Verzicht auf ein Kellergeschoss verbessert die Zirkularität beider Bauweisen wesentlich. Beide erreichen ein hervorragendes Kreislaufpotenzial von 75%. Die Zirkularität der mineralischen Bauten, Haus A und Variante 1, steigt nur minimal, während der Holz-Beton-Hybridbau sich merklich verbessert. Auf das Global Warming Potential wirkt sich der Wegfall des Kellers für alle Bauweisen enorm positiv aus. Da die Herstellungsemissionen des Kellers bei den Bestandsbauten höher ausfallen als bei den kreislaufoptimierten Varianten, erleben sie durch sein Weglassen eine größere Verbesserung des GWPs.

Neben den enorm positiven Umweltauswirkungen eines Verzichts auf Unterkellerung zeigt sich, dass sowohl die natürliche Bauweise als auch die Systembauweise gleichermaßen äußerst zirkulär sind. Bezogen auf das Treibhauspotenzial schneidet die Variante 2 dennoch deutlich besser ab – sie ist sogar klimapositiv.

## Grundsätzliche Beobachtungen

Es lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Kreislaufpotenzial und der $CO_2$-Bilanz feststellen. Dafür gibt es mehrere Gründe. Es hat sich gezeigt, dass nachwachsende Rohstoffe sowohl besonders zirkulär als auch sehr klimaschonend sind. Zudem entstehen bei einer Wiederverwendung keine Emissionen in der Entsorgung und bei einer Wiederverwertung werden dank der Substitution von Primärrohstoffen Vorteile außerhalb der Systemgrenze (also im Lebenszyklusmodul D) angerechnet. Der Vergleich zwischen der natürlichen Bauweise und der Systembauweise zeigt, dass eine idente Zirkularität dennoch nicht bedeutet, dass auch ein gleiches GWP erreicht wird.

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sind irreversible Stoffverbünde zu vermeiden. Trocken gefügte Verbindungen wirken sich dank der Reversibilität der Fügung positiv auf die Kreislauffähigkeit aus. Doch auch nass gefügte Stoffe können zirkulär sein, wenn ihre Verbindung – wie bei Lehm – reversibel ist. In den hier untersuchten Bauten haben neben fossilen Materialien nur verschmutzte, irreversibel vermischte Baustoffe keinerlei Kreislaufpotenzial erreicht.

Die Nutzungsdauern der betrachteten Baustoffe variieren weniger stark als angenommen. Fast alle untersuchten Materialien erreichen laut dem Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie zumindest eine Nutzungsdauer von 50 Jahren. Diesbezüglich lässt sich auch selten ein Unterschied zwischen konventionellen und alternativen Baustoffen feststellen.

Mehrfach wurde in der Arbeit angemerkt, dass eine Holzbauweise, wie sie in Variante 2 und 3 eingesetzt wurde, für ein fünfgeschossiges Gebäude in dieser Form derzeit nur in Vorarlberg realisierbar ist, da dort im Vergleich zum Rest von Österreich Erleichterungen im Brandschutz gelten. Die Untersuchung dieser Diplomarbeit zeigt auf, dass die Holzbau-Varianten 2 und 3 ein deutlich höheres Kreislaufpotenzial als die betrachteten mineralischen Bauweisen erreichen. Eine Erleichterung der Brandschutzvorschriften nach dem Vorbild Vorarlbergs für ganz Österreich würde deshalb die Möglichkeiten zirkulär zu planen und zu bauen wesentlich unterstützen.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Methodenkritik

Der Urban Mining Index hat sich als einfach anwendbares und leicht darstellbares Bewertungssystem zur Kreislauffähigkeit auf Materialebene erwiesen. Die ihm zugrunde liegende Gewichtung der Baustoffe nach deren Masse ergibt grundsätzlich Sinn, da sie erstens leicht erfassbar ist und zweitens gerade im Rückbau und Abbruch die entscheidende Kenngröße darstellt. Es ist jedoch zu bemerken, dass dadurch Baustoffe mit einer hohen Rohdichte, besonders mineralische Baustoffe, sehr deutlich abgebildet werden. Leichte Materialien wie Kunststoffe und Dämmungen werden hingegen kaum dargestellt. Die bereits erwähnte Gleichsetzung einer stofflichen und einer energetischen Verwertung bei biotischen Materialien ist kritisch zu betrachten. Aus Sicht der Kreislaufführung ist eine stoffliche Verwertung stets zu priorisieren. Auch Ausnahmelösungen wie die Bauteil-Wiederverwendung können aufgrund des begrenzten zugrundeliegenden Datensatzes im Tool nicht erfasst werden. Da die Messmethodik jedoch bekannt ist, können diese Verwertungswege auch individuell prognostiziert werden, wie dies im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurde.

Ein wesentlicher Beitrag des Urban Mining Index ist, dass er die stoffliche Zirkularität der Materialien und Bauweisen auf einfache Weise darstellt. Dadurch leitet er die Planenden an, im Entwurfsprozess stets auch Optimierungspotenziale zur Kreislaufführung zu beachten. In Zukunft sollte die Zirkularität als selbstverständliches Entwurfskriterium – gleichwertig zur energetischen Performance, dem Schallschutz und weiteren etablierten Kriterien – in den Entwurfsprozess integriert werden.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Fazit und Ausblick

Insgesamt zeigt die vorliegende Diplomarbeit, dass heute schon deutlich ressourceneffizienter gebaut werden kann als dies im gegenwärtigen Baugeschehen üblicherweise der Fall ist. Jeder der entwickelten Ansätze zur Steigerung der Zirkularität erreicht eine höhere Kreislauffähigkeit als konventionelle Bauweisen. Die fehlende Ressourcenschonung beim Bauen kann also nicht mit einem Mangel an Möglichkeiten begründet werden. Es ist erkennbar, dass das Kreislaufpotenzial eines Bauwerks auf verschiedene Weisen verbessert werden kann und eine hohe Kreislauffähigkeit heute schon mit marktgängigen Produkten realisierbar ist. Die aufgestellten Varianten zeigen konkrete Handlungsschritte auf, wie eine Steigerung der Zirkularität in unterschiedlichen Material- und Bauteilkontexten erreicht werden kann.

Jeder der drei Ansätze stellt eine Verbesserung gegenüber der aktuellen Baupraxis dar und sollte für eine schnelle Implementierung der Kreislaufwirtschaft forciert werden. Das größte Potenzial zur Kreislaufführung erzielt dabei die natürliche Bauweise, da sie bereits sehr viele Baustoffe mit enorm hoher Zirkularität aufweisen kann – und gleichzeitig eine Kohlenstoffsenke darstellt. Das Potenzial der Bauteilwiederverwendung kann derzeit aufgrund fehlender Angebote nicht vollständig ausgeschöpft werden. Dies zeigt auf, dass hier noch Raum besteht, die Kreislaufwirtschaft voranzutreiben. Im Sinne einer ressourcenschonenden Bauweise ist zudem eine materialgerechte Planung unerlässlich. Die natürliche und die Systembauweise eignen sich besonders gut für kleinere Bauaufgaben bis zu vier Geschossen. Während der Systembau von einer sehr kurzen Bauzeit profitiert, kann sich die natürliche Holz-Lehm-Hybridbauweise besser an den Genius Loci anpassen und einen höheren bauphyhsikalischen Komfort bieten. Im Sinne des zirkulären Bauens ist eine Lockerung der Brandschutzvorgaben zugunsten des Holzbaus empfehlenswert – dadurch lassen sich die Einsatzmöglichkeiten dieser zwei sehr zirkulären Ansätze deutlich erweitern.

Der große Vorteil der mineralischen Massivbauweise liegt in ihrer nahezu uneingeschränkten Anwendbarkeit, auch wenn sie bezogen auf die Zirkularität schlechter abschneidet als die anderen Ansätze. Allein die Tatsache, dass eine Unterkellerung ohne konventionelle mineralische Materialien – insbesondere Stahlbeton – kaum denkbar ist, verdeutlicht, dass auch die Forschung zur Ressourceneffizienz dieses Baustoffs voranzutreiben ist.

Angesichts der Klimakrise, der weltweiten Ressourcenverknappung und des enormen Abfallaufkommens der Baubranche führt langfristig kein Weg am zirkulären Bauen vorbei. Dass es bereits heute möglich ist, auch in der breiten Baupraxis wesentlich ressourcenschonender und nachhaltiger zu bauen, wurde in dieser Diplomarbeit dargelegt. Nun gilt es, das Bewusstsein der Planer:innen und Entscheidungsträger:innen für zirkuläre Lösungen zu schärfen. Ein entscheidender Schritt dahin ist, die Bemessung des Kreislaufpotenzials als etablierter Bestandteil des Gebäudeentwurfs voranzutreiben.

