



DIPLOMARBEIT

EINSATZMÖGLICHKEITEN VON HOLZLEICHTBETON-KONSTRUKTIONEN UND ZEMENTGEBUNDENEN HOLZWERKSTOFFEN IM BAUWESEN

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des
akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

o. Univ. Prof. DDI Wolfgang Winter

und

Dipl.-Ing. Dr. Alireza Fadai

E 259.2

Institut für Architekturwissenschaften
Abteilung für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Thomas Schmidt, BSc
0925206

Wien, am

KURZFASSUNG

Materialien im Bauwesen unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung und Neubewertung. Der Holzleichtbeton ist in diesem Zusammenhang eine leichtere und ökologischere Variation von Beton. Er zieht verschiedene Vorteile und Eigenschaften aus der Kombination der beiden Ausgangsmaterialien Holz und Beton. Unterschiedliche Anwendungsfelder, in denen er bereits langjährig eingesetzt wird, zeigen die gute Nutzbarkeit des Baustoffs. Darüber hinaus zielen verschiedene Forschungen darauf ab den Holzleichtbeton vermehrt und auch konstruktiv einzusetzen.

Mittels eines Vergleichs von Holzleichtbeton-Konstruktionen und konventionellen Bauweisen wird angestrebt, Rückschlüsse für weitere Einsatzmöglichkeiten des Materials aufzuzeigen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung von neuen Holzleichtbeton-Bauweisen ein. Es werden verschiedene Ansätze gezeigt, die darauf beruhen die positiven Eigenschaften des Materials optimal einzusetzen. Ausgenutzt werden dafür die Kombination von mehreren Vorteilen des Stoffes und dessen Verbindung mit Holz und Beton. Die Machbarkeit der vorgestellten Lösungen wird anhand eines Probekörpers demonstriert. Abschließend werden die Zukunftsaussichten des Holzleichtbetons skizziert.

ABSTRACT

Materials in the construction industry underlie a continuous development and revaluation. Lightweight-wood-concrete in this matter is a lighter and more ecological variation of concrete. It draws its benefits and characteristics out of the combination of the two source materials wood and concrete. Different fields of application, where he is already used for several years, show the good usability of the building material. Beyond that different researches aim at using lightweight-wood-concrete more and also in a constructional manner.

Through an analysis of the comparison of lightweight-wood-concrete-constructions and conventional ways of building it is intended to draw conclusions for further options of using the material. The gained insights are used to develop new forms of lightweight-wood-concrete-constructions. Different approaches are being shown, that base on using the positive features of the material in the best way possible. Therefore utilized is the mix of several advantages of the material and its ability to combine with wood and concrete. The practicality of the shown solutions is demonstrated with a test piece. At the end the future prospects of lightweight-wood-concrete are being outlined.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG	1
2 CHARAKTERISTIKA DES HOLZLEICHTBETONS	3
2.1 Geschichtlicher Hintergrund	3
2.2 Ausgangsstoffe	4
2.2.1 Holz	4
2.2.1.1 Zusammensetzung und Aufbau	4
2.2.1.2 Eigenschaften	5
2.2.1.3 Ökologische Aspekte	6
2.2.1.4 Wirtschaftliche Relevanz	8
2.2.2 Mineralische Bindemittel und Beton	9
2.2.2.1 Magnesiabinder	9
2.2.2.2 Zement	10
2.2.2.2.1 Eigenschaften	10
2.2.2.2.2 Ökologische Aspekte	12
2.2.2.2.3 Wirtschaftliche Relevanz	13
2.3 Holzleichtbeton	13
2.3.1 Zusammensetzung und Aufbau von Holzleichtbeton	14
2.3.2 Kompatibilität von Holz und Zement	15
2.3.3 Bautechnische Eigenschaften	15
2.3.3.1 Festigkeit und Belastbarkeit	15
2.3.3.2 Brandverhalten	18
2.3.3.3 Wärme- / Hitzeschutz	18
2.3.3.4 Schallschutz	19
2.3.3.5 Beständigkeit	19
2.3.4 Gestaltung	20
2.3.5 Ökologie	21

2.3.6 Wirtschaftlichkeit	23
2.3.7 Herstellungsverfahren	24
2.3.7.1 Historischer Hintergrund	24
2.3.7.2 Produktion	25
2.3.7.3 Ökologie	26
2.3.7.4 Verwertung von Reststoffen	27
3 VORHANDENE PRODUKTE UND LÖSUNGEN AUS HOLZLEICHTBETON	29
3.1 Produkte	29
3.1.1 Holzspanbeton	29
3.1.1.1 Schalungsplatten	29
3.1.1.2 Mantelbetonsteine	30
3.1.1.3 Mantelbetonbauteile	30
3.1.1.4 Zementgebundene Spanplatten	30
3.1.1.5 Estrich	31
3.1.1.6 Schüttung	31
3.1.2 Holzwollebeton	31
3.1.2.1 Platten	32
3.1.2.1.1 Dämmplatten	32
3.1.2.1.2 Tiefgaragenplatten	32
3.1.2.1.3 Akustikplatten im Innenraum	33
3.1.2.2 Wandelemente	33
3.1.2.2.1 Außenwandelement aus Holzwollebeton	33
3.1.2.2.2 Innenwandelement aus Holzwollebeton mit Holzstützen	33
3.1.2.2.3 Außenwand aus Leichtbeton und Holzwollebeton	33
3.1.2.3 Sekundärträger-Dachelemente	33
3.1.2.4 Lärmschutzwände	34
3.1.2.5 Schalungsplatten und Mantelbetonsteine	34

3.1.3 Steinholzbelag	34
3.2 Fallbeispiele	35
3.2.1 green:house	35
3.2.1.1 Konstruktion	35
3.2.1.2 Holzleichtbeton.....	36
3.2.1.3 Brandschutz.....	36
3.2.1.4 Bauphysik.....	36
3.2.2 Träullit Einfamilienhäuser	37
3.2.2.1 Konstruktion	38
3.2.2.2 Holzleichtbeton.....	39
3.2.2.3 Brandschutz.....	39
3.2.2.4 Bauphysik.....	40
3.3 Wissenschaftliche Ansätze	40
3.3.1 Gebäudefassade	40
3.3.2 Decken	42
3.3.2.1 Verbund mit Massivholzdecken	42
3.3.2.2 Verbund mit Holzträgern.....	44
3.3.3 Wände.....	45
3.3.3.1 Kombination und Verbund mit Massivholzplatten.....	45
3.3.3.2 Beplankung von Holzständerwerken.....	46
3.3.3.3 Holzverstärkte Holzleichtbetonwände	47
3.4 Beobachtungen aus der Recherche	48
4 EINORDNUNG DES MATERIALS	49
4.1 Gegenüberstellung von Bauweisen	49
4.1.1 Referenzgebäude	50
4.1.1.1 Einfamilien-Reihenhaus	51
4.1.1.2 Wohngebäude.....	51

4.1.1.3 Gewerbe-/Bürogebäude	52
4.1.2 Konstruktionen	52
4.1.3 Vergleichspunkte	53
4.1.4 Vergleichsergebnisse	54
4.1.4.1 Kosten	54
4.1.4.2 Bauteilstärke	58
4.1.4.3 OI3-Indikatoren	61
4.1.4.4 Gewicht	65
4.1.4.5 Zusammenfassung und Einordnung	66
4.2 SWOT-Analyse	67
5 VORSCHLÄGE ZUM EINSATZ VON HOLZLEICHTBETON	69
5.1 Erweiterung bestehender Aufbauten mit Holzleichtbeton	69
5.1.1 Holzrahmenbauweise	69
5.1.2 Beplankung von Massivholzwänden	73
5.1.3 Innenwände mit Holzleichtbeton	73
5.2 Ersatz von anderen Baumaterialien durch Holzleichtbeton	75
5.2.1 Holzleichtbeton-gefüllte Mantelbetonwände	75
5.2.2 Ersatz bei Nutzungen mit geringen Traganforderungen	77
5.3 Finden einer materialtypischen Holzleichtbetonbauweise	78
5.3.1 Holzleichtbeton-Decke mit Holz-Bewehrung	78
5.3.2 Holzleichtbeton Wandelemente	82
6 PROOF OF CONCEPT - MACHBARKEITSNACHWEIS	87
6.1 Herstellung des Versuchskörpers	87
6.2 Erkenntnisse	89
7 EINORDNUNG IN AKTUELLE TENDENZEN	91
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	93
9 ANHANG	97

9.1 Vorgehensweise zur Gegenüberstellung der Bauweisen	97
9.1.1 Aufbauten.....	97
9.1.1.1 Einfamilien-Reihenhaus	97
9.1.1.2 Wohngebäude.....	99
9.1.1.3 Gewerbe-/ Bürogebäude.....	101
9.1.2 Bezugsquellen für Materialkenndaten.....	102
9.1.3 Berechnungsmethodik	104
9.1.3.1 Tragwerke	104
9.1.3.2 OI3-Indikatoren.....	105
9.1.3.3 Bauphysikalische Kennwerte.....	105
9.1.3.4 Kombination	106
9.1.4 Übersichtstabellen für die errechneten Kennzahlen	107
9.1.5 Dokumentation Ergebnisgraphen	122
9.2 Berechnung Holzleichtbetondecke.....	130
9.3 Details für die vorgestellten Konstruktionen	131
9.3.1 HLB-Decke mit Holz-Zugbewehrung, Anschluss an Holzrahmenbau	131
9.3.2 HLB-Wandelement für Hallenbau - Sockel, Elementstoss und Dach.....	132
9.3.3 HLB-Wandelement für Bürobau - Deckenanschluss	134
9.4 Rezepturen Holzleichtbeton für Versuche.....	134
10. VERZEICHNISSE.....	137
10.1. Literaturverzeichnis	137
10.2. Abbildungsverzeichnis.....	142

1 EINLEITUNG

„Da also aus dem Zusammentreffen dieser [Grundstoffe] alle Dinge sich zusammenzufügen und zu entstehen scheinen und diese bei den unendlich vielen Arten von Dingen von Natur verschieden sind, so glaubte ich den mannigfaltigen und unterschiedlichen Gebrauch derselben und die Eigenschaften, welche sie bei der Verwendung für Gebäude haben sollten, auseinandersetzen zu müssen, damit, wenn diese bekannt sind, diejenigen, welche zu bauen gedenken, nicht Fehlgriffe machen, sondern das für den Gebrauch geeignete Material für ihre Bauten beschaffen.“ [1, S.79]

So schreibt Vitruv, im zweiten seiner Zehn Bücher über Architektur, in der Einleitung über die Beschreibung der Baumaterialien. Wenn sich auch die Materialien weiterentwickelt haben, so zählt weiterhin das Wissen um deren Eigenschaften zu einem der wesentlichen Werkzeuge des Architekten. Der gekonnte Einsatz des richtigen Materials ist die Grundlage für gelungene Bauwerke. Architekten, wie Le Corbusier, Shigeru Ban, Peter Zumthor und viele andere setzen sich entsprechend intensiv mit ihnen jeweils eigenen Materialien auseinander.

Zu den Grundstoffen der Architektur - Holz, Ziegel, Metall und Beton - kommen, entsprechend des technologischen Fortschritts, neu entwickelte Materialien und Fertigungstechniken. Diese gilt es zu erfassen und einzuordnen um stets aus einem vollständigen Repertoire die geeignete Ausdrucksform für die Gestaltung schöpfen zu können. Grundlage für die Verwendung eines Stoffes ist stets die vertiefte Kenntnis seiner Eigenschaften und seiner Entstehung. Dafür wesentlich ist auch das regelmäßige Hinterfragen der bekannten Parameter und die Erforschung neuer Verfahren, Techniken und Einsatzmöglichkeiten.

In dieser Tradition steht auch die Entwicklung des Holzleichtbetons, welcher als Abwandlung des Betons entstanden ist. Wesentlich ist ihm der Einsatz von Holz anstelle von Steinen als Zuschlag. Damit einhergehend ist ein relativ geringes Gewicht. Entsprechend dieser drei essenziellen Wesensarten entsteht der Begriff Holz-Leicht-Beton (HLB). Andere Begriffe, wie Holz-Beton, Sägemehl-Beton, Span-Beton, Holzwolle-Beton und Steinholz werden ebenfalls gebraucht. Daneben haben sich die zementgebundenen Holzwerkstoffe, meist Spanplatten, etabliert, die von der Bezeichnung her der Holzverarbeitung entstammen, aber einen ähnlichen Aufbau mit gleichen Ausgangsstoffen wie der HLB besitzen.

Die Erforschung des Holzleichtbetons wird über einen längeren Zeitraum betrieben und so sind die Parameter in ihren wesentlichen Zügen bereits dokumentiert. Auch gibt es Überlegungen und Versuche zum Einsatz in Bauteilen in der Kombination mit anderen Materialien. Die Frage mit der sich diese Arbeit daher beschäftigt ist, wie sich der Holzleichtbeton in die Riege der bestehende Baumaterialien einfügt und, daraus folgend, wie er eingesetzt werden kann um seine Stärken bestmöglich auszunutzen. Im Speziellen gründet diese Diplomarbeit auf der These, dass es neben den bekannten Anwendungen noch weitere Einsatzfelder gibt für die der HLB gut geeignet ist und wo seine Vorteile (besser) genutzt werden können.

Entsprechend dieses Ansatzes gilt es zunächst herauszuarbeiten über welche Eigenschaften das Material verfügt. Danach muss gezeigt werden welche Ansätze zur Nutzung des Holzleichtbetons bereits in der Baupraxis genutzt werden und welche Lösungen darüber hinaus schon theoretisch ausgearbeitet wurden. Ziel davon ist einen Überblick über den derzeitigen Entwicklungsstand zu liefern. In weiterer Folge müssen die einzelnen Forschungsergebnisse in Relation zueinander und zu anderen Baustoffen/ -weisen gesetzt werden. Dabei ist die Intention, dass, in der Ausarbeitung eines Vergleichs, Bereiche auffallen in denen am Markt Lücken gegeben sind, welche der Holzleichtbeton in Anspruch nehmen kann. Im Idealfall werden aus der Analyse direkt Erkenntnisse für mögliche weitere Einsatzfelder sichtbar. Daneben gilt es andere Herangehensweisen an bekannte Einsatzmöglichkeiten zu liefern.

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Einsatzmöglichkeiten müssen grundsätzlich ausgearbeitet und auf ihre praktische Anwendbarkeit hin diskutiert werden. Soweit neue Ansätze mit noch nicht vorhandenen Produkten oder Verfahrensweisen entstehen, ist es auch erforderlich deren prinzipielle Realisierbarkeit in Versuchen herauszustreichen. Letztlich stellt sich auch die Aufgabe den Holzleichtbeton, nicht nur unter den verfügbaren Materialien, sondern ebenfalls im Hinblick auf seine Zukunftstauglichkeit einzuschätzen. Der Aufbau der Arbeit erfolgt nach diesen gestellten Zielen.

2 CHARAKTERISTIKA DES HOLZLEICHTBETONS

Die Annäherung an das Material und die damit möglichen Konstruktionen erfolgt über dessen charakteristische Eigenschaften. Dabei folgt einem Abriss der Geschichte von Holz-Zement-Kompositen ein Einblick in die technischen und bauphysikalischen Kennwerte entsprechend dem aktuellen Stand der Forschung. Betrachtet wird in diesem Zusammenhang auch wie sich die Ausgangsstoffe Holz und Zement verhalten, da deren Aufbau und Eigenschaften wesentlich für den Holzleichtbeton sind.

2.1 GESCHICHTLICHER HINTERGRUND

Die Entdeckung der Einsatzmöglichkeit von organischen Zuschlägen begann in Europa, etwa in der Frühphase des Siegeszugs konventionellen Betons, um 1850. Stanislaus Sorel entwickelte den Magnesiazement, welchen er auch zur Bindung von organischen Füllstoffen einsetzte. Anwendung findet dieses Material als Steinholz ab 1895, für Bodenbeläge. Auch Versuche mit Gips und Sägespänen werden vorgenommen. Der Einsatz von Steinholz nimmt ab 1920 in Anbetracht von Ressourcenknappheit zu und findet ab dann auch als fugenloser Bodenbelag, in der Art eines Estrichs, statt. Obgleich die Anzahl der Produzenten von Steinholzbelägen seit den 1930er Jahren stetig abnimmt, gibt es auch heute noch, wenn auch in sehr geringem Ausmaß, Firmen, die diese, zum Beispiel für Industriehallen, verarbeiten. [2, S.29ff.]

Die Entwicklung zu einem konstruktiv einsetzbaren Material fand unter dem Begriff Holz- oder Sägemehlbeton ab den 1940er Jahren statt. Untersucht wurden Eignung und Vorbehandlungsmöglichkeiten von Holzpartikeln, das Verhältnis von Holz zu Zement und Wasser, sowie die Eigenschaften des daraus gemischten Materials. Nach dem Ende des zweiten Weltkriegs wurde dieses im Hinblick auf die Rohstoffknappheit für den Wiederaufbau eingesetzt. Die weitere Entwicklung und Erforschung findet in den 1960er und 70er Jahren in der DDR statt, mit dem Ziel regionale Rohstoffe verstärkt zu nutzen. [2, S.33ff.]

Produkte aus Verbindungen von Holz und Bindemittel, welche auch weiterhin Einsatz finden, sind die von Handl um 1930 entwickelt Mantelbetonsteine aus Holzspanbeton [2, S.34], sowie die 1908 von Scherer in Österreich patentierten Holzwolle-Leichtbauplatten [3, S.28]. Beide Anwendungen werden vorrangig als Schalungsmaterial in Kombination mit konventionellem Beton eingesetzt. Im Laufe der Produktionsgeschichte wurden, aus den ursprünglichen Produkten ableitend, weitere Einsatzfelder, wie im Innenaus-, (Wand-)Element- und Schallschutzbau erschlossen. Die hier dargestellte Entwicklung beschränkt sich auf den mitteleuropäischen Raum. Global war der Werdegang von Holzleichtbeton und ähnlichen Materialien sehr differenziert. Dies ist durch drei Faktoren bedingt:

- Die regionale Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Gestein und Sand hat die Suche nach Alternativen zum Einsatz bei Beton gefördert.
- Die Menge der Vorkommen oder die Eignung bestimmter Holzsorten bei der Verwendung für Holzleichtbeton ist vorteilhaft.

- Die jeweiligen Rohstoff- und Arbeitspreise lassen Holzleichtbeton wirtschaftlich günstiger darstellen.

Beispielhaft fanden Entwicklungen in Ländern wie Brasilien, Indien, Russland, Kanada und vielen weiteren statt. So wurden zum Beispiel in Brasilien Wohnhäuser mit Holzwolle-Beton hergestellt. [4, S. 213f.] In Kanada werden, nach einem massiven Befall von Schädlingen, als Bauholz unbrauchbar gewordene Kiefernwälder in Verbindung mit Zement einer alternativen Verwertung als Baumaterial zugeführt. [5] Der erzielte Fortschritt und die Entwicklung sind also global durchaus unterschiedlich stark ausgeprägt, können allerdings nicht einfach auf andere Regionen übertragen werden, da vor allem das eingesetzte Holz und dessen Eignung im Verbund mit Zement stark divergieren. Entsprechend ist es sinnvoll verstärkt die Entwicklungen, Forschungen und wirtschaftlichen Einflussfaktoren einer speziellen Region, im vorliegenden Fall von Österreich, beziehungsweise Mitteleuropa, für die Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton zu betrachten.

2.2 AUSGANGSSTOFFE

2.2.1 Holz

Holz ist ein natürlich vorkommender Rohstoff, der im Bauwesen in verschiedenen Formen zum Einsatz kommt. Konstruktiv kann Holz als Voll- oder Brettschichtholz-Träger und -Stützen oder plattenförmig eingesetzt werden. Zusätzlich werden diverse Holzwerkstoffplatten, die sich in ihrer Zusammensetzung, Spangröße und gepressten Dichte unterscheiden, als Schalungs-Beplankungs-, Fassaden-, Wandabschluss-, Möbelbau- und Bauhilfs-Materialien eingesetzt. Die Nutzung von Holz und Holzprodukten ist entsprechend sehr vielseitig. Sie liegt in den positiven Eigenschaften von Holz, wie Leichtigkeit, Stabilität und leichte Bearbeitbarkeit, begründet. Beim Einsatz des Baustoffs ist stets auf die Brandbeständigkeit und den Schutz vor Zersetzung des organischen Materials zu achten.

2.2.1.1 Zusammensetzung und Aufbau

Holz ist auf der chemischen Ebene großteils aus Cellulose und Lignin aufgebaut. Zusätzlich kommen auch Hemicellulose, Kohlehydrate, celluloseähnliche Polysaccharide, Harze und anorganische Bestandteile vor. Der Aufbau erfolgt aus fadenförmigen Molekülen, die in der sogenannten Fransenmizell-Struktur angeordnet sind. Der Zusammenhalt erfolgt dabei durch Nebenvalenzkräfte oder physische Verkettung. Die Cellulose bildet die Grundlage für die Festigkeit, wohingegen Lignin für den Zusammenhalt der Moleküle sorgt. Eine Holzzelle setzt sich in weiterer Folge aus mehreren Schichten, die in unterschiedlichen Neigungen zueinander liegen, zusammen. [6, S. 176ff.]

Diese Zellen bilden langgestreckte, röhrenartige Fasern. Die Röhren unterscheiden sich in Dicke, Wandstärke und Form und haben verschiedene Aufgaben, wie Wassertransport (Tracheen), Speicherung von Nährstoffen, wie Stärke Zucker und Öle (Parenchymzellen)

und Festigkeit (Tracheiden bei Nadelhölzern und Hart-, Sclerenchym- oder Librifasern bei Laubhölzern). Die Zellen sind etwa 3 bis 5 Millimeter lang und liegen nebeneinander in Bündeln. Das Wachstum der Zellen folgt den äußeren klimatischen Bedingungen. So bilden sich im Frühjahr und Sommer Zellen mit großem Durchmesser und geringer Wandstärke, die den Wassertransport ermöglichen und somit das Wachstum des Baums unterstützen. Im Spätsommer und Herbst dagegen entstehen dickwandigere Zellen, die die notwendige Stabilität für den Winter (Schneelasten, Wind) erzeugen. Durch dieses Wachstum entstehen die typischen Jahresringe, die auch Rückschlüsse auf das Wetter zur Entstehungszeit zulassen. Der Vorgang findet im sogenannten Kambium, einer Schicht der Rinde, statt, wobei die Zellen des Kambiums sich teilen. Innenliegend entstehen neue Holzzellen, dabei wandern Kambium, Bast und Borke, die Bestandteile der Rinde, weiter nach außen. [6, S. 174ff.]

2.2.1.2 Eigenschaften

Holz eignet sich aufgrund seiner Druck- und Zugfestigkeit sehr gut als Baustoff. Diese sind sogar vergleichbar mit Stahl, wenn man sie der geringen Rohdichte von Holz gegenüberstellt. Das bedeutet, dass ein Querschnitt aus Holz zwar größer ist, aber dennoch weniger wiegt als ein vergleichbarer Querschnitt aus Stahl, der der gleichen Belastung ausgesetzt ist. Dabei ist Stahl jedoch pro Quadratmillimeter mehr als zehn mal so belastbar wie Holz. (Siehe dazu Abb.1)

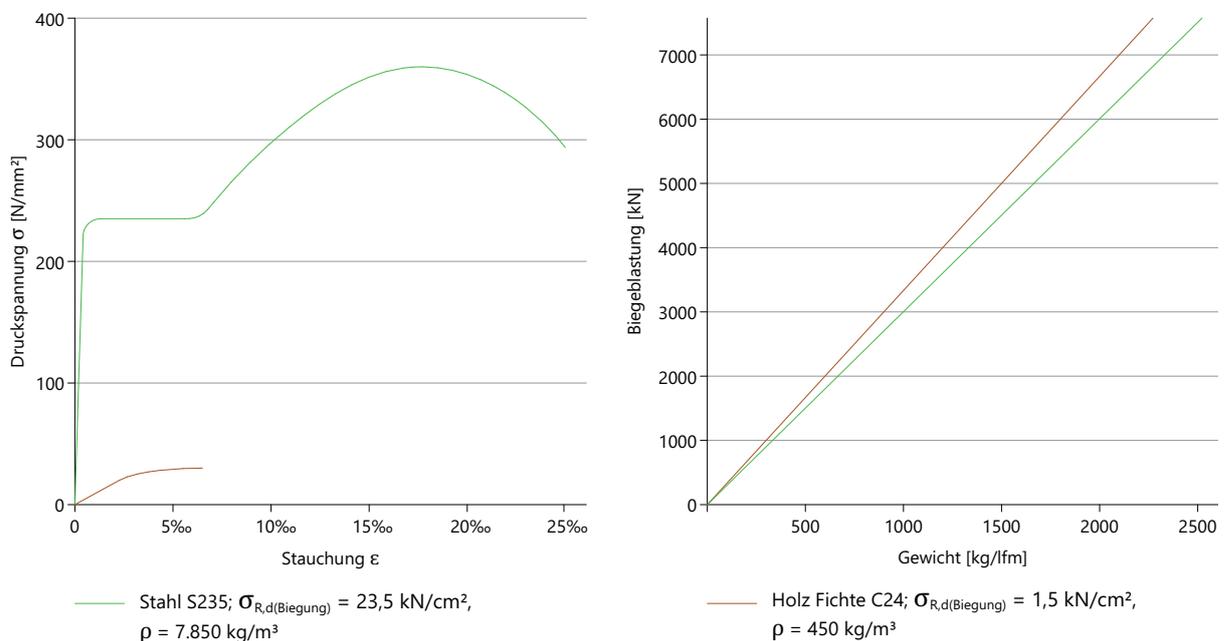


Abb. 1: Arbeitslinie und Vergleich Belastung zu Gewicht von Holz und Stahl

Wesentlich ist, dass die Festigkeiten von Holz nur in eine Richtung erreicht werden und quer dazu auf etwa ein Zehntel abfallen. Dies liegt im Aufbau des Holzes aus parallelen Fasern begründet. Die Fasern tragen Lasten längs ihrer Ausdehnung gut ab. Querbelastungen dagegen kann wenig Widerstand geleistet werden, da der Zusammenhalt zwischen den Fasern nicht sehr

groß ist. Wesentlich ist allerdings, dass sich die Festigkeiten je nach Holzsorte unterscheiden und sie vielen, nachteiligen Einflüssen unterliegen. Diese Einflüsse sind:

- Feuchtigkeit; Frisch geschlagenes Holz beinhaltet Wasser, welches in der Pflanze genutzt wurde. Bei einer Lagerung an Luft stellt sich durch Verdunstung ein Ausgleichsfeuchtegehalt von ca. 20% ein. Durch andere Arten der Lagerung oder in Trocknungskammern kann der Feuchtegehalt weiter reduziert werden. Bei einer anschließenden Lagerung an Luft stellt sich allerdings wieder die Ausgleichsfeuchte ein. Änderungen des Feuchtegehalts führen zu Volumsveränderungen, die je nach Holzart und Lage innerhalb des Stammquerschnitts unterschiedlich ausfallen. Außerdem kommt es zu einem Abfall der Druckfestigkeit bei feuchtem Holz.
- Temperatur: Die Tragfähigkeit von Holz nimmt bei steigender Temperatur ab. Das ist im normalen Einsatz wenig relevant, muss aber im Brandfall berücksichtigt werden. Gleichzeitig ist Holz als organisches Material brennbar. Dabei beginnt die thermische Zersetzung bei 105°C, der Flammpunkt liegt bei etwa 230°C und der Zündpunkt bei 300°C bis 470°C. Im Brandfall verbrennt allerdings nur die äußere Schicht des Bauteils und hinterlässt eine Kohleschicht, welche das Innere vor Feuer schützt und eine Dämmung gegen die Brandhitze bildet. Bei angepasster Dimensionierung wird die Tragfähigkeit über längere Zeit erhalten, da die Brandhitze nicht in den Kern vordringt. Außerdem erfolgt das Versagen von Holz nicht sprunghaft, wie zum Beispiel bei Stahl, sondern es gibt einen stetigen Versagensprozess, der wahrgenommen werden kann. All diese Faktoren zusammen kompensieren zum Teil die Brennbarkeit von Holz.
- Art der Belastung: Holz kann etwa 60% einer kurzzeitigen Belastung als Dauerbelastung aufnehmen. Bei wechselnden oder schwingenden Lastfällen sinkt diese Tragfähigkeit auf etwa 20% um keine Schäden zu verursachen.
- Wachstumsbedingte Verformungen: Als natürlicher Baustoff kann Holz primär nur so eingesetzt werden, wie man es vorfindet. Dabei zu beachten ist, dass während des Wachstums eines Baumes Fehlstellen entstehen können und naturgemäß Äste vom Stamm abzweigen. An diesen Stellen hat der Baustoff andere Festigkeiten als an einwandfreien Stellen. Diese nachteiligen Bereiche können bei der Herstellung von Holzwerkstoffen, wie zum Beispiel Brettschichtholz, Sperr-, OSB- oder anderen Holzplatten, aussortiert werden.

[6, S. 184-193]

2.2.1.3 Ökologische Aspekte

Die Bedeutung des Rohstoffes Holz für die Umwelt und deren Schutz sind vielschichtig. Zum Ersten bildet das Ökosystem Wald einen Lebensraum für Tiere, Pflanzen und Menschen. Weiters bindet die Produktion von Holz CO₂, wodurch dieses sich nicht in der Atmosphäre ablagert und die Erderwärmung vorantreibt. Auch erzeugen Bäume Sauerstoff, helfen das Klima zu regulieren und beugen Naturkatastrophen, wie Muren und dergleichen vor. Bei der Ernte

von Bäumen für die verschiedensten Holzverarbeitenden Industrien ist daher ein schonender und maßvoller Umgang mit der Ressource Wald wesentlich. Dies erfolgt durch gezielte und rücksichtsvolle Erntemethoden, die Ausrichtung des Bedarfs an vorhandenen Ressourcen und durch die Wiederaufforstung gefälltter Bestände.

Um die Bedeutung und Chancen von Holz als Baustoff und als Rohstoff für Holzleichtbeton einzuschätzen ist es relevant das Ertragspotenzial des Rohstoffes Holz darzulegen. Etwa 47% des österreichischen Bodens sind mit Wäldern bedeckt, worin sich eine Masse von ca. 1,1 Milliarden Vorratsfestmetern Holz befindet. [7, S.12f.] Jährlich werden davon etwa 17 bis 18 Millionen Erntefestmeter entnommen und wachsen ca. 30 Millionen Vorratsfestmeter zusätzlich heran. Der Großteil des Waldes besteht dabei zu näherungsweise 60% aus Fichtenbäumen, welche nach 80 bis 120 Jahren erntereif sind. [8, S.18f.] Zusätzlich zu diesen Mengen werden nach Österreich rund 8,5 Millionen Festmeter Holz importiert. Zu hinterfragen ist allerdings die Nutzung der in Österreich verwerteten Holzmengen, da etwa 30% des geernteten Holzes der energetischen Nutzung zugeführt werden. [9, S.4] Darüber hinaus werden auch Rinden und Verarbeitungsreststoffe direkt der thermischen Verwertung zugeführt. Diese Vorgehensweise ist prinzipiell umweltschonend, da dadurch der Einsatz von anderen, nicht erneuerbaren Energieträgern vermieden und der CO₂-Ausstoß reduziert wird. Dennoch wäre eine vorangehende Nutzungsphase vorteilhaft und würde das Potenzial des Rohstoffs Holz besser ausnutzen.

Entsprechend der Entwicklung der Holzmengen in Österreich lässt sich ableiten, dass die Grundbesitzer zukunftsorientiert und verantwortungsvoll mit dem Wald umgehen, da die Holzmengen und Waldflächen kontinuierlich steigen. [7, 8] Gleichzeitig stehen ausreichend Reserven zu Verfügung um den Ausbau des Holzbaus und gegebenenfalls auch des Holzleichtbetons zu forcieren. Zu bedenken ist dabei, dass Holz aus regional verfügbaren Quellen stammen sollte um die Transportwege kurz zu halten. Bei Holzimporten ist auch darauf zu achten aus welchen Quellen diese stammen und ob dabei eine nachhaltige Forstwirtschaft betrieben wird.

Neben diesen generellen Überlegungen gibt es zwei Kennwerte, die den Baustoff Holz gegenüber anderen Baustoffen vergleichbar und im Rahmen diverser Klassifizierungssysteme bewertbar machen. Diese sind:

- **Primärenergie:** Dieser Wert gibt an welche Mengen an Energie notwendig sind um ein Produkt herzustellen. Insgesamt hat Holz einen hohen Wert der Primärenergie, da auch erneuerbare Energien, wie in diesem Fall die Sonneneinstrahlung für das Pflanzenwachstum, herangezogen werden. Betrachtet man nur nicht erneuerbare Energien, welche für Ernte, Verarbeitung und Transport aufgewendet werden, so ist der Energieinhalt vergleichbar mit jenem von Stahlbeton und deutlich geringer als bei Stahl. Zusätzlich wird bei der (thermischen) Verwertung nach der Nutzungsphase, im Gegensatz zu Stahl und Stahlbeton, wieder Energie erzeugt. Dies stellt nur eine generelle Abschätzung dar, da der Energiebedarf

von Verarbeitungsprozessen, zum Beispiel für Platten, und auch Transportwegen abhängig ist.

- Treibhauspotenzial / CO₂ Emissionen: Generell bindet Holz während des Wachstums CO₂, welches es bei der Verwertung wieder abgibt. Je länger dabei die Nutzungsphase des Holzes ist, desto mehr Holz kann parallel dazu im Wald heranwachsen und desto mehr CO₂ wird insgesamt gebunden. Eingedämmt wird dieser Effekt wiederum durch Ernte, Verarbeitung und Transport.

Das nachfolgende Diagramm stellt diese zwei Kennwerte für die gebräuchlichsten Baustoffe dar. Nicht berücksichtigt wird dabei, welche Mengen des Baustoffs für Konstruktionen aus verschiedenen Materialien bei gleichen Anforderungen und Belastungen notwendig sind. Letztlich sind diese Werte im Hinblick auf die gestellte Bauaufgabe zu betrachten.

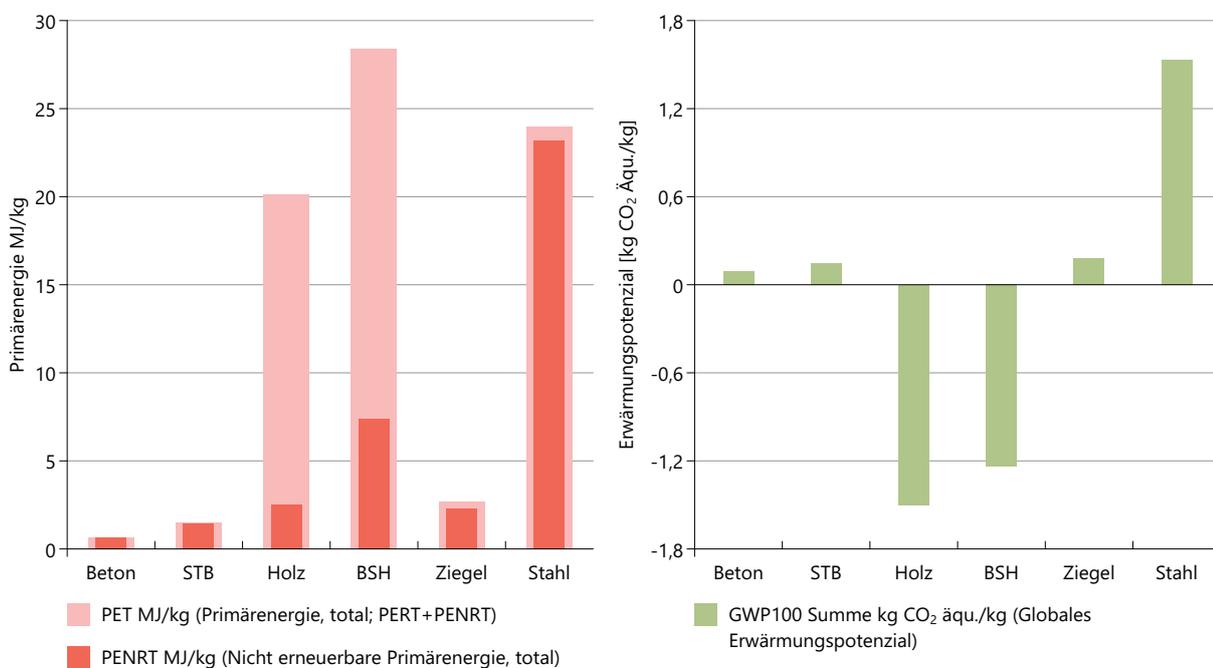


Abb. 2: Benötigte Primärenergie und Treibhauspotenzial gebräuchlicher Baustoffe

2.2.1.4 Wirtschaftliche Relevanz

Mit rund 7,5 Milliarden Euro Produktionsvolumen erwirtschaftet die österreichische Holzindustrie 2,2% des jährlichen BIP. [10] Deutlich mehr als die Hälfte davon entfallen auf die Bauwirtschaft. Bei der letzten, fünfjährig durchgeführten Erhebung des Holzbauanteils im Jahr 2013 für pro:Holz Austria waren 43% der Bauvorhaben, beziehungsweise 23% des umbauten Volumens in Österreich in Holzbauweise, das heißt mit einem Holzanteil an der Konstruktion von über 50%, errichtet worden. Entsprechend dieser und tiefergehender Daten zeigt sich, dass vorwiegend kleinvolumige, allerdings im steigenden Maß auch mittelgroße Bauvorhaben mit Holz realisiert werden. Dabei entfällt mehr als die Hälfte auf den Wohnbau und der Rest in absteigender Reihenfolge an landwirtschaftliche Zweckbauten, auf den Gewerbe- und

Industriebau und öffentliche Bauvorhaben. Schlussendlich ist es im Wohnbau so, dass neben Einfamilienhäusern vor allem Zu- und Umbauten, wie zum Beispiel Dachgeschossausbauten und Revitalisierungen in Holzbauweise durchgeführt werden. [11] Die Kosten für Neubauten liegen im Einfamilienhausbereich aufgrund diverser Fertighausanbieter unter jenen anderer Bauweisen. Zunehmend trifft dies auch für größere Bauvorhaben zu, da der Grad der Maschinalisierung und die Anzahl an Firmen mit ausreichender Expertise zunehmend steigen. Dabei bilden die Vorfertigung im Werk und die daraus realisierbaren kurzen Bauzeiten einen großen Vorteil gegenüber Beton- oder Mauerwerksbauten.

2.2.2 Mineralische Bindemittel und Beton

Das gebräuchlichste Bindemittel ist Zement, welcher breite Anwendung in verschiedenen Betonen findet. Daneben ist allerdings für mineralisch gebundene Holzwerkstoffe auch Magnesit relevant. Dies hängt mit der guten Verträglichkeit von Holz und Magnesit zusammen. Daher wurde auch früh Steinholz daraus hergestellt. Gleichzeitig weisen Magnesia-Betone ein negatives Verhalten bei Kontakt mit Wasser auf, was zur Korrosion von Stahlbewehrungen und Durchfeuchtung anderer Bauteile führen kann. Daher wird meistens, auch in gängigen Holzleichtbetonprodukten, Zement als Bindemittel eingesetzt. Trotzdem wird Magnesit auch weiterhin als Estrich oder bei manchen Holzwolfeplatten verwendet, weshalb er im folgenden kurz behandelt wird. Daneben kann auch Gips zur Bindung von Holzpartikeln genutzt werden. Dabei wird oftmals zusätzlich Zement beigegeben. Auch hier führt das negative Feuchteverhalten zu einer sehr begrenzten Anwendung.

Beton ist ein Baustoff, der aus einem Bindemittel (Zement), Wasser, Zuschlag- (meist Sand und Gestein) und Zusatzstoffen (zur Regelung bestimmter Eigenschaften des Produkts) hergestellt wird. Die Formbarkeit des flüssigen, sowie die Dauerhaftigkeit und Beständigkeit des erstarrten Betons machen ihn zu einem oft gewählten Baumaterial. Die Problematik im Einsatz von Beton liegt im hohen Gewicht und der geringen nachträglichen Veränderbarkeit. So müssen Bauteile oder Bauwerke aus Beton, die geänderten Anforderungen nicht mehr entsprechen können, meist entsorgt und neu errichtet werden. Demgegenüber kann Beton gezielt auf gewünschte Eigenschaften hin optimiert werden.

2.2.2.1 Magnesiabinder

Natürlich vorkommendes Magnesit wird bei etwa 800°C gebrannt, wobei CO₂ entweicht und kaustisch gebrannte Magnesia zurückbleiben. Damit diese als Bindemittel genutzt werden können, wird in Wasser gelöstes Magnesiumchlorid zugegeben. Dadurch kommt es zu einer chemischen Reaktion, die eine nadelförmige Kristallisation als erhärtete Struktur liefert. Dabei bleibt teilweise noch freies Magnesiumchlorid über, welches stark korrosionsfördernd wirkt, weshalb angrenzende Metallteile geschützt werden müssen. [76, S. 163f.]

2.2.2.2 Zement

Zement besteht aus einem Gemisch verschiedener Rohstoffe, die gemahlen, gemischt und bei etwa 1.450°C gebrannt werden. Der entstandene Zementklinker wird abschließend gekühlt und zermahlen um pulverförmigen Zement zu erhalten. Die Ausgangsstoffe für die Zementherstellung sind im wesentlichen Calciumcarbonat (in Kalksteinen oder Kalkmergel enthalten), Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxid in absteigendem Mengenverhältnis. Beim Brennvorgang findet die chemische Umwandlung der Grundstoffe in Klinkerphasen statt. Das sind chemische Verbindungen, die für die Aushärtung des Zements verantwortlich sind. Dieser Vorgang läuft in der industriellen Produktion nicht in jedem Teil des Stoffes vollständig ab, wodurch nicht durchgängig ein stabiler Zustand erreicht wird und weshalb Zement eine hohe Reaktionsfreudigkeit mit Wasser aufweist. [6]

Bei Kontakt mit Wasser beginnt die Hydratation der Klinkerphasen. Dabei laufen je nach Klinkerphase unterschiedlich schnell chemische Reaktionen ab, die zur Erhärtung und zur Erstarrung des Zementsteins führen. Wesentliches Endprodukt für die Festigkeit ist dabei Calciumsilicat, welches eine kristalline Struktur bildet. Die Reaktionen sind exotherm, wobei der Grad der Wärmeabgabe von der Reaktionsgeschwindigkeit abhängt. Damit dieser Vorgang vollständig abläuft, muss das Verhältnis von Wasser zu Zement etwa 1:2,4 ($W/Z=0,42$) betragen. Unter diesem Wert verbleiben unhydratisierte Zementteile, darüber werden Teile des Anmachwassers in den sonst luftgefüllten Poren des Zementsteins eingeschlossen. Bei der Erhärtung des Zements ist es daher wichtig die Austrocknung zu regulieren. [6, S.224-230, S.275f.]

Bei Beton dient der Zement dazu, den Zuschlag, im Wesentlichen werden hier verschiedene Gesteinsorten unterschiedlicher Korngröße verwendet, untereinander zu verkitten. Da üblicherweise die eingesetzten Gesteine hohe Festigkeiten haben, ist die Qualität des Zements ausschlaggebend für die Festigkeit des Betons. Die Schwachstelle im Betongefüge ist die Kontaktzone zwischen Zementgestein und Zuschlag. Bei zu hoher Belastung kommt es hier zu Rissen, die den Baustoff versagen lassen. [6, S.273f.]

2.2.2.2.1 Eigenschaften

Zement und in weiterer Folge daraus hergestellte Normalbetone sind stark belastbar gegenüber Druckbeanspruchungen. Dahingegen können sie Zugbelastungen nur sehr beschränkt aufnehmen. Dafür können in den Beton zusätzlich Fasern (Stahl, Karbon, Kunststoff, Glas oder Aramid) integriert oder Bewehrungen im Bauteil eingesetzt werden. Außerdem besteht eine gute Beständigkeit gegen Feuer und gegen diverse chemische Einwirkungen. Daneben weist Beton eine gute Eignung als Wärmespeicher, allerdings eine mittlere Wärmeleitfähigkeit, also eine schlechte Dämmwirkung, auf.

Die wesentlichen Herausforderungen beim Einsatz des Baustoffs liegen in der Wahl der Ausgangsstoffe und der Verarbeitung. Dabei kann es zu folgenden Problemstellungen kommen:

- Kalktreiben: Bei falscher Rohstoffmischung kann im Zementstein Freikalk enthalten sein, der erst nach der teilweisen Erhärtung mit Wasser reagiert. Dabei kommt es zu einer Ausdehnung des Kalks um den Faktor 1,7, wobei der umgebende, erhärtete Zementstein einer Spannung ausgesetzt wird, die zur Zerstörung des Gesteins führen kann. Durch Überwachung bei der Zementherstellung kann dieser Vorgang praktisch ausgeschlossen werden.
- Magnesiatreiben: Ähnlich dem Kalktreiben kann freies Magnesiumoxid im Zementstein enthalten sein. Die Reaktion findet allerdings erst nach etwa zwei Jahren statt und hat eine noch größere Ausdehnung zur Folge. Um diesen Effekt zu unterbinden wird der Anteil von Magnesium auf 5 Massenprozent begrenzt.
- Gipstreiben: Gips wird bei der Betonherstellung zur Regelung des Abbindezeitpunkts des Zements herangezogen. Wird dabei nicht der gesamte, zugegebene Gips verbraucht, bildet sich weiterhin Calciumaluminatsulfathydrat, welches mit seinem 8-fach größeren Volumen als vor der Reaktion zu Spannungen im erhärteten Betonstein führt. Dieser Vorgang kann auch durch äußere Einwirkung von sulfathaltigen Wässern ausgelöst werden.
- Bluten: Bei der Aushärtung des Zementsteins kommt es vor, dass Wasser abgesondert wird und an die Oberfläche des Bauteils steigt. Dort bildet sich eine Schlämme mit geringer Festigkeit.
- Volumsveränderungen: Während der Erstarrung und im nutzbaren Zustand kommt es zu geringfügigen Volumsveränderungen aufgrund von üblichen Vorgängen wie Schrumpfen, Quellen, Schwinden, Wärmedehnung, Kriechen und Relaxation. Die Einflüsse und Faktoren sind bekannt und müssen bei der Planung des Bauelements berücksichtigt werden.

[12, S.62-65]

Generell ist die Variabilität der Anwendung von Zement und Beton sehr hoch, da verschiedene Stoffe für die Herstellung von Zement herangezogen und unterschiedliche Zusätze dem Beton beigemischt werden können um die spezifischen Eigenschaften des frischen, sowie des erstarrten Betons zu beeinflussen. Je nach Mengenanteil der Ausgangsstoffe, beziehungsweise der Zugaben, wie Hüttensand, Puzzolanen, Flugasche, Kalkstein oder Schiefer, wird der Zement in fünf Hauptarten unterteilt. [13] Relevant für den Großteil des Baugeschehens sind dabei die Arten CEM I – Portlandzement und CEM II- Portlandkompositzement. Darüber hinaus erfolgt die Einteilung nach zu erreichender Druckfestigkeit des Zementsteins und nach dem Zeitpunkt des Erreichens einer bestimmten Anfangsfestigkeit. Die Unterteilung von Betonen erfolgt nach Dichte in Leicht- ($800-2000\text{kg/m}^3$), Normal- ($2000-2600\text{kg/m}^3$) und Schwerbeton ($>2600\text{kg/m}^3$), sowie nach Druckfestigkeit (Angaben laut Druckproben, je nach Probekörper Würfel-/ Zylinderdruckfestigkeit) und Art der Umweltbelastung (Expositionsklassen).

2.2.2.2.2 Ökologische Aspekte

In erster Linie besteht der gravierendste Eingriff in die Umwelt bei der Herstellung von Zement und Beton in der Entnahme der Rohstoffe aus dem Erdreich. Dabei werden in Steinbrüchen Kalkstein und Ton, bzw. Mergel für Zement, sowie Kies und Sand für Beton gewonnen. Generell stellt dies einen Abbau von begrenzten, nicht nachwachsenden Ressourcen dar. Weltweit sind vor allem die Sandreserven überbeansprucht, weshalb alternative Quellen und Abbaumethoden gesucht werden. In Österreich ist der Vorrat an diesen Materialien noch auf lange Sicht gedeckt. Dennoch ist deren Erschöpfung weder zukunftsorientiert, noch erstrebenswert. Gleichzeitig kommt es zunehmend zu Überschneidungen mit anderen Interessen, da der Abbau große Flächen in Anspruch nimmt und dabei das Landschaftsbild beeinträchtigt. Auch unter diesem Gesichtspunkt wird in der Forschung nach Alternativen für die Rohstoffe gesucht. Schon jetzt kommen dabei Industrieabfälle, wie Flugasche oder Hüttensand zur Reduktion des Klinkeranteils in rund 1/5 der erzeugten Zementmenge in Österreich zum Einsatz. [15] Bei der Betonherstellung werden darüber hinaus Reststoffe aus abgebrochenen Betonbauteilen als Zuschlag herangezogen.

Im Hinblick auf Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial ist vor allem der im Beton enthaltene Zement relevant, da die chemischen Reaktionen bei seiner Herstellung CO₂ freisetzen und zusätzlich ein Drehrohrofen mit 1.450°C betrieben werden muss, wofür entsprechend hohe Mengen an Energie aufgewendet werden. Die Beiträge durch Abbau und Transport der Rohstoffe und des fertigen Materials werden durch kurze Wege, welche vor allem im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit angestrebt werden, reduziert. Beim Einsatz vom Stahl als Bewehrung steigen die Kennwerte für Primärenergieinhalt und Treibhauspotenzial schon bei geringen Mengen sehr stark an, da dieser für die Erzeugung sehr viel Energie benötigt und CO₂ ausstößt.

Ein Ansatzpunkt zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes bilden die Ökobetone. Dabei wird versucht durch Änderung der Mischungszusammensetzung umweltfreundlichere Betone herzustellen. Besonders hervorzuheben ist dabei das Produkt Slagstar vom österreichischen Hersteller Wopfinger Baustoffindustrie GmbH. Dieser Sulfathüttenzement wird nur mithilfe von Vermischung der einzelnen Bestandteile hergestellt. Dadurch entfällt der Brennprozess, was eine CO₂ Reduktion von bis zu 90% gegenüber herkömmlichen Zementen bewirkt. Wichtig ist dabei, dass das Produkt den gängigen Normen entspricht, übliche Druckfestigkeiten erreicht und bereits über 200 Bauvorhaben damit realisiert wurden. [14]

Wesentlich ist darüber hinaus die Frage, was mit den Reststoffen des Betonbaus nach der Nutzungsphase passiert. Wie schon angesprochen können Abfälle wieder dem Beton zugeführt werden. Ab 25 bis derzeit 45 Massenprozent Beton- oder Betonmischgranulat im Zuschlag spricht man hier von Recyclingbeton. Alternativ kann der Betonbruch als Schüttung oder Füllmaterial genutzt werden. Betonreststoffe, welche nicht weiter verwertet werden, da zum Beispiel zu wenig Nachfrage vorhanden ist oder sie zu geringe Festigkeiten aufweisen, werden deponiert. Das ist aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll aber aus ökonomischer Sicht sehr wohl.

Eine Änderung dieser Vorgehensweise wäre durch die Reduktion der Abbruchmengen, eine bessere Verwertung der Reststoffe und höhere Kosten für die Deponierung zu erzielen.

2.2.2.2.3 Wirtschaftliche Relevanz

Im langjährigen Mittel werden in Österreich etwa 4 bis 5 Millionen Tonnen Zement hergestellt. Mehr als die Hälfte dieser Produktion wird in Transportbetonwerke geliefert. Der Rest in absteigender Reihenfolge als Siloware (18%), in Fertigteilwerke (18%) und in Säcken (9%). [15] Welcher Anteil des österreichischen Bauaufkommens in Betonbauweise errichtet wird ist nicht statistisch erfasst. Um trotzdem eine grobe Einordnung vornehmen zu können, kann man die Produktionsmengen und die durchschnittlich benötigte Menge an Beton für ein mehrgeschossiges Gebäude heranziehen und vergleichen. Die angenommenen Rahmenkennwerte dafür sind: Beton enthält durchschnittlich etwa 20% Zement, ein viergeschossiges Gebäude benötigt circa 510 m³ Beton und zum Abzug von Zement, welcher in Estrichen, sonstigen Bauteilen oder im Straßenbau Verwendung findet werden nur 60% der Zementproduktion herangezogen. Unter Berücksichtigung dieser Angaben und dem Erfahrungswert, dass Einfamilienhäuser mehrheitlich nicht in Betonbauweise errichtet werden, ergibt sich ein Wert von 6000 - 9000 Gebäuden jährlich. Dies entspricht bis zu 55 Prozent der österreichischen Gebäudeproduktion. Im Vergleich zu den vorher angegebenen Werten für Holzbauten (vgl. 2.2.1.4) scheint diese Schätzung standzuhalten. Dennoch ist die Berechnung kritisch zu sehen und sollte durch eine Erweiterung der Datenlage in diesem Bereich überprüft werden.

Über die reinen Gebäude in Betonbauweise hinaus kommen Zement und Beton bei nahezu jedem Bauwerk zum Einsatz. Dies ist daraus bedingt, dass durch die positiven Eigenschaften, die gute Verfügbarkeit und die niedrigen Kosten viele Bauteile, wie Fundamente, Kellerbauten, Estriche, Überlager, und Fertigteile für Außengestaltung mit Zement, beziehungsweise in Beton realisiert werden. Ein Verschwinden des Betons im Bauwesen ist daher längerfristig nicht absehbar. Wohl aber kommt es durch moderne Verfahren und Werkstoffe zur Verdrängung des konventionellen Betons in einzelnen (Teil-)Bereichen.

2.3 HOLZLEICHTBETON

Die Materialien Beton und Holz scheinen in der allgemeinen Wahrnehmung gegensätzlicher kaum sein zu können. Sie verkörpern dabei diametral die Extreme ihrer jeweiligen Eigenschaften, wie schwer - leicht, brandbeständig - brennbar, dauerhaft - wandelbar und viele weitere. Dennoch oder auch gerade deswegen erscheint ihr kombinierter Einsatz immer interessanter. Das gilt sowohl für die technische, als auch für die gestalterische Seite der Materialien. Dabei werden Gegensätze inszeniert und die Eigenschaften der Stoffe kombiniert, um sie entsprechend ihrer Stärken ideal einzusetzen. Vorrangig passiert dies heute durch den Einsatz von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen oder die Kombination der beiden Baustoffe in unterschiedlichen Bauteilen. Das Vereinen der beiden Stoffe in einem Material ist die dritte Variante, die noch

nicht in die breite baukonstruktive Praxis vorgedrungen ist. Dabei entsteht das Material Holzleichtbeton, das wiederum je nach bestimmten Faktoren eigene Eigenschaften mit sich bringt. Um im Weiteren den möglichen Einsatz des Holzleichtbetons zu skizzieren, müssen vorerst die Faktoren und Eigenschaften, wie sie der Stand der Forschung beschreibt, abgebildet werden.

2.3.1 Zusammensetzung und Aufbau von Holzleichtbeton

Zur Erzeugung von Holzleichtbeton werden Holzpartikel in einer Zementstruktur eingeschlossen. Dabei übernimmt der erhärtete Zementstein die Aufgabe der Lastabtragung. Gleichzeitig bilden sich je nach Mischungsverhältnis Poren. Zusätzlich sind bereits in der Struktur des Holzes Poren vorhanden, wodurch insgesamt ein sehr leichter Baustoff vorliegt. Um die Eigenschaften von HLB darzustellen wird oft der Holzanteil einer Ausgangsmischung als Vergleichsbasis herangezogen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Dichte von Holz im Vergleich zu Zement relativ gering ist. Das bedeutet eine Angabe des Holzanteils am Gesamtgewicht einer Mischung entspricht einem höheren Holzanteil am Gesamtvolumen einer Mischung. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs sind in Abbildung 3 die Anteile der verschiedenen Stoffe am Gesamtgewicht beziehungsweise am Gesamtvolumen von einer Holzleichtbetonmischung mit mittlerer Dichte, sowie von Normalbeton dargestellt. Im Weiteren wird bei den folgenden Diagrammen auf den Holzanteil am Gesamtgewicht bezogen, da bei der Konzipierung von Mischungen typischerweise das Gewicht der Ausgangsstoffe herangezogen wird.

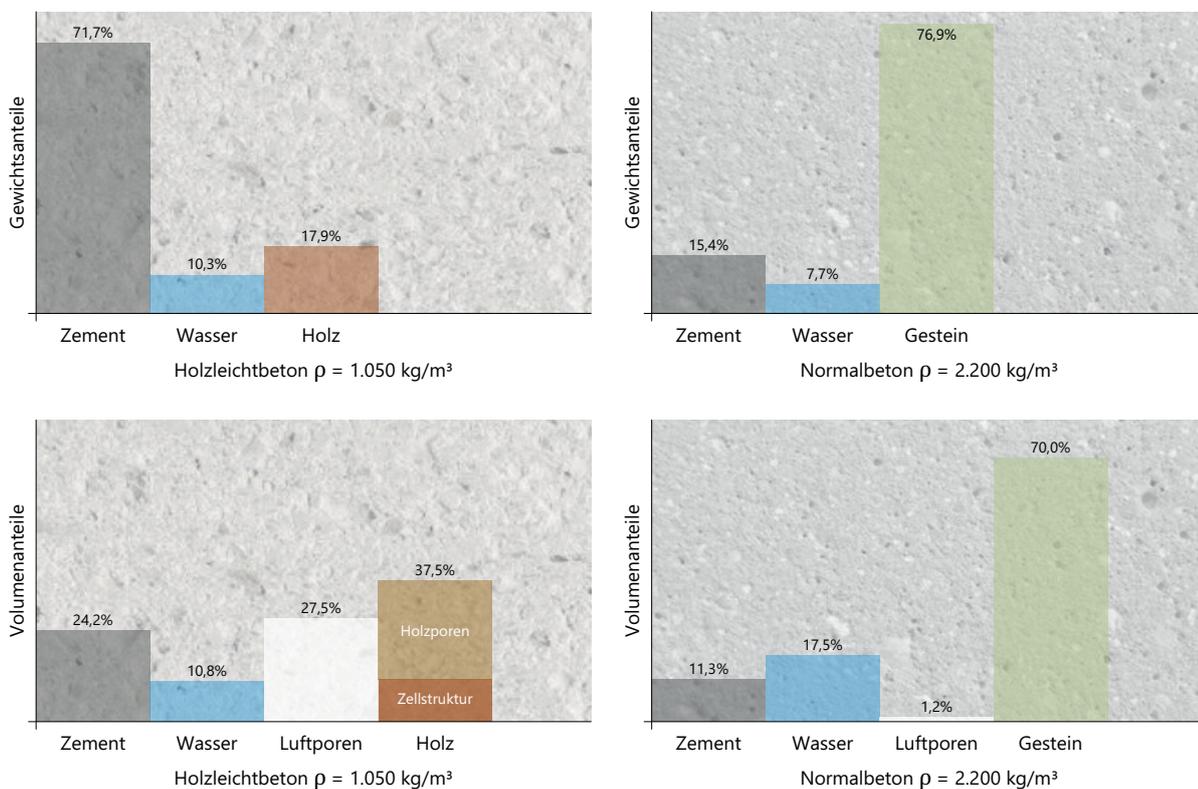


Abb. 3: Gewichts- und Volumenanteile der Ausgangsstoffe an Holzleicht- und Normalbeton

2.3.2 Kompatibilität von Holz und Zement

Die bei der Erhärtung des Zements ablaufende chemische Reaktion mit Wasser und der Umgebungsluft wird von bestimmten Holzinhaltstoffen beeinträchtigt. Dies führt dazu, dass der daraus entstehende Holzleichtbeton geringere bis gar keine Druckbelastungen aufnehmen kann. Die Problematik bei diesen schädlichen Stoffen ist ihre Identifizierung und Entfernung. Jede Holzart, das heißt auch jede Sorte innerhalb einer Baumgattung, verfügt über andere Bestandteile, welche je nach ihrem Vorkommen nachteilig sein können. Allgemein ist bekannt, dass Harthölzer einen negativeren Einfluss haben als Weichhölzer. Die größte Beeinträchtigung findet durch Glucose statt. Andere bekannte Stoffe, die nachteilig wirken, sind: Hemicellulose, Tannine, Essigsäure, Teracacidin, Pinitol, Sequirin-C, Saccharose und viele weitere. Wie sehr eine Holzsorte mit einem Zement kompatibel ist, kann mit dem C_A -Faktor ausgedrückt werden. Dieser gibt an in welcher Zeitspanne eine maximale Temperatur bei der Erhärtung des Zements erreicht wird. Versuche haben gezeigt, dass dieser Wert auch mit Druckfestigkeitswerten der erhärteten Proben in Verbindung gebracht werden kann. Jedoch gibt es hier bei einigen Holzsorten Abweichungen, weshalb eine tiefergehende Prüfung der Eignung einer Holzsorte sinnvoll ist. [16] Die Kompatibilität zwischen Zement und Holz kann, sofern dies erforderlich ist, mit folgenden Methoden verbessert werden:

- Extraktion im Wasserbad mit kaltem oder warmem Wasser.
- Behandlung des Holzes mit chemischen Substanzen oder Prozessen wie zum Beispiel NaOH, Fermentation, Kupfer-Chrom-Arsen (CCA) und Chromsäure
- Abbindebeschleuniger für die verbesserte Erhärtung des Zements (z.B. SnCl_2 , FeCl_3 , AlCl_3 , CaCl_2)
- Injektion von CO_2
- Mineralisierung des Holzes, z.B. durch Versetzen der Holzpartikel mit Zementmilch

Wiederum sind einige der Methoden bei bestimmten Holzsorten mit bestimmten Zementen effektiver als andere. So muss bei der Westamerikanischen Lärche warmes Wasser benutzt werden, während teilweise bei tropischen Harthölzern kaltes Wasser ausreicht um eine vergleichbare Verbesserung zu erzielen. [16]

2.3.3 Bautechnische Eigenschaften

2.3.3.1 Festigkeit und Belastbarkeit

Die wesentlichen Einflussfaktoren für die Festigkeit des Holzleichtbetons sind:

- Zementklasse und Art
- Holzaufbau (Weich- oder Hartholz)
- Holzart und deren Kompatibilität
- Art der Holz-Vorbehandlung
- Holzanteil, bzw. Mengenverhältnis Holz / Zement
- Form, Größe und Oberflächenrauigkeit des Holzes / der Holzpartikel

- W/Z-Wert unter der Berücksichtigung der Wasseraufnahmefähigkeit des Holzes
- Äußere Einflussfaktoren bei der Erstarrung, wie Druck, Feuchtigkeit oder Temperatur
- Zugabe weiterer Zuschläge und Zusatzstoffe (Sand, Abbinderegler, ...)

In diversen Versuchsreihen wurden diese verschiedenen Parameter und ihr Einfluss ermittelt. Die nachfolgenden Graphen geben daraus die erfolgversprechendsten Resultate mit ausgewählten, optimalen Zusammensetzungen wieder. Dies einerseits nur unter der Verwendung von Holz, Zement und Wasser, sowie unter Einbezug diverser Zusätze.

In Abbildung 3 sieht man, dass bei zunehmendem Holzanteil die erreichten Druck- und Zugfestigkeiten deutlich abnehmen. Da es sich hier um Versuche mit reinem Holzleichtbeton, ohne Zugabe von Sand oder Zusätzen handelt, und auch ohne Variation im verwendeten Holz oder Beton korreliert der Holzanteil direkt mit der Rohdichte. Dieser Zusammenhang ist bei den weiters betrachteten Versuchen mit Zugabe von Sand und Zusätzen, sowie variierenden Holz- und Zementsorten weniger stark ausgeprägt, wenngleich trotzdem eine starke Ähnlichkeit besteht. Bei Zugabe von Sand sieht man wie das Druckfestigkeitsniveau bei gleichen Holzanteilen ansteigt (Abbildung 4). Gleichzeitig erkennt man im mittleren Teil der Grafik eine starke Streuung der Ergebnisse. Diese ist darin begründet, dass Röser bei seinen Versuchen unterschiedliche Holzarten und Körnungen erprobt hat. In diesem Zusammenhang wurde Fichtenholz aufgrund der Festigkeitsergebnisse und der Verfügbarkeit als besonders geeignet für weitere Untersuchungen ausgewählt.

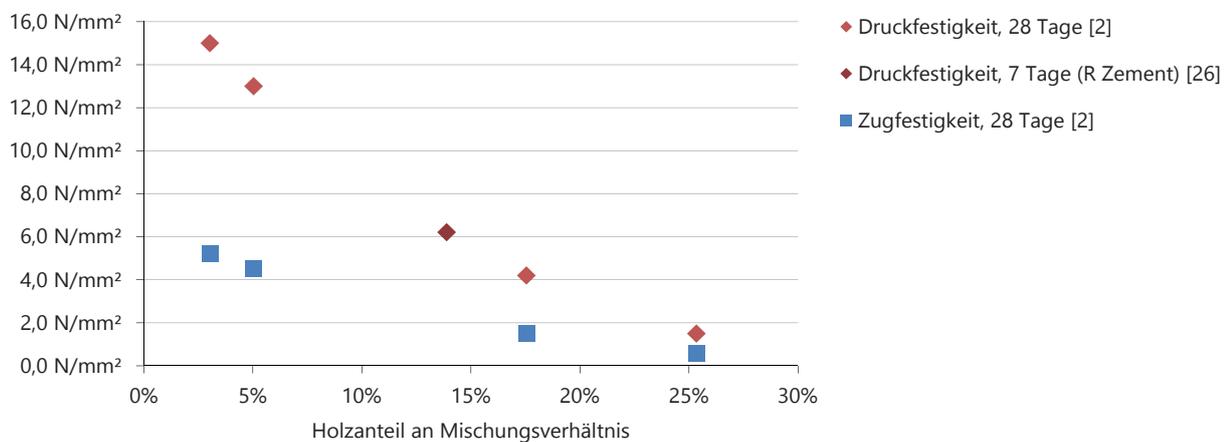


Abb. 4: Druck- und Zugfestigkeit in Relation zum Holzanteil am Gesamtgewicht der Mischung

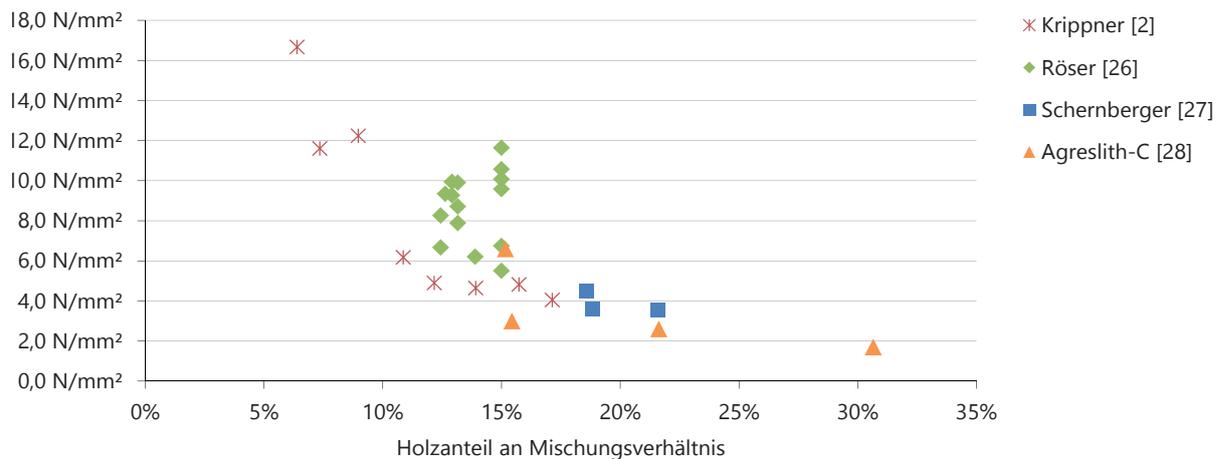


Abb. 5: Druckfestigkeit in Relation zum Holzanteil am Gesamtgewicht unter Zugabe von Sand

Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt die Resultate von Versuchen mit diversen Zusätzen. Dabei wurden die Proben von Röser einerseits mit handelsüblichen Zementen mit höheren Festigkeiten und andererseits unter Zugabe von bis zu 2,4% Calciumchlorid (CaCl) ausgeführt. Beides hatte einen deutlich positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit des Holzleichtbetons. Der Ansatz von Stöllinger dagegen war die Entwicklung von Ultrahochfesten Betonen mit Holzanteil, welche mit Zusätzen von über 30% und teilweise thermischer Nachbehandlung realisiert wurden. Damit konnten sehr hohe Druckfestigkeiten erreicht werden. Diese Betone können, teils auch entsprechend der ebenfalls von Stöllinger vorgestellten Gestaltungsmöglichkeiten, zum Beispiel bei Fassadenelementen interessant sein, wo aktuell bereits Ultrahochfeste Betone (UHPC) zur Verwirklichung filigraner Formen eingesetzt werden.

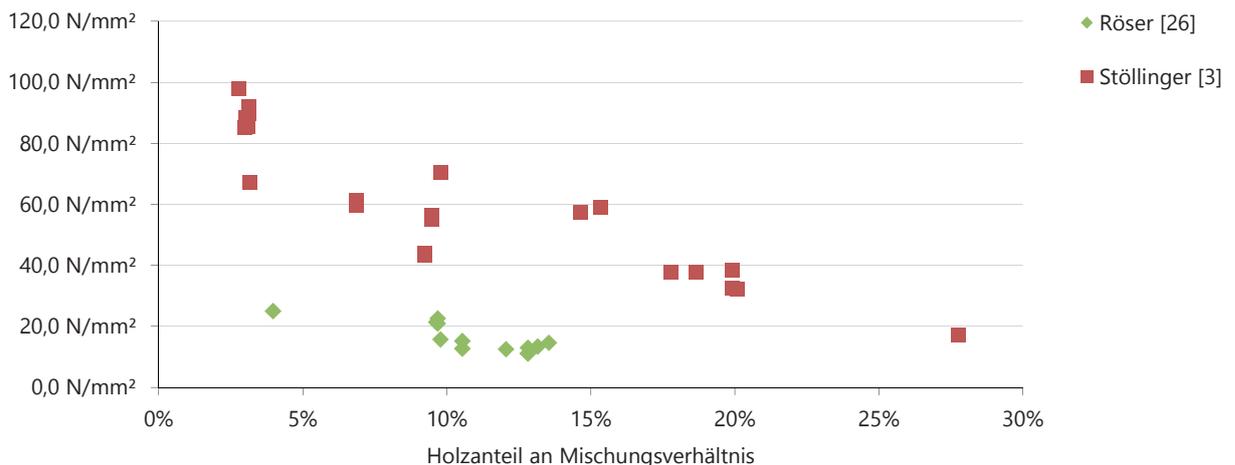


Abb. 6: Druckfestigkeit in Relation zum Holzanteil am Gesamtgewicht unter Verwendung von Zusätzen

Die Problematik im Holzleichtbeton liegt also darin, dass bei zunehmendem Holzanteil die Belastbarkeit deutlich abnimmt. Für typische Einsatzzwecke im Mehrgeschossbau sind zudem zu geringe Festigkeiten vorhanden. Bei mittleren und höheren Beanspruchungen muss ein Verbund mit anderen Materialien vorgesehen werden. Sinnvoll sind hier je nach Beanspruchung Holz und Beton. Stahl kann nur bedingt eingesetzt werden, da im Zusammenhang mit Holz(-leichtbeton) eine erhöhte Korrosionsgefahr besteht, die darin begründet ist, dass die offene Struktur des HLB keine so geschlossene Ummantelung des Stahls bietet wie Normalbetone. [vgl. 2, S.35 u. 41]

2.3.3.2 Brandverhalten

Durch das Einbinden des Holzes in die Betonstruktur wird der positive Effekt der Brandbeständigkeit des Betons genutzt. Der Zementstein verhindert dabei zuerst, dass das Feuer direkt auf die Holzpartikel einwirkt. Erreicht die Brandhitze nach einiger Zeit das Holz und kommt es zu einer Entflammung, brennt das Holz kontrolliert ab und es entstehen Brandrückstände, die wiederum das Vordringen des Feuers in tiefere Schichten des Baustoffs beschränken. Die in den Arbeiten von Krippner dargestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem Anteil des Holzes von unter 15% der Gesamtmasse die Baustoffklasse A2, nicht brennbar erreicht wird. Dabei sollen die Partikel gleichmäßig mit Zement umhüllt sein. [2, S.53f.] Im Handel erhältliche Produkte mit laut Herstellerangabe teilweise deutlich höherem Holzanteil haben eine Klassifizierung von B1-s1, d0 bzw. A2-s1, d0. [17]

Darüberhinausgehend hat Radlherr umfangreiche Untersuchungen über das Brandverhalten von Holzspan-Dämm- beziehungsweise -Schallschutz-Platten angestellt. Darin wurden zuerst eindimensionale Abbrandraten von 0,6 und 0,85mm/min experimentell festgestellt. [18, S.82] Anschließend wurden Versuche unternommen, wie eine Holzkonstruktion mit den gewählten Platten vor einer Brandeinwirkung geschützt werden kann. Dabei wurden insbesondere die Belastung durch Plattenstöße und durch die Hitzeübertragung der Verschraubung betrachtet. Darauf aufbauend wurde ein Berechnungsmodell für die Grundschutzzeit mithilfe von Holzspanplatten entwickelt. In den Versuchen und der Berechnung wurde gezeigt, dass ein Holztragwerk mithilfe von zwei 30mm starken Platten über eine Dauer von 90 Minuten vor einer Brandeinwirkung geschützt, und das Kapselkriterium erfüllt wird. [18, S.127ff.]

2.3.3.3 Wärme- / Hitzeschutz

Wie gut die Dämmeigenschaften und die spezifische Wärmekapazität eines Holzleichtbeton sind ist vorrangig abhängig von dem Holzanteil, der Gefügestruktur und der damit verbundenen Menge an Lufteinschlüssen im Material. Da diese Faktoren die Dichte beeinflussen, eignet diese sich um Wärmeleitfähigkeit und -Speicherfähigkeit mit ihr in Relation zu setzen. (Siehe dazu Abbildung 5) Zu beachten ist dabei, dass Holzleichtbeton ein hygroskopisches und, mit einem μ -Wert zwischen 4 und 13, auch ein diffusionsoffenes Material ist. [2, S.52f.]

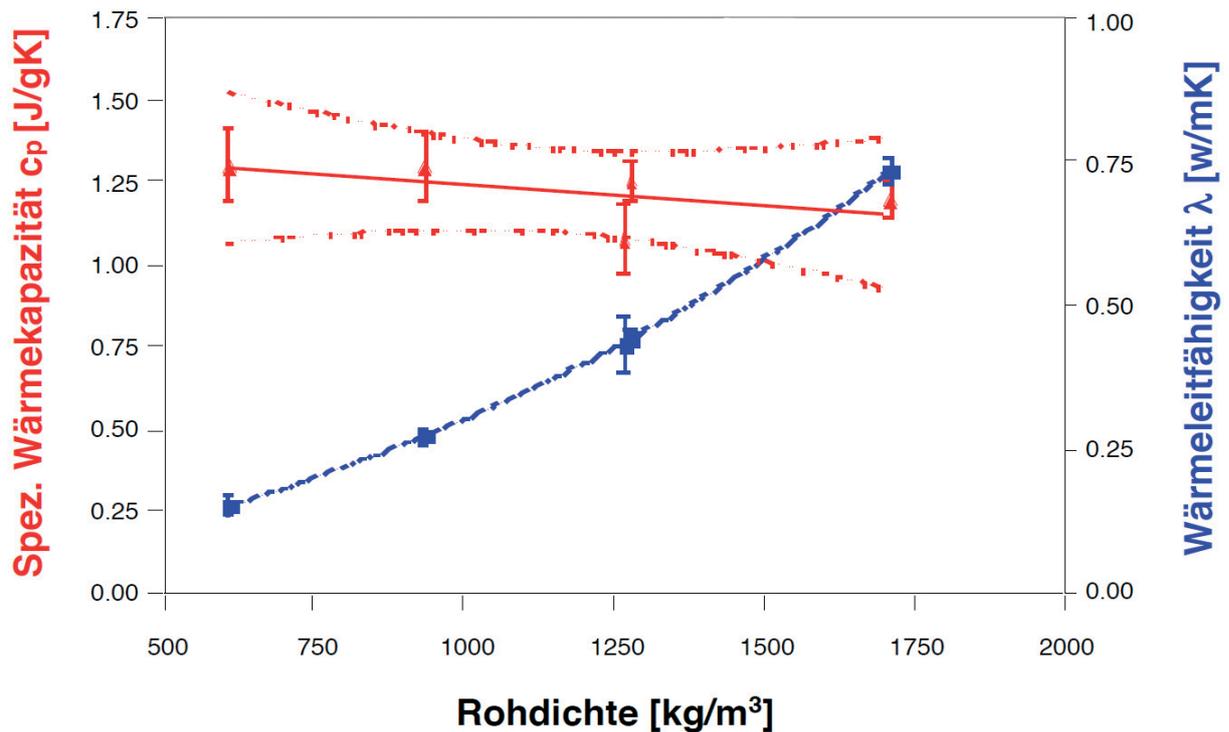


Abb. 7: Gemittelte Werte der spezifischen Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der gemittelten Probedichte [2, S.52, Abb. 5.10]

2.3.3.4 Schallschutz

Die Bewertung des Schallschutzmaßes eines einzelnen Baustoffes gestaltet sich durchwegs schwierig, da im Bauwesen meist eine Kombination von Materialien, die durch bestimmte Montageweise teilweise voneinander entkoppelt werden, in einem Bauteil vereint sind. Geprüft wird der Schallschutz des gesamten Bauteils. Aufgrund seiner Masse und Struktur lässt sich allerdings eine positive Einschätzung des Holzleichtbetons vornehmen. Holzleichtbetone mit offenporigem Gefüge, also zum Beispiel Holzwollebetonplatten, kommen bereits beim Schutz vor Schallübertragung und zur akustischen Verbesserung von Raumsituationen im Innen- und Außenbereich zur Anwendung.

2.3.3.5 Beständigkeit

Bei offenem Einsatz von Holzleichtbeton ist dieser diversen Angriffen ausgesetzt. Der häufigste Belastungsfall ist dabei im Außenraum der Frost-Tau-Wechsel. Generell ist es erwünscht, dass Baustoffe, die direkt der Witterung ausgesetzt sind, keine Poren oder Kapillaren haben in denen sich Wasser ansammeln kann, da dies im Frostfall zur einer (weiteren) Beschädigung des Bauteils führt. Entsprechend sind dichte Holzleichtbetone an der Fassade jenen mit Poren zu bevorzugen. Der bereits langjährig erprobte Einsatz von Holzwolle-Beton-Elementen als Schallabsorber im Außenbereich zeigt allerdings, dass auch diese offenporigen Systeme beständig gegen Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchungen sind. Ein Grund hierfür kann auch die von Krippner in seinen Untersuchungen beobachtete "Zähigkeit des Gefüges von Zement-

Holz-Wasser-Mischungen [...], dass trotz offenporiger Oberflächen Abplatzungen verhindert" [2, S.121] sein.

2.3.4 Gestaltung

Holzleichtbeton ist ein inhomogener Baustoff. Entsprechend ist seine Oberfläche geprägt von Frakturen seiner Inhaltsstoffe. Derzeit existierende Anwendungen von Holzleichtbetonen werden entweder verputzt oder offen, als Schallschutzelemente aus Holzwole, eingesetzt. Für die Gestaltung einer Sichtenanwendung von Holzleichtbeton gibt es folgende Ansätze:

- Modellierung; Durch die Formbarkeit des Betons während seiner Produktion ist es möglich verschiedenste Oberflächenausformung herzustellen. Dies kann mit (computergestützt generierten) Schalungen verwirklicht werden. Alternativ können bestimmte Mischungen von Holzleichtbetonen nachträglich leicht bearbeitet werden, was eine Formgebung durch (computergesteuerte) Abtragsverfahren ermöglicht.

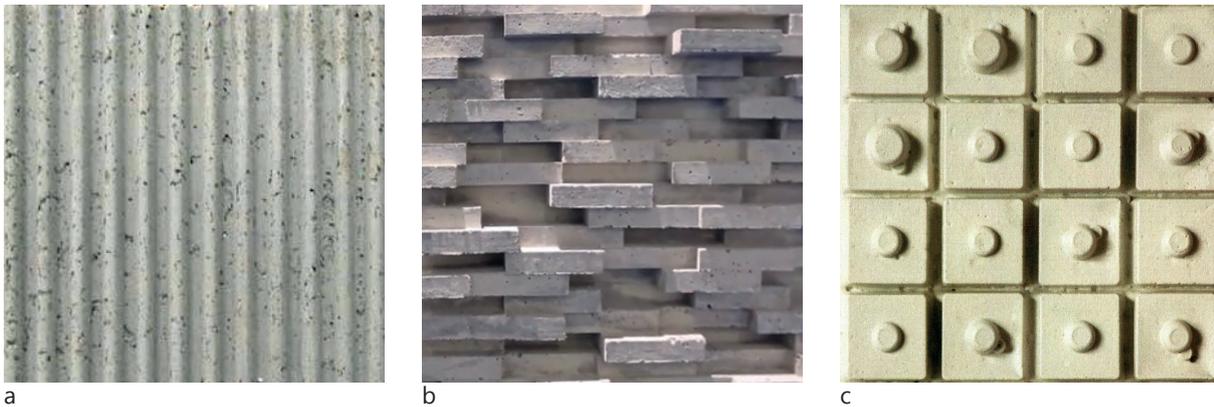


Abb. 8: Beispielhafte Modellierung der Oberfläche; a Wellenförmig [2]; b Vor- und Rücksprünge [29]; c organisierte Kleinsonderschalungsformen [3]

- Strukturdefinition; Durch die Auswahl bestimmter Holzzuschläge und deren Anteil an der Mischung, sowie durch die Entscheidung zur Verdichtung der Masse während des Aushärtens, kann die Struktur des Materials von offenporig bis gefügedicht eingestellt werden.

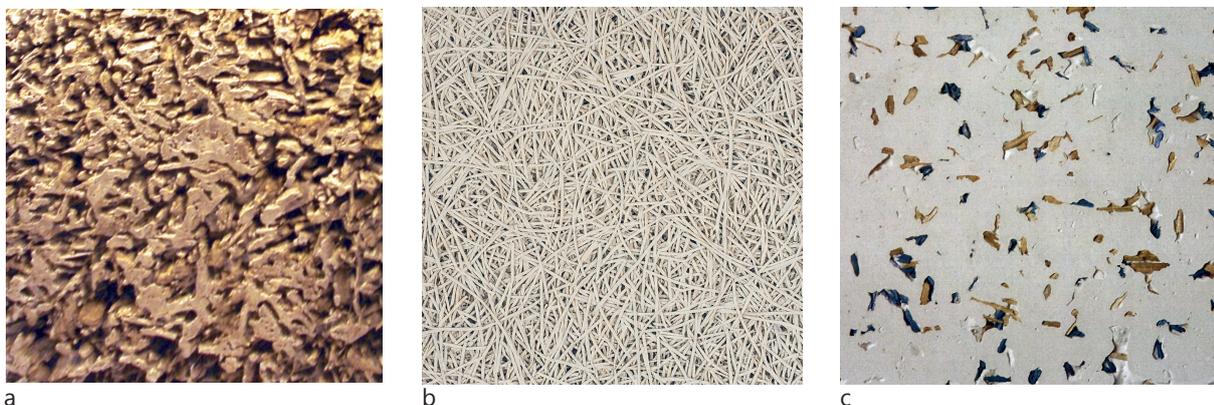


Abb. 9: Beispielhafte Strukturierung der Oberfläche; a Späne grob [27]; b Holzwole fein [30]; c beinahe geschlossenen mit sichtbaren Einschlüssen [3]

- Körnung; Bei der sichtbaren Oberfläche von Holzleichtbetonen sind die Holzzuschläge erkennbar. Durch die Auswahl bestimmter Holzkörnungen und deren Menge wird der Anteil an offenliegendem Holz geregelt.



a



b



c



d

Abb. 10: Beispielhafte Holzpartikelgrößen; a Späne gemischt [2]; b Späne mittel [2]; c Holzwolle fein [30]; d Holzwolle grob [30]

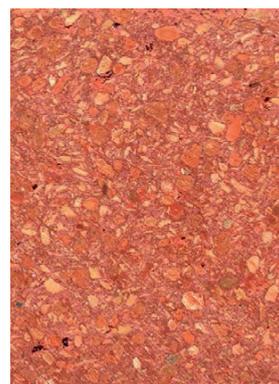
- Farbigkeit; Wie bei anderen Betonen auch können Farbpigmente in die Mischung eingebracht werden. Dies bedingt eine Durchfärbung des erstellten Betonkörpers, was positiv für weitere Verarbeitungsschritte ist. Alternativ kann das Färben auch nachträglich mit Dispersionen, Lacken oder Ähnlichem erfolgen.



a



b



c



d

Abb. 11: Beispielhafte Farbigkeit; a Schwarz [3]; b Blau [3]; c Rot [2]; d Weiß mit Rottönen [3]

2.3.5 Ökologie

Ein wesentlicher Forschungsansatz von Holzleichtbeton war und ist die Suche nach Alternativen zu Gesteinskörnung in Betonen. Demnach ist die grundsätzliche Konzeption des Materials durch die beabsichtigte Substitution eines nicht nachwachsenden Rohstoffes durch einen nachwachsenden Rohstoff ökologisch positiv zu sehen. Um diese Überlegung

verantwortungsvoll umzusetzen ist es wichtig die Herkunft des Holzes zu beachten. Es ist danach zu trachten, Holz mit gesicherter Herkunft aus nachhaltiger Forstwirtschaft einzusetzen und auch Holzabfallstoffe in die Überlegungen miteinzubeziehen. Holzleichtbeton kann in diesem Zusammenhang nicht als uneingeschränkt umweltfreundlicher, vollständiger Ersatz zu herkömmlichem Beton gesehen werden, da, neben vielen anderen Faktoren, auch die entsprechenden Holzressourcen nicht zu Verfügung stehen.

Ein wesentlicher Schwachpunkt in der Frage der Umweltverträglichkeit von HLB ist der gesteigerte Zementanteil im Vergleich zu Betonen mit Gesteinszuschlag. Damit einhergehend ist eine negative CO₂ Bilanz, da bei der Herstellung von Zement hohe Mengen dieses Treibhausgases ausgestoßen werden. Durch den Holzanteil kann nur ein Teil des Effekts abgeschwächt werden. Sinnvoll ist daher die Überlegung zur Einbeziehung von Ökobetonen bei der Entwicklung und Herstellung eines Holzleichtbeton.

Neben der Erderwärmung tritt als Problematik die lokale Verknappung von Wasserressourcen auf. Da dieses Problem im Speziellen in Österreich und allgemein in westlichen Industrienationen nur gering ausgeprägt ist, stellt es im Zusammenhang mit Holzleichtbetonproduktion in Mitteleuropa nur eine untergeordnete Frage dar. Dennoch ist der Wasserverbrauch zu hinterfragen, da er pro Kubikmeter Material um das Doppelte und mehr erhöht ist, als im Vergleich zu konventionellem Beton. (Grundlage Daten für den Einsatz von Süßwasserressourcen (FW) laut Datenbank ökobaudat [19]) Dies hängt mit den Wassermengen, die für das Holzwachstum benötigt werden, zusammen und ist abhängig von eingesetzter Holzart und Vorbehandlungsmethoden, wie zum Beispiel auswaschen von Holzzuckern aus dem Rohholz.

Nach der Nutzungsphase eines Materials stellt sich die Frage nach einer sinnvollen Weiterverwertung. Dabei ist jeder Bauweise gemein, dass eine langlebige Architektur mit dauerhaften Bauteilen und -Stoffen, die als solches wiederverwendet werden können, angestrebt werden soll. Wird ein Bauteil unbrauchbar muss es einer Verwertung zugeführt werden. Im Fall von Holzleichtbeton ist dies allerdings mit einigen Hürden verbunden. So ist aufgrund der Inhomogenität und der vergleichsweise geringen Belastungswerte ein Einsatz als Zuschlag in neuen Betonbauteilen oder als Schüttung nur in einer sehr geringen Anzahl an Fällen vorstellbar. Die Wiederverarbeitung von Holzwohle-Beton-Platten zu ebendiesem wird dagegen schon von einigen Herstellern propagiert, ist aber meist nur mit reduzierten Eigenschaften des Endprodukts realisierbar. Eine thermische Verwertung des Holzes ist auch nur in beschränktem Ausmaß möglich, da Holzleichtbeton aufgrund des Zementanteils brandbeständig ist und daher ein hohes Maß an zusätzlicher Verbrennungsenergie zugeführt werden muss. Selbst dann bleiben allerdings große Anteile an Restmassen nach der Verbrennung. Derzeit ist daher bei der Entsorgung eine Deponierung des Holzleichtbetons oder etwaiger Restmassen für eine Vielzahl von möglichen Mischungen für den konstruktiven Einsatz absehbar. Um dabei die Mengen zu reduzieren ist bei der Konzeption solcher Bauteile darauf zu achten, ob und wie die Verbindung von Holzleichtbeton mit anderen Materialien wieder reversibel ist. Unter diesem

Gesichtspunkt ist eine Verschraubung einer Verklebung vorzuziehen. [20, S.39-49]

2.3.6 Wirtschaftlichkeit

In Österreich gibt es aktuell etwa acht relevante Hersteller von Holzleichtbetonprodukten mit einem geschätzten Jahresumsatz von circa 80 Mio. Euro. (Berechnet aus den veröffentlichten Umsatzergebnissen der Produzenten laut Wirtschaftsankunfteien [21]) Ihre hauptsächliche Produktion besteht aus Mantelbetonsteinen, Schalungsplatten, Fassadentafeln und Lärmschutz- bzw. Akustikelementen. Die Materialmischungen, die dafür eingesetzt werden, sind Holzwolle-Beton, Holzspan-Beton und zementgebundene Spanplatten. Die Produktionsstandorte sind bei kleineren Herstellern in Österreich konzentriert und bei größeren Produzenten zusätzlich in andere europäische Länder, vorwiegend im Osten Europas, gestreut. Bevorzugte Produktionsstandorte sind in waldreichen Gebieten, in der Nähe von Flüssen mit guter Infrastrukturanbindung. Teilweise werden neben Holzleichtbetonprodukten auch andere Geschäftsfelder bearbeitet. Zum Beispiel ist die Firma Heraklith ein Teil der Knauf-Gruppe, einem Anbieter von Materialien für den Innenausbau, beziehungsweise liefert die Firma Frischeis neben Zementgebundenen Spanplatten auch diverse andere Holzwerkstoffplatten.

In anderen Ländern werden neben den genannten Produkten auch darüberhinausgehende Lösungen angeboten. So liefert die Firma Träulit in Schweden, ausgehend von der Produktion von Holzwolle-Beton-Platten, seit der Jahrtausendwende Dachelemente mit sekundärer Tragfunktion, sowie raumbildende Innen- und Außenwandelemente. Die entsprechenden Produktionsanlagen für letztgenannte Elemente werden von der Firma Eltomation in den Niederlanden errichtet. Agresta aus Frankreich liefert mit Agreslith-C versteinertes Hackgut, genannt Aggregat, welches zur Herstellung von Estrichen genutzt wird. Die Erzeugung von Steinholzbelägen dagegen wird nur noch von sehr wenigen Firmen, wie zum Beispiel von der Repoxit AG in der Schweiz, angeboten.

Grundlegende Kostenfaktoren bei jedwedem Produkt sind Material- und Produktionskosten. Bei der Kalkulation von vorhandenen Holzleichtbetonprodukten treten vor allem die Kosten für Holz und die Abbindezeit in den Vordergrund. Zur Erzeugung von Holzwolle, welche in vielen aktuell verfügbaren Produkten eingesetzt wird, werden Abschnitte von Holzstämmen in Hobelmaschinen bearbeitet. Dieser Ausgangsstoff ist vergleichsweise teuer, da qualitativ gutes Bauholz verwendet wird, dessen Preis durch den Flächenverbrauch beim Anbau und die Ernte- und Trocknungsprozesse definiert ist. Alternativ können hier Schwachholzprodukte eingesetzt werden. Für andere Holzleichtbetone aus Hackschnitzeln und Holzmehl eignen sich teilweise auch Holzabfälle und Restprodukte aus der Holzproduktion. Dabei steht deren Einsatz in Konkurrenz zur Verwendung in Holzwerkstoff-Produkten und als Brennstoff. Bei gleichbleibenden verfügbaren Mengen wäre bei gesteigerter Nachfrage aufgrund der Holzleichtbetonproduktion ein Preisanstieg absehbar. Deshalb sollten bei der Konzeptionierung von Holzleichtbetonprodukten derzeit ungenutzte Holzreststoffe, wie zum Beispiel Rinden und

Äste, die aktuell in Wäldern verbleiben, einbezogen werden. Letztgenanntes in einem Ausmaß, dass das Ökosystem Wald jedenfalls keine Nachteile, im Idealfall sogar Vorteile, daraus zieht.

Die Aushärtezeiten von Holzleichtbetonprodukten sind länger als jene von Produkten aus konventionellem Beton, auch da Zusatzstoffe und -mittel, die die Abbindezeiten reduzieren könnten, meist die Festigkeit des Holzleichtbeton negativ beeinflussen oder nicht weit genug erforscht sind und somit nicht eingesetzt werden können. Dadurch entstehen Mehrkosten bei der Lagerung und beim Ausnutzungsgrad von Schalungsformen. Teilweise fallen auch erhöhte Kosten für Pressen und die Temperierung der Formen an.

2.3.7 Herstellungsverfahren

Zur Einschätzung von bisherigen und Entwicklung neuer Einsatzmöglichkeiten ist es wichtig die Prozesse zur Herstellung bereits eingesetzter Produkte zu kennen. Auch kommt es dabei zu Erkenntnissen welche theoretischen Überlegungen in der Praxis relevante Auswirkungen haben. Betrachtet wurde dafür die Produktion von magnesitgebundenen Holzwoleplatten „Heradesign“ des Herstellers Knauf AMF am Standort Ferndorf in Österreich, von wo aus das Produkt in über 80 Länder der Erde exportiert wird.



Abb. 12: Produktionsstandort Ferndorf

2.3.7.1 Historischer Hintergrund

Der Produktionsstandort in Ferndorf in Kärnten ist geschichtlich aufgrund einer nahen Magnesitmine gewachsen. Ursprünglich wurde das gewonnene Gestein vom Steinbruch mit einer Lastseilbahn zur Drau und von dort weiter mit dem Zug transportiert. Da der Verkauf nur für reines Magnesit wirtschaftlich und die Aufbereitung verunreinigten Rohstoffes zu kostspielig war suchte man nach alternativen Einsatzzwecken für dieses Restmaterial. Zur Herstellung von magnesitgebundenen Holzwoleplatten war die Qualität ausreichend gegeben.

2.3.7.2 Produktion

Aufgrund des Vorrats in der Umgebung des Werks werden für die Herstellung der Platten regionale Fichtenhölzer verwendet. Diese müssen einen Durchmesser zwischen 20 und 25 cm haben um die Anlage optimal betreiben zu können. Geliefert werden sie in 2 Meter langen Abschnitten, die je nach Schnittzeitpunkt bis zu einem Jahr gelagert werden um eine gleichmäßige Qualität der Holzwolle zu erzielen. In der Verarbeitungsstraße werden die Hölzer zuerst in 50 cm lange Abschnitte geteilt. Danach erfolgt eine Überprüfung auf Metallreste im Holz und ob der geforderte Durchmesser vorliegt, wobei ungeeignete Stücke automatisch ausgesondert werden. Auf einem Förderband werden ausreichend Holzstücke auf Vorrat gehalten um eventuelle Sägeausfälle puffern zu können. Im nächsten Verarbeitungsschritt werden die Holzstücke auf 25 cm abgelängt und der Holzwollemaschine zugeführt. Diese verfügt über einen Rotationshobel, der langfasrige Späne von den Holzstücken abhobelt. Die Länge der Stücke ist dabei entscheidend, da sonst zu lange oder zu kurze, nicht verkettbare, Holzwolle entsteht.



Abb. 13: Produktionsschritte Verarbeitung zu Holzwolle; a Zufuhr abgelängtes Material; b Rotationshobel; c Weitertransport Holzwolle

Im nächsten Arbeitsgang wird die Holzwolle mit Magnesit und Wasser vermengt. Nach einer Auflockerung mit Stachelwalzen wird die Masse auf das Produktionsförderband aufgebracht. Entscheidend für eine gleichmäßige Dichte der fertigen Platten ist die Produktion auf einer Bandanlage. Dabei läuft ein kontinuierlicher Produktionsprozess ab, wobei die Länge der Platten nur durch ihre Hantierbarkeit und die Ausdehnung der Produktionshalle begrenzt wird. Im Gegensatz dazu kann die Produktion bei anderen Herstellern auch mit Kastenformen vollzogen werden. Dabei werden die Formen mit der Masse befüllt, glatt gestrichen und übereinander gestapelt. Durch das Gewicht der Kästen kommt es zu unterschiedlichen Komprimierungen.



Abb. 14: Pressen des Holzwolle-Magnesit-Wasser-Gemischs zwischen den Walzen der Bandformanlage

Bei einer Bandformanlage hingegen wird das aufgelockerte Material mit zwei Walzen (Siehe Abb. 12) auf die gewünschte Dicke gebracht und härtet danach in einem Bandofen bei etwa 200°C (notwendige Temperatur für den Erhärtungsprozess des Magnesits) für ca. 3 Minuten aus. Erst anschließend werden die Platten abgelängt, gestapelt und im Reifelager

für 10 Tage, sowie im Warmlager für weitere 14 Tage gelagert um ihre endgültige Festigkeit zu entwickeln. Manche Plattentypen haben geschlossenporigere Oberflächen. Hier werden Sägespäne vor dem Pressen der Platten aufgebracht um die Oberfläche zu verdichten.

Danach werden die Platten auf die bestellten Maße geschnitten und die Kanten gefräst. Die Kantenausführung richtet sich nach Montageart und gewünschtem Erscheinungsbild. Anschließend werden die Platten gefärbt und verpackt. Das Färben kann auch nachträglich durch den Kunden erfolgen wird aber jedenfalls empfohlen, da die Platten nach der Produktion eine unregelmäßige Farbgestaltung der Oberfläche aufweisen. Diese Flecken sind bedingt durch die unterschiedlichen Ausgangsholzstücke. Sonderanfertigungen, bestimmte Kanten- und Gehrungsschnitte, Verklebungen und Aufkantungen werden in einer Manufaktur hergestellt. Ansonsten sind sämtliche Prozesse computergesteuert und durch Mitarbeiter überwacht. Auch eine Bedruckung des Materials ist bei einem Partnerunternehmen mit einem Drucker mit höhenverstellbarem Druckkopf möglich.

2.3.7.3 Ökologie

Das eingesetzte Holz ist jedenfalls PEFC-Zertifiziert, womit ein Anbau in nachhaltiger Forstwirtschaft bestätigt wird. Alternativ kann nach Kundenwunsch auch FSC-Zertifiziertes Holz eingesetzt werden, was allerdings, aufgrund der höheren Zertifizierungskosten, da hier aufwändigere Kontrollen durchgeführt werden, zu Mehrkosten beim fertigen Produkt führt. Laut Herstellerangabe sind die Hölzer aus der Region.

Für die Produktion wird einerseits Energie für die Erhitzung innerhalb des Ofens in der Bandanlage benötigt. Andererseits kommt es zu Energieaufwand für die Temperierung der Lagerhallen. Letzteres ist besonders relevant aufgrund der vergleichsweise langen Lagerzeiten im Warmlager. Für die Verarbeitung der Rohstoffe, Zuschnitt und Verpackung wird wenig Energie benötigt. Die Materialanlieferung erfolgt aufgrund der guten regionalen Rohstoffversorgung mit kurzen Transportwegen. Die fertigen Produkte werden allerdings aus dem Werk weltweit ausgeliefert, weshalb es je nach Einsatzort zu relevanten Umweltbelastungen durch den Transport kommt.

Beim Anlaufen der Anlage fällt teilweise plattenförmiger Ausschuss an, da nicht die richtige Mischung, beziehungsweise keine gleichmäßige Dichte vorliegt. Diese Platten werden zum Schutz der verwertbaren Platten eingesetzt. Weiters kommt es zu Abfällen beim Zuschnitt und bei der Bearbeitung in der Manufaktur. Die Restmaterialien werden gesammelt und in einem Drehrohrofen thermisch aufbereitet. Derzeit geschieht das noch außerhalb des Werks. Allerdings kann dieser Ofen auch in das Werk integriert werden um die Abwärme des Verfahrens zur Temperierung der Lagerhallen zu nutzen. Die eingesetzten Farben sind vergleichbar zu herkömmlichen Wandfarben und für die Verwendung im Innenraum, im Hinblick auf Ausdampfungen, unbedenklich.

2.3.7.4 Verwertung von Reststoffen

Der Baustoffhersteller Knauf stellt neben Heradesign auch andere mineralisch gebundene Holzwolleplatten unter den Bezeichnungen Heraklith, Heratekta (EPS) und Tektalan (Mineralwolle) her. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal verschiedener Holzwolleprodukte des Unternehmens sind die eingesetzten Bindemittel Magnesit und Zement. Entsprechend dieser ergeben sich unterschiedliche Herangehensweisen an die Verwertung von Reststoffen. Darüber hinaus ist entscheidend, ob ein zusätzlicher Dämmkern in die Platte eingebracht wurde und welcher Dämmstoff (EPS oder Steinwolle) dafür Verwendung fand. Im Rahmen diverser Untersuchungen hat Knauf für die verschiedenen Produkttypen folgende Ansätze zur Reststoffverwertung entwickelt und erprobt:

- Trennung von Mehrschichtplatten; EPS und Mineralwolle, welche als Dämmkern fungieren, können wieder zur Erzeugung von EPS und Mineralwolle herangezogen werden. Dafür dürfen allerdings keine Verunreinigungen durch Holzwolle oder Bindemittel zurückbleiben. Gleichzeitig verfügen die Mehrschichtplatten über eine widerstandsfähige Verbindung da die Schichten nicht nachträglich verklebt, sondern im Produktionsprozess der Holzwolleplatte verbunden werden und somit ein Einbinden des Dämmstoffs über den Abbindeprozess stattfindet. Diese Verbindung ist für das Produkt entscheidend, da es somit widerstandsfähiger ist, für eine Trennung allerdings hinderlich. Daher müssen Abfälle mechanisch durch Sägen zertrennt werden. [74]
- Rückführung in den Produktionsprozess; Sägestaub kann bis zu 15% Anteil an der Gesamtmasse der Produktion als Füllstoff zugeführt werden. Denkbar ist es auch zerkleinerte Platten wieder einzusetzen, was jedoch mit der vorhandenen Produktionstechnologie nicht zufriedenstellend durchführbar ist. [74]
- Kompostierung; Es ist möglich magnesitgebundene Holzwolleplatten zu schreddern und der Kompostierung zuzuführen. Dabei nimmt das Material Flüssigkeiten auf und liefert Nährstoffe für verschiedene Pflanzenarten. Durch den Einsatz dieser Reststoffe kann die Verwendung von Stroh im Kompost reduziert werden. [75]
- Sekundärbrennstoffnutzung; Durch die eingeschlossenen Holzpartikel verfügt das Restmaterial über einen verwertbaren Brennwert und kann somit als zusätzlicher Brennstoff eingesetzt werden. [74]
- Erzeugung von anderen Bauteilen; Zusammen mit der niederländischen Firma MGX wurde untersucht, inwieweit Restmaterialien von Holzwolleplatten mit EPS in einen Leichtbeton eingebunden werden können. Dabei konnte gezeigt werden, dass Bauteile aus diesem Material realisierbar sind. [74] Bei früheren Untersuchungen wurden auch erfolgreich zementgebundene Ziegelsteine mit Splitt- und Holzwolle-Granulat zur Errichtung von Trennwänden gefertigt. [75]
- Nutzung als Stroh- oder Rindenmulch-Ersatz; geschreddertes Restmaterial kann auch als Zugabe bei Einstreu von Tierställen genutzt werden und ersetzt dabei bis zur Hälfte des

oftmals verwendeten Strohs. Außerdem kann das Material zur Bodenauflockerung und als Rindenmulch-Ersatz herangezogen werden. Bei Letzterem ist die Staubentwicklung einzudämmen. [75]

Sämtliche Ansätze beziehen sich im Wesentlichen auf Produktionsabfälle, die direkt beim Hersteller anfallen. Eine Übertragung auf Baustellenabfälle aus Verschnitt ist vorstellbar, allerdings müssten dafür die verschiedenen Abnehmer die Restmassen zum Hersteller oder zu einem darauf ausgerichteten Wiederverwertungsbetrieb retournieren. Der daraus entstehende Aufwand und die damit verbundenen Kosten sind derzeit nicht wirtschaftlich darstellbar. Parallel dazu werden auch die vorgestellten Lösungen nicht vollständig für Produktionsabfälle angewendet, da die Kosten für eine Deponierung der Reststoffe geringer sind oder hohe Investitionen in einen Umbau bestehender Anlagen notwendig wären. Eine Änderung dieser Rahmenbedingungen durch rechtliche Vorgaben würde die Verwertungsmethoden begünstigen. [74]

Bisher nicht betrachtet in dieser Aufstellung wurde jener Großteil der Produktion, der in Gebäuden verbaut wird. Für ihn sind prinzipiell die gleichen Verwertungsmethoden möglich. Bei Holzwolledämmplatten, die als Schalung zum Erstellen von Betonbauteilen verwendet werden, ist die Oberfläche stark mit Beton durchdrungen. Eine Trennung wäre bei den vergleichsweise dünnen, einschichtigen Platten nur mechanisch, etwa durch Abschlagen, vorstellbar und entsprechend sehr zeit- und kostenintensiv. Bei mehrschichtigen Platten können zumindest die Lagen ohne direkten Betonkontakt leichter rückgewonnen werden. Hier ergeben sich allerdings wieder die genannten Probleme der Zuführung zu einem nachhaltigen Verwertungsprozess. Anders stellt sich die Situation für Platten, die nachträglich an eine vorhandene Konstruktion geschraubt wurden, dar. Sie können rückgewonnen und den genannten Verwertungsmethoden, bei gleichbleibender Kostenproblematik, zugeführt werden. Beachtet werden muss dabei, dass keine Verunreinigungen, durch zum Beispiel Putze oder dergleichen, mit einem Anteil von über 10% des Materials vorliegen. Entsprechend betrifft dies vor allem Platten mit Sichtanwendungen und schließt Putzträgerplatten aus. [74]

Um eine Einschätzung der Mengen vornehmen zu können, die von diesen Vorgängen betroffen sind, kann man die Produktionszahlen von Knauf betrachten. Näherungsweise produziert das Unternehmen in Mitteleuropa rund 6 bis 7 Mio. Quadratmeter gebundene Holzwolleplatten pro Jahr. In der Produktion fallen 1,5% bis 3% Abfall an und es wird angenommen, dass weitere 3% der Platten auf der Baustelle als Verschnitt abfallen. [74] Zusammengefasst zeigt sich also, dass ein großer Anteil der verbauten Platten nur durch intensive mechanische Behandlung weiterverwendet werden könnte und auch sonst die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen derzeit für eine Deponierung der Reststoffe sprechen. Die vorgestellten Lösungen sind demnach zukunftsorientiert. Eine Übertragung der Konzepte auf andere Holzleichtbetone ist vor allem im Hinblick auf das Zerkleinern und Rückführen in die Produktion vorstellbar. Welcher Anteil dabei wiederverwendet werden kann, muss für das jeweilige Produkt ermittelt werden.

3 VORHANDENE PRODUKTE UND LÖSUNGEN AUS HOLZLEICHTBETON

Das nachfolgende Kapitel liefert eine Übersicht über bereits verbreitete oder erarbeitete Ansätze zum Einsatz von Holzleichtbeton im Bauwesen. Dabei ist die Bandbreite an Lösungen, Herstellern und Charakteristika so groß, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine solche Aufstellung vollständig ist.

3.1 PRODUKTE

Die am Markt verfügbaren Systeme und vertretenen Hersteller sind in diversen wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema Holzleichtbeton ausführlich behandelt worden. Zu empfehlen sind hier vor allem die Diplomarbeiten von Stöllinger aus dem Jahr 2013 [3], Pipoh aus 2015 [22] und Stähl aus 2011 [23]. Da diese umfangreich und aktuell ausgearbeitet sind, wird darauf verzichtet eine nochmalige Auflistung der Hersteller und ihrer Erzeugnisse zu liefern und stattdessen im Folgenden eine Übersicht über die vorhandenen Produktkategorien vorgenommen. Dies dient um vorhandene Potenziale zu erkennen und Ableitungen für weitere Lösungsvorschläge herzustellen. Die Einordnung erfolgt dabei zuerst nach der Form des verwendeten Holzes und weiters nach der Form, in die der Holzleichtbeton gebracht wird.

3.1.1 Holzspanbeton

Holzspäne sind übliche Abfallprodukte aus der Holzbearbeitung können aber auch durch schreddern von Holz hergestellt werden. Form und Größe sind variabel. Außerdem sind meist Feinstoffanteile (Sägemehl) in dem Spangemenge enthalten.

3.1.1.1 Schalungsplatten

Bei der Herstellung von Unter- / Überzügen, Ringankern oder Ähnlichem werden Holzspanbetonplatten als verlorene Schalung genutzt. Ihr Vorteil liegt darin, dass sie auch als Wärmedämmung zur Vermeidung von Kältebrücken fungieren. Die Platten sind ausreichend stabil um für die meisten Schalungsaufgaben ohne weitere Trägerplatten verwendet zu werden. Die Fixierung erfolgt dabei mit metallischen Ankern, Winkeln oder Bügeln, die teilweise an der Innenseite mit



Abb. 15: Ringankerschalung aus Holzspanbetonplatten

einbetoniert oder wiederverwendbar an der Außenseite eingesetzt werden. Aufgrund der rauen Struktur der Platten kann das fertige Bauteil gut verputzt werden. Bei Gebäuden mit sehr hohen Anforderungen an die Dämmwerte der Außenbauteile, wie Passiv- und Plusenergie-Häuser, sind die Dämmeigenschaften von Holzspanbeton nicht ausreichend um die geforderten Werte zu erreichen. Hier müssen teurere Platten mit zusätzlichen Dämmlagen eingesetzt werden. Außerdem werden bei diesen Gebäuden meist zusätzliche Dämmschichten auf die gesamten Außenwände aufgebracht, die auch einen gleichmäßigen Putzuntergrund bilden. Daher werden

in diesen Fällen eher günstigere, wiederverwendbare Schalungsmaterialien eingesetzt.

3.1.1.2 Mantelbetonsteine



Abb. 16: Mantelbetonstein aus Holzspanbeton mit integrierter Dämmung

Wände aus Mantelbetonsteinen werden zum Erzielen der Tragfähigkeit mit Bewehrungsseisen versehen und mit Beton ausgegossen. Die Steine dienen zur Formgebung als verlorene Schalung, als Wärmedämmung und als Putzträger. Durch die leicht hantierbare Form, geringes Gewicht und die leichte Bearbeitbarkeit des lockeren Gefüges können schnell und einfach, auch komplexere Gebäudeformen generiert werden. Die Produkte selbst sind allerdings nur bedingt belastbar und müssen nur Transport- und Montagekräfte aufnehmen.

Zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften können die Hohlräume der Mantelbetonsteine teilweise mit Dämmmaterialien ausgefüllt werden. Manche Systeme füllen die Hohlräume sogar vollständig aus. Die Tragstruktur wird dabei im Extremfall auf Stützen reduziert. Diese werden dadurch hergestellt, dass einige Steine ohne Dämmung verbaut und mit Beton verfüllt werden. (vgl. ILA Systembau [31], bzw. [3], Seite 59)

3.1.1.3 Mantelbetonbauteile



Abb. 17: Montage eines Mantelbetonwandelements

Das Prinzip ist vergleichbar mit jenem der Mantelbetonsteine, allerdings sind die Elemente wesentlich größer (beschränkt durch die Transportfähigkeiten eines LKWs). Die Wände sind je nach Hersteller aus Mantelbetonsteinen oder Schalungsplatten zusammengestellt. Diese werden im Werk konfektioniert und zusammengesetzt. Auf der Baustelle erfolgen nur das Aufstellen und abschließende Ausbetonieren. Vorteile ergeben sich durch die wetterunabhängige, routinierte Montage beim Hersteller

vor allem bei geraden oder mehreren gleichen Wänden.

3.1.1.4 Zementgebundene Spanplatten

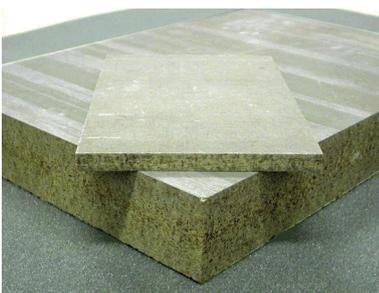


Abb. 18: Verschiedene Plattenstärken Zementspanplatte

Vergleichbar zu konventionellen Spanplatten, jedoch durch den Zement witterungsbeständiger, werden zementgebundene Spanplatten als Fassadenmaterial, für Verkleidungen im Innenraum und begrenzt auch als Innenwände eingesetzt. Die Platten sind dicht gepresst und haben eine geschlossene Oberfläche, die in verschiedenen Farben und Designs erhältlich ist. Sie sind hinsichtlich der Brandbeständigkeit auch in der Klassifikation nicht brennbar erhältlich und Resistent gegen Pilze,

Schimmel und Insekten. Im Vergleich zu häufig bei Fassaden eingesetzten Zementfaserplatten ergibt sich eine Gewichtseinsparung durch die Verwendung von Holz. [32]

3.1.1.5 Estrich

Der Einsatz von Holz als Zuschlag zu Estrichen reduziert das Gewicht und verbessert die Ökobilanz. Das Material ist getestet auf eine maximale Belastbarkeit von $6,6 \text{ N/mm}^2$ bei Druckbelastung, sowie 3 N/mm^2 bei Biegebeanspruchung. Außerdem ist es brandbeständig und verbessert Wärme- und Schallschutz des Bodenaufbaus. Die Verarbeitbarkeit ist dabei vergleichbar zu konventionellen Estrichen. Es können auch Fußbodenheizungen mit dem Material kombiniert werden. Der Einsatzort ist sowohl im Neubau als auch im Altbau. Generell vorteilhaft ist die Verwendung des Estrichs bei Decken mit geringer Tragfähigkeit. [28]



Abb. 19: Verarbeitung des Materials zu Estrich

3.1.1.6 Schüttung

Mineralisch ummantelte Holzspäne werden als Ausgleichschüttung eingesetzt. Dabei sind die einzelnen Holzspäne mit einer mineralischen Schicht umgeben und werden trocken in den Bodenaufbau eingebracht. Die Belastbarkeit ist höher als bei vergleichbaren Blähtonenschüttungen und es können Flächenlasten bis 10 kN/m^2 unter Einhaltung der erlaubten Stauchungen bei einer Schichtdicke bis zu 20 cm aufgenommen werden. Das Produkt hat eine Brandbeständigkeit der Klasse B2 und widersteht Schimmel-, Pilz-, und Termitenbefall. [33] Aufgrund des geringen Gewichts ist ein Einsatz auch bei Tramdecken im Altbau möglich.



Abb. 20: Einbringen der Schüttung

3.1.2 Holzwollebeton

Holzwolle wird durch das maschinelle Abhobeln langer Späne von Holzstücken gewonnen. Das Material ist im Vergleich zu anderen Holzspänen länger, schmaler und gleichförmiger und neigt dazu sich ineinander zu verketten. Ein typischer Einsatzzweck ist als Dämm- oder Füllstoff in Form von zum Beispiel zement- oder magnesitgebundenen Holzwolle-Leichtbauplatten. Der Vorteil von zementgebundener Holzwolle ist die gute Wärmedämmung in Kombination mit anderen Eigenschaften, wie Stabilität, Brandbeständigkeit, Schallschutz und Oberflächenstruktur.

3.1.2.1 Platten

3.1.2.1.1 Dämmplatten

Zementgebundene Holzwolleplatten finden vor allem Einsatz als Wärmedämmung. Der Vorteil gegenüber anderen Systemen liegt in einer hohen (Stoß-)Beständigkeit, mit guten Brandschutzeigenschaften. Gleichzeitig können gute Dämmleistungen erzielt werden. Diese wird durch die Kombination mit Steinwolle, in Sandwichplatten, oder mit EPS, in mehrschichtigen Platten, zusätzlich verbessert. Bei großflächigen Dämmarbeiten ohne besondere Anforderung an (Brand-)Beständigkeit sind jedoch Kunststoff-Hartschaumplatten effizienter und wirtschaftlicher einsetzbar. An der Fassade werden die Holzwolledämmplatten verputzt, da sich ihre offene Struktur gut als Putzträger eignet.

Ein anderer Einsatzzweck ist bei Holzdachstühlen als Innendämmung mit dem Vorteil, dass aufgrund der Speichermasse auch Schutz vor sommerlicher Überhitzung, welcher aufgrund von Sonneneinwirkung und Aufbau besonders bei Holzkonstruktionen als problematisch angesehen wird, gegeben ist. Die Platten sind wiederum Diffusionsoffen und gut als Putzträger geeignet.



a
Abb. 21: Arten von Holzwolledämmplatten; a Holzwolledämmplatte; b Sandwichplatte mit Steinwolle;
c Mehrschichtplatte mit EPS Dämmlage

3.1.2.1.2 Tiefgaragenplatten

Ein besonderer Einsatzort von Holzwolle-Dämmplatten sind Tiefgaragen. Dabei dient die Dämmung zur Erreichung der U-Werte der Kellerdecken gegen beheizte Räume. Zementgebundene Holzwolleprodukte eignen sich dafür verstärkt, da sie brandbeständig sind, was aufgrund der möglichen Brandlasten durch Fahrzeuge und Treibstoff überaus relevant ist. Die Platten schützen gleichzeitig auch die Tragkonstruktion vor direkter Einwirkung der Brandlast, was zum Beispiel Abplatzungen bei Betondecken verhindert. Außerdem wird der Schallschutz und die Akustik der Räume verbessert. Die Montage kann durch Mitbetonieren während der Herstellung der Decke oder durch nachträgliche Montage mit Dübeln erfolgen. [24]



Abb. 22: Kleinformatige Akustik-
Paneele

3.1.2.1.3 Akustikplatten im Innenraum

Aufgrund der guten Schallabsorptionsfähigkeit und der Schallschutzeigenschaften von Holzwolle-Platten werden diese im Innenraum zur Verbesserung der Raumakustik eingesetzt. Diese Entwicklung wird begünstigt durch verschiedene Hersteller die ihre Produkte in unterschiedlichen Farben, Formen und Feinheitsgraden der eingesetzten Holzwolle anbieten. Variationen gibt es außerdem in der Montageart (sichtbar / unsichtbar) und der Kantenausführung. Zum Einsatz kommen die Produkte meist in Büroräumlichkeiten, Schulen und öffentlichen Bauten an Wand und Decke.

3.1.2.2 Wandelemente

3.1.2.2.1 Außenwandelement aus Holzwollebeton

Die Konzeptionierung eines Holzleichtbeton-Schalungskörpers für eine tragende Betonstruktur ist ähnlich zu Mantelbetonsteinen. Dabei ist jedoch der Anteil des Betons auf ein Minimum in Form von Stützen und Trägern reduziert. Der HLB übernimmt den Wandabschluss und wird als Dämmung eingesetzt.

Siehe Fallbeispiel Träullit 3.2.1

3.1.2.2.2 Innenwandelement aus Holzwollebeton mit Holzstützen

Die Elemente bestehen aus Holzstützen, die in Holzwollebeton eingegossen sind. Der HLB bildet den Raumabschluss und fungiert als Putzträger. Es wird nur das Eigengewicht der Elemente aufgenommen. Im Gegensatz dazu gibt es auch Elemente mit integrierten Holz-Rundstäben, die als Außenwände von kleinen Nebengebäuden oder Ähnlichem dienen. Diese übernehmen die Kräfte aus dem Dachtragwerk über eine lastverteilende Holzlatte, die die Module gleichmäßig belastet.

Siehe Fallbeispiel Träullit 3.2.1

3.1.2.2.3 Außenwand aus Leichtbeton und Holzwollebeton

Diese Wände bestehen aus einer tragenden Schicht Leichtbeton auf die Holzwollebeton, als Dämmebene, aufgetragen wird. Die Elemente werden im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle versetzt. (vgl. LÜTKETON [3], Seite 59)

3.1.2.3 Sekundärträger-Dachelemente

Ein in Holzwollebeton eingegossener Holz-Rundstab erlaubt die Tragfähigkeit der Dachelemente. Diese werden auf eine primäre Sparren- oder Trägerkonstruktion montiert und überspannen so nur begrenzte Weiten. Sie sind auch als großformatige Tafeln für eine schnellere Montage erhältlich. Siehe Fallbeispiel Träullit 3.2.1

3.1.2.4 Lärmschutzwände

Durch seine Struktur und die damit verbundenen guten Schallschutzeigenschaften eignet sich Holzwollebeton sehr gut als Lärmschutzwand bei Autobahnen, Gleisanlagen oder Ähnlichem. Das Material kommt dabei offen, in unterschiedlichen Oberflächenformen, wie zum Beispiel gewellt, glatt oder texturiert, zum Einsatz. Der Holzwollebeton wird auf eine tragende Konstruktion aus Stahlbeton aufgebracht. Diese kann plattenförmig oder gebogen sein, wobei letzteres zu einem verbesserten Schallschutz führt. Die plattenförmigen Elemente werden zur Montage zwischen vormontierte Stahl-I-Profile eingeschoben.

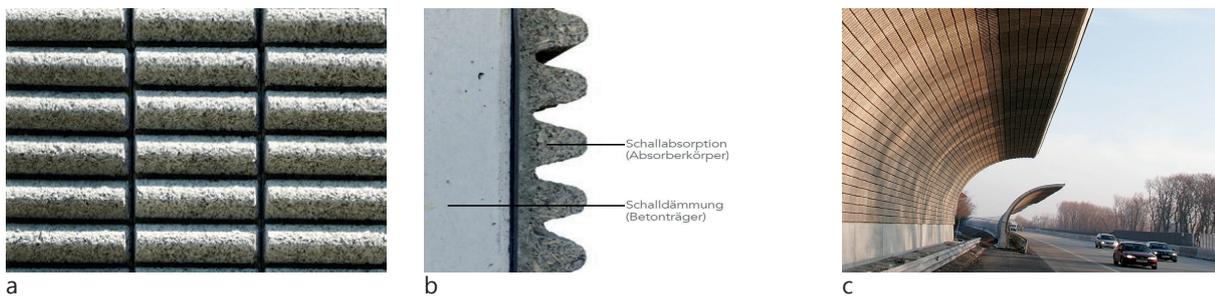


Abb. 23: Lärmschutzwände aus Holzwollebeton; a Offenporige Oberfläche; b Holzwolle auf Trägerbeton; c Schallschutzanlage in gebogener Ausführung

3.1.2.5 Schalungsplatten und Mantelbetonsteine

Analog zu Holzspanbeton kann auch Holzwollebeton herangezogen werden um Schalungsplatten oder Mantelbetonsteine zu erzeugen. Die Wahl der Form des Ausgangsrohstoffes hängt vom Hersteller und dessen Verarbeitungsmethoden ab.

3.1.3 Steinholzbelag

Ogleich die Produktion von Fußbodenbelägen aus Steinholz nur mehr einen Bruchteil ihrer Spitzenleistung um das Jahr 1900 erreicht und es daher eher als historisches Material einzuordnen ist, werden auch weiterhin von einigen Herstellern Steinholzbeläge vertrieben. Diese sind Magnesitgebunden und finden bei Industrieanlagen und teilweise in Küchen Anwendung. Sie weisen Druckfestigkeiten von 40 N/mm² auf und sind beständig gegen Abrieb, Öle, Fette, Lösungsmittel und Bohremulsionen. Außerdem sind sie feuerhemmend und sicher im Hinblick auf Funkenflug. [72]

3.2 FALLBEISPIELE

3.2.1 green:house

Das Projekt green:house wurde an der Bauhaus-Universität Weimar unter der Leitung von Professor Stamm-Teske, der die Professur für Entwerfen und Wohnungsbau innehat, entwickelt. Ziel war es ein Institutsgebäude zum Jubiläum der Universität zu realisieren, anhand dessen Studierende Erfahrungen sammeln und neue Herangehensweisen an übliche Aufgabenstellungen erprobt werden konnten. Entsprechend wird das Gebäude



Abb. 24: Südfassade mit Eingang green:house

als Experimentalbau bezeichnet, da gezielt Baustoffe und Methoden außerhalb der gängigen Normen und Regelwerke ausgewählt wurden. Die Entwicklung des Projekts begann im Jahr 2008. Die Ausführung erfolgte in Zusammenarbeit mit Baufirmen, die Material und Arbeitszeit beisteuerten und dafür die Möglichkeit zum Experiment mit neuen Methoden geboten bekamen. Realisiert wurde der Bau vom Oktober 2010 bis in den Sommer 2011. [34]

Das Gebäude gliedert sich in die vorhandene städtebauliche Planung des Universitätscampus ein. Seine drei Geschosse mit gesamt ca. 480m² Nutzfläche dienen als Arbeitsplätze für Studierende und Mitarbeiter des Lehrstuhls Wohnungsbau. Darüber hinaus wird es im Lehrbetrieb als Anschauungsobjekt für innovative Bauweisen herangezogen und unterliegt einem andauernden Monitoring. [34]

3.2.1.1 Konstruktion

Mit dem Hintergrund des Experimentalbaus hat man sich für den Einsatz von Holzleichtbeton entschieden. Als Partner in der Industrie konnte das Betonwerk Knecht in Metzingen gewonnen werden. Der ursprüngliche Plan die tragenden Bauteile aus HLB zu fertigen musste allerdings zurückgestuft werden. Obwohl es sich bei dem Gebäude um ein Experiment handelt, gab es zu wenig praktische Langzeiterfahrung über die dauerhafte Festigkeit von Holzleichtbeton. Deshalb wurden, im Hinblick



Abb. 25: Wandaufbau Projekt green:house

auf den Schutz der Nutzer, die tragenden Elemente jedenfalls aus erprobten Materialien, im Speziellen einer Holzkonstruktion, gefertigt. [36] Die eingesetzten Holzleichtbetonplatten dienen als Abschluss der Holzbauteile und übernehmen eine aussteifende Rolle. [35 u. 37]

Aufsetzend auf einem Plattenfundament wurde das Gebäude aus insgesamt 26 Fertigteilen errichtet. Diese sind als Holzrahmenelemente mit Hohlraumdämmung, welche beidseitig mit 8cm starken HLB-platten beplankt wurden, ausgeführt. Die Dampfbremse und die Abdichtung

liegen jeweils zwischen Holzkonstruktion und Holzleichtbeton. Die Deckenkonstruktion ist ebenfalls in Holzrahmenbauweise ausgeführt. [35]

3.2.1.2 Holzleichtbeton

Die Zusammensetzung des Holzleichtbetons wurde durch die Betonwerke Knecht unter Federführung des Leiters der technischen Abteilung, Herrn Ing. Klein, entwickelt. Der Wunsch der Universität nach einer Rohdichte von 300kg/m^3 wurde im Hinblick auf die geforderten Eigenschaften der Platten schlussendlich auf ca. 600kg/m^3 abgeändert. Damit konnten eine Festigkeit von $1,75\text{N/mm}^2$ und eine Biegezugfestigkeit von $0,55\text{N/mm}^2$ erreicht werden. [37] Eine wesentliche Herausforderung bei der Erstellung der Rezeptur war es auch die fertigungstechnische Forderung nach möglichst kurzen Abbindezeiten zu erfüllen.

Als Ausgangsstoff wurde Fichtenholz eingesetzt, da dieses eine gute ganzjährige Verfügbarkeit aufweist. Die genauen Mengenverhältnisse können aufgrund des Aufwands bei der Entwicklung durch die Betonwerke Knecht nicht bekanntgegeben werden. Rückschließend aus der Dichte der Platten, deren haufwerksporiger Struktur und im Vergleich zu vorhandenen Produkten liegt der Holzanteil bei etwa 50%.

3.2.1.3 Brandschutz

Für das Gebäude war eine Brandwiderstandsdauer von 30 Minuten gefordert, welche mit den nachträglich brandschutztechnisch zertifizierten Holzbetonplatten, mit der Brandwiderstandsklasse B1, erreicht hätte werden können. Lediglich für die Holzbalkendecken hätte eine Kapselung mit Gipskartonplatten vorgenommen werden müssen. Nutzerseitig waren allerdings Ausstellungsflächen mit glatten, weißen Wänden gefordert, weshalb man vollflächig Gipskartonplatten als raumseitigen Wandabschluss eingesetzt hat. [37]

3.2.1.4 Bauphysik

Der Baustoff Holzleichtbeton wurde gewählt um die Wärmedämmung, den Hitzeschutz und den Schallschutz zu verbessern. Die produzierten Platten weisen ein λ von $0,11\text{ W/mK}$ und eine spezifische Wärmekapazität von 1511 J/kgK auf. Obwohl durch die dunkle Außenfarbe des Gebäudes relativ viel Wärmeeintrag entsteht, wird durch den Baustoff, die geringe Fensterfläche und die kontrollierte Lüftung ein guter sommerlicher Wärmeschutz gewährleistet. Gleichzeitig ist im Winter nur ein kleiner Anteil an zusätzlicher Heizung notwendig. Der Wandaufbau aus einem 18cm Rahmenwerk, welches mit WL 0,035 Dämmung versehen und beidseitig mit 80mm Holzleichtbeton beplankt ist, erreicht einen U-Wert von $0,16\text{ W/m}^2\text{K}$. [37] Die Anforderungen für ein Passivhaus liegen hier bei $0,15\text{ W/m}^2\text{K}$.

Der Schallschutz zeigt sich in der Nutzung als ausreichend. Die Außenwände bieten eine gute Abschottung. Die Zwischendecken hingegen haben einen reduzierten Aufbau, der nur mäßigen Schutz bietet. Während der Rohbauphase wurde subjektiv eine deutlich bessere Raumakustik

wahrgenommen, da noch keine Gipskartonplatten eingebaut waren und die Oberfläche des Holzleichtbetons offen lag. Die vorliegenden Bewertungen der Bauphysik sind empirischer Natur, da während der Bauphase keine finanziellen Mittel für eine Integration von Messtechnik zur Verfügung standen und noch keine wissenschaftliche Analyse während der Nutzung stattgefunden hat. [37]



a



b

Abb. 26: Innenansicht green:house; a Rohbau vor Verkleidung; b Fertiggestellter Innenausbau

3.2.2 Träullit Einfamilienhäuser

Die Firma Träullit stellt seit 1946 Platten aus zementgebundener Holzwolle her, die vor allem in Schweden, aber auch in Norwegen, Finnland, Island und den Niederlanden vertrieben werden. Seit 2004 werden auch komplette Außenwandmodule produziert, die meistens für den Bau von eingeschossigen Wohnbauten Verwendung finden. Das System kann aber auch für größere



Abb. 27: Einfamilienhaus von Träullit in Sommen

Außenwandkonstruktion herangezogen werden, wie zum Beispiel bei einer Sporthalle in Rotebro. Daneben werden vorgefertigte Innenwandelemente, Dach(-Sandwich-)Konstruktionen, Lärmschutzelemente, Akustikelemente für den Innenraum, abgehängte Decken, Dämmungen und Putzträger hergestellt. Bisher wurden etwa 300 Projekte mit dem Bausystem für Außen- und Innenwände realisiert. [38] Anhand eines von Träullit dokumentierten Beispielprojektes lässt sich das Konstruktionssystem anschaulich erklären.

Die Außenwandelemente haben eine Stärke von 40 cm und sind individuell in einer Größe bis 260 x 600 cm herstellbar. Für größere Öffnungen werden auch eigene Körper für Überlager hergestellt. Träullit bietet einige Entwürfe, beziehungsweise Grundrissvarianten, die vom Architekten Matthias Rückert entwickelt und betreut werden. Deren Errichtung erfolgt mit standardisierten Elementen. [39] Die Wandbauteile werden mittels LKW auf die Baustelle

transportiert und mit einem Kran versetzt. Während des Aufbaus erfolgt die Verbindung der Elemente untereinander mit Haken, die eingeschlagen werden. Außerdem werden die Wände mit schräggestellten Montagestützen senkrecht einjustiert. Der endgültige Zusammenschluss geschieht über einen aus Beton gegossenen Ringanker/ Träger. [40]



a



b

Abb. 28: Innenwandelemente; a Aufbau; b Montage

Die Innenwandelemente bestehen aus zwei Holzstützen, die in zementgebundene Holzwolle eingegossen sind. Bei der Montage wird zuerst eine Feuchtigkeitssperre auf die Bodenplatte aufgebracht und darauf ein Metall-U-Profil befestigt. Die Wandbauteile stehen in den Profilen und werden seitlich jeweils bei den Holzstützen mit ihnen verschraubt. Bei der Montage sind die Positionen der Stützen leicht zu erkennen, da sie sich durch eine dichtere Struktur des Holzbetons an der Außenseite der Elemente abzeichnen. Beide Elementtypen eignen sich aufgrund ihrer Oberflächenstruktur gut als Untergrund für darauf aufzubringende Putzsysteme. [40]

3.2.2.1 Konstruktion

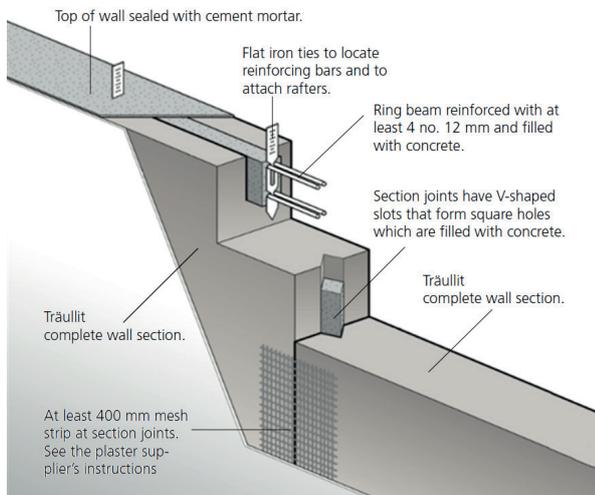


Abb. 29: System Träulit Wandelementbauweise

Die Außenwände können Lasten von etwa 27 KN pro Laufmeter abtragen. [41] Ihre wesentliche Aufgabe ist als Wärmedämmung, Raumabschluss und Putzträger zu fungieren. Die Lastabtragung erfolgt über ein System aus Stützen und Träger. Die Wandelemente sorgen dabei für die notwendige Aussteifung der Konstruktion. In den Wandelementen, vor allem an den Anschlüssen zwischen den Elementen, sind V-förmige Vertiefungen ausgenommen, die als Schalung für die Stützen dienen. Im oberen Bereich ist umlaufend eine

rechteckige Aussparung vorgesehen, die als Schalung für den Ringanker konzeptioniert ist. Dieser wird auch als Träger für die Dachkonstruktion herangezogen. [40]

Die Wandelemente werden auf der Bodenplatte in Mörtel versetzt. An den Schalungspositionen für die Stützen werden anschließend Bewehrungsseisen zur Verbindung von Stütze und Bodenplatte in die Bodenplatte eingebohrt. In die Schalung für den Ringanker werden Metallbleche eingeschlagen, welche Ausschnitte für vier Bewehrungsstäbe haben und später als Befestigung für die Dachträger dienen. Nachdem die Bewehrung verlegt ist werden die Schalungen mit Beton verfüllt. Der hier dargestellte Prozess des Aufbaus ist möglichst einfach

und standardisiert konzipiert, damit die Errichtung der Außenwände eines Einfamilienhauses innerhalb eines Tages möglich ist. [40]

Die Lasten des Dachtragwerks werden über den Ringanker/ Träger in die Stützen eingeleitet und von diesen in die Bodenplatte abgegeben. Die Dachkonstruktion wird in Holzbauweise als Holz(-Fachwerk-)Trägern bei Flachdächern oder mit Holzsparren bei Steildächern ausgeführt. Darauf kann das Träullit Dachelement als Sekundärtragwerk, sowie ein Sandwichelement mit Wärmedämmung aufgebracht werden. Ersteres ist, im Aufbau ähnlich der Zwischenwand-Konstruktion, ein Element mit den Abmessungen 60 x 239 x 15 cm und besteht aus zementgebundener Holzwolle, in die zwei Holz-Rundstäbe eingelassen sind. Es wird seit ca. 40 Jahren als Sekundärtragwerk für diverse Gebäude genutzt. In Kombination mit dem Wandsystem kommt es zum Beispiel bei einem Kindergarten zum Einsatz, wo die Elemente unverputzt für eine gute Raumakustik sorgen. Die Platten werden in zwei Varianten produziert, die Lasten von 2,6 KN/m² bzw. 5,3 KN/m² aufnehmen können. Das Sandwichpanel hingegen besteht aus 55 mm Polystyrolschaum mit einer 15 mm starken Schicht zementgebundener Holzwolle als äußerem Abschluss. [42]



Abb. 30: Aufbau Träullit Dachelement

3.2.2.2 Holzleichtbeton

Aus der Umweltdeklaration des Herstellers geht hervor, dass die Bauteile im fertigen Zustand aus 35% FSD-zertifizierten Tannenholz in Form von Holzwolle, 48% Portlandzement und 17% Kalkstein bestehen (Gewichtsprozent). Bei der Herstellung werden außerdem CO₂ und SO₂ freigesetzt und Energie im Ausmaß von 3,08 MJ/kg, sowie Holzhackschnitzel im Umfang von 0,08 MJ/kg verbraucht. [43] Das Werk für die Bauteile wurde von Eltomation, einem Generalunternehmer für Produktionslinien für Holzleichtbetonfabrikate aus den Niederlanden, errichtet. Dieser gibt an, dass bei der Herstellung der Produkte etwa gleichviel Wasser wie Holzwolle zugegeben wird. [44]

Die Dichte des Materials liegt bei etwa 330 kg/m³. Zusätzliche Öffnungen für Fenster oder für Leitungsinstallationen können mit einer Handkreis- oder Motorsäge hergestellt werden. [39] Der Baustoff kann nach der Nutzungsphase wieder als Ausgangsstoff, mit verminderten Eigenschaften, herangezogen werden. Ansonsten ist er als Füllstoff recyclebar oder deponierbar.

3.2.2.3 Brandschutz

Das Material ist in Schweden mit dem Brandverhalten der Oberflächenklasse 1 eingeordnet. Das entspricht einem Brandverhalten laut EN von B-s1, d0, schwerentflammbar. Die Außenwandbauelemente haben eine Brandwiderstandsdauer von REI 360. Die Deckenelemente hingegen erreichen die Brandwiderstandsklassen REI 30 bis REI 60, je nach gewählter Konstruktion. [39]

3.2.2.4 Bauphysik

Der U-Wert der Wandkonstruktion liegt bei $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, wobei die Wärmespeicherkapazität $375 \text{ KJ/m}^2\text{K}$ beträgt. Um vergleichbare Werte mit einer typischen Wand aus Hochlochziegel zu erreichen benötigt man etwa 10 cm mehr Wandstärke. Die Luftdurchlässigkeit des Materials liegt bei ca. $20 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{hPa}$. Dadurch wird die Austrocknung des eingegossenen Betons begünstigt. Allerdings muss eine Abdichtung bei den Anschlüssen zu Fenstern und dem Dachstuhl angebracht werden. [39]

3.3 WISSENSCHAFTLICHE ANSÄTZE

Im Hinblick auf die Schonung nicht nachwachsender Ressourcen, wie Sand, sowie anderen ökologischen Faktoren und auf mögliche Konstruktionsvorteile, wie Gewichtsreduktion oder Brandsicherheit, wurde und wird der Baustoff Holzleichtbeton erforscht. Im Rahmen dieser Tätigkeit wurden diverse Ansätze entwickelt und daraus Konstruktionen abgeleitet. Diese sind im Hinblick auf bestimmte Eigenschaften abgestimmt und untersucht. Dabei fanden auch Untersuchungen an realisierten Konstruktionsprobekörpern, von zum Beispiel Deckenelementen, statt. Die folgende Zusammenfassung bildet einen Ausschnitt der erprobten Ansätze, deren wissenschaftliche Dokumentation verfügbar ist. Aufgrund der diversen Forschungen, die weltweit seit über einem Jahrhundert stattfinden, kann die vollständige einer solchen Übersicht nicht garantiert werden.

3.3.1 Gebäudefassade

Dieser Ansatz wurde von Krippner 2004 in seiner Dissertation an der TU München vorgestellt und seither weiter bearbeitet. Aufbauend auf einer Analyse der Festigkeits- und Wärmedämmeigenschaften und im weiteren der Beständigkeit und Verarbeitbarkeit wird untersucht in wie weit Holzleichtbeton in der Fassade Anwendung finden und wie ein thermisch aktives Bauteil mit HLB realisiert werden kann um solare Zugewinne nutzbar zu machen. Die Untersuchungen erfolgten dabei Anhand von virtuellen Gebäudesimulationen und realen Funktionsmodellen. Die thermisch aktiven Bauteile waren bei den Versuchen aufgrund der Leistung von lediglich bis zu 3% des jährlichen Heizwärmebedarfs während der Heizperiode mäßig erfolgreich. (vgl. [2, S.76f.])

Weitergehende Untersuchungen zur Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien (PCM, Parafine) hingegen konnten zeigen, dass diese keine negativen Auswirkungen auf die Druckfestigkeit haben und sich positiv auf die thermische Speicherfähigkeit des Bauteils auswirken. Innerhalb der Gebäudesimulation zeigte sich, dass eine wesentliche Verbesserung der Raumsituation allein durch den Einsatz von Holzleichtbeton stattfindet und durch zusätzliches PCM-Material die weitere Optimierung nur geringfügig vorangetrieben wird. Die Simulation erfolgte Anhand eines Bürogebäude, bei dem die Materialien als Trennwände vorgesehen wurden. (vgl. [2, S. 129-137]) Als Außenwandkonstruktion stellt

Krippner die Verbindung von Holzleichtbeton mit Brettstapelholzplatten vor. Dabei werden die bekannten und erprobten konstruktiven Eigenschaften der Brettstapelholz-Elemente genutzt und mit den positiven wärmetechnischen Aspekten von Holzleichtbeton kombiniert. Der HLB kann dabei Raum- und Außenseitig angebracht werden.

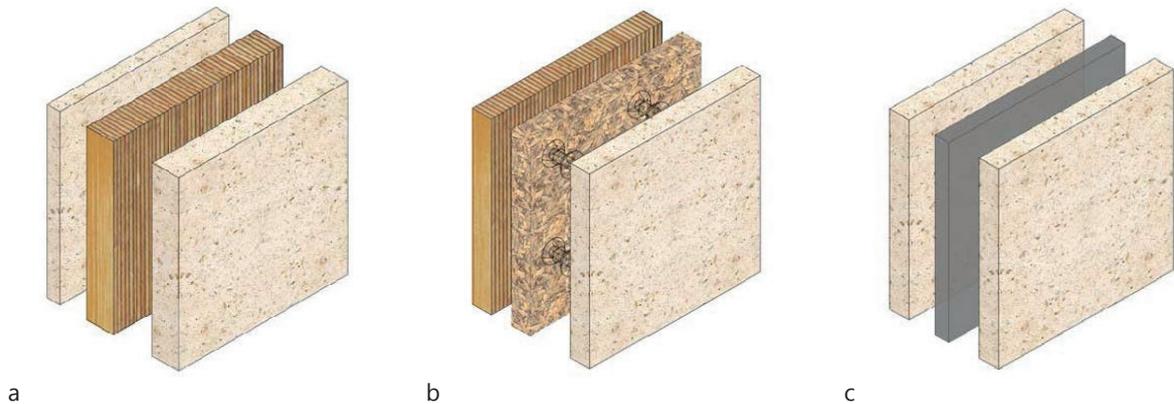


Abb. 31: Ausgewählte Wandaufbauten laut Krippner; a Speichermasse innen und Wärmedämmung außen (HLB+BS+HLB); b Wärmedämmung außen mit Zusatzdämmung (BS+WD+HLB); c Nichttragendes Wandpaneel (HLB+Vakuum-Dämmplatte+HLB)

Weiters wird von Krippner gezeigt, dass beim Einsatz an der Fassade großer Gestaltungsspielraum durch adaptierbare Farbigkeit des Materials und durch die dreidimensionale Formung der Oberfläche, bei der Zugabe von Fließmitteln und unter der Verwendung von konventionellen Schalungsmatrizen, besteht. [2, S. 146-156] Im Gegensatz zu zementgebundenen Spanplatten, die bereits als Fassadenplatten verfügbar sind, übernehmen die vorgestellten Holzleichtbeton-Fassadenelemente neben schützenden Aufgaben auch bauphysikalische Aspekte. Diese können durch zusätzliche Dämmschichten oder einer Ausführung als Massivabsorber zur thermischen Aktivierung weiter verbessert werden.

Die Aufbauten von Krippner sind auch von Pomberger in ihrer Diplomarbeit 2015 an der TU Wien herangezogen worden. Darin werden anhand eines Referenzobjektes diverse Bauteile auf ihre ökologischen Faktoren hin untersucht. Aus der Analyse wird ersichtlich, dass gegenüber einer Bauweise in Stahlbeton mit diesen Außenwandaufbauten bei ähnlichen U-Werten ein Gewicht von nur einem Drittel, bei weniger Bauteilstärke, und eine deutlich besserer ökologische Bewertung nach OI3 erreicht wird. Im Vergleich zu einer Holzrahmenbauweise ist das, generell dennoch geringe, Gewicht der Konstruktion in Holzleichtbetonbauweise doppelt so hoch, bei sonst ähnlichen Werten. [20, S. 59 u. 63ff.] Auch in dieser Arbeit wird der Vorteil einer Fassadenoberfläche aus Holzleichtbeton aufgezeigt, kann aber nicht in Relation zu anderen Lösungen gesetzt werden, da die Erfahrungswerte für die Lebensdauer bei Bewitterung nicht ausreichend vorhanden sind.

3.3.2 Decken

3.3.2.1 Verbund mit Massivholzdecken

Der Verbund von konventionellem Beton mit Holz ist im Bereich der Deckensysteme ein junger aber bereits erprobter Ansatz. Eine Möglichkeit diese auszuführen ist mit Massivholz-(Brettsperrholz-)Platten auf die eine Betonschicht gegossen wird. Dabei übernimmt im Wesentlichen die Holzplatte die auftretenden Zugspannungen und die Betonschicht die Druckspannungen. Um die beiden Tragschichten zu verbinden und eine Verbundtragwirkung zu erzielen werden metallische Platten, Schrauben oder ähnliches eingesetzt. Der Vorteil im Einsatz von BSP für eine Holz-Beton-Verbunddecke besteht darin, dass die Holzplatte bereits eine gute Tragfähigkeit vor dem Verbund besitzt, was hilfreich für die Montage ist. Gleichzeitig dient sie als Schalung. Ein Ansatz zur Verbesserung dieses Systems mithilfe von Holzleichtbeton, der im Rahmen mehrerer Arbeiten am Institut für Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau der TU Wien behandelt wurde, besteht darin diesen als Zwischenschicht einzusetzen. Dadurch werden die stark belastbaren Materialien Holz und Beton in der Zug- beziehungsweise Druckzone konzentriert und damit besser ausgenutzt. Vergleichbar zu einem I-Träger ist die Mittelzone, in der der Holzleichtbeton zum Einsatz kommt, nur relativ schwach beansprucht.

Die wesentliche Herausforderung des Aufbaus stellt die Kraftübertragung zwischen den unterschiedlichen Materialien dar. Der Aufbeton kann gut in die Poren der eingesetzten Holzleichtbetonplatten eindringen und sich somit mit ihnen verbinden. Je nach Belastung können aber auch zusätzliche Verbindungsmittel notwendig werden. Für die Verbindung zwischen HLB und Massivholzplatte dagegen ist der reine Verguss nicht ausreichend belastbar. Auch werden vorgefertigte Holzleichtbetonplatten eingesetzt. Folgende, erfolgversprechende Ansätze zur kräfteübertragenden Kopplung der Schichten werden von Schernberger [27], Kirchmayer [45] und Hofer [46] vorgestellt:

- Verschraubung: Eine vorgefertigte Holzleichtbetonplatte wird mit der BSP-Platte verschraubt. Die Schrauben werden dabei in einer 45° Neigung eingeschraubt, was zu einer verbesserten Übertragung der Kräfte führt. Wichtig dabei ist eine gleichmäßige Verteilung einer hohen Anzahl von Schrauben.
- Verklebung: Eine Klebeschicht wird auf die BSP-Platte aufgebracht und anschließend vorgefertigte Holzleichtbetonplatten aufgeklebt. Durch die gleichmäßige, vollflächige Verteilung des Verbindungsmittels wird eine gute Kraftübertragung erzielt.
- Lattung: Auf die BSP-Platte werden mit Schrauben unter einem 45° Winkel Holzlatten normal zur Krafrichtung montiert. Die Latten müssen nicht gleichmäßig über die Platte verteilt sein sondern können im Mittelbereich entfallen und im Randbereich konzentriert werden. Anschließend wird eine Holzleichtbetonschicht aufbetoniert. Die abschließende Betonschicht für die Druckzone wird auf den feuchten HLB aufgebracht. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass auf eine ausreichende Verdichtung bei den Latten geachtet werden muss. Außerdem waren die Probekörper mit vor Ort hergestelltem Holzleichtbeton weniger

stark belastbar, als jene mit industriell vorgefertigten Holzleichtbetonplatten.

Als Abwandlung des Systems kann man die von Schernberger vorgestellte Kombination mit, und tragwerkstechnische Ertüchtigung von Dippelbaumdecken sehen. Diese werden üblicherweise bei Dachgeschossausbauten mit einer Aufbetonschicht versehen, um gängige Anforderung an Nutzlasten, Schall- und Brandschutz zu erzielen. Dabei erfolgt der Einsatz von Holzleichtbeton als Zwischenschicht, welche über die Funktion der derzeit fallweise eingesetzten Leichtbetonschichten als Schallschutz hinaus, zur weiteren Ertüchtigung der Tragfähigkeit der Decke dient.

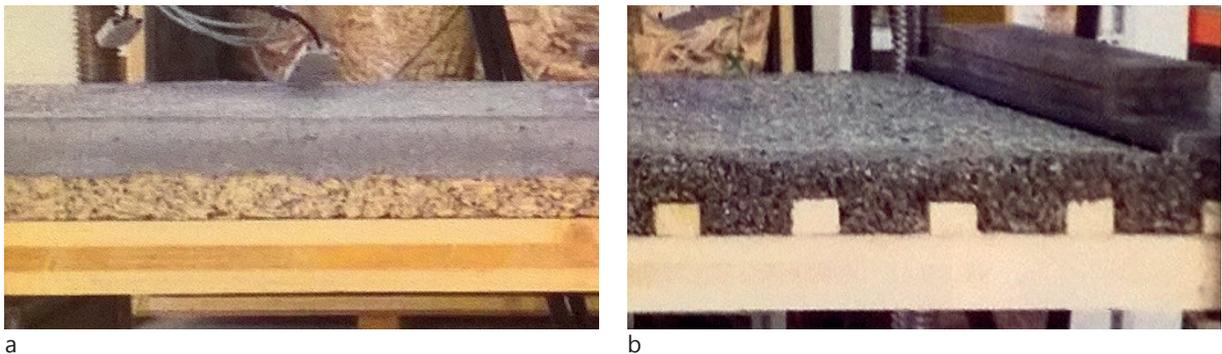


Abb. 32: Aufbau Brettsperrholz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecke; a Schichtverbindung mittels Verschraubung; b Kraftübertragung mittels Lattung, ohne Aufbetonschicht

Ausgehend von den tragwerkstechnischen Untersuchungen wurde die Holz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecken von Pipoh [22] auf ihre Wirtschaftlichkeit hin analysiert. Dabei zeigten sich im Vergleich zu konventionellen BSP-Beton-Verbunddecken deutlich höhere Herstellungskosten von 188,14€/m² zu 114,02€/m². Diese werden einerseits durch die zusätzliche Brandschutzverkleidung unterhalb der BSP-Platte bei der HLB-Konstruktionsvariante mit einem Preis von 35€/m² und andererseits durch die, in Relation zu den anderen, hauptsächlich lastabtragenden Baustoffen, hohen Kosten für die eingesetzten Holzleichtbetonplatten der Firma VELOX bedingt. Letztere sind mit 52,50€/m² das zweit teuerste Element hinter der BSP-Platte mit 67,75€/m². Verglichen wurde ebenfalls eine Stahlbetondecke, welche um 106,91€/m² am günstigsten hergestellt werden kann. [22, S.88-99]

Im Hinblick auf den Umweltschutz ist eine reversible Verbindung der Bauteilschichten einer dauerhaften Verklebung vorzuziehen, da somit nach der Nutzungsphase die Materialien getrennt verwertet werden können. In den Ausführungen von Pomberger [20] zur Ökologie eines solchen Bauteils wurde ein Vergleich von typischen Konstruktionen anhand eines Referenzgebäudes durchgeführt. Bei dem Vergleich der Kennwerte lässt sich dabei ein Einsparungspotenzial an CO₂-Ausstoß gegenüber einer Stahlbetondecke und auch gegenüber einer Holz-Tramdecke erkennen. Allerdings ist gleichzeitig der Primärenergieinhalt gleich hoch wie bei STB-Decken und somit deutlich höher als bei reiner Holz-Bauweise. Dies liegt an den eingesetzten BSP- und HLB-Platten. Über die Ökologie hinaus erkennt man in der Arbeit außerdem, dass die Dicke der HLB-Decke mit 33cm gegenüber 20cm deutlich über jener der Stahlbetondecke

liegt. Das Gewicht der Decke liegt mittig zwischen Holz- und STB-Bauweise. [20, S.87-91] Das führt gegenüber Holz zu einem besseren Schallschutz und gegenüber Stahlbeton zu einer Gewichtseinsparung.

3.3.2.2 Verbund mit Holzträgern

Alternativ zu Massivholzplatten werden HBV-Decken auch durch die Kombination von Holzträgern und Beton-Platten(-Elementen) erzeugt. Diese liefern architektonisch ansprechende und bautechnisch durchdachte Lösungen, wie zum Beispiel beim Illwerke Zentrum Montafon in Vorarlberg durch Hermann Kaufmann Architekten. Bei diesem System übernehmen die Holzträger die Zugkräfte und überbrücken hohe Spannweiten und die Aufbetonschicht übernimmt Druckkräfte und spannt zwischen den Trägern. Die Kraftübertragung zwischen den Elementen geschieht über in das Holz eingeschlitzte Bleche oder Schrauben. Der Einbezug des Holzleichtbetons in diese Bauweise erfolgt in erster Linie als Schalungsplatte, die zusätzlich zur Verbesserung des Schallschutzes und zur Gewichtsreduktion herangezogen wird. Die Bearbeitung dieser Thematik erfolgt durch Haximustafa im Rahmen einer Dissertation an der Universität von Belgrad. Die zugehörigen Belastungsversuche an Probendeckenabschnitten wurden in Kooperation mit der TU Wien durchgeführt.

Das gewählte System besteht aus zwei keilförmigen Trägern zwischen die mittig Holzleichtbetonplatten eingelegt werden. Darauf wird eine Estrichschicht, die bündig mit der Oberkante der Träger abschließt, aufgebracht. Die Verbindung zwischen Holz, HLB und Beton erfolgt dabei durch Schrauben die seitlich durch die Träger in den HLB eingebracht werden und durch den Verguss mit Beton. Zusätzlich sind abschnittsweise Stahl-U-Profile in der Druckzone eingesetzt, die eine direkte Kraftverbindung zwischen Beton und Holz herstellen. Die Profile sind in Aussparungen im Holz versetzt und mit Beton vergossen. Sie dienen außerdem während der Montage zur Stabilisierung der beiden Träger. Nach ersten Versuchen wurde im Rahmen der Optimierung des Systems die Betonschicht erweitert und die Schrauben unter einem 45° Winkel zur direkten Verbindung von Holz und Beton eingesetzt. Bei einer mittig aufgebrachten Last zeigte sich im Verformungsverhalten, dass die Betonplatte zu den Auflagern an den Rändern hin verschoben wurde. Dabei haben sich die U-Profile verformt und in den Holzträger gepresst, sowie die Schrauben in das Holz hineingezogen. Das Versagen des Systems findet in der Druckzone durch die relativ dünne Betonschicht statt, wodurch in weiterer Folge die Träger stärker belastet werden und ebenfalls versagen. Der Holzleichtbeton nimmt konstruktiv nur eine untergeordnete Rolle ein, ist allerdings relevant für die und belastet während der Montage.

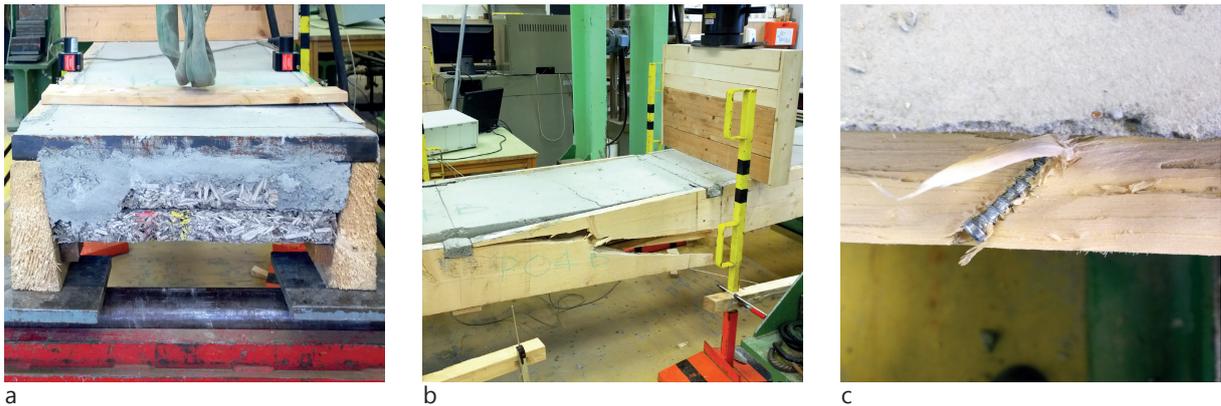


Abb. 33: Belastungsversuche Holzträger mit Holzleichtbeton- und Beton-Verbund; a Aufbau eines Versuchskörpers mit Stahlprofilen; b Bruchversagen im Belastungsversuch; c Verformung Hineinziehen der Schraube in das Holz durch Belastung

3.3.3 Wände

3.3.3.1 Kombination und Verbund mit Massivholzplatten

Der Einsatz von Holzleichtbeton in Verbindung mit Massivholzplatten kann einerseits im Hinblick auf brandschutztechnische, wärmedämmende oder generell schützende Aufgaben erfolgen. Andererseits, teilweise zusätzlich zu diesen Nutzungen, kann das Material statisch wirksam für die Lastabtragung herangezogen werden. Diese Anforderungen schlagen sich im verwendeten Holzleichtbeton(-Produkt), den Verbindungsmitteln und den Bauteilanschlüssen nieder. Durch Druckbelastungsversuche wurde von Setoodeh Jahromy [47] (betreut durch A.Fadai)

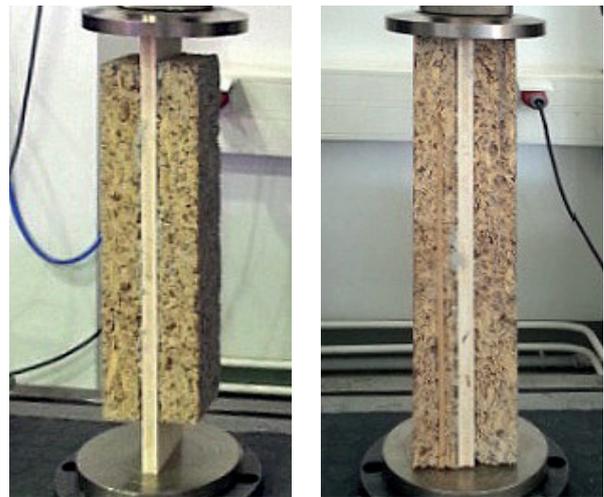


Abb. 34: Druckversuche mit BSP-HLB Kombinationen; a HLB nicht direkt druckbelastet; b HLB direkt druckbelastet

gezeigt, dass der Verbund von Brettsperrholz mit Holzleichtbetonplatten einen positiven Einfluss auf die maximale Belastbarkeit ausübt. Diese stieg im Mittel der Testergebnisse von 29,8KN auf 72,19KN. Dabei wurden Brettsperrholzplatten mit gleicher Schichtdicke belastet, beziehungsweise verglichen. Die Verbesserung wurde mit beidseitig aufgeklebten HLB-Platten, die zum Erreichen des Maximalwerts ebenfalls druckbelastet wurden, durchgeführt. Demnach kam es zu einer Vergrößerung der Gesamtdicke des Probekörpers aber nicht zu einer Erhöhung des Holzquerschnittes. [47, S.51-56]

In weiterer Folge wurde von Setoodeh Jahromy eine Berechnungsmethode für einen Tragfähigkeitsnachweis für ein solches Verbundwandelement auf Grundlage des Gamma-Verfahrens erarbeitet. Die Anwendung der Berechnung auf Holzleichtbetonmischungen von Natterer der EPF Lausanne/I-Bois zeigte, dass für den Einsatz im gewählten Szenario eines

5-geschossigen Wohngebäudes Mischungen mit geringen Holzanteilen verwendet werden können. Dadurch werden Verbesserungen der Tragfähigkeit der BSP-Platte von bis zu 50% erreicht. Die Schichten sind dabei außenliegend je 3,5cm HLB und ein 10cm BSP Kern, die untereinander vollflächig verklebt sind. [47, S.96ff.]

Alternativ oder zusätzlich kann Holzleichtbeton herangezogen werden um eine Massivholzplatte vor direkter Brandeinwirkung zu schützen. Bei einem konstruktiven Einsatz ist in diesem Zusammenhang die Abbrandgeschwindigkeit von Holzleichtbeton zu beachten, die für eine Platte der Firma Velox mit einer Dichte von 750kg/m^3 bei etwa 1mm/min liegt. (vgl. Radlherr [18], S. 81f.) Entsprechend wird, je nach Brandwiderstandsdauer und geforderter Resttragfähigkeit, eine zusätzliche Kapselung zum Schutz des tragenden Holzleichtbetons notwendig. Für Massivholzwände ohne HLB-Tragwirkung hat Radlherr Brandversuche zu einer möglichen Kapselung der Holzschicht durch genannte VELOX-Platten angestellt. Die Ergebnisse zeigen dabei, dass für eine 90 minütige Kapselung eine Schichtdicke von mindestens 5,2cm und für 30 Minuten nur etwa 3cm notwendig sind. Die Problematik dabei ist die Fugenausbildung und die Befestigung mittels Schraubung, die eine zweilagig versetzte Anordnung der Platten notwendig macht. [18, S.127ff.]

Der beidseitige Einsatz von HLB ist auch im Hinblick auf Wärmedämm- und -speicherfähigkeit vorteilhaft. Zur Reduzierung der Bauteilstärke unter Beibehaltung guter Dämmeigenschaften wird zwischen Holz und Holzleichtbeton an der Außenseite eine Dämmschicht angebracht. Wie bei Pomberger [20] aufgezeigt kann diese ebenfalls aus Holzwerkstoffen bestehen. Durch die Anbringung hinter der äußeren HLB Schicht ist die Dämmung gegen Umwelt- und mechanische Lasten geschützt. Die Anordnung einer HLB-Ebene im Innenraum verbessert die Wärmespeicherung des Bauteils. Die ökologische Auswertung durch Pomberger ist ähnlich wie bei Massivholz-HLB-Deckensystemen bis auf die Variante 3c, in der eine Vakuumdämmplatte eingesetzt wurde, die einen höheren Primärenergieinhalt bewirkt. [20, S.63ff.] Im Hinblick auf den Schallschutz ist die zusätzliche Masse des HLB für die BSP-Wandkonstruktion jedenfalls förderlich. Dies ist vor allem bei Innenwänden, beziehungsweise Wohnungstrennwänden relevant.

3.3.3.2 Beplankung von Holzständerwerken

Der Einsatz von Holzleichtbeton bei Holzständer- oder Holzrahmenwänden verbessert vor allem die Speicherkapazität und den Schallschutz des Bauteils durch die zusätzliche Masse, die damit eingebracht wird. Dadurch wird die typische Problematik der sommerlichen Überhitzung bei der Holzleichtbauweise abgeschwächt. Zusätzlich kann der HLB zur Aussteifung der Wände herangezogen werden. Das System wurde beim Projekt green:house der Universität Weimar eingesetzt (Siehe Fallbeispiel 3.2.1., S.30ff.). Dabei wurde nicht auf ein vorhandenes HLB-Produkt zurückgegriffen, sondern in Zusammenarbeit mit einem Betonwerk eine eigene Mischung entwickelt. Die Kosten für einen vergleichbaren Aufbau wurden von Pipoh mit

114,52€/m² angegeben. [22, S.127ff.] Wenngleich die von ihm vorgeschlagene Verwendung als einfache Trennwand ökonomisch nicht sinnvoll erscheint, ist doch eine Nutzung als Wohnungstrenn-, oder Außenwand vorstellbar. Obwohl dabei teilweise zusätzliche Schichten, wie eine Dampfbremse und die Fassadenabdichtung, miteinbezogen werden müssten, lässt sich eine Konkurrenzfähigkeit mit üblichen Wandsystemen ableiten.

3.3.3.3 Holzverstärkte Holzleichtbetonwände

Im Zuge der Arbeit von Setoodeh Jahromy [47] wurde an der TU Wien eine Patentrecherche über Holzleichtbeton durchgeführt. Dabei wurden Patente zu Systemen, bei denen lastabtragende Holzteile in eine Betonstruktur eingebettet sind, dokumentiert. Diese finden sich erstmals in einem Patent von Kuppelwieser aus dem Jahr 1924. Damals wurde der Vorteil dieser Methode im Zusammenhang mit zylindrischen Formen gesehen, die so einfacher hergestellt werden können. Im Zuge der weiteren Entwicklung entstehen Überlegungen zur Kombination von Holztragwerken mit Holzleichtbeton. Die Vorteile, die dabei gesehen werden sind die Diffusionsoffenheit, die Versteifung des Gefüges, die einfache Ver- und Bearbeitbarkeit und der Schutz des innenliegenden Holzes vor äußeren Einflüssen. Im Wesentlichen gibt es dabei drei Ansatzpunkte diese Kombination herzustellen:

- Holzständer, die mit und ohne diagonal oder horizontal dazu verlaufende Holzverstrebungen ausgeführt sind, werden mit einem Holzleichtbeton vergossen.
- Holzleichtbetonfertigteilelemente werden mit passgenauen Aussparungen für Holzständer vorgefertigt und auf diese montiert.
- Die Zwischenräume eines Holzfachwerks werden, anstatt wie üblich mit Ziegel, Leichtbausteinen oder dergleichen, mit Holzleichtbeton vergossen oder es werden Holzleichtbetonfertigteile eingesetzt, die gegebenenfalls über ein Nut-Feder-System fixiert sind.

[47, S.120-168]

Die vorgestellten Systeme zielen darauf ab, tragende Wände herzustellen, bei denen das Holz die hauptsächliche Lastabtragung gewährleistet und der Holzleichtbeton schützend, wärmedämmend und fallweise aussteifend wirksam wird. Ein vergleichbares System, allerdings für nicht-tragende Innenwände und Sekundär-Dachtragelemente, wird von der Firma Träulit bereits produziert und eingesetzt. (vgl. Fallbeispiel 3.2.2., S.33)

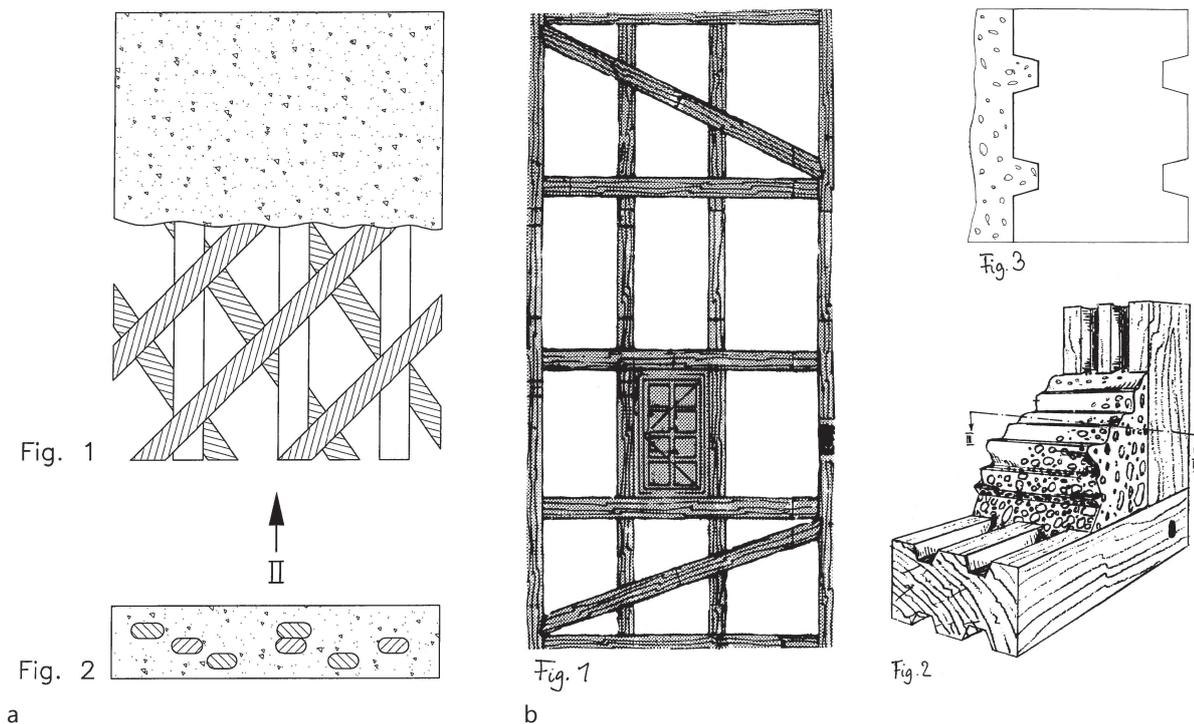


Abb. 35: Varianten von Holzverstärkten Holzleichtbetonwänden; a Holzständer mit Diagonalverstrebung in HLB-Verguss; b Holzfachwerk mit HLB-Füllung in vorgefertigten Nuten

3.4 BEOBACHTUNGEN AUS DER RECHERCHE

Im Zuge der Recherchen ist aufgefallen, dass Hersteller generell vor allem leichte Bearbeitbarkeit und gute (Brand-)Beständigkeit als Vorteile ihrer Holzleichtbetonprodukte hervorheben. Darüber hinaus wird im Vergleich zu konventionellem Beton das geringe Gewicht und im Vergleich zu Holzprodukten die Beständigkeit vermarktet. Die Themen Wärme- und Schallschutz treten je nach Einsatzzweck des Produkts in den Vordergrund. Die Entwicklung der Systeme geht ausgehend von kleinteiligen, flexiblen Strukturen zu vorgefertigten Elementen, die mit anderen Materialien, wie zum Beispiel zusätzlicher Wärmedämmung, kombiniert werden. Dies geschieht im Hinblick auf eine Reduzierung der gesamten Systemkosten, einer besseren Abstimmung auf größere Bauvorhaben und Einsparungspotenziale in der Montagezeit.

Auffallend ist, dass es keine Produkte gibt, bei denen Holzleichtbeton statisch wirksam oder als primäre Tragkonstruktion eingesetzt wird. Wenngleich manche Produkte hinsichtlich Druck- oder Biegezugfestigkeit geprüft sind, fällt die tragende Rolle stets Holz- bzw. (Stahl-)Betonelementen zu. Selbst beim Experimentalbau green:house konnte das Ziel des Einsatzes von HLB als tragendes Material nicht verwirklicht werden, da die Sicherheitsbedenken des ausführenden Betonwerks zu groß waren. Die Problematik liegt hier in fehlenden Erfahrungswerten über die Festigkeitsentwicklung von Holzleichtbetonen unter Langzeitbeanspruchung. Auch gibt es keine Experimentalbauten oder Versuchspavillione, wie bei vergleichbaren Materialentwicklungen, anhand derer die Leistungsfähigkeit überprüft und demonstriert wird.

4 EINORDNUNG DES MATERIALS

Durch die vorgestellten, mannigfaltigen Produkte und Lösungen mit Holzleichtbeton zeigt sich, dass ein Potenzial innerhalb des Materials erkannt und teilweise bereits genutzt wird. Die Fragen der Wissenschaften in diesem Zusammenhang sind, ob und wie sich der Stoff darüber hinaus einsetzen lässt. Ersteres wird von vorhandenen Publikationen stets bejaht und entsprechende Ansätze für Zweites aufgezeigt. Diese werden aber nur zögerlich in die Baupraxis übernommen. Dies liegt zum Einen sicher daran, dass genügend erprobte Materialien und Systeme zu Verfügung stehen. Andererseits drängt sich die Frage auf, inwieweit Holzleichtbeton mit diesen Systemen konkurrieren kann. Daher ist es zunächst relevant, eine Einordnung von bekannten HLB-Lösungen innerhalb gängiger Bauarten mit Stoffen wie Stahlbeton, Holz oder Ziegel vorzunehmen. Dadurch können die Vorteile, aber auch Nachteile des HLB erkannt und dargestellt werden. Außerdem ist es dabei möglich Bereiche zu finden, hinsichtlich derer das Material optimiert werden kann, um besser konkurrenzfähig zu sein. Damit ist diese Betrachtung auch eine Basis zum Erarbeiten von weiteren Einsatzmöglichkeiten des Holzleichtbeton.

Die Methodik gliedert sich dabei in zwei Segmente. Der erste, umfangreichere Teil ist eine Gegenüberstellung von wirtschaftlichen, ökologischen und bautechnischen Kriterien verschiedener Konstruktionen. Dabei liegt der Fokus auf einer generellen Übersicht, weshalb verschiedene Gebäudetypen, mit ihnen eigenen Belastungen, und variierenden Spannweiten betrachtet werden. Im zweiten Abschnitt wird eine SWOT-Analyse auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse durchgeführt. Ihr Ziel ist eine Abschätzung des Materials und seiner Entwicklungsmöglichkeiten vorzunehmen.

4.1 GEGENÜBERSTELLUNG VON BAUWEISEN

Die Einordnung des Holzleichtbetons in die Reihe der Bausysteme erfolgt im Weiteren anhand von drei angenommenen Referenzgebäuden. Diese unterscheiden sich in ihrer Höhe und Nutzung. Dadurch bedingt sind unterschiedliche Anforderungen an Brand-, Wärme- und Schallschutz, sowie an die anzunehmenden Nutzlasten und den Anteil der Fensterflächen an der Fassade. Diese Rahmenbedingungen sind für die unterschiedlichen Materialien innerhalb des jeweiligen Referenzgebäudes konstant. Betrachtet wird jeweils ein Gebäudestreifen von einem Meter Breite. Die Außenwände sind dabei als vollflächig, über die Breite des Abschnitts geschlossen angesehen und müssen zusätzlich prozentuell die Lasten der nicht betrachteten Sektoren mit Fensterflächen aufnehmen.

Untersucht werden die Faktoren auch hinsichtlich ihrer Veränderung in Abhängigkeit von der Deckenspannweite. Diese wird von, für den jeweiligen Gebäudetypus üblichen, bis zu sehr hohen Spannweite variiert. Die Decken werden dabei jeweils als zweiseitig, linienförmig auf den Außenwänden gelagert angesehen. Im Zuge des Vergleichs wird nicht auf Sonderbereiche eines Gebäudes, wie Stiegenhäuser, Durchbrüche, Auskragungen oder Ähnliches eingegangen. Außerdem werden auch keine Detailausführungen bewertet. Dies geschieht deshalb, da ein

breites Spektrum der Betrachtung und keine Rekonstruktion eines spezifischen Gebäudes in einer anderen Bauweise erfolgen soll. Zur besseren Einschätzbarkeit wird davon ausgegangen, dass Details und Sonderbereiche sich ähnlich proportional im Vergleich zwischen den Bausystemen verhalten, wie die analysierten Standard-Deckenabschnitte.

Verglichen werden Decken-, Dach- und Außenwandsysteme aus Holz, Stahlbeton und Ziegel, sowie Konstruktionen bei denen Holzleichtbeton eingesetzt wird. Diese werden, nach üblicher Verwendung, in unterschiedlichen Varianten, wie zum Beispiel vorgespannt/ nicht vorgespannt, angenommen. Sofern eine Kombination von Wand-, Decken- und Dachelementen vorgenommen wird erfolgt diese immer im üblicherweise eingesetzten, gleichen System. Das bedeutet zum Beispiel, dass für Betonwände die Lasten aus Beton-Elementdecken angenommen werden. In den nachfolgenden Punkten werden zuerst die angenommenen Rahmenbedingungen und Untersuchungsziele dargelegt und anschließend ausgewählte Ergebnisgraphen vorgestellt und diskutiert. Die Berechnungsmethodik, Quellen für einzelne Daten, Aufbauten, Übersichtstabellen für die errechneten Kennzahlen und die Dokumentation der restlichen Ergebnisgraphen finden sich im Anhang. (Siehe Anhang 9.1 S. 97-129)

4.1.1 Referenzgebäude

Im Folgenden werden die Parameter der angenommenen Referenzgebäude vorgestellt. Die Wahl fiel dabei auf Gebäude kleinerer und mittlerer Größe, die im städtischen Kontext von Wien und Umgebung positioniert sind. Als kleinste Einheit wird ein Einfamilien-Reihenhaus betrachtet. Es wurde bewusst kein einzelnes Einfamilienhaus gewählt, da diese bei Sonderkonstruktionen, aufgrund der geringen Flächen, überproportional teuer sind und teilweise in Serienfertigung mit anderen Rahmenbedingungen produziert werden. Dagegen sind Reihenhäuser Kleinserien, die zwar mit wiederholenden Elementen errichtet werden, welche aber gesondert für das jeweilige Gebäudeprojekt entwickelt werden. Bei Wohn- und Bürogebäude werden mitteldichte Bebauungen betrachtet. Bei höheren Gebäuden wären brandschutztechnische Anforderungen aufgetreten, die sich gegebenenfalls nicht direkt in der Konstruktion, sondern eher in anderen Kompensationsmaßnahmen (z.B. Sprinkler) niederschlagen. Das hätte zu einer Verzerrung der Ergebnisse geführt. Beim Bürogebäude wird zusätzlich angenommen, dass der Errichter zukunftsorientiert eine flexible Nutzung, auch für Gewerbenutzungen, ermöglichen möchte, weshalb ein zusätzlicher Aufschlag von 1 KN/m^2 auf die Nutzlast laut Eurocode einbezogen wird. Die Geschosshöhe wird bei jedem Gebäudetypus mit 3 Metern angenommen.

4.1.1.1 Einfamilien-Reihenhaus

- Zwei Geschosse (EG & 1.OG=DG)
- Lochanteil Außenwände 30%
- Nutzlast Kategorie A1 [48], Decken, kein Zwischenwandzuschlag = 2 kN/m²
- Bodenaufbau mit 7 cm Heizestrich, schwimmend verlegt, Schüttung
- Schrägdach 45°, Lasten [49, 50] aus Schnee + Wind + Wartung = 1,4 kN/m²
- Passivhaus, angestrebte U-Werte: AW 0,12 W/m²K, Dach 0,10 W/m²K
- Anforderungen an Brandverhalten [51]: Außenwände REI 60, Decken REI 30
- Keine bes. Anf. an den Schallschutz

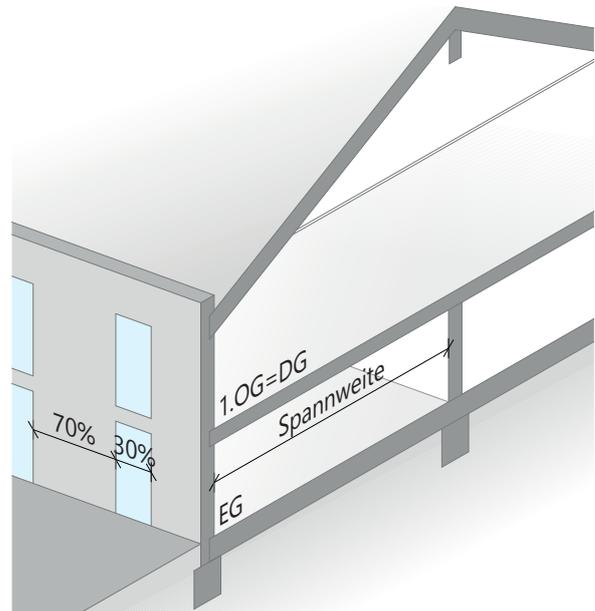


Abb. 36: Schematische Darstellung Referenzgebäude Einfamilien-Reihenhaus

4.1.1.2 Wohngebäude

- Vier oberirdische Geschosse (EG, 1. & 2.OG, 3.OG=DG)
- Lochanteil Außenwände 50%
- Nutzlast Kategorie A1 [48], Decken + Zwischenwandzuschlag = 3 kN/m²
- Bodenaufbau mit 5 cm Estrich, schwimmend verlegt, reduzierte Schüttung
- Schrägdach 45°, Lasten [49, 50] aus Schnee + Wind + Wartung = 2,0 kN/m²
- Niedrigenergiehaus, angestrebte U-Werte Außenwände 0,2 W/m²K, Dach 0,15 W/m²K
- Anforderungen an Brandverhalten [51]: AW REI 90 und A2, Decken REI 60
- Schallschutz [52]: Decken $D_{nT,w}$ 55 dB, $L'_{nT,w}$ 48dB

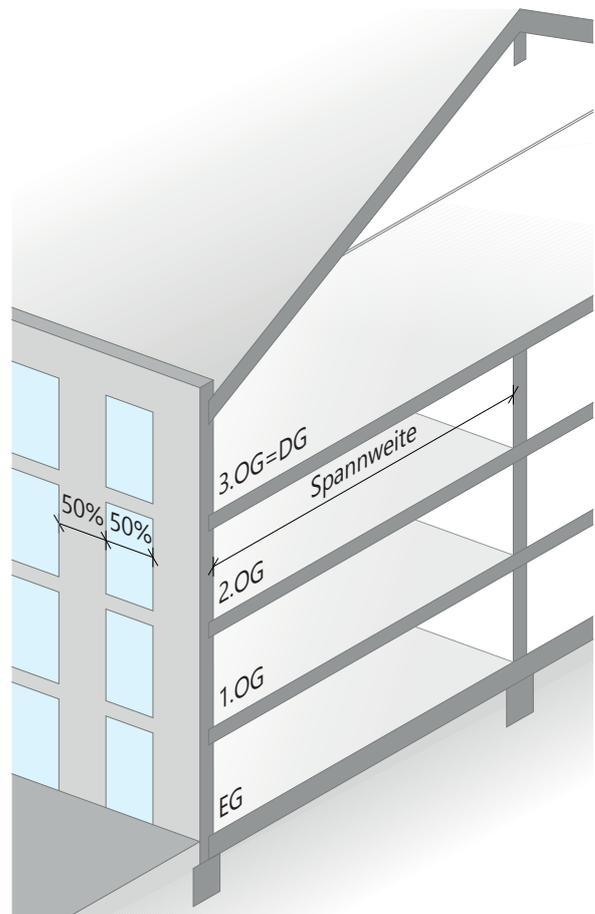
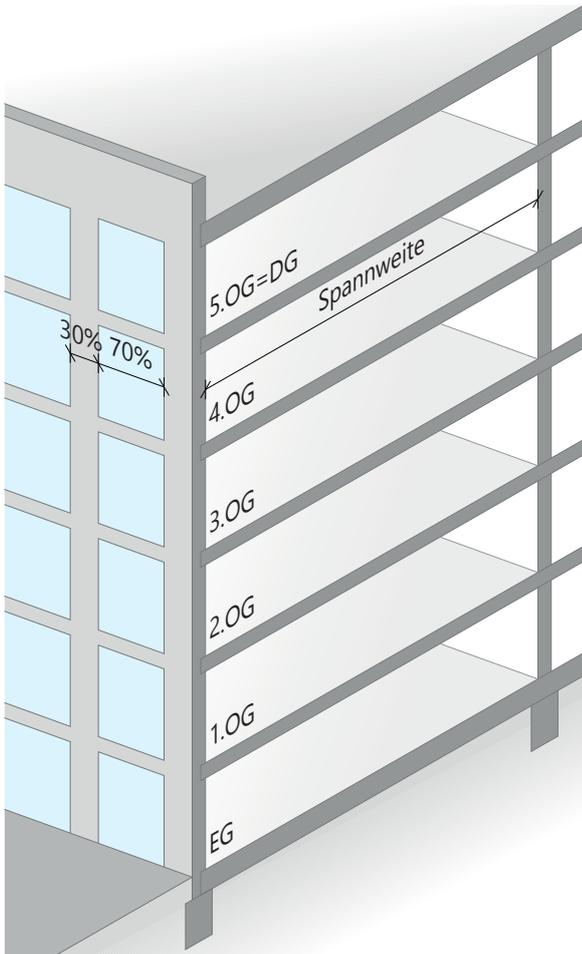


Abb. 37: Schematische Darstellung Referenzgebäude Wohngebäude

4.1.1.3 Gewerbe-/Bürogebäude



- Sechs oberirdische Geschosse (EG, 1. bis 4.OG + 5.OG=DG)
- Lochanteil Außenwände 70%
- Nutzlast Kategorie B2 [48], Decken + erhöhte Lastanforderung für variable Nutzung (+1 kN/m²) + Zwischenwandzuschlag = 5 kN/m²
- Doppelboden
- Flachdach, Lasten [49, 50] aus Schnee + Wind + Wartung = 2,8 kN/m²
- Mindestanforderung [53], U-Wert AW 0,35 W/m²K, Dach 0,2 W/m²K
- Anforderungen an Brandverhalten [51]: AW REI 90 und A2, Decken REI 90
- Schallschutz [52]: Decken $D_{nT,w}$ 55 dB, $L'_{nT,w}$ 48dB; Dach $D_{nT,w}$ 55 dB, $L'_{nT,w}$ 48dB

Abb. 38: Schematische Darstellung Referenzgebäude Gewerbe- bzw. Bürogebäude

4.1.2 Konstruktionen

Verglichen werden folgende Konstruktionen:

- Decken
 - Holz: Balkendecken in Rahmenbauweise (nur EF-RH und Wohngeb.); Massivholzdecken aus Brettsper Holzplatten
 - Beton: Stahlbetondecke in Elementbauweise (nur EF-RH und Wohngeb.); Stahlbeton-Hohlkörperdecke; Vorgespannte Stahlbetondecke in Elementbauweise
 - Holzleichtbeton: Brettsper Holz-HLB-Beton-Verbundbauweise lt. Krippner u.a.

- Dach (nur EF-RH und Wohngeb.)
 - Holz: Sparrendach; Massivholzdach aus BSP-Platten
 - Holzleichtbeton: Sparrendach mit HLB beplankt

- Dach (Bürogebäude)
 - Ident mit jeweiliger Deckenkonstruktion

- Wände
 - Holz: Ständerwände in Rahmenelementen (nur EF-RH und Wohngeb.); Massivholzwände aus BSP-Platten
 - Beton: Fertigteil Betonwände; Fertigteil Leichtbetonwände; Mantelbetonwandelemente (HLB Mantelbetonsteine mit Betonkern);
 - Ziegel: Hochlochziegelwände (nur EF-RH und Wohngeb.)
 - Holzleichtbeton: Massivholzwände aus BSP-Platten beidseitig mit HLB beplankt

Die Auswahl erfolgt aufgrund von üblicherweise im Bauwesen eingesetzten Konstruktionen. Für den Holzleichtbeton wurden Konstruktionen gewählt, die bereits ausreichend dokumentiert sind um Aussagen treffen zu können. Nicht einbezogen wurde der Verbund mit Holzträgern (vgl. 3.3.2.2), da hier gegenwärtig keine Berechnungsgrundlage zu Verfügung steht. Ebenfalls ausgeklammert wurden Wandsysteme mit einem Verbund mit tragenden Holzleichtbetonen. Die Aufbauten der jeweiligen Konstruktionsweise sind im Anhang zu finden.

4.1.3 Vergleichspunkte

Die Auswahl der Kriterien, nach welchen die Bauweisen untersucht werden, richtet sich entsprechend der Anforderungen aus dem Bauwesen nach der Wirtschaftlichkeit, der bautechnischen Leistungsfähigkeit und der Ökologie. Letztere ist zwar noch längst nicht bei jedem Bauvorhaben relevant, jedoch steigt das Interesse der Bauherrschaft an Fragen des Umweltschutzes kontinuierlich. Entsprechend dieser Überlegungen wurden folgende Punkte für den Vergleich ausgewählt:

- Kosten: Wie hoch sind die Kosten zur Herstellung des Bauteils? Die Wirtschaftlichkeit eines Bausystems ist bei beinahe jedem Projekt äußerst relevant.
- Bauteildicke: Welche Stärke hat das Bauteil? Die Bauteildicke scheint auf den ersten Blick wenig relevant, da sie sich jeweils nur um wenige Zentimeter verändert. Auf die Gesamtfläche eines Bauwerks allerdings können sich diese kleinen Unterschiede deutlich auswirken. Bei Wänden kann das bedeuten, dass auf gleicher Grundfläche mehr wirtschaftlich verwertbare Nutzfläche entsteht, welche über die gesamte Nutzungsdauer des Gebäudes Ertrag erwirtschaftet. Bei Decken hingegen haben die Deckenstärken einen Einfluss auf die Höhenausnutzbarkeit des Bauplatzes, da meist eine Höhenbeschränkung vorliegt, die mit möglichst vielen Geschossen ausgenutzt werden soll. Entsprechend sagt die Bauteildicke, über den Weg der Bautechnik, wiederum etwas über die Wirtschaftlichkeit eines Systems aus. Gleichzeitig aber lässt sie Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit eines Baustoffes zu.
- Ökokennzahl: Wie umweltschädlich ist das Bauteil? Dafür werden die OI3-Indikatoren herangezogen. Mit ihnen findet die ökologische Bewertung eines Bausystems auf der Grundlage des Verbrauchs an nicht erneuerbarer Energie, des Ausstoßes des Treibhausgases CO₂ und des Versauerungspotenzials für den Boden statt.

Gegenübergestellt werden diese Punkte mit der jeweiligen Spannweite.

4.1.4 Vergleichsergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisgraphen dargestellt, analysiert und diskutiert. Die Diagramme sind dabei in die baustoffbezogenen Farbgruppen Brauntöne (Holz), Grüntöne (Stahlbeton), Helllila (Ziegel) und Rot (Holzleichtbeton) gegliedert. Da die Auswertung teilweise ähnliche Ergebnisse brachte, werden in diesem Abschnitt nur die aussagekräftigsten Diagramme abgebildet. Eine Zusammenstellung der restlichen Diagramme mit kurzen Erläuterungen ist im Anhang (9.1.5, S.122-129) zu finden. Im Zuge der Untersuchung wurden nicht nur Erkenntnisse über Holzleichtbeton-Konstruktionen, sondern auch über Holzkonstruktionen im Vergleich zu Betonbauweisen gewonnen. Da der Fokus allerdings auf HLB und nicht auf Letztgenannten liegt, werden etwaige Schlüsse nur insoweit dargestellt, als sie die Methodik beeinflusst haben oder für die Aussagekraft der Analyse relevant sind.

4.1.4.1 Kosten

Bei der vorliegenden Betrachtung ist die Deckenkonstruktion mit Holzleichtbeton durchwegs konkurrenzfähig mit anderen Materialien. Es zeigt sich, dass bei typischen Belastungen aus dem Wohnbau bei Spannweiten bis zu ca. 8 Metern das System ähnliche Kosten aufweist, wie gängige Betondecken. Im Gegensatz zu Holz gibt es sogar Einsparungen. Das ist damit zu erklären, dass moderne Holzkonstruktionen Kostenvorteile besonders gut durch standardisierte Elemente und einen hohen Grad der Vorfertigung erzielen, diese besonderen, teils Hersteller- und projektspezifischen Bedingungen, aber nicht einbezogen werden konnten. Bei höheren Spannweiten werden die Vorteile der leistungsfähigen STB-Hohlkörperdecke ersichtlich. Gleichzeitig wird auch der Vorteil des HLB-Verbunds gegenüber reinem Brettsperrholz deutlicher. (vgl. Abb. 37)

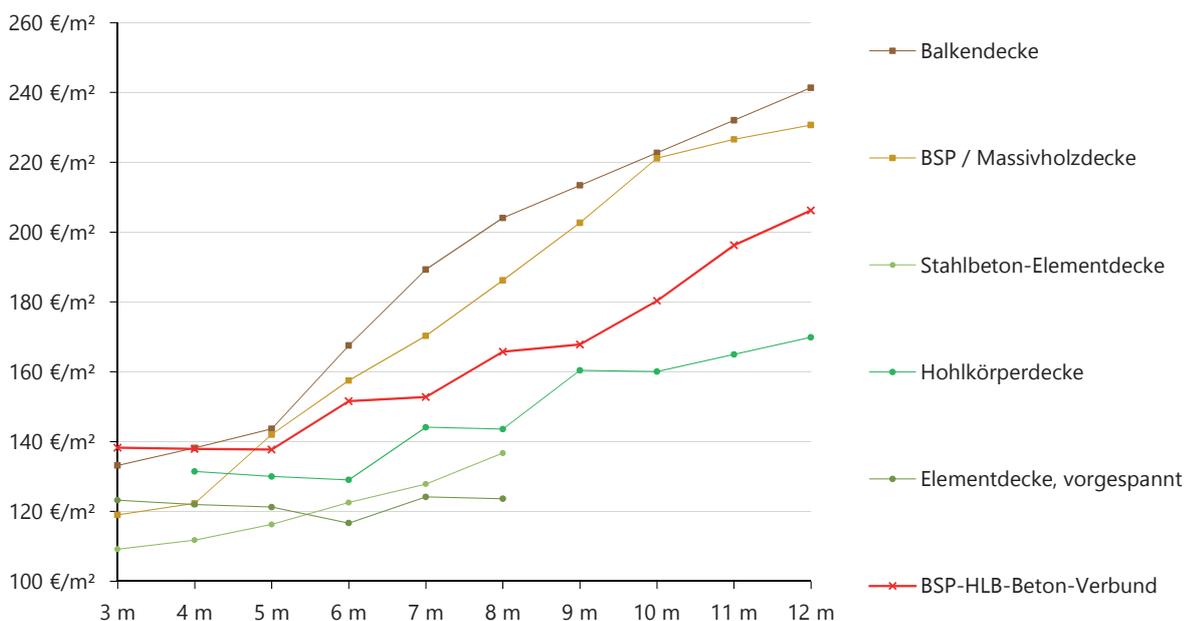


Abb. 39: Diagramm Kosten Wohngebäude pro Quadratmeter Deckenfläche

Bei den hohen Lasten des Gewerbe- bzw. Bürogebäudes ergeben sich dagegen keine Kostenvorteile beim Einsatz von Holzleichtbeton. Der Verbundbauteil verhält sich ähnlich wie die BSP-Decke und liegt damit deutlich über den Kosten für Stahlbeton-Deckensysteme. Das liegt vor allem an den Kosten für die Holzleichtbetonplatten, die preislich vergleichbar sind zu BSP-Platten. Bei höherer Beanspruchung muss im BSP-HLB-Beton-Verbund-Deckensystem entweder mehr beanspruchtes Material (BSP oder Beton) eingesetzt oder die HLB-Zwischenschicht dicker ausgeführt werden. Der Kostenvorteil von HLB zu BSP allein ist dabei zu gering um einen ausreichend positiven Effekt auf die Gesamtkosten des Bauteils gegenüber den Vergleichskonstruktionen zu erbringen.

Bei den Dächern sind grundsätzliche Unterschiede durch die Analyseanordnung zwischen den Steildächern und den Flachdächern gegeben. Erstgenannte, bei den Wohngebäuden vorgesehene, sind durchgängig in Holzbauweisen konzeptioniert. Hier gibt es stets einen Kostenvorteil der Systeme ohne Holzleichtbeton. (vgl. Abb. 38a) Beim Wohngebäude mit etwas höheren Nutzlasten fällt dieser Vorteil nochmals, vor allem im Hinblick auf das Massivholzdach, geringfügig besser aus. Generell resultieren die höheren Kosten des HLB-Systems daraus, dass dieses grundsätzlich gleich aufgebaut ist wie ein typisches Sparrendach, außer, dass zusätzliche HLB-Platten aufgebracht werden. Diese Platten dienen auch als Dämmlage wodurch teilweise die Zwischensparrendämmung reduziert werden kann. Die daraus resultierenden Einsparungen können allerdings nicht die Kosten für den Holzleichtbeton kompensieren.

Beim Gewerbe- bzw. Bürogebäude dagegen sind die Lasten stärker und der Materialeinsatz entsprechend vermehrt, weshalb das BSP-HLB-Beton-Verbundsystem bei rein wirtschaftlicher Betrachtung kaum konkurrenzfähig ist. (vgl. Abb. 38b) In der Auswertung fällt auf, dass bei hohen Spannweiten und dem entsprechenden Materialeinsatz keine zusätzliche Dämmung benötigt wird um die Mindestanforderungen der OIB-Richtlinie zu erfüllen. Das ist durch die Dämmeigenschaften des Holzleichtbetons und der Massivholzplatte möglich.

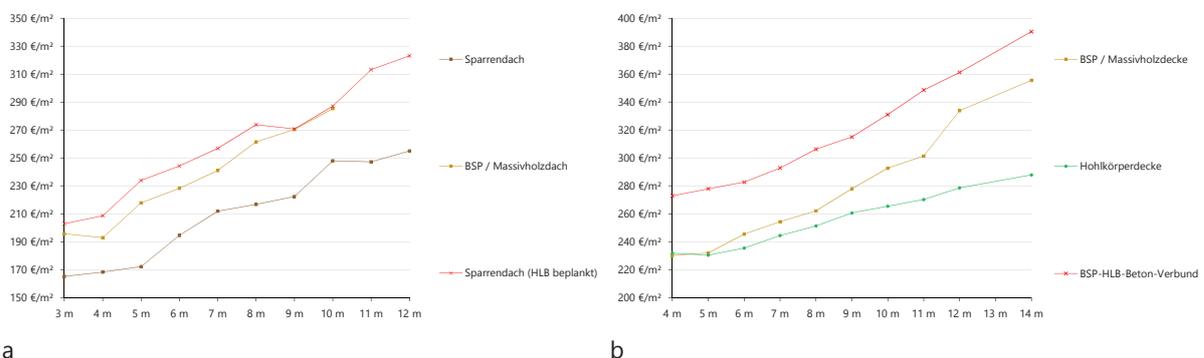


Abb. 40: Diagramm Kosten pro Quadratmeter Dachfläche; a Einfamilien-Reihenhaus; b Gewerbe-/Bürogebäude

Die Auswertung der Wände haben generell sehr konstante Ergebnisgraphen, da die Kosten bei höheren Spannweiten kaum steigen. Dies ist daraus bedingt, dass im Vergleich zu Decken nur geringe Querschnittserhöhungen ausreichen um mehr Lasten abtragen zu können. Lediglich

bei den vielen Geschossen und hohen Lasten des Gewerbe-/Bürogebäudes kommt es zu mehr Variation. Die Systeme, bei denen konventionelle Holzbauweisen zusätzlich mit Holzleichtbeton beplankt wurden, weisen mittlere (Einfamilien-Reihenhaus) bis hohe (Gewerbe-Bürogeb.) Kosten im Vergleich zu anderen Systemen auf. Interessant ist, dass die Mantelbetonsteine aus Holzleichtbeton durchwegs sehr nahe am günstigsten System der Betonfertigteile rangieren. Ausreißer aus den Betrachtungen gibt es bei den Ständerkonstruktionen bei Wohngebäuden. Hier wird teilweise im Hinblick auf die Bauteilstärke auf Brettschichtholz-Ständer zurückgegriffen, die wesentlich teurer sind als Konstruktionsvollholz.

Bemerkenswert ist außerdem, dass die HLB-beplankte Massivholzwand beim Bürogebäude günstiger ist als die konventionelle Massivholzwand. (vgl. Abb. 39) Dies ist durch zwei Faktoren bedingt: Erstens ist außer der HLB-Platten keine zusätzliche Dämmung zum Erreichen der Mindeststandards laut OIB erforderlich, wohingegen die reine Brettsperrholzplatte, im Hinblick auf den Brandschutz, mit Steinwolle gedämmt wird, welche im Vergleich zu oft eingesetzten (auch bei den Typen des EF-RH und WG dieser Analyse) EPS-Dämmungen teurer ist. Zweitens wird im Hinblick auf die Untersuchungsergebnisse von Radlherr [18] die raumseitige Brandschutzverkleidung von zwei Lagen GKF auf eine Lage (+HLB-Platte) reduziert. In diesem Beispiel kann der Holzleichtbeton seine Vorteile der guten Dämmwirkung und der Brandbeständigkeit deutlich ausspielen.

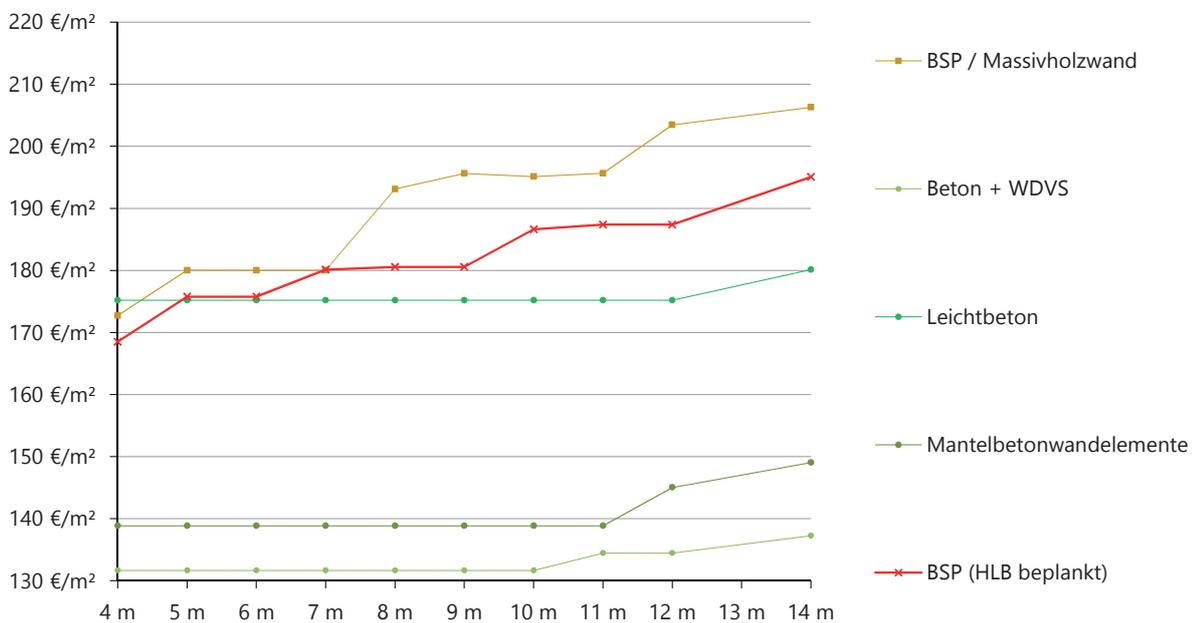


Abb. 41: Diagramm Kosten Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Wandfläche

Es wurde auch eine Kombination der Werte für Wände, Decken, und Dächer vorgenommen um Daten für eine gesamte Bauweise zu erhalten. Dabei sind naturgemäß bei geringen Spannweiten die Wände relevant, wohingegen bei zunehmender Spannweite die Decken mehr an Anteil und somit an Bedeutung gewinnen. Dies lässt sich im Diagramm daran erkennen, dass die Linien der Beton-Bauweisen über längere Strecken parallel verlaufen, da hier die gleichen Deckensysteme

mit unterschiedlichen Wandsystemen kombiniert wurden. Die Streuung der Kurven ist beim Einfamilien-Reihenhaus gering, bei den mehrgeschossigen Gebäuden aber signifikanter. Dabei ist das Holzleichtbetonsystem immer im oberen Kostenbereich. Bei höheren Belastungen tritt auch ein deutlicher Abstand zu den Betonkonstruktionen auf.

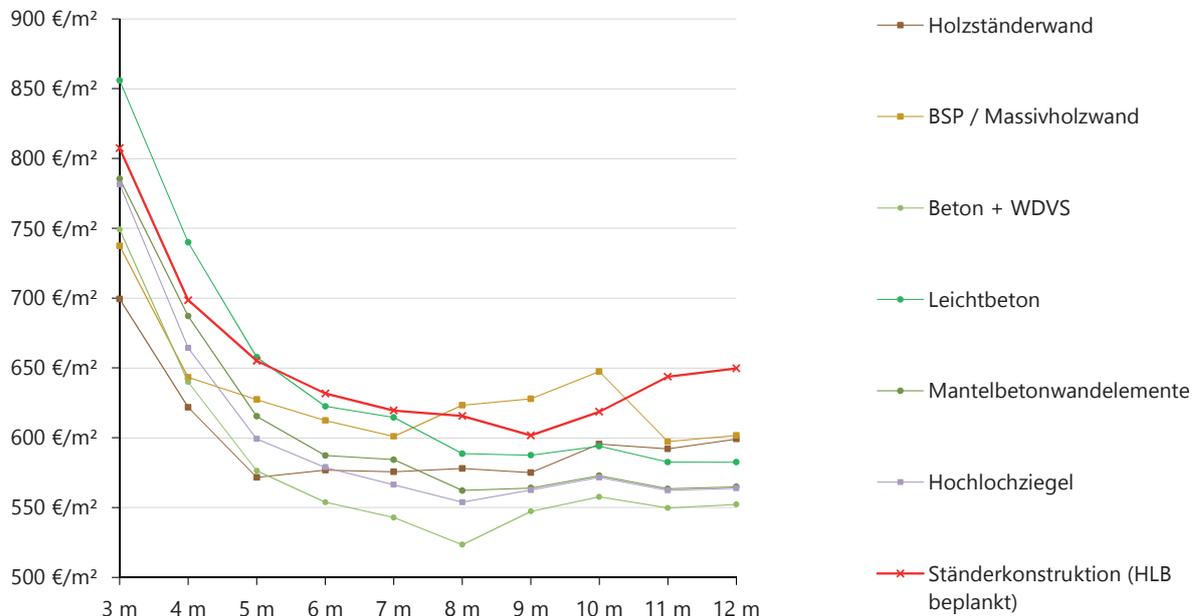


Abb. 42: Diagramm kombinierte Kosten Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Grundfläche

Der Vergleich zu Pipoh [22] zeigt, dass die Werte seiner und dieser Auswertung ähnlich sind. Das ist insofern relevant, da damit gezeigt wird, dass die vorliegenden Berechnungen plausibel sind. Darüberhinausgehend wird aber auch eine differenziertere Betrachtung durch die Variierung der Spannweiten und Lasten möglich. Bei Pipoh sind diese auf ein Referenzobjekt mit definierter Spannweite begrenzt.

Zusammenfassend erkennt man, dass die Holzleichtbetonsysteme nie die billigste Variante darstellen. Das liegt nicht zwingend im Systemaufbau begründet, sondern vielmehr in den Preisen der eingesetzten Holzleichtbeton-Platten-Produkte. Zur Kostenoptimierung können zum Beispiel andere Produkte mit ähnlichen Eigenschaften aber geringeren Kosten, durch etwa günstigere Ausgangsstoffe oder Verarbeitungsweisen, oder auch andere Formen des HLB, als die vorgesehenen Platten, herangezogen werden. Nebenbei zieht der Stahlbetonbau seine Kostenvorteile daraus, dass diese Bauweise oft eingesetzt wird und demnach viele konkurrierende Hersteller, Facharbeiter und ausführende Firmen existieren.

Gleichzeitig lässt sich erkennen, dass die Holzleichtbetonkonstruktionen bei den meisten Einsatzgebieten im Nahbereich zu den, und teilweise günstiger als die anderen Materialien sind. Der Einsatz des HLB ist also nicht von vornherein wirtschaftlich uninteressant, muss aber entweder im Einzelfall genau geprüft oder durch andere vorteilhafte Aspekte des Materials begründet werden.

4.1.4.2 Bauteilstärke

Betrachtet man die Dicke der Brettsperrholz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecken im Vergleich zu den anderen Materialien ist diese sehr schlank. Dies liegt vor allem an ihrer grundsätzlichen Konzeption wesentlich lastabtragende Materialien in den Bereichen der Kraftwirkung zu konzentrieren. Gleichzeitig ist auch die Variabilität der verschiedenen Bauteilschichten von Vorteil um genauer auf Belastungen eingehen zu können. Ersichtlich wird dies im direkten Vergleich zu STB-Hohlkörperdecken, die als vorgefertigte Elemente nur in bestimmten Stärken geliefert werden. Dadurch sind bei bestimmten Lastfällen die BSP-HLB-B-Verbunddecken dünner als die Hohlkörperdecken, da bei Letzteren eine dünnere Variante die geforderte Belastung nicht abtragen kann und eine deutlich dickere Variante mit mehr Tragfähigkeit gewählt werden muss. Ähnliches gilt für Massivholzdecken, die aber standardmäßig in wesentlich feiner gradierten Dickenabstufungen produziert werden. Gegenüber der linearen Lastabtragung der Balkendecken manifestiert sich der Vorteil der flächigen Lastabtragung der anderen Deckensysteme in der Dicke. Ähnliches erkennt man auch bei der Ausbildung von Massivholzdecken als Kasten.

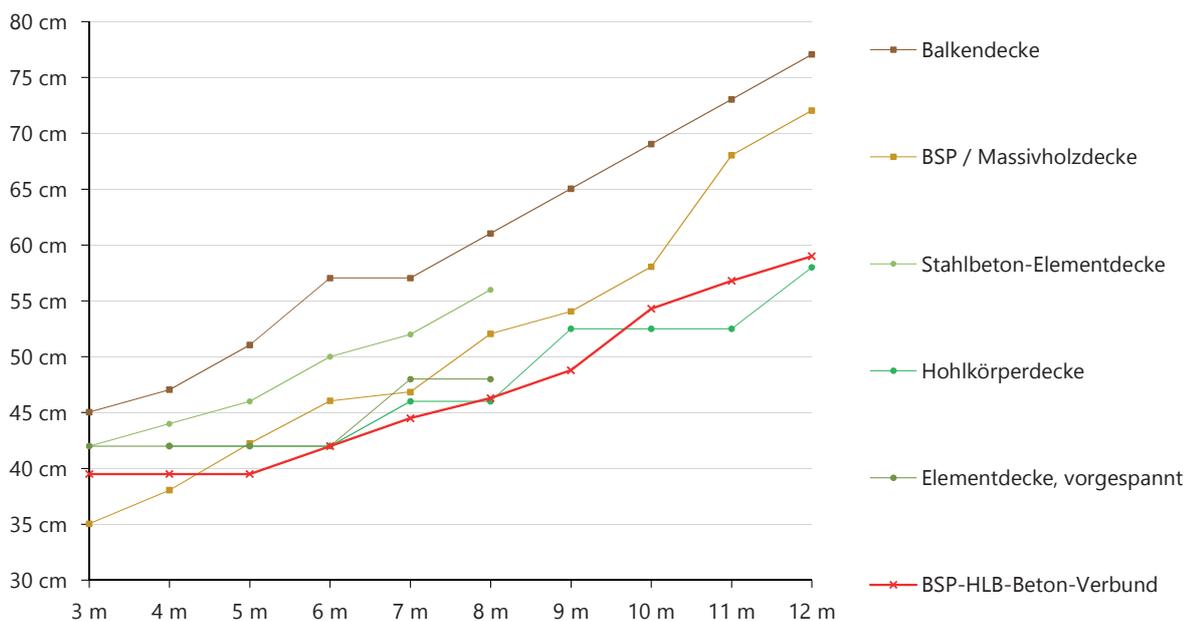


Abb. 43: Diagramm Deckenstärke Einfamilien-Reihenhaus

Bei den Flachdächern sind die Effekte ähnlich wie bei den Decken, da die gleichen Tragkonstruktionen gewählt wurden. Lediglich bei höheren Belastungen ist im Unterschied zu den Decken keine so signifikante Zunahme der Bauteildicke beim BSP-HLB-B-Verbund festzustellen, da gleichzeitig die Menge der benötigten Dämmung zum Erreichen der geforderten U-Werte abnimmt. Deshalb liegt hier die Verbunddecke auch bei der maximalen Spannweite und Belastung etwa gleichauf mit der Hohlkörperdecke.

Anders verläuft die Entwicklung bei den Steildächern. Die zusätzlich mit Holzleichtbeton beplankte Dachkonstruktion ist gegenüber der konventionellen Sparrenkonstruktion konstant

dicker. Der Grund hierfür liegt in der geringeren Dämmleistung der HLB-Platten gegenüber der Zwischensparrendämmung (Glaswolle), die mit mehr Schichtstärke kompensiert werden muss. Besonders bei kleinen Spannweiten und hohen Anforderungen an die Wärmedämmung (z.B. Passivhaus) ist vor allem die Leistung des Dämmstoffs ausschlaggebend für die Bauteildicke, da diese die Höhe der Tragkonstruktion übersteigt. Daneben konnte beobachtet werden, dass aufgrund des zusätzlichen Gewichts des Holzleichtbetons größere Querschnitte gewählt werden mussten. Dieser Effekt ist allerdings nur sehr gering ausgeprägt.

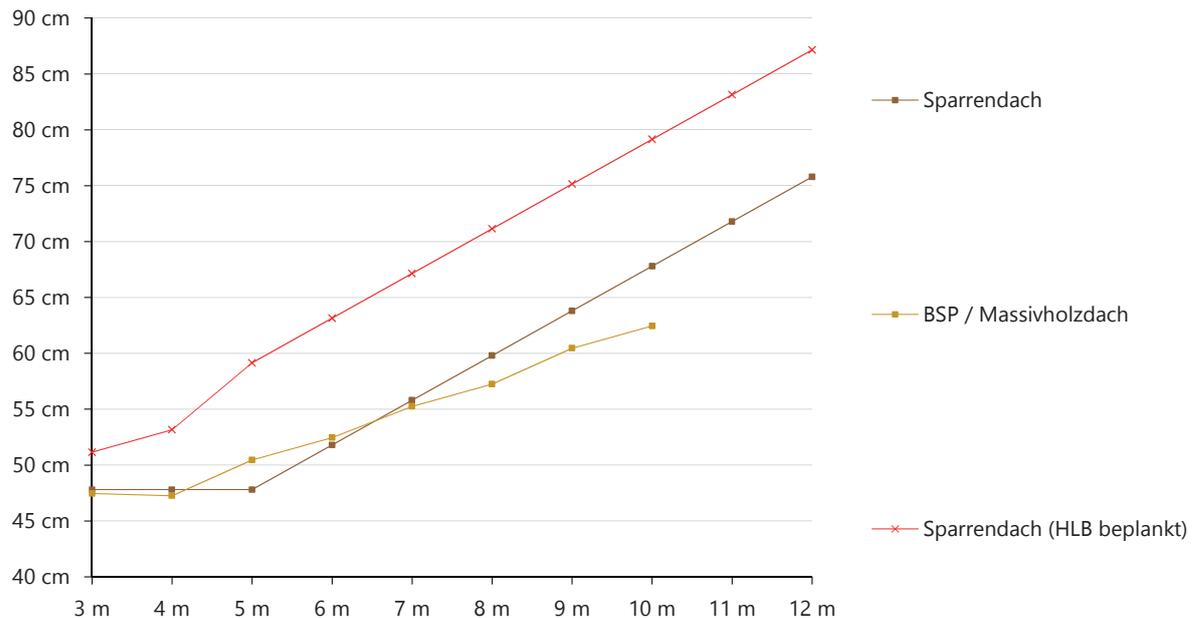


Abb. 44: Diagramm Dachdicke Einfamilien-Reihenhaus

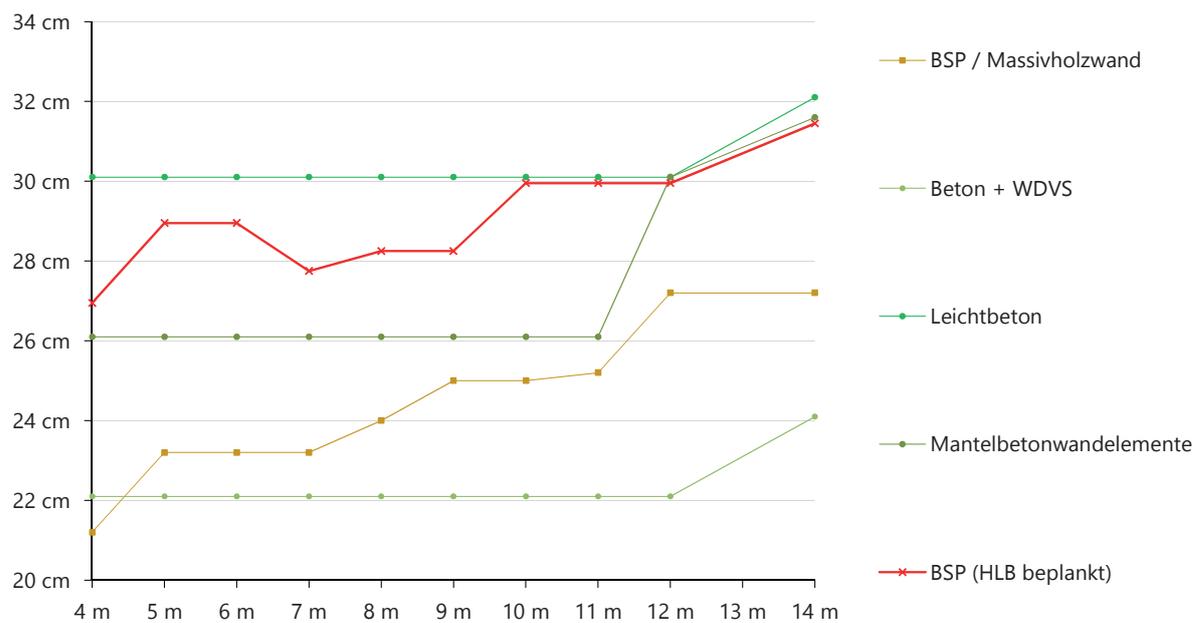


Abb. 45: Diagramm Wanddicke Gewerbe-/Bürogebäude

Bei den Wänden sind die Holzwände mit Holzleichtbeton-Beplankung relativ dick. Auch die Mantelbetonwände benötigen mehr Fläche im Vergleich zum dünnsten Wandsystem der Betonfertigteilwände. Im direkten Vergleich zwischen konventionellem und HLB-System hat Letzteres immer mehr Bauteilstärke. Generell lässt sich der Trend erkennen, dass Konstruktionen mit klarer Trennung zwischen flächiger Lastabtragung und Dämmung besser abschneiden als solche, die beide Aufgaben in einem Material vereinen. Diese Erkenntnisse scheinen auch unabhängig von Lasten, Dämm- und Brandschutzanforderungen konstant zu sein.

In der kombinierten Betrachtung der gesamten Bauweise werden die Vorteile der HLB-Decken durch die dickeren HLB-Wände eliminiert. Die Optimierung der Wand- oder weitere Verbesserung der Deckensysteme können hier durchaus nützlich sein, da damit Kostennachteile teilweise kompensiert werden. So wären Mehrkosten aufgrund der Entscheidung für eine Holzleichtbeton-Konstruktion tragbar, da ihnen Mehreinnahmen durch größere, bewirtschaftbare Nutzflächen gegenüberstünden.

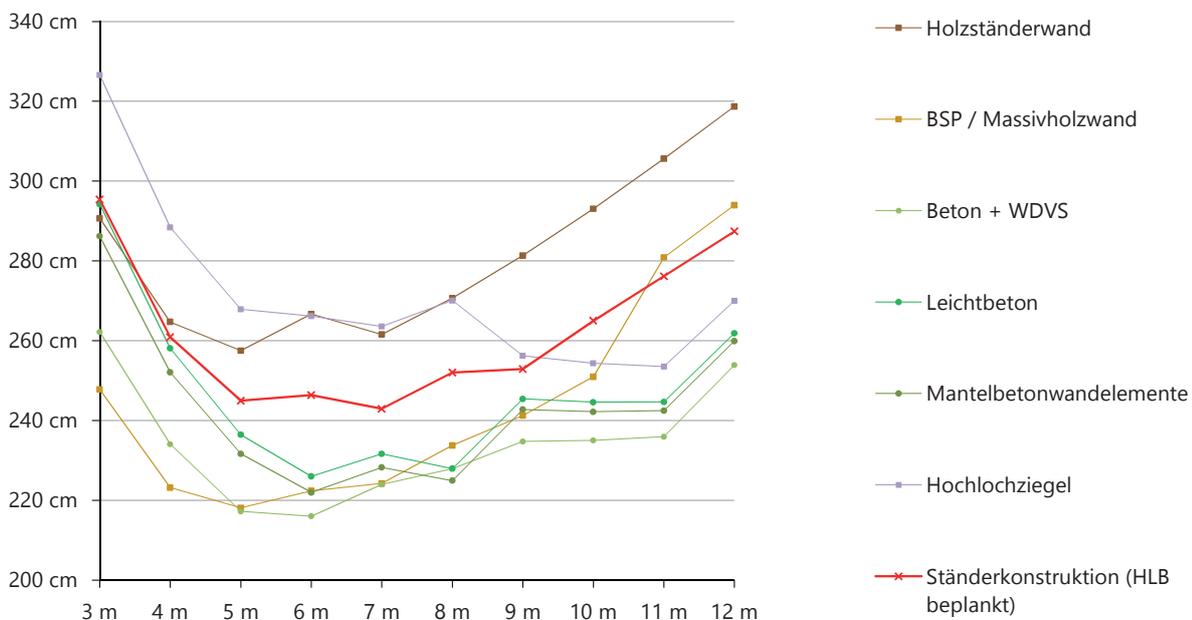


Abb. 46: Diagramm kombinierte Bauteilstärke Wohngebäude pro Quadratmeter Grundfläche

Die Zusammenfassung der Erkenntnisse stellt sich positiv dar. Die Holzleichtbetondecke ist ein sehr schlankes System. Es treten deutliche Vorteile im Vergleich zu anderen Deckenbauweisen auf. Bei den Wänden hingegen sind Verbesserungen notwendig um konkurrenzfähiger zu sein. Einerseits ist die Dämmwirkung nicht ausreichend um die zusätzliche Schichtdicke zu kompensieren und andererseits hilft auch die Brandbeständigkeit nur gering, da diese auch mit Gipskarton in einer Schichtdicke von 2,5 cm, also weniger als mit HLB, erreicht wird. Gleichzeitig kommt ihm auch keine hauptsächlich tragende Rolle zu. Da es für diese Aufgabenbereiche allerdings schon spezialisierte Materialien gibt, könnte die Stärke des Holzleichtbetons in der Vereinigung der Dämm- und Brandschutz-Anforderungen in einem Material liegen. So ergeben sich geringere Bauteilstärken durch die teilweise Kompensation mehrere Schichten.

4.1.4.3 OI3-Indikatoren

Der Vergleich der erzielten Punkte (wobei weniger Punkte einer ökologischeren Bauweise entsprechen) zeigt, dass die Holzleichtbeton-Deckenkonstruktion gute Leistungen erzielt. Vor allem gegenüber konventionellen Stahlbetondecken werden klare Vorteile erkennbar. Das liegt hauptsächlich an der schlechten CO₂-Bilanz des Stahlbetons und der Speicherung des Treibhausgases in Holz(leichtbeton)-Produkten. Dies gilt allerdings nicht im Vergleich zur Hohlkörperdecke. Durch ihre Optimierung und den reduzierten Materialeinsatz schneidet sie besser ab als der BSP-HLB-Beton-Verbund. Das ist damit zu begründen, dass für die Produktion von Brettsperrholzplatten relativ viel Energie für die Verarbeitung und Verbindung der Schichten aufgewendet werden muss. Entsprechend ist der CO₂-Ausstoß gering, aber der Verbrauch an nicht erneuerbarer Energie hoch. Ähnliches, aber weniger stark ausgeprägt, gilt auch für die eingesetzten Holzleichtbetonplatten selbst. Hier sind es zum Beispiel die thermischen Prozesse im Zusammenhang mit der Abbinderegulierung die Energie benötigen.

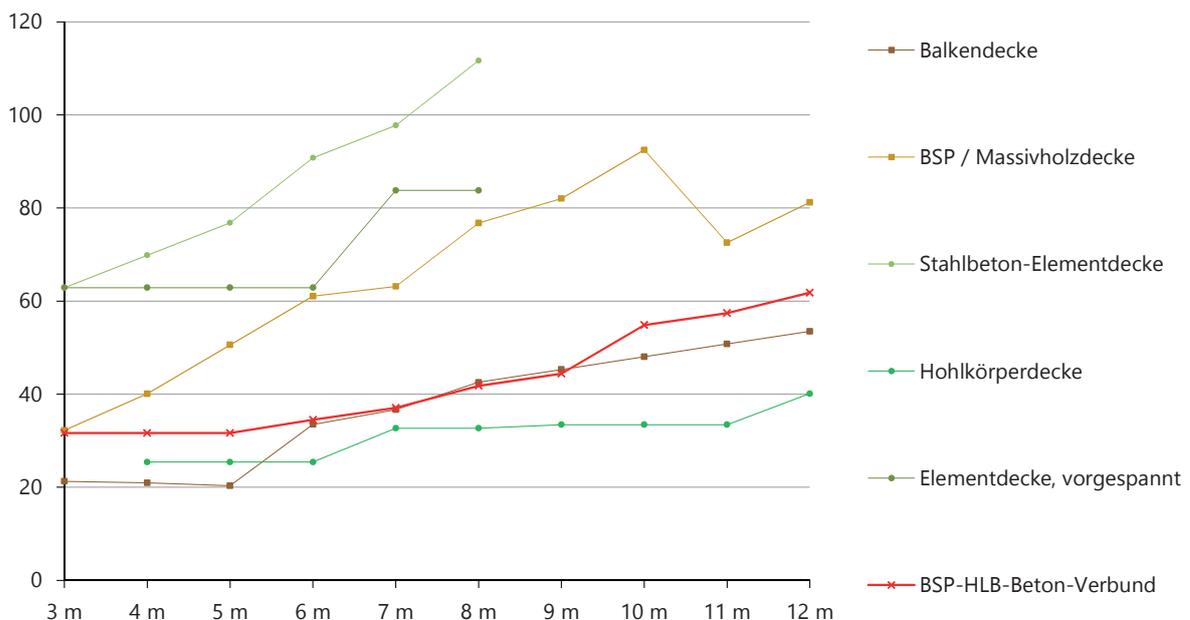


Abb. 47: Diagramm Punkte lt. OI3 Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Deckenfläche

Im Vergleich dazu ergeben sich bei Konstruktionsvollholz sogar negative OI3-Werte, da die Verarbeitung nur relativ wenig Energie beansprucht und die Auswirkung der CO₂-Speicherung überwiegt. Dass die Balkendecke im Vergleich dennoch etwa gleich abschneidet wie die HLB-Decke liegt daran, dass bei den Balken zusätzlich lastverteilende, beziehungsweise abschließende OSB-Platten, sowie eine Dämmeinlage zur Schalldämmung zum Einsatz kommen. Die schlechteren Resultate der Brettsperrholzdecke wiederum lassen sich durch den genannten Effekt des Energieverbrauchs erklären.

Interessant ist, dass sich diese Trends auch bei den Dachkonstruktionen fortsetzen. Hier war eher damit zu rechnen, dass durch das Ersetzen von Dämmmaterialien durch Holzleichtbeton-Produkte bessere Werte erzielt werden können. Diese Erwartung liegt darin begründet,

dass Dämmstoffe generell mittlere bis hohe Werte für Energieverbrauch, CO₂-Ausstoß und Versauerungspotenzial haben. Gezeigt hat sich dagegen allerdings, dass die Dämmleistung der eingesetzten HLB-Platten nicht ausreicht um genügend andere Dämmmaterialien zu kompensieren, sodass ein positiver Effekt eingetreten wäre. Bei den Flachdächern reicht diese Kompensation gerade aus, um die Nachteile des Holzleichtbeton-Verbunds gegenüber der Hohlkörperperdecke einzudämmen.

Betrachtet man die Steildächer ist es sogar so, dass der Einsatz von Holzleichtbeton zu einer konstant schlechteren Bewertung im Vergleich gegenüber der konventionellen Bauweise führt, da nur auf geringe Mengen der Glaswolle-Zwischensparrendämmung verzichtet werden kann. An dieser Stelle sind Holzfaser-Dämmplatten besser geeignet um eine ökologische Bauweise zu erzielen, da sie ähnliche Dämmwerte wie Glaswolle bei teilweise reduzierten OI3-Indikatoren-Werten erreichen. Sie dämmen also auch besser als Holzwollebetonplatten und haben bessere Ökofaktoren als diese. Demgegenüber stehen die schlechtere Beständigkeit und die Kosten von Holzfaserdämmungen. Auch wurden diese bei den analysierten Massivholz-Steildächern berücksichtigt und konnten weder die negativen Effekte der Brettspertholzplatte wesentlich abmindern noch einen erkennbar positiven Effekt erzielen. Dementsprechend schneiden die Massivholzdächer ähnlich schlecht ab wie die Decken.

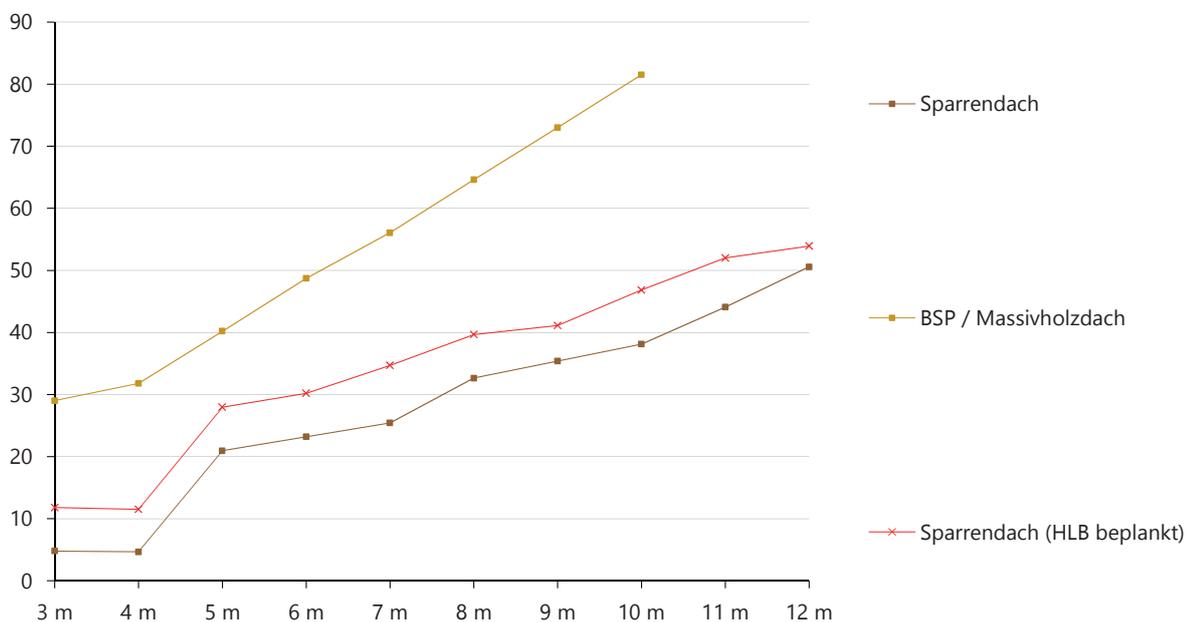


Abb. 48: Diagramm Punkte lt. OI3 Wohngebäude pro Quadratmeter Dachfläche

Bei den Ständerwänden des EF-RH zeigt die Datenlage, dass ein Gleichgewicht zwischen dem Mehraufwand des Holzleichtbetonelements und der Kompensation der Glaswolle im Hinblick auf die Auswirkungen auf die OI3-Bewertungen erreicht wurde. Dies spiegelt sich darin, dass die Graphen der beiden Konstruktionen sich beinahe überlagern. Beim Wohngebäude ist es ähnlich, nur, dass im Zusammenhang mit HLB früher auf Brettschichtholz zur Erhöhung der Tragfähigkeit zurückgegriffen wird und entsprechend die Bilanz schlechter ausfällt. Dennoch

sind beide Holzständerkonstruktionen stets besser bewertet, als sämtliche andere untersuchten Aufbauten. Die Ursache dafür liegt im hohen Holzanteil der Konstruktionen. Der höhere Holzanteil der Massivholzwand schneidet allerdings schlechter ab, da mehr Energie zu ihrer Produktion aufgewendet werden muss.

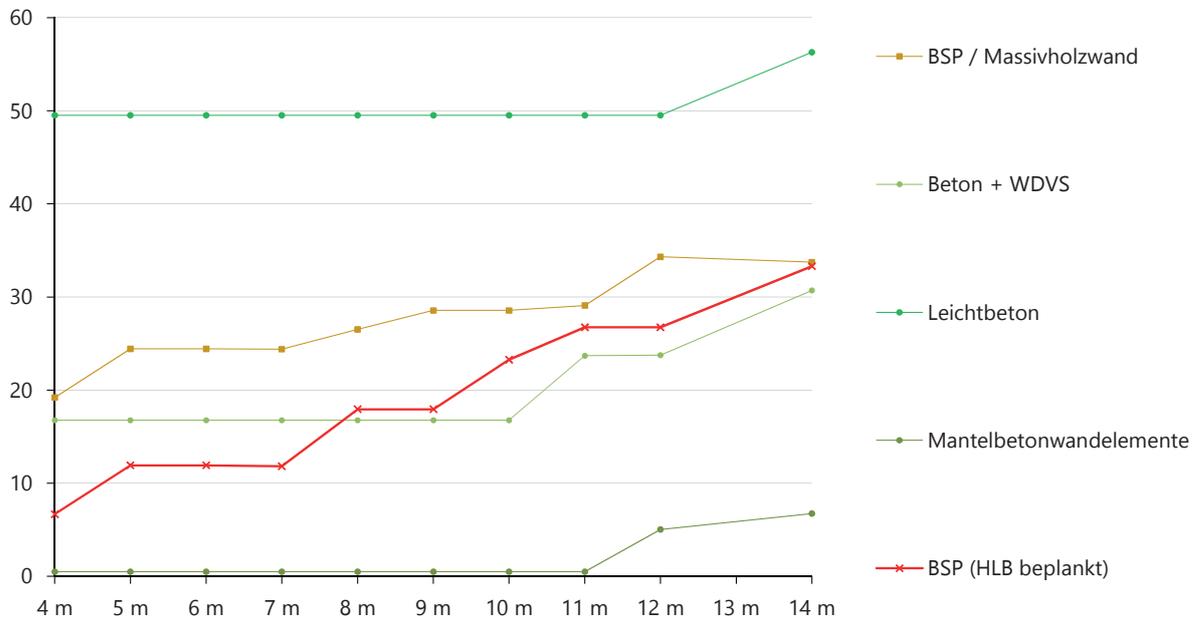


Abb. 49: Diagramm Punkte lt. OI3 Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Wandfläche

Beim Bürogebäude ist die Situation grundlegend anders, da keine Ständerkonstruktionen untersucht wurden. Hier unterscheiden sich die Massivholzsysteme mit und ohne Holzleichtbeton dahingehend, dass die vorgesehene Steinwolldämmung eine schlechte ökologische Bewertung bewirkt. Auf diese kann beim Einsatz von Holzleichtbeton-Dämmplatten verzichtet werden, da deren Dämmleistung ausreichend ist für die relativ geringen, geforderten U-Werte laut OIB-Richtlinie. Entsprechend groß fällt der Unterschied in der Bewertung der beiden Varianten aus. Gleichzeitig wird die Differenz mit zunehmender Dicke der Brettsperrholzplatte geringer, da die Dämmung durch das Holz alleine ausreicht. Am besten schneidet hier das Mantelbetonsystem ab, da nur ein sehr geringer Anteil an Bewehrungsstahl berücksichtigt wird, die Holzspanbeton-Elemente selbst gute ökologische Werte liefern und diese teilweise die Dämmung ersetzen.

In der Kombination sind die Holzleichtbetonsysteme mitunter am besten bewertet. Besser schneiden nur die Holzständerwände mit Balkendecken und Mantelbetonwandelemente mit Hohlkörperdecken ab. Der Grund für Letzteres liegt in den guten Leistungen der Hohlkörperdecke. Dadurch werden die Nachteile der Wandsysteme kompensiert. Das zeigt sich auch im Hinblick auf die anderen kombinierten Bauweisen. Hier ist ein deutlicher Abfall der Indikatoren erkennbar, sobald ein spanweitenbedingter Wechsel des regulären oder vorgespannten Elementdeckensystems auf die Hohlkörperdecke stattfindet. Damit liegt teilweise selbst das ökologisch schlecht bewertete Leichtbetonwandelement in Kombination mit der Hohlkörperdecke vor den Holzleichtbetonaufbauten.

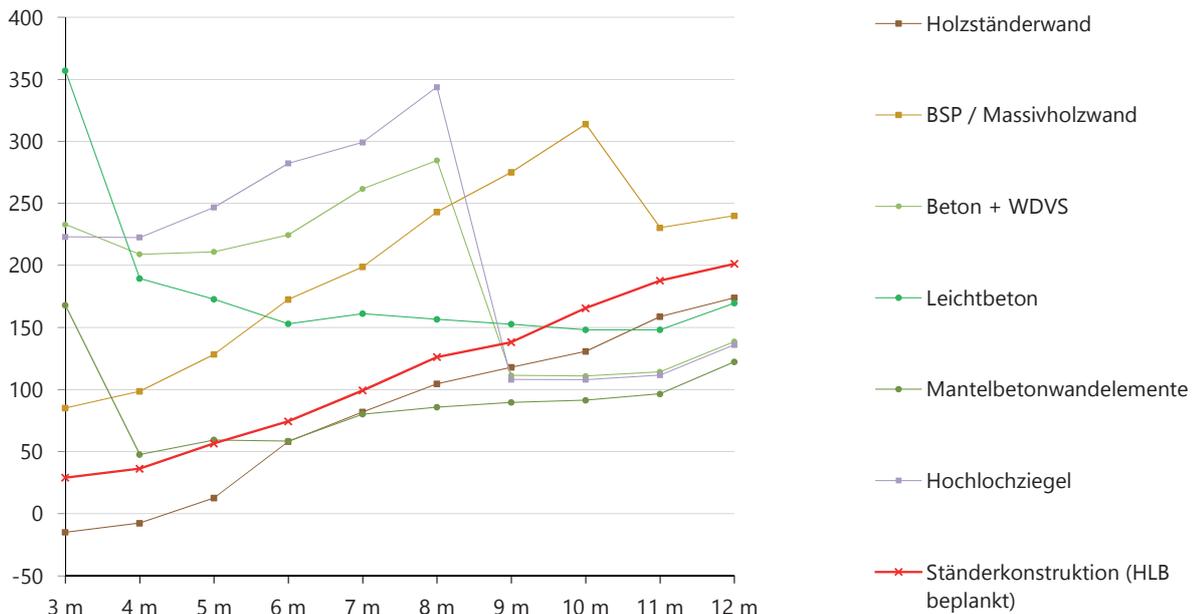


Abb. 50: Diagramm Punkte lt. OI3 Wohngebäude kombiniert pro Quadratmeter Grundfläche

Im Hinblick auf die OI3-Bewertung ist ein Vergleich dieser Auswertung zu jener von Pomberger [20] angebracht. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse vom Prinzip der geringen Werte für Holz- und Holzleichtbeton- und klar höheren Werten für Stahlbetonkonstruktionen übereinstimmen. Darüber hinaus geht Pomberger auch auf die Lebenserwartung der Aufbauten, welche ähnlich ist wie jene der konventionellen Baustoffe, sowie auf die Frage der ökologisch sinnvollen Verbindungstechnik der BSP-HLB-B-Verbunddecke ein. Ihre Erkenntnisse konnten bei der Definition des Aufbaus der vorliegenden Untersuchung genutzt werden.

Der Überblick über die Analyse der OI3-Indikatoren zeigt, dass der Holzleichtbeton durchaus ein ökologisch sinnvolles Material ist. Dennoch ist er nicht als uneingeschränkt vorteilhaft anzusehen. Es zeigt sich auch, dass eine Holzkonstruktion nicht per se ökologisch und eine Betonkonstruktion umweltzerstörend ist. Hier kommt es auf die Verwendung und den optimierten Einsatz des Materials an. Im Bezug auf den Holzleichtbeton wurde von Pomberger der Ansatz vorgestellt Ökozement, mit geringeren CO₂-Emissionen einzusetzen. Das würde die Ergebnisse in dieser Analyse weiter verbessern. Gleichzeitig könnte dieser aber auch für konventionelle Betonrezepturen herangezogen werden.

Letztlich stellt sich auch die Frage nach dem Verbrauch nicht nachwachsender Rohstoffe, die mit den bekannten Datenmaterial und Ökobilanzen für die meisten Produkte kaum bis gar nicht festzustellen ist. Aufgrund der Rohstoffe kann man aber davon ausgehen, dass Holzkonstruktionen an einem Ende einer theoretischen Skala und Betonkonstruktionen an ihrem anderen Ende zu finden sind. Der Holzleichtbeton reiht sich hier, je nach Herkunft des Zements, mittig mit der Tendenz zum Holz ein.

4.1.4.4 Gewicht

Wie schwer eine Konstruktion ist, ist primär relevant für die lastabtragenden Elemente, wie Stützen, Wände und Fundamente. In diesem Hinblick wurde das Eigengewicht der Bauweisen für die Dimensionierung der Wände ermittelt. Diese Werte werden hier nun gemittelt dargestellt um eine Einordnung der HLB-Bauweisen vorzunehmen. Eine differenzierte Betrachtung nach Spannweite und Gebäudetypus ist dagegen nicht angebracht, da die Relation der Materialien untereinander annähernd konstant ist. Die Mittelwerte der Konstruktionen wurde aus den kombinierten Werten der Einfamilien-Reihenhaus- und der Wohngebäude-Daten errechnet, da diese ähnliche Lastfälle und die gleichen Konstruktionstypen behandeln. Zum Vergleich des HLB-beplankten Brettsperrholzaufbaus der Bürogebäude wurde ein Abminderungswert aus den verglichenen Ergebnissen der anderen Aufbauten ermittelt. Die Betrachtung unterteilt sich in das Gewicht der Konstruktion selbst und jenes Gewicht, welches aus, im Vergleich zu den anderen Bauweisen, zusätzlich benötigten Schichten im Bauteilaufbau resultiert.

Die Resultate zeigen klar das geringere Gewicht von Holz- und Holzleichtbeton- gegenüber Betonkonstruktionen. Interessant ist die Gegenüberstellung der konventionellen Holzbauweise und ihrer jeweiligen Erweiterung im Holzleichtbeton. Hier fällt das gesteigerte Gewicht der Konstruktion auf. Diese ist bedingt durch die betrachteten BSP-HLB-Beton-Verbunddecken, welche schwerer sind als Balken- oder reine BSP-Decken. Gleichzeitig kommt es auch zu mehr Gewicht durch den höheren Materialaufwand in den Wänden zur Lastabtragung. Deutlich fällt das zusätzliche Gewicht im Aufbau auf, welches bei den Wänden und Dächern anfällt. Hier schlagen sich die HLB-Beplankungen nieder.

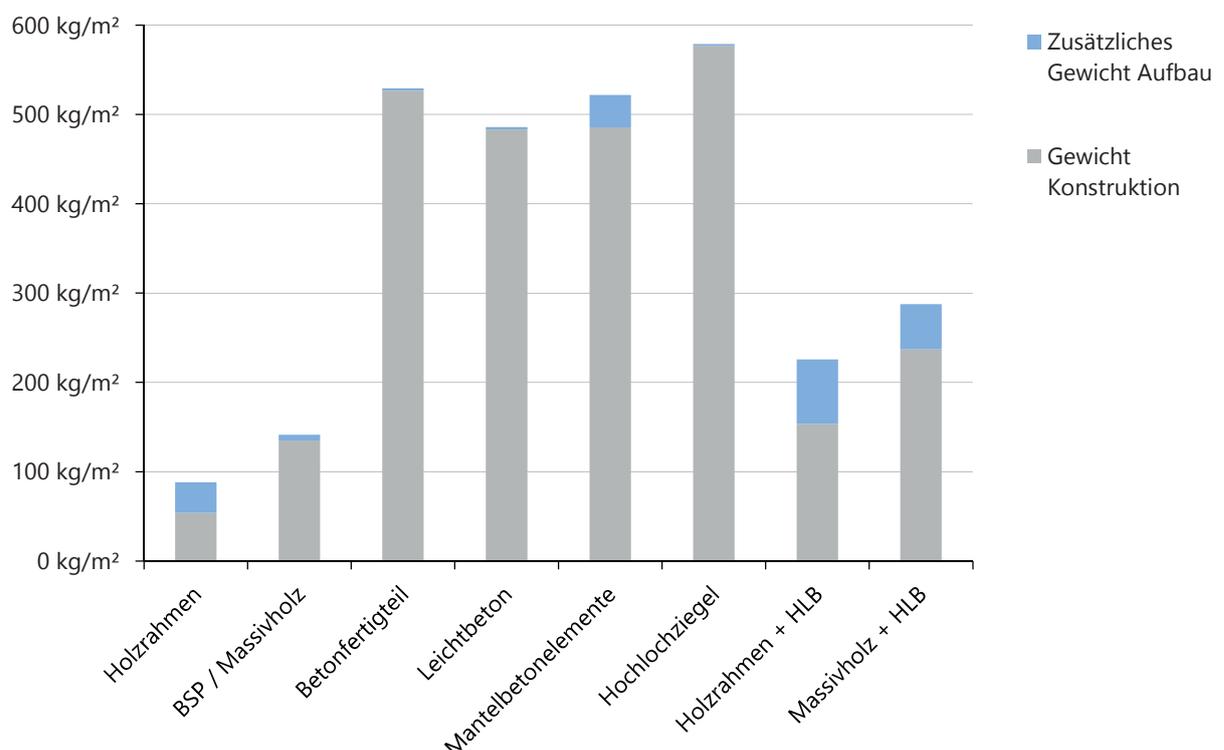


Abb. 51: Diagramm Gewicht der Bauweisen pro Quadratmeter Geschossfläche

Die Mantelbetonbauweise kann im Hinblick auf das Gewicht kaum Vorteile erbringen. Ein Weniger im Gewicht der Konstruktion durch Wand- und Deckentragwerk wird durch das Gewicht der Mantelbetonelemente kompensiert. Um hier ein geringeres Gesamtgewicht zu erzielen, müssten die Mantelbetonwände mit leichteren Deckensystemen aus Holz oder Holzleichtbeton kombiniert werden.

Wie schwer ein Bauteil oder Gebäude ist, hat neben der statischen Relevanz auch einen Einfluss auf seine ökologische Verträglichkeit, da beim Transport Energie aufgewendet und CO₂ ausgestoßen wird. Unter der Annahme, dass die Materialien im Schnitt 60km weit transportiert werden benötigt Stahlbeton rund 27 MJ nicht erneuerbarer Primärenergie und emittiert dabei 2 kg CO₂ Äqv. jeweils pro Quadratmeter Geschossfläche. Der Verbrauch der Holzleichtbetonbauweisen ist bei weniger als der Hälfte und der von Holz sogar nur bei rund einem Fünftel davon. Auf die OIB-Bewertung umgerechnet ergibt das etwa 2 Punkte für den Stahlbeton, 1 Pkt. für Holzleichtbeton und 0,4 Pkt. für Holz.

4.1.4.5 Zusammenfassung und Einordnung

Die einzelnen Bereiche alleine liefern bereits gute Ansätze zur weiteren Optimierung und für alternierende Einsatzzwecke des Holzleichtbetons. Darüber hinaus ist aber auch die Betrachtung einer Kombination der einzelnen Faktoren wichtig, da somit einzelne Vor- oder Nachteile in Relation gesetzt werden können und eine bessere Abschätzung der Chancen innerhalb des Bauwesens ermöglicht wird. Entsprechend geht es dabei gleichzeitig auch um eine generelle Einordnung der gewonnenen Erkenntnisse. Zuerst werden dafür außerordentliche Beobachtungen dargestellt und besprochen, bevor eine Auflistung der Holzleichtbeton-spezifischen Erkenntnisse erfolgt.

Allgemein sind bei der gesamten Analyse die besonders guten Resultate der Hohlkörperdecken aufgefallen. Entsprechend würde man deren breiten Einsatz in der Baupraxis erwarten. Dass dem nicht so ist, liegt wohl an den beiden Faktoren Variabilität und Auflagerung. Die elementierte Decke erfordert neben genauer Vorplanung vor allem linienförmige Auflager. Bei punktgestützten Tragwerken müssen also zusätzliche Träger verwendet werden. Gleichzeitig können die Elemente nur bedingt an geschwungene oder unterschiedlich weit spannende Formen angepasst werden. Eine weitere Einschränkung betrifft Durchbrüche, die nur an definierten Positionen möglich sind. Diese Punkte lassen Ortbetonkonstruktionen mit flexiblen Schalungen und auf die Situation angepasst berechneten Querschnitten und Bewehrungen bei vielen Gebäuden wirtschaftlicher darstellen.

Konträr dazu fallen die schlechten Ergebnisse des Leichtbetonwandsystems auf. Zuerst ist der Grund hierfür in der Kozeptionierung der Analyse, im Speziellen der Wahl des Leichtbetons, zu sehen. Es ist abzusehen, dass ein Leichtbeton mit besseren Dämmwerten insgesamt bessere Resultate geliefert hätte. Der beschränkende Faktor war die Absicht eine gute Tragfähigkeit zu erreichen und auch die angenommene Mindestdicke, die teilweise mehr als die benötigten

Lasten aufnehmen konnte. Gleichzeitig ist das System in einer Markteintrittsphase, muss also noch verbessert und erweitert werden um den Vergleich mit anderen Baustoffen antreten zu können.

Im Hinblick auf die Holzleichtbeton-Konstruktionen wurde Folgendes beobachtet:

- Es wurden konstant gute Ergebnisse erzielt. Nur in einzelnen Teilbereichen war es nicht möglich, ähnliche Resultate wie herkömmliche Baustoffe zu erreichen. Ein Faktor, der dazu beiträgt ist, dass die betrachteten HLB-Systeme immer eine Erweiterung einer bestehenden, konventionellen Bauweise darstellen.
- Die BSP-HLB-Beton-Verbunddecke schneidet im direkten Vergleich mit der reinen Brettsperrholzdecke besser ab. Das ist insofern relevant, da Erstere als Erweiterung Letzterer gesehen werden kann.
- Die Betrachtung des Verbunds zeigt auch, dass teilweise Mehrkosten durch Vorteile in anderen Bereichen, wie der geringeren Deckenstärke, ausgeglichen werden können. Im Besonderen bei gennanter konnte der BSP-HLB-B-Verbund sehr gute Resultate erbringen.
- Die Beplankung von Ständerwerken oder Dachsparren mit Holzleichtbeton liefern die zu erwartenden, schlechteren Werte, die dabei aber nicht sehr stark von den Resultaten der konventionellen Aufbauten abweichen. Vor allem in Bezug auf die Speichermasse ergeben sich allerdings Vorteile, die im Weiteren noch behandelt werden.
- Die reine Dämmleistung der Holzleichtbetonplatten ist im Vergleich zu Dämmstoffen relativ schwach, kann aber bei einigen Einsatzzwecken dazu führen, dass auf zusätzliche Dämmschichten verzichtet werden kann.
- Vor allem die Mantelbetonwandbauweise ist auch immer wieder mit guten Resultaten in den Analysen vertreten. Sie wird zwar eher als etabliertes Betonbausystem wahrgenommen, verfügt aber über einen wesentlichen Anteil an Holzleichtbeton. Die Vorteile der Bauweise können auch gut realisiert werden, da sie bereits über einen längeren Zeitraum genutzt wird und entsprechende Erfahrungswerte dazu vorliegen.
- Das Gewicht des Holzleichtbetons in Verbindung mit Holzkonstruktionen ist nur soweit erhöht, dass sie noch als leichte Konstruktionen gesehen werden können. Gleichzeitig kann man daraus ableiten, dass der Schall- und Hitzeschutz besser gewährleistet ist als bei herkömmlichen Holzkonstruktionen.

4.2 SWOT-ANALYSE

Die Methodik der SWOT-Analyse sieht vor, dass Stärken (strengths; S), Schwächen (weaknesses, W), Chancen (opportunities; O) und Bedrohungen (threats; T) für ein Produkt, Konzept oder, in diesem Fall, Material aufgelistet werden. Sie dient im Management typischerweise zur Positionsbestimmung. Für die weitere Vorgehensweise in den nächsten Abschnitten soll damit eine Basis für Überlegungen zu alternativen Einsatzmöglichkeiten geschaffen werden, indem die bekannten Rahmenbedingungen konzentriert aufgezeigt werden.

STÄRKEN	SCHWÄCHEN
<ul style="list-style-type: none"> • Wärmedämmung • Geringes Gewicht • Brandbeständigkeit • Variabilität der Zusammensetzung • Bearbeitbarkeit • Schalldämmmaß • CO₂-Bilanz • Dauerhaftigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Mäßige Belastbarkeit • Trocknungszeiten • Kaum Langzeiterfahrungswerte • Abhängigkeit von Holzverträglichkeit • Hoher Primärenergiebedarf • Hohe Kosten vorhandener Produkte
CHANCEN	BEDROHUNGEN
<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen an Wärmedämmwerte in Kombination mit nachhaltigen, beständigen, bzw. dauerhaften Materialien. • Kapselung, Hitzeschutz/ Speichermasse, oder Schallschutz bei Holzkonstruktionen • Gewichtsreduktion im Zusammenspiel mit Betonkonstruktionen • Brandschutz oder Zwischenschicht zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Holz-Beton-Verbund Konstruktionen • Kleinvolumige Bauten mit geringen Belastungen • Inovative Hersteller auf der Suche nach neuen Absatzwegen • Einsatz bei Fassadensystemen • Verbesserung des Schallschutzes bei leichten Trennwänden 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlendes Interesse der Industrie durch Konzentration auf angestammte Vermarktungsfelder • Fehlendes Fachwissen der Ausführenden und Planer • Unbekanntes Material bei Bauherren • Keine Normen zur Tragfähigkeit • Fehlende Anschauungs- und Versuchsobjekte mit medialer Strahlkraft • Gesättigter Markt an Produkten und Materialien • Gesteigerte Nachfrage nach HLB-Produkten führt zu höherer Nachfrage und höheren Preisen von Holz und Holzabfällen, auch in Konkurrenz zu thermischer Verwertung • Fragliche Interessensvertretung, da zwischen Holz und Beton angesiedelt

5 VORSCHLÄGE ZUM EINSATZ VON HOLZLEICHTBETON

Ein Ziel dieser Arbeit ist es die Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton aufzuzeigen. Wurden dazu in den vorangegangenen Kapiteln bereits vorhandene Produkte und Konzepte untersucht erfolgt nun die Entwicklung alternativer Ansätze. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus bestehenden Systemen und den Analysen werden die Lösungen entsprechend folgender Ansätze präsentiert:

- Erweiterung bestehender Aufbauten mit Holzleichtbeton
- Ersatz von anderen Baumaterialien durch Holzleichtbeton
- Finden einer materialtypischen Holzleichtbetonbauweise

Die Überlegungen behandeln dabei Themen der Bauphysik, des Brandschutzes und vor allem der statischen (Mit-)Beanspruchbarkeit von Holzleichtbeton.

5.1 ERWEITERUNG BESTEHENDER AUFBAUTEN MIT HOLZLEICHTBETON

Von ihrer Konzeption her eignen sich moderne Holzkonstruktionen besser zur Variation der Materialien, da hier grundsätzlich bereits mehrere Schichten unterschiedlicher Baustoffe zum Einsatz kommen. Auch bietet ihr geringes Gewicht Spielraum zur Erweiterung mit (geringfügig) schwereren Materialien. Dagegen sind Betonkonstruktionen von sich aus schwer und haben meist weniger Schichten.

5.1.1 Holzrahmenbauweise

Beim Holzrahmenbau werden Holzständer beidseitig mit Holzwerkstoffplatten beplankt. Erstere übernehmen die vertikale Lastabtragung, während Letztere die Aussteifungen und den Zusammenhalt der Konstruktion sichern. Dadurch eignet sich die Konstruktion in Form einer Tafelbauweise sehr gut um vorgefertigte Bauteile herzustellen. Diese sind durch die beidseitige Beplankung bereits geschlossen und belastbar während des Transports. Im Gegensatz dazu steht die Holzständerbauweise mit Fachwerk- und Ingenieurholzbau und mehrgeschossig durchgehenden Stützen. Den Kern beim Holzrahmenbau bilden Holzständer, in relativ geringem Abstand, der oft auf die Maße der Ausbauplatten abgestimmt ist (z.B. 62,5cm), zueinander, und eine Dämmschicht. Die Beplankung erfolgt raumseitig mit OSB-Platten und außenseitig mit Spanplatten um den Feuchtetransport in die Konstruktion zu unterbinden und die Austrocknung nicht zu behindern. Zusätzlich kann noch eine Dampfsperre oder -bremse eingesetzt werden. (vgl. Abb. 50a)

Der einfachste Weg diese Konstruktionsweise mit Holzleichtbeton zu erweitern ist die Kernschicht ein- oder beidseitig mit HLB-Platten zu beplanken. Diese fungieren als Dämmschicht und reduzieren die Dicke des Dämmkerns. (vgl. Abb. 50b) Dafür können bereits am Markt erhältliche Holzwolledämmplatten herangezogen werden. Der positive Nutzen dieses Systems liegt darin, dass zusätzliches Gewicht in die Konstruktion eingebracht wird, wodurch diese höheren Schallschutz und eine höhere thermische Masse bietet. Letzteres bedeutet, dass die

Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils erhöht wird und verspricht einen besseren Schutz vor sommerlicher Überhitzung durch die Dämpfung von Temperaturspitzen und die Verschiebung der Klimaphasen. Das bedeutet, dass die Hitzespitzen des Außenklimas nicht in das Raumklima vordringen und generell die Aufheizung des Bauteils solange verzögert wird, bis bereits eine Abkühlung in der Nacht stattfindet.

Die nächste Stufe der Einbindung des Holzleichtbetons besteht darin, dass die beidseitigen Beplankungen mit Holzwerkstoffplatten durch HLB-Platten ersetzt werden. (vgl. Abb. 50c) Dafür ist es notwendig, dass der Holzleichtbeton statisch soweit beanspruchbar ist, dass er die Lasten zur Aussteifung des Gebäudes, sowie den Beanspruchungen während des Transports standhält. Letztere Anforderung kann problematisch sein, da selbst bei ausreichend flächiger Lastabtragungsfähigkeit während der Montage punktuelle Spitzenbelastungen, zum Beispiel an Ecken und Kanten, auftreten können. Zusätzlich müssen in diesem Aufbau eine Dampfsperre, sowie eine Winddichtbahn vorgesehen werden um den Dämmkern und die Holzkonstruktion vor Wasserdampf und Luftzug zu schützen. Diese Aufgabe kann im Vergleich zum konventionellen Aufbau nicht von den Platten übernommen werden, da der Holzleichtbeton zu offenporig ist.

Als nochmalige Erweiterung dieses Systems ist der Vorschlag einer zusätzlichen, leichteren, Holzwollebeton-Innenschicht zu sehen. (vgl. Abb. 50d) Bei herkömmlichen Holzleichtbauweisen werden häufig innenliegende Lattungen mit Dämmung unter dem raumseitigen Abschluss mit Gipskartonplatten aufgebracht um eine Ebene für Installationen zu schaffen, die die Abdichtungsebene nicht durchbricht. Analog dazu kann dies auch mit Holzwollebeton hergestellt werden, da er einfach zu bearbeiten ist um Leitungen zu verlegen. Der Wandabschluss kann darauf mit einem Gipsputz erfolgen für den der HLB einen guten Untergrund bildet. Gleichzeitig bietet sich damit ein zusätzlicher raumseitiger Brandschutz der tragenden Holzkonstruktion.

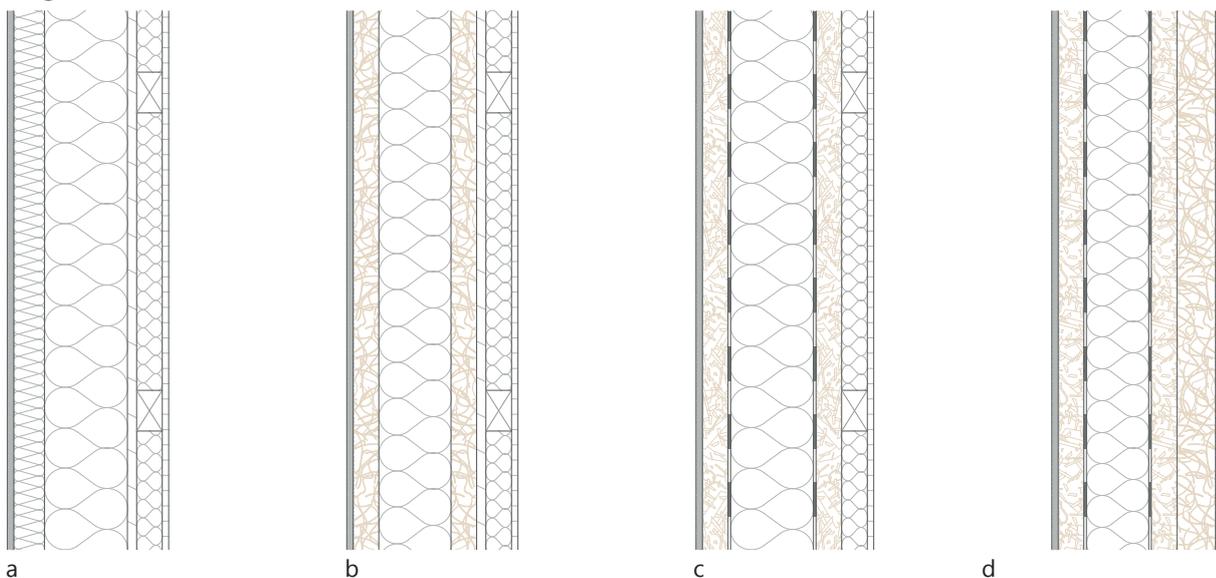


Abb. 52: Holzständerwand in Rahmenbauweise; a Konventionell mit Putzfassade und Installationsebene; b Einfache Erweiterung mit HLB als Dämmung; c Alternative Beplankung mit HLB; d Zusätzliche HLB-Installationsebene

Untersucht man diese Resultate entsprechend der im vorangegangenen Kapitel aufgestellten Kriterien im Hinblick auf ein Einfamilien-Reihenhaus bei mittlerer Spannweite von 6 Metern mit einem Niedrigenergiehaus-Standard, so ergeben sich folgende Beobachtungen:

- Der konventionelle Aufbau bietet mit seiner geringen, wärmespeichernden Masse wenig Schutz vor Aufheizung. Hitzespitzen werden nur schwach gedämpft und können gut in das Rauminnere vordringen. Positiv fällt dabei die Phasenverschiebung von 11 Stunden auf. Durch sie ist es bei angepasstem Lüftungsverhalten möglich die kühlen Nachttemperaturen auszunutzen um das Bauteil wieder auskühlen zu lassen. Dafür ist die geringe Wärmespeicherfähigkeit von Vorteil, da so die Auskühlung leichter vorangeht.
- Beim Einsatz von Holzwollebeton als zusätzliche Dämmschicht steigen die Wärmespeicherfähigkeit und die Temperaturamplitudendämpfung. Der Wärmeeintrag dringt also schwächer in das Raumklima vor. Allerdings wird die Phasenverschiebung verzögert, wodurch die Nachtauskühlung geringfügig beeinträchtigt wird. Gleichzeitig steigen die Kosten und die Bauteilstärke des Aufbaus deutlich an, da zusätzliche Schichten eingeplant und nur wenig Dämmstoff reduziert wurden. Damit ist das System markant teurer, bietet aber nur geringe Vorteile beim Hitzeschutz. Entsprechend ist es nur als bedingt sinnvoll anzusehen.

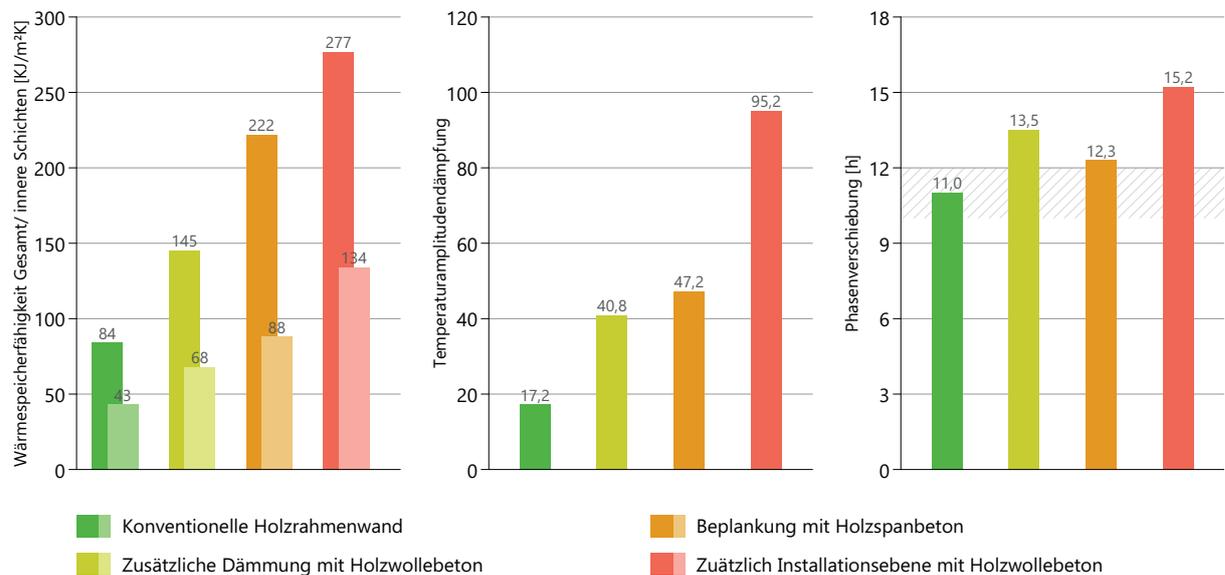


Abb. 53: Diagramm bauphysikalische Kennwerte zum Hitzeschutz von Ständerwänden mit Holzleichtbeton

- Eine wesentliche Verbesserung der Betrachtung findet statt wenn die Beklankung mit Holzleichtbeton durchgeführt wird. Damit einher geht der Ersatz der verklebten OSB-Platten durch eine Dampfsper-Folie, sowie eine höhere Dichte der HLB-Platten. Durch Ersteres können Preisvorteile gegenüber der vorangegangenen Variante realisiert werden. Zweiteres dagegen führt zu einer geringfügigen Verbesserung der Wärmespeicherfähigkeit und der Amplitudendämpfung. Gleichzeitig verändert sich auch die Phasenverschiebung in die Nähe ihres optimalen Bereichs. Damit ist dieser Aufbau besser geeignet baupraktisch

eingesetzt zu werden, da (begrenzte) Mehrkosten mit einem besseren Hitzeschutz argumentiert werden können.

- Die letzte betrachtete Konstruktion sticht vor allem durch sehr gute Werte bei der Temperaturamplitudendämpfung hervor. Auch die Wärmespeicherfähigkeit der, vor allem raumseitig positionierten, Massen ist hoch. Damit einher geht jedoch auch ein deutlich gesteigertes Gewicht (+42% ggü. konventionellem Aufbau), das dabei aber noch immer wesentlich geringer ist, als bei massiven Wänden. Die Phasenverschiebung ist mit 15,2 Stunden stark verzögert. Dies ist jedoch weniger relevant, da die Aufheizung nur sehr stark abgeschwächt stattfindet. Insgesamt verhält sich der Aufbau im Hinblick auf den Hitzeschutz rechnerisch eher wie eine massive Konstruktion. Gleichzeitig sind die Kosten ähnlich der vorangegangenen Variante und die Bauteildicke am geringsten im Vergleich zu den betrachteten HLB-Aufbauten. Die Kombination aus diesen Kriterien lässt den Aufbau als sehr vorteilhaft erscheinen.
- Die OI3-Bewertungen für die verschiedenen Aufbauten wurden ebenfalls ermittelt, weichen allerdings nur geringfügig (max. 2 Punkte) voneinander ab und sind somit wenig relevant. Wichtig ist, dass die Bauteilschichten nach ihrer Nutzung wieder verwertet werden können. Das ist bei den vorliegenden Konstruktionen der Fall, solange die Verbindung reversibel über Verschraubungen erfolgt.

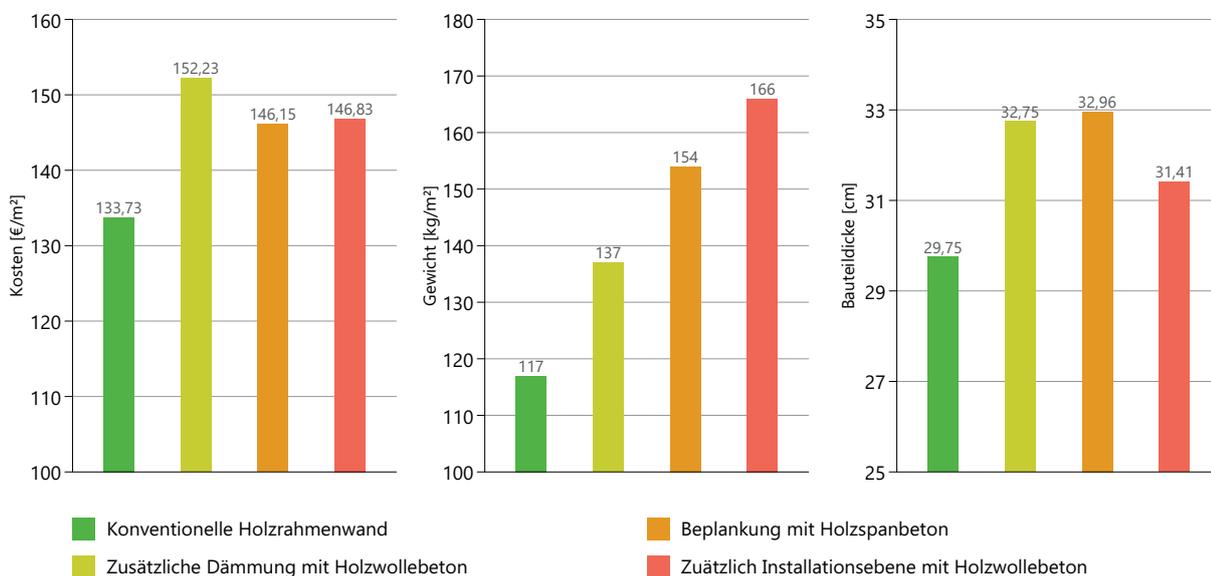


Abb. 54: Diagramm Kosten, Gewicht und Bauteildicke von Ständerwänden mit Holzleichtbeton

Letztendlich stellt sich für diese Vorschläge die Frage der Machbarkeit und der realen Marktchancen. Für Ersteres bietet sich die Betrachtung des Experimentalbaus green:house an, da hier ein Aufbau mit HLB-Beplankungen ausgeführt wurde. Dieser ist ähnlich zur dritten Variante (Abb. 50c), jedoch ohne gesonderte Installationsebene. Die Außenwände des Projekts wurden mit den Holzleichtbeton-Platten vorgefertigt. Diese haben den Belastungen aus Transport

und Montage standgehalten. Dafür wurde allerdings eine eigene Holzleichtbeton-Mischung entwickelt, die nicht als Produkt am Markt verfügbar ist. Betrachtet man aber vorhandene HLB-Produkte finden sich ähnliche oder bessere Werte für Druck- und Biegezugfestigkeit. Entsprechend kann man ableiten, dass das System auch mit bekannten Produkten realisiert werden kann.

Für die Chancen des Holzleichtbetons als Beplankungsmaterial von Holz-Leichtkonstruktionen eingesetzt zu werden ist positiv zu vermerken, dass Hersteller von Holzwolledämmplatten (Knauf Insulation, Heraklith BM) diese bereits als zusätzliche, raumseitige Dämmung für den sommerlichen Hitzeschutz bei Steildächern vermarkten. Dieser Hersteller hat im Markt also die Lücke, beziehungsweise diese Einsatzmöglichkeit von Holzleichtbeton erkannt. Dabei wird das Material aber nicht wesentlich statisch in Anspruch genommen. Eine darüberhinausgehende Nutzung zur aussteifende Wirkung des HLB ist laut den vorliegenden Daten allerdings sinnvoll. Es könnte als eine Erweiterung der Dämmfunktion von Holzwollebetondämmplatten oder als alternativer Ansatz zur Verwendung von Holzspanbetonplatten gesehen werden und demnach für Hersteller dieser Produkte interessant sein.

5.1.2 Beplankung von Massivholzwänden

Prinzipiell können Brettsperr- oder -stapelholzwände genauso mit Holzleichtbeton beplankt werden wie Holzständerwände. Dies geschieht allerdings unter anderen Voraussetzungen, da die Massivholzplatten bereits als Wandscheiben wirken und somit keine zusätzliche Aussteifungsebene benötigen. Gleichzeitig ist die sommerliche Überhitzung, dank des flächigen, massiven Holzeinsatzes, weniger problematisch als bei Ständerkonstruktionen. Brettsperrholzwände werden dagegen immer häufiger bei mehrgeschossigen Gebäuden eingesetzt, wo die Frage des Brandschutzes relevant ist. In diesem Zusammenhang kann der Holzleichtbeton seine Stärken ausspielen, indem er zum Beispiel als raumseitige Beplankung den Hitze- und Schallschutz weiter verbessert und gleichzeitig die Konstruktion vor Brandeinflüssen schützt.

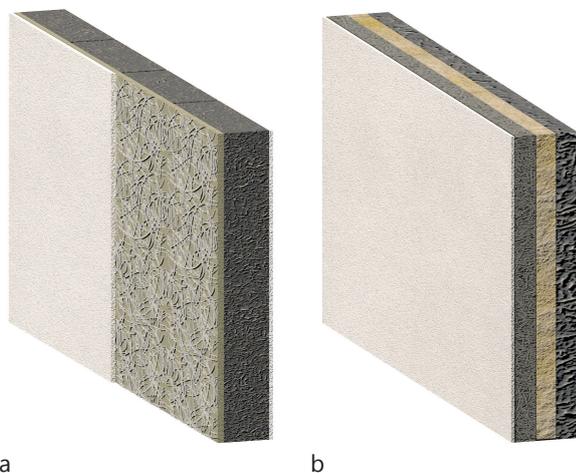
Zusätzlich kann der Holzleichtbeton herangezogen werden um die Tragfähigkeit des Massivholzelements zu steigern (vgl. 3.3.3.1, Setoodeh Jahromy [47]). Entscheidend dabei ist, dass die Resttragfähigkeit des BSP-Querschnitts im Brandfall ausreichend ist um die Standfähigkeit zu gewährleisten. Andernfalls könnte der HLB nicht als Brandschutzmaterial herangezogen werden, sondern müsste selbst vor Brandeinwirkung geschützt werden. In diesem Fall wäre ein dickeres BSP-Element mit GK-Beplankung sinnvoller als ein BSP-HLB-Verbund-Bauteil.

5.1.3 Innenwände mit Holzleichtbeton

Konventionelle leichte Trennwände werden aus Metall-C-Profilen mit Dämmeinlagen und beidseitigem Gipskarton- oder Gipsfaserplatten-Abschluss hergestellt. Sie können schnell und

einfach errichtet werden, sind vielseitig anpassbar und haben dabei geringe Bauteilstärken. Auch bieten sie Platz für Installationen und können durch beidseitig zweifache Beplankung mit GKF-Platten einen Brandwiderstand von EI 90 erzielen. Diese Vorteile führen zu einem breiten Einsatz des Systems in wechselseitiger Verbindung mit relativ geringen Kosten. Einen Schwachpunkt stellt jedoch das Schalldämmmaß dar, welches aufgrund des geringen Gewichts der Wände im unteren Bereich für Innenwände liegt. Hier besteht ein Potenzial für den Einsatz von Holzleichtbeton, da übliche Gipskartonplatten eine Dichte von etwa 650 kg/m^3 aufweisen, wogegen zementgebundene Spanplatten bei etwa $1.000 - 1.200 \text{ kg/m}^3$ liegen. Diese Einsatzmöglichkeit wurde von Herstellern wie zum Beispiel ETERNIT (Duripanel) bereits erkannt. Auch die Brandbeständigkeit, welche bei 36mm bereits EI 90 erreicht, ist vergleichbar mit konventionellen GK-Ständerwänden. (vgl. [69]) Aufgrund der, in Relation zu Gipskartonplatten, hohen Materialkosten werden zementgebundene Spanplatten nur bei gehobenen Ausbaustandards oder als Sichtenwendung herangezogen. Anders ist die Anwendung von Holzwolledämmplatten der italienischen Firma CELENIT. Diese sind in verschiedenen, zu GK-Ständerwänden ähnlichen Ausführungen geprüft und werden im Hinblick auf einen besseren Schallschutz vermarktet. Das bewertete Schalldämmmaß ist dabei allerdings etwa gleich wie bei konventionellen Wandaufbauten, was daran liegen kann, dass die Holzwolleplatten weniger Gewicht einbringen als Gipskartonplatten. Vorteile werden insofern erzielt, dass höhere Frequenzen (über 2000 Hz) besser gedämmt werden als bei herkömmlichen GK-Ständerwänden. Dies wird jedoch mit dickeren Wänden erzielt. [73]

Eine andere Herangehensweise stellen die Systeme von Träullit (vgl. S. 33) und Knauf dar. Letztere bieten mit der sogenannten Heraklith Kompaktbauweise ein System aus 75 bis 100mm breiten magnesitgebundenen Holzwolledämmplatten, welche untereinander verklebt und so aufgemauert werden. Die Methode wird selten verwendet und ist wenig technisch dokumentiert, wird aber mit Vorteilen im Hinblick auf die verfügbare Speichermasse zum Beispiel bei Dachgeschossausbauten vermarktet. (vgl. [70]) Auch die Innen- und Außenwandelemente von Träullit, welche zusätzlich mit Holzstäben verstärkt sind, sind außerhalb Skandinaviens, insbesondere Schwedens, kaum eingesetzt.



a
Abb. 55: Holzleichtbetontrennwände; a Massivelemente mit GK- / HLB-Beplankung; b Metallständerwand mit Holzwolle-/ Holzspanbeton-Beplankung

von Träullit, welche zusätzlich mit Holzstäben verstärkt sind, sind außerhalb Skandinaviens, insbesondere Schwedens, kaum eingesetzt.

Eine mögliche Erweiterung der Leichtbauwände ergibt sich mit Holzleichtbeton wiederum in Kombination mit mehreren seiner Eigenschaften. Konkret sind der gute Schallschutz und die Brandbeständigkeit in Kombination mit seiner Tragfähigkeit von Vorteil bei Trennwänden zwischen Wohnungen oder generell Mieteinheiten. Der Holzleichtbeton kann hier als Beplankung von vorhandenen

Konstruktionen die Leistungsfähigkeit verbessern oder als selbsttragende Wandelemente eingesetzt werden. Bei Letzterem werden Schall- und Brandschutzleistungen durch eine massive Holzleichtbetonschicht übernommen, die verputzt oder mit Trockenbauplatten verkleidet ist. Das System ähnelt Ziegel oder Porenbetonwänden ist aber potenziell ökologischer und leistungsfähiger. Besonders beim Brandschutz ist eine dahingehende Abschätzung allerdings problematisch, da diese nur mit Versuchen an realen Probewandabschnitten aussagekräftig durchgeführt werden kann.

5.2 ERSATZ VON ANDEREN BAUMATERIALIEN DURCH HOLZLEICHTBETON

Die hohe Druckfestigkeit von Beton ist ein Vorteil, der ihn zum meist gewählten Baumaterial macht. Dabei wird aber die maximale Beanspruchung oft bei weitem nicht ausgenutzt. So sind für manche Beanspruchungen die Betonquerschnitte überdimensioniert, da fertigungstechnische oder regulative Mindestdicken bestehen. Gleichzeitig sorgen die niedrigen Preise und breite Verfügbarkeit von Beton und Betonprodukten für einen breiten Einsatz des Materials, bei dem die Belastbarkeit oft bei weitem nicht zur Gänze genutzt wird. Typisch sind Betonplatten oder -Wände im Außenbereich, die kaum Lasten aufnehmen müssen aber aufgrund ihrer Dauerhaftigkeit und der niedrigen Kosten bevorzugt eingesetzt werden.

Im Bezug auf statisch beanspruchte Bauteile sind es vor allem kleingeschossige Wohngebäude mit entsprechend geringen Lasten, bei denen die Belastbarkeit von Wänden nicht zur Gänze genutzt wird. Gezeigt hat sich dies auch in der Analyse, wo sämtliche Wände des Wohngebäudes und des Einfamilien-Reihenhaus mit der gleichen Betonfertigteile-Elementdicke berechnet wurden. Entsprechend war der Grad der Ausnutzung der Druckfestigkeit bei mittleren Spannweiten gering. Der Holzleichtbeton kann in diesem Zusammenhang den Beton ersetzen, da er ähnliche Dauerhaftigkeit und Formbarkeit verspricht. Die geringere Belastbarkeit ist bei kleiner Beanspruchung weniger ausschlaggebend. Dagegen ist die schwächere Wärmeleitfähigkeit vorteilhafter als jene von Normalbeton.

5.2.1 Holzleichtbeton-gefüllte Mantelbetonwände

Mantelbetonsteine und -plattenelemente werden bereits aus Holzleichtbeton hergestellt und dann mit Beton vergossen. Die Bauweise bietet Variabilität und eine einfache Montage, wobei aber mit einer längeren Verarbeitungszeit für das Aufmauern gerechnet werden muss. Für größere Bauvorhaben werden daher von Herstellern Wandelemente im Werk vorgefertigt. Bei diesen, für mehrgeschossige Gebäude vorgesehenen, Elementen ist der Verguss mit Beton sinnvoll, da die abzuleitenden Lasten dessen Tragfähigkeit erfordern. Die einfachen Mantelbetonsteine dagegen werden oft auch für Einfamilienhäuser und Nebengebäude, wie Garagen, eingesetzt bei denen keine so großen Lasten auftreten. Hier kann Holzleichtbeton, in einer entsprechenden Dichte, als tragendes Material zum Ausfüllen der Schalungssteine genutzt werden.

Betrachtet man die Untersuchungsergebnisse von Röser [26] erkennt man, dass ein HLB mit einer Tragfähigkeit von 10N/mm^2 mit begrenztem Aufwand und entsprechend vertretbaren Kosten herstellbar ist. Auch sind Werte bis 15N/mm^2 mit moderatem Mehraufwand vorstellbar. Um darzustellen inwieweit diese Werte ausreichend sind für die Verwendung als Wandbaustoff, wird eine Abschätzung der Tragfähigkeit entsprechend des Einfamilien-Reihenhauses der Analyse bei einer Spannweite von acht Metern vorgenommen:

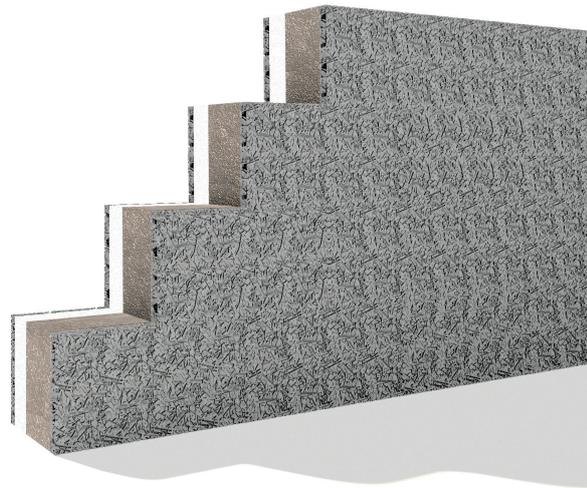


Abb. 56: Mantelbetonsteinwand mit Holzleichtbeton-Verguss

Charakteristische Druckfestigkeit betrachteter Holzleichtbeton: $f_k = 0,8\text{ kN/cm}^2$

Teilsicherheitsbeiwert Beton: $\gamma_M = 1,50$

Daraus folgt die Grenznormalspannung: $\sigma_{R,d} = 0,53\text{ kN/cm}^2$

Auftretende Lasten: $61,0\text{ kN/m}$

Wandfläche: $10\text{ cm (Dicke)} \times 100\text{ cm (betrachtete Länge)} = 1.000\text{ cm}^2$

Druckbelastung: $F_k = 0,06\text{ kN/cm}^2$

Teilsicherheitsbeiwert Lasten: $\gamma_F = 1,40$

Vorhandene Druckspannung: $\sigma_{s,d} = 0,08\text{ kN/cm}^2$

Diese grobe Abschätzung zeigt, dass der Holzleichtbeton prinzipiell ausreichend tragfähig ist. In Bereichen mit höheren Beanspruchungen, wie Auflagern von Decken oder Überlagern, treten zwar höhere Spannungen auf, die gesondert überprüft werden müssen, dennoch erscheint der Holzleichtbeton ein geeignetes Material. Berechnet man solch eine Wand mit den Belastungen des Bürogebäudes bei gleicher Spannweite, wird für die Lastabtragung eine mindestens 13cm Dicke HLB-Tragschicht benötigt. Mit erhöhten Belastungen in den Auflagerbereichen, Wind- und Erdbebenbeanspruchungen, die im Realfall einzubeziehen sind muss die Wand noch dicker ausgeführt werden.

Betrachtet man die Wärmedämmeigenschaften ist der klare Vorteil dieser vorgeschlagenen Bauweise zu erkennen. Die Wärmeleitfähigkeit eines Holzleichtbetons der betrachteten Dichte beträgt laut Krippner [2] $0,37\text{ W/mK}$. Dagegen liegt dieser Wert für Normalbeton bei $2,1\text{ W/mK}$, beziehungsweise für Stahlbeton sogar bei $2,5\text{ W/mK}$. Mit dieser Differenz kann je nach Wandaufbau die Dicke des zusätzlich benötigten Dämmstoffes um etwa 1 bis 2 Zentimeter verringert werden. Gleichzeitig wird das Gewicht der tragenden Wandschicht halbiert. Die Bewertung hinsichtlich der Ökobilanz fällt schwer, da es derzeit keinen Transport-Holzleichtbeton gibt und dieser entsprechend auch nicht ausgewertet ist. Ableiten lässt sich allerdings die Aussage, dass der Holzleichtbeton einen geringeren Verbrauch an nicht

erneuerbaren Rohstoffen hat und entsprechend, allein aus diesem Faktor heraus bereits, ökologisch sinnvoller ist. In diesem Zusammenhang zeigt sich auch, dass beim derzeitigen Einsatz von HLB-Mantelbetonsteinen die Trennung des Füllbetons und des Holzleichtbetons beim Abbruch sehr aufwendig ist. Eine einheitliche Verwendung von Holzleichtbeton in beiden Schichten, mit im Idealfall gleicher Zusammensetzung, würde die Verwertung erleichtern, da diese nicht mehr getrennt werden müssten.

In direkter Konkurrenz steht die Mantelbetonsteinbauweise mit Ziegeln dadurch, dass beide Systeme zunächst gemauert werden. Die Vorteile der Mantelbetonsteine sind ihr geringeres Gewicht, wodurch das Verlegen schneller geht, dünnere Wände bei vergleichbarer Leistung, die Möglichkeit ganze Wandelemente vorzufertigen und die geringere Umweltbelastung. Dennoch ist die Ziegelbauweise weiter verbreitet. Eine andere, konkurrierende Anwendung wäre das Verfüllen von Mantelbetonsteinen mit anderen Leichtbetonen. Im Vergleich zum Holzleichtbeton ist davon auszugehen, dass diese jedoch weniger ökologisch verträglich sind.

5.2.2 Ersatz bei Nutzungen mit geringen Traganforderungen

Die Nutzung von Holzleichtbeton als Schüttung, Estrich oder Bodenbelag wurde in den vorangegangenen Kapiteln bereits vorgestellt. Diese ist, unter anderem, auch in Hinsicht auf die Renovierung von Decken mit geringer Tragkraft sinnvoll. Daneben werden mineralisierte Holzpartikel auch als Material für Beläge im Außenbereich eingesetzt. In die ähnliche Richtung gehend kann Holzleichtbeton auch für Möblagen im Freiraum herangezogen werden. Derzeit werden diverse Stadtmöblierungen aus Beton mit und ohne Kombination von Holz- oder Kunststoffteilen eingesetzt. Diese werden teilweise aus Faserzement gegossen und haben so nur relativ dünne Materialstärken und ein geringes Gewicht. Alternativ dazu gibt es auch Ausführungen aus massiven Betonblöcken. Letztere können auch aus Holzleichtbeton gefertigt werden. Dadurch würde sich das Gewicht der Betonmasse in etwa halbieren. Exemplarisch wurde dafür ein vorhandenes Produkt in Holzleichtbeton digital rekonstruiert und die Massen der beiden Varianten ermittelt. (Siehe Abb. 57)



a Betonbank "Concreta" - 4.950 kg



b Betonbank Holzleichtbeton - 2.900 kg

Abb. 57: Betonbank "Concreta"; a Original der Firma Runge; b Übersetzung in Holzleichtbeton

Die Oberflächengestaltung kann dabei nahezu ident wie bei Normlbleton ausgeführt werden. Alternativ dazu kann aber auch eine Holzleichtbeton-typische Oberfläche mit den genannten Gestaltungsparametern (Modellierung, Struktur, Körnung und Farbigkeit) erzielt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass möglichst eine geschlossoporige Struktur an den Außenflächen des Objekts entsteht, die resistent gegen Witterungseinflüsse ist. Zusätzlich ist auch eine nachträgliche Oberflächenversiegelung zielbringend. Insgesamt sind Holzleichtbeton-Freiraum-Möbel eine gute Erweiterung bestehender Beton-Freiraummöbel, da sie die Möglichkeit bieten auch auf Untergründen mit begrenzter Tragfähigkeit, wie zum Beispiel Dachterrassen, eingesetzt zu werden.

5.3 FINDEN EINER MATERIALTYPISCHEN HOLZLEICHTBETONBAUWEISE

Die bis hierher in dieser Arbeit gezeigten Ansätze und Produkte beruhen zumeist auf anderen Bausystemen und bilden für diese eine sinnvolle Erweiterung. Eine positive Ausnahme in diesem Zusammenhang bilden die Wand- und Dachprodukte der Firma Träullit, die bereits die Vorteile des Holzleichtbetons nutzt um eigenständige Lösungen zu entwickeln. Für die weitere Entwicklung des Holzleichtbetons ist es wichtig herauszufinden wie die dem Material eigene Bauweise, Konstruktion und Gestaltung sind. Der nachfolgende Abschnitt ist dazu als Anregung für eine, beziehungsweise Beitrag zu einer Diskussion anzusehen.

Die Entwicklung materialtypischer Holzleichtbetonbauweisen beginnt mit der grundlegenden Frage nach der elementaren Wesensart des Materials. Dafür wird folgende Definition vorgeschlagen:

Der Holzleichtbeton ist eine formbare, variable Verbindung von Holz und Bindemittel.

- Der Baustoff setzt sich also aus anderen, bekannten Materialien zusammen.
- Diese können in verschiedenen Verhältnissen kombiniert werden und ergeben entsprechend unterschiedliche Eigenschaften.
- Das entstehende Material kann in eine gewünschte Form gebracht werden.
- Entsprechend der Ausgangsstoffe eignet sich das Material gut zur Kombination mit anderen Betonen und Holz.

Diese Erkenntnisse und ihre Auswirkungen wurden bereits ausführlich behandelt, sollten hier aber noch einmal präzisiert und zusammengefasst werden um als Ausgangspunkt für neue Lösungen zu dienen.

5.3.1 Holzleichtbeton-Decke mit Holz-Bewehrung

Das System der Brettsperr-/Brettstapelholz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecke wurde bereits ausführlich entwickelt und analysiert. Auch in dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Massivholzplatte ein wesentlicher Kosten- und Ökofaktor ist. Genauso ist der plattenförmige Einsatz des Holzleichtbetons teuer und fertigungstechnisch fraglich, da kleinteilige Elemente auf großen Flächen, oft in mehreren Schichten, verbaut werden. Dies wäre nur sinnvoll bei

Anforderