



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

DIPLOMARBEIT

MASTER`S THESIS

Ressourceneffiziente Bauweise am Beispiel von Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen

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

unter der Leitung von

Assistant Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Alireza Fadai

Institut für Architekturwissenschaften, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

eingereicht an der **Technischen Universität Wien**

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Katharina Pomberger

0926826

Neulinggasse 21/25

1030 Wien

Wien, am 01.10.2015

KURZFASSUNG

In Anbetracht der voranschreitenden Verknappung an endlichen Ressourcen wie Sand und Kies, welche im Bauwesen gegenwärtig nicht wegzudenken sind, ist die Suche nach alternativen Baumaterialien wesentlich. Eine gründlich überlegte Auswahl von ökologisch nachhaltigen Baustoffen ist für Architekten und Planer der einfachste Weg, um ressourcenschonende Entwurfsstrategien in ein Gebäude einzubringen. Am Beispiel von Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen wird aufgezeigt inwieweit ein verantwortungsbewusster Umgang mit den vorhandenen nachwachsenden Rohstoffen besonders gut gelingen kann. Dabei ist eine anwendungsnahe und damit praxisorientierte Bilanzierung des gesamten Lebenszyklus des Baustoffes und der damit verbundenen Stoffkreisläufe maßgebend. Durch die Gegenüberstellung von Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen mit konventionellem Stahlbetonbau und gängiger Holzrahmenbauweise werden mit Hilfe von Berechnungen und Informationen aus verschiedenen Datenbanken vergleichende Ergebnisse erzielt, wodurch Aussagen betreffend ökologischer, aber auch bauphysikalischer und architektonischer Aspekte gemacht werden können.

Infolgedessen werden Optimierungsansätze und Anwendungsvorschläge sowie Detailausführungen diskutiert. Diese zeigen, dass durch den Einsatz von Holzleichtbeton eine relativ lange Lebensdauer von Bauteilen erzielt werden kann. Des Weiteren können die Umweltwirkungen während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes besonders gering gehalten und zusätzlich die ästhetischen und bauphysikalischen Anforderungen an die Architektur erfüllt werden. Auch die Verarbeitbarkeit ist unproblematisch und der Einbau sowie die anschließende Demontage können einfach durchgeführt werden. Es handelt sich um einen Baustoff mit großem Potenzial zur weiteren ökologischen und konstruktiven Optimierung, welcher ohne den Einsatz endlicher Ressourcen gut funktionieren kann.

ABSTRACT

Due to the ongoing scarcity of finite resources such as sand and gravel, which are currently an integral part in the building industry, the search for alternative materials is essential. A well-reasoned choice of ecologically sustainable building materials is the easiest way for architects and planners to introduce resource-saving design strategies in a building. This thesis shows how resource-efficient design can succeed particularly well by using wood-based concrete structures as an example. Therefore a practice-orientated and application-driven assessment for the whole lifecycle of a building material is necessary. Through the comparison of wood-based concrete constructions with conventional reinforced concrete and common timber frame construction, with calculations using information from various databases, statements concerning ecological, but also structural-physical and architectural aspects can be made.

Consequently, optimisation approaches and application suggestions as well as detailed explanations are discussed. With wood-based concrete, which is a very long-living material, lasting buildings can be designed. Furthermore, the environmental impact through the entire lifecycle of a building can be kept low and additionally the aesthetic requirements for good architecture can be achieved. Even installations and dismounting can be done easily. Overall the results show that it is a building material with great potential for further environmental and structural optimisation, which can work well with a less intense use of finite resources.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	7
1.1	MOTIVATION	8
1.2	ENTSTEHUNG DES ROHSTOFFES SAND	10
1.2.1	RELEVANTE ENTNAHMEN AUS DER UMWELT	11
1.2.1.1	AUSBLICK UM DEN MASSIVEN SANDABBAU ZU MINDERN.....	12
1.3	AUFBAU UND ZIELSETZUNG	13
2	GRUNDLAGEN HOLZLEICHTBETON – VERBUNDBAUWEISE.....	14
2.1	AUSGANGSSTOFFE UND MATERIALZUSAMMENSETZUNG	14
2.1.1	FÜR DIE PRODUKTION GEEIGNETE HÖLZER.....	14
2.1.2	FÜR DIE PRODUKTION GEEIGNETE ZEMENTE	15
2.2	EIGENSCHAFTEN VON HOLZLEICHTBETON	16
2.3	VERARBEITUNG UND ANWENDUNGSBEREICHE VON HOLZLEICHTBETON	18
2.3.1	ZEMENTGEBUNDE HOLZWOLLEPLATTEN	19
2.3.2	ZEMENTGEBUNDENE HOLZSPANPLATTEN.....	20
2.3.3	HOLZBETON – MANTELSTEINE.....	20
2.4	HOLZANTEIL IN HOLZLEICHTBETONPRODUKTEN.....	21
3	LEBENSZYKLUS.....	23
3.1	PRODUKTIONSPHASE	26
3.1.1	NACHWUCHSPOTENZIAL	27
3.1.1.1	EINWIRKUNGEN AUF DAS NACHWUCHSPOTENZIAL	27
3.1.1.2	DATEN ZUR BERECHNUNG DES NACHWUCHSPOTENZIALS	29
3.1.2	UMWELTEFFEKTE BEI DER ZEMENTHERSTELLUNG.....	31
3.1.2.1	EMISSIONEN BEI DER ZEMENTHERSTELLUNG.....	32
3.1.2.2	SUBSTITUTIONSPROZESSE UND MODERNE TECHNOLOGIEN	32
3.1.2.3	SLAGSTAR	35
3.1.3	REDUKTION VON BAUSTELLENABFÄLLEN	36
3.1.4	TRANSPORT	36
3.2	DAUERHAFTIGKEIT UND INSTANDHALTUNG	37
3.3	END-OF-LIFE PHASE.....	39
3.3.1	THERMISCHE VERWERTUNG VON HOLZLEICHTBETON.....	42
3.3.2	TRENNBARKEIT UND DEMONTAGE VON HOLZ-HOLZLEICHTBETON- VERBUND-KONSTRUKTIONEN.....	44
3.3.2.1	VERBINDUNG DURCH VERKLEBUNG	45
3.3.2.2	VERBINDUNG MIT KUNSTSTOFFMATTE	46
3.3.2.3	VERBINDUNG DURCH VERSCHRAUBUNG	46
3.3.2.4	VERBINDUNG DURCH VERSCHRAUBUNG UND LATTUNG.....	47
3.3.2.5	MANTELBETONELEMENTE.....	48
3.3.3	DEPONIERUNG	48
3.4	LEITLINIEN ZUR ÖKOLOGISCHEN OPTIMIERUNG	49
4	SZENARIO - ANALYSE	50
4.1	VERWENDETE DATENBANKEN	50
4.1.1	BAUBOOK.....	50
4.1.2	DATAHOLZ.....	50

4.1.3	ÖKOBAU.DAT	51
4.2	BEGRIFFSDEFINITIONEN	51
4.3	BEWERTUNGSKRITERIEN	53
4.4	PROJEKTBSCHREIBUNG DES FALLBEISPIELS.....	54
4.5	BAUTEILANALYSE	56
4.5.1	AUSSENWAND	56
4.5.1.1	AUSSENWAND IN STAHLBETON- UND HOLZRAHMENBAUWEISE	57
4.5.1.2	AUSSENWAND IN HOLZLEICHTBETON-VERBUNDBAUWEISE	61
4.5.1.3	FLÄCHENBILANZ	66
4.5.1.4	MASSENBILANZ	67
4.5.1.5	EINFLUSS DER ROHDICHTE	68
4.5.1.6	ENERGIEEFFIZIENZ.....	70
4.5.1.7	ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG NACH OI3	71
4.5.1.8	LEBENSDAUER	73
4.5.1.9	LEBSENDE.....	74
4.5.1.10	IDEALE DÄMMDICKE	74
4.5.1.11	ZUSAMMENFASSUNG	75
4.5.2	INNENWAND	76
4.5.2.1	INNENWANDAUFBAU IN STAHLBETON- UND HOLZRAHMENBAUWEISE.....	78
4.5.2.2	INNENWANDAUFBAU IN HOLZLEICHTBETON-VERBUNDBAUWEISE.....	80
4.5.2.3	BRANDVERHALTEN VON HOLZLEICHTBETON-VERBUNDKONSTRUKTIONEN BEI ANWENDUNG IM INNENRAUM	81
4.5.2.4	MASSENBILANZ	82
4.5.2.5	OI3 KLASIFIZIERUNG	83
4.5.2.6	LEBENSDAUER	84
4.5.2.7	LEBSENDE.....	84
4.5.2.8	ZUSAMMENFASSUNG	85
4.5.3	DECKEN	86
4.5.3.1	ROHBAUDECKENAUFBAUTEN IN STAHLBETON – UND HOLZRAHMENBAUWEISE	87
4.5.3.2	ROHBAUDECKENAUFBAUTEN IN HOLZLEICHTBETON – VERBUNDBAUWEISE	89
4.5.3.3	OI3 KLASIFIZIERUNG	90
4.5.3.4	LEBENSDAUER	91
4.5.3.5	ZUSAMMENFASSUNG	91
5	ARCHITEKTURANALYSE UND OPTIMIERUNGSVORSCHLÄGE	92
5.1	GRUNDRISSGESTALTUNG	92
5.2	ENERGETISCHE OPTIMIERUNG	93
5.3	FASSADENGESTALTUNG	93
5.4	INNENRAUMGESTALTUNG	96
5.5	DECKENAUFBAUTEN	97
5.6	FALLBEISPIEL URBANEUM KLAGENFURT	98
5.6.1	OBJEKTBSCHREIBUNG	98
5.6.2	AUFBAUTEN	99
5.6.3	OPTIMIERUNGSVORSCHLAG.....	100
5.6.3.1	ANWENDUNG VELOX MANTEL BETONSYSTEME.....	100
5.6.3.2	HOLZLEICHTBETON - ANWENDUNGSVORSCHLAG	101
5.6.4	DETAILAUSFÜHRUNGEN	102
5.6.4.1	ANSCHLUSS ZWISCHENDECKE – AUSSENWAND	103
5.6.4.2	ANSCHLUSS AUSSENWAND – INNENWAND.....	104

5.6.4.3	FENSTERANSCHLUSS	105
5.6.4.4	ANSCHLUSSDETAIL SOCKEL	106
6	ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK.....	107
6.1	WEITERFÜHRENDE METHODEN ZUR ÖKOBILANZIERUNG	108
7	ANHANG	110
7.1	ZUSAMMENFASSUNG DER ANALYSIERTEN BAUTEILE	110
7.2	AUFBAUTEN URBANEUM KLAGENFURT	112
8	VERZEICHNISSE	113
8.1	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	113
8.2	LITERATURVERZEICHNIS	115
8.3	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	119
8.4	TABELLENVERZEICHNIS	122

1 EINLEITUNG

Der Mensch verbringt den Großteil seines Lebens in der von ihm gebauten Umgebung. Dementsprechend wird durch die Errichtung von Gebäuden und Infrastruktur sowie die damit verbundene Ressourcennutzung das umgebende Ökosystem weitgehend beeinflusst.

Grundsätzlich wird zwischen den zwei Begriffen „Baubiologie“ und „Bauökologie“ unterschieden, welche aus den drei „Schutzzielen des ökologischen Bauen“ [1] hervorgehen:

- Schutz der menschlichen Gesundheit
- Schutz des Ökosystems
- Schutz der Ressourcen

Die Baubiologie definiert die Wechselwirkungen zwischen dem Menschen und den Gebäuden in denen er sich aufhält mit dem Ziel die menschliche Gesundheit zu schützen. Im Gegensatz dazu ist als Schutzziel der Bauökologie die gesamte Umwelt definiert. Strategien, um die verschiedenen Umweltwirkungen, welche in **Abbildung 1** dargestellt werden, so gering wie möglich zu halten, müssen entwickelt werden. Der nachhaltige Umgang mit Ressourcen ist die gemeinsame Absicht und Bindeglied der beiden Themengebiete.

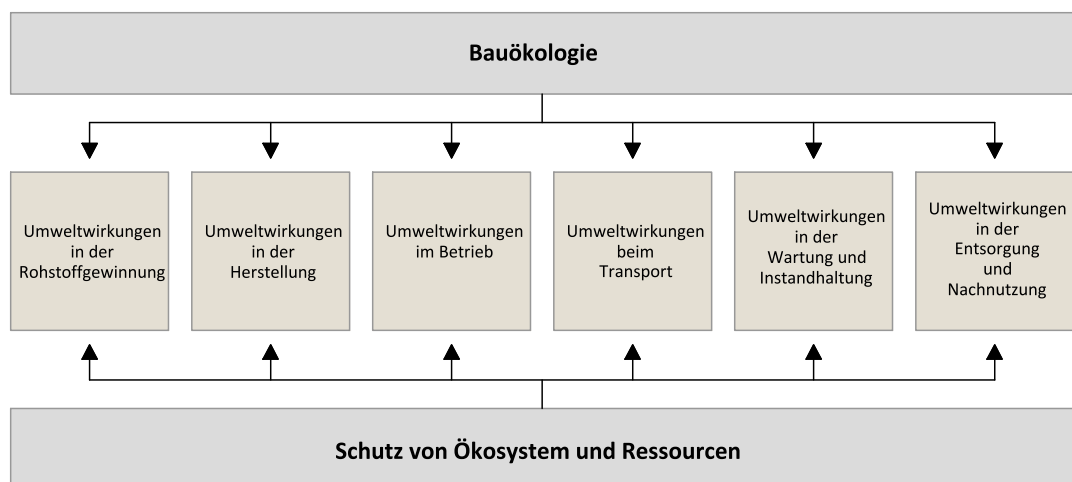


Abb. 1: Ziele und Handlungsfelder der Bauökologie [2]

Die Bauindustrie ist allgemein der größte Ressourcenverbraucher und bietet dadurch hohes Optimierungs- und Verbesserungspotenzial in Bezug auf die Reduzierung von Flächen-, Material- und Energieverbrauch. Durch die Verwendung neuer, nachhaltiger Produkte sowie die Steigerung der Lebensdauer und das erhöhte Potenzial zur Wiederverwertbarkeit von Baustoffen können ressourceneffiziente Gebäude errichtet werden und der gesamte Materialeinsatz an einem Bauwerk reduzieren werden [2].

Nichts war im Bauwesen jemals wichtiger als die Überlegungen zu verschiedenen Materialanwendungen und bis jetzt ist das Bauen untrennbar mit der Nutzung von Baustoffen verknüpft. Heute sind kaum noch Gebäude zu finden welche schlicht aus einem einzigen Material konstruiert wurden. Mit Beginn der industriellen Revolution wurden neue Möglichkeiten für die Herstellung und den Einsatz sowie die Verarbeitung verschiedenster Substanzen geschaffen, wodurch gegenwärtig ein bereits kaum überschaubares Materialangebot zu Verfügung steht. Doch zwischen den unterschiedlichsten Baustoffen gibt es drastische Unterschiede, denn nicht jeder bringt einen ressourcenschonenden Umgang mit sich. Gerade dieser Aspekt ist derzeit jedoch wichtiger als je zuvor, denn noch nie war die Bevölkerungsdichte so hoch wie heute und noch nie wurde so viel gebaut wie in jüngster Zeit. Das bedeutet auch, dass noch nie zuvor eine so hohe Menge an Ressourcen verbraucht wurde wie es gegenwärtig der Fall ist. Aber nicht alle dieser Ressourcen sind in unerschöpflichem Maße auf der Erde vorhanden. Einige sind endlich.

Um dieses breit gefächerte Thema des nachhaltigen Planes und Konstruierens einzugrenzen, wird in dieser Arbeit hauptsächlich aufgezeigt inwieweit ein schonender und effizienter Ressourcenumgang am Beispiel von Holzleichtbeton - Verbundbauweise gelingen kann. Es soll herausgearbeitet werden in welchem Maß die Phasen der Herstellung, Nutzung und das Lebensende einzelner Bauteile funktionieren können und welche Vorteile, aber auch Nachteile verglichen mit konventionellen Bauweisen zu erwarten sind.

1.1 MOTIVATION

Die Bauindustrie hat einen riesigen Anteil am Verbrauch von Rohstoffen und ist an der generellen Abfallproduktion sehr stark beteiligt. Der Hauptteil aller mineralischen Rohstoffe wird zu Baumaterialien verarbeitet und die Nutzung übersteigt schon jetzt die Regenerationszeit unserer Erde. Durch die Verknappung der Ressourcen besteht eine noch nie dagewesene Dringlichkeit, welche einen sparsamen und nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen und Energie der Erde fordert. Für Architekten beginnt ressourcenschonendes Bauen bereits bei der Planung. Die Konstruktion eines Gebäudes sowie die ein-

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

zusetzenden Baumaterialien und angewandten Techniken sind stark voneinander abhängig und erfordern eine vorausschauende Gesamtplanung. In der folgenden **Abbildung 2** ist zu erkennen, dass vor allem der Verbrauch von Baumineralien wie Sand oder Kies, in den letzten Jahrzehnten rasant angestiegen ist.

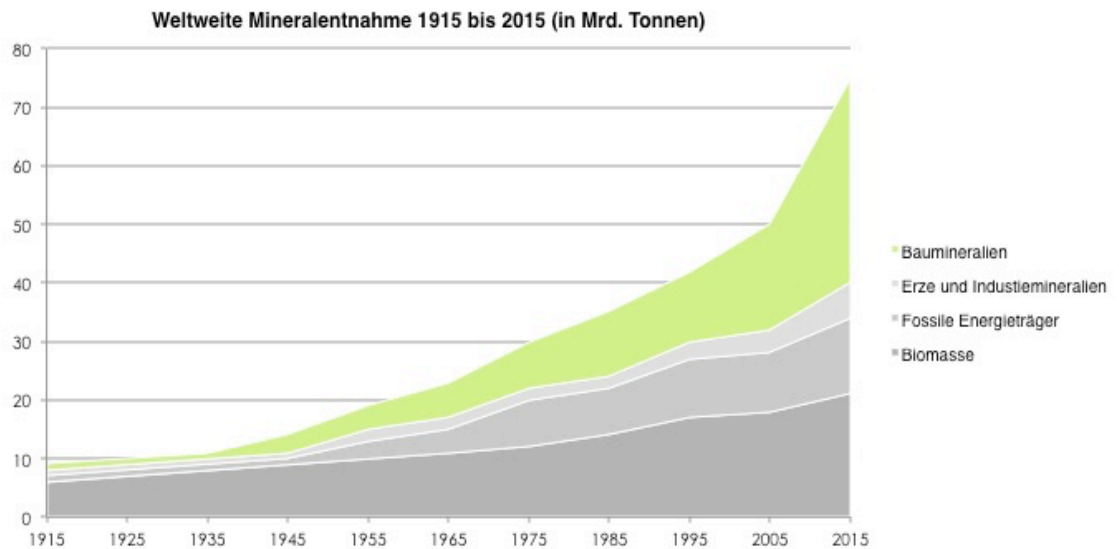


Abb. 2: Globale Entnahmen an Mineralien in den letzten 100 Jahren [58]

Sand ist ein begehrter, natürlich vorkommender und kostengünstiger Rohstoff, der zur Herstellung von unzähligen Dingen, welche uns Menschen durch den Alltag begleiten, verwendet wird, aber hauptsächlich, wie schon erwähnt, in der Bauindustrie in unersättlichem Maße zum Einsatz kommt. Doch Sand ist nicht gleich Sand. Im Bauwesen können nur bestimmte Quarzsande mit speziellen Kornstrukturen und Korngrößen genutzt werden, welche in Küstennähe unter anderem unsere Strände bilden. Der immer weiter steigende Verbrauch von Sand vom Meeresboden und den Strandgebieten führt dazu, dass ganze Inseln, wie zum Beispiel in Indonesien wo bereits mehrere Gebiete betroffen sind, zu verschwinden beginnen, Menschen die Grundlage für ihre gesicherte Existenz verlieren und der Lebensraum vieler Tier- und Pflanzenarten zerstört wird [3]. Der bekannte Ausspruch „das gibt es ja wie Sand am Meer“ wird wohl bald nicht mehr zutreffend sein.

Um diesen Problemen entgegenzuwirken, wird mehr und mehr nach Alternativen zu herkömmlichem Beton, dem Baustoff mit dem höchsten Verbrauch an Sand, gesucht. Auch neue innovative Baumaterialien werden entwickelt, um ressourcensparende Architektur zu planen.

1.2 ENTSTEHUNG DES ROHSTOFFES SAND

Der lange Entstehungsweg von Sand beginnt mit der physikalischen und chemischen Verwitterung von Gesteinen, wodurch diese in einzelne Bestandteile zerbrechen, die dann abtransportiert und anschließend als klastische Sedimente abgelagert werden. Sand ist so ein Sediment aus Komponenten mit einer Korngröße zwischen 0.063 mm und 2.0 mm. Je nach Zusammensetzung können verschiedene Arten von Sand unterschieden werden. Mineralogisch kann ein Sandkorn sehr unterschiedlich aufgebaut sein, wobei es sich um Bruchstücke von Kalkstein, Schieferfragmente, Glimmer, Quarz oder auch Diamanten handeln kann.

Sand entwickelt sich demnach durch Verwitterung und Abtragung von Gesteinen im Gebirge und den darauf folgenden Transport aus höher gelegenen Gebieten in Tieflagen. Hierbei werden die Gesteine durch Regen, Sonne und Wind mechanisch zerkleinert und zum Teil chemisch gelöst, wobei sich die einzelnen Sandkörner in Richtung eines Sees oder des Meeres bewegen [4].

Der Transport in ein Ablagerungsgebiet beginnt sobald bei der Verwitterung Gesteinsbruchstücke und gelöste Ionen entstehen. Die Schwerkraft ist hier der dominierende Faktor, denn mit Ausnahme des Windes und einiger Meeresströmungen wird das Material immer dem natürlichen Gefälle folgend, abwärts transportiert, wobei der Weg schließlich in einem Sedimentbecken endet. Die Bewegungen von Luft und Wasser leisten einen großen Teil des Sedimenttransports. Flüsse zum Beispiel haben eine enorme Transportkapazität, denn sie führen den Meeren und Binnenseen pro Jahr eine Sedimentfracht von circa 25 Milliarden Tonnen an festen und gelösten Substanzen zu. Luftströmungen transportieren ebenfalls Sedimentpartikel, jedoch in viel geringerem Umfang. Je stärker generell die Strömung ist, also je größer ihre Geschwindigkeit und je dichter die fluide Phase, desto mehr Material kann transportiert werden.

Strömungen können anfangs sehr unterschiedliche Korngrößen transportieren, welche schrittweise voneinander getrennt werden, sobald sich die Strömungsgeschwindigkeit ändert. Aus einer starken Strömung wird zuerst eine Kiesschicht abgelagert, während Sand, Silt und Ton noch in Bewegung bleiben. Sandschichten werden allgemein von mäßig starken Strömungen von 20-50 cm/s abgelagert. Die Sedimentkomponenten unterliegen beim Transport durch Wasser- und Luftströmungen in zweifacher Weise der physikalischen Verwitterung:

Zum einen führt sie zu einer Verringerung der Korngröße, zum anderen zur Rundung der ursprünglich kantigen Gesteinsbruchstücke, wobei sich die Form der Körner nicht

1 EINLEITUNG

1.2 ENTSTEHUNG DES ROHSTOFFES SAND

wesentlich ändert. Außerdem wird das Material eher episodisch als kontinuierlich weitertransportiert. So kann ein Fluss bei Hochwasser neben Silt und Ton große Mengen an Sand und auch Kies bewegen. Sobald mit dem Rückgang des Hochwassers zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit wieder abnimmt, setzt er sie wieder ab, doch nur so lange, bis das Material beim nächsten Hochwasser erneut aufgenommen und weitertransportiert wird. In gleicher Weise können starke Winde große Staubmengen tagelang mit sich führen, um sie dann nach dem Abflauen als Sedimentschicht abzulagern.

Je nach Entfernung zum endgültigen Ablagerungsgebiet und der Zahl der Ruhephasen auf dem Weg dorthin, kann die gesamte Zeitspanne, während sich die klastischen Sedimentkomponenten auf Transport befinden, Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende betragen [5].

1.2.1 RELEVANTE ENTNAHMEN AUS DER UMWELT

Doch Sand ist allgegenwärtig und nicht nur im Bauwesen von Bedeutung, denn er ist in unzähligen weiteren Komponenten, die uns durch unseren Alltag begleiten, enthalten. Er wird geschmolzen zu Glas verarbeitet, ist als Siliziumdioxid in Kosmetikartikeln und Waschmittel enthalten oder dient zur Herstellung von Mikroprozessoren für Computer und andere elektronische Geräte. Auch bei allen Verkehrsmitteln ist Sand zum Beispiel im Kunststoff, in den Farben oder in den Reifen enthalten [3].

Doch vor allem für die Bauindustrie ist Quarzsand, also Sand der überwiegend aus Quarzkörnern besteht, ein bedeutender Rohstoff, da dieser sehr robust ist und im Gegensatz zu anderen Sanden nicht leicht zerfällt. Wüstensand kann im Bausektor nicht eingesetzt werden, da die einzelnen Körner durch äolische Strömungen zu sehr abgerundet wurden, sich nicht ineinander verzahnen und somit nicht aneinander haften [4]. Seit rund 150 Jahren wird nun schon Sand mit Zement zu Beton vermischt und in so riesigen Mengen wie keine andere Ressource neben Wasser verbraucht. Insgesamt werden 15 Milliarden Tonnen Sand pro Jahr verarbeitet. Hier einige Beispiele in Zahlen: für ein Haus mittlerer Größe werden 200 Tonnen Sand benötigt, für jeden Kilometer Autobahn mindestens 30 000 Tonnen und für den Bau eines Atomkraftwerkes sogar 12 Millionen Tonnen.

Aus der folgenden **Abbildung 3** ist zu entnehmen, dass die Reserven an Kies und Sand von 1850 bis zur Gegenwart drastisch verkleinert wurden und somit parallel der Kies- und Sandabbau stark gestiegen ist. Dies ist auf die vermehrte Bautätigkeit, welche rund um das Jahr 1950 deutlich sichtbar wird, zurückzuführen.

1 EINLEITUNG

1.2 ENTSTEHUNG DES ROHSTOFFES SAND

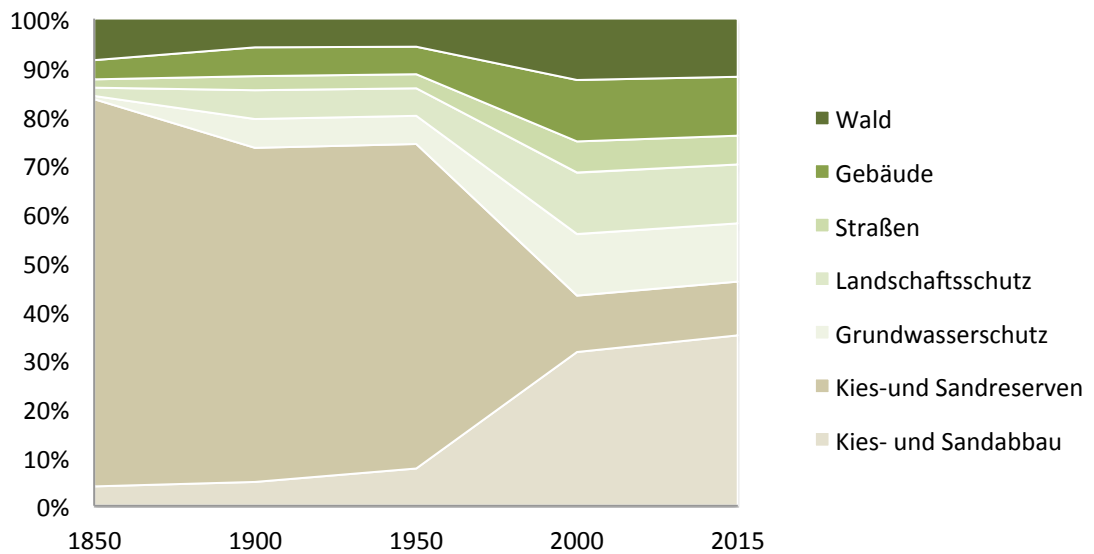


Abb. 3: Entwicklung der Kies- und Sandreserven sowie deren Abbau und beeinflussende Faktoren seit dem Jahr 1850 [2]

Sand ist keine nachhaltige Ressource und die Nebenwirkungen des enormen Abbaus sind bereits spürbar. Durch das Ausbaggern von Flüssen kommt es vermehrt zu Hochwasser und durch Tagebau werden ganze Landschaften zerstört. Das vermehrte Abpumpen von Meeresboden durch Schwimmbagger, welche bereits zu Tausenden im Einsatz sind, führt zum Sterben unzähliger lebender Organismen, die wichtige Elemente des marinen Ökosystems bilden. Der Sand wird anschließend auf den riesigen Schiffen gehortet, um dann teuer an Baufirmen verkauft zu werden. Bereits auf jedem Kontinent der Erde wird dieser abgegraben. Des Weiteren wird das natürliche Gleichgewicht zerstört, das Wind, Wellen und Wasserströmungen zusammenwirken und somit Inseln entstehen lässt. Durch den Abbau am Meeresboden wird der Sand an der Oberfläche in Bewegung gesetzt, um die abgesaugten Flächen wieder aufzufüllen und somit drohen immer mehr Inseln nach und nach zu verschwinden. In Indonesien beispielsweise wurden aus diesem Grund bereits 25 Inseln von der Weltkarte gestrichen [3] [6] [7].

1.2.1.1 AUSBLICK UM DEN MASSIVEN SANDABBAU ZU MINDERN

Um den immer kritischer werdenden Sandmangel zu mindern, ist es sinnvoll, den Bauschutt ganzer Gebäude und vor allem Glas wieder zurück in Sand umzuwandeln. In manchen Teilen der Erde, wie zum Beispiel auf verschiedenen Pazifikinseln, wird Altglas

nahe dem Meer abgelagert und dort durch die natürlichen Strömungen des Wassers zu Sandstränden recycelt [7].

Doch die dringendste Aufgabe unserer Zeit ist ein sparsamer Umgang mit Rohstoffen sowie deren effizienter Einsatz im Bauwesen. Es gibt viel Bedarf, aber auch großes Potenzial zur Optimierung des Ressourceneinsatzes.

Als Beispiel für eine Alternative zu herkömmlichen Bauweisen, wie zum Beispiel der Stahlbetonbau, wo riesige Mengen von Sand und anderen nicht nachwachsenden Rohstoffen verbraucht werden, soll der Einsatz von Holzleichtbeton erläutert werden.

1.3 AUFBAU UND ZIELSETZUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, bei ganzheitlicher Betrachtung von der Herstellung, Instandhaltung und dem Lebensende eines Gebäudes aufzuzeigen, inwieweit eine ressourceneffiziente Bauweise mit Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen besonders gut gelingen kann. Dabei sollen zuerst die Ergebnisse aus bereits vorhandener Literatur, bezogen auf den Lebenszyklus von Bauteilen aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise, diskutiert werden. Dies beginnt beim notwendigen Rohstoffabbau und der darauf folgenden Produktionsphase bis hin zur Lebenserwartung der eingebauten Bauteile sowie der anschließenden Abbruch- und Entsorgungsphase.

Anschließend folgt eine systematische Analyse der ökologischen Eigenschaften und Umweltwirkungen des Materials im Vergleich mit Stahlbetonbauweise und Holzrahmenbauweise unter definierten Bewertungskriterien. Damit verbunden sind auch statische und konstruktive Parameter, aber ebenso bauphysikalische und optische Eigenschaften, welche ebenfalls Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der Bauteile haben. Alle diese Funktionen werden einander gegenübergestellt, um Stärken und Potenziale, aber auch Schwächen und etwaige Gefahren aufzuzeigen.

Nach der Darstellung der Ergebnisse und deren Bewertung, werden Optimierungen der Produkte und deren Herstellung vorgeschlagen. Dabei werden für den folgenden Anwender einfach nutzbare Näherungsansätze zur Beurteilung der Bauteile in Holzleichtbeton-Verbundbauweise erstellt. Ziel ist es, für Architekten und Planer ökologisch nachhaltig optimierte Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

2 GRUNDLAGEN HOLZLEICHTBETON – VERBUNDBAUWEISE

Vor allem durch die Ressourcenverknappung von Sand, aber auch wegen der deutlichen Gewichtsreduktion bei Wand- und Deckensystemen, beschäftigt man sich seit einigen Jahren intensiv mit dem Einsatz von Holzleichtbeton, einer Mischung aus Holz und Zement [8].

Holz ist seit jeher ein wichtiger Baustoff, während Beton heutzutage das am häufigsten eingesetzte Baumaterial ist. Führt man zwei oder mehrere Ausgangsmaterialien zusammen, erhält man einen neuen Werkstoff mit eigenen stofflichen und geometrischen Eigenschaften. Holzleichtbeton ist so ein Verbund- oder Kompositwerkstoff. Die guten Eigenschaften von Zement, welcher feuchtigkeitsunempfindlich, nicht brennbar und schimmelresistent ist sowie von Holz, welches leicht, elastisch und gut zu verarbeiten ist, werden in einem neuen Baustoff kombiniert [9]. Das Material ist aufgrund seiner relativ geringen Rohdichte den Leichtbetonen zuzuordnen [10]. In der Leichtbetonindustrie werden als Betonzuschlag Naturbims, Schaumlava, Blähton, Blähgas oder Perlite eingesetzt, bei denen es sich um nicht nachwachsende Rohstoffe handelt [11]. Wesentlich ist hervorzuheben, dass beim Holzleichtbeton die Gesteinskörnung, welche bei herkömmlichem Beton und Leichtbeton unerlässlich ist, durch den nachwachsenden Rohstoff Holz ersetzt wird [9].

2.1 AUSGANGSSTOFFE UND MATERIALZUSAMMENSETZUNG

Holzleichtbeton besteht aus einem Zuschlag aus Holzspänen (oder Sägemehl), Zement, Wasser und eventuell Additiven. Der organische Zuschlagstoff Holz bedingt einige konstruktive und funktionelle Vorteile. Dieser wird als Sekundärrohstoff aus Abfällen von Sägewerken sowie aus Produkten der Forstwirtschaft gewonnen.

2.1.1 FÜR DIE PRODUKTION GEEIGNETE HÖLZER

Generell bildet jede Holzart spezifische Zellen aus, welche sich in Größe und Aufbau deutlich unterscheiden können. In diesen verschiedenen Charakteristiken der Feinstruktur und dem chemischen Bestandteilen liegen die Gründe für die unterschiedlichen Eigenschaften eines Holzes. Um festzustellen ob sich ein Holz für die Verarbeitung

zu Holzleichtbeton eignet, wird oft die Hydratationstemperatur gemessen, wobei das Höchstmaß der Wärmeentwicklung bei Mischungen mit Holzbestandteilen bestimmt und mit einer Referenzgröße verglichen wird. Allgemein sind Hölzer mit einem hohen Gehalt an wasserlöslichen Stoffen für die Produktion zementgebundener Werkstoffe meistens nicht so geeignet wie Holzarten mit einem geringeren Lösungsanteil. Organische Stoffe wie Zersetzungsprodukte des Holzes, Fette oder Harze, Holzsäuren sowie alkali- und wasserlösliche Bestandteile können das Mineralgemisch des Zements stören. Unter den wasserlöslichen Stoffen sind verschiedene Zucker, Stärke und Phenole ungelegen, da diese den Vorgang der Zementabbindeung behindern oder sogar vollkommen unterbinden. Verwendet werden hauptsächlich Nadelhölzer wie Tanne und Fichte, zum Teil aber auch Laubhölzer wie Birke, Esche und Linde, wobei aus ökologischer Sicht vor allem auf den Einsatz heimischer Hölzer geachtet werden sollte. Nadelholz hat im Vergleich zu Laubholz einen niedrigeren Anteil an wasserlöslichen Zuckern und ist dadurch für die Anwendung vorteilhafter, da sich diese negativ auf den Zementabbindevorgang auswirken können.

Neben der Auswahl einer geeigneten Holzart ist die Vorbehandlung der Holzspäne wesentlich, denn dadurch soll die Menge an wasserlöslichen Zuckern reduziert werden und eine erhöhte Oberflächenbindung sowie eine verringerte Dimensionsänderung der Späne und Fasern hervorgerufen werden. Durch Bearbeitung der Holzspäne mit Mineralisierungsadditiven oder durch die Verwendung spezieller Schnellzemente lässt sich der verzögernde Einfluss des Holzzuckers auf den Abbindevorgang des Zements verhindern [8] [9] [12].

2.1.2 FÜR DIE PRODUKTION GEEIGNETE ZEMENTE

Grundsätzlich sind nicht alle Zementsorten zur Herstellung von Holzleichtbetonwerkstoffen einsetzbar. Besonders geeignet sind Zemente mit einer hohen Bindekraft, einem hohen Wasserrückhaltevermögen, einer geringen Neigung zur Entmischung und einer einfachen Verarbeitbarkeit. Die Einsetzbarkeit wird außerdem durch eine erhöhte Menge an hydraulischen Bindemitteln verbessert. Verschiedene Portlandzemente (CEM I), die durch Vermahlung von Klinker und Anhydrit produziert werden, eignen sich am Besten zur Anwendung. Dazu gehören folgende spezifische Portlandzemente:

- C3A (Tricalciumaluminat) – Zemente:
Die C3A – Klinkerphase, welche die Klinkerphase mit der höchsten Reaktionsgeschwindigkeit ist, führt zur Absorption, der durch Zucker hervorgerufenen Inhibition der Zementhydratation.

- Alkaliarme Zemente:
Bei Zementen mit hohem Alkaligehalt kommt es zu einer stufenweisen Umwandlung und Abspaltung der im Holz enthaltenen pyrolytischen Zersetzung. Dies hat eine ähnliche Wirkung wie die abgebauten monomeren Zucker. Im Vergleich zu Zementen mit normalem Alkaligehalt wird also sichtbar, dass alkaliarme Zemente geringere Abbindestörungen hervorrufen.
- Zemente mit hohen Frühfestigkeiten:
Zemente mit einer kurzen Erhärtungsdauer sind für die Herstellung von Holzleichtbetonelementen besser geeignet als diejenigen mit weniger hohen Frühfestigkeiten [12].

2.2 EIGENSCHAFTEN VON HOLZLEICHTBETON

Holzleichtbeton ist um einiges leichter als gängiger Beton und weist zu dem bessere wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften auf. Durch die Verwendung des Kompositwerkstoffes wird zum einen eine verbesserte Ausnutzung des Baumholzes angestrebt, zum anderen wird eine Optimierung bauphysikalischer und baukonstruktiver Werte unter Beibehaltung der positiven Eigenschaften des Holzes verfolgt [8] [12].

Zusammenfassend sind der Literatur nach folgende Vorteile bei der Verwendung von Holzleichtbeton zu nennen:

- Geringes Gewicht
- Trocknet schnell aus
- Vorfertigung als Platte möglich
- Gute Bearbeitbarkeit
- Kaum Wärmeleitung bei guter Atmungsfähigkeit
- Verwertung von Abfallprodukten wie Holzresten
- Gute Werte bezüglich Brand- und Schallschutz

Nachteilig ist, dass die Bearbeitbarkeit von den Dimensionen und der Menge der Späne abhängt und nicht alle Holzarten gleich gut für den Einsatz geeignet sind. Außerdem kann ein hoher Wasser-Zementwert (W/Z – Wert), welcher mit einem Wert zwischen 0,55 und 0,65 schon relativ hoch ist, unerwünschte Eigenschaften hervorrufen. Schwin-

2 GRUNDLAGEN HOLZLEICHTBETON – VERBUNDBAUWEISE

2.2 EIGENSCHAFTEN VON HOLZLEICHTBETON

den und schnelleres Austrocknen werden hervorgerufen, wodurch es zur Rissbildung kommt, aber auch die Festigkeit des Betons nimmt mit einem zunehmenden W/Z-Wert ab.

Des Weiteren kann es zum sogenannten Vorgang des „Ausblutens“ kommen. Aufgrund der sich absetzenden Zementkörner, neigen diese in der Erhärtungsphase bei dünnem Zementleim dazu, Wasser abzugeben. An der *École polytechnique fédérale de Lausanne* in der Schweiz wurden Anfang der 1990er Jahre unter der Leitung von J. Natterer Forschungen durchgeführt, die zeigen, dass der W/Z-Wert primären Einfluss auf die Festigkeit und die Verarbeitbarkeit von Holzleichtbeton hat. Aus den Prüfberichten wird sichtbar, dass die Festigkeit kontinuierlich durch Erhöhung des Zementgehaltes steigt. Bei einem W/Z-Wert zwischen 0,55 und 0,57 ist das Maximum erreicht, während es bei einem Wert von über 0,65 wieder zu einem raschen Abfall der Festigkeitskurve kommt. Der Zementgehalt wirkt sich dabei besonders auf die Biegezug- und Druckfestigkeit, sowie auf das Elastizitätsmodul des Holzleichtbetons aus [13] [14].

	Rezeptur 1	Rezeptur 2	Rezeptur 3	Rezeptur 4
Rohdichte [kg/m ³]	700	850	1300	1450
W/Z-Wert	1,75	1,09	0,65	0,60
Wassergehalt [kg/m ³]	525	490	520	600
Zementgehalt [kg/m ³]	300	450	800	1000
Holzgehalt [kg/m ³]	280	200	70	50
Zuschlag	Nadelholz	Nadelholz	Nadelholz	Nadelholz
Additive / Zusatzstoffe	Keine	Keine	Keine	Keine
E-Modul [N/mm ²]	1300	1800	5000	6500
Druckfestigkeit [N/mm ²]	1,50	4,20	13,00	15,00
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	0,60	1,50	4,50	5,20
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,10	0,21	0,55	0,65

Tab. 1: Eigenschaften unterschiedlicher Holzleichtbeton-Rezepturen [13]

In der vorangegangenen **Tabelle 1** sind materialspezifische Kenndaten von vier verschiedenen Materialrezepturen aufgezeigt. Die W/Z - Werte variieren zwischen 1,75 und 0,60, während die Biegezugfestigkeiten zwischen 0,60 N/mm² und 5,20 N/mm², die

Druckfestigkeiten zwischen $1,50 \text{ N/mm}^2$ und $15,00 \text{ N/mm}^2$, sowie die Elastizitätsmodule zwischen 1300 N/mm^2 und 6500 N/mm^2 liegen [13] [14].

Wesentlichen Einfluss hat auch das Holz/Zementverhältnis. Holz als Zuschlagsstoff beeinflusst stark die statischen Eigenschaften des Materials, denn durch Zunahme des Holzanteils, nehmen die Festigkeitswerte ab. Im Vergleich zu klassischen Betonmischungen weisen Holzleichtbetone einen höheren Zementgehalt auf. Durch die negative Einwirkung des Holzzuckers auf den Abbindevorgang und die große Oberfläche des Holzanteils, ist bei bisherigen Mischungen noch eine relativ hohe Zugabe an Zement erforderlich [10].

2.3 VERARBEITUNG UND ANWENDUNGSBEREICHE VON HOLZLEICHTBETON

Holzleichtbetone können mit unterschiedlichen mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften produziert werden, wodurch eine relativ große Auswahl an Anwendungsbereichen entsteht. Im Brandschutzbereich erreichen Mischungen mit einem Holzanteil bis ungefähr 20 % die Baustoffklasse A2. Dadurch ergeben sich vor allem für den Innenraum Möglichkeiten für den Einsatz als baulicher Brandschutz. In Untersuchungen zeigten Bauteile für Decklagen von Unterdecken und als Wandbekleidung von Vorsatzschalen, dass Holzleichtbeton bezüglich Stabilität, Kantenfestigkeit, sowie der Struktur der Oberfläche für den Innenraum gut anwendbar ist. Auch im Bereich der Fassadengestaltung ist Holzleichtbeton gut geeignet. Hier ist vor allem aufgrund energetischer Aspekte der Wärmeschutz stark zu berücksichtigen. Durch den organischen feinen Zuschlag lassen sich erstklassige Oberflächen gestalten, die durch weitere mögliche Zusätze akzentuiert und verbessert werden können. Der Werkstoff ist folglich auch für sichtbare Anwendungen einzusetzen [10].

In der Literatur sind verschiedene Einteilungen von Produkten aus Holzbeton zu finden, welche in der folgenden **Tabelle 2** zusammengefasst dargestellt werden. Nach *Sarja* [15] können Holzbetone abhängig von ihrer Rohdichte in vier unterschiedliche Klassen eingeteilt werden:

- Zementgebundener Hackspan: 400 bis 600 kg/m^3 , kurze Späne bis $2,0 \text{ cm}$ Länge
- Zementgebundene Holzwole: 350 bis 600 kg/m^3 , Holzfasern bis $8,0 \text{ cm}$ Länge
- Zementgebundener Holzpartikelbeton: 1000 bis 1200 kg/m^3 , kurze Späne bis $2,0 \text{ cm}$ Länge
- Konstruktionsbetone mit Holzfasern: 1200 bis 2000 kg/m^3 , kurze Späne bis $3,0 \text{ cm}$ Länge

In Mitteleuropa werden zementgebundener Hackspan und zementgebundene Holzwolle am häufigsten eingesetzt. Unter „Zementgebundenen Holzspanplatten“ sind praktisch „Holzspanplatten“ zu verstehen. Auch „zementgebundene Holzpartikel-Betone“ und „Konstruktionsbetone mit Holzfasern“ sind „Holzspanplatten“, haben jedoch einen höheren Gehalt an Bindemitteln und daraus resultierend eine höhere Dichte. „Zementgebundene Holzwolleplatten“ werden auch als „Holzwolleleichtbauplatten“ bezeichnet [14].

	Rohdichte [kg/m ³]	Länge der Holzspäne bzw. -fasern [cm]
Zementgebundener Hackspan	400 - 600	bis 2,0
Zementgebundene Holzwolle	350 - 600	bis 8,0
Zementgebundener Holzpartikelbeton	1000 - 1200	bis 2,0
Konstruktionsbetone mit Holzfasern	1200 - 2000	bis 3,0

Tab. 2: Unterschiedliche Holzbetonprodukte und deren Werte für die Rohdichte und die Abmessungen der Holzspäne bzw. Holzfasern

2.3.1 ZEMENTGEBUNDE HOLZWOLLEPLATTEN

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde in Wien erstmals das Patent mit dem Namen „Magnesium gebundene Holzwolleplatten“ ausgestellt und so die Grundlage für die heute verwendeten Holzwolleleichtbauplatten gesetzt. Zwei Jahre später ging das Produkt unter dem Namen „Heraklith“ in Serienproduktion. Ende der 1920er wurde das als Bindemittel eingesetzte Magnesium erstmals durch Portlandzement ersetzt [16].

Hergestellt werden die Platten aus einem Gemisch aus Holzwolle, welche großteils aus Fichte und Kiefer gewonnen wird und mineralischem Bindemittel wie Zement oder Magnesit. Die Hölzer werden zu langen, wellenförmigen und ineinander verknäulten Fasern gehobelt, welche hauptsächlich 0,03 bis 0,40 mm dick und zwischen 50 und 80 mm lang sind [17]. Vor der Verarbeitung zu Dämmplatten werden die Hölzer gelagert, um die enthaltenen Zucker und Stärke zu reduzieren. Die Holzwolle kann zusätzlich über Nacht in kaltem Wasser getränkt werden, um die löslichen kurzkettigen Zucker und andere störende Stoffe, welche sich im Kernholz befinden, herauszulösen. Auch eine Vorbehandlung mit Kalziumchlorid ist möglich. Anschließend wird die Holzwolle luftgetrocknet und zur weiteren Verarbeitung im Verhältnis 2:1 bis 1:1 mit Zement

vermischt [18]. Über Pressdruck werden der Grad der Verdichtung und die Festigkeit des Werkstoffes bei der Erzeugung gesteuert. Holzwolleleichtbauplatten haben normalerweise eine vergleichsweise geringe Dichte (rund 400 kg/m^3), eine geringe Wärmeleitfähigkeit (rund $0,18\text{-}0,35 \text{ W/mK}$) und gute Schalldämmeigenschaften. Außerdem gelten sie als guter Putzträger und werden häufig zu Schall- und Brandschutz sowie zu Dämmzwecken eingesetzt [14]. Als Putzträger im Außenbereich und als feuerfeste Beplankung im Innenbereich werden Holzwolleleichtbauplatten vor allem im Holzbau verwendet. Aus ökologischer Sicht bringt das Material einige Vorteile. Es kann gemahlen und somit als Basis für neue Zementprodukte wiederverarbeitet werden. Die Platten eignen sich auch zur Kompostierung, wobei die organischen Inhaltsstoffe verrotten und der Zement für eine Erhöhung des Sauerstoffniveaus sorgt. Dieser Effekt beschleunigt den Zersetzungsprozess und hat somit eine zusätzlich günstige ökologische Auswirkung. Das Material sollte dabei auf jeden Fall frei von Verbindungsmitteln wie Schrauben oder Nägeln sein [19].

2.3.2 ZEMENTGEBUNDENE HOLZSPANPLATTEN

Zementgebundene Holzspanplatten werden meistens unter großem Verpressdruck aus mit Leimen, Zement, Magnesit, Kunstharz oder Gips gebundenen Holzspänen hergestellt [20]. Im Jahr 1956 wurde das österreichische Familienunternehmen *VELOX Werk GesmbH* [21] gegründet, welches Produkte auf Basis einer $200 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ großen zementgebundenen Holzspanplatte entwickelt. Diese finden vor allem im mehrgeschossigen Wohn- und Hochbau, als Lärm- und Sichtschutzwände, als Fertigschalungen für den Bau, sowie im Trockenausbau als Verkleidungen von Holzriegelkonstruktionen und als Fassadengestaltung Anwendung. Die Produkte enthalten laut Hersteller zu 90 % Holz und brillieren durch eine hervorragende Ökobilanz. Neben der sogenannten „Veloxplatte“ existieren auch zahlreiche andere Produktbezeichnungen aus Österreich und Deutschland wie „Duripanel“ der Firma *Eternit* (Vöcklabruck/AUT) [22], welche dreischichtige zementgebundene Holzspanplatten mit besonderer Eignung für Brand- und Schallschutz entwickelt oder „Amroc Panel“ der Firma *Amroc Baustoffe* (Magdeburg/GER) [23].

2.3.3 HOLZBETON – MANTELSTEINE

Die österreichische Firma *isospan* (Madling/AUT) [20] produziert seit drei Jahrzehnten neben Holzspan-Dämmplatten und Holzspan-Fertigwänden, vor allem Holzspan-Mantelsteine mit oder ohne Wärmedämmung. Diese werden als tragende Außenwän-

de, sowie als tragende oder nichttragende Innenwände verwendet. Die Mantelsteine besitzen aber zu geringe Festigkeiten um den Belastungen ohne einen zusätzlichen Betonkern standzuhalten. Um eine ausreichende Aussteifung eines Gebäudes zu ermöglichen, müssen die Hohlräume der Steine mit Normalbeton aufgefüllt werden. Dadurch haben diese Produkte schlussendlich nur die Funktionen der Wärmedämmung und des Schallschutzes [13]. Bei der Produktion werden die Holzspäne nach Aussage des Herstellers unter minimalem Energieaufwand in Schlagmühlen auf die richtige Größe zerkleinert, mit Zement, Wasser und Mineralien versetzt, um anschließend zum Endprodukt geformt zu werden [20].

2.4 HOLZANTEIL IN HOLZLEICHTBETONPRODUKTEN

Der Holzanteil im Holzleichtbeton ist von Bedeutung, da er in gewisser Weise die Menge an nachwachsenden Rohstoffen im Produkt angibt.

Je nach den Erzeugnissen und Herstellern werden unterschiedlichste Angaben zum Anteil an Holz in Holzleichtbetonprodukten angegeben. Die Firma *VELOX Werk GesmbH* [21] nennt auf der Firmenhomepage einen Wert von 90 % Holz für deren Produkte. Dabei handelt es sich um Volumenprozent, also den Holzanteil in der Holz-Zementmischung bezogen auf das gesamte Volumen.

Im Zuge von Forschungsarbeiten am *Institut für Hochbau und Technologie* (Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit) der TU Wien wurden Untersuchungen an Holzspanbeton-Platten der Firma *VELOX* (35 mm, 50 mm und 75 mm Nenndicke) zur Ermittlung des Glühverlustes gemacht. Die Untersuchungen zur Bestimmung des anorganischen Anteils im Probenmaterial wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Holz-Holzbeton-Beton Verbundbauteile“ durchgeführt [24]. In der folgenden Tabelle 3 sind der mittlere Glühverlust ($V_{gl\text{ mittel}}$) und der mittlere anorganische Restanteil der Proben, als Auszug der Ergebnisse, in Prozent angeführt.

	WSD 35	WS 50	WS 75
Glühverlust $V_{gl\text{ mittel}}$ [%]	48	48	58
Anorganischer Restanteil $_{\text{mittel}}$ [%]	51	52	42

Tab. 3: Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung des Glühverlustes [24]

Bei der 35 mm dicken Holzspan-Schallschutzplatte (WSD 35) und der 50 mm dicken Holzspan-Dämmplatte (WS 50) beträgt der mittlere Glühverlust jeweils 48 %, während sich der mittlere anorganische Restanteil auf 51 % und 52 % beläuft. Die Werte für die beiden Plattentypen sind trotz der unterschiedlichen Materialstärken sehr ähnlich. Dementsprechend sind bei Dämmplatte (WS 50) der Zementanteil und die Rohdichte im Verhältnis höher. Die 75 mm dicke Holzspan-Dämmplatte (WS 75) erzielt ein Ergebnis von 58 % für den mittleren Glühverlust und 42 % beim mittleren anorganischen Restanteil. Nach diesen Kenntnissen kann es sich bei den angegebenen 90 vol.% nur um einen Höchstwert der Produktliste handeln.

Im Gegensatz dazu gibt die Firma *Eternit* [22] in ihren Produktdatenblättern der Holzspanplatte *Duripanel* einen Holzanteil in Volumenprozent von 58 % bei der Basisplatte B1 und 40 % bei der Basisplatte A2 an.

3 LEBENSZYKLUS

Definitionsgemäß ist die Ökologie die „Gesamtheit der Wechselbeziehungen zwischen den Lebewesen und ihrer Umwelt.“¹ Der Begriff der Nachhaltigkeit wird als „Prinzip, nach dem nicht mehr verbraucht werden darf, als jeweils nachwachsen, sich regenerieren, künftig wieder bereitgestellt werden kann“² beschrieben. Ziel muss es sein, nur mehr mit Produkten zu bauen, die diesem Prinzip so vollkommen wie nur möglich entsprechen. Durch ökologische Bewertung von Baustoffen kann schon im Vorhinein festgehalten werden, ob es sich um ein nachhaltiges Produkt handelt und welche Belastungen für unsere Umwelt durch die Errichtung eines Gebäudes erschaffen werden.

Verschiedenste Prozesse haben Einfluss auf die Nachhaltigkeit und Ökologie eines Bauwerks. Nach den ersten architektonischen Planungsschritten wie der Anordnung eines Gebäudes auf einem bestimmten Grundstück und dessen Ausrichtung sowie der richtigen Formfindung hat die Festlegung der richtigen Materialwahl große Bedeutung. Dies ist für den ganzen Lebenszyklus eines Bauwerks, von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Verwertung, ausschlaggebend. Wichtig für diese Arbeit ist, inwieweit sich die Effizienz eines Bauwerkes durch die richtige Auswahl der Materialien und Baustoffe für Konstruktion und Tragwerk steigern lässt, denn auf das Tragsystem wird weder in Normen, noch in Zertifizierungssystemen eingegangen. Um eine ressourceneffiziente Bauweise zu erfüllen, ist von Seiten der Planer und Architekten auf eine gut überlegte Tragkonstruktion besonders zu achten. Auch die architektonische Gestaltung von Grundrissen und Gebäuden müssen dabei berücksichtigt werden [25].

Die Nachfrage nach nachwachsenden Baustoffen wird immer größer, da endliche Ressourcen wie Sand, Kies oder auch Metalle, welche absolut nicht mehr dem Prinzip der Nachhaltigkeit entsprechen, knapp werden. Auch die Frage, in welchem Maß unsere Umwelt durch verschiedene Bauweisen beeinflusst wird, wird immer wichtiger. Anhand ausgewählter Fallbeispiele, welche aus konventionellen Bauprodukten unter Verwendung von endlichen Ressourcen (mineralisch, metallisch, synthetisch) gebaut wurde, wird anschließend analysiert, bis zu welchem Grad ein Bauwerk bzw. einzelne Bauteile aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise Entlastungspotenzial für die Umwelt bringt.

Die Wahl eines Baustoffes muss gut überlegt werden, vom Rohstoffabbau über den Transport, die Verarbeitung und den Erhalt eines Gebäudes, bis hin zu Abriss, Entsorgung und Wiederverwendung. Im Idealfall werden Baumaterialien angewendet die na-

¹ Duden

² Duden

3 LEBENSZYKLUS

2.4 HOLZANTEIL IN HOLZLEICHTBETONPRODUKTEN

he der Abbau- und der Produktionsstätte zur Verfügung stehen, um den Transportweg zu verkürzen und lokale Arbeitsstellen zu schaffen. Schon während der kompletten Entwurfsphase, in der die Materialien ausgewählt werden, kann somit der belastende Einfluss eines Gebäudes auf die Umwelt minimiert werden. Der Auswahlprozess des richtigen Baustoffes beginnt mit einer Lebenszyklusanalyse [26]. Durch die Ökobilanzierung (LCA – Life Cycle Assessment) kann der ganze Lebenszyklus eines Bauwerkes, einschließlich dem gesamten Verbrauch an Ressourcen und den Umweltfolgen, bewertet werden. Dazu gehören auch Umweltwirkungen wie Emissionen in Wasser, Luft und Boden. In den ISO-Normen 14 040 „Ökobilanz- Prinzipien und allgemeine Anforderungen“ und 14 044 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“ ist die allgemeine Herangehensweise an die Ökobilanzierung beschrieben.

Sie unterstützt Architekten und Planer bei der Materialauswahl und es können dadurch die zahlreich möglichen Alternativen miteinander verglichen werden. In jeder Lebensphase eines Bauwerks können Immissionen und Emissionen den natürlichen Kreislauf unserer Umwelt stören und beeinflussen. Die nachstehende **Abbildung 4** zeigt schematisch den Lebenszyklus eines Bauprodukts.

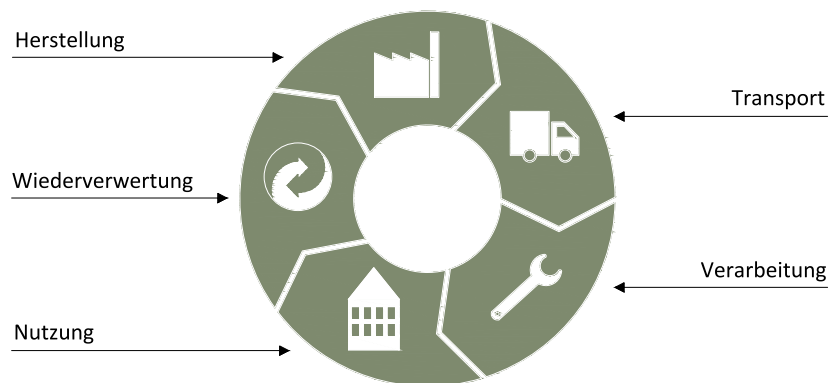


Abb. 4: Schematische Darstellung des Lebenszyklus eines Bauwerks bzw. Bauteils

Ökobilanzierungen bzw. Lebenszyklusanalysen bilden die Basis für die einfache quantitative Bewertung der Nachhaltigkeit eines Baustoffes oder Bauteils. Zur Beurteilung können je nach Datenbank unterschiedliche Ökokennzahlen herangezogen werden. In dieser Arbeit wurden hauptsächlich der Datensatz des *Instituts für Baubiologie und Bauökologie (IBO)* [27] und die Wirkungskategorien von *dataholz.com* der Holzfor-schung Austria [28] angewendet.

3 LEBENSZYKLUS

2.4 HOLZANTEIL IN HOLZLEICHTBETONPRODUKTEN

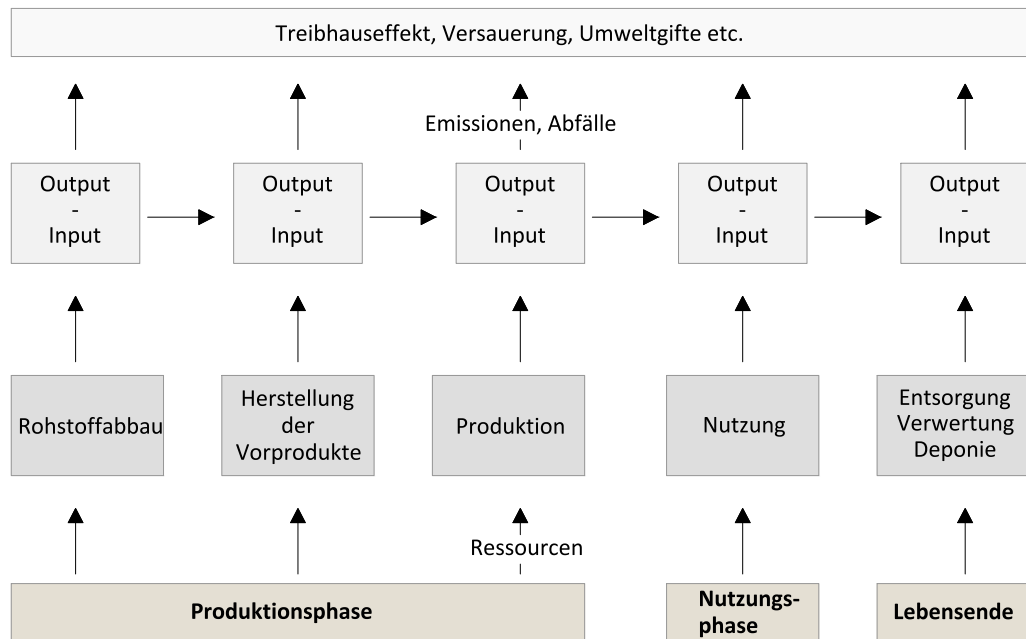


Abb. 5: Schematischer Aufbau zur Ökobilanzierung [29]

Zusammenfassend wird durch die „cradle-to-grave“ („Von der Wiege bis zur Bahre“) Analyse von Baustoffen ein besseres Verständnis für die Langzeitkosten eines Gebäudes erzielt. Dies ist der detaillierteste Bewertungszeitraum, denn der gesamte Lebenszyklus einer Ware wird berücksichtigt. Dabei handelt es sich nicht ausschließlich um die Kosten, welche vom Auftraggeber getragen werden müssen, sondern auch um den Preis den Besitzer, Bewohner und vor allem die Umwelt zahlen müssen. Der Lebenszyklus eines Materials kann also in drei Phasen organisiert sein: Produktionsphase, Nutzungsphase und End-Of-Life Phase. Die Evaluierung der Umwelteinflüsse des Baumaterials in jeder einzelnen Phase ermöglicht eine Kosten-Nutzungs-Analyse über die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes, anstatt der alleinigen Baukostenberechnung vor Errichtung [30]. **Abbildung 5** zeigt schematisch den grundlegenden Aufbau einer Ökobilanzierung von den drei Lebenszyklusphasen bis hin zu den einzelnen Lebenszyklusschritten, welche durch In- und Output eine endgültige Wirkungsabschätzung, in Bezug auf die Umwelt, möglich machen. Im Folgenden wird auf die unterschiedlichen Lebenszyklusphasen näher eingegangen.

3.1 PRODUKTIONSPHASE

Der gesamte Prozess der Produktion eines Baustoffes umfasst die Rohstoffgewinnung, den anschließenden Transport zum Verarbeitungsort, den Herstellungsvorgang selbst sowie die Verpackung und Distribution bis zu dem Zeitpunkt an dem eine Nutzung möglich wird. Diese Phase im Lebenszyklus eines Gebäudes hat das größte Potenzial, um Umweltschäden zu verursachen [30]. Die höchsten Entwicklungschancen stecken in den Bereichen der Gewinnung des Rohstoffes sowie in der folgenden Produktion, da diese Prozesse gleichzeitig den größten Anteil an Grauer Energie mit sich bringen [2] (vergleiche **Abbildung 6**). Die Angaben zur Grauen Energie sind wie Nährwertangaben für Baustoffe. Sie helfen uns die totale Belastung durch von Menschenhand geschaffene Produkte abzurechnen [31].

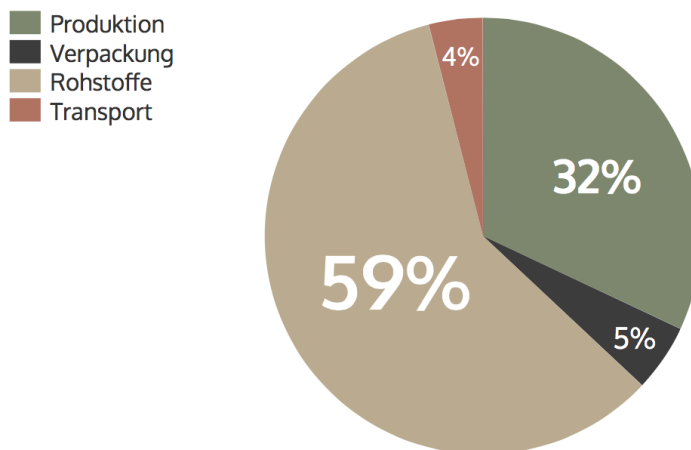


Abb. 6: Durchschnittliche Anteile der verschiedenen Phasen im Herstellungsprozess an der Grauen Energie von Baustoffen. [2]

Die Umweltschäden, welche auf den Abbau von natürlichen Rohstoffen und die folgende Transformation in Baumaterialien zurückzuführen sind, beinhalten die Zerstörung von Lebensraum, Erosion sowie Wasser- und Luftverschmutzung [30]. Bei der Produktion von Bauteilen aus Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen können der Verbrauch an Holz sowie Zement zu diesen Vorgängen beitragen. Durch Abholzung und die Beseitigung von Vegetation werden Habitate vernichtet, während ein Fehlen von Bäumen und Bodendeckern zu vermehrter Erosion führen kann. Bei der Zementherstellung sind wiederum die Auswirkungen auf Luft- und Wasserressourcen zu beurteilen.

3.1.1 NACHWUCHSPOTENZIAL

Zur Produktion eines Baumaterials werden Ressourcen benötigt. Ein für die Produktion von Holzleichtbeton wichtiger Rohstoff ist das Holz. Im Zuge ökologisch orientierter Forschungsprojekte führte *Holger König* mit dem „Nachwuchspotenzial“ (NWP) [32] ein weiteres Kriterium für die Ökobilanzierung zum Bauen mit Holz und Holzwerkstoffen ein. Dabei handelt es sich um eine Größe, mit der die Menge des Holzzuwachses bezogen auf eine Fläche von einem Hektar pro Jahr berechnet werden kann. Folglich kann damit bestimmt werden, wie viel Holz auf einer Fläche, die zuvor für die Holzproduktion gerodet wurde, nachwachsen kann.

3.1.1.1 EINWIRKUNGEN AUF DAS NACHWUCHSPOTENZIAL

In **Tabelle 4** sind verschiedene Einflussfaktoren auf das Nachwuchspotenzial aufgezeigt. In der primären Lebenszyklusphase Wald wirken sich eine große Menge an Zuwachs und ein optimaler Holzvorrat deutlich positiv auf die Änderung des Nachwuchspotenzials aus. Außerdem kann durch eine hohe Zuwachseistung mehr Kohlenstoff, mit dem Ziel in möglichst kurzer Zeit diesen zu binden, gespeichert werden. In der Phase der Rohstoffgewinnung haben die industrielle sowie die manuelle regionale Holzernte keinen Einfluss auf das Nachwuchspotenzial. Regionale Rohstoffquellen wirken sich aber positiv auf die Kohlenstoffbilanz aus, da dadurch weniger lange Transportwege notwendig sind. Bei der Produktherstellung ist vor allem ein gering gehaltener Energieeinsatz von Vorteil für die Kohlenstoffbilanz. Im Gegensatz dazu wirkt sich ein hoher Energieeinsatz deutlich negativ darauf aus. Es ist aber trotzdem in den meisten Fällen weniger Energie notwendig als bei konventionellen Produkten, wie beispielsweise bei Stahlbeton. Entsprechend niedrig sind daher die Emissionen an CO₂. In der Lebenszyklusphase des Einbaus und der tatsächlichen Nutzung ist eine lange Nutzungsdauer, welche zu einer langfristigen Speicherung von Kohlenstoff im Holz führt, günstig. Auch hohe Holzmengen und die Substitution nicht nachwachsender Bauteile führen zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen. Bei der anschließenden Nachnutzung haben die Vorgänge Recycling und Energiegewinnung einen hohen Effekt auf das Kohlenstoffpotenzial, da durch Verzicht auf fossile Energieträger ebenfalls der Ausstoß an CO₂ reduziert wird [32].

3 LEBENSZYKLUS

3.1 PRODUKTIONSPHASE

LCA-Phasen	Einflussfaktoren		Änderung des C-Speichers [CO ₂ -Äqui./((haxa))]	Änderung des NWP [m ³ /((haxa))]
Ökosystem Wald	Hohe		++	++
	Zuwachsleistung			
	Bestmöglicher		0	++
	Vorrat			
	Misswuchs		0	+
Rohstoff- Gewinnung	Nachhaltige		0	+
	Waldbewirtschaftung			
	Bestmögliche		0	++
	Umtriebszeit			
	Industrialisierte		0	0
Produktion	Holzernte			
	Regionale Quellen		+	0
	Geringer		++	0
	Energieeinsatz			
	Hoher		--	0
Nutzung	Energieeinsatz			
	Hoher		+	+
	Ausbeutefaktor			
	Große Bauteildimensio- nierung		0	++
	Oberflächen- behandlung		+	0
Nachnutzung	Produkttransport		-	0
	Gebrauchsdauer		++	++
	Substitution	nicht	++	++
	nachwachsender	Roh-		
	stoffe			
Nachnutzung	Recycling		++	++
	Downcycling		+	+
	Energie- gewinnung		++	0

Tab. 4: Effekte auf der Einflussfaktoren des Nachwachspotentials (++ sehr hoch, + hoch, 0 kein Effekt, - gering, -- sehr gering) [32]

3 LEBENSZYKLUS

3.1 PRODUKTIONSPHASE

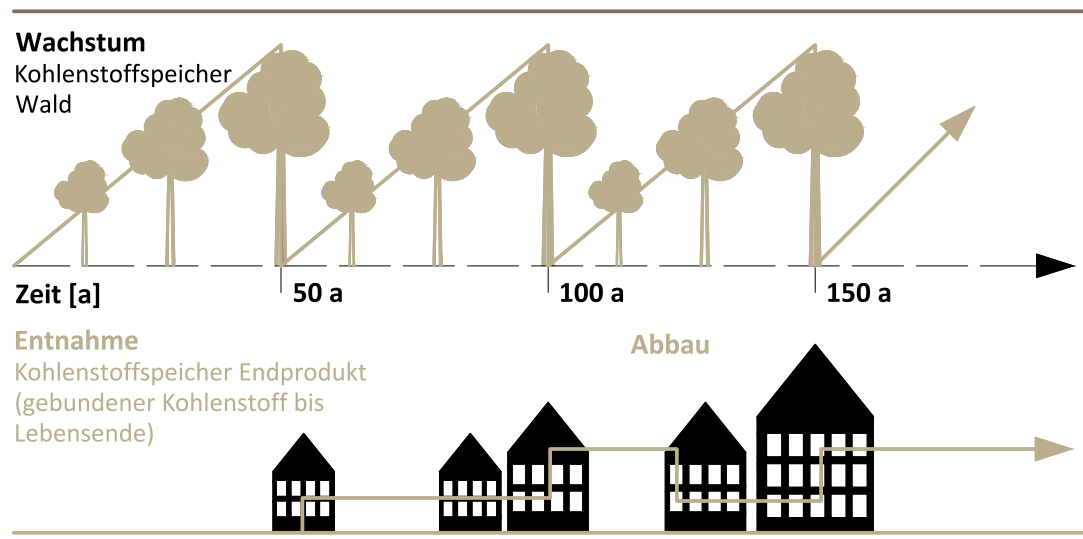


Abb. 7: Schematische Darstellung von Gebäuden als Kohlenstoffspeicher [32]

Im Gegensatz zu nicht nachwachsenden Rohstoffen hat Holz prinzipiell ein unendliches Wachstumspotenzial, welches nur durch das begrenzte Vorhandensein an Fläche gezügelt wird. Der Kohlenstoffspeicher wird größer, wenn das Holz für langlebige Produkte, wie beispielsweise in Gebäuden, eingesetzt wird. Am Lebensende des Gebäudes wird der Kohlenstoff nach dem Abbruch wieder frei. Das heißt bei ökologischer Betrachtung wird der Kohlenstoffspeicher wieder auf die Ausgangssituation, nämlich „Null“ zurückgesetzt [29]. Zur Veranschaulichung dient hierzu **Abbildung 7**.

3.1.1.2 DATEN ZUR BERECHNUNG DES NACHWUCHSPOTENZIALS

Fichtenholz ist für die Herstellung von Holzleichtbeton die am häufigsten verwendete und geeignetste Holzart. In Österreichs Wäldern ist und bleibt die Fichte die Hauptbaumart mit 61 % Anteil an dem gesamten Baumbestand. Die Gesamtnutzung beträgt um die 29,9 Mio. Vfm/Jahr (Vorratsfestmeter/Jahr). In den letzten Jahren ist diese stark gestiegen. Jedoch liegt die Menge an Zuwachs noch immer deutlich über dem genutzten Anteil (vergleiche **Abbildung 8**). Seit dem Jahr 2000 umfasst die Nutzung einen Wert von ca. 17,8 Mio. Vfm pro Jahr gegenüber einem Zuwachs von ca. 20,1 Mio. Vfm pro Jahr [33].

Die Schere zwischen Zuwachs und Nutzung ist, obwohl sie in den letzten Jahren deutlich kleiner geworden ist, noch eindeutig geöffnet. Da für die Herstellung von Holzleichtbeton hauptsächlich Abfallprodukte der Holzwirtschaft verwendet werden, spricht

3 LEBENSZYKLUS

3.1 PRODUKTIONSPHASE

dies deutlich für den Baustoff. Solange genügend Holzspäne und Sägemehl für die Produktion vorhanden sind, wird der Nutzungswert dementsprechend nicht beeinflusst. Erst wenn eine Holzernte nur zur Herstellung dieser Ausgangsprodukte notwendig wird, könnte dies Auswirkungen auf den aktuellen Fichten- und allgemeinen Baumbestand haben.

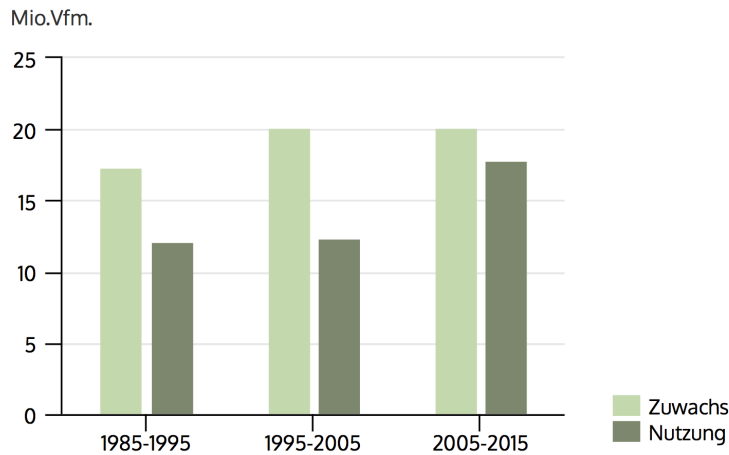


Abb. 8: Anteil an Zuwachs und Nutzung von Fichtenholz in [Mio.Vfm.] [33]

Holger König berechnete für Fichtenholz folgende Grunddaten zur Berechnung des Nachwuchspotenzials (Werte beziehen sich auf Deutschland) [32]:

	Zuwachs ¹ [m ³ /(ha*a)]	Mittlere Rohdichte atro ² [kg/m ³]
Fichte	14,5	430

Tab. 5: Zuwachs und mittlere Rohdichte von Fichtenholz [32]

	Zuwachs ³ [kg atro/ (ha*a)]	C-Bindung ⁴ [kg CO ₂ /m ³]	Zuwachs entspricht ei- ner C-Bindung ⁵ von [kg CO ₂ /(ha*a)]
Fichte	6 235	789	11 441

Tab. 6: Zuwachs, C-Bindung sowie dem Zuwachs entsprechende C-Bindung von Fichtenholz [32]

¹ König 2011

² König 2011

³ Polley et al. 2009

⁴ Oehmichen et al. 2011

⁵ König 2011

Bei der weiteren Berechnung des Nachwuchspotenzials für Holzprodukte wurde für Fichtenschnittholz ein Wert von 44 % ($347 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$), für Fichten-Brettschichtholz 32% ($253 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$) sowie für Fichten-Furnierschichtholz 40 % ($316 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$), berechnet. Fichtenholz hat im Gegensatz zu den anderen Hauptholzarten wie Buche, Kiefer oder Eiche einen relativ hohen Stammholzanteil und eine hohe Ausbeute. Dadurch fällt auch das Nachwuchspotenzial im Vergleich am höchsten aus.

Die Ergebnisse der Berechnungen des Nachwuchspotenzials sind nur für den aktuellen Zeitraum gültig, da es noch keine genauen Szenarien zur Untersuchung zukünftiger Entwicklungen gibt [32].

3.1.2 UMWELTEFFEKTE BEI DER ZEMENTHERSTELLUNG

Ein weiterer Hauptbestandteil von Holzleichtbeton ist Portlandzement. Da das Ersetzen der Gesteinskörnung durch den natürlich nachwachsenden Rohstoff Holz, endliche Ressourcen wie Sand und Kies verschont bleiben, ist die nachhaltige Anwendung aufgrund des hohen Zementanteils zu hinterfragen. Seit seiner Erfindung von *Joseph Aspidin* 1824 hat sich Portlandzement wenig verändert – außer, dass er seit den letzten zwei Jahrzehnten so häufig wie nie verwendet wird. Wie damals werden für den „Artificial Stone“ Kalkstein und Mergel oder Ton zermahlen, mit Wasser vermischt, anschließend unter hohen Temperaturen gebrannt und wieder gemahlen. Jedes Jahr werden derzeit drei Tonnen Beton pro auf der Erde lebenden Mensch produziert. Gleichzeitig werden durch Beton 5 % der globalen CO_2 Emissionen frei. Dieser Wert beruht hauptsächlich auf zwei Prozessen: zum Ersten kommt es zu einem hohen Ausstoß des Treibhausgases bei der Verarbeitung des Kalksteins zu Zement, des Weiteren werden für den Brennvorgang wo Temperaturen bis zu 1370°C erreicht werden müssen, fossile Brennstoffe wie beispielsweise in großen Mengen Kohle, verbrannt [31].

Die Zementproduktion bringt also ernsthafte Gefährdungen für die Umwelt und die menschliche Gesundheit mit sich. Schon beim Abbau der Rohstoffe für die Herstellung von Zement kommt es zu negativen Effekten. Beim Tagebau von Kalkstein werden vor allem durch die Verwendung von Sprengmaterial Ökosystem und Umwelt stark gestört. Beim folgenden Zerkleinerungs- und Mahlungsprozess bei dem sehr feiner Zement gewonnen wird, werden viel Staub und Smog und somit schlechte Luftqualität produziert. Dies kann folglich zu schweren Atemwegserkrankungen führen. Die Weiterverarbeitung in den Zementdrehöfen ist sehr energieintensiv und beim Verbrennungsvorgang kommt es, wie schon erwähnt, zu starken Ausstößen von Treibhausgasen, welche zur Klimaerwärmung und dem Entstehen von saurem Regen beitragen. Außerdem kommt

es durch lange Transportwege des fertigen Zements zur atmosphärischen Verschmutzung [26].

3.1.2.1 EMISSIONEN BEI DER ZEMENTHERSTELLUNG

Österreichweit ist die Zementindustrie für ca. 3,5 % des durch Menschen verschuldeten Ausstoßes an Kohlendioxid CO₂ verantwortlich. Der globale Durchschnittswert liegt bei ca. 5 % und ist somit deutlich höher. In einigen Ländern werden noch ca. 1 Tonne CO₂ pro Tonne Zement im Durchschnitt freigesetzt. In Österreich wurden im Jahr 2010 574 Kilogramm CO₂ pro Tonne Zement emittiert. Dieser vergleichsweise gute Wert wurde durch modernisierte Ofentechnologien, einem optimierten Klinkeranteil im Zement und dem Einsatz von alternativen Brennstoffen erzielt [34].

3.1.2.2 SUBSTITUTIONSPROZESSE UND MODERNE TECHNOLOGIEN

Die Prävention von Belastungen durch die Produktion von Zement kann die ökologische Nachhaltigkeit maßgebend beeinflussen. Ein und derselbe Baustoff können von unterschiedlichen Herstellern unter verschiedenen Methoden produziert werden, wobei ungleich gewissenhaft gehandelt wird [30]. Gegenwärtig wird mehr und mehr daran gearbeitet, die Zementindustrie mit Hilfe moderner Technologien und Gesetzgebungen zu optimieren und ressourceneffizienter zu gestalten.

Als Beispiel dafür wurde in Dubai in den Vereinigten Arabischen Emiraten mit dem 1. April 2015 eine neue Gesetzgebung veranlagt, welche beinhaltet, dass Grundbesitzer, Bauunternehmer sowie Projektberater von nun an verpflichtet sind mit *green cement* in Betonmischungen zu bauen. Die Einhaltung ist Voraussetzung für den Erhalt einer Baugenehmigung. Dadurch sollen die Emissionen von CO₂ und anderen schädlichen Gasen reduziert und somit die Umwelt besser geschützt werden. Der sogenannte *green cement* wurde vor ca. drei Jahren in Deutschland entwickelt und hält den selben Anforderungen wie herkömmlicher Portlandzement stand. Recycelte Materialien werden darin vereinigt und optimiert, während der Verbrauch natürlicher Rohstoffe, Wasser und Energie reduziert wird [35]. Es handelt sich also um ein sehr nachhaltiges Konstruktionsmaterial.

Eine weitere Methode um die Menge an Emissionen von Treibhausgasen und den Wasserverbrauch bei der Herstellung konventioneller Zemente zu minimieren, wurde durch die Zusammenarbeit der australischen Firma *CSIRO* und der chinesischen *Beijing MCC Equipment Research & Design Corporation Ltd.* entwickelt. Grundsätzlich werden

3 LEBENSZYKLUS

3.1 PRODUKTIONSPHASE

durch die DSG Dry Slag Granulation (Granulation von Hochofenschlacke) die Abfälle aus den Hochöfen welche zur Produktion von Eisen und Stahl verwendet werden, in ein neues Produkt zur Zementherstellung umgewandelt. China produziert heute beispielsweise 60% des weltweiten Abfalls der Eisen- und Stahlherstellung. Durch diese neue Technologie können immense Einsparungen an Wasser (60 Mrd. Liter), an Wärmeenergie (800 Petajoule) und an Treibhausgasemissionen (60 Mio. Tonnen) gemacht werden [36].

Zwei weitere Start-Ups, eines aus Nova Scotia, Kanada, und ein weiteres aus Arizona, USA, bemühen sich, neue Technologien zur Produktion von sauberem Zement und Beton zu entwickeln. Die kanadische Firma *CarbonCure Technologies Inc.* bietet eine Methode an, wobei überflüssiges unbrauchbares CO₂ in Beton injiziert und dort gebunden wird. Dieser Prozess funktioniert mit jeder Art von konventionellem Zement. Der Vorgang funktioniert ähnlich wie das Zuführen von chemischen Zusatzstoffen in den Beton. Das CO₂ wird während des Mixens beigeführt und reagiert mit Wasser, um Kohlenstoff-Ionen zu formen, wodurch es anschließend sofort mit den vom Zement freigesetzten Kalzium-Ionen zu einem Kalkstein ähnlichen Material reagiert. Das Mineral ist in Form von Nanomaterialien entstanden und ist nun in der ganzen Betonmischung verteilt. Diese Umwandlung von gasförmigem CO₂ in festen Kohlenstoff, bindet das Gas permanent im Beton. Die neue Technologie wird gerade vor allem für Fertigbeton angewendet. Die Menge an gebundenem CO₂ beträgt rund 1% des Zementgewichts. Beim Gebrauch in Fertigbetonmischungen kann die Zugabe des Gases auch zu einer Verbesserung der Leistung des Materials betragen und noch weiter CO₂ reduzieren.

Mit *Ferrock* der Firma *Iron Shell LLC* wird ein anderer Ansatz gewählt, wobei Stahlstaub - ein Abfallprodukt - als grundlegende Komponente verwendet wird und dabei eine komplett neue Alternative zu herkömmlichen Zement entwickelt wird. Während die Produktion von Portlandzement, wie zuvor angeführt, eine erhebliche Menge an Energie benötigt – das meiste aus fossilen Brennstoffen, welche CO₂ emittieren – benötigt *Ferrock* keinerlei Energie-Input. Hier führt die graue Energie im reduzierten Eisen die Oxidation an. Der Stahlstaub macht 60% der Trockeninhaltsstoffe des Materials aus, der Rest sind Flugasche und Kalkstein. Durch die Zugabe von Wasser und CO₂ wird die Oxidationsreaktion hervorgerufen, wodurch die Eisenkarbonat Mineralmatrix entsteht, welche den Zement formt. *Ferrock* kann nach vier Tagen des Härtens in Wasser und CO₂ und einer 28tägigen Feuchtigkeitshärtung eine mit Portlandzement vergleichbare Festigkeit erreichen. Der derzeit noch größte Nachteil von *Ferrock* ist die langsam ablaufende Reaktion, wobei bereits an Möglichkeiten, um dem entgegenzuwirken gearbeitet wird. Auch im trockenen Zustand ist das Material gleich wie Portlandzement. Nach dem Mischen mit Wasser härtet es erst wenn es CO₂ ausgesetzt wird oder durch Oxidation

3 LEBENSZYKLUS

3.1 PRODUKTIONSPHASE

in der Luft. Es können außerdem alle herkömmlichen Zuschlagsstoffe wie Stahl, Kunststoff- und Glasfasern, mit *Ferrock* verwendet werden [37].

Für Holzleichtbeton werden auch meist die herkömmlichen Zementmischungen mit üblicherweise einem hohen Anteil an Portlandzement (CEM I) eingesetzt. In den letzten Jahren wurden parallel dazu Mischungen mit einem erhöhten Anteil an Hüttensand entwickelt. (CEM III B mit einem Hüttensandanteil von 70 % und Sulfathüttenzement mit einem Anteil von 90 %). Aufgrund der ausgezeichneten Dichtheit wird das Abfallprodukt der Stahlindustrie, welches auch Schlacke genannt wird, bisher vor allem im Tiefbau verwendet. Im Vergleich mit den üblichen in Mitteleuropa eingesetzten Zementmischungen können mit CEM III B bis zu 47 % und mit Sulfathüttenzement bis zu 65 % der CO₂ eingespart werden [2] (siehe **Abbildung 9**). In der folgenden **Tabelle 7** ist eine Auswahl unterschiedliche Zementarten mit der möglichen Reduzierung des Treibhauspotenzials (GWP) durch Hüttensand statt Portlandzement angeführt.

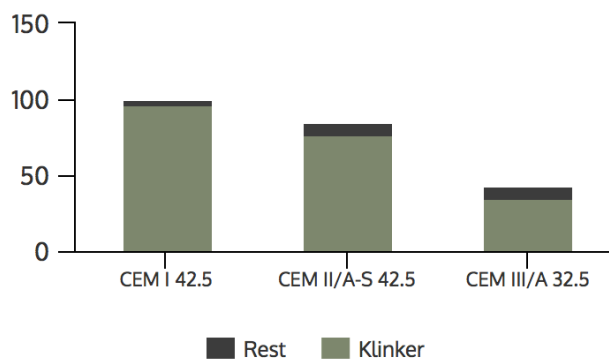


Abb. 9: Einfluss des Klinkeranteils auf den Treibhausgasindikator GWP in [kg CO₂-Äquiv.] [59]

Haupt-art	Benennung	Kurzzeichen	Art	Anteil [M.-%]	GWP-Reduktion
CEM I	Portlandzement	CEM I	-	0	0 %
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	Hüttensand (S)	6-20	ca. 13 %
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/B-S	Hüttensand (S)	21-35	ca. 27 %
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	Hüttensand (S)	36-65	ca. 47 %
CEM III	Hochofenzement	CEM III/B	Hüttensand (S)	66-80	ca. 65 %

Tab. 7: Verschiedene Zementmischungen und deren GWP-Reduktionen

3.1.2.3 SLAGSTAR

Das österreichische Unternehmen *Wopfinger Baustoffindustrie GmbH* bietet ebenfalls eine Alternative zu konventionellem Zement an, welches der gültigen *ÖNORM B 4710-1* entspricht. Das Produkt *Slagstar* [38] wird ausschließlich in einem Mischvorgang ohne dem herkömmlichen Brennprozess hergestellt, wodurch bis zu 90 % der CO₂-Emissionen gegenüber Portlandzement, eingespart werden können (vergleiche **Abbildung 10**). Es wird der bereits erwähnte Hüttensand bzw. Hochofenschlacke, welcher als Nebenprodukt der Roheisenproduktion anfällt, als hydraulischer Anteil der Mischung eingesetzt. Zur Verbesserung der hydraulischen Eigenschaften werden sulfatische Anreger und alkalische Beimengungen verwendet. Dabei handelt es sich um mineralische Nebenbestandteile, Gips und eventuell weitere spezielle Zusätze. Pro 1000 m³ Beton kann mit *Slagstar* der Ausstoß an Treibhausgasen bis zu 200 Tonnen vermindert werden. Der Ökobeton mit *Slagstar* kann wie herkömmlicher Beton verarbeitet und angewendet werden [38]. Das Produkt wurde als erstes Bindemittel für die Herstellung von Beton vom *IBO – Österreichischen Institut für Baubiologie* bewertet und mit dem IBO-Gütesiegel ausgezeichnet [25]. Auch gesundheitlich wurde *Slagstar* als unbedenklich eingestuft.

Für die Holzleichtbeton-Mischungen muss ein deutlich höherer Zementanteil eingebracht werden, um gewünschte Festigkeiten zu erzielen als bei konventionellen Betonmischungen. Um ein Gebäude aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise ökologisch nachhaltig zu optimieren, müssen demnach Alternativen zum konventionellen Portlandzement eingesetzt werden. Dadurch kann die Schadstoffbelastung beim Herstellungsprozess drastisch reduziert werden.

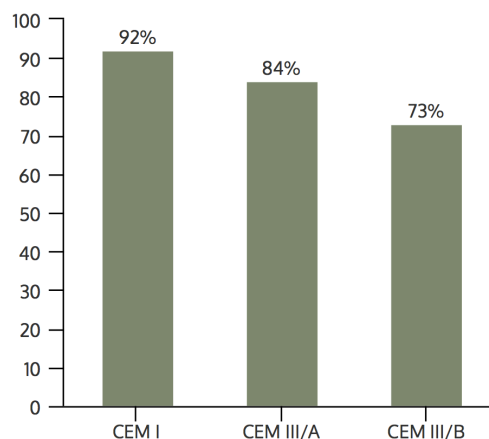


Abb. 10: Durch Slagstar erzielte Reduktion an CO₂-Emissionen [38]

3.1.3 REDUKTION VON BAUSTELLENABFÄLLEN

Die Minimierung des an der Baustelle anfallenden Abfalls reduziert die Notwendigkeit von Ablageflächen sowie Deponien und ermöglicht eine Einsparung an Kosten. Als Planer kann schon bei der Grundrissgestaltung auf eine Einhaltung von Standardabmessungen, wodurch der Einsatz von vorgefertigten Bauteilen gewährleistet wird, Acht gegeben werden. Dadurch wird bereits in der Entwurfsphase die Abfallproduktion verringert, welche durch etwaiges Zurechtschneiden der Materialien entsteht. Auch Kosten können durch das Einsparen von zusätzlichen Arbeitskräften eingeschränkt werden [30].

Die Bauteilschichten aus Holzleichtbeton selbst, werden nicht direkt auf der Baustelle angefertigt, sondern vor Ort schichtweg mit den Verbundmaterialien wie Massivholz oder Beton zusammengesetzt. Bei Mantelbeton-Konstruktionen werden die Holzleichtbetonplatten zuerst aufgestellt und danach der bereits mit Wasser vorgemischte Beton dazwischen eingebracht. Grundsätzlich kommt es dementsprechend beim Bauen mit Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen nicht zu einer erhöhten Produktion an Abfällen an der Baustelle.

3.1.4 TRANSPORT

Der Aspekt des Transports hat gesamt einen vergleichsweise unbedeutenden Anteil an den Umweltwirkungen. Trotzdem ist es wichtig Wert auf die Verarbeitung regionaler Produkte zu legen, wodurch eine Verschmutzung der Luft reduziert wird. Lokal vorhandene Materialien sind außerdem oft besser an klimatische Gegebenheiten angepasst und unterstützen überdies die regionale Wirtschaft [30].

Jede Art des Transports hat global betrachtet ihre eigene Wirkung auf das Klima. Der durch Verbrennung entstehende Wasserdampf hat beispielsweise in Bodennähe nur geringe Auswirkungen, hingegen in höheren Schichten der Atmosphäre großen Einfluss auf den Klimawandel. Demnach ist der Transport per Flugzeug die für die Umwelt am meisten belastende Form [39]. Bezogen auf die Herstellung und Anwendung von Produkten aus Holzleichtbeton ist diese Transportart nicht nötig. Die verwendeten Rohstoffe können lokal abgebaut und weiterverarbeitet werden.

3.2 DAUERHAFTIGKEIT UND INSTANDHALTUNG

Neben der Herstellungsphase und des Lebensendes eines Bauteils ist die gesamte Instandhaltung und Dauerhaftigkeit nicht zu vernachlässigen. Die Nutzungsphase eines Baumaterials beginnt mit der Zusammenführung in die Gesamtkonstruktion und beinhaltet die Instandhaltung und eventuell anfallende Reparaturen bis zum Ende, wenn es nicht mehr als Teil des Gebäudes funktionieren kann. Als Planer besteht die Möglichkeit auch während dieser Lebensdauer eines Materials die Umweltwirkungen zu reduzieren. Folglich kann der Wahrscheinlichkeit des Ersetzens von Bauteilen eines Gebäudes entgegengewirkt werden sowie Einfluss auf deren Alterung genommen werden.

Mit zunehmender Lebensdauer kann die statische Sicherheit des Gebäudes womöglich nicht mehr garantiert werden. Demnach wird die Funktionstüchtigkeit durch Instandhaltung sowie Wartung und anschließende Instandsetzung aufrechterhalten. Der Lebenszyklus wird dadurch verlängert [2].

Die Bauteile sind ständig unterschiedlichen äußeren und inneren Einflüssen ausgesetzt, welche die Dauerhaftigkeit reduzieren. Von außen wirken hauptsächlich Wind, Niederschlag, Sonneneinstrahlung sowie temperaturabhängige Einflussnahmen und von innen besteht eine Abhängigkeit mit der Gebäudenutzung oder entsprechender Fehlnutzung. Also zusammenfassend kann zwischen biogenen, chemischen, physikalischen Einflussfaktoren auf den Lebenszyklus eines Bauwerks und materialspezifischem Abnutzungsverhalten unterschieden werden [2]. Insgesamt ist die Dauer während der ein Bauteil seine Funktion aufrechterhalten kann in den letzten 50 Jahren gesunken [29]. Dies ist vor allem auf die intensivere Nutzung und die damit verbundene verstärkte Abnutzung, die steigenden und aggressiver werdenden Umweltwirkungen sowie die geringere Dauerhaftigkeit der einzelnen Material zurückzuführen [40]. Durch das Abschätzen der umweltbezogenen Einflussfaktoren und anhand der beabsichtigten Nutzung und daraus folgenden Instandhaltung können und müssen die Lebensdauer einzelner Bauteile abgeschätzt werden. Dadurch wird ein Vergleich unterschiedlicher Materialien möglich. Die Dauerhaftigkeit verschiedener Materialien hängt immer mit dem Kontext eines Gebäudes zusammen und lässt sich prinzipiell nicht verallgemeinern.

Unterschiedliche Gebäudeteile sind idealerweise aus einem Minimum an unterschiedlichen Baumaterialien zusammengesetzt. Dies führt zu einer verbesserten Gesamtbilanz, da weniger Austauschzyklen notwendig sind. Die Schichtung der Bauteile muss unter Berücksichtigung der ungleichen Lebenserwartungen und der einfachen Austauschbarkeit erfolgen, um ökologisch nachhaltig zu planen. Um den vorzeitigen Abbruch noch funktionstüchtiger Bauteilschichten zu verhindern, wäre es sinnvoll wenn Materialien mit längerer Dauerhaftigkeit zusätzlich Teilleistungen weniger langlebiger Schichten

3 LEBENSZYKLUS

3.2 DAUERHAFTIGKEIT UND INSTANDHALTUNG

übernehmen würden. Folglich würde die Dauerhaftigkeit des Gesamtsystems erhöht werden [39].

3.3 END-OF-LIFE PHASE

Das Prinzip der Nachhaltigkeit beruht auf weitsichtigen Überlegungen, wobei immer das Ende zu berücksichtigen ist. Das Lebensende eines Bauwerkes hat großen Einfluss auf die gesamte Umweltwirkung und Effizienz eines Gebäudes. Es umfasst den Abbau- und Abriss, den Transport, die Abfallaufbereitung sowie die Deponierung von Baumaterialien. Der gesamte Bausektor verursacht bis zu 60 % sämtlichen Abfallaufkommens, wovon 83 % zwar verwertet, aber nur 10 % richtig recycelt werden [41]. Aus Sicht des Architekten ist diese Phase, wenn die Lebensdauer und Funktionalität einer Konstruktion ausgeschöpft sind, womöglich die am wenigsten beachtete und verstandene des gesamten Lebenszyklus eines Materials. Dazu sind im Folgenden die unterschiedlichen Möglichkeiten für das Vorgehen nach Ende des Nutzens eines Baustoffes angeführt und beschrieben [42].

- **Wiederverwendung**

Um ein Bauteil für seinen anfänglichen Nutzen wiederzuverwenden, wird es nur leicht mechanisch verändert und aufgearbeitet. Gegenwärtig werden hauptsächlich historische Baustoffe, die in der Denkmalpflege neue Anwendung finden, wiederverwendet, da die Kosten für eine geeignete Rückführung den ursprünglichen Produktwert meist deutlich übersteigen. Aufgrund der mangelhaften Logistik und dem großen Aufwand beim materialreinen Rückbau werden die meisten Bauteile nur deponiert [42]. Eine Weiterverwendung lässt sich außerdem nur ermöglichen, wenn ein Bauteil in gewisser Weise über eine funktionale und technische Neutralität verfügt und nicht zu sehr auf seinen Lebenszyklus hin optimiert wurde [39].

- **Recycling**

Beim Recycling befindet sich ein Stoff im ständigen Kreislauf. Rohstoffe werden aus Abfällen gewonnen und wieder zurück in den Wirtschaftskreislauf eingeführt sowie zu neuen Produkten verarbeitet. Es werden hierbei keine neuen Rohstoffe hinzugefügt und keine neuen Abfälle produziert. Im Bausektor ist vollständiges Recycling kaum möglich, da die technischen Kreisläufe nicht geschlossen und die Energieverluste zu hoch sind. Außerdem ist es schwer gewisse Baumaterialien wieder in ihren reinen Zustand zurückzuführen. Vor allem Verbundwerkstoffe stellen hierbei ein großes Problem dar. Beim Recycling

bleibt darüber hinaus die in einem Material enthaltene Energie stetig erhalten. Die Energie, welche beim Recyclingvorgang aufgebracht werden muss, ist meistens deutlich geringer als jene die bei der Produktion verbraucht wird.

- **Upcycling**

Der Begriff Upcycling beschreibt den Vorgang, welcher einen niederwertigen Stoff in einen höherwertigen Zustand übergehen lässt. Metalle beispielsweise sind aufgrund der hohen Energieeinsparung gegenüber den Primärprodukten hierfür gut geeignet. Es gibt dabei kaum Qualitätsverluste und gegenüber der Herstellung aus Erzen ist die Einsparung an Energie sehr groß.

- **Downcycling**

Das Downcycling kann als Gegenteil des Upcyclings betrachtet werden, denn nach jedem Recyclingvorgang sinkt die Qualität des Materials und die Notwendigkeit neue Primärrohstoffe hinzuzufügen steigt deutlich an. Typisch dafür sind Ziegel und Mauerwerksabbruch sowie Kunststoffe. Problematisch ist die kaum mögliche sortenreine Gewinnung von beispielsweise gipshaltigen reinen Bauabfällen oder Ziegel- und Mauerwerksabbruch ohne Rest von Putz und Mörtel.

- **Deponierung**

Die Stoffe, welche zur endgültigen Ablagerung auf Deponien gebracht werden müssen nicht mehr recycelbar sein bzw. wäre ein Recycling nicht zielführend möglich. Eine Verwertung ist dadurch also ausgeschlossen. Die genaue Einteilung der unterschiedlichen Baurestmassen (Materialoutput aus dem Bauwesen) und Abfälle wird nach der Abfallverzeichnisverordnung festgelegt. Altholz darf laut der Altholzverordnung (*AltholzV*) beispielsweise überhaupt nicht deponiert werden, sondern muss thermisch verwertet werden [43] [44].

Daraus folgt, dass eine gewisse Entsorgungskaskade entsteht (siehe **Abbildung 11**). Nachdem eine vollständige Wiederverwendung oder Weiterverwendung eines Bauteils ausgeschlossen ist, ist eventuell eine einzelne stoffliche Verwertung oder Aufbereitung möglich. Ist dem nicht so, können einzelne Bauteilschichten entweder recycelt werden oder es ist eine schlussendliche Deponierung nötig.

3 LEBENSZYKLUS

3.3 END-OF-LIFE PHASE

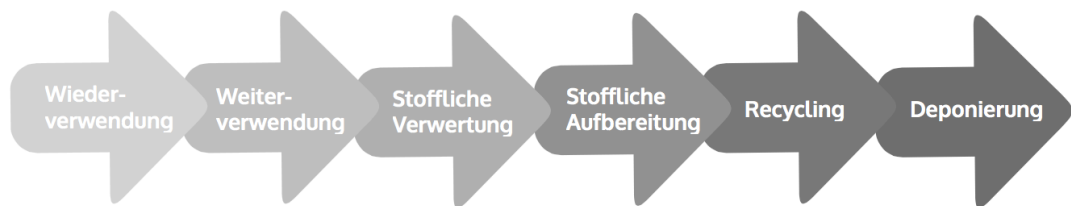


Abb. 11: Entsorgungskaskade

Selbst bei Bauwerken aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise bilden mineralische massive Baustoffe einen hohen Massenanteil. Die Fundamentplatten, der Keller sowie Estriche sind in der Regel aus mineralischen Substanzen, und auch bei den einzelnen Verbundsystemen muss auf Trennbarkeit der jeweiligen Schichten geachtet werden.

Wegen der nicht vorhandenen Brennbarkeit ist die Zuführung mineralischen Abbruchmaterials in die Abfallverbrennung nicht sinnvoll. Deshalb wird für das Recycling dieser Baustoffe das ausgediente Material meist in Aufbereitungsanlagen zu vorgegebenen Korngrößen mechanisch zerkleinert. Diese Aufbereitungslager können entweder stationär oder mobil aufgebaut werden. Bei der mobilen Variante werden die Baurestmassen direkt am Abtragungsort nach vorangegangener Demontage und dem Eliminieren von Fremdbestandteilen zerkleinert. Manchmal kommt es auch zur sofortigen Wiederverwendung als Baumaterial. In stationären Aufbereitungslagern werden die Abbruchmassen ebenfalls zuerst gestückelt. Dieser Vorgang erfolgt in einem sogenannten Brecher. Zur Abtrennung von Fremdprodukten werden zum Beispiel Magnete für eisenhaltige Bestandteile, wie möglicherweise Verbindungselemente, verwendet. Vor allem durch seine Heterogenität ist folglich ein relativ hoher Aufwand zur Aufbereitung des Bauschutts notwendig. Bei Verbundmaterialien wie Produkten aus Holzleichtbeton sind alle möglichen Verbindungen, aber auch Installationen, Wärmedämmungen sowie Fußböden und Verkleidungen voneinander zu trennen. Bei der anschließenden Klassierung werden abhängig vom zukünftigen Anwendungsgebiet verschieden große Körner ausgesiebt [45].

Ein Teil des recycelten Materials wird anschließend als Zuschlagsstoff für die erneute Herstellung von Beton, dem sogenannten Recyclingbeton, eingesetzt. Die Umweltwirkungen der Produktion von Beton lassen sich dadurch nur gering verbessern, da beim Einsatz von Baurestmassen als Zuschlagsstoff wiederum mehr Zement notwendig ist. Die folgende **Abbildung 12** zeigt den Energieaufwand von Beton zu der Recyclingvariante im Vergleich. Die Mengen an Bauschutt werden jedoch sowie die Deponien auf denen dieser aufwendig gelagert wird und vor allem die Flächennutzung zum Abbau von

3 LEBENSZYKLUS

3.3 END-OF-LIFE PHASE

Kies und Sand reduziert. Folglich dient die Verwertung von baulichen Restmassen direkt zum Schutz endlicher Ressourcen. In der Schweiz ist die Nutzung von Recyclingbruch im Beton anstelle von Kies schon per Gesetz vorgeschrieben. Der Bestand als eigene Ressource könnte somit also immer wichtiger für die Bauindustrie werden [2].

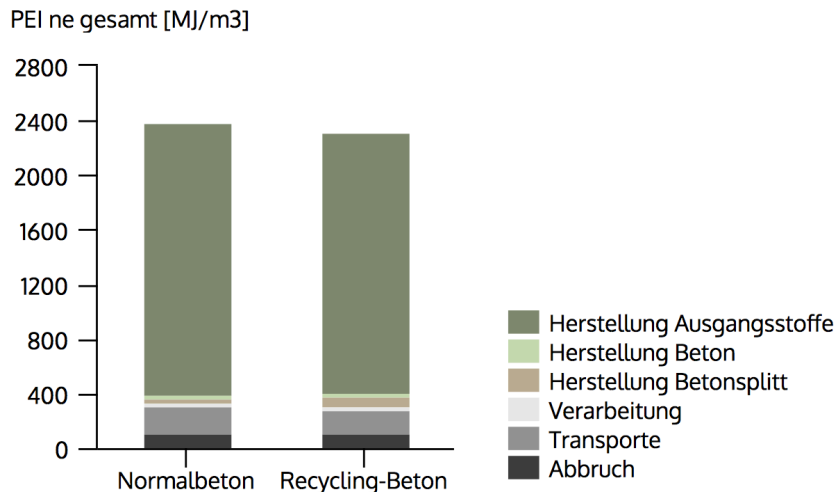


Abb. 12: Vergleich des Primärenergieinhalts an nicht erneuerbaren Ressourcen von Normalbeton mit Recyclingbeton [2]

Eine gemeinsame Aufbereitung von herkömmlichem Beton mit Holzbeton ist laut *Lechner und Stark (1993)* aufgrund der voneinander abweichenden Festigkeit und der unterschiedlichen Formate nicht möglich. Das Abbruchmaterial von Holzmantelsteinen beispielsweise sollte, um das Recyclingpotenzial nicht zu reduzieren, getrennt von den anderen baulichen Restmassen gelagert werden. Fallen beim Bauen vor Ort sortenreine Abfälle von Holzmantelsteinen an, können diese in zermahlener Form der Neuproduktion beigegeführt werden. Bis zu 10 % der Rohmaterialien können durch den Schrot ersetzt werden. Ein Einsatz von Abbruchmaterial ist jedoch im Herstellungsprozess bis jetzt noch nicht bekannt [45].

3.3.1 THERMISCHE VERWERTUNG VON HOLZLEICHTBETON

Holzbaustoffe werden hauptsächlich thermisch verwertet. Die Brennbarkeit von Holzleichtbeton ist vorab zu hinterfragen, da der Baustoff geeignet ist, um im Bereich des baulichen Brandschutzes eingesetzt zu werden. Dementsprechend gehört Holzleichtbe-

ton der Baustoffklasse A2 an. Es müssten infolgedessen zusätzlich Stoffe zugeführt werden, um das Material besser entflamm- und brennbar zu machen.

Im Zuge von Forschungsarbeiten an der *Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud* wurde die Brennbarkeit von Holzbeton-Verbundwerkstoffen unter hohen Temperaturen als mögliche Recyclingmethode untersucht. Holz-Zement-Verbundstrukturen beinhalten einen signifikanten Anteil an Kohlenstoff, welcher im Holz gebunden wird. Infolgedessen wurde geprüft, inwieweit das Material brennt und wie viel bzw. ob überhaupt Energie zur späteren Weiterverwendung am Ende des Produktlebenszyklus produziert wird. Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass der Heizwert von etwas weniger als 6 MJ/kg hoch genug ist, um den Brennvorgang zu ermöglichen, obwohl auch der Aschegehalt von über 55 % nicht zu vernachlässigen ist. Die Konditionen um das Produkt zu verbrennen, also die Größe der einzelnen Stücke, die Entzündungstemperatur und die Entflammungszeit, sind abhängig von der Dichte des Originalprodukts. Es wurden für die Versuchsreihe drei verschiedene Holz-Zement-Verbundwerkstoffplatten mit unterschiedlicher Dichte untersucht.

Der Rauch beim Verbrennungsvorgang wurde ebenfalls analysiert. Bis auf Schwefeldioxid (SO_2), Kohlendioxid (CO_2), Stickoxid (NO_x) und Methan (CH_4) wurden keine signifikanten Schadstoffe entdeckt. Der CO_2 -Anteil ist dabei jedoch relativ hoch. Dies könnte auf die niedrige Luftströmung zurückzuführen sein. Im normalen Brennofen mit Standardbedingungen ist der CO_2 Wert ähnlich dem von Holz, welcher bei 12 % liegt.

Ein mögliches Problem beim Verbrennungsvorgang ist außerdem der hohe Ascheanteil. Da die Wirkung so groß ist, wird es nötig sein, den Holzleichtbeton mit einem weiteren Material beim Brennvorgang zu mischen, um die Sättigung im Brennofen zu verhindern. Wichtig ist außerdem, dass sobald das Material aus dem Brennofen entfernt wird, der Brennvorgang anhält. Holzbeton kann nicht als entflammbar angesehen werden, obwohl es unter sehr hohen Temperaturen und anhaltender Aussetzung entzündet.

Das Produkt kann infolgedessen verbrannt werden, jedoch nur unter Zugabe eines oder mehrerer Brennstoffe. Es kann daher nicht als Standard-Brennstoff angesehen werden, weil der Brennvorgang bei Temperaturen unter 210 °C anhält, jedoch ohne zusätzliches Brennmaterial nicht wieder neu gestartet werden kann.

Die Zeit um Holzleichtbeton komplett zu verbrennen ist grundsätzlich abhängig von der Temperatur, der Materialdichte und dem Brennwert. Um eine effiziente Verbrennung durchzuführen, ist es erforderlich, auf mindestens 600 °C für mehr als 20 Minuten zu erhitzen. Ist die Temperatur höher, wird sich die Zeit verkürzen, aber der Gehalt an Emissionen von NO_x wird sich erhöhen. Wenn der Brennofen mit einem System zur Regulierung des Rauches für NO_x ausgestattet ist, stellt dies jedoch kein Problem dar [46].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die thermische Verwertung des Baustoffes zwar möglich ist, aus ökologischer Sicht jedoch nicht befriedigend. Der Anteil an mineralischen Stoffen ist zu hoch, um eine gute Brennbarkeit aufzuweisen. Auch die Zugabe von Brennstoffen zahlt sich nach derzeitigen Entwicklungen noch nicht aus, um einen erheblichen Betrag an Energie zu gewinnen, denn sonst könnte durch die thermische Behandlung die Wärme in Strom umgewandelt werden oder als Nah- und Fernwärmequelle dienen [39].

Außerdem müsste die Menge an Asche, die durch die thermische Entsorgung entsteht, nach dem Vorgang auf einer Reststoff-Deponie gelagert werden, was zu hohen Kosten führen kann. Der Preis beläuft sich gegenwärtig auf ca. 30-40 € pro Tonne.

3.3.2 TRENNBARKEIT UND DEMONTAGE VON HOLZ-HOLZLEICHTBETON-VERBUND-KONSTRUKTIONEN

Bei Verbundmaterialien ist zur Optimierung beim Rückbau besonders auf die Trennbarkeit der Baustoffe zu achten, um die einzelnen Elemente schlussendlich bestmöglich recyceln. Im vorangegangenen **Kapitel 3.3.1** wurde die mögliche thermische Verwertung von Holzleichtbeton angesprochen. Dies bezieht sich aber nur auf den Baustoff selbst, nicht auf den Verbund mit anderen Materialien. Um das Produkt bestmöglich zu verwerten, muss dementsprechend gut separiert werden. Problematisch sind vor allem vollflächig verklebte Verbundstoffe, aber auch teilweise verklebte und mechanisch verbundene, die nicht zerstörungsfrei auseinanderzunehmen sind. Einfach ist es, wenn die Materialien mechanisch verbunden, aber zerstörungsfrei zu trennen oder überhaupt nicht verbunden sind (siehe **Abbildung 13**).

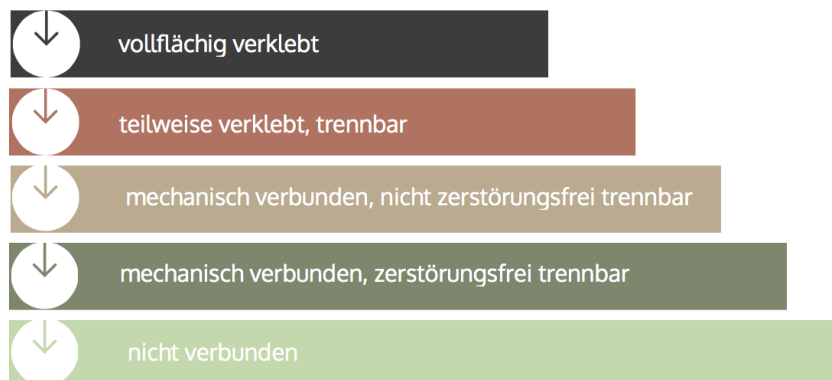


Abb. 13: Stufen der Trennbarkeit von Bauteilschichten

Außerdem ist auf die Austauschbarkeit einzelner beschädigter Schichten bei Verbundsystemen zu achten. Wenn dies nicht möglich ist ohne das ganze Bauteil auszuwechseln, kann es die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes deutlich verkürzen.

Es sind demnach die Sortenreinheit eines Baustoffes und eine möglichst erfolgreiche Trennung einzelner Bauteilschichten von Vorteil. Dafür sollte die Zusammensetzung eines Bauteils bekannt und gut dokumentiert sein [39].

Für Holzleichtbeton-Verbundsysteme können verschiedene Verbindungsarten in Betracht gezogen werden, wobei es aus ökologischer Sicht zu großen Ungleichheiten kommt. Es wird zwischen einer vollflächigen Verklebung, dem Einsatz von Kunststoffmatten oder Verschraubungen unterschieden. Auch Schubkerven sind möglich. Holzleichtbeton kann außerdem in Form von vorgefertigten Platten angewendet werden oder erst vor Ort als Frischbeton aufgetragen werden, wobei zur Auswahl der durchgeführten Methode wiederum die Entscheidung der Verbindungsart wichtig ist. Im Folgenden wird auf die unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten eingegangen [24].

3.3.2.1 VERBINDUNG DURCH VERKLEBUNG

Eine Möglichkeit zur Verbindung der einzelnen Holzleichtbetonschichten, welche in Form von Platten verlegt sind, und dem Massivholz ist die Verwendung von Zweikomponentenkleber. Dabei werden die einzelnen HLB-Platten miteinander und mit dem Brettsperrholz vollflächig verklebt (siehe **Abbildung 14** und **Abbildung 15**).

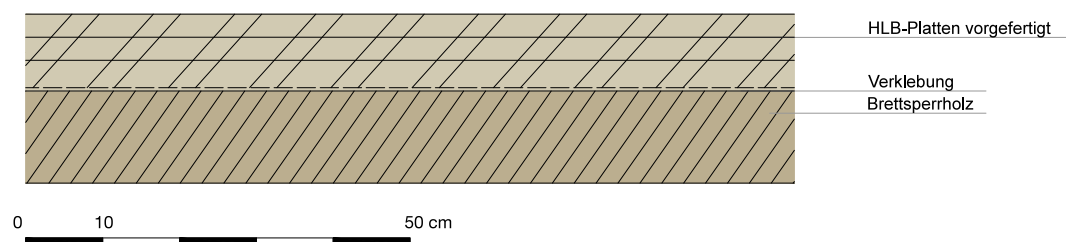


Abb. 14: Verbindung durch Verklebung

Bei dieser Form des Verbunds ist eine spätere Trennung der jeweiligen Schichten nach Abbruch des Bauteils sehr schwierig und nur unter großem Aufwand möglich. Die Materialien können somit nicht zerstörungsfrei voneinander getrennt werden, wodurch die Wiederverwendung ausgeschlossen wird und auch Recycling kaum möglich ist.

3 LEBENSZYKLUS

3.3 END-OF-LIFE PHASE

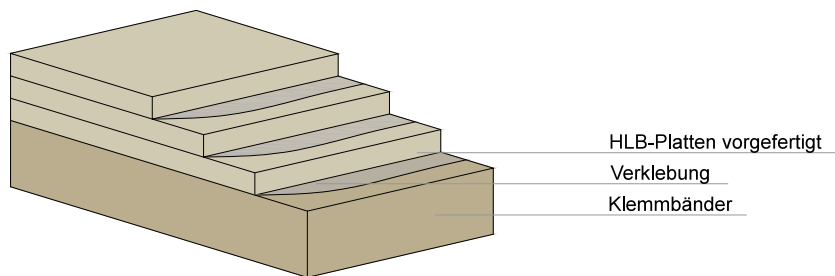


Abb. 15: Verklebung der einzelnen Bauteilschichten

3.3.2.2 VERBINDUNG MIT KUNSTSTOFFMATTE

Auch die Verbindung durch Einsatz einer Kunststoffmatte bzw. eines Gitternetzes zwischen dem Holzleichtbeton und dem Brettsperrholz ist durchführbar (vergleiche **Abbildung 16**). Der Holzleichtbeton wird ebenfalls in Form von Platten eingesetzt, welche jedoch ebenfalls wieder einzeln zusammengefügt werden müssen. Eine Trennung ist hierbei zwar möglich, jedoch kaum zerstörungsfrei ausführbar.

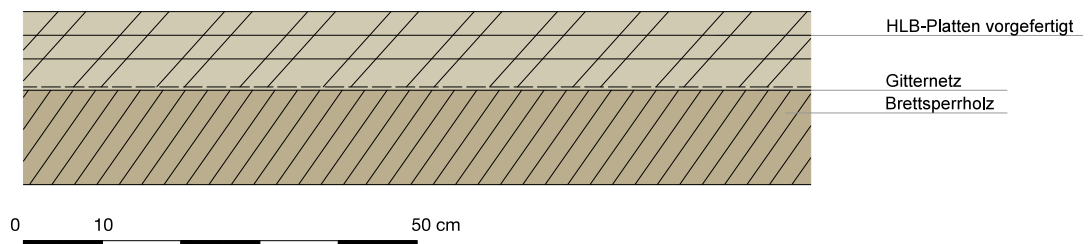


Abb. 16: Verbindung mittels Kunststoffmatte

3.3.2.3 VERBINDUNG DURCH VERSCHRAUBUNG

Eine mechanische Verbindung durch Schrauben ist ebenso möglich, um vorgefertigte HLB-Platten mit Brettsperrholz zu verbinden. Diese erfolgt in Regel konzentriert in den Bereichen der Auflager. Um ein Einsinken der Schrauben zu verhindern, werden zusätzlich Klemmbänder eingesetzt (siehe **Abbildung 17**).

3 LEBENSZYKLUS

3.3 END-OF-LIFE PHASE

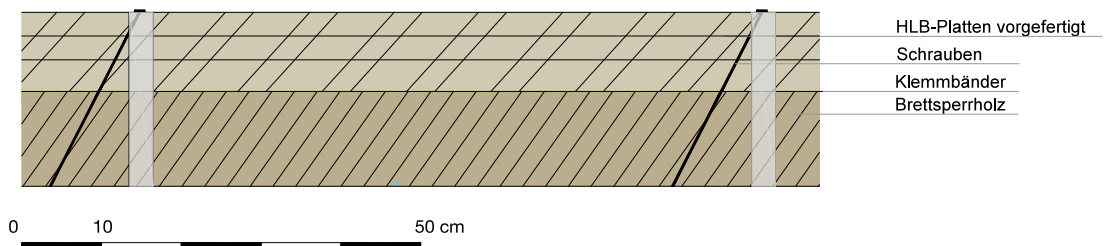


Abb. 17: Verbindung durch Schrauben

Im Gegensatz zur vollflächigen Verklebung oder der Verwendung eines Kunststoffnetzes ist eine zerstörungsfreie Trennung möglich, welche jedoch einen gewissen Aufwand erfordert, da um einen sauberen Recyclingvorgang zu erzielen, alle Schrauben einzeln entfernt werden müssen. Dies ist allerdings fehlerfrei durchführbar und eine Wiederverwendung einzelner Baustoffe oder Up- und Recycling sind nicht ausgeschlossen.

3.3.2.4 VERBINDUNG DURCH VERSCHRAUBUNG UND LATTUNG

Durch eine Holzlattung auf der Oberseite der Massivholzschicht kann der Holzleichtbeton als Frischbeton aufgetragen werden, wodurch eine vollflächige Verklebung oder Verschraubung von einzelnen Platten überflüssig wird (vergleiche mit **Abbildung 18**). Dies ist aus ökologischer Betrachtung von Vorteil, da kein zusätzlicher Arbeitsaufwand oder eine größere Menge an zu verwertenden Bauteilschichten und Verbindungselementen anfällt. Ähnlich ist außerdem die Verbindung mittels Schubkerve. Durch den Verlauf über die gesamte Breite des Trägers hinweg, wird eine hohe Steifigkeit des ganzen Bauteils erzielt und es kann schon durch eine relativ geringe Anzahl ein hohes Tragverhalten ermöglicht werden [13].

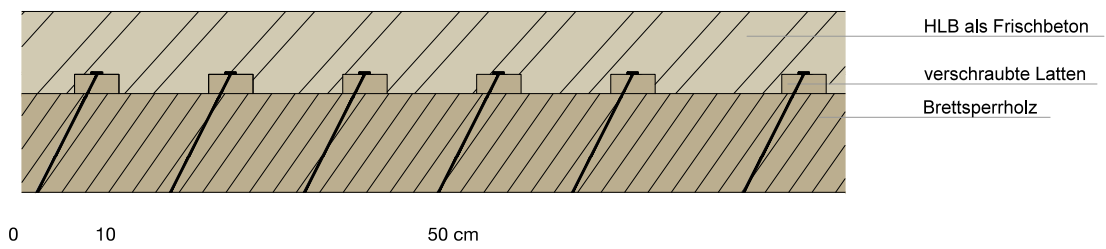


Abb. 18: Verbindung durch verschraubte Latten

Das Fazit der Überlegungen ist, dass wenn möglich die Bauteilschichten aus demselben Material schon vorab zusammengefasst werden sollten, um die Anzahl an Verbin-

dungselementen weitgehend gering zu halten. Mechanische Verbindungen wie Schrauben lassen sich wieder ohne großen Aufwand entfernen und können im Bestfall wiederverwendet werden. Verklebungen eignen sich nicht als nachhaltige Variante zur Verbindung, da eine Trennung der einzelnen Schichten am Lebensende kaum zerstörungsfrei möglich ist.

3.3.2.5 MANTELBETONELEMENTE

Mantelbetonelemente, wie beispielsweise die Holzleichtbetonplatten der Firma *VELOX* [21], sind zum Teil durch Steckeisen und Bügel sowie Nägel verbunden, welche sich ohne besonderen Aufwand voneinander lösen lassen. Jedoch sind diese Verbindungen hauptsächlich für den Montagevorgang von Bedeutung. Die Holzbetonplatten werden dementsprechend aufgestellt und anschließend mit Beton gefüllt. Um einen guten Zusammenhalt der einzelnen Schichten zu gewährleisten, wird der Betonkern gerüttelt. Die Wärmedämmung wird anschließend an die Holzbetonplatten verklebt. Folglich ist auch bei Mantelbetonelementen der Demontagevorgang deutlich aufwendiger als der vorangegangene Zusammenbau.

3.3.3 DEPONIERUNG

Sind Baustoffe für die Rückführung in den Produktkreislauf ungeeignet, müssen Alternativen zur Verwertung des Abbruchmaterials am Lebensende gefunden werden. Es ist nicht genug ein Material einfach als recyclingfähig zu erklären, da die unterschiedlichen Formen des Recyclings berücksichtigt werden müssen und wenn nötig, auch eine Deponierung möglich sein sollte. Grundsätzlich gilt es Materialien, welche im Verbund zu Unreinheiten führen, zu vermeiden, ebenso wie Konstruktionen, welche schlussendlich schwer zu deponieren sind.

Gemäß der österreichischen Deponieverordnung ist es erlaubt zementgebundene Holzwolledämmplatten und zementgebundene Holzspanplatten auf Baurestmassendeponien unterzubringen, obwohl diese einen hohen Anteil an organischen Substanzen beinhalten. Grund dafür ist die vorherige Mineralisierung des Holzes, durch die eine endgültige Lagerung als unbedenklich eingestuft wird und dadurch der Grenzwert von 10% an organischem Kohlenstoff nicht überschritten wird. Dies würde sonst zur Gasentwicklung und einem folgenden Energieverlust führen. Laut dem Baustoffrecyclingverband haben aber leider nur vereinzelt Deponien in Österreich um Bewilligung zur Ablagerung von Holzspanbeton angefragt [47].

Die Transportwege von der Abbruchstelle zum endgültigen Abladeplatz haben kaum Auswirkungen auf die gesamte Ökobilanz eines Bauteils bzw. Gebäudes, da sich diese nie über mehr als einige wenige hundert Kilometer erstrecken. In Österreich gibt es insgesamt 14 Baurestmassendeponien [48], welche nach Anfrage auf Bewilligung zur Ablagerung von Holzleichtbeton herangezogen werden können. Dabei müsste aber schlussendlich zusätzlich überprüft werden auf wie viel sich die Kosten einer eventuellen Entsorgungsgebühr und des Transports zu dem Abladeplatz belaufen.

3.4 LEITLINIEN ZUR ÖKOLOGISCHEN OPTIMIERUNG

Im Allgemeinen können gewisse Leitlinien für die ökologische Optimierung von Bauteilen zusammengefasst werden. Dabei ist die Verwendung von nachwachsenden erneuerbaren Rohstoffen sowie regionalen Produkten besonders wichtig. Einzelne Bauteilschichten und Materialien sollen einfach und mit geringen Umweltwirkungen hergestellt werden können. In der Nutzungsphase ist eine möglichst lange Lebensdauer aller eingesetzten Baustoffe zu beachten, um überflüssige Austauschprozesse zu vermeiden. Auch eine gute Recyclierbarkeit sowie die Förderung von Baustoffen aus Recyclingmaterial sind für ressourcenschonende Bauweisen Voraussetzung. Gesundheitsschädliche Materialien sowie Abfälle, welche bei der Entsorgung Gefahren mit sich bringen sollten immer vermieden werden. Um festzustellen inwieweit diese Aussagen bezüglich der Anwendung von Holzleichtbeton-Verbundbauweise zutreffen, sollen sie anhand eines Fallbeispiels bzw. einer Szenario-Analyse im Vergleich mit konventionellen Konstruktionen überprüft werden.

4 SZENARIO - ANALYSE

Um Verständnis für die Zusammenhänge und das mögliche Optimierungspotenzial einzelner Bauteile eines Gebäudes zu bekommen, eignen sich Fallbeispiele besonders gut. Durch die Gegenüberstellung von Holzleichtbetonkonstruktionen mit konventionellen Bauweisen soll unter definierten Vergleichskriterien anhand eines gebauten Gebäudes beleuchtet werden, welche Stärken und Schwächen sowie Chancen und eventuelle Gefahren in der strategischen Planung mit dem Material liegen. Die modellierten Bauteile sind in Raum und Fläche mit denen des realen Gebäudes gleichwertig und erfüllen dieselben Funktionen und energetischen Zielwerte.

4.1 VERWENDETE DATENBANKEN

Für eine ökologische Bewertung der jeweiligen Bauteile wurden verschiedene Datenbanken herangezogen. Es wurde bevorzugt mit den Daten aus *baubook* [49] gerechnet, da hier die meisten Angaben bezüglich des Baustoffes Holzleichtbeton vorhanden sind. Zur Überprüfung der Genauigkeit wurde zum Teil mit anderen Angaben verglichen.

4.1.1 BAUBOOK

Mittels der Onlineplattform *baubook* [49] des *IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH* werden die Umweltwirkungen der verschiedenen Bauweisen mittels der zur Verfügung gestellten Ökokennzahlen berechnet. Die angegebenen bauphysikalischen und bauökologischen Richtwerte werden kostenlos zur Verfügung gestellt. Diese vorhandenen Werte beruhen hauptsächlich auf Daten aus *Ecoinvent Version 2.1* und beziehen sich auf die „Cradle to gate“ Prozesse. Das heißt vom Rohstoffabbau, über die Herstellung und den Transport, bis zum Verlassen des Werks.

4.1.2 DATAHOLZ

Zur Überprüfung der Ergebnisse werden die Angaben für die Konstruktionen aus Holzrahmenbauweise mit Daten der Homepage *dataholz.com* [28] der *Holzforschung Austria* verglichen. Es können verschiedene Wirkungskategorien und ebenfalls bauphysikalische Kennwerte sowie genaue Baustoffangaben entnommen werden.

4.1.3 ÖKOBAU.DAT

Die Baustoffdatenbank ökobau.dat wird vom „Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung Deutschland“ über die Seite „Nachhaltiges Bauen“ kostenlos zur Verfügung gestellt. Im Gegensatz zu den vorher angeführten Datenbanken sind die Daten noch genauer aufgeschlüsselt und in weitere Unterkategorien eingeteilt. Sie beziehen sich aber ebenfalls auf „Cradle to gate“ Prozesse. Die Angaben basieren auf der *Datenbank GaBi 2011*.

Ökobau.dat ist mit ungefähr 950 Datensätzen sehr umfangreich, hat jedoch nur wenige Informationen über Holzleichtbeton gespeichert. Gegenüber *baubook* gibt es Daten zu den Holzzementplatten der Firma *Eternit*, jedoch nicht zu den hauptsächlich für die Analyse herangezogenen Platten der Firma *VELOX*.

4.2 BEGRIFFSDEFINITIONEN

Bei der Wirkungsbilanz werden die Schadstoffemissionen in Luft, Wasser und Boden zusammengefasst. Aus den unterschiedlichsten Umweltkategorien werden für den Ökoindex 3 (OI3) - Leitfaden folgende drei Ökoindikatoren eingesetzt:

- **Treibhauspotenzial** (GWP, 100 Jahre bezogen auf 1994):

Durch anthropogene Tätigkeiten werden immer mehr Treibhausgase in unsere Atmosphäre emittiert. Demzufolge wird mehr von der Erde abgehende Strahlungswärme absorbiert, was das gesamte Strahlungsgleichgewicht des Planeten verändert. Die Folge sind weltweite Veränderungen des Klimas. Mit dem Treibhauspotenzial GWP (Global Warming Potential) wird der Betrag an Emissionen, die in einem Produktzyklus zur globalen Erwärmung bzw. zum Treibhauseffekt führen in Relation zur Menge an anfallenden Kohlendioxid (CO₂) beschrieben. Dieses Treibhausgas ist quantitativ das einflussreichste. Bei der IBO-Richtwertetabelle wird das Treibhauspotenzial für einen Zeitraum von 100 Jahren bestimmt und in kg-CO₂ angegeben.

- **Versauerungspotenzial (AP):**

Durch Wechselwirkungen von Schwefeldioxid- (SO_2) und Stickoxidgasen (NO_x) mit der Luft kommt es zu einer Verringerung des pH-Wertes dieser chemischen Verbindungen, wodurch die Luftschadstoffe innerhalb von nur wenigen Tagen in Schwefelsäure (H_2SO_4) und Salpetersäure (HNO_3) umgewandelt werden. Aufgrund der guten Löslichkeit dieser Stoffe in Wasser, gehen sie anschließend als saurer Regen nieder. Dies ist kein globales Ereignis, wie der Treibhauseffekt, sondern kommt regional vor. Das Versäuerungspotential AP (Acidification Potential) wird in der Einheit kg-SO_2 , also relativ zum Säurebildungspotenzial von SO_2 , angegeben.

- **Primärenergieinhalt an nicht-erneuerbaren Ressourcen (PEI ne):**

Der Primärenergieinhalt PEI ne (Primary Energie Input) bezeichnet den gesamten Bedarf an nichterneuerbaren Energieträgern, der für die Herstellung eines Baustoffes oder eines Bauteils nötig ist. Dazu zählen beispielsweise Erdgas, Erdöl, Braunkohle sowie Steinkohle und Uran [27]. Der Architekt kann anhand der Informationen zum Primärenergieinhalt von Baustoffen Alternativen prüfen und danach diejenigen mit einem geringen Anteil an nicht erneuerbaren Ressourcen bei gleicher Leistung, bevorzugt anwenden.

Der OI3- Index selbst kann wie folgt aus den beschriebenen Ökoindikatoren berechnet werden:

$$OI3 = 1/3 OI_{PE} + 1/3 OI_{GWP} + 1/3 OI_{AP} \quad [27]$$

Bei dieser Gleichung werden die Ökokennzahlen mit einer linearen Funktion pro m^2 Fläche des Bauteils auf eine Punkteskala von 0-100 Punkten umgerechnet und daraufhin unter gleicher Gewichtung der einzelnen Faktoren aufsummiert. Die jeweiligen Ökoindikatoren verschiedener Bauteile können mit Hilfe des Rechners der *baubook GmbH* [49], welcher im Internet zur Verfügung steht, ermittelt werden.

Außerdem gibt es noch folgende Kategorien, welche jedoch für die spätere Analyse keine Rolle spielen [39]:

- Primärenergieinhalt erneuerbar (PEI), [MJ]
- Ozonzerstörungspotenzial (Ozone Depletion Potential – ODP), [$\text{kg CCL}_3\text{F eq}$]
- Entropierungspotenzial (Entrophication Potential – EP), [$\text{kg PO}_4^{-3} \text{ eq}$]

- Sommersmogpotenzial (photochemisches Oxidanzienbildungspotenzial, Photochemical Ozone Creation Potential – POCP), [kg C₂H₄ eq]

4.3 BEWERTUNGSKRITERIEN

Aus den in Kapitel 3.4 angeführten Leitlinien für eine ökologische Optimierung von Bauteilen, welche den gesamten Produktlebenszyklus umfassen, lassen sich nun Bewertungskriterien für die Anwendung von Holzleichtbeton-Verbundbauweise ableiten (siehe **Abbildung 19**).

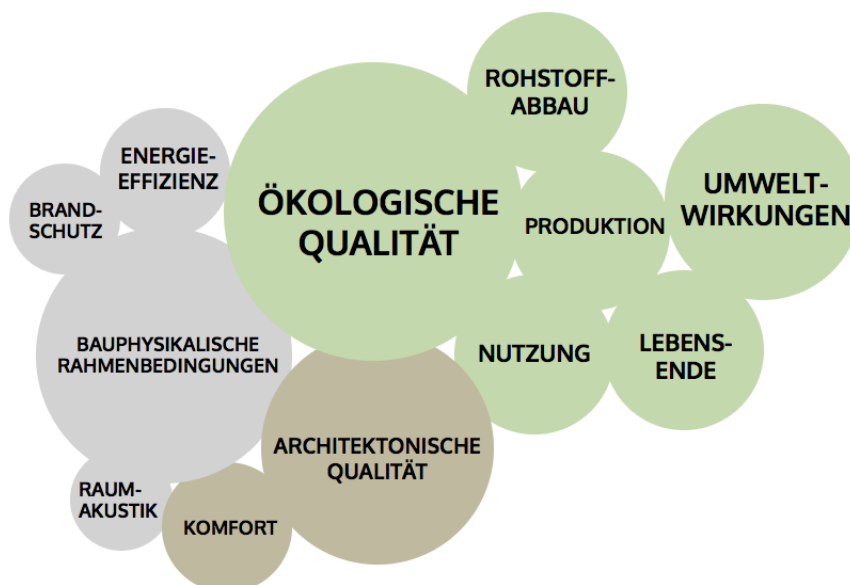


Abb. 19: Bewertungskriterien der Bauteile in Holzleichtbeton-Verbundbauweise

Im Zentrum steht die ökologische Qualität der Produkte, welche den Lebenszyklus mit den daraus resultierenden Umweltwirkungen beinhaltet. Dazu wird den einleitenden Überlegungen folgend der Rohstoffabbau besonders berücksichtigt, wobei zusätzlich zwischen nachwachsenden und nicht nachwachsenden Ressourcen unterschieden wird sowie das Thema Regionalität von Wichtigkeit ist. Auch die Herstellung und Verarbeitung der Produkte sowie die Verwertung von Abbruchmaterialien am Lebensende sind auf die Nachhaltigkeit der jeweils ausgeführten Verfahren zu überprüfen.

Eng im Zusammenhang mit der ökologischen Bewertung stehen bauphysikalische Rahmenbedingungen und die architektonische Qualität. Dabei geht es hauptsächlich um die Nutzungsphase, wobei Energieeffizienz, Brandschutz und Raumakustik sowie die

allgemeine Behaglichkeit in einem Gebäude von Bedeutung sind. Durch beispielsweise optimale wärmespezifische Eigenschaften oder die richtige Ausrichtung sowie eine ideale Standortwahl kann der generelle Komfort in einem Gebäude maßgebend beeinflusst werden. Je nach den Anforderungen an ein Bauteil können hier Schwerpunkte gesetzt werden. Bei einer Außenwand ist zum Beispiel besonders auf einen geringen Wärmedurchlass zu achten, um die Zufuhr an Energie in das Bauwerk gering zu halten, während Innenwände diese Funktion nicht in diesem Ausmaß erfüllen müssen. Im Innenraum ist wiederum auf Brandschutz und Schallschutz zu achten, um die Konstruktion und die Sicherheit sowie die Behaglichkeit der Nutzer zu gewährleisten. Gesundheitsgefährdende Risiken dürfen ebenso nicht außer Acht gelassen werden.

Um die erwähnten Aspekte herauszuarbeiten, wird ein konventionelles Gebäude aus Stahlbetonbauweise im Vergleich mit Holz- und Holzleichtbeton Verbundbauweise aufgezeigt. Bei sehr ähnlichen Voraussetzungen sind die unterschiedlichsten Lösungsansätze möglich, welche besonders bezogen auf die Umweltwirkungen zu verschiedenen Ergebnissen führen. In der folgenden Analyse wird der Lebenszyklus der jeweiligen Bauteile im Kontext mit der spezifischen Leistungsfähigkeit über einen angenommen Zeitraumraum von 50 Jahren beleuchtet. Eine definierte Lebenserwartung ist wichtig, um die Nachhaltigkeit der jeweiligen Bauteile zu bewerten.

Generell ist die Gegenüberstellung verschiedener Materialien erst in Bezug auf ein bestimmtes Bauteil sinnvoll. Ein bloßer quantitativer Vergleich von einem Kilo herkömmlichen Beton mit einem Kilo Holzleichtbeton würde keine zufriedenstellenden Ergebnisse bringen. Die herangezogenen Bauteile sollen daher in Bezug auf das gegebene Projekt innerhalb eines Gebäudes den gleichen Anforderungen entsprechen und die gleichen Funktionen erfüllen.

4.4 PROJEKTDESCREIBUNG DES FALLBEISPIELS

Die als Fallbeispiel für konventionelle Stahlbetonbauweise herangezogene Wohnbauanlage wurde durch die Gemeinnützige Bau- und Wohnungsgenossenschaft Wien Süd im Jahr 2008 erbaut. Das Projekt wurde zum Großteil anonymisiert bearbeitet. Das zum Vergleich ausgewählte viergeschossige Gebäude ist Teil eines Wohn- und Gewerbekomplexes, wobei sich im Erdgeschoss ausschließlich Geschäftsflächen und in den darüber liegenden Ebenen die Wohnungen befinden. Die einzelnen Wohnebenen sind terrassenförmig aufgebaut, wodurch sich deutlich erkennbare Vor- und Rücksprünge in der Grundrissgestaltung bilden. Zusätzlich verfügt fast jede Wohnungseinheit über eine eigene Loggia.

4 SZENARIO - ANALYSE

4.4 PROJEKTBE SCHREIBUNG DES FALLBEISPIELS

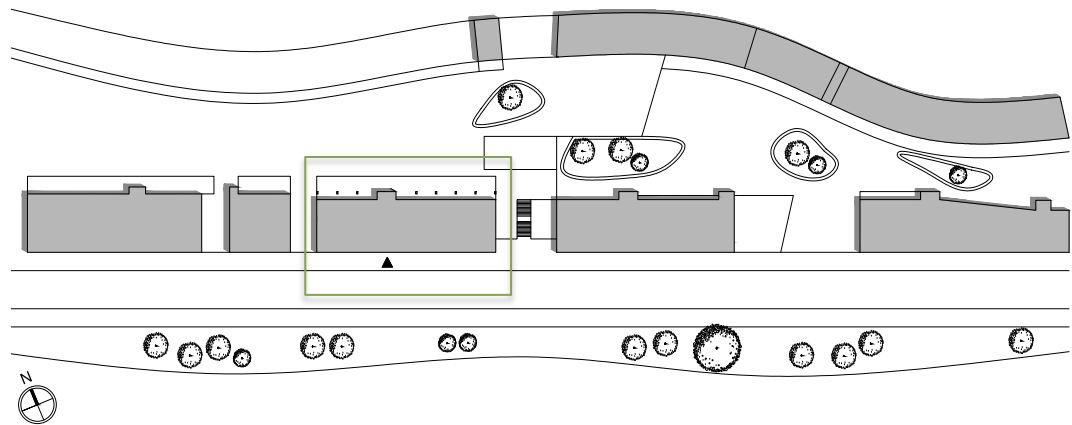


Abb. 20: Lageplan der Wohnanlage

Das Volumen und die Bruttogrundfläche (BGF) des Gebäudes belaufen sich auf folgende Werte:

Volumen: $8031,41 \text{ m}^3$

BGF: $2649,82 \text{ m}^2$

Bei der Tragkonstruktion ergeben sich des Weiteren Spannweiten von bis zu $5,7 \text{ m}^2$. Dies ist vor allem für den Vergleich von Decken- und Dachkonstruktionen von Bedeutung.

Auch die Ausrichtung und damit verbundene Grundrissgestaltung sind für eine Betrachtung aus ökologischer Sicht wichtig. Die einzelnen Wohnungseinheiten sind entweder nach Nord-Osten oder Süd-Westen auf der gegenüberliegenden Seite ausgerichtet. Um ein Gebäude schon in der Planung energetisch zu optimieren, sollten Räume mit hohen thermischen Anforderungen immer in Richtung Süden angeordnet werden, denn in unseren Breitengraden wird bei Süd-Orientierung auch nur die Südseite besonnt. Die Sonneneinstrahlung erreicht hohe Reflexionen durch die im Sommer sehr hoch stehende Sonne. Durch verschiedene Sonnenschutzsysteme kann zum Beispiel so der Strombedarf eines Haushalts für Beleuchtung reduziert werden. Hierbei handelt es sich um Aufenthaltsräume, wohingegen Lagerräume, Erschließungs- oder Sanitärbereiche weniger hoch thermisch beansprucht sind [25]. In diesem Fall sind die Hälfte der Wohnungen ideal angeordnet, während die Restlichen mit einer Orientierung nach Nord-Osten eher ungünstig liegen, denn hier ist der Einstrahlungswinkel immer sehr niedrig und es entstehen nur sehr geringe Reflexionen. Vor allem im Winter ist die Einstrahlung auf die

Ost- und Westfassade schwach, weshalb keine erwünschten solaren Wärmegevinne erzielt werden können [25]. Es sollte demnach schon vor der Materialwahl auf eine optimale Gestaltung von Form und Grundriss in der ersten Planungsphase Wert gelegt werden, um ein rundum nachhaltig konzipiertes Gebäude zu entwerfen. Im Folgenden werden einzelne Bauteile hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen im Lebenszyklus analysiert. Weiterführende Informationen zu den angesprochenen Bereichen liefert das **Kapitel 5.1** und die nachfolgenden Abschnitte mit Konstruktionsvorschlägen und Optimierungsansätzen.

4.5 BAUTEILANALYSE

4.5.1 AUSSENWAND

Um die Frage zu beantworten wie verputzte Außenwände aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise hinsichtlich ihrer ökologischen Eigenschaften abschneiden, werden diese Alternativen mit möglichst gleichen U-Werten gegenübergestellt.

Zum Vergleich mit Holz- und Holzleichtbeton Verbundbauweise wird ein Außenwandelement des Stahlbetongebäudes mit definierten Abmessungen herangezogen (vergleiche mit **Abbildung 21**). Durch die gegebene Höhe von 3,2 m und der Breite von 15,6 m ergibt sich nach Abzug der Fläche von Fenstern und Türen eine Fläche von 45,7 m². Diese Kenndaten werden in **Tabelle 8** zusammengefasst.

Breite [m]	Höhe [m]	Fläche Brutto [m ²]	Fenster+Türen [m ²]	Fläche Netto [m ²]	Ausrichtung
15,6	3,2	49,8	-4,1	45,7	90°/90°

Tab. 8: Abmessungen der gegebenen Stahlbetonwand

Die zur Gegenüberstellung herangezogene Außenwand aus Stahlbeton hat einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,23 W/m²K. Das liegt deutlich unter den Mindestanforderungen des Wärmeschutzes an Außenwände von < 0,50 W/m²K, nachdem sich infolgedessen auch die im Vergleich stehenden Bauteile richten sollen. Durch Versuche zur ökologischen Optimierung der Bauteile, wobei einzelne Bauteilschichten ausgetauscht werden, können die U-Werte schließlich etwas von den gegebenen abweichen.

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

Dadurch wird auch sichtbar, inwieweit jene Schichten Einfluss auf den Wärmedurchgang, aber auch die Wärmespeicherung haben.

Außerdem muss jede der untersuchten Außenwandkonstruktionen bestimmte statische Anforderungen erfüllen. Die Last eines viergeschossigen Gebäudes muss demnach ohne Versagen abgetragen werden können.

Wichtig ist auch das Erstellen einer Flächenbilanz. Durch Angabe des Prozentanteils an verbauter Fläche durch die jeweiligen Bauteile kann abgeschätzt werden, welche Konstruktion mehr oder auch weniger der Bruttogeschoßfläche einnimmt. Es wird sichtbar wie viel Volumen an Material jeweils verbraucht wird.

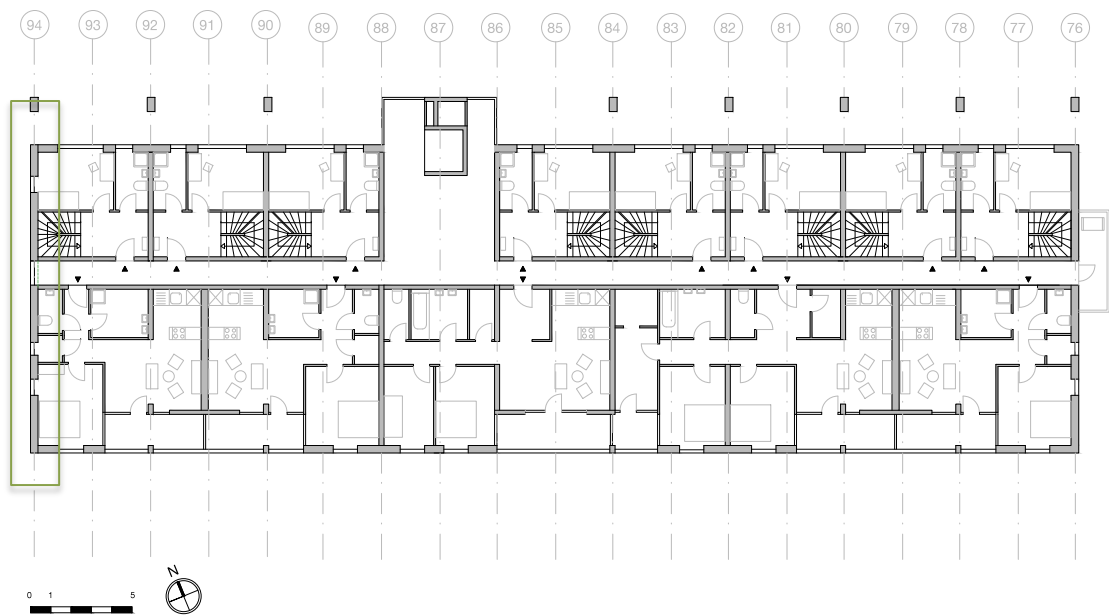


Abb. 21: Grundriss eines Regelgeschosses mit ausgewählter Außenwand

4.5.1.1 AUSSENWAND IN STAHLBETON- UND HOLZRAHMENBAUWEISE

Der Schichtaufbau der Stahlbetonaußenwand besteht konventionell aus einer 20 cm dicken Stahlbetonschicht mit einer 16 cm dicken Wärmedämmung (Fassadendämmplatte EPS-F). Außen ist Kunststoffdünnputz aufgetragen und im Innenraum wird Gipsputz verwendet.

Die Informationen für die Wand aus Holzrahmenbauweise basieren auf Angaben der Datenbank *Dataholz* [28]. Diese Außenwand ist aus einer Außenverkleidung aus Holz

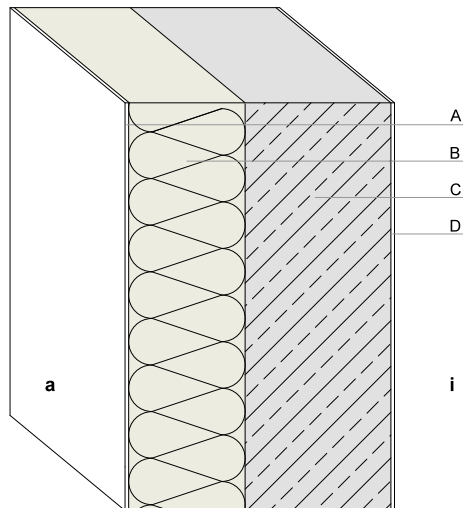
(Lärche), der dahinterliegenden Hinterlüftung bzw. Holzlattung (Fichte), sowie einer Gipsfaserplatte jeweils vor und nach der 16 cm dicken Schicht aus Konstruktionsholz (Fichte) und Glaswolle aufgebaut. Dann gibt es eine zusätzliche dämmende Schicht aus Holz - Querlattung (Fichte) und wiederum Glaswolle. Im Innenraum ist diese nochmals mit einer Gipsfaserplatte verkleidet. Das Verhältnis zwischen Konstruktionsholz und der Glaswolle ist immer 10 % zu 90 %.

Die Gesamtschichtdicke der Wand in Holzrahmenbauweise beträgt 30 cm und fällt dadurch deutlich geringer aus als die der Stahlbetonwand mit 37 cm. Der geringere Wert ergibt sich dadurch, dass hier die Tragkonstruktion mit der Wärmedämmung in einer Schicht von 16 cm zusammengefasst ist, während beim Stahlbeton die Dämmung von 16 cm zusätzlich angebracht wird. In der später berechneten Flächenbilanz werden die Auswirkungen auf die Bruttogeschossfläche sichtbar. In den folgenden Seiten in den **Abbildungen 22 und 23** sowie den **Tabellen 9 und 10** sind die jeweiligen Schichtaufbauten und Baustoffangaben nochmals genau sichtbar.

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

AW 1a: Stahlbetonbauweise



Bauphysikalische und ökologische Bewertung

Wärmeschutz	U-Wert [W/m ² K]	0,23
	R _{se} -R _{si} [W/m ² K]	0,17
Ökologie	OI3 _{KON}	54,7

Mittlere Lebenserwartung: 40 Jahre

Ersatz in 50a: 1,25

Flächenbezogene Masse: 498,5 kg/m²

Abb.22: Außenwand in Stahlbetonbauweise

Schichtaufbau und Baustoffangaben

(von Außen nach Innen)

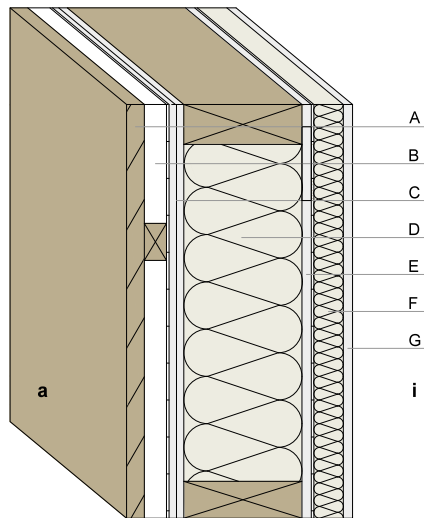
	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse* [kg]	λ [W/mK]	Lebens- dauer [a]
A	0,005	Kunststoffdünnputz	1200	273,96	0,90	30
B	0,160	Fasadendämm- platte EPS-F	40	292,22	0,04	40
C	0,200	Stahlbeton	2400	21.916,80	2,30	≥ 50
D	0,005	Gipsspachtel	900	205,47	0,80	≥ 50
Ge- samt	0,370			22.688,45		

Tab. 9: Aufbau und Baustoffangaben der Stahlbetonkonstruktion. * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 45,66 m²

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

AW 2a: Holzrahmenbauweise



Bauphysikalische und ökologische Bewertung

Wärmeschutz	U-Wert [W/m ² K]	0,22
	R _{se} -R _{si} [W/m ² K]	0,13
Ökologie	OI3 _{KON}	-5,2

Mittlere Lebenserwartung: 40 Jahre
Ersatz in 50a: 1,25
Flächenbezogene Masse: 87,3 kg/m²

Abb. 23: Außenwand in Holzrahmenbauweise [28]

Schichtaufbau und Baustoffangaben (von Außen nach Innen)

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse* [kg]	λ [W/mK]	Lebens- dauer [a]
A	0,024	Holz Lärche Außenwandverkleidung	600	657,50	0,15	45
B	0,030	Holzlattung Fichte - Hinterlüftung	500	684,90	0,13	≥ 50
		Abdichtung	-	-	-	40
C	0,020	Gipsfaserplatte	1000	913,20	0,32	≥ 50
D	0,160	Konstruktionsholz /Glaswolle	500/16	365,28/ 105,20	0,13 /0,04	≥ 50
E	0,0125	Gipsfaserplatte	1000	570,75	0,32	≥ 50
F	0,040	Holz-Querlattung Fichte /Glaswolle	500/16	91,32/ 26,30	0,13 /0,04	≥ 50
G	0,0125	Gipsfaserplatte	1000	570,75	0,32	≥ 50
Gesamt	0,299			3.985.2		

Tab. 10: Aufbau und Baustoffangaben der Holzrahmenkonstruktion. *Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 45,66 m²

4.5.1.2 AUSSENWAND IN HOLZLEICHTBETON-VERBUNDBAUWEISE

Die vorgestellten Außenwandkonstruktionen in Stahlbeton- und Holzrahmenbauweise stehen nun mit Wänden aus Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise im Vergleich. Die nachfolgenden Überlegungen basieren auf den ausführlichen Erläuterungen von *Roland Krippner* [13], welche durch eigene Berechnungen und Modellierungen ergänzt werden. Dabei übernimmt die Massivholzschiicht aus Brettstapelholz (Nadelholz) die Funktion der Lastabtragung, während der Holzleichtbeton zur Wärmedämmung und –speicherung dient. Es sind auch Konstruktionen wie die folgende Variante 3a möglich, welche zwei Schichten Holzleichtbeton aufweisen. Hierbei dämmt, wie in **Abbildung 24** dargestellt, die Äußere, während die Innere speichert. Als wichtige Randbedingung muss die Mindestanforderung an den Wärmeschutz mit einem U-Wert von $< 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei Außenwänden eingehalten werden. Außerdem sollten die Stärken der Wände möglichst gering gehalten werden.

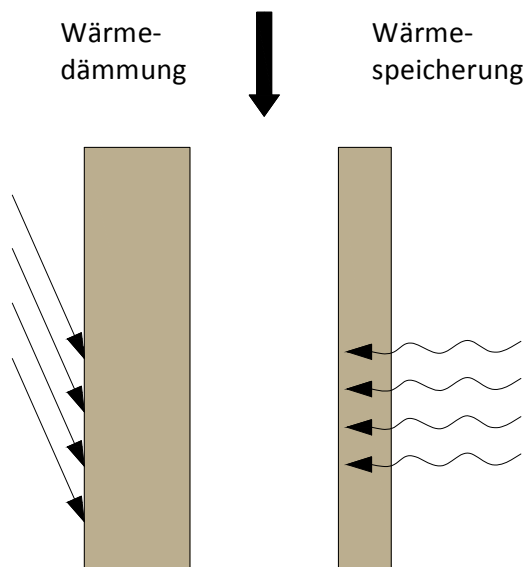


Abb. 24: Die Funktionsschichten der Holzleichtbeton-Verbundbauweise (von Außen nach Innen) [13].

Für die folgenden Berechnungen wurde für die Holzleichtbetonmischungen jeweils eine Dichte von 550 kg/m^3 angenommen. Dies entspricht dem durchschnittlichen Wert der Dämmplatten der Firma *VELOX* [21]. Die Platten WS 50 (50 mm dicke Holzspan-Dämmplatten) haben eine Dichte von 560 kg/m^3 , während die Ausführung WS 75 (75

mm dicke Holzspan-Dämmplatten) eine Dichte von 540 kg/m^3 hat. Als zusätzliche Wärmedämmung wird vorrangig eine Holzfaserdämmung angewendet. Diese ist vorteilhafterweise ebenfalls auf Holzbasis entwickelt.

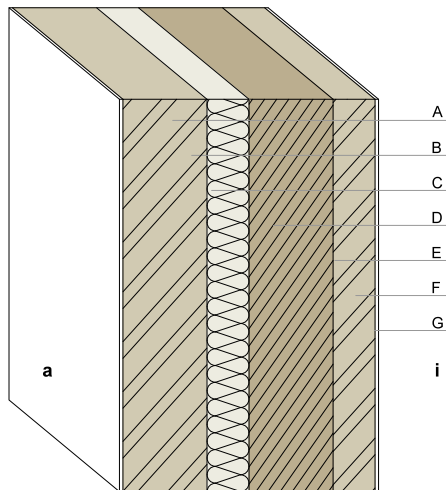
Für die Massivholzsicht wird Brettstapelholz verarbeitet, da das ebenso am Markt angebotene Kreuzlagenholz deutlich ungünstiger in der Herstellungsphase durch einen erhöhten Primärenergiegehalt auffällt. Brettstapelholz wird des Weiteren ohne Verleimung ausgeführt [13].

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

AW 3a:

Holzleichtbeton-Verbundbauweise



Bauphysikalische und ökologische Bewertung

Wärmeschutz	U-Wert [W/m ² K]	0,26
	R _{se} -R _{si} [W/m ² K]	0,13
Ökologie	OI3 _{KON}	-2,3

Mittlere Lebenserwartung: 45 Jahre

Ersatz in 50a: 1

Flächenbezogene Masse: 184,1 kg/m²

Abb. 25: Außenwand in Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3a)

Schichtaufbau und Baustoffangaben

(von Außen nach Innen)

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse* [kg]	λ [W/mK]	Lebens- dauer [a]
A	0,005	Normalputz	1800	410,94	0,70	45
B	0,120	Holzleichtbeton	550	3.013,56	0,13	≥ 50
C	0,060	Holzfaser- Dämmplatte	160	438,33	0,05	≥ 50
D	0,120	Diagonal Dübelholz	450	2.876,58	0,12	≥ 50
E	0,050	Holzleichtbeton	550	1.255,65	0,13	≥ 50
F	0,005	Edelputzmörtel CR Kalkzement	1800	410,94	1,05	≥ 50
Gesamt	0,360			8.406,00		

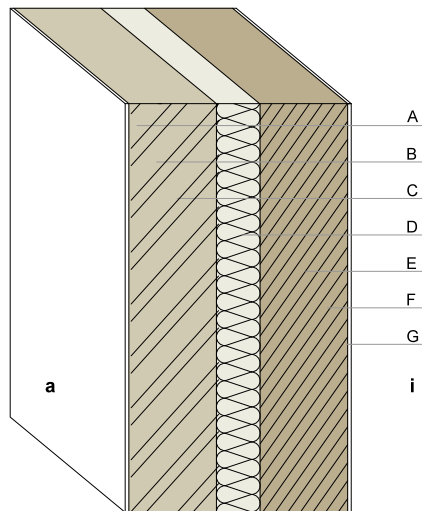
Tab. 11: Aufbau und Baustoffangaben der Holzleichtbeton – Konstruktion (3a). * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 45,66 m²

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

AW 3b:

Holzleichtbeton-Verbundbauweise



Bauphysikalische und ökologische Bewertung

Wärmeschutz	U-Wert [W/m ² K]	0,29
	R _{se} -R _{si} [W/m ² K]	0,13
Ökologie	OI3 _{KON}	-14,3

Mittlere Lebenserwartung: 45 Jahre

Ersatz in 50a: 1

Flächenbezogene Masse: 156,8 kg/m²

Abb. 26: Außenwand in Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3b)

Schichtaufbau und Baustoffangaben

(von Außen nach Innen)

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse* [kg]	λ [W/mK]	Lebens- dauer [a]
A	0,005	Normalputz	1800	410,94	0,70	45
C	0,120	Holzleichtbeton	550	3.013,56	0,13	≥ 50
D	0,060	Holzfaser- Dämmplatte	160	438,33	0,05	≥ 50
E	0,120	Diagonal Dübelholz	450	2.876,58	0,12	≥ 50
F	0,005	Edelputzmörtel CR Kalkzement	1800	410,94	1,05	≥ 50
Gesamt	0,310			7.150,35		

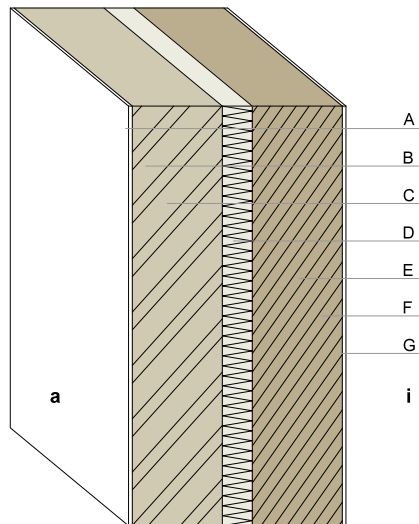
Tab. 12: Aufbau und Baustoffangaben der Holzleichtbetonkonstruktion (3b). * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 45,66 m²

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

AW 3c:

Holzleichtbeton-Verbundbauweise



Bauphysikalische und ökologische Bewertung

Wärmeschutz	U-Wert [W/m ² K]	0,24
	R _{se} -R _{si} [W/m ² K]	0,13
Ökologie	OI _{3KON}	27,7

Mittlere Lebenserwartung: 30 Jahre
Ersatz in 50a: 1,5
Flächenbezogene Masse: 154,60 kg/m²

Abb. 27: Außenwand in Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3c)

Schichtaufbau und Baustoffangaben

(von außen nach innen)

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse* [kg]	λ [W/mK]	Lebens- dauer [a]
A	0,005	Normalputz	1800	410,94	0,70	45
B	0,120	Holzleichtbeton	550	3.013,56	0,13	≥ 50
C	0,040	Vakuum- Dämmplatte	190	347,02	0,02	30
D	0,120	Diagonal Dübelholz	450	2.876,58	0,12	≥ 50
F	0,005	Edelputzmörtel CR Kalkzement	1800	410,94	1,05	≥ 50
Gesamt	0,290			7.059,04		

Tab. 13: Aufbau und Baustoffangaben der Holzleichtbetonkonstruktion (3c). * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 45,66 m²

4.5.1.3 FLÄCHENBILANZ

Aus planerischer sowie wirtschaftlicher Betrachtung ist außerdem die Flächenbilanz der jeweiligen Außenwandkonstruktionen von Bedeutung. Zur Berechnung und dem anschließenden Vergleich wird die Bruttogeschosßfläche des Gebäudes benötigt. Der für die Fallstudie herangezogene Baukörper hat folgende Abmessungen:

Breite: 15,19 m

Länge: 51,05 m

Bruttogeschosßfläche: 775,45 m²

Daraus ergeben sich die in der untenstehenden **Tabelle 14** angegebenen Werte für die Nettowandfläche und den daraus folgenden Prozentanteilen, welche zum grafischen Vergleich in **Abbildung 28** aufgezeigt werden.

	Verbaute Fläche [m ²]	Prozentanteil [%]
AW1a	49,02	6,32
AW2a	40,00	5,16
AW3a	47,69	6,15
AW3b	41,07	5,30
AW3c	38,42	4,95

Tab. 14: Nettoaußenwandfläche und Prozentanteil der jeweiligen Aufbauten.

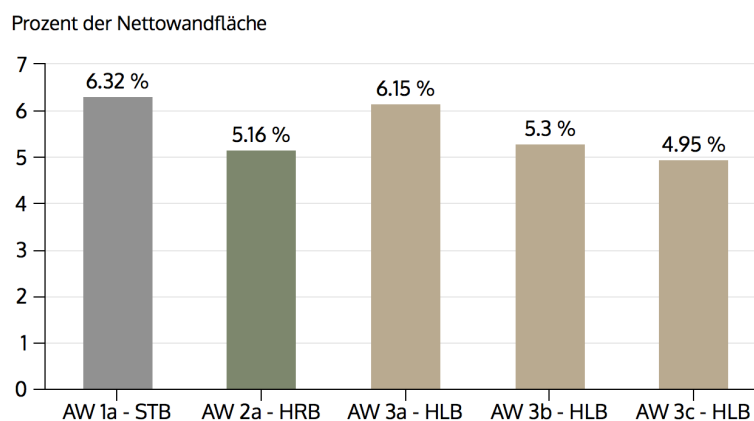


Abb. 28: Prozentangaben der Nettoaußenwandflächen

Die Stahlbetonwand und die Holzeichbeton Variante 3a haben sehr ähnliche Ergebnisse mit den höchsten Prozentanteilen von 6,32 % und 6,15 %. Diese Resultate waren durch die relativ großen Dicken der Schichtaufbauten vorauszusehen. Die Variante 3b der Holzleichtbetonkonstruktionen erzielt einen sehr guten Wert von 5,30 % durch Weglassen der zusätzlichen Holzleichtbetonschicht, welche nur geringen Einfluss auf die Anforderungen des Wärmeschutzes hat. Die Wand in Holzrahmenbauweise sowie die Holzleichtbetonwand Variante 3c haben mit 5,16 % und 4,95 % die geringsten Prozentanteile der Nettowandflächen.

4.5.1.4 MASSEN Bilanz

Durch die stark differierenden Rohdichten der jeweiligen Baustoffe weichen die Massen der einzelnen Außenwandaufbauten stark voneinander ab. Dies ist in der folgenden **Abbildung 29** zu erkennen. Die Stahlbetonwand wiegt mit 82 % mehr als acht Mal so viel wie die Holzrahmenkonstruktion und 67 % mehr als die drei ausgewählten Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen im Mittel.

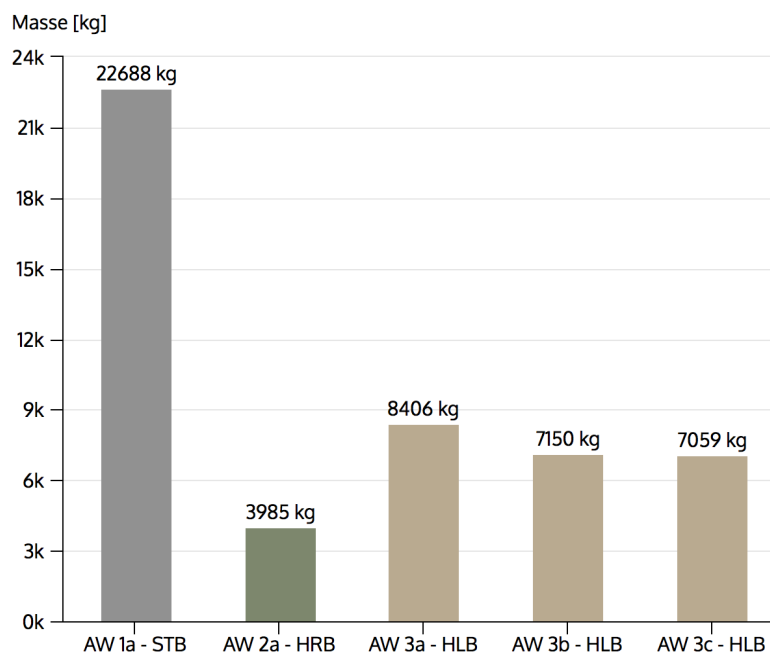


Abb. 29: Massen der Außenwandkonstruktionen

Die deutlich geringere Rohdichte des Holzleichtbetons im Gegensatz zum konventionellen Stahlbeton verursacht eine drastische Gewichtsreduzierung. Im Verbund mit Massivholz wiegt die Außenwand aus Holzleichtbeton nur ungefähr doppelt so viel wie die

Holzleichtbaukonstruktion. Bei Außenwandvariante 3c kommt es durch den Einsatz der Vakuumdämmplatte zu einer zusätzlichen Gewichtsreduktion.

4.5.1.5 EINFLUSS DER ROHDICHTE

Wie bereits erwähnt wurde bei den oben angeführten Tabellen mit einer Dichte von 550 kg/m^3 gerechnet. Nun soll erneut mit Hilfe von *baubook* [49] untersucht werden in welchem Maß sich die Anforderungen an den Wärmeschutz durch eine erhöhte Rohdichte verändern. Zum Vergleich werden Werte von 650 kg/m^3 sowie 800 kg/m^3 herangezogen.

Bei den zementgebunden Holzspan-Schallschutzplatten von *VELOX* [21] wird eine Dichte ca. 750 kg/m^3 in den Datenblättern angegeben. Da diese Werte nicht mit denen im *baubook* übereinstimmen, wurde mit den angenommen Bezugswerten gerechnet.

Die jeweiligen Werte für die Rohdichte wurden in die Konstruktionsvariante 3b eingesetzt, wobei nur eine 12 cm dicke Holzleichtbetonschicht vorhanden ist. Dadurch ergeben sich die in **Tabelle 15** angeführten Werte für die gesamte Wandkonstruktion.

Dichte der HLB-Mischung [kg/m^3]	λ [W/mK]	R [$\text{m}^2\text{K/W}$]	U-Wert [$\text{W/m}^2\text{K}$]
550	0,13	0,92	0,29
650	0,16	0,75	0,31
800	0,24	0,50	0,34

Tab. 15: Thermische Kennwerte der verschiedenen Holzleichtbeton-Mischungen

Es wird sichtbar, dass die Wärmeleitfähigkeit (λ -Wert) des Stoffes bei steigender Dichte deutlich zunimmt. Der Wärmedurchgangswiderstand (R-Wert) und Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) verringern sich hingegen. Erhöht man die Dichte um 100 kg/m^3 von 550 auf 650 kg/m^3 steigt der λ -Wert um 18 % an, während der R-Wert parallel dazu um 18% fällt. Wird die Dichte von 650 auf 800 kg/m^3 erhöht, ergibt sich beim λ -Wert eine Steigerung um 33 % und beim R-Wert eine Verringerung um 33 %. Der U-Wert ändert sich zuerst um 6 %, dann um weitere 8 %.

Der Anstieg der Dichte hat nicht nur auf wärmespezifische Werte einen negativen Einfluss, sondern auch die Umwelteinwirkungen werden deutlich gesteigert. Dies ist an den berechneten Ökokennzahlen, welche in **Tabelle 16** angeführt sind, zu erkennen.

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

Dichte der HLB-Mischung [kg/m ³]	$\Delta OI3$ HLB-Schicht	$\Delta OI3$ gesamte Konstruktion	$OI3_{KON}$
550	8	22	-14,3
650	9	23	-13,3
800	11	25	-11,3

Tab. 16: Ökokennzahlen der verschiedenen Holzleichtbeton-Mischungen

Durch die Ergebnisse des Ökoindikators $\Delta OI3$ der Holzleichtbetonschicht wird sofort sichtbar um wie viel $OI3$ Punkte sich der $OI3_{KON}$ der gesamten Konstruktion ändert. Von 550 zu 650 kg/m³ steigt der $\Delta OI3$ um 11 %. Von 650 zu 800 kg/m³ erhöht sich die Umweltbelastung um 18 %. Bei Betrachtung der gesamten Konstruktion liegen die Werte bei 7 % und 15 %.

In der folgenden **Tabelle 17** werden die Auswirkungen auf die primären Umweltkategorien dargestellt.

Dichte der HLB-Mischung [kg/m ³]	GWP100 [kg CO ₂ /m ²]	AP [kg SO ₂ /m ²]	PEI ne [MJ/m ²]
550	-104,34	0,16	541,02
650	-107,00	0,17	570,14
800	-110,97	0,18	613,81

Tab. 17: Auswirkungen der verschiedenen Holzleichtbeton-Mischungen auf die drei Umweltkategorien.

Es fällt auf, dass die Erhöhung der Dichte der Holzleichtbetonmischungen auf den Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Ressourcen den größten Einfluss hat. Hier kommt zu einem Anstieg von 5,1 % und des Weiteren von 7,1 %. Die Auswirkungen auf die Schadstoffbelastung sind etwas geringer. Das Versauerungspotenzial ändert sich deutlich mit einer Erhöhung von 4,2 % und 5,5 %. Beim Treibhauspotenzial liegen die Werte bei einer Steigerung von 2,4 % sowie 3,6 %.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz von Holzleichtbetonmischungen mit höheren Rohdichten als 550 kg/m³ nur aus statischen Gründen gerech-

fertigt wäre, da dadurch höhere Lasten abgetragen werden können. Auf die wärme- und vor allem umweltspezifischen Eigenschaften des gesamten Verbundbauteils haben sie demnach deutlich negative Auswirkungen.

4.5.1.6 ENERGIEEFFIZIENZ

Die Energieeffizienz eines Materials ist ein bedeutender Faktor, um einen Baustoff ökologisch nachhaltig zu optimieren. Der Energieverbrauch eines gesamten Gebäudes kann durch verbesserte Isolierung und technische Lösungen stark reduziert werden. Diese Faktoren beeinflussen schließlich die Beziehung zwischen betrieblich zugeführter und gespeicherter Energie. Durch optimale Ausführung kann das Ziel, den Anteil an zugegebener Energie zu reduzieren, erreicht werden. Die auf Langzeit aufkommenden Energiekosten sind demnach sehr abhängig von den verwendeten Materialien einer Konstruktion [51].

Bauteile, welche die Hülle eines Gebäudes bilden, werden generell anhand ihres U-Wertes auf ihre wärmespezifischen Eigenschaften hin bewertet. Materialien mit einem geringeren U-Wert sind bessere Dämmstoffe, während bei einem Wert von über 0,50 W/m²K die isolierende Schicht dicker ausgeführt werden muss, um eine bessere Funktionalität zu erzielen. In manchen Konstruktionen müssen zusätzliche Materialien eingesetzt werden, um die technischen Anforderungen zu erfüllen. In **Abbildung 30** sind die U-Werte der unterschiedlichen Außenwandkonstruktionen aufgezeigt.

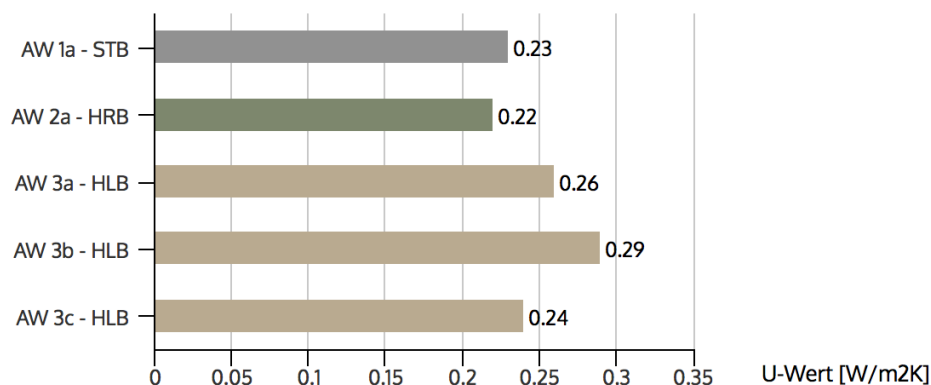


Abb. 30: Wärmedurchlasskoeffizienten [W/m²K] der unterschiedlichen Außenwandtypen

Die Außenwände aus Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen weisen relativ gute Werte auf und stehen den konventionellen Aufbauten nicht um viel nach. Vor allem durch Einsatz der nur 4 cm dicken Vakuumdämmplatte kann der U-Wert sehr niedrig gehalten

werden. Beim Einsatz der aus Kunststoffen bestehenden Platte werden im Folgenden die entstehenden Umweltwirkungen überprüft, um zu entscheiden ob die geringe U-Wert Verbesserung in Relation mit dem ökologischen Fußabdruck steht. Die Wandaufbauten aus ein oder zwei Holzleichtbetonschichten und der zusätzlichen Holzfaserdämmung erreichen U-Werte von 0,26 und 0,29 W/m²K. Diese Ergebnisse liegen auch noch deutlich unter der vorgeschriebenen Mindestanforderung. Es besteht jedoch Optimierungspotenzial, um den Wärmedurchlass durch die Bauteile noch weiter zu reduzieren.

Holzleichtbeton selbst hat einen Lamda-Wert von 0,13 W/mK, welcher dem von Holz entspricht. Dabei wird die Dicke der Materialschicht nicht berücksichtigt, sondern nur die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes. Um als guter Dämmstoff klassifiziert zu werden, muss ein möglichst geringer Lamda-Wert angestrebt werden.

4.5.1.7 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG NACH OI3

Produktions-, Nutzungs- und End-Of-Life-Phase ergeben in Summe die gesamtheitliche Bewertung der jeweiligen Außenwandkonstruktion für die Schadstoffbelastung und die nicht erneuerbare Primärenergie.

Schon an den OI3_{kon} – Werten wird deutlich, dass die Außenwände in Holzleichtbeton-Verbundbauweise aus ökologischer Sicht mit -4,3 und -7,3 der Stahlbetonkonstruktion, welche einen Wert von 54,7 aufweist, weit überlegen sind. Die Holzrahmenkonstruktion hat mit -5,2 einen sehr ähnlichen Wert. Zur genaueren Bewertung sind in der nachstehenden Tabelle 17 das Treibhauspotenzial, das Versäuerungspotenzial sowie der Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Ressourcen jedes einzelnen Bauteils angeführt.

Die Stahlbeton-Außenwand weist mit einem Wert von 94,09 kg CO₂/m² ein sehr hohes Treibhauspotential auf. Im Vergleich hat es den höchsten Wert der untersuchten Konstruktionen. Dieser GWP100-Wert wird hauptsächlich durch die Herstellungsphase definiert, denn bei der Produktion von Stahlbeton wird, wie schon beschrieben, eine große Menge an Kohlendioxid durch Brennvorgänge freigesetzt. Konstruktionen aus Holzwerkstoffen sind daher als eher CO₂-neutral einzuordnen. Die Außenwand AW 1a emittieren bis zu doppelt so viel wie die Außenwände aus Holzleichtbeton – Verbundbauweise. Die Außenwandtypen 3a und 3b mit konventioneller Dämmung aus Holzfaserplatten weisen mit -108,35 und -104,34 die besten Werte auf.

Auch der Anteil an nicht-erneuerbarer gebrauchter Primärenergie ist mit 1.173,88 MJ/m² bei der Konstruktion aus Stahlbeton sehr groß, wobei auffallend ist, dass die Ergebnisse von GWP100 und PEI ne bei jedem untersuchten Bauteil in einem ähnlichen

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

Verhältnis zueinander, entweder beide gut oder beide schlecht, ausfallen. Nur bei der Variante 3c gibt es merkbare Abweichungen (vergleiche mit **Tabelle 18**).

	GWP100 [kg CO ₂ /m ²]	AP [kg SO ₂ /m ²]	PEI ne [MJ/m ²]
AW1a	94,09	0,27	1.173,88
AW2a *	-31,50	0,14	571,50
AW2a	-12,68	0,15	522,78
AW3a	-108,35	0,21	714,21
AW3b	-104,34	0,16	541,02
AW3c	-59,02	0,28	1.052,14

Tab. 18: Treibhauspotenzial, Versäuerungspotenzial und Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Energien der unterschiedlichen Außenwandkonstruktionen pro m². * Werte aus der Datenbank *Dataholz*, um etwaige Abweichungen zu überprüfen [52]

Deutlich negativ fällt außerdem die Außenwandkonstruktion 3c mit einem PEI ne - Wert von 1.052,14 MJ/m² auf. Dies ist auf den Einsatz der Vakuum-Dämmplatte zurückzuführen, welcher aufgrund der relativ kleinen Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten im Gegensatz zur sehr großen Veränderung der Umweltwirkungen ins Nachteilige nicht sinnvoll erscheint. Durch die Verwendung von Holzfaser-Dämmplatten können sehr gute Ergebnisse, welche im Bereich der Außenwand in Holzrahmenbauweise, mit einem PEI ne von nur 571,50 MJ/m² liegen. **Abbildung 31** zeigt das GWP100 und den PEI ne der einzelnen Wandaufbauten im Vergleich.

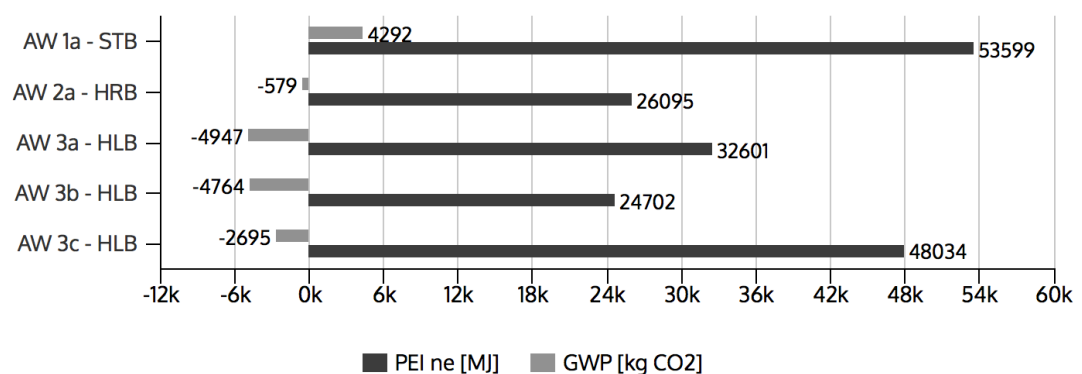


Abb. 31: GWP100 [kg CO₂] und PEI ne [MJ] der Außenwand-Konstruktion für eine Fläche von 45,66m².

Auch das Versauerungspotenzial fällt durch die Vakuum-Dämmplatte bei Holzleichtbeton 3 mit $0,28 \text{ kg SO}_2/\text{m}^2$ am negativsten aus, während die Holzrahmenkonstruktion mit $0,15 \text{ kg SO}_2/\text{m}^2$ den besten Wert erzielt. Zwischen diesem und dem Ergebnis der Stahlbetonkonstruktion mit $0,27 \text{ kg SO}_2/\text{m}^2$ liegen die der Holzleichtbetonkonstruktionen mit Holzfaser-Dämmung. Das Versauerungspotenzial bei den Holzkonstruktionen ist deutlich geringer als bei der mineralischen Konstruktion, da schon die Primärkonstruktion deutlich geringere Werte aufweist.

4.5.1.8 LEBENSDAUER

Um die verschiedenen Materialkombinationen sinnvoll gegenüberzustellen, ist es wichtig, den Aufwand für die Instandhaltung nicht zu vernachlässigen. Ein Bauteil das umweltbewusst hergestellt sowie gut recycelt werden kann, muss auch eine entsprechend lange Lebensdauer aufweisen. Die in der Literatur angeführten Kennwerte können grobe Voraussagen über die letztendliche Lebenserwartung geben, für ein konkretes Ergebnis ist jedoch immer die finale Einbausituation ausschlaggebend [2]. Die Berechnungen für die verschiedenen Außenwandsysteme und auch die der folgenden Innenwand sowie Deckenkonstruktionen stützen sich auf die Angaben aus der BBSR-Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ [53] und auf Angaben aus „Nachhaltig Konstruieren“ [2].

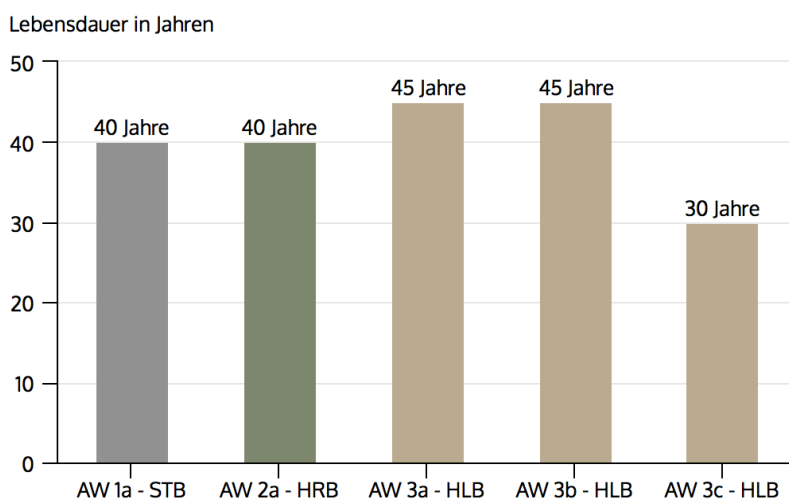


Abb. 32: Mittlere Lebenserwartung der unterschiedlichen Außenwandaufbauten

In **Abbildung 32** sind die mittleren Lebenserwartungen der jeweiligen Außenwandkonstruktionen aufgezeigt. Jede einzelne Schicht eines Bauelements hat eine eigene expli-

zit begrenzte Lebensdauer. Wenn auch nur eine davon eine geringere Dauerhaftigkeit von nur 40 Jahren aufweist, wie zum Beispiel die Abdichtungsfolie bei der Außenwandvariante 2a in Holzrahmenbauweise, müssten nach dieser Zeitspanne auch alle weiteren Schichten bis zur Abdichtung abgerissen und ausgetauscht werden. Dies verringert die gesamte Lebenserwartung eines Bauteils. Auch Wärmedämmverbundsysteme wie bei dem Aufbau 1a weisen eine geringere Lebensdauer als 50 Jahre auf. Der Stahlbeton selbst hat eine Dauerhaftigkeit von mehr als 50 Jahren. Die Außenwände aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise weisen alle einen relativ guten Wert in Bezug auf ihre Haltbarkeit auf. Nur der Außenputz müsste nach ungefähr 45 Jahren erneuert werden, wodurch aber keine weiteren Schichten beeinflusst werden. Nur bei Variante 3b sind frühere Auswechslungsarbeiten nötig. Die Vakuumdämmplatte hat mit circa 30 Jahren eine sehr geringe Lebensdauer, ist aber schon durch den hohen Primärenergiebedarf an nicht erneuerbaren Energien und die hohe Schadstoffbelastung bei der Herstellung als ungeeignet eingestuft worden.

Generell ist es demnach, um die Nachhaltigkeit einer Konstruktion zu gewährleisten, entscheidend, dass alle Schichten eine möglichst lange Lebensdauer aufweisen. Die Lebenserwartungen der einzelnen Schichten sollten außerdem am besten sehr ähnlich sein, um am Ende der Lebensdauer das gesamte Bauteil zu erneuern oder nach vollkommenem Abriss zu recyceln.

4.5.1.9 LEBENSENDE

Eine ökologische Herstellung sowie eine nachhaltige Nutzungsphase sind grundsätzlich wirkungslos solange das jeweilige Produkt nicht wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Bei Bauteilen aus Stahlbeton ist eine Trennbarkeit der einzelnen Schichten relativ einfach, da nur die Wärmedämmung von der Tragkonstruktion gelöst werden muss. Der Stahlbeton ist wie in **Kapitel 3** beschrieben als Recyclingbeton wiederverwendbar.

Die bereits angesprochenen Schwierigkeiten bei einer nachhaltigen Entsorgung oder Wiederverwertung von Holzleichtbeton-Verbundbauteilen gelten auch für Außenwände. Hierbei ist die intensive Suche nach verbesserten Lösungsansätzen wichtig.

4.5.1.10 IDEALE DÄMMDICKE

Der Anteil der Dämmung an der Herstellungsenergie und den CO₂-Emissionen hat grundsätzlich einen bedeutenden Einfluss auf die Umweltwirkungen der gesamten Kon-

struktion [54]. Die Dämmung der Außenwand aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise Variante 3c hat einen Anteil von 80 % am gesamten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf des kompletten Bauteils. Dabei werden die Holzleichtbetonschichten und die zusätzliche Wärmedämmungen zusammengefasst. Bei Variante 3b beläuft sich der Betrag auf 60 %. Diese Werte sind im Vergleich mit den beiden konventionellen Konstruktionstypen sehr hoch. Die EPS-F-Dämmplatte macht nur 22 % des totalen Primärenergieinhalts an nicht erneuerbaren Energien aus und bei der Holzrahmenkonstruktion handelt es sich um 27 %. Für eine Optimierung müssen dementsprechend die Dämmdicken eventuell verringert werden ohne die thermischen Kennwerte negativ zu beeinflussen. Der Anteil der Dämmung an den Schadstoffemissionen ist mit 28 % bei Typ 3a nicht auffallend hoch. Bei der Stahlbetonkonstruktion hat die Dämmung mit 12 % einen relativ geringen Einfluss auf die gesamten CO₂-Emissionen, während der Wert bei der Außenwand aus Holzrahmenbauweise mit fast der Hälfte, nämlich mit 44 %, sehr hoch ist.

4.5.1.11 ZUSAMMENFASSUNG

Generell geht hervor, dass Außenwände aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise große Chancen auf eine nachhaltig optimierte Anwendung mit sich bringen. Zusammenfassend liegen nach der vergleichenden Analyse die Stärken im geringen Gewicht der Konstruktion, welches aus Ergebnissen der Massenbilanz hervorgegangen ist. Die Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen wiegen im Mittel um ca. 80 % weniger als die Stahlbetonkonstruktion.

Auch die Ökobilanzierungsergebnisse zeigen allgemein im Vergleich sehr positive Werte. Es bestehen Möglichkeiten, die ohnehin schon relativ geringen Umweltwirkungen noch weiter zu minimieren und deshalb vor allem im Bereich der Zementproduktion zu Alternativen zu greifen sowie wenn möglich, den gesamten Zementanteil zu vermindern. Optimierungsvorschläge sind dazu in Kapitel 5 aufgezeigt.

Sehr positiv ist außerdem die lange Lebensdauer, denn im Vergleich mit konventionellen Bauweisen müssen kaum einzelne Bauteilschichten ausgewechselt werden. Die mittlere Lebenserwartung liegt mit 45 Jahren nur knapp unter den zu erfüllenden 50 Jahren. Davon ist jedoch nur die äußerste Putzschicht betroffen, welche einfach zu erneuern ist. Der Abbau von langlebigeren Bauteilschichten wird dadurch nicht nötig. Diesen Erkenntnissen zur Folge ist es aus ökologischer, aber auch ästhetischer Betrachtung eventuell wirkungsvoller den Holzleichtbeton sichtbar auszuführen. Diese Möglichkeit wird ebenfalls ausführlicher in **Kapitel 5** diskutiert.

Durch die Berechnung der Flächenbilanz wird ersichtlich, dass in diesem Bereich noch einige Verbesserungen notwendig sind, da die Wände relativ viel verbauten Platz in Anspruch nehmen und der Materialverbrauch dadurch sehr hoch ist. Auch bezogen auf die Erfüllung thermischer Anforderungen gibt es noch ausschöpfbares Potenzial, um beispielsweise den Einsatz von Produkten wie der Vakuumdämmplatte bei AW – Typ 3c möglichst zu vermeiden.

4.5.2 INNENWAND

Zur Analyse am Beispiel einer Innenwand wurde eine tragende Wand zwischen zwei Wohnungseinheiten herangezogen. Das Bauteil soll den Anforderungen an eine Brandabschnittswand entsprechen, wodurch eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten gewährleistet werden muss. Der U-Wert ist in diesem Fall zu vernachlässigen, da keine Abgrenzung zum Außenraum besteht und dadurch eine zusätzliche Wärmedämmung überflüssig ist. Die ausgewählte Innenwand-Konstruktion hat eine Länge von 5,3m sowie eine Breite von 3,2 m und demnach eine Gesamtfläche von $17,0 \text{ m}^2$. Dieser festgelegte Wert soll zu einer qualitativen Analyse der unterschiedlich eingesetzten Baumaterialien führen.

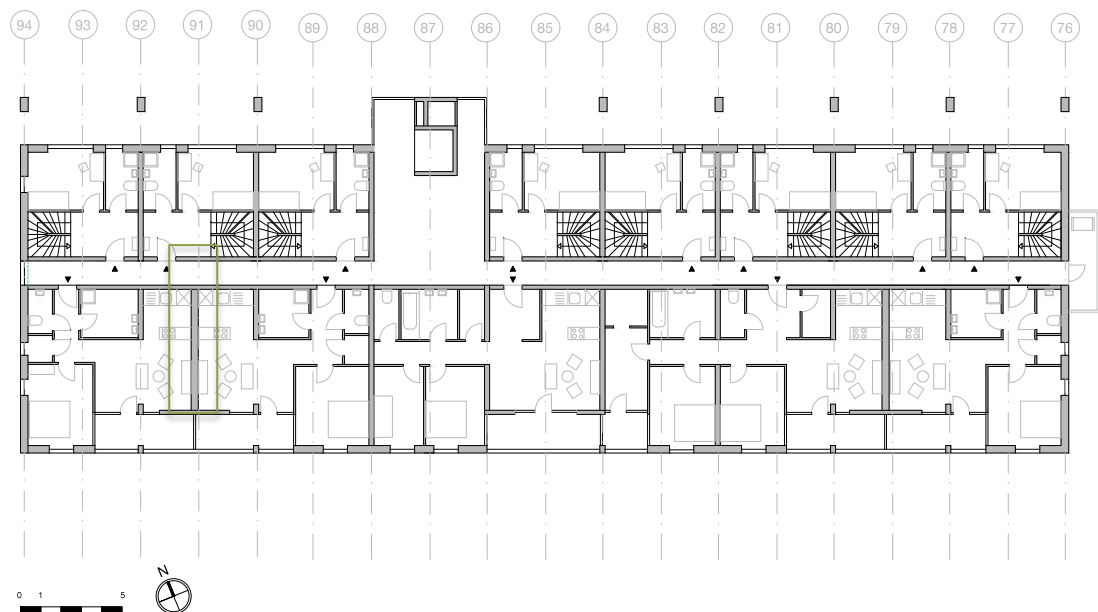


Abb. 33: Grundriss eines Regelgeschosses mit ausgewählter Innenwand

Nachfolgend werden wie auch im vorherigen Kapitel die Massenbilanz sowie ökologische Aspekte der unterschiedlichen Konstruktionen verglichen. Eine Flächenbilanz kann bei den Innenwänden vernachlässigt werden, da die gesamte Dicke bei den jeweiligen Schichtaufbauten sehr ähnlich ist.

4.5.2.1 INNENWANDAUFBAU IN STAHLBETON- UND HOLZRAHMENBAUWEISE

Die Schichtaufbauten für die Innenwände aus Stahlbeton und Holzrahmenbau wurden wie bei den Außenwandkonstruktionen den Plänen des Fallbeispiels sowie der Datenbank *dataholz* [28] entnommen. Die folgenden **Abbildungen 34** und **35** sowie die **Tabellen 19** bis **22** beschreiben die Aufbauten und Baustoffangaben dieser Innenwände.

IW 1a:

Stahlbetonbauweise

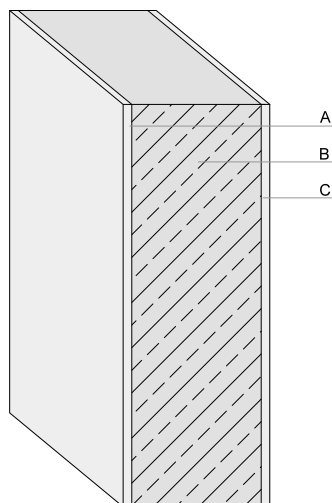


Abb. 34: Innenwand aus Stahlbeton

Bauphysikalische und ökologische Bewertung:

Ökologie	OI3 _{KON}	34,7
Brandschutz	REI	90

Mittlere Lebenserwartung: 50 Jahre

Ersatz in 50a: 0

Flächenbezogene Masse: 458 kg/m²

	ΔOI3
A	6
B	60
C	6
Gesamt	71

Tab. 19: ΔOI3-Werte der einzelnen Schichten

Schichtaufbau und Baustoffangaben

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Lebens- dauer [a]
A	0,013	Gipsfaserplatte	1000	221	≥ 50
B	0,180	Stahlbeton	2400	7.344	≥ 50
C	0,013	Gipsfaserplatte	1000	221	≥ 50
Gesamt	0,206			7.786	

Tab. 20: Aufbau und Baustoffangaben der Stahlbeton-Innenwandkonstruktion

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

IW 2a:

Holzrahmenbauweise

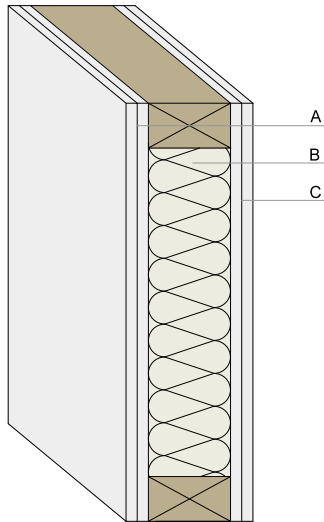


Abb. 35: Innenwand aus Holzrahmenbauweise [28]

Bauphysikalische und ökologische Bewertung

Ökologie | OI3_{KON} | -5,3

Brandschutz | REI | 90

Mittlere Lebenserwartung: 50 Jahre

Ersatz in 50a: 0

Flächenbezogene Masse: 70 kg/m²

	ΔOI3
A	14
B	5
C	14
Gesamt	33

Tab. 21: ΔOI3-Werte der einzelnen Schichten

Schichtaufbau und Baustoffangaben

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Lebensdauer [a]
A	0,030	Gipsfaserplatte (2x1,5cm)	1000	510	≥ 50
B	0,100	Konstruktionsholz /Glaswolle	500/60	85/92	≥ 50
C	0,030	Gipsfaserplatte	1000	510	≥ 50
Gesamt	0,160			1.197	

Tab. 22: Aufbau und Baustoffangaben der Holzrahmen-Innenwandkonstruktion

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

4.5.2.2 INNENWANDAUFBAU IN HOLZLEICHTBETON-VERBUNDBAUWEISE

IW 3a:

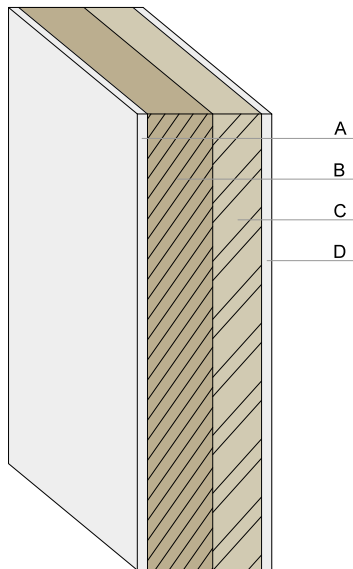


Abb. 36: Innenwand aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3a)

Bauphysikalische und ökologische Bewertung

Ökologie	OI3 _{KON}	-19,3
----------	--------------------	-------

Brandschutz	REI	90
-------------	-----	----

Mittlere Lebenserwartung: 50 Jahre

Ersatz in 50a: 0

Flächenbezogene Masse: 99 kg/m²

	ΔOI3
A	6
B	2
C	4
D	6
Gesamt	17

Tab. 23: ΔOI3-Werte der einzelnen Schichten

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Lebens- dauer [a]
A	0,013	Gipsfaserplatte	1000	255	≥ 50
B	0,080	Brettsperrholz (Fichte)	450	612	≥ 50
C	0,060	Holzleichtbeton	550	561	≥ 50
D	0,013	Gipsfaserplatte	1000	255	≥ 50
Gesamt	0,206			1.682	

Tab. 24: Aufbau und Baustoffangaben der Holzleichtbeton-Innenwandkonstruktion

4.5.2.3 BRANDVERHALTEN VON HOLZLEICHTBETON-VERBUNDKONSTRUKTIONEN BEI ANWENDUNG IM INNENRAUM

Da die Innenwand als Brandabschnittswand funktionieren soll, ist auf das Brandverhalten von Holzleichtbeton und ob etwaige Verkleidungen notwendig sind, zu achten. Wie im **Kapitel 3.3.1** über die thermische Verwertung von Holzleichtbeton schon angesprochen, ist dieser schwer entflammbar und daher auch für den Brandschutz ein geeigneter Baustoff. Eine gewährleistete Sicherheit im Brandfall ist auch aus gesundheitlichen Aspekten wichtig, denn chemische Substanzen, wie beispielsweise Verklebungen, können durch Kontakt mit großer Hitze oder Flammen toxisch werden [30]. Bei Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen müssen solche Stoffe nicht zwingend eingesetzt werden.

Bei der konventionellen Holzrahmenbauweise ist im Vergleich eine nicht brennbare Brandschutzbekleidung der Konstruktion, in diesem Fall Gipskarton, vorzusehen. Die Zeitspanne, die im Fall eines Vollbrandes vergehen muss, damit es an der Oberfläche der brennbaren Tragstruktur zur Verkohlung kommt, ist maßgebend für die Wahl der Stärke des Verkleidungsmaterials. Für die herkömmliche Innenwand aus Holz wurden 3x 1,25 cm Gipskartonplatten angewendet, um einen Brandwiderstand von 90 Minuten zu erreichen. Die typischen Feuerwiderstandsdauern durch die Anwendung von Gipskarton lassen sich mit 1 x 1,25 cm für REI 30, 2 x 1,25 cm für REI 60 und wie in diesem Fall mit 3x 1,25 cm für REI 90 definieren. Werden 4x 1,25 cm Platten eingebaut, kann sogar die Klasse REI 120 erreicht werden [19].

Das Feuerwiderstandsverhalten von Holzleichtbeton ist vergleichbar mit dem des Gipskartons, wobei die Temperatur im Brandfall durch den hohen Wassergehalt über längere Zeit in einem niedrigeren Bereich bleibt und gegen Ende - nach ca. 50 Minuten - stärker ansteigt. Für die Innenwandkonstruktion wurden die Holzspanschallschutzplatten WSD50 der Firma *VELOX* [21] angenommen. Für diese Platten mit einer Materialstärke von 5 cm kommt man auf eine Zeitspanne von rund 86,5 Minuten, die im Brandfall vergehen muss, um die Tragstruktur zu verkohlen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das Kriterium REI 90 bei dem angenommen Schichtaufbau erfüllt ist [19]. Die zusätzliche Gipskartonplatte gewährt weitere Sicherheit, kann aber aus ästhetischen Gründen auch weggelassen werden. Von der anderen Seite her wird ein Feuerwiderstand von 30 Minuten im Falle eines Vollbrandes gewährleistet.

Zusammenfassend kann angenommen werden, dass wenn eine 4-lagig beplankte GKF-Platte eine Feuerwiderstandsklasse von REI 120 erreicht, Holzleichtbeton mit derselben Dicke von insgesamt 5 cm, das gleiche Ergebnis aufbringen kann. Durch die Anwendung kann dementsprechend zusätzlicher Materialaufwand durch nicht brennbare Verkleidungen erspart werden [19].

4.5.2.4 MASSEN Bilanz

Die bereits angeführten Daten hinsichtlich der unterschiedlichen Massenangaben zeigen, dass die 17 m² große Innenwand aus Stahlbetonbauweise um 78 % mehr Masse hat als die im Vergleich stehende Holzleichtbeton-Verbundkonstruktion. Diese ist wiederum trotz des hohen Massivholz- und Zementanteils nur um 29 % schwerer als die Wand in Holzrahmenbauweise (siehe **Abbildung 37**).

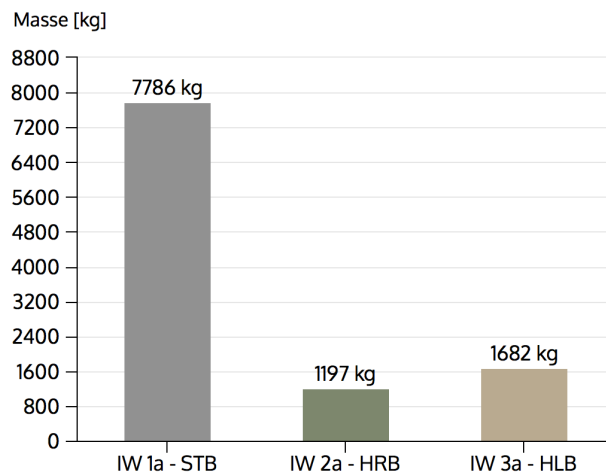


Abb. 37: Massen der unterschiedlichen Außenwand-Konstruktionen in [kg]

4.5.2.5 OI3 KLASSIFIZIERUNG

Die Innenwand in Holzleichtbeton-Verbundweise zeigt bei der Bewertung der Gesamtkonstruktion den besten Wert auf, gefolgt von der Holzrahmenbauweise. Die Stahlbetonwand hat auch hier im Vergleich den schlechtesten Wert.

	GWP100 [kg CO ₂ /m ²]	AP [kg SO ₂ /m ²]	PEI ne [MJ/m ²]
IW - Typ 1a	72,25	0,23	872,43
IW - Typ 2a *	-15,80	0,10	453,10
IW - Typ 2a	2,80	0,12	437,85
IW - Typ 3a	-59,5	0,12	369,41

Tab. 25: Treibhauspotenzial, Versäuerungspotenzial und Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Energien der unterschiedlichen Innenwandkonstruktionen pro m². *Werte aus der Datenbank von *dataholz*, um etwaige Abweichungen zu überprüfen [28]

Bei genauerer Betrachtung im Detail fällt wiederum auf, dass die Innenwandkonstruktion 3a in jeder der drei Wirkungskategorien den besten Wert aufweist (siehe **Tabelle 25** und **Abbildung 38**). Vor allem der Wert an Schadstoffemissionen ist deutlich unter dem der Stahlbetonwand, welcher wie schon bei der Außenwandkonstruktion auf die Brennvorgänge beim Herstellungsprozess zurückzuführen ist. Der Zementanteil in der Holzleichtbeton-Verbundkonstruktion hat demnach wenig Einfluss auf das Treibhaus- und das Versäuerungspotenzial. Auch der Energieinhalt an nicht erneuerbaren Energien ist nur halb so groß wie der der Stahlbetoninnenwand.

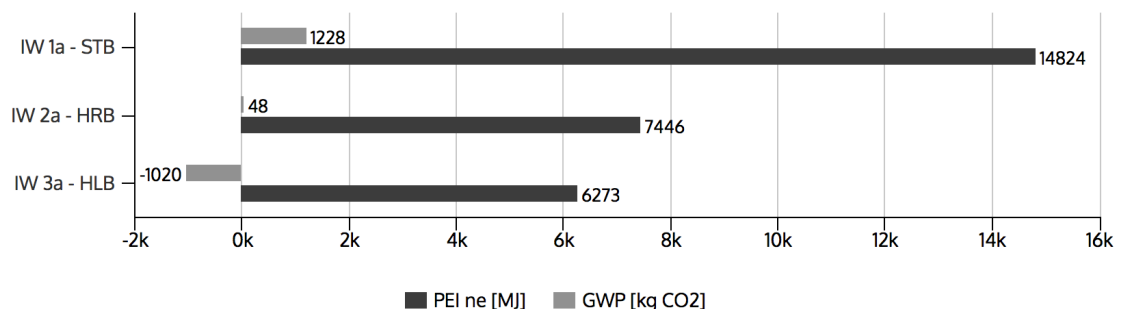


Abb. 38: GWP100 [kg CO₂] und PEI ne [MJ] der Innenwandkonstruktionen für eine Fläche von 17,0 m².

Es ist erkennbar, dass die Innenwand in Holzrahmenbauweise Typ 2a sehr ähnliche Ergebnisse wie Typ 3a erzielt. Die Angaben zu den Ökoindikatoren wurden wieder mit Werten von *dataholz* [28] verglichen, um eine Genauigkeit zu gewährleisten. Das Versauerungspotenzial und PEI ne sind sehr ähnlich, beim GPW100 kommt es jedoch zu kleineren Abweichungen. Diese können auch auf die unterschiedlichen Herstellerangaben und Holzarten zurückzuführen sein, da hierbei keine konkreten Angaben vorhanden sind und als Holzart, wie bei den Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen, Fichtenholz als Annahme getroffen wurde.

4.5.2.6 LEBENSDAUER

Bei den Wandaufbauten für den Innenraum ergaben die durchgeführten Berechnungen jeweils eine Dauerhaftigkeit von über 50 Jahren, wodurch die Mindestzeitdauer erfüllt ist. Im Gegensatz zu im Außenraum angewendeten Konstruktionen sind die witterungs- und klimabedingten Einflüsse nur sehr gering vorhanden, wodurch eine längere Lebenserwartung der Bauteile gewährleistet ist. Die einzelnen Schichten werden also nicht so stark von außen beansprucht und müssen folglich auch nicht frühzeitig ausgetauscht werden. In Bezug auf die Lebensdauer sind demnach keine Verbesserungen der Innenwände in Holzleichtbeton-Verbundbauweise nötig.

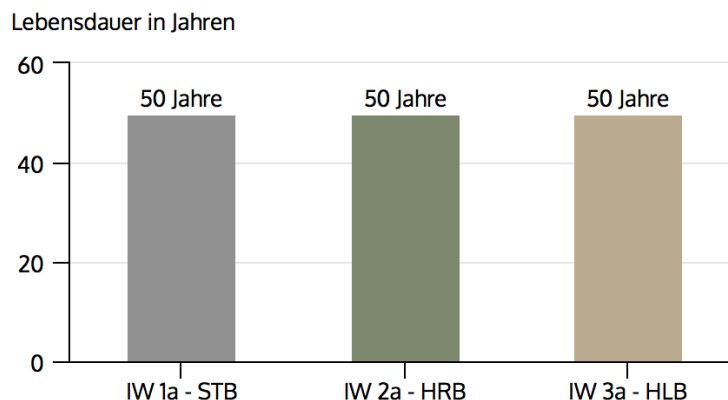


Abb. 39: Mittlere Lebenserwartung der unterschiedlichen Innenwandaufbauten

4.5.2.7 LEBENSENDE

Hinsichtlich der End-Of-Life Phase gibt es bei den Innenwandaufbauten kaum Unterschiede zu denen der Außenwände. Die Verbindungen der einzelnen Schichten der jeweiligen Konstruktionen erfolgen auf die gleiche Weise, wobei zum Teil eine geringere

Anzahl an Bauteilschichten vorhanden ist. Dadurch werden der Demontagevorgang und die anschließende Verwertung vereinfacht. Verschraubungen oder ähnliche mechanische Verbindungen können Forschungsberichten [24] zur Folge einfach und zerstörungsfrei entfernt werden.

4.5.2.8 ZUSAMMENFASSUNG

Aus den angeführten Ergebnissen wird sichtbar, dass die Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen bei der ökologischen Bewertung deutlich positiv im Vergleich mit der Stahlbetonwand beziehungsweise der Innenwand in Holzrahmenbauweise auffallen. Der Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Ressourcen während des gesamten Lebenszyklus ist bei der Wand in Stahlbetonbauweise doppelt so hoch der der Holzleichtbetonkonstruktion. Gegenüber der Wand in Holzrahmenbauweise ist der Betrag um 19 % geringer. Auch die Menge an CO₂ – Emissionen ist deutlich weniger.

Bezüglich des Brandschutzes bei Trennwänden im Innenraum können mit Holzleichtbetonwänden im Verbund mit Massivholz alle Anforderungen erfüllt werden. Je nach Bauteilstärke können Feuerwiderstandsklasse von REI 90 oder sogar REI 120 ohne zusätzliche Konstruktionen erreicht werden. In Hinsicht auf die gesundheitsschädliche Wirkung einiger Substanzen im Brandfall, ist es wichtig auf die Verbindungsart der Verbundkonstruktionen zu achten. Verklebungen können beispielsweise durch starke Erhitzung zu gefährlichen Dämpfen führen. Dementsprechend sind auch in Anbetracht dieser Risiken mechanische Verbindungen zu bevorzugen.

Am Lebensende der Bauteile sind mechanisch verbundene Konstruktionen ebenfalls empfehlenswert. Vor allem bei Innenwänden, welche im Vergleich zu den Außenwandkonstruktionen aus weniger Baustoffschichten aufgebaut sind, ist demnach eine Wiederverwendung und Recycling einfacher durchzuführen.

In **Kapitel 5** werden auf Basis dieser Erkenntnisse Optimierungsvorschläge und Anwendungsbeispiele von Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen im Innenraum diskutiert.

4.5.3 DECKEN

Nach der Beurteilung der vertikalen Bauteile des ausgewählten Gebäudes, werden folglich die unterschiedlichen Ausführungen auf horizontaler Ebene diskutiert. Die Decken- und Dachsysteme werden zuerst im Rohbau bearbeitet, da die jeweiligen zusätzlichen Aufbauten die thermischen und akustischen Eigenschaften stark beeinflussen und somit keine klaren Aussagen bezüglich der primären Schichtaufbauten getroffen werden können.

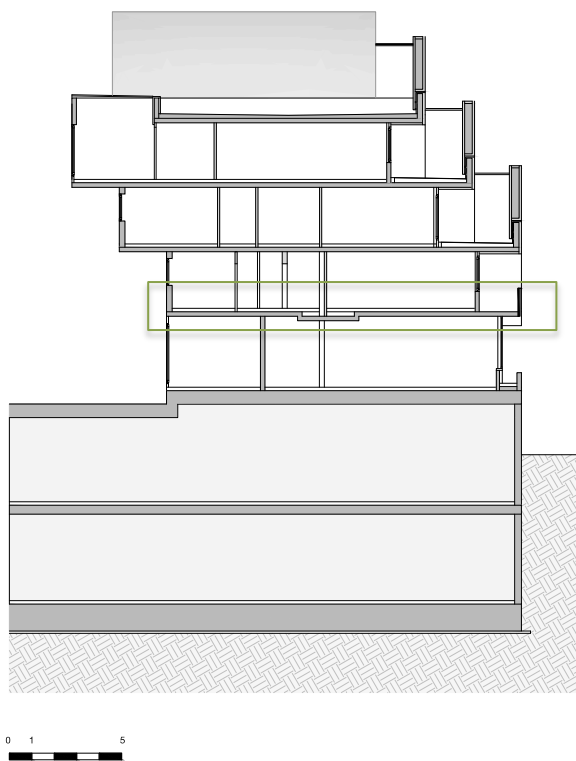


Abb. 40: Schematischer Querschnitt durch das Stahlbetongebäude

Die unterschiedlich ausgeführten Regelgeschoßdecken sollten in Bezug auf das gegebene Projekt jeweils für Spannweiten bis zu 5,7 m konzipiert sein, wodurch mit einer Fläche von $31,36 \text{ m}^2$ gerechnet wird. In **Abbildung 40** ist die ausgewählte Deckenkonstruktion innerhalb des Gebäudequerschnitts dargestellt.

4.5.3.1 ROHBAUDECKENAUFBAUTEN IN STAHLBETON – UND HOLZRAHMENBAUWEISE

Nach Angaben aus den Plänen der Wohnanlage in Stahlbetonbauweise muss die tragende Schicht der Decke 22 cm dick sein, um einen Bereich von 5,6 m sicher zu überspannen. **Abbildung 41** und **Tabelle 26** geben Informationen zu dem Konstruktionsaufbau und dem ausgewählten Baustoff.

Decke 1a Stahlbetonbauweise

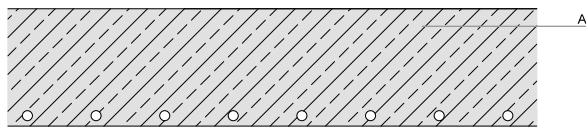


Abb. 41: Rohbaudecke aus Stahlbetonbauweise (1a)

Bauphysikalische und ökologische Bewertung:

Ökologie | $OI3_{KON}$ | **38**

Mittlere Lebenserwartung:

50 Jahre

Ersatz in 50a: 0

Flächenbezogene Masse:

478 kg/m²

Schichtaufbau und Baustoffangaben:

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse* [kg]	λ [W/mK]	Lebens- dauer [a]
A	0,200	Stahlbeton	2400	15 052	2,5	≥ 50
Gesamt	0,200			15 052		

Tab. 26: Aufbau und Baustoffangaben der Rohbaudecke in Stahlbetonbauweise. * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 31,36 m²

4 SZENARIO - ANALYSE

4.5 BAUTEILANALYSE

Decke 2a Holzrahmenbauweise



Abb. 42: Rohbaudecke aus Holzrahmenbauweise (2a)

Bauphysikalische und ökologische Bewertung:

Ökologie | OI3_{KON} | **4,2**

Mittlere Lebenserwartung:

50 Jahre

Ersatz in 50a: 0

Flächenbezogene Masse:

26 kg/m²

Schichtaufbau und Baustoffangaben:

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse* [kg]	λ [W/mK]	Lebens- dauer [a]
A	0,019	Spanplatte	700	417	0,13	≥ 50
B	0,220	Konstruktionsholz (Fichte)	500	345	0,13	≥ 50
C	0,024	Sparschalung (Fichte)	500	38	0,13	≥ 50
Gesamt	0,263			800		

Tab. 27: Aufbau und Baustoffangaben der Rohbaudecke in Holzrahmenbauweise. * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 31,36 m²

Beim Tragwerk in Holzrahmenbauweise hat das Konstruktionsholz (Fichte) Abmessungen von 0,8 cm / 22,0 cm. Die darüber liegende Spannplatte ist 1,9 cm dick. Unter dem Konstruktionsholz ist eine Sparschalung, ebenfalls aus Fichtenholz, mit einer Stärke von 2,4 cm (vergleiche mit **Abbildung 42** und **Tabelle 27**). Dieser Aufbau ist um 6 cm dicker als die Stahlbetonplatte, jedoch mit nur 26 kg/m² um 94 % leichter als der Massivbau.

4.5.3.2 ROHBAUDECKENAUFBAUTEN IN HOLZLEICHTBETON – VERBUNDBAUWEISE

Die Verbunddecke aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise richtet sich nach Angaben aus der Diplomarbeit von *Thomas Hofer* [55]. Die tragende Konstruktion bildet wieder Brettstapelholz aus Fichte mit einer Dicke von 12 cm. Darüber liegen 15 cm Holzleichtbeton und eine dünne Stahlbetonschicht mit 6 cm. Die Holzleichtbetonschicht entspricht 3 cm x 5 cm *VELOX*-Wärmedämmplatten [21], wobei die Rohdichte wieder ein angenommener Mittelwert ist, der leicht von den Herstellerangaben abweicht.

Decke3a: Holzleichtbeton-Verbundbauweise

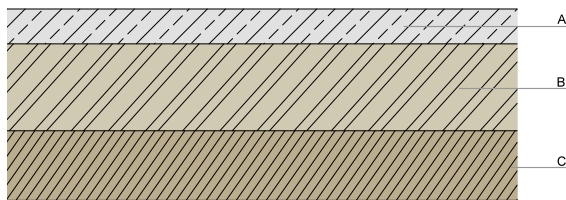


Abb. 43: Rohbaudecke aus Holzleichtbetonverbundbauweise (3a)

Bauphysikalische und ökologische Bewertung:

Ökologie | OI3_{KON} | **6,7**

Mittlere Lebenserwartung:

50 Jahre

Ersatz in 50a: 0

Flächenbezogene Masse:

281 kg/m²

Schichtaufbau und Baustoffangaben:

	Dicke [m]	Baustoff	Dichte [kg/m ³]	Masse* [kg]	λ [W/mK]	Lebens- dauer [a]
A	0,060	Stahlbeton	2400	4 516	2,50	≥ 50
B	0,150	Holzleichtbeton	550	2 587	0,13	≥ 50
C	0,120	Brettsperrholz (Fichte)	450	1 693	0,12	≥ 50
Gesamt	0,330			8 796		

Tab. 28: Aufbau und Baustoffangaben der Rohbaudecke in Holzleichtbeton-Verbundbauweise.

*Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 31,36 m²

4.5.3.3 OI3 KLASSIFIZIERUNG

Durch die ökologische Abschätzung der Decken im Rohbauzustand wird festgestellt welche Umweltwirkungen die Konstruktionsmaterialien ohne zusätzliche Ausbauten haben.

	GWP100 [kg CO ₂ /m ²]	AP [kg SO ₂ /m ²]	PEI ne [MJ/m ²]
Decke 1a	85,24	0,23	875,14
Decke 2a	-39,37	0,03	130,48
Decke 3a	-81,83	0,21	843,78

Tab. 29: Treibhauspotenzial, Versäuerungspotenzial und Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Energien der unterschiedlichen Deckenkonstruktionen pro m²

Die aufgezeigten Daten (siehe **Tabelle 29**) zeigen, dass der Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Ressourcen bei der Holzleichtbetondecke um nur 3 % geringer als der der Stahlbetonrohdecke ist. Die 6 cm dicke Stahlbetonschicht macht aber nur rund 30 % des Gesamtbetrags an nicht erneuerbaren Energien aus, weshalb der relativ hohe Wert auf die Holzleichtbetonschicht zurückzuführen ist. Der Rohbau in Variante 3a hat außerdem einen um 85 % höheren PEI ne als die nicht ausgebaute Holzrahmenkonstruktion.

Bei den Schadstoffemissionen ist ein großer Unterschied zwischen der Stahlbeton- und der Holzleichtbeton-Verbundkonstruktion erkennbar (**Abbildung 44**). Das Treibhauspotenzial ist bei einer Anwendung von Holzleichtbeton wie bei Typ 3a, um über 100 % geringer.

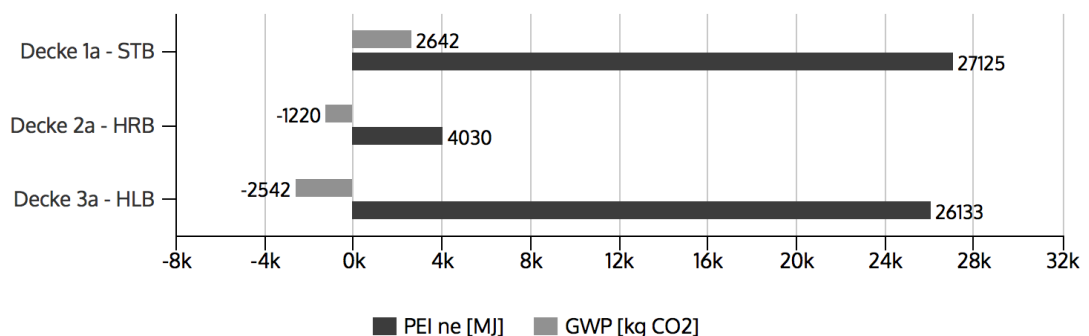


Abb. 44: GWP100 [kg CO₂] und PEI ne [MJ] der Deckenkonstruktionen für eine Fläche von 31,36 m²

4.5.3.4 LEBENSDAUER

Die durchschnittliche Lebenserwartung der Deckenaufbauten in Rohbauausführung beläuft sich, wie in **Abbildung 45** dargestellt, auf jeweils mindestens 50 Jahre. Zusätzlich zur tragenden Konstruktion ist es notwendig auf einen langlebigen Ausbau zu achten.

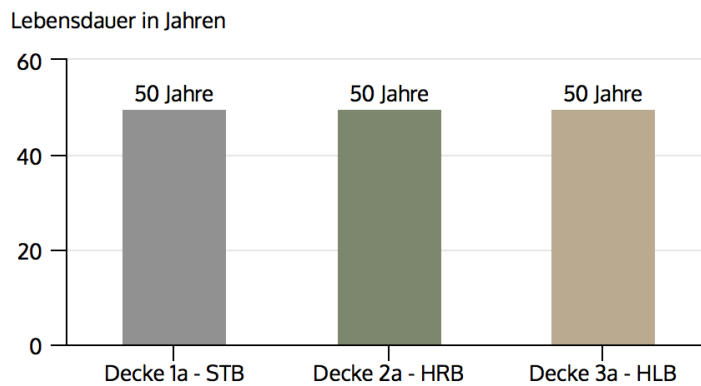


Abb. 45: Durchschnittliche Lebenserwartung der unterschiedlichen Deckenaufbauten

4.5.3.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse der Deckenkonstruktionen weichen kaum von denen der Wandsysteme ab. Auffallend ist nur, dass die Decke aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise 3a hinsichtlich der Rohbaukonstruktionen, ohne zusätzlich Aufbauten wie beispielsweise Dämmungen oder Estriche, einen ähnlich hohen Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Ressourcen wie die Stahlbetonkonstruktion auf. Die Menge an CO₂-Emissionen ist hingegen trotzdem deutlich geringer.

5 ARCHITEKTURANALYSE UND OPTIMIERUNGSVORSCHLÄGE

Nach der vorangegangenen Analyse von Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen im Vergleich mit Stahlbetonbauweise und Holzrahmenbauweise werden aus den Ergebnissen und Schlussfolgerungen Optimierungsansätze aufgezeigt. Die Stärken und Chancen des Materials werden gefestigt, während vorhandene Schwachstellen bestmöglich behoben werden.

5.1 GRUNDRISSGESTALTUNG

Um Optimierungsansätze der Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen anzuwenden, muss vorher davon ausgegangen werden, dass bei der Grundriss – und Gebäudegestaltung auf wichtige Parameter geachtet wird. Die Form der Hülle wirkt sich auf die Transmissionswärmeverluste des gesamten Gebäudes aus, denn je größer die umhüllende Fläche, desto größer ist der Heizwärmebedarf. Laut OIB Richtlinie 6 wird die Kompaktheit über das Verhältnis des Volumens des Gebäudes (V) zu den umgebenden Flächen der Bruttofläche (A) angegeben. Folglich stellt eine Kugel ein ideales Volumen im A/V -Verhältnis dar. Rein rechnerisch verbessert sich die Kompaktheit eines Gebäudes bei zunehmendem Gesamtvolumen. Durch die Wahl einer geeigneten Form kann also der Heizwärmebedarf optimiert werden. Ausgehend von einem Würfel als ideale Form, steigt er bei Aufsplitterung des gesamten Volumens auf acht einzelne Würfel um bis zu 200 %, während er bei einer Halbkugel oder zylindrischen Form auf 96 % sinkt [25].

Außerdem ist wie **Abbildung 46** dargestellt, die Anordnung der Räume je nach Funktionalität zu beachten. Aufenthaltsräume werden bestenfalls Richtung Süden ausgerichtet, während Nebenräume idealerweise Richtung Norden angeordnet sind.

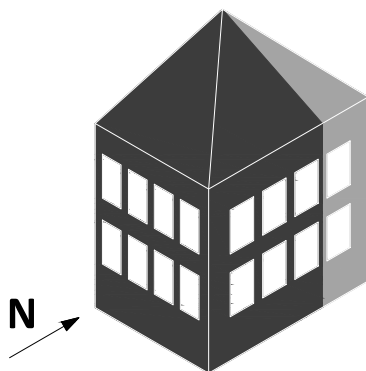


Abb. 46: Ideale Raumausrichtung

5.2 ENERGETISCHE OPTIMIERUNG

Um den Energiebedarf während der Nutzungsphase eines Gebäudes möglichst gering zu halten, muss bei der Konstruktion auf eine Minimierung der Verluste von Wärme durch Wärmebrücken oder einer schlecht abgedichteten Hülle geachtet werden. Bei Wärmebrücken handelt es sich um energetische Schwachstellen innerhalb der Hülle eines Gebäudes. Dabei sind neben der schon erwähnten Planung der Gebäudeform und Grundrissgestaltung sowie dem optimierten Wärmedurchgang durch Bauteile, konstruktive Maßnahmen zu treffen. Grundlegend für eine wärmebrückenfreie Konstruktion ist, dass das gesamte Volumen eines Bauwerks lückenlos mit der Dämmebene umhüllt ist [25]. Die folgende **Abbildung 47** zeigt Bauteilübergänge und Anschlüsse innerhalb eines Gebäudes, welche bei sich durch ungenaue Planung kritisch auf die Effizienz der Bauweise auswirken können. Dabei sind vor allem Auskragungen, Dachränder und Attikabrüstungen sowie Installationsebenen und an den Außenraum oder an unbeheizte Räume angrenzende Bauteile Schwachstellen in der Gebäudehülle.

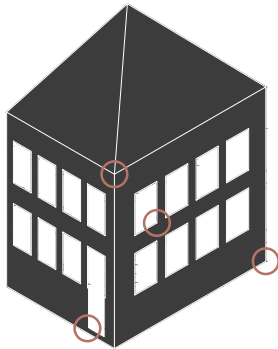


Abb. 47: Schwachstellen bei Bauteilübergängen innerhalb eines Gebäudes [25]

5.3 FASSADENGESTALTUNG

Holzleichtbeton eignet sich nicht nur als verputzte zusätzliche Dämmschicht, sondern kann auch im Außenraum ästhetisch eingesetzt werden. Im Bereich der Fassadengestaltung sind verschiedenste Möglichkeiten gegeben, um mit dem Material zu arbeiten.

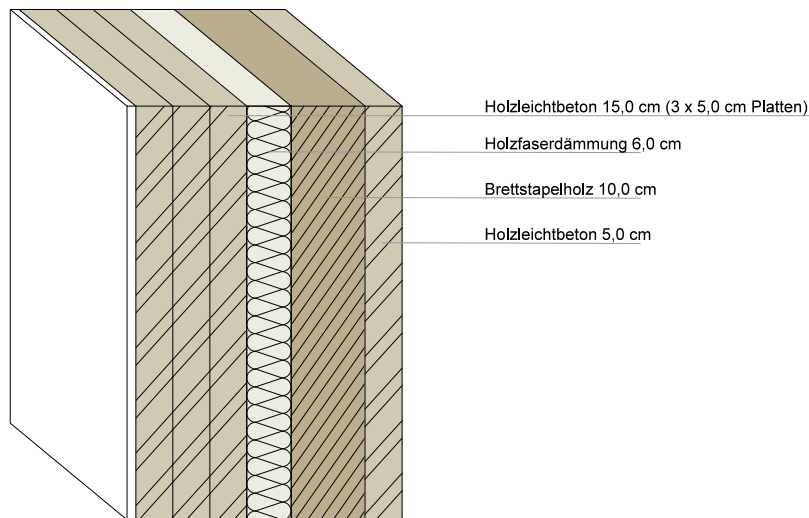


Abb. 48: Außenwand Variante 3d

Variante 3d zeigt, dass bei Reduzierung der Brettstapelholzschiicht um 20 mm und einer Verstärkung des außenliegenden Holzleichtbetons um 25 %, der Wärmedurchgangskoeffizient gegenüber Variante 3a um 8 % verbessert werden kann (vergleiche mit **Abbildung 48**). Die Bauteilstärke bleibt dadurch unverändert. Außerdem ist eine mögliche Ausführung mit beispielsweise drei WD 50 Holzspan-Dämmplatten der Firma VELOX [21] im Verbund gewährleistet. Dabei ist wie in **Kapitel 3.3.2** die Verbindungsart zu berücksichtigen, wobei bezüglich der Trennbarkeit die Verschraubung zu bevorzugen ist. Die Schadstoffemissionen werden im Vergleich zu Variante 3a mit 18 % bezüglich des Kohlendioxidausstoßes und 3 % in Bezug auf das Versauerungspotenzial reduziert. Der Primärenergieinhalt aller energetisch und stofflich nicht erneuerbaren Ressourcen wird hierbei sogar um knapp über 18 % minimiert, wodurch sichtbar wird, dass der Holzleichtbeton sogar im Gegensatz zu Brettstapelholz einen positiven Einfluss hinsichtlich der ökologischen Bewertung hat. Es können demnach schon durch geringe Änderungen des Schichtaufbaus eines Bauteils deutliche Verbesserungen im Bereich der ökologischen und wärmespezifischen Eigenschaften erreicht werden. Die Lebensdauer der Wandkonstruktion verändert sich nicht, da keine neuen Materialien hinzugefügt werden und sich der technische Aufbau demnach nicht ändert.

In der folgenden **Abbildung 49** ist eine weitere Möglichkeit zur Fassadengestaltung dargestellt. Durch Einfärben der Zementmischung kann zwischen unterschiedlichste Farben gewählt werden, aber auch verschiedene Strukturen sind möglich [13].

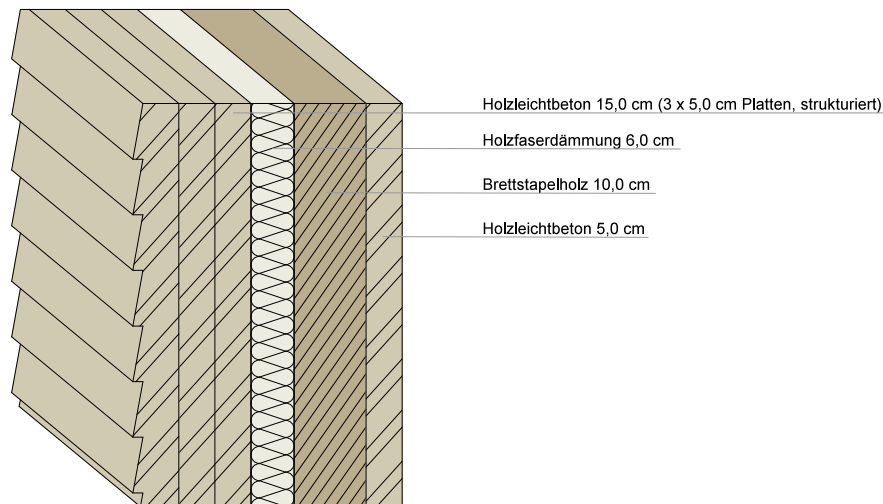


Abb. 49: Mögliche strukturierte Fassadengestaltung

Variante 3e (**Abbildung 50**) orientiert sich hingegen an dem Wandaufbau 3b, bei dem im Gesamten nur eine Holzleichtbetonschicht vorgesehen ist. Eine sichtbare Anwendung im Außenraum ist auch hier möglich. Die Stärke des Holzleichtbetons wurde zum Vergleich ebenfalls um 25 % erhöht. Aus statischen Gründen könnte eine Reduktion des Brettstapelholzes gegebenenfalls zu Problemen führen. In diesem Fall werden wieder die energetischen Anforderungen an das fertige Gebäude durch eine Optimierung des Schichtaufbaus minimiert. Der U-Wert ist um 15 % kleiner als bei Variante 3b, wonach die wärmespezifischen Eigenschaften deutlich besser ausfallen. Beim Treibhauspotenzial kommt es zu einer relativ starken Reduktion von 11 %.

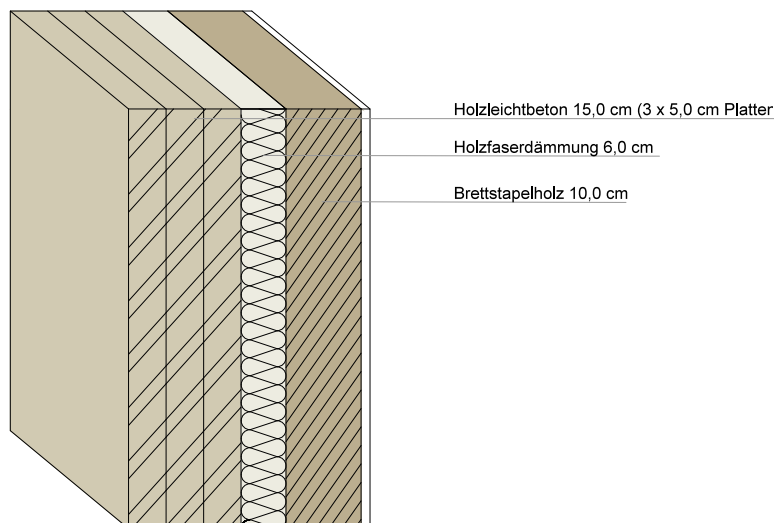


Abb. 50: Außenwand Variante 3e

5.4 INNENRAUMGESTALTUNG

Um das Potenzial des Materials vollständig auszuschöpfen, kann als nicht tragende Trennwand im Innenraum eine sichtbare Anwendung im Verbund mit Brettstapelholz oder als Verbundkonstruktion aus zwei Holzleichtbetonplatten empfohlen werden. Aus gestalterischer Sicht verleiht die sichtbare Konstruktion dem Raum ein industrielles modernes Design sowie durch den hohen Holzanteil eine gewisse Wärme, welche bei Sichtbeton oft vermisst wird. Die WSD 50 Platten (Holzspanschallschutzplatten) der Firma *VELOX* [21] erfüllen erhöhte Schallschutzanforderungen und erreichen mit einer Stärke von jeweils 5,0 cm eine Feuerwiderstandsdauer von REI 90, wonach sie beidseitig als brandabschnittsbildende Bauteile ausgeführt werden können.

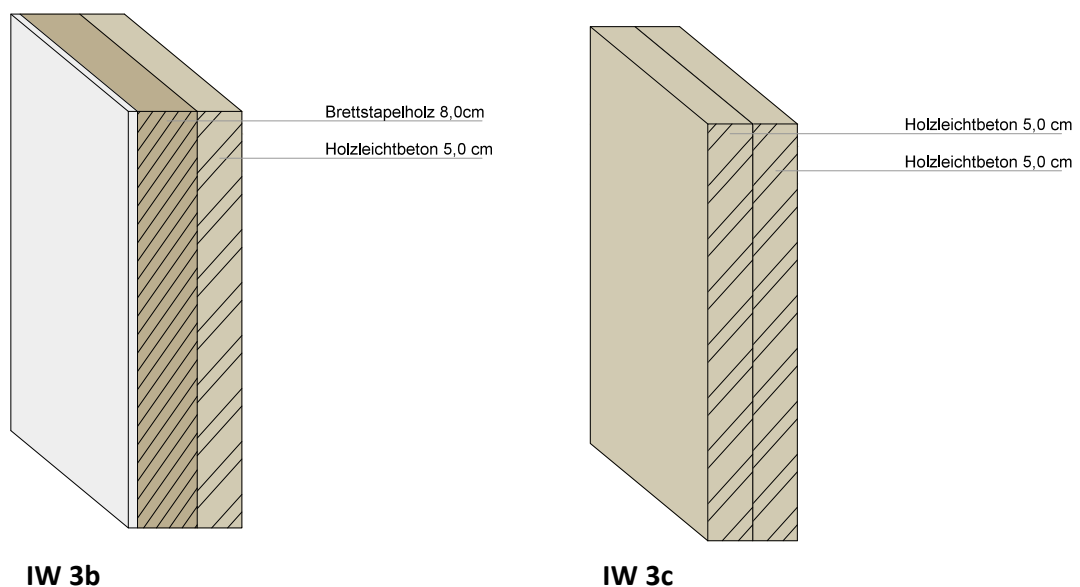


Abb. 51: Innenwandvarianten 3b und 3c

Die Variante 3b folgt dem Aufbau der Konstruktion 3a und kommt dadurch auf eine sehr ähnliche ökologische Bewertung. Ideal ist eine Anwendung von *Slagstar* [38], wodurch bei beiden Varianten bis zu 90 % Kohlendioxid eingespart werden kann. Ohne die Wände zu verputzen, werden demnach nur das Holz als nachwachsender Rohstoff, die Holzspäne als Abfallprodukt und *Slagstar* als nachhaltige Alternative zu herkömmlichem Zement eingesetzt.

5.5 DECKENAUFBAUTEN

Die Rohbaudecke Variante 3a ist aus einer tragenden Massivholzschicht von 12,0 cm und einer zusätzlichen Holzleichtbetonschicht von 15,0 cm, wonach sich vorgefertigte Platten mit Standardmaßen wie beispielsweise die der Firma *VELOX* [21] einbauen lassen, aufgebaut. Darüber ist außerdem eine Trittschalldämmung, Trennschicht und darauf liegender Estrich notwendig (siehe **Abbildung 52**).

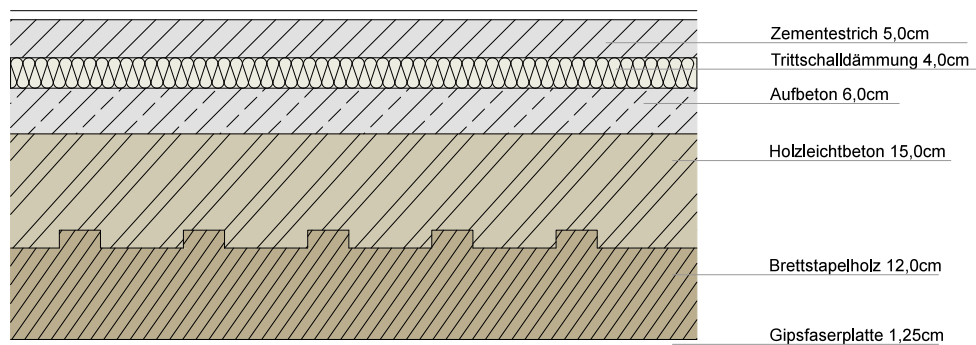


Abb. 52: Deckenaufbau Variante 3b

Im Fall von **Abbildung 53** ist eine Verbindung durch Schubkerven vorgesehen, wodurch die großen Mengen an Zwei-Komponentenklebern gespart werden können. Wie schon in **Kapitel 3.3.2.4** angeführt, kann durch die Ausführung über die ganze Länge des Trägers, das Tragverhalten der Deckenkonstruktion deutlich verbessert werden.

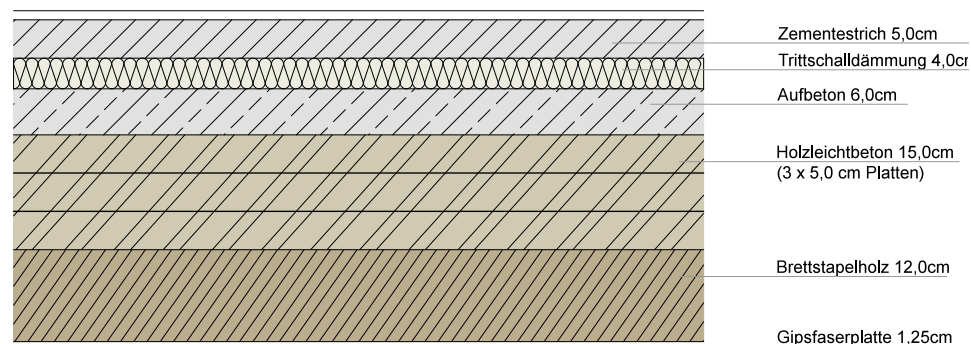


Abb. 53: Deckenaufbau Variante 3c

Im Zuge eines weiteren Fallbeispiels werden im Folgenden für die beschriebenen Aufbauten Anwendungsbeispiele aufgezeigt.

5.6 FALLBEISPIEL URBANEUM KLAGENFURT

Abschließend werden die erarbeiteten Thesen anhand eines Fallbeispiels diskutiert und eine Anwendung der Optimierungsvorschläge im Bereich einer ausgewählten Wohnungseinheit aufgezeigt. Das Objekt wurde hauptsächlich aus Mantelbeton unter Verwendung von Holzspanbetonplatten der Firma *VELOX* [21] gebaut und von *Müller & Hohenwarter Architekten* [56] geplant.

5.6.1 OBJEKTDESCHEIBUNG

Das „Urbanem Klagenfurt“ besteht aus insgesamt drei Baukörpern welche in U-Form eine großzügige Parkfläche, die mehr als ein Drittel der gesamten Grundstücksfläche ausmacht, umschließen. Der größte Gebäudeblock ist mit einem der beiden kleineren verbunden, während der südlich gelegene Wohnkomplex freistehend situiert ist. Die gesamte Anlage umfasst insgesamt 108 Wohnungen mit acht zusätzlichen Geschäften und einem Café sowie zwölf Räumlichkeiten für Büros oder Praxen (siehe **Abbildung 54**).

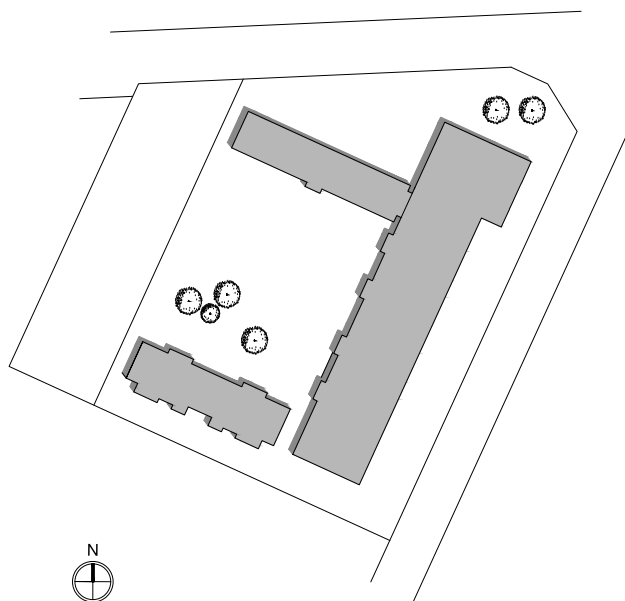


Abb. 54: Übersichtsplan Urbanem Klagenfurt

5.6.2 AUFBAUTEN

Die Decken und Fundamente sowie das gesamte Kellermauerwerk sind jeweils aus konventioneller Stahlbetonbauweise ausgeführt. Dabei handelt es sich um Stahlbeton-Elementdecken, undurchlässige Stahlbetonplatten an den Fundamenten sowie Stahlbetonwände mit bituminöser Abdichtung. Bis auf die tragenden Innenwände aus Stahlbeton sowie die Zwischenwände und Schachtrennwände in den Nassräumen, sind alle Wände aus Mantelbetonsystemen unter der Verwendung von *VELOX* Holzspanplatten [21] aufgebaut. Dabei werden vier verschiedene Ausführungsarten eingesetzt. Insgesamt wurden 6.720m^2 GT25, 2.340m^2 TT20, 1.700m^2 GT30 und 260m^2 TT22 verbaut. Alle Trennwände zwischen den einzelnen Wohnungseinheiten sowie die Wände im Stiegenhaus sind aus herkömmlichen Mantelbetonsystemen aufgebaut, während bei den Außenwänden ein zusätzlicher Vollwärmeschutz angebracht wurde. Die genauen Aufbauten der unterschiedlichen Wandtypen sind dem **Anhang 7.2** zu entnehmen. **Abbildung 55** zeigt den Grundriss eines Regelgeschosses des Hofhauses, welcher in jeweils sechs Wohnungseinheiten unterteilt ist.

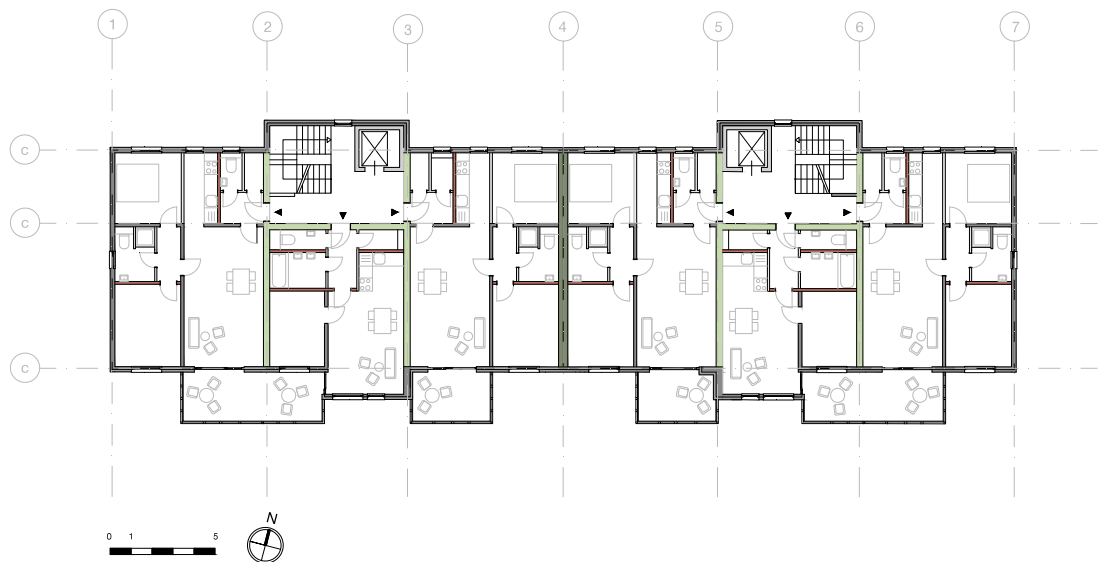


Abb. 55: Grundriss Hofhaus Urbaneum Klagenfurt

Im folgenden Längsschnitt (siehe **Abbildung 56**) sind ebenfalls die unterschiedlichen Wandsysteme von den Stahlbetondecken und Fundamenten zu unterscheiden.

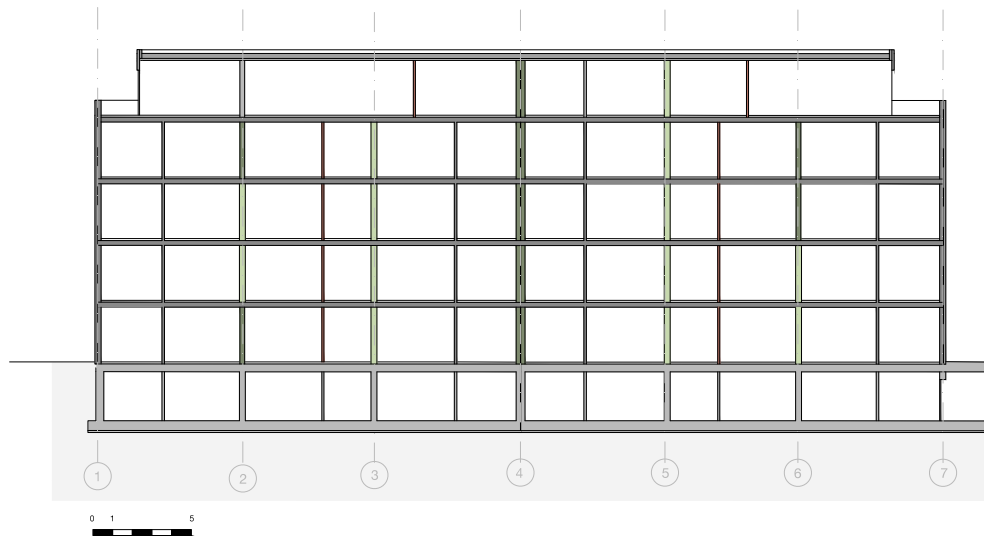


Abb. 56: Längsschnitt Hofhaus Urbanum Klagenfurt

5.6.3 OPTIMIERUNGSVORSCHLAG

Anhand einer Wohnungseinheit des Fallbeispiels werden im weiteren Verlauf Vorschläge für eine optimierte Anwendung von Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen gemacht. Die Anwendungsbeispiele sollen den in den vorangegangenen **Kapiteln 3** und **4** diskutierten Leitlinien und Bewertungskriterien entsprechen.

5.6.3.1 ANWENDUNG VELOX MANTELBETONSYSTEME

Die Richtung Nord-Osten und Süd-Westen ausgerichteten Außenwände sind im „Urbanum Klagenfurt“ aus dem Verbund von **VELOX** GT25 Platten und einem zusätzlichen Vollwärmeschutz ausgeführt, welche im Gesamten einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreichen. Die Wohnungstrennwand TT22 ist aus zwei **VELOX** Wärmedämmplatten WSD 35 und der dazwischenliegenden Mantelbetonschicht aufgebaut, während die Trennwand zwischen Wohnungseinheit und Stiegenhaus nach OIB Richtlinie 6 dem Mantelbetonsystem GT30 entspricht. Diese tragenden Wohnungstrennwände sind ohne Bewehrung ausgeführt und entsprechen der Brandwiderstandsklasse REI 90 nach *ÖNORM B 3800*. Die restlichen Innenwände sind entweder tragend

aus Stahlbeton oder nichttragend als Rigipswände ausgeführt [56] (vergleiche mit **Abbildung 57**).

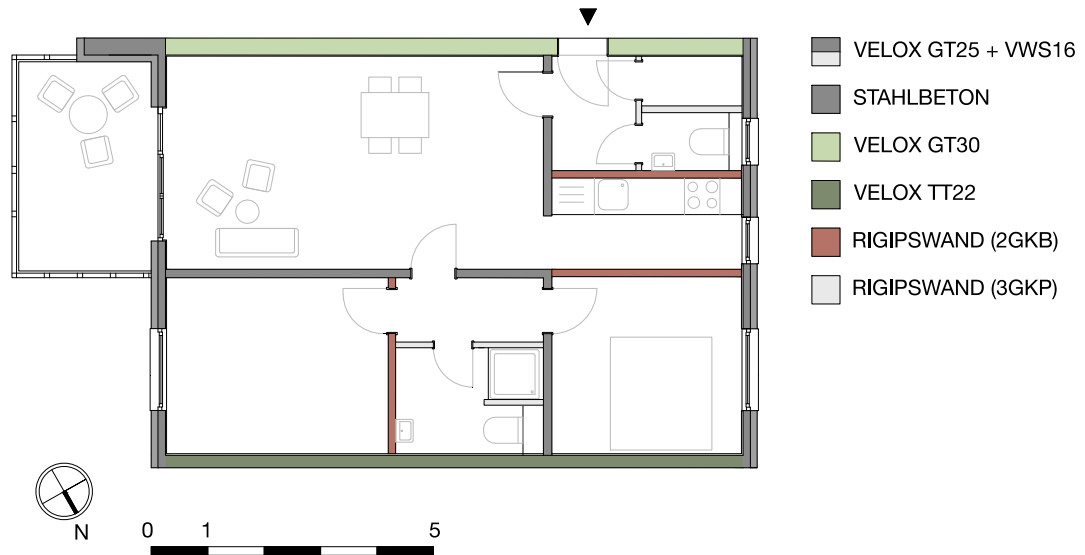


Abb. 57: Wohnungseinheit mit VELOX-Mantelbetonsystemen

5.6.3.2 HOLZLEICHTBETON - ANWENDUNGSVORSCHLAG

Anhand der beschriebenen Wohnungseinheit wird ein Vorschlag zur Anwendung der vorher diskutierten Optimierungsansätze einzelner Bauteile vorgestellt. Den Ergebnissen der vorangegangenen Szenario-Analyse zur Folge ist es sinnvoll die Mantelbetonsysteme durch Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundkonstruktionen zu ersetzen, um aus ökologischer Sicht den Betonanteil zu minimieren, aber auch aus ästhetischen Gründen die herkömmlichen Anwendungen zu ersetzen.

Für die beiden Außenwände wird Variante 3d mit der sichtbaren außenliegenden Holzleichtbetonschicht und der ebenfalls unverputzten inneren Holzleichtbetonschicht gewählt, um mit einem U-Wert von $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ dieselben thermischen Bedingungen der referierenden Außenwand *VELOX GT25* zur gewährleisten. Die Wohnungstrennwände werden in der Variante 3f ausgeführt, wodurch die Anforderungen an den Brandschutz mit einer Feuerwiderstandsklasse von REI 90 erfüllt sind. Bei den tragenden Innenwänden ist Variante 3b sinnvoll, um mit der Massivholzkonstruktion die statischen Anforderungen zu gewährleisten. Die nicht tragenden Innenwände können aus Variante 3c, also nur verbundenen Holzleichtbetonplatten (eventuell zwei *VELOX WSD 50* Platten), aus-

geführt werden. Im Bereich der Nassräume ist gegebenenfalls eine zusätzliche Beschichtung oder Abdeckung notwendig.

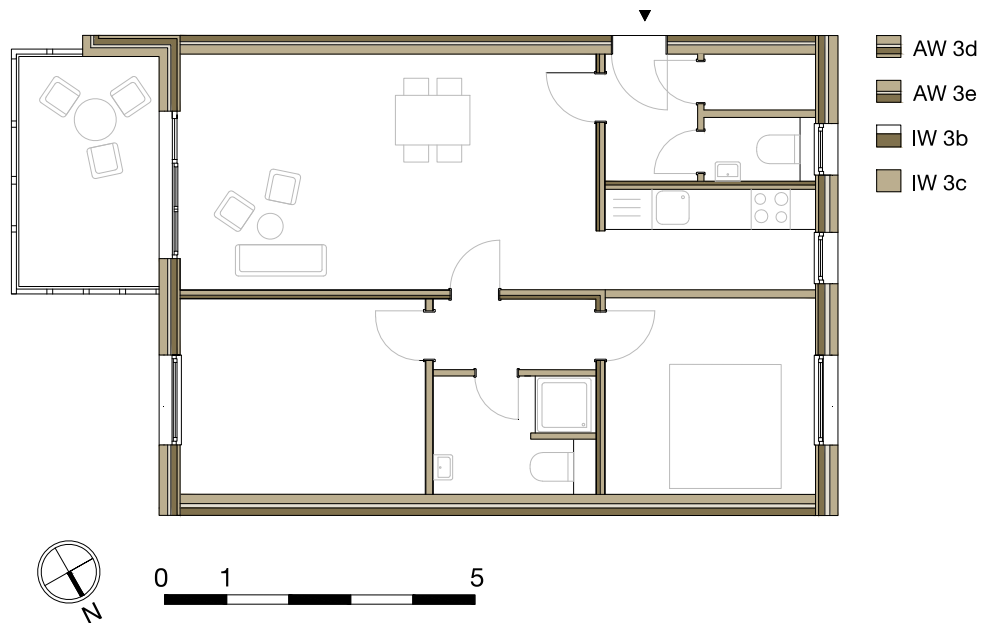


Abb. 58: Wohnungseinheit mit Anwendungsvorschlag der HLB-Konstruktionen

5.6.4 DETAILAUSFÜHRUNGEN

Um ein Gebäude rundum möglichst ressourcenschonend und nachhaltig zu planen, ist es wichtig Konstruktionen bis ins Detail ökologisch vorausschauend zu durchdenken. Dabei spielen auch die unterschiedlichen Verbindungen der Bauteile zueinander eine bedeutende Rolle, denn diese müssen ebenfalls so einfach wie möglich zu montieren sowie später wieder abzubauen sein.

Im Folgenden werden einige Möglichkeiten für die Anwendung im Detail, auf Basis des Grundrisses aus **Kapitel 5.6.3.2**, angeführt. Die grundlegenden Informationen über Bauteilanschlüsse zum Bauen und Planen mit Holz und Holzwerkstoffen beruhen auf Angaben der Datenbank *dataholz.com* [28].

5.6.4.1 ANSCHLUSS ZWISCHENDECKE – AUSSENWAND

Die folgende **Abbildung 59** zeigt einen möglichen Anschluss der Trenndecke an die Außenwand, welche aus insgesamt vier *VELOX* Holzspanplatten [21] zu je 5,0 cm aufbaut ist (Variante 3d, siehe **Kapitel 5.3**). Die Platten könnten demnach schon als Paket verbunden vorgefertigt werden.

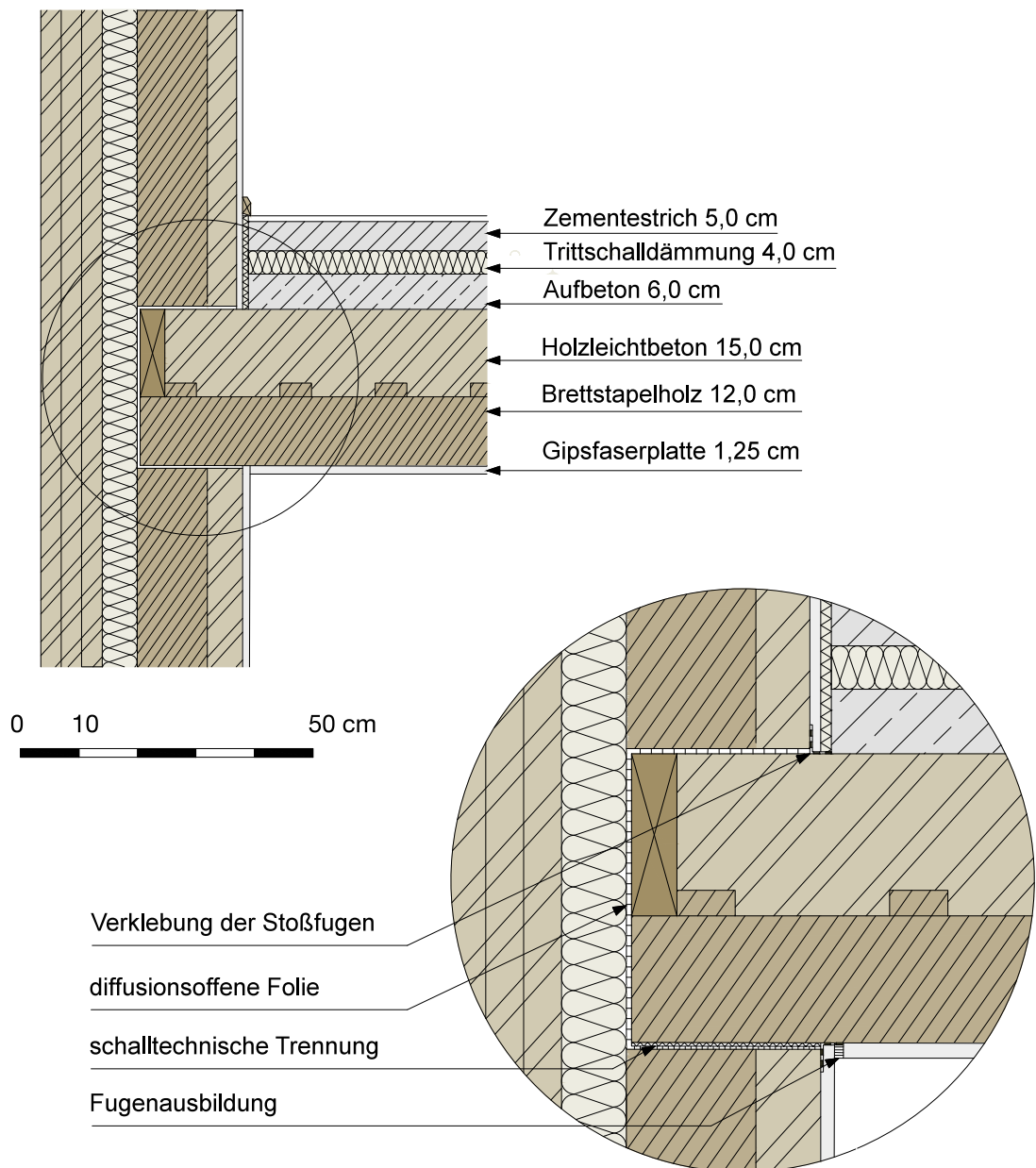


Abb. 59: Anschlussdetail Trenndecke

Die Deckenkonstruktion entspricht der Deckenvariante 3b, könnte jedoch auch ohne der Holzlattung mit drei vorgefertigten **VELOX** Platten ausgeführt werden. Der Anschluss an die Außenwand erfolgt ähnlich wie beim konventionellen Holzmassivbau. Die Stoßfugen werden mit Kleband konvektionsdicht zugeklebt, während zwischen den unterschiedlichen Bauteilen eine Trennung aus schalltechnischen Gründen zu beachten ist.

5.6.4.2 ANSCHLUSS AUSSENWAND – INNENWAND

Die Innenwand kann mechanisch an die tragende Außenwand angeschraubt werden (siehe **Abbildung 60**). Funktioniert die Innenwand als nicht tragende Trennwand, kann sie aus zwei vorgefertigten **VELOX** Platten ausgeführt werden (Vergleich Variante IW 3c, **Kapitel 5.4**). Durch die Wandstärke von insgesamt 10,0 cm erfüllt sie wie in **Kapitel 4.5.2.3** alle Anforderungen an den Brandschutz. Durch die Anwendung von **VELOX** Holzspan-Schallschutzplatten (WSD 50) alle schallschutztechnischen Ansprüche gewährleistet.

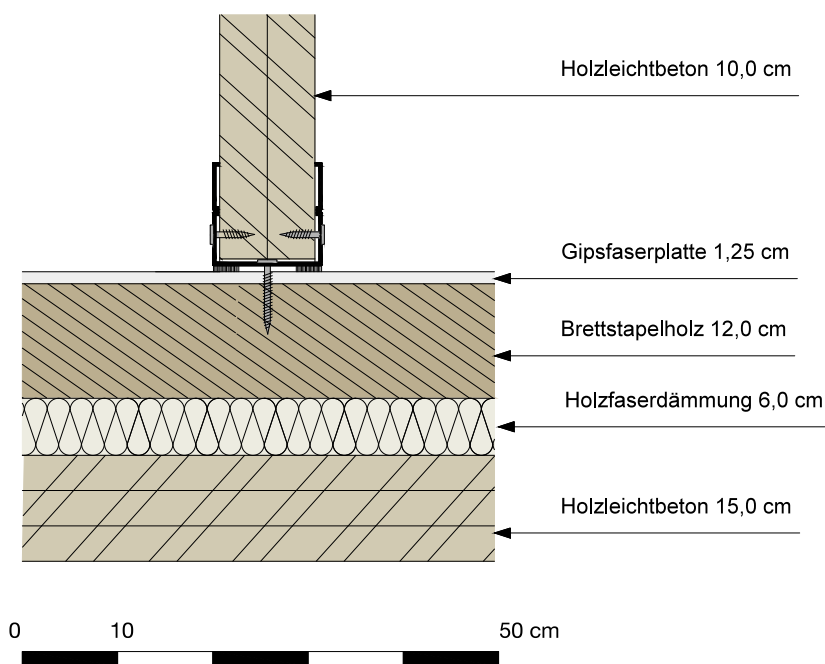


Abb. 60: Anschlussdetail Innenwand

5.6.4.3 FENSTERANSCHLUSS

Die im Folgenden angeführte **Abbildung 61** zeigt einen Fensteranschluss an der Außenwandkonstruktion 3e (siehe **Kapitel 5.3**). Die Zwischendecke ist wie schon in **Kapitel 5.5.4.1** aufgezeigt mit der Wandkonstruktion verbunden. Um Wärmebrücken zu vermeiden, sind ein Dichtband sowie die richtige Fugenausbildung zu berücksichtigen.

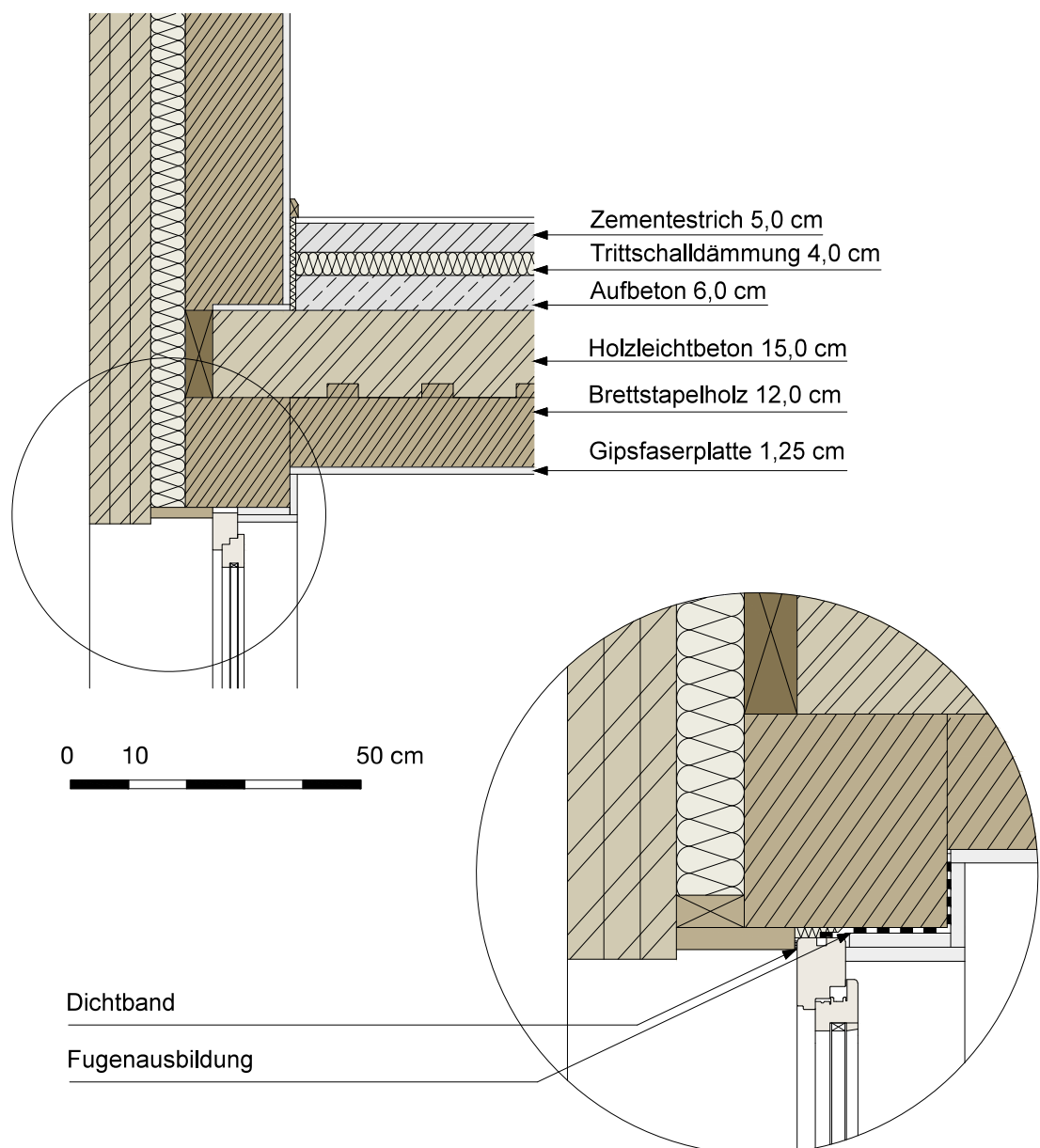


Abb. 61: Anschlussdetail Fenster

5.6.4.4 ANSCHLUSSDETAIL SOCKEL

Die nachfolgende **Abbildung 62** zeigt ein Anschlussdetail zwischen der Außenwandvariante 3d und der Deckenkonstruktion 3b (vergleiche mit **Kapitel 5.3** und **5.5**). Die Kellerwände und Fundamente sind aus 22,0 cm dickem Stahlbeton gebaut, wobei Mauerwerk ebenso möglich wäre. Dabei befindet sich außengelegen ein zusätzliches 5,0 cm dickes Fertigteil aus Beton sowie die dahinterliegende Perimeterdämmung mit Drainage und Feuchtigkeitsabdichtung zur ordnungsgemäßen Entwässerung. Die vorhandenen Stoßfugen müssen auch hier mit geeignetem Klebeband konvektionsdicht verklebt werden. Erst danach erfolgt die Befestigung des Sockelanschlusses mittels Verankerungen, welche je nach statischen Anforderungen in Größe und Anzahl variieren [28].

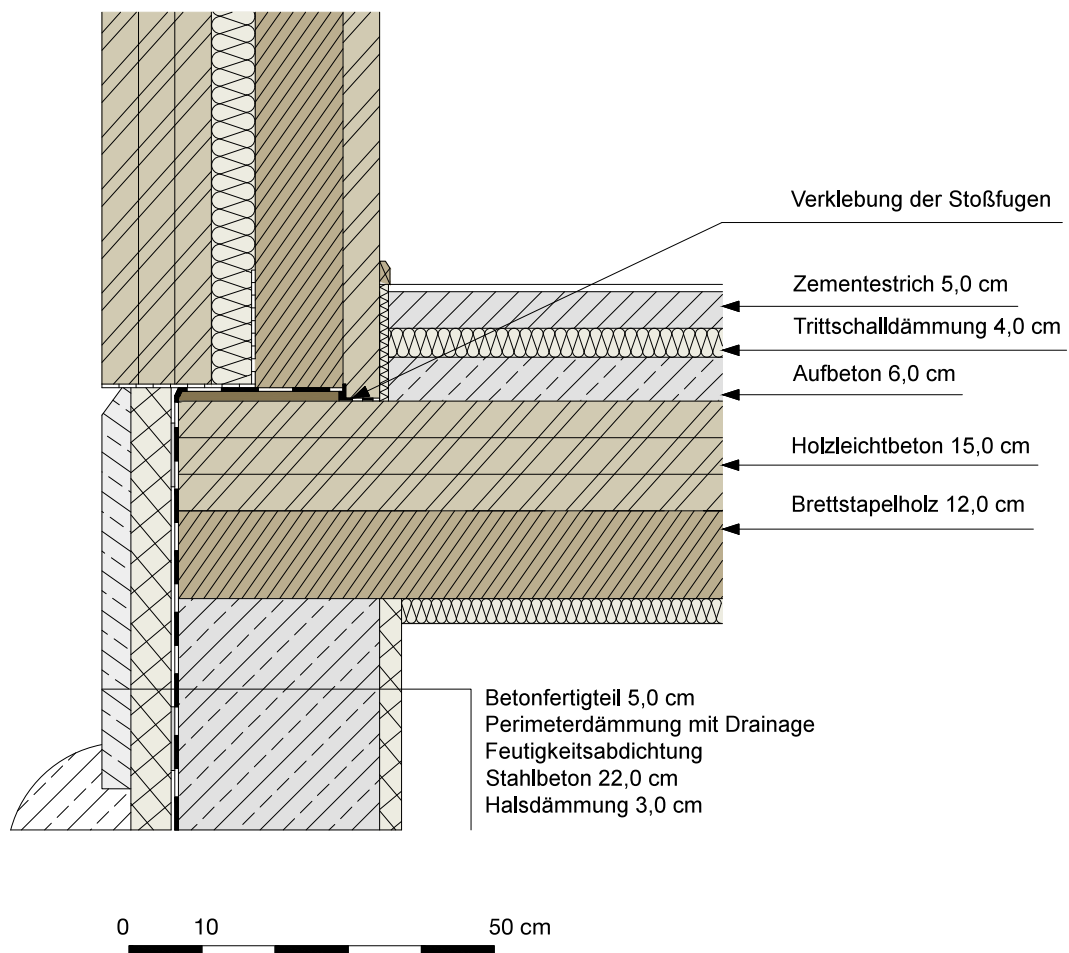


Abb. 62: Anschlussdetail Außenwand - Sockel

6 ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Generell sind Architekten in der Position die Produktion einer größeren Vielfalt von nachhaltigen Materialien bereits durch Kontakt mit Herstellern für mehr Informationen anzuregen und Baustoffe, welche durch stark kontaminierende Prozesse hergestellt werden, abzulehnen. Durch bereits anfängliche Mitwirkung beim Aufbau eines Materialangebots, kann schließlich mehr Kontrolle über die Qualität und Nachhaltigkeit des fertiggestellten Gebäudes erreicht werden [30].

Konstruktionen aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise als Beispiel für eine ressourcen-effiziente Bauweise haben mit einem hohen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen viel Potenzial zur Entlastung der Wirkungen auf Umwelt und Ökosystem aufgezeigt. Die zur Herstellung verwendeten Holzspäne sind Abfallprodukt und nachhaltige Ressource zugleich. Durch ihren Einsatz können endliche Ressourcen wie Sand, dessen Verknappung drastisch zunimmt, geschont werden. Dazu hat das Nachwuchspotenzial von Holz aufgezeigt, dass der Zuwachs von Fichtenholz, welches hauptsächlich für die Produktion von Holzleichtbeton verwendet wird, deutlich über dem Nutzungsanteil liegt. Für den Zementanteil sollte zu einer der vielen Alternativen zu herkömmlichem Portlandzement gegriffen werden, welche auch bei einem niedrigeren Klinkeranteil dieselben Festigkeitswerte erzielen, da dieser vor allem beim Herstellungsprozess einen sehr hohen Ausstoß an Schadstoffemissionen verursacht. Dazu kommt, dass beim Holzleichtbeton ein höherer Zementanteil notwendig ist, da im Gegensatz zu konventionellem Beton die Gesteinskörnung durch die Holzspäne ersetzt wird.

Auch die End-Of-Life Phase des gesamten Produktlebenszyklus bietet entsprechendes Verbesserungspotenzial. Die thermische Verwertbarkeit von Holzleichtbeton ist nur schwer möglich und bringt in Summe keinen Energiegewinn. Auch die Menge des auf Deponien abgelagerten Abbruchmaterials ist relativ unwirtschaftlich, weshalb nach weiteren Alternativen zur Entsorgung am Lebensende gesucht werden muss. Entwicklungen könnten, ähnlich wie bei Recyclingbeton, zur Weiterverwendung der Baurestmassen zur Entwicklung neuer Materialien führen.

Aus konstruktiver Sicht ergeben Holzleichtbetonkonstruktionen im Verbund mit Massivholz sehr gute wärmespezifische Eigenschaften, die durchaus mit konventionellen Bauweisen aus Stahlbeton oder Holzrahmenbau vergleichbar sind. Hinsichtlich der Bauteilstärken und Massen, sind sie diesen teilweise sogar überlegen. Auch im Bereich des Brand- und Schallschutz kann eine sehr positive Bilanz gezogen werden. Die Montage erfolgt im Detail ähnlich wie bei gewöhnlichen Massivholzkonstruktionen und ist infol-

gedessen wirtschaftlich durchführbar. Die mechanischen Verbindungen können außerdem ohne großen Aufwand, hauptsächlich zerstörungsfrei wieder voneinander gelöst werden. Vor allem weitere Entwicklungen mit den *VELOX* Holzspanplatten [21] durch Zusammenfassen mehrerer Elemente, wie in den Detaildarstellungen aufgezeigt, können leicht vorzufertigende und einfach bearbeitbare Bauteile entstehen.

Trotz der guten Festigkeiten durch den relativ hohen Zementanteil, können nach jetzigem Stand der Forschung Holzleichtbetonkonstruktionen nicht alleine - ohne der Anwendung im Verbund mit anderen Materialien - die statischen Ansprüche eines Gebäudes erfüllen. Dieser Aspekt fordert noch weitere Überlegungen und Versuchsreihen, wobei das Ziel ist, diese Ansprüche ohne eine Reduzierung des Holzanteils zu Gunsten der Zementmenge zu erfüllen.

Grundsätzlich haben die Berechnungen und Analysen gezeigt, dass Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundkonstruktionen durch ihre Langlebigkeit, einfache Bearbeitbarkeit und geringen Umweltwirkungen für eine nachhaltige, ökologische Bauweise gut geeignet sind. Sie bieten eine ressourcenschonende Alternative zum konventionellen Stahlbetonbau, welcher Hauptursache für die Verknappung der Sand- und Kiesreserven ist.

6.1 WEITERFÜHRENDE METHODEN ZUR ÖKOBILANZIERUNG

Die angeführten Daten liefern generell einen Überblick über den Lebenszyklus von Bauteilen in Holzleichtbeton-Verbundbauweise. Für eine weiterführende genauere ökologische Betrachtung können die mit *baubook* [49] berechneten Resultate im Folgenden mit Werten aus anderen Datenbanken, wie zum Beispiel der *ökobau.dat* [50] verglichen werden. Deren Daten beruhen zum Teil wiederum auf denen der *GaBi Datenbank*.

Den angegebenen OI3 Indikator des *IBO* gibt es nur in Österreich, weshalb er international nicht sehr bekannt ist. Er kann als Versuch gesehen werden, ein umfassendes System auf einen einzelnen aussagekräftigen Indikator zu reduzieren. Die mittels Ökobilanzen ermittelten stofflichen Größen, nämlich der Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Ressourcen, das Treibhauspotenzial bezogen auf CO₂ – sowie das Versauerungspotenzial bezogen auf SO₂-Äquivalent, werden auf einen gemeinsamen Index zusammengefasst. Unsicherheiten liegen in der Qualität dieser zu Verfügung gestellten Ökobilanzen bezogen auf die Datenerfassung und die verwendeten Hintergrunddatensätze sowie welche Version und Methodik beim LCIA (Life Cycle Impact Assessment) verwendet werden. Diese Hintergrunddaten müssten in weiterer Folge genauer überprüft werden, um zu sehen, welche Bandbreiten an Ergebnissen für die einzelnen Indikatoren

6 ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

6.1 WEITERFÜHRENDE METHODEN ZUR ÖKOBILANZIERUNG

herauskommen. Dadurch könnte auch der Einfluss auf den OI3 Indikator herausgearbeitet werden [57].

7 ANHANG

7.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ANALYSIERTEN BAUTEILE

7 ANHANG

7.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ANALYSIERTEN BAUTEILE

Außenwände

	AW 1a	AW 2a	AW 3a	AW 3b	AW 3c	AW 3d	AW 3e
Dicke [m]	0,37	0,30	0,36	0,31	0,29	0,36	0,33
Masse [kg/m ²]	498,5	87,3	184,1	156,8	154,6	153,9	148,7
U-Wert	0,23	0,22	0,26	0,29	0,24	0,23	0,25
Verbaute Fläche [%]	6,32	5,16	6,15	5,30	4,95	6,15	
OEKOLOGISCHE KENNWERTE							
OI3-Index	91	29	35	22	64	29	28
GWP100 [kg CO ₂ /m ²]	94,09	-12,68	-108,35	-104,34	-59,02	-109,10	-116,1
AP [kg SO ₂ /m ²]	0,27	0,15	0,21	0,16	0,28	0,21	0,21
PEI ne [MJ/m ²]	1.173,88	522,78	714,21	541,02	1.052,14	603,77	592,51
Lebensdauer [a]	40	40	45	45	30	50	50
Ersatz in 50a	1,25	1,25	1	1	1,5	0	0

Innenwände

	IW 1a	IW 2a	IW 3a	IW 3b	IW 3c
Dicke [m]	0,21	0,16	0,21	0,14	0,10
Masse [kg/m ²]	458	70	99	71	55
Brandschutzklasse	REI 90	REI 90	REI 90	REI 90	REI 90
OEKOLOGISCHE KENNWERTE					
OI3-Index	71	38	17	6	6
GWP100	72,25	2,80	-59,5	-61,9	-12,1
AP	0,23	0,12	0,12	0,06	0,03
PEI ne	872,43	437,85	369,41	216,40	133,43
Lebensdauer [a]	50	50	50	50	50
Ersatz in 50a	0	0	0	0	0

7 ANHANG

7.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ANALYSIERTEN BAUTEILE

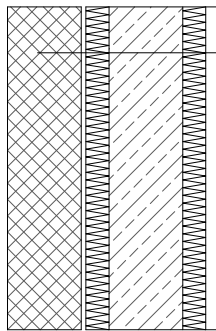
Decken

	Decke 1a (Rohbau)	Decke 2a (Rohbau)	Decke 3a (Rohbau)	Decke 3b	Decke 3c
Masse [kg/m ²]	538,0	28,0	282,9	373,7	373,7
OEKOLOGISCHE KENNWERTE					
OI3-Index	74	28	43	59	59
GWP100	85,2	-39,3	-81,83	-76,43	-76,43
AP	0,22	0,03	0,21	0,30	0,30
PEI ne	875,14	130,48	843,78	949,0	949,0
Lebensdauer [a]	50	50	50	50	50
Ersatz in 50a	0	0	0	0	0

7.2 AUFBAUTEN URBANEUM KLAGENFURT

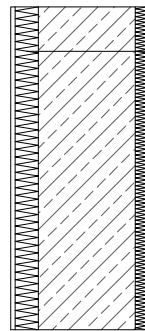
Außen- und Innenwände

Aussenwand Mantelbeton mit
VELOX GT25 = VWS16



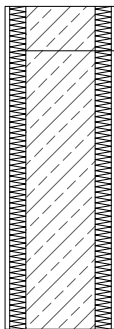
160mm VWS
50mm WS 50
160mm Stahlbeton
35mm WSD 35

Aussenwand Mantelbeton VELOX GT30



50mm WS 50
210mm Stahlbeton
35mm WSD 35

Aussenwand VELOX TT22



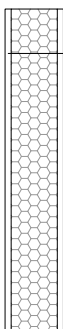
35mm WSD 50
210mm Stahlbeton
35mm WSD 35

tragende Innenwand Stahlbeton



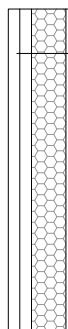
160mm Stahlbeton

Innenwand



12.5mm Gipsfaserplatte
125mm Wandprofil + Daemmung
12.5mm Gipsfaserplatte

Innenwand



2x20mm Gipsfaserplatte
75mm Wandprofil + Daemmung
12.5mm Gipsfaserplatte

8 VERZEICHNISSE

8.1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

8 VERZEICHNISSE

8.1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
Abb.	-	Abbildung
AP	kg SO ₂ -äquiv	Versauerungspotenzial (Acidification Potential)
CH ₄	-	Methan
CO ₂	-	Kohlendioxid
EP	kg PO ₄ ⁻³ eq	Entropierungspotenzial (Entrophication Potential)
EPS	-	expandierter Polysterolpartikelschaum
GT25	-	VELOX Mantelbetonsysteme, Wohnungstrennwand oder Außenwand mit einer Wandstärke von 25 cm
GT30	-	VELOX Mantelbetonsysteme, Wohnungstrennwand mit einer Wandstärke von 30 cm
GWP	kg CO ₂ -äquiv	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
H ₂ SO ₄	-	Schwefelsäure
HLB	-	Holzleichtbeton
HNO ₃	-	Salpetersäure
HRB	-	Holzrahmenbauweise
IBO	-	Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie
NO _x	-	Stickoxid
NWP	-	Nachwuchspotenzial
ODP	kg CCL ₃ F eq	Ozonzerstörungspotenzial (Ozone Depletion Potential)
OIB	-	Österreichisches Institut für Bautechnik
PEI	MJ	Primärenergieinhalt erneuerbar
PEI ne	MJ	Primärenergieinhalt nicht erneuerbar (Primary Energie Input)
POCP	kg C ₂ H ₄ eq	Sommersmogpotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential)
R-Wert	m ² K/W	Wärmedurchlasswiderstand
SO ₂	-	Schwefeldioxid
STB	-	Stahlbetonbauweise
Tab.	-	Tabelle

8 VERZEICHNISSE

8.1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
TT20	-	VELOX Mantelbetonsysteme, Innenwand mit einer Wandstärke von 20 cm
TT22	-	VELOX Mantelbetonsysteme, Innenwand mit einer Wandstärke von 22 cm
U-Wert	W/m ² K	Wärmedurchgangskoeffizient
Vfm	-	Vorratsfestmeter
VWS	-	Vollwärmeschutz
WS 50	-	VELOX Holzspan-Dämmplatte mit einer Stärke von 5 cm
WS 75	-	VELOX Holzspan-Dämmplatte mit einer Stärke von 7,5 cm
WDVS	-	Wärmedämmverbundsystem
WSD 50	-	VELOX Holzspan-Schallschutzplatte mit einer Stärke von 5 cm

8.2 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.) Bundesministerium für Verkehr-, "Leitfaden Nachhaltiges Bauen," 2001.
- [2] S. EL KHOULI, V. JOHN, and M. ZEUMER, *Nachhaltig Konstruieren. Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl: Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren*, 1st ed.: DETAIL Green Books, 2014.
- [3] D. DELESTRAV, *Sand die neue Umweltzeitbombe*, ARTE, Ed., 2013, Film. Dokumentation.
- [4] (2013) Interview: Können wir auf Sand bauen? [Online]. <http://donatu.fbmd.h-da.de/zukunft-leben/?p=507>, zuletzt aufgerufen am 25.1.15
- [5] J. GROTZINGER, T.H. JORDAN, F. PRESS, and SIEVER, *Press/Siever Allgemeine Geologie*, 5th ed.: Spektrum Akademischer Verlag, 2008.
- [6] (2014, Juni) Die Gier nach Sand - doch auch dieser Rohstoff ist endlich. [Online]. <http://www.br.de/themen/wissen/sand-abbau-umwelt-100.html>
- [7] GREENPEACE. (2014, Oktober) Textbeitrag: Ressource Sand, jedes Sandkorn zählt. [Online]. http://www.greenpeace.org/switzerland/de/News_Stories/Magazin/2013-Magazin/Ressource-Sand, zuletzt aufgerufen am 4.4.15
- [8] R. KRIPPNER, "Zuschnitt 45: Holz Beton Verbund," p. 19, März 2012.
- [9] A. KLATT and H. GARRECHT. (2011) Beton aus modifizierten Holzspänen. [Online]. <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2011/w46/woche46.html>, zuletzt aufgerufen am 10.3.15
- [10] R. KRIPPNER, D. NIEBLER, and H. ISSIG, *Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 17. Holzleichtbeton im Hochbau.*: Lehrstuhl für Baustoffkunde und Baukonstruktionen. TU München, 2009.
- [11] F. RÖSNER, *Analyse verschiedener Einflussfaktoren auf die Betondruckfestigkeit von Holzbeton aus industriell gefertigten Holzspänen.*: TU Darmstadt, 2010, Diplomarbeit.
- [12] F. SONNTAG, *Wandbauarten mit Schalungssteinen aus Holzspanbeton.*: TU Leipzig, 2003, Diplomarbeit.
- [13] R. KRIPPNER, *Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten im Bereich von Gebäudefassaden.*, 2004, Dissertation.
- [14] E. KIRCHMAYER, *Beitrag zur Entwicklung von Holz-Holzbeton-Betonverbunddecken.*: TU Wien, 2012, Diplomarbeit.
- [15] A. SARJA, *Wood fibre reinforced concrete.*: Blackie and Sons Ltd. Glasgow and

London, 1988.

- [16] HERAKLITH. (2015) [Online].
http://www2.heraklith.at/heraklith/at/presse/pdf/Heraklith_Eckdaten_der_Unternehmensgeschichte.pdf, zuletzt besucht am 25.3.15
- [17] Meyers großes Taschenlexikon,, 1987, vol. Band 10.
- [18] W. STÖLLINGER, *Ansätze zu einer nachhaltigen Architektur am Beispiel Holzspanbeton.*: TU Wien, 2013, Diplomarbeit.
- [19] C. RADLHERR, *Brandverhalten von Holz-Beton Verbundkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung zementgebundener Platten aus Holzleichtbeton: experimentelle und numerische Untersuchungen.*: TU Wien, 2015, Diplomarbeit.
- [20] ISOSPAN. (2015) Isospan GmbH. Webpage. [Online].
<http://www.isospan.eu/de/produkte.html>, zuletzt aufgerufen am 24.3.15
- [21] VELOX Werk GsmBH. (2015) [Online]. www.velox.at, zuletzt besucht am 13.8.15
- [22] ETERNIT AG. (2015) [Online]. <http://www.eternit.de/produkte/bauplatten.html>, zuletzt aufgerufen am 25.3.15
- [23] AMROC Baustoffe GmbH Magdeburg. (2015) <http://www.amroc.de/de/>, zuletzt aufgerufen am 20.08.2015.
- [24] Fachbereich Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau Technische Universität Wien: Forschungsbericht, "Weitgespannte Flachdeckensysteme in Holzspanbeton-Verbundbauweise (Holzspanbeton-Decken)," FFG Forschungsprojekt: 824 892, im Druck,.
- [25] C. EINHELL, *Less is more. Österreichische Architektur als Vorbild für Ressourceneffizienz.*: TU Wien, 2014, Diplomarbeit.
- [26] A. FRIEDMAN, *Fundamentals of sustainable dwellings.*: Island Press, 2012.
- [27] IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. (2015) Ökokennzahlen. [Online]. <http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm>, zuletzt aufgerufen am 3.6.15
- [28] Dataholz. Service der Holzforschung Austria. (2015) [Online]. www.dataholz.at, Zuletzt aufgerufen am: 20.7.15
- [29] H. KÖNIG, *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung. Grundlagen Berechnung Planungswerkzeuge.* München: Detail Green Books, 2009.
- [30] J. KIM and B. RIGDON, "Sustainable Architecture Module: Qualities, Use, and Examples of Sustainable Building Materials," The University of Michigan, 1998.
- [31] D.A. GROSS. (2015, Mai) Citylab. How Slightly Better Concrete Could Save The Planet. [Online]. <http://www.citylab.com/design/2015/05/how-slightly-better-concrete-could-save-the-planet/392996/>, zuletzt aufgerufen am 20.5.15
- [32] H. KÖNIG, "Bauen mit Holz - Wege in die Zukunft," Abschlussbericht. Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung (DBU) - AZ: Nummer 29239. Technische Universität München., 2011.
- [33] R. BÜCHSENMEISTER, "Verbreitung und Leistung der Fichte in Österreich.," BFW-

Praxisinformation 31: 3 -6, 2013.

- [34] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung – AltholzV) BGBl. I S.3302.*, 2002.
- [35] A. PHILIPPS. (2015) Dubai leads the world in sustainable construction with green cement. [Online].
<http://www.constructionglobal.com/infrastructure/427/Dubai-leads-the-world-in-sustainable-construction-with-green-cement>, zuletzt aufgerufen am 4.4.15
- [36] C. PASH. (2015) China is experimenting with a new technology that turns iron or waste into cement. [Online]. <http://uk.businessinsider.com/csiro-exports-iron-waste-harvest-technology-to-china-2015-3?r=US>, zuletzt aufgerufen am 3.5.15
- [37] T.F. ARMISTEAD. (2015) Engineering News Record, Cement Makers Test Cleaner Concrete For Carbon Capture. [Online].
<http://enr.construction.com/products/materials/2015/0427-65279cement-makers-test-cleaner-concrete-for-carbon-capture.asp>, zuletzt aufgerufen am 16.4.15
- [38] SLAGSTAR. Eine Innovation der Wopfinger Baustoffindustrie GmbH. (2015) www.slagstar.at, zuletzt aufgerufen am 23.4.15.
- [39] M. HEGGER, M. FUCHS, T. STARK, and M. ZEUMER, *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur.*: Birkhäuser München : Ed. Detail 2008.
- [40] Impulsprogramm IP Bau (Hrsg.) Bundesamt für Konjunkturfragen, *Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten: Grundlagendaten für den Unterhalt und die Erneuerung von Wohnbauten.* Bern, 1994.
- [41] R. SIEBERS, *Ressourceneffizienz durch recyclinggerechte Konstruktion und Baustoffe.*: bauforum-stahl e.V. Düsseldorf, 2012.
- [42] D. GLÜCKLICH, *Ökologisches Bauen. Von Grundlagen zu Gesamtkonzepten.*: München: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 2005.
- [43] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, *Umwelt und Wasserwirtschaft. Abfallverzeichnisverordnung. BGBl. II. Nr. 570/2003 in der Fassung BGBl. II. Nr.498/2008.*, 2003.
- [44] VÖZ Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. [Online]. www.zement.at, Zuletzt aufgerufen am: 25.3.15
- [45] H. MÖTZL, "Haus der Zukunft - eine Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Entsorgungswege der Baustoffe," Haus der Zukunft. Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften., Projektbericht 2009.
- [46] J. ROPP, "Combustion and behaviour of a wood-cement composite (WCC) at high temperature," heig-vd. Haute Ecole d'Ingenierie et de Gestion du Canton de Vaud. Departement: TIN. Institut de Genie Thermique., Final report.
- [47] H. MÖTZL, "Haus der Zukunft, eine Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Entsorgungswege der Baustoffe.

- ABC-Disposal. Anhang A2. Projektnummer 813974," 2009.
- [48] Wirtschaftskammer Österreich. Entsorgungs- und Ressourcenmanagement. (2015) [Online].
https://www.wko.at/Content.Node/branchen/oe/sparte_iuc/Abfall--und-Abwasserwirtschaft/Deponiebetreiber1.html, zuletzt aufgerufen am 5.6.15
- [49] baubook Rechner für Bauteile. (2015) <https://www.baubook.info>, zuletzt aufgerufen am 10.09.2015.
- [50] Ökobaudat, Informationsportal Nachhaltiges Bauen; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- [51] C. THORMARK, "The effect of material choice on the total energie need and recycling potential of a buidling," Lund Institute of Technology. Departement of Building Science, Lund, Schweden, 2005.
- [52] ProHolz. Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft. (2015) [Online]. www.proholz.at, Zuletzt aufgerufen am: 14.7.15
- [53] Stadt- und Raumforschung (BBSR) Bundesinstitut für Bau-. (2011) BBSR-Tabelle "Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB". [Online]. <http://www.nachhaltigesbauen.de>
- [54] S. OEHLER and H.G. REINKE. (2012, April) Bauplaner-Special. [Online]. www.bauplaner-special.de, zuletzt aufgerufen am 5.8.15
- [55] T. HOFER, *Experimentelle und analytische Untersuchungen des Tragverhaltens von Holz-Holzleichtbeton-Sandwich-Deckenbauweisen.*: TU Wien, 2013, Diplomarbeit.
- [56] Müller & Hohenwarter Architekten, staatlich befugte und beeidete Ziviltechniker, Ankershofenstraße 8, A-9020 Klagenfurt.
- [57] A. MERL, Daxner&Merl GmbH. Sustainability Strategy Responsibility. Lindengasse 39/8, 1070 Wien, 2015.
- [58] F. KRAUSMANN et al., "Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century," Institute of Social Ecology, Faculty of Interdisciplinary Studies, Alpen Adria Universität, Klagenfurt, 2009.
- [59] D. SCHULTER, "Ökobilanz zementgebundener Bauprodukte - Chancen und Risiken," Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Matereialprüfung. Technische Universität Graz,.

8.3 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.1.: Ziele und Handlungsfelder der Bauökologie [2].....	7
Abb.2.: Globale Entnahmen an Mineralien in den letzten 100 Jahren [58]	9
Abb.3.: Entwicklung der Kies- und Sandreserven, sowie deren Abbau und beeinflussende Faktoren [2].....	12
Abb.4.: Schematische Darstellung des Lebenszyklus eines Bauerwerks bzw. Bauteils.....	24
Abb.5.: Schematischer Aufbau zur Ökobilanzierung [29].....	25
Abb.6.: Durchschnittliche Anteile der verschiedenen Phasen im Herstellungsprozess an der Grauen Energie von Baustoffen [2].....	26
Abb.7.: Schematische Darstellung von Gebäuden als Kohlenstoffspeicher [32].....	25
Abb.8.: Anteil an Zuwachs und Nutzung von Fichtenholz [Mio.Vfm] [33].....	30
Abb.9.: Einfluss des Klinkeranteils auf den Treibhausgasindikator GWP in [kg CO ₂ -Äquiv.] [59].....	34
Abb.10.: Durch Slagstar erzielte Reduktion an CO ₂ -Emissionen [38].....	35
Abb.11.: Entsorgungskaskade.....	41
Abb.12.: Vergleich des Primärenergieinhalts an nicht erneuerbaren Ressourcen von Normal- beton mit Recyclingbeton [2].....	42
Abb.13.: Stufen der Trennbarkeit von Bauteilschichten.....	40
Abb.14.: Verbindung durch Verklebung.....	45
Abb.15.: Verklebung der einzelnen Bauteilschichten.....	46
Abb.16.: Verbindung mittels Kunststoffmatte.....	46
Abb.17.: Verbindung durch Schrauben.....	47
Abb.18.: Verbindung durch verschraubte Latten.....	47
Abb.19.: Bewertungskriterien der Bauteile in Holzleichtbeton-Verbundbauweise.....	53
Abb.20.: Lageplan der Wohnanlage.....	55
Abb.21.: Grundriss eines Regelgeschosses mit ausgewählter Außenwand.....	57
Abb.22.: Außenwand in Stahlbetonbauweise.....	59
Abb.23.: Außenwand in Holzrahmenbauweise [28].....	60

8 VERZEICHNISSE

8.3 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.24.: Die Funktionsschichten der Holzleichtbeton-Verbundbauweise (von Außen nach Innen) [13].....	61
Abb.25.: Außenwand in Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3a).....	63
Abb.26.: Außenwand in Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3b).....	64
Abb.27.: Außenwand in Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3c).....	65
Abb.28.: Prozentanteile der Nettoaußenwandflächen.....	66
Abb.29.: Massen der Außenwandkonstruktionen.....	67
Abb.30.: Wärmedurchlasskoeffizienten $[W/m^2K]$ der unterschiedlichen Außenwandtypen..	70
Abb.31.: GWP100 $[kg CO_2]$ und PEI ne $[MJ]$ der Außenwandkonstruktionen für eine Fläche von jeweils $45,66 m^2$	72
Abb.32.: Mittlere Lebenserwartung der unterschiedlichen Außenwandaufbauten.....	73
Abb.33.: Grundriss eines Regelgeschosses mit ausgewählter Innenwand.....	76
Abb.34.: Innenwand aus Stahlbeton	78
Abb.35.: Innenwand aus Holzrahmenbauweise [28].....	79
Abb.36.: Innenwand aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3a).....	80
Abb.37.: Massen der unterschiedlichen Innenwandkonstruktionen in $[kg]$	82
Abb.38.: GWP100 $[kg CO_2]$ und PEI ne $[MJ]$ der Innenwandkonstruktionen für eine Fläche von jeweils $17,0 m^2$	83
Abb.39.: Mittlere Lebenserwartung der unterschiedlichen Innenwandaufbauten.....	84
Abb.40.: Schematischer Querschnitt durch das Stahlbetongebäude.....	86
Abb.41.: Rohbaudecke aus Stahlbetonbauweise (1a).....	87
Abb.42.: Rohbaudecke aus Holzrahmenbauweise (2a).....	88
Abb.43.: Rohbaudecke aus Holzleichtbeton-Verbundbauweise (3a).....	89
Abb.44.: GWP100 $[kg CO_2]$ und PEI ne $[MJ]$ der Deckenkonstruktionen für eine Fläche von jeweils $31,36 m^2$	90
Abb.45.: Durchschnittliche Lebenserwartung der unterschiedlichen Deckenaufbauten.....	91
Abb.46.: Ideale Raumausrichtung.....	92
Abb.47.: Schwachstellen bei Bauteilübergängen innerhalb eines Gebäudes [25].....	93
Abb.48.: Außenwand Variante 3d.....	94
Abb.49.: Mögliche strukturierte Fassadengestaltung.....	95
Abb.50.: Außenwand Variante 3e.....	95

8 VERZEICHNISSE

8.3 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.51.: Innenwand Variante 3b und 3c.....	96
Abb.52.: Deckenaufbau Variante 3b.....	97
Abb.53.: Deckenaufbau Variante 3c.....	97
Abb.54.: Übersichtsplan Urbaneum Klagenfurt.....	98
Abb.55.: Grundriss Hofhaus Urbaneum Klagenfurt.....	99
Abb.56.: Längsschnitt Hofhaus Urbaneum Klagenfurt.....	100
Abb.57.: Wohnungseinheit mit VELOX-Mantelbetonsystemen.....	101
Abb.58.: Wohnungseinheit mit Anwendungsvorschlag der HLB-Konstruktionen.....	102
Abb.59.: Anschlussdetail Trenndecke.....	103
Abb.60.: Anschlussdetail Innenwand.....	104
Abb.61.: Anschlussdetail Fenster.....	105
Abb.62.: Anschlussdetail Außenwand-Sockel.....	106

8.4 TABELLENVERZEICHNIS

Tab.1.:	Eigenschaften unterschiedlicher Holzleichtbeton-Rezepturen.....	17
Tab.2.:	Unterschiedliche Holzbetonprodukte und deren Werte für die Rohdichte und die Abmessungen der Holzspäne bzw. Holzfasern.....	19
Tab.3.:	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung des Glühverlustes [22].....	21
Tab.4.:	Effekte auf der Einflussfaktoren des Nachwachspotentials (++ sehr hoch, + hoch, 0 kein Effekt, - gering, -- sehr gering) [29]	28
Tab.5.:	Zuwachs und mittlere Rohdichte von Fichtenholz [32].....	30
Tab.6.:	Zuwachs, C-Bindung sowie dem Zuwachs entsprechende C-Bindung von Fichtenholz [32].....	30
Tab.7.:	Verschiedene Zementmischungen und deren GWP-Reduktionen.....	34
Tab.8.:	Abmessungen der gegebenen Stahlbetonwand.....	56
Tab.9.:	Aufbau und Baustoffangaben der Stahlbeton-Konstruktion. * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit Fläche = 45,66 m ²	59
Tab.10.:	Aufbau und Baustoffangaben der Holzrahmenbau-Konstruktion. * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit Fläche = 45,66 m ²	60
Tab.11.:	Aufbau und Baustoffangaben der Holzleichtbeton-Verbundkonstruktion (3a) * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit Fläche = 45,66 m ²	63
Tab.12.:	Aufbau und Baustoffangaben der Holzleichtbeton-Verbundkonstruktion (3b) * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit Fläche = 45,66 m ²	64
Tab.13.:	Aufbau und Baustoffangaben der Holzleichtbeton-Verbundkonstruktion (3c) * Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit Fläche = 45,66 m ²	65
Tab.14.:	Nettowandfläche und Prozentanteil der jeweiligen Aufbauten.....	66
Tab.15.:	Thermische Kennwerte der verschiedenen Holzleichtbeton-Mischungen.....	68
Tab.16.:	Ökokennzahlen der verschiedenen Holzleichtbeton-Mischungen.....	69
Tab.17.:	Auswirkungen der verschiedenen Holzleichtbeton-Mischungen auf die drei Umweltkategorien.....	69

8 VERZEICHNISSE

8.4 TABELLENVERZEICHNIS

Tab.18.:	Treibhauspotenzial, Versäuerungspotenzial und Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Energien der unterschiedlichen Außenwandkonstruktionen pro m ² . *Werte aus der Datenbank von <i>Dataholz</i> , um etwaige Abweichungen zu überprüfen [28].....	72
Tab.19.:	ΔOI3-Werte der einzelnen Schichten	78
Tab.20.:	Aufbau und Baustoffangaben der Stahlbeton-Konstruktion.....	78
Tab.21.:	ΔOI3-Werte der einzelnen Schichten	79
Tab.22.:	Aufbau und Baustoffangaben der Holzrahmen-Innenwandkonstruktion.....	79
Tab.23.:	ΔOI3-Werte der einzelnen Schichten	80
Tab.24.:	Aufbau und Baustoffangaben der Holzleichtbeton-Innenwandkonstruktion.....	80
Tab.25.:	Treibhauspotenzial, Versäuerungspotenzial und Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Energien der unterschiedlichen Innenwand-Konstruktionen pro m ² . *Werte aus der Datenbank von <i>Dataholz</i> , um etwaige Abweichungen zu überprüfen [28].....	83
Tab.26.:	Aufbau und Baustoffangaben der Rohbaudecke in Stahlbetonbauweise *Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 31,36 m ²	87
Tab.27.:	Aufbau und Baustoffangaben der Rohbaudecke in Holzrahmenbauweise *Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 31,36 m ²	88
Tab.28.:	Aufbau und Baustoffangaben der Rohbaudecke in Holzleichtbetonbauweise *Berechnung der Masse durch Volumen x Dichte mit einer Fläche von 31,36 m ²	89
Tab.29.:	Treibhauspotenzial, Versäuerungspotenzial und Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Energien der unterschiedlichen Deckenkonstruktionen pro m ²	90