Hoffnung für große Veränderungen in der Bauindustrie bieten die EU-Taxonomie und die rechtlichen Zielsetzungen in Österreich. Indem nachhaltiges und zirkuläres Handeln in der Finanzwirtschaft gefördert wird, kann die Kreislaufbauwirtschaft auch unter ökonomischen Interessen bestehen. So erhält die Firma Lukas Lang Building Technologies seit dem Inkrafttreten der EU-Taxonomie deutlich mehr Aufträge, da ihre Systembauweise, welche in Variante 3 eingesetzt wurde, taxonomiekonform ist.[320] Dank des österreichischen Deponierverbots für Gipse wird in der Umgebung von Wien das erste österreichische Gips-Recyclingwerk errichtet, das 2025 in Betrieb gehen soll.[321] Seit dem Inkrafttreten der Norm für tragendes Lehmsteinmauerwerk haben – auch in Österreich – mehr als ein Dutzend Ziegel- und Kalksandsteinproduzent:innen mit der Entwicklung und Produktion von tragenden Lehmsteinen begonnen.[322]

Jetzt gilt es, mit Mut voranzugehen und diese Strategien zum kreislaufgerechten Bauen auch in die Realität umzusetzen.

320 Persönliches Gespräch mit Kilian Mattitsch, Leiter Planung bei Lukas Lang Building Technologies, telefonisch, am 24.03.2024.

321 Siehe: Saint-Gobain, „Kreislaufwirtschaft im Vormarsch – Startschuss für das erste Gips-zu-Gips- Recyclingwerk in Österreich".

322 Vortrag von Dipl.-Ing. Christof Liebrich: „Moderner Lehmbau in Deutschland", von TU Wien, Netzwerk Lehm eV und Young Earth Builders eV, Wien, 14.03.2024.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 7

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Literaturverzeichnis 268
Abbildungsverzeichnis 276

# VERZEICHNISSE

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Literaturverzeichnis


Achatz, Astrid, Eva Margelik, Thomas Romm, Thomas Kasper, und Dirk Jäger. KreislaufBAUwirtschaft. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021.

Achtziger, Joachim, Günter Pfeifer, Rolf Ramcke, und Konrad Zilch. Mauerwerk Atlas. Edition Detail, 2001.

Ackermann, Jörg. „Trockenestriche optimiert für tieffrequenten Trittschallschutz". Bad Wörishofen, 2017.

Aicher, Florian. „2226 revisited". Bauwelt 22.2021 (2021).

Austrian Standards Institute, Hrsg. „OENORM B 4710-1:2018 01 01. Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität. Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton", 1. Januar 2018.

Austrotherm. „XPS Premium P". Zugegriffen 28. April 2024. https://www.austrotherm.at/fileadmin/user_upload/Austrotherm_XPS_Premium_P_AT.pdf.

Bahr, Carolin, und Kunibert Lennerts. Lebens- und Nutzungdauer von Bauteilen. Bundesinstitut für Bau-, Stadt-und Raumforschung (BBSR), Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2010.

Ballester, Nicolas, und Jurek Zaroffe. „Der Kreislaufwirtschaftsaktionsplan als wirtschaftliches Kernstück des Green Deal". In Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft, herausgegeben von Peter Kurth, Anno Oexle, und Martin Faulstich, 379–400. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-658-36262-1_19.

Bau EPD GmbH, Hrsg. „Umwelt-Produktdeklaration. HOIZ - Hobelspandämmung Baufritz GmbH & Co. KG", 2018.

baubook. „Schafwolle Isolena". Zugegriffen 6. März 2024. https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142685609&win=y&SW=32&lng=1.

Baufritz, Hrsg. „Holz Hobelspan-Dämmung", o. J. https://www.baufritz.com/Dokumente/HOIZ/Datenblatt_HOIZ_web.pdf.

Baukobox. „Ziegeldecken". Baukobox. Zugegriffen 18. Januar 2024. https://baukobox.de/wissen/747-ziegeldecken.

BauNetz. „Betonherstellung und Klimaschutz". Baunetz Wissen. Zugegriffen 17. Mai 2023. https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/betonherstellung-und-klimaschutz-7229519.

———. „Doppelböden". Baunetz Wissen. Zugegriffen 15. Januar 2024. https://www.baunetzwissen.de/boden/fachwissen/_systemboeden/doppelboeden-988375.

———. „Fachwissen Estriche". Baunetz Wissen. Zugegriffen 30. Dezember 2023. https://www.baunetzwissen.de/boden/fachwissen/estriche/einsatzbereiche-von-estrich-984537.

———. „Vakuumisolationspaneele". Baunetz Wissen. Zugegriffen 25. Januar 2024. https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/vakuumisolationspaneele-899259.

Bechter, Georg. „Lerchenstraße Wolfurt – Quartiersbetrachtung". Gemeinde Wolfurt, 2016.

Biscoping, Dipl.Ing. Michaela, Dr.Ing. Diethelm Bosold, und Dipl.Ing. Markus Brunner, Hrsg. „Zement-Merkblatt Betontechnik. Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung", November 2021.

BMI, Hrsg. klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten Neubau und Sanierung 2020. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2020.

BMK, Hrsg. Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022.




TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Böhmer, Siegmund, Michael Gössl, Thomas Krutzler, Werner Pölz, Josef Hackl, Peter Weiss, und Jürgen Schneider. Effiziente Nutzung von Holz: Kaskade versus Verbrennung. Wien: Umweltbundesamt GmbH, 2014.

Bricoflor. „Parkett – verkleben oder schwimmend verlegen?“ Bricoflor. Zugegriffen 18. Januar 2024. https://www.bricoflor.de/blog/2019/03/18/parkettboden-verkleben-oder-schwimmend-verlegen.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg. „Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft“. Zukunft Bauen Band 6 | Forschung für die Praxis (2017).

Circle Economy. „The Circularity Gap Report Austria“. circle-economy.com. Zugegriffen 14. Dezember 2022. http://publish.circle-economy.com/circularity-gap-report-austria.

Claytec Lehmbaustoffe, Hrsg. „Lehm-Trockenputzplatte“, 18. September 2019. https://shop.claytec.at/produkt/claytec-lehm-trockenputzplatte/.

Dachverband Lehm eV, Hrsg. „Muster-Umweltproduktdeklaration. Lehmsteine nach DIN 18945“, 29. März 2023.

Deutsches Institut für Normung, Hrsg. „DIN 18940:2023-06. Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung“, Juni 2023.

DGNB, Hrsg. „DGNB System. Kriterienkatalog Gebäude Neubau“, 2023.

———. „Gebäuderessourcenpass“. DGNB GmbH. Zugegriffen 13. Dezember 2023. https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass.

———. „Zirkuläres Bauen im DGNB System“. DGNB GmbH. Zugegriffen 28. März 2024. https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/im-dgnb-system.

Dodd, Nicholas, Shane Donatello, und Mauro Cordella. „Level(s) – Ein gemeinsamer EU-Rahmen von Kernindikatoren für die Nachhaltigkeit von Büro- und Wohngebäuden. Benutzerhandbuch 1: Einführung in den gemeinsamen Level(s)-Rahmen (Version 1.1 der Veröffentlichung)“, Januar 2021.

Doris, Weismayr. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021.

Dyckerhoff. „Dyckerhoff erhält als erster deutscher Hersteller die Zulassung für CEM II/C-Zement“, November 2020. https://www.dyckerhoff.com/-/cem-ii-c-zement.

Eberhardt, Leonora Charlotte Malabi, Harpa Birgisdottir, und Morten Birkved. „Potential of Circular Economy in Sustainable Buildings“. Materials Science and Engineering, 2018, de.

e-genius. „Schaumglas“. Zugegriffen 10. April 2024. https://www.e-genius.at/lernfelder/baustoffe-und-fassadensysteme/daemmstoffe-verarbeitung/mineralische-daemmstoffe/schaumglas.

———, Hrsg. „Vakuumdämmung“. Zugegriffen 25. Januar 2024. https://www.e-genius.at/lernfelder/baustoffe-und-fassadensysteme/daemmstoffe-verarbeitung/hochleistungsdaemmstoffe/vakuumdaemmung.

El Khouli, Sebastian, Viola John, und Martin Zeumer. Nachhaltig Konstruieren. Vom Tragwerksentwurf Bis Zur Materialwahl: Gebäude Ökologisch Bilanzieren Und Optimieren. DETAIL - Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2015. https://doi.org/10.11129/9783955532390.

Ellen MacArthur Foundation. „The Butterfly Diagram: Visualising the Circular Economy“. Zugegriffen 19. März 2024. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram.

ETH Zürich Sustainability Forum, Hrsg. „Nass oder trocken“. Zugegriffen 22. März 2024. https://sustainable-digital-construction.ethz.ch/wet-vs-dry.

Europäische Kommission. Delegierte Verordnung (EU) 2021/2139 der Kommission vom 4. Juni 2021 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates (2021).



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

———. Delegierte Verordnung (EU) 2023/2486 der Kommission vom 27. Juni 2023 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates (2023).

———. „Der europäische Grüne Deal“, 14. Juli 2021. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de.

Europäische Kommission. Generaldirektion Umwelt. Level(s). Maßnahmen zu den Gesamtauswirkungen des Bausektors ergreifen. LU: Publications Office, 2019. https://data.europa.eu/doi/10.2779/598661.

Europäisches Parlament. „Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile“. europarl.europa.eu, 20. April 2022. https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile.

Europäisches Parlament, und Europäischer Rat. Richtlinie (EU) 2018/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (2018).

———. Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, 088 OJ L § (2011). http://data.europa.eu/eli/reg/2011/305/oj/deu.

European Commission. Joint Research Centre. Level(s): a common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings : part 3, How to make performance assessments using level(s) (Beta v1.0). LU: Publications Office, 2017. https://data.europa.eu/doi/10.2760/95143.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. „Schafwolle“. https://baustoffe.fnr.de/. Zugegriffen 7. März 2024. https://baustoffe.fnr.de/daemmstoffe/materialien/schafwolle.

Foamglas. „T3+“. Zugegriffen 8. Mai 2024. https://www.foamglas.com/de-de/produkte/fgbt3slabs.

Forum Nachhaltiges Bauen. „Ökobilanz Stahl“. Zugegriffen 8. April 2024. https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/stahl.

Gengnagel, Christoph, und Diego Apellániz. „Lebenszyklusanalyse und parametrischer Raumentwurf“. nbau. NACHHALTIG BAUEN (blog), 17. April 2023. https://www.nbau.org/2023/04/17/lebenszyklusanalyse-und-parametrischer-raumentwurf/.

Gutex. „Thermoflat“. Zugegriffen 21. Januar 2024. https://shop.gutex.de/GUTEX-Thermoflat/1600.

GXN. Circle House. Denmarks first circluar housing project. 1st edition., 2018.

Harder, Dr.-Ing. Joachim. „Gips – Ein knapper Rohstoff?“ AT Mineral Processing, Nr. 04/2022 (April 2022). https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_gips_ein_knapper_rohstoff_-3752852.html.

Hart, Jim, Katherine Adams, Jannik Giesekam, Danielle Densley Tingley, und Francesco Pomponi. „Barriers and Drivers in a Circular Economy: The Case of the Built Environment“. ScienceDirect, 2019.

Hartenberger, Ursula, Seema Issar, Anja Köhler, Jonathan Leonardsen, Roza Wegkamp, und Bruno Sauer. „Is the Real Estate Industry Ready for a Circular Economy? Study Results on the EU Taxonomy Criteria for Buildings Confirmation“. Gehalten auf der DGNB, online, 22. Februar 2023.

Hebel, Dirk Prof., und Ludwig Prof. Wappner. Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik. Edition Detail, 2023.

Hillebrandt, Annette, Petra Riegler-Floors, Dr. Anja Rosen, und Johanna-Katharina Seggewies. Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource. München: Edition Detail, 2018.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Huber, Tobias, Katja Fiebrandt, Michael Klippel, Tobias Bonwetsch, Götz Hilber, und Oliver Kirschbaum. „Holz-Lehm-Decken Swiss Made“. nbau. NACHHALTIG BAUEN (blog), 16. Februar 2024. https://www.nbau.org/2024/02/16/holz-lehm-decken-swiss-made/.

IBO (Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie). „EI Entsorgungsindikator“. IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie. Zugegriffen 29. November 2022. https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/ei-entsorgungsindikator.

Institut für Bauen und Umwelt e.V. „Anhang ReUse: Rechenregeln für ReUseProdukte“, Dezember 2023.

Institut für Bauen und Umwelt e.V., und Bundesverband Leichtbeton e.V., Hrsg. „EPD Mauersteine aus Leichtbeton mit Trass-Zement - Vollstein schwer. Deklarationsnummer: EPD-BVL-20131321-IAE1-DE“, April 2013.

Institut für Bauen und Umwelt e.V., und Lindner. „EPD Doppelbodensystem Typ Nortec. Deklarationsnummer: EPD-LIN-20210022-IBA1-DE“, o. J.

Isocell, Hrsg. „ÖKO NATUR Dampfbremse fadenverstärkt“. Zugegriffen 11. April 2024. https://www.isocell.com/de-at/produkt/oeko-natur.

Istraw. „Panels“. Zugegriffen 12. April 2024. https://istraw.tech/strohbauplatten-moderner-trockenbau/.

Kanters, Jouri. „Circular Building Design: An Analysis of Barriers and Drivers for a Circular Building Sector“. Buildings, März 2020.

Katerusha, Dmytro. „Einsatz von Recycling-Beton fördern: D versus CH“. Ressourceneffizienz, November 2020. https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/umweltschutz/zuercher-umweltpraxis-zup/2020/98/ZUP098_2020_A0091_Recyclingbeton_Aachen.pdf.

Kaufmann, Hermann, Stefan Krötsch, und Stefan Winter. Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. First Edition. Munchen: Edition Detail, 2017.

Klinge, Andrea, und Eike Roswag-Klinge. „Holz – ein zirkulärer Baustoff“. Innsbruck, 2019.

Kromoser, Univ. Prof. Dr. Benjamin, Dr. Mathias Hammerl, Univ. Prof. Dr. Marion Huber-Humer, und Ao. Univ. Prof. Dr. Stefan Salhofer. Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien. Wien: Universität für Bodenkultur Wien, 2022.

Küpfer, Célia, und Corentin Fivet. Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion: Studie zur Förderung der Abfallreduktion und der Wiederverwendung in der Baubranche. Zenodo, 2021. https://doi.org/10.5281/ZENODO.5131243.

Leal Filho, Walter, Hrsg. Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58717-1.

Levita, Hrsg. „Lehmbauplatte schwer“. Zugegriffen 12. April 2024. https://lehm.com/fileadmin/user_upload/downloads/TechnDatenbl_L16_L22.pdf.

Liblik, Johanna, Alar Just, und Judith Küppers. „Eigenschaften von Lehmputzen für den Brandschutz von Holzkonstruktionen“. Weimar, 2020.

Lindner Group. „LOOP Prime. Aufbereitete Doppelböden mit höchstem Anspruch an Nachhaltigkeit“. Zugegriffen 15. Januar 2024. https://www.lindner-group.com/de_AT/ausbauprodukte/boden/doppelboden/loop-aurum/.

Lithotherm, Hrsg. „Fußbodenheizung“, o. J. https://www.lithotherm-system.de/wp-content/uploads/2023/10/Lithotherm_Prospekt.pdf.

Massivholz Junker, Hrsg. „GFM-Diagonalplatte“, o. J. https://www.gfm-system.com/wp-content/uploads/2019/02/20190221_GFM-Technisches-Datenblatt.pdf.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

McDonough, William, Michael Braungart, Karin Schuler, und Ursula Pesch. Cradle to cradle : einfach intelligent produzieren. 2. Auflage. Berlin: Berliner Taschenbuch Verlags GmbH, 2005. http://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/item/54XXHP6OHH62YKUTIM76LH5D4DOT3PEK.

Moser, Gertraud, Brigitte Karigl, und Silvia Benda-Kahri. „Grundlagendokument - Entwicklung einer Kreislaufwirtschaftsstrategie". Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021.

Müller, Prof. Dr.-Ing. habil. Anette, Dipl.-Ing. Ines Döring, Dipl.-Ing. Manuela Knorr, Dr. sc. nat. Annett Lipowsky, Dr.-Ing. Ulrich Palzer, und Dr.-Ing. Barbara Leydolph. „Entwicklungen zum Recycling von Ziegeln und Ziegelmauerwerk (Teil 1)". Ziegelindustrie International. Zugegriffen 12. Januar 2024. https://www.zi-online.info/de/artikel/zi_Entwicklungen_zum_Recycling_von_Ziegeln_und_Ziegelmauerwerk_Teil_1_-3514624.html.

naturkalender.at. „Fichte". Zugegriffen 5. Mai 2023. https://www.naturkalender.at/arten/baeume/7-fichte.

OIB. OIB-Grundlagendokument zur Ausarbeitung einer OIB-Richtlinie 7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen. Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023.

———. OIB-Richtlinie 2. Brandschutz. Österreichisches Institut für Bautechnik, 2019.

———. OIB-Richtlinie 5. Schallschutz. Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015.

ÖkobauDat. „Prozess-Datensatz: Calciumsulfat-Fließestrich und Konventioneller Calciumsulfatestric". oekobaudat.de. Zugegriffen 30. Dezember 2023. https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=de&uuid=825fc872-5d02-40f2-a68b-fe71f11a817d&version=00.04.000.

———. „Prozess-Datensatz: Estrichmörtel-Zementestrich". oekobaudat.de. Zugegriffen 30. Dezember 2023. https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=0864927a-1f93-4a07-a39c-51725a8b967e&version=00.06.000.

———. „Prozess-Datensatz: Stahl-Feinblech (0,3-3,0 mm)". Zugegriffen 25. April 2024. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=bca0565e-ee92-4b32-939e-60c67e503390&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en.

———. „Prozess-Datensatz: Vakuumisolationspaneel Vacupor". Zugegriffen 6. März 2024. https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=de&uuid=b4f9acf5-678f-4624-93e1-65515c8c3f86.

Österreichischer Baustoff- Recycling Verband. „Baustoff-Recycling ist die erste Wahl!" Zugegriffen 5. Januar 2024. http://brv.at/deponieverbot-fuer-beton-asphalt-strassenaufbruch-baustoff-recycling-ist-die-erste-wahl/.

overshootday.org. „Earth Overshoot Day". Zugegriffen 13. März 2024. https://overshoot.footprintnetwork.org/.

Padalkina, Dina, Julius Schäufele, und Patrick Teuffel. „Geschäftsmodelle für zirkuläres Bauen und Sanieren - Die Rolle innovativer Geschäftsmodelle in der Transformation des Bausektors". Deutsche Energie-Agentur GmbH, November 2023.

PEFC Austria. „Anteil PEFC-Zertifizierter Waldbewirtschaftung in Österreich". PEFC Austria. Zugegriffen 6. Mai 2023. https://www.pefc.at/pefc-austria/.

Peikko Group Corporation. „Dismount and Reuse of Precast Concrete Frame". Peikko White Paper, März 2022.

———. „Ist die Baubranche bereit für den Umstieg? Peikko und die Kreislaufwirtschaft, Praktische Überlegungen". Peikko White Paper, 2017.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Pfabigan, Notburga. „Es kommt drauf an. Zur Dauerhaftigkeit unbehandelter Hölzer in der Außenanwendung“. Herausgegeben von proHolz Austria. Zuschnitt 23, 2006. https://www.proholz.at/zuschnitt/23/es-kommt-drauf-an.

proHolz Austria, Hrsg. „Bauen mit Raummodulen. Ein Überblick“. Zuschnitt 67, September 2017. https://www.proholz.at/zuschnitt/67/bauen-mit-raummodulen.

———. „Der Wald wächst: Nachhaltige Waldwirtschaft in Österreich“. proholz.at, 25. Juli 2022. https://www.proholz.at/wald-holz-klima/der-wald-waechst-um-3200-fussballfelder-pro-jahr.

———, Hrsg. „Wie viel wird mit Holz gebaut?“, 18. März 2022. https://www.proholz.at/wald-holz-klima/wie-viel-wird-in-oesterreich-mit-holz-gebaut.

psloop.eu. „PSLoop. Circular Economy.“ Zugegriffen 10. April 2024. https://www.psloop.eu/circular-economy/.

Rauch, Martin. Gebaute Erde. Gestalten & Konstruieren mit Stampflehm. Edition Detail, 2015.

Reichel & Naar GmbH, Hrsg. „Dämmjute. Technisches Datenblatt Recycling Jute Dämmplatten“, Januar 2023.

Rhomberg Bau GmbH. „Innovationsprojekt Wolfurt Lerchenstraße“. Bregenz: Rhomberg Bau GmbH, 20. Mai 2020. https://www.rhomberg.com/de/studienprojekt-lerchenstrasse.

Rigips Austria. „Nachhaltigkeit“. Zugegriffen 5. Januar 2024. https://www.rigips.at/nachhaltigkeit.

Röhlen, Ulrich, und Christoph Ziegert. Lehmbau-Praxis: Planung und Ausführung. Herausgegeben von DIN Deutsches Institut für Normung eV. 2., Vollst. überarb. Aufl. Praxis : Bauwesen. Berlin Wien [u.a.]: Beuth, 2014.

Rosen, Anja. Urban Mining Index. Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Stuttgart: Frauenhofer IRB Verlag, 2021.

Saint-Gobain. „Kreislaufwirtschaft im Vormarsch – Startschuss für das erste Gips-zu-Gips- Recyclingwerk in Österreich“. Zugegriffen 28. April 2024. https://www.saint-gobain.at/presseaussendung/kreislaufwirtschaft-im-vormarsch-startschuss-fuer-das-erste-gips-zu-gips-recyclingwerk-oesterreich.

Schlummer, Martin, Andreas Maurer, Swetlana Wagner, Arthur Berrang, Tanja Fell, und Fabian Knappich. „Recycling of Flame Retarded Waste Polystyrene Foams (EPS and XPS) to PS Granules Free of Hexabromocyclododecane (HBCDD)“. Advances in Recycling & Waste Management 02, Nr. 02 (2017). https://doi.org/10.4172/2475-7675.1000131.

Schroeder, Horst. Lehmbau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-658-23121-7.

Schulte, Karl-Werner. Immobilienökonomie: 1. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 4. Aufl.. München, 2008. https://permalink.catalogplus.tuwien.at/AC06637625.

Sohm HolzbauTechnik GmbH. „DiagonalDübelholz“. Zugegriffen 4. März 2024. https://www.sohm-holzbau.at/diagonalduebelholz.

Spaun, Sebastian. „Kolloquium 2023 ‚Forschung & Entwicklung für Zement und Beton‘“, 2023.

Statistik Austria. „Ein Blick auf die Gemeinde: Wolfurt“. Zugegriffen 25. Mai 2023. https://www.statistik.at/blickgem/gemDetail.do?gemnr=80240.

Systembau Eder, Hrsg. „Fertigkeller aus Beton“. Zugegriffen 21. April 2024. https://www.eder.co.at/systembau/fertigkeller-aus-beton.

Technische Universität München. „Timber Earth Slab“, 18. November 2021. https://www.arc.ed.tum.de/defac/aktuelles/news-single-startseite/article/timber-earth-slab/.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Thermo Hanf. „Ökologische Trittschalldämmung“. Zugegriffen 21. Januar 2024. https://hbc-solution.at/product/thermo-hanfplatte/.

———, Hrsg. „Thermo Hanf Combi Jute“, o. J. https://www.thermo-hanf.de/wp-content/uploads/2023/09/230905_TDB_THERMO_HANF_COMBI_JUTE.pdf.

Tobias Tumfart GmbH. „Der nachhaltige Produkt-Lebenszyklus“. Zugegriffen 12. April 2024. https://www.schafwolldaemmung.at/de/produktlebenszyklus.html.

———, Hrsg. „Schafwoll-Dämmmatte“. Zugegriffen 12. April 2024. https://www.schafwolldaemmung.at/de/unsere-produkte/detail/20/1/schafwoll-daemmmatte.html.

Trebut, Franziska, und Bianca Pfefferer. Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen. Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT), 2021.

Universität der Künste Berlin. „Minimal Mineral“. Zugegriffen 11. April 2024. https://www.udk-berlin.de/studium/architektur/fachgebiete/konstruktives-entwerfen-und-tragwerksplanung/minimal-mineral/.

Verbraucherzentrale NRW, Hrsg. „Dämmstoff.Navi“. Zugegriffen 22. April 2024. https://webspace-energie.de/daemmstoff-tool/suche.php?material=&lieferform=&waermeleitfaehigkeitSingleInput=&waermeleitfaehigkeit=0-0.08&baustoffklasse=&schallschutz=2&find=&search=filtern&sortierung=name.

Vereinte Nationen, Hrsg. „Global Sand Observatory Initiative“. Zugegriffen 23. November 2022. https://unepgrid.ch/en/activity/sand.

VMobil. „Linie 148“. Zugegriffen 4. März 2024. https://www.vmobil.at/bus-bahn/das-vvv-liniennetz/linie-148.

Vogdt, Frank U, Diana Fischer, Falk Schaudienst, und Michael Schober. „Leitfaden Recyclingpotential von Mineralwolle“. Forschungsinitiative ZukunftBAU, 2023.

WECOBIS. Ökologisches Baustoffinformationssystem. „Calciumsulfatestrich“. Zugegriffen 19. Februar 2024. https://www.wecobis.de/en/bauproduktgruppen/moertel-estriche/estriche/calciumsulfat-fliessestrich.html.

WEM, Hrsg. „Bodenheizung System 30“, o. J. https://wandheizung.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Prospekte/WEM_Fussbodenheizung.pdf.

WKO (Wirtschaftskammer Österreich). „Umgang mit künstlichen Mineralfasern (KMF) im Bauwesen“, Januar 2018.

Wopfinger Transportbeton. „Ökobeton-K“. Zugegriffen 17. Januar 2024. https://wopfinger.com/produkte/oekobetone/oekobeton-k.html.

Zelger, Thomas, Hildegrund Mötzl, Astrid Schamhorst, und Markus Wurm. Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen. Wien: IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und –ökologie GmbH, 2009.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Diagramm zur Linearwirtschaft (links) und Kreislaufwirtschaft (rechts). Eigene Darstellung.

Abb. 2: Modell der fünf technisch-funktionalen Schichten der Baukonstruktion in Anlehnung an die sechs Shearing Layers nach Steward Brand.
Eigene Darstellung nach Hebel, Dirk Prof., und Ludwig Prof. Wappner. Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik. Edition Detail, 2023. S.121.

Abb. 3: Übersicht über unterschiedliche Verbindungsarten.
Eigene Darstellung, teilweise angelehnt an Hebel, Dirk Prof., und Ludwig Prof. Wappner. Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik. Edition Detail, 2023, S. 106.

Abb. 4: Schmetterlingsdiagramm des biotischen und technischen Kreislaufs angelehnt an die Ellen MacArthur Foundation.
Eigene Darstellung nach Hebel, Dirk Prof., und Ludwig Prof. Wappner. Sortenrein bauen. Material, Konstruktion, Methodik. Edition Detail, 2023, S. 25.

Abb. 5: Materialfußabdruck und CO2-Fußabdruck in Österreich nach Wirtschaftssektoren.
Darstellung aus: Moser, Gertraud, Brigitte Karigl, und Silvia Benda-Kahri. „Grundlagendokument - Entwicklung einer Kreislaufwirtschaftsstrategie". Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021, .S. 40.

Abb. 6: Prognose des Versiegens der Rohstoffquellen.
Eigene Darstellung nach Hillebrandt, Annette, Petra Riegler-Floors, Dr. Anja Rosen, und Johanna-Katharina Seggewies. Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource. München: Edition Detail, 2018, S. 124.

Abb. 7: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens im Jahr 2019 nach Abfallgruppen.
Eigene Darstellung nach Die Doris, Weismayr. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021, S. 15.

Abb. 8: Haus 2226 in Lustenau von Baumschager Eberle Architekten. Foto: Baumschlager Eberle Architekten.
https://www.baumschlager-eberle.com/werk/projekte/projekt/2226/, 05.03.2024.

Abb. 9: Holzbauanteil bei Mehrfamilienhäusern in Österreich von 1998 bis 2018.
Darstellung: ProHolz Austria. „Wie viel wird mit Holz gebaut?", 18. März 2022.
https://www.proholz.at/wald-holz-klima/wie-viel-wird-in-oesterreich-mit-holz-gebaut.

Abb. 10: K.118 – Kopfbau Halle 118 in Winterthur (2021) von Baubüro InSitu.
Foto: Martin Zeller / Lea Hummel.
https://www.insitu.ch/img/full/dv20211208-094808-746.jpg, 13.04.2024.

Abb. 11: Wirkungsdiagramm der EU-Taxonomie. Eigene Darstellung nach WKO: „EU-Taxonomie-Verordnung".
https://www.wko.at/finanzierung/eu-taxonomie-verordnung-eutax, 18. März 2024.

Abb. 12: Abfallhierarchie der EU-Abfallrahmenrichtlinie. Eigene Darstellung.

Abb. 13: Zusammenfassung verschiedener Konzepte des kreislauffähigen Bauens in drei Strategien.
Eigene Darstellung.

Abb. 14: Übersicht der Lebenszyklusphasen inklusive Einschätzung der Relevanz und kurzzeitige Umsetzbarkeit für einen Zirkularitätsfaktor.
Eigene Darstellung nach Kromoser, Univ. Prof. Dr. Benjamin, Dr. Mathias Hammerl, Univ. Prof. Dr. Marion Huber-Humer, und Ao. Univ. Prof. Dr. Stefan Salhofer. Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien. Wien: Universität für Bodenkultur Wien, 2022, S. 19.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 15: Notwendige Informationen und Indikatoren zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden laut Ein Zirkularitätsfaktor für Wien.
Eigene Darstellung nach Kromoser, Univ. Prof. Dr. Benjamin, Dr. Mathias Hammerl, Univ. Prof. Dr. Marion Huber-Humer, und Ao. Univ. Prof. Dr. Stefan Salhofer. Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien. Wien: Universität für Bodenkultur Wien, 2022, S. 12.

Abb. 16: Hervorgehobene Darstellung der Kriterien, die für diese Arbeit besonders relevant sind.
Eigene Darstellung nach Kromoser, Univ. Prof. Dr. Benjamin, Dr. Mathias Hammerl, Univ. Prof. Dr. Marion Huber-Humer, und Ao. Univ. Prof. Dr. Stefan Salhofer. Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien. Wien: Universität für Bodenkultur Wien, 2022, S. 12.

Abb. 17: Laut DGNB stehen bei der Verstion 2023 etwa 40% der Bewertungspunkte direkt oder indirekt im Zusammenhang mit Zirkularität.
Darstellung: DGNB: Zirkuläres Bauen im DGNB System. https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/im-dgnb-system, 12.04 2024.

Abb. 18: Kategorien des Bewertungssystems KlimaAktiv und Verteilung der Punktzahl nach Kategorien.
Darstellung: BMI, klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten Neubau und Sanierung 2020. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2020., S. 9.

Abb. 19: Vergleich der betrachteten Bewertungssysteme im Bezug auf die Erfüllung der eingangs festgelegten Kritereien. Eigene Darstellung.

Abb. 21: Betrachtungszeitraum für eine Lebenszyklusanalyse in unterschiedlichen Bewertungssystemen. Eigene Darstellung.

Abb. 20: Die Gliederung des Gebäudelebenszyklus in Anlehnung an EN 15804.
Eigene Darstellung nach Hillebrandt, Annette, Petra Riegler-Floors, Dr. Anja Rosen, und Johanna-Katharina Seggewies. Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource. München: Edition Detail, 2018, S. 114.

Abb. 22: Der Zusammenhang zwischen Gebäudelebenszyklus und Lebenszyklus von Materialien ist im End-of-Life am größten. Eigene Darstellung.

Abb. 23: Zusammensetzung des Kreislaufpotenzials in die Kategorien Pre-Use und Post-Use sowie in verschiedene Qualitätsstufen der Verwertung.
Darstellung: Rosen, Anja. Urban Mining Index. Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Stuttgart: Frauenhofer IRB Verlag, 2021, S. 190.

Abb. 24: Ebenen der Bewertungssystematik.
Darstellung: Rosen, Anja. Urban Mining Index. Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Stuttgart: Frauenhofer IRB Verlag, 2021; S. 172.

Abb. 25: Verwertungswege und das Maß ihrer Kreislaufführung.
Eigene Darstellung nach Hillebrandt, Annette, Petra Riegler-Floors, Dr. Anja Rosen, und Johanna-Katharina Seggewies. Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource. München: Edition Detail, 2018, S. 59.

Abb. 26: Legende des Urban Mining Index mit Qualitätsstufen der Verwertung. Darstellung Rosen, Anja. Urban Mining Index. Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Stuttgart: Frauenhofer IRB Verlag, 2021, S. 161.

Abb. 27: Beispielhafter Wandaufbau einer Trockenbauwand zur Erläuterung des Urban Mining Index. Eigene Darstellung.

Abb. 28: Berechnung der Verwertungswege der einzelnen Bauteilschichten im Post-Use. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 30: Darstellung des Urban Mining Index und Legende der Verwertungswege. Eigene Darstellung.

Abb. 29: Berechnung des Urban Mining Index der beispielhaften Trockenbauwand. Eigene Darstellung.

Abb. 32: Darstellung des Treibhauspotenzials der Trockenbauwand. Eigene Darstellung.

Abb. 31: Berechnung des Treibhauspotenzials der beispielhaften Trockenbauwand. Eigene Darstellung

Abb. 33: Darstellung der im Urban Mining Index erfassten Lebenszyklusphasen sowie der laut Studie Ein Zirkularitätsfaktor für Wien relevanten und erfassbaren Lebenszyklusphasen.
Eigen Darstellung basierend auf Kromoser, Univ. Prof. Dr. Benjamin, Dr. Mathias Hammerl, Univ. Prof. Dr. Marion Huber-Humer, und Ao. Univ. Prof. Dr. Stefan Salhofer. Explorative Studie: Ein Zirkularitäts-Faktor für Wien. Wien: Universität für Bodenkultur Wien, 2022, S. 19.

Abb. 34: Verortung des Fallbeispiels, maßstabslos. Eigene Darstellung.

Abb. 35: Lageplan des Fallbeispiels. Die Grundfläche der Bestandsbauten ist ident, lediglich zueinander verdreht. Maßstab 1:750. Eigene Darstellung.

Abb. 36: Erdgeschoss-Grundriss. Maßstab 1:250. Orientierung nach Bestandshaus A. Eigene Darstellung.

Abb. 37: Regelgeschoss-Grundriss. Maßstab 1:250. Eigene Darstellung.

Abb. 38: Konzeptzeichnung Tragwerk. Alle farblich markierten Wände sind tragend. Maßstab 1:250. Eigene Darstellung.

Abb. 39: Konzeptueller Schnitt durch den Erschließungs-Kern. Maßstab 1:250. Eigene Darstellung.

Abb. 40: Luftbildaufnahme des Quartiers. Quelle: Google Earth

Abb. 41: Alle weiteren Abbildungen: Außenaufnahmen der Gebäude Lerchenstraße 25 und Flurstraße 16. Fotos: Weissengruber

Abb. 42: Außenaufnahme nach der Fertigstellung von Haus A. Flurstraße 16, 6922 Wolfurt.
Foto: Weissengruber.

Abb. 43: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Haus A. Eigene Darstellung.

Abb. 44: Regelgrundriss von Haus A. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.

Abb. 45: oben: Erdgeschossgrundriss, unten: Schnitt A - A von Haus A, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.

Abb. 46: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Gründung. Eigene Darstellung.

Abb. 47: Gründung Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 48: Keller-Außenwand Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 49: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Außenwand Keller und Erdgeschoss.. Eigene Darstellung.

Abb. 50: Außenwand EG Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 51: Obergeschoss-Außenwand Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 52: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Außenwand OGs und Trockenbauwand. Eigene Darstellung.

Abb. 53: Trockenbauwand Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 54: Wohnungstrennwand Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 55: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Wohnungstrennwand und Geschossdecke. Eigene Darstellung.

Abb. 56: Geschossdecke Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 57: Decke zu Keller Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 58: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus A, Dach und Decke zu Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 59: Dach Haus A: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 60: Haus A: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude.. Eigene Darstellung.

Abb. 61: Haus A: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses.. Eigene Darstellung.

Abb. 62: Haus A: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. . Eigene Darstellung.

Abb. 63: Haus A: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet. Eigene Darstellung.

Abb. 64: Außenaufnahme nach der Fertigstellung von Haus B. Lerchenstraße 25, 6922 Wolfurt.
Foto: Weissengruber.

Abb. 65: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Haus B.. Eigene Darstellung.

Abb. 66: Regelgrundriss von Haus B. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.

Abb. 67: oben: Erdgeschossgrundriss, unten: Schnitt A - A von Haus B, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.

Abb. 68: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Gründung. Eigene Darstellung.

Abb. 69: Gründung Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 70: Außenwand Keller Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 71: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Keller-Außenwand & Wohnungstrennwand. Eigene Darstellung.

Abb. 72: Wohnungstrennwand Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 73: Außenwand Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 74: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Gründung und Keller-Außenwand. Eigene Darstellung.

Abb. 75: tragende Innenwand Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 76: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, BSH-Wand und Trockenbauwand. Eigene Darstellung.

Abb. 77: Trockenbauwand Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 78: Decke Erschließung Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 79: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Decken Erschließung und zu Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 80: Decke zu Keller Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 81: Geschossdecke Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 82: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Haus B, Geschossdecke und Dach. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 83: Dach Haus B: UMI und Treibhausgaspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 84: Haus B: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude.Eigene Darstellung.

Abb. 85: Haus B: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 86: Haus B: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 87: Haus B: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet. Eigene Darstellung.

Abb. 88: Funktionsäquivalenz. U-Werte der Bestandsbauten und Varianten sowie rechtliche Vorgabe. Eigene Darstellung.

Abb. 89: Baufeld D22 in der Seestadt Aspern, Wien, Clemens Kirsch Architektur (2017). Foto: Andreas Hafenscher/ Wienerberger Ziegelindustrie GmbH.
https://www.clemenskirsch.at/wp/wp-content/uploads/clemens-kirsch-architektur-d22-klimaaktiv-gold-1024x768.jpg, 19.02.2024.

Abb. 90: Wohnungsbau 2226 Graf, Dornbirn, Baumschlager Eberle (2020). Foto: Baumschlager Eberle Architekten
https://www.baumschlager-eberle.com/werk/projekte/projekt/2226-graf/, 13.05.2024.

Abb. 91: Darstellung der angestrebten Form der Kreislaufführung. Eigene Darstellung, basierend auf Hillebrandt, Annette, Petra Riegler-Floors, Dr. Anja Rosen, und Johanna-Katharina Seggewies. Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource. München: Edition Detail, 2018, S. 61.

Abb. 92: Vergleich: Kreislaufpotenzial einer Stahlbetonwand ohne Recycling-Zuschläge mit geringen Verschmutzungen und einer Stahlbetonwand mit 38% Recycling-Zuschlägen und ohne Verschmutzungen. Eigene Darstellung.

Abb. 93: ÖNORM B 4710-1: Tabelle E.3 — Grenzwerte für den Austausch von natürlichen Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Expositionsklassen (in Masse-%).
Austrian Standards Institute, Hrsg. „OENORM B 4710-1:2018 01 01. Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität. Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton“, 1. Januar 2018, S. 151.

Abb. 94: Vergleich des Treibhauspotenzials in der Herstellung (A1-3) einer 20 cm dicken Betonwand (ohne Bewehrung). Eigene Berechnung & Darstellung.

Abb. 95: Zielvorgabe der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie, wie die Betonherstellung bis 2050 klimaneutral werden soll. Darstellung: VÖZ.
Spaun, Sebastian. „Kolloquium 2023 ‚Forschung & Entwicklung für Zement und Beton‘“, 2023, S. 9.

Abb. 96: Vergleich des Treibhauspotenzials in der Herstellung (A1-3) einer 20 cm dicken mineralischen Wand. Eigene Berechnung und Darstellung.

Abb. 97: 2226, Lustenau, Baumschlager Eberle (2013). Foto: Baumschlager Eberle Architekten
https://www.baumschlager-eberle.com/werk/projekte/projekt/2226/, 05.03.2024.

Abb. 98: Wohnungsbau 2226 Graf, Dornbirn, Baumschlager Eberle (2020). Foto: Baumschlager Eberle Architekten
https://www.baumschlager-eberle.com/werk/projekte/projekt/2226-graf/, 13.05.2024.

Abb. 99: Abbruch von Mauerziegel mit Dämmstofffüllung aus Mineralwolle-Stecklingen.
Foto: Bundesverband Ziegel. https://www.ziegel.de/recycling, 08.05.2024.

Abb. 100: Mauerziegel mit Dämmstofffüllung aus Holzfaser-Stecklingen. Foto: Schaller.
https://www.bauhandwerk.de/imgs/1/8/9/8/4/9/1/meinziegelhaus-mz80-gh-02-0de69df79a6a0125.jpg, 10.05.2024.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 101: Im Gegensatz zu Beton können Ziegel aktuell nicht mit zirkulären Materialien hergestellt werden. Links: 20 cm dicke, saubere Stahlbetonwand mit 38% Recycling-Zuschlägen. Rechts: 20 cm dicke, saubere Hochlochziegel-Wand. Eigene Darstellung.

Abb. 102: Eignung der untersuchten Bauweisen für entscheidende Gebäudefunktionen. Eigene Darstellung.

Abb. 103: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Variante 1. Eigene Darstellung.

Abb. 104: Regelgrundriss von Variante 1. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.

Abb. 105: Erdgeschossgrundriss, unten: Schnitt A - A von Variante 1, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.

Abb. 106: Vergleich geeigneter Perimeterdämmstoffe.Eigene Darstellung.

Abb. 107: Vergleich verschiedener dämmstoffgefüllter Hochlochziegel. Alle Produkte sind statisch geeignet für den mehrgeschossigen Objektbau. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 108: Vergleich verschiedener konventioneller Trockenbauplatten. Eigene Darstellung.

Abb. 109: Vergleich mineralischer Trockenbaudämmungen. Eigene Darstellung.

Abb. 110: Vergleich von für die Ausführung mit Fußbodenheizung geeigneten Nassestricheben. Eigene Darstellung.

Abb. 111: Vergleich konventioneller Trittschalldämmungen. Eigene Darstellung.

Abb. 112: Zusammenstellung verschiedener mineralischer und fosiller Dämmstoffe. Von links nach rechts: Mehrere Künstliche Mineralfasern, Schaumglasplatte, EPS-Dämmstoff und XPS-Dämmstoff.
https://www.der-daemmstoff.de/wp-content/uploads/2023/07/img_start2.jpg, 10.05.2024.
https://www.baunetzwissen.de/imgs/1/2/7/8/4/5/16-02-FOAMGLAS-Daemmung-06b5bf9e1dba4e49.jpg, 10.05.2024.
https://www.baunetzwissen.de/imgs/2/3/0/2/2/1/7/IVH_2-108b480c2882d0b0.jpg, 10.05.2024.
https://www.dach-holzbau.de/imgs/1/7/9/2/8/1/2/4b98fc7e04b3cbc5.jpg, 10.05.2024.

Abb. 113: Vergleich konventioneller Dachdämmungen. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 114: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Gründung. Eigene Darstellung.

Abb. 115: Gründung Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 116: Außenwand Keller Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 117: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Außenwand und Außenwand Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 118: Außenwand Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 119: Trockenbauwand Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 120: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Trockenbauwand & Wohnungstrennwand. Eigene Darstellung.

Abb. 121: Wohnungstrennwand Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 122: Geschossdecke Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 123: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Geschossdecke & Decke zu Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 124: Decke zu Keller Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 125: Dach Variante 1: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 126: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 1, Dach und Decke zu Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 127: Variante 1: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude.. Eigene Darstellung.

Abb. 128: Variante 1: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses.. Eigene Darstellung.

Abb. 130: Variante 1: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet. Eigene Darstellung.

Abb. 129: Variante 1: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses.. Eigene Darstellung.

Abb. 131: Links: Gemeindezentrum St. Gerold, Cukrowicz Nachbaur Architekten (2008). Foto: Hanspeter Schiess für Cukrowicz Nachbaur Architekten ZT GmbH
https://www.cn-architekten.at/projekt/gemeindezentrum-st-gerold, 29.02.2024.

Abb. 132: Forschungshaus 2.0 in Bad Aibling, Florian Nagler Architekten (2023). Foto: Sebastian Schels.

Abb. 134: Darstellung der angestrebten Form der Kreislaufführung. Eigene Darstellung, basierend auf Hillebrandt, Annette, Petra Riegler-Floors, Dr. Anja Rosen, und Johanna-Katharina Seggewies. Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource. München: Edition Detail, 2018, S. 61.

Abb. 135: Kaskadische Nutzungswege von Holz. Eigene Darstellung.

Abb. 136: Brettstapelelement wird mit Hartholzdübel leimfrei verbunden. Foto: Holzbau Sutter.
https://www.holz-suttner.de/duebelholz/, 19.04.2024.

Abb. 137: Bretter werden mittels Schwalbenschwanz leimfrei zu einer Diagonalplatte gefügt. Foto: GFM
https://www.gfm-system.com/wp-content/uploads/2019/09/GFM-Platte-400x280.jpg, 19.04.2024.

Abb. 138: Vergleich vertikaler Holzbauelemente auf deren Tragfähigkeit, Aussteifung und Leimanteil. Eigene Darsellung nach Kaufmann, Hermann, Stefan Krötsch, und Stefan Winter. Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. First Edition. Munchen: Edition Detail, 2017, S. 64.

Abb. 139: Vergleich horizontaler Holzbauelemente auf deren Spannweite, CO2-Bindung und Leimanteil. In Grün ist die gewählte Bauweise hervorgehoben. Eigene Darsellung nach AKaufmann, Hermann, Stefan Krötsch, und Stefan Winter. Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. First Edition. Munchen: Edition Detail, 2017, S. 65.

Abb. 140: Materialität und schematische Herstelltechnik der drei gängigen Lehmbautechniken für tragendes Mauerwerk. Darstellung: TERRA Award - Pauline Sémon.

Abb. 141: Die Lehmsteine der Firma Conclay werden wie Kalksandsteine im Großformat und mittels Versetzhilfe vermauert. Foto: Lehmbaustoffe Conclay
https://lehmbaustoffe-conclay.de/images/2023/11/13/image000022_thumbnail.jpg, 19.04.2024.

Abb. 142: Tragendes Lehmsteinmauerwerk und Holz-Ringbalken. Forschungshäuser 2.0, Bad Aibling, Florian Nagler Architekten und ZRS Ingenieure. Foto Sebastian Schels.

Abb. 143: Kreislaufpotenzial und Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus einer 20 cm dicken, sauberen tragenden Lehmsteinwand. Der Lehm ist ein Nebenprodukt aus der Kiesgewinnung und deshalb als Nebenprodukt recycelt. Eigene Darstellung.

Abb. 145: Eignung der untersuchten Bauweisen für entscheidende Gebäudefunktionen. Eigene Darstellung.

Abb. 144: Schemaaufbau der tragenden Wohnungs-Innenwand. Vergleich Tragstruktur von Haus B und Variante 2. Eigene Darstellung.

Abb. 146: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Variante 2. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 147: Regelgrundriss von Variante 2. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.

Abb. 148: Erdgeschossgrundriss, Schnitt A - A von Variante 2, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.

Abb. 149: Vergleich ausgewählter ökologischer Dämmstoffe. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 150: Zusammenstellung verschiedener ökologischer Dämmstoffe. Links: Zellulose-Einblasdämmung, Mitte: Hanf-Dämmplatte, Rechts: Schafswolle-Dämmung
https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRinFfOGrGX77KtbPONsYspwNTNQuoeOhES-nYiTPWzXIA&s, 13.03.2024.
https://www.eco-logisch.nl/images/hennep.jpg, 13.03.2024.
https://www.baunetzwissen.de/imgs/1/2/7/8/7/3/6-8f80409f643b99d6.jpg, 13.03.2024.

Abb. 151: Vergleich ausgewählter ökologischer Dämmstoffe. Eigene Darstellung.

Abb. 152: Vergleich ausgewählter Trockenbauplatten. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 153: Trockenestrich-Systeme mit integrierter Fußbodenheizung. Links: Holzfaser-Dämmplatten mit Wärmeleitblech. Rechts: Zementgebundene Lavasplittplatten.
https://www.schreinerzeitung.ch/sites/default/files/styles/galerie_slider/public/sz/artikel/2021/38/3830_Produkte_Bild_WEM_Cemwood_F_10044895.jpg?itok=033i5k0b, 08.03.2024.
https://sg-projekt.com/wp-content/uploads/2021/01/LITHOWOOD-Aufbau.jpg, 08.03.2024.

Abb. 154: Vergleich ausgewählter Trockenestrich-Systeme mit integrierter Fußbodenheizung. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 155: Vergleich ausgewählter biologischer Trittschall-Dämmplatten. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 156: Verlegung einer Holzfaserdämmung mit Gefälledämmung.
https://www.baunetzwissen.de/imgs/2/8/8/6/0/1/2/STEICOroof_dry_Anwendung2-a571f4a75836791e.jpg, 28.02.2024.

Abb. 157: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Gründung. Eigene Darstellung.

Abb. 158: Gründung Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 159: Außenwand Keller Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 160: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Außenwand und Innenwand Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 161: Wand Keller Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 162: Außenwand Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 163: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Außenwand. Eigene Darstellung.

Abb. 164: Trockenbauwand Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 165: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Trockenbauwand. Eigene Darstellung.

Abb. 166: Wohnungstrennwand OGs Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 167: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Wohnungstrennwand, tragende Innenwand und Ringbalken. Eigene Darstellung.

Abb. 168: Tragende Innenwand Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 169: Ringbalken Variante 2: Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 170: Geschossdecke Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 171: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Geschossdecke. Eigene Darstellung.

Abb. 172: Decke Erschließung Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 173: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Decke Erschließung und Decke zu Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 174: Decke zu Keller Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 175: Dach Variante 2: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 176: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 2, Dach. Eigene Darstellung.

Abb. 177: Variante 2: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude.. Eigene Darstellung.

Abb. 178: Variante 2: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 180: Variante 2: Wertstoffe im Rückbau. Eigene Darstellung.

Abb. 179: Variante 2: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 181: Variante 2: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial, wenn der Keller aus der Betrachtung ausgeklammert wird. Eigene Darstellung.

Abb. 182: Circle House Demonstrator, Kopenhagen, GXN (2018). Foto: Jersø. https://images.squarespace-cdn.com/content/632c323fac03bd68c2ed4707/1682511870937-59JTQU-3HY4F0VLPFXTYS/Circle+House+1.jpg?content-type=image%2Fjpeg, 06.03.2024.

Abb. 183: Temporäres Parlament, Wien, WGA ZT mit Lukas Lang Building Technologies (2017-2023). Foto: Hörbst https://architektur.hoerbst.com/projekt/temporares-parlament-wien-wga-zt/, 06.03.2024.

Abb. 184: Studentenheim WOODIE, Hamburg, Kaufmann Bausysteme (2023). Foto: Kaufmann Bausysteme. https://kaufmannbausysteme.at/img/Hamburg-Woodie_01_web_2022-03-06-100749_mjwp.jpg, 06.03.2024.

Abb. 185: Darstellung der angestrebten Form der Kreislaufführung. Eigene Darstellung, basierend auf Hillebrandt, Annette, Petra Riegler-Floors, Dr. Anja Rosen, und Johanna-Katharina Seggewies. Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource. München: Edition Detail, 2018, S. 61.

Abb. 186: RoofKIT der Fakultät für Architektur des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Wuppertal 2022. Foto: Zooey Braun. https://roofkit.de/de/sde21/, 13.04.2024.

Abb. 187: Projekt K.118 von Baubüro InSitu: Sammlung der ReUse Fenster. Foto: Werner Knuesel. https://www.insitu.ch/img/full/dv20181220-105854-783.jpg, 13.04.2024.

Abb. 188: Angebotene ReUse Produkte nach Kategorien im Online-Shop der größten Bauteilbörse im deutschsprachigen Raum Concular. Stand: 21.04.2024. Eigene Darstellung.

Abb. 190: Schemazeichnung einer Montage und Demontage des Peikko Stützenschuhs. Eigene Darstellung nach Peikko Group Corporation. „Ist die Baubranche bereit für den Umstieg? Peikko und die Kreislaufwirtschaft, Praktische Überlegungen“. Peikko White Paper, 2017, S. 7.

Abb. 189: Der Circle House Demonstrator im Rohbau. Er wurde aus Betonfertigteilen gebaut mit dem Anspruch auf Wiederverwendung. Foto: Jersø. https://assets-global.website-files.com/62ceb97c155fca4f281da9ca/63580293f7639114907a91a7_Circle%20House%20-%20ekstra1.jpg, 09.01.2024.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 191: Schemazeichnung einer Montage, Demontage und Wiederverwendung einer Beton-Fertigteildecke. Eigene Darstellung.

Abb. 192: Das Studentenwohnheim WOODIE im Bauzustand. Foto: Senectus GmbH. https://www.getzner.com/uploads/media/970x600/03/5443-UDQ%20Hamburg%20_Woodie_%20%40G%C3%B6tz%20Wrage%20%283%29.jpg?v=1-1, 18.02.2024.

Abb. 193: Die verschiedenen Prinzipien der Vorfertigung im Holzbau: Schemazeichnung und Praxisbeispiel. Darstellung nach Kaufmann, Hermann, Stefan Krötsch, und Stefan Winter. Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. First Edition. Munchen: Edition Detail, 2017, S. 139.

Abb. 194: Explosionszeichnung der Konstruktion des temporären Parlaments. Die Konstruktion von Lukas Lang ist ein Baukastensystem weniger, vielseitig kombinierbarer Elemente. Grafik: Lukas Lang Building Technologies.

Abb. 195: Innenaufnahmen von Gebäuden, die mit dem Systembau von Lukas Lang errichtet wurden. Links: Rohbau-Zustand - zu erkennen sind die vielen identen Elemente. Rechts: fertiger Ausbau. Fotos: Lukas Lang Building Technologies.

Abb. 196: Eignung der untersuchten Bauweisen für entscheidende Gebäudefunktionen. Eigene Darstellung.

Abb. 197: Dreidimensionaler Schnitt B - B von Variante 3. Eigene Darstellung.

Abb. 198: Regelgrundriss von Variante 3. Maßstab 1:140. Eigene Darstellung.

Abb. 199: Erdgeschossgrundriss, Schnitt A - A von Variante 3, Maßstab 1:220. Eigene Darstellung.

Abb. 200: Vergleich ausgewählter Dämmstoffe. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 201: Einhängung eines Fassadenelements. Foto: Lukas Lang Building Technologies. https://smartcity.wien.gv.at/wp-content/uploads/sites/3/2017/12/Brogeb%C3%B1ude-P.-Montage-9.jpg, 19.02.2024.

Abb. 202: Projekt K.118 von Baubüro InSitu: Demontage der Fassade von ihrem ersten Einsatzort. Foto: Werner Knuesel. https://www.insitu.ch/img/full/dv20181220-105904-350.jpg, 16.03.0224.

Abb. 204: Vergleich ausgewählter Fassadenmaterialien. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 203: Fassadenelemente, z.B. dieses Wellblech, sind einige der Produkte, die regelmäßig bei ReUse Plattformen angebotne werden. Quelle: Concular https://shop.concular.de/, 21.04.2024.

Abb. 205: Tragwerk im Rohbau. Foto: Lukas Lang Building Technologies

Abb. 206: Nahaufnahme des Verbindungsknotens. Foto: Lukas Lang Building Technologies

Abb. 208: Vergleich ausgewählter Trockenbauplatten. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 207: Montage der Trockenbauwände. Foto: Lukas Lang Building Technologies

Abb. 209: Vergleich ausgewählter Trockenbauplatten. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 210: Kampa Verwaltungsgebäude, Aalen, DE von Florian Nagler Architekten (2014). Der Brettsperrholz-Aufzugsschacht wurde als dreigeschossiges Element eingebracht. Foto: Peters Fotodesign https://www.kampa-objektbau.de/wp-content/uploads/sites/2/2023/01/KAMPA-K8_Liftschacht_klein.jpg, 06.03.2024.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 211: Doppelböden werden auf Stahlstützen hochgeständert, um darunter eine frei Leitungsführung zu ermöglichen. Darstellung: Lindner GmbH https://lindner.cz/wp-content/uploads/2022/10/boden_doppelboden_ligna_01.jpg, 06.03.2024.

Abb. 212: Vergleich ausgewählter Dämmstoffe. Daten nach Herstellerangaben. Eigene Darstellung.

Abb. 213: Wiederverwendungspotenzial der einezelnen Elemente des Systembaus. Eigene Darstellung.

Abb. 214: Tabelle zur Ermittlung des Wiederverwendungspotenzials der einzelnen Elemente des Systembaus Lukas Lang Building Technologies. Eigene Darstellung.

Abb. 215: Gründung Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 216: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Gründung und Außenwand Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 217: Außenwand Keller Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 218: Fassade Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 219: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Fassade. Eigene Darstellung.

Abb. 220: Stütze Holz Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 221: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Stützen Holz und Stahl und Aussteifung. Eigene Darstellung.

Abb. 222: UMI der Stütze Stahl und Aussteifung von Variante 3 sowie Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 223: Aussteifung Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 224: Trockenbauwand Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 225: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Trockenbauwand und Aufzug.. Eigene Darstellung.

Abb. 226: Konstruktion Aufzug Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 227: Wohnungstrennwand Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 228: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Wohnungstrennwand und Wand Erschließung. Eigene Darstellung.

Abb. 229: Wand Erschließung Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 230: Geschossdecke Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 231: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Geschossdecke. Eigene Darstellung.

Abb. 232: Decke Erschließung Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 233: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Decke Erschließung und Decke zu Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 234: Decke zu Keller Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 235: Wand Keller Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 236: Tabelle zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Variante 3, Dach und Innenwand Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 237: Dach Variante 3: UMI und Treibhauspotenzial pro m². Eigene Darstellung.

Abb. 238: Variante 3: Masseanteil der Bauteile am Gesamtgebäude.. Eigene Darstellung.

Abb. 239: Variante 3: Kreislaufpotenzial des gesamten Hauses.. Eigene Darstellung.

Abb. 241: Variante 3: Wertstoffe im Rückbau. Anteilige Darstellung nach Masse gewichtet.. Eigene Darstellung.

Abb. 240: Variante 3: Treibhauspotenzial des gesamten Hauses.. Eigene Darstellung.

Abb. 242: Variante 3: Kreislaufpotenzial und Treibhausgaspotenzial, wenn der Keller aus der Betrachtung ausgeklammert wird.. Eigene Darstellung.

Abb. 243: Bestandshaus A - konventionelle Massivbauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 244: Bestandshaus B - Holz-Beton-Hybridbauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 245: Variante 1 - mineralische Massivbauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 246: Variante 2 - natürliche Holz-Lehm-Hybridbauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 247: Variante 3 - Systembauweise: Kreislaufpotenzial und Treibhauspotenzial des gesamten Hauses. Eigene Darstellung.

Abb. 248: Vergleich der Kreislauffähigkeit der verschiedenen Bauweisen mit dem Urban MIning Index. Kreislaufpotenzial der Bauweisen in originaler Ausfürhung mit Keller und alternativ ohne Keller. Eigene Darstellung.

Abb. 249: Vergleich des Treibhauspotenzials im Lebenszyklus der verschiedenen Bauweisen. Treibhauspotenzial der Bauweisen in originaler Ausfürhung mit Keller und alternativ ohne Keller. Eigene Darstellung.



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich sowohl auf dem Weg durch das Studium als auch während dem Verfassen dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Mein erster Dank gilt meinem Betreuer, Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadai für den wertvollen Input während meines gesamten Arbeitsprozesses. Sein professionelles Feedback und die fachliche Unterstützung haben wesentlich dazu beigetragen, dass diese Arbeit so entstehen konnte.

Weiters möchte ich auch bei meinen Interviewpartner:innen bedanken, die mit ihrer Informationsbereitschaft und ihren spannenden Beiträgen meine Arbeit mit vielfältigen Perspektiven bereichern konnten. Besonderer Dank gilt Alexander Szymoniuk und der gesamten Firma Lukas Lang Building Technologies, die mit mehreren Gesprächen und bereitgestellten Unterlagen eine wertvolle Hilfe waren. Auch bei Dr. Anja Rosen, die mir freundlicherweise das Bewertungstool Urban Mining Index zur Verfügung stellte, möchte ich mich herzlich bedanken.

Ein großes Dankeschön geht an meine Freund:innen, die mich während der gesamten Zeit unterstützt haben und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Danke an Karo, Franzi, Lea, Annika und alle „BIBler“ für die vielen hilfreichen Rückmeldungen und motivierenden Worte, vor allem aber für die zahllosen schönen Kaffee- und Mittagspausen, die mir die nötige Kraft und Freude für diesen intensiven Arbeitsprozess gegeben haben.

Einen ganz lieben Dank möchte ich außerdem an meine Familie aussprechen, die immer für mich da ist. An meine Eltern, die mir stets den Rücken stärken und an Sophia und Jojo, die bereit waren, diese Arbeit aufmerksam zu lesen und zu korrigieren.

# Danke!



TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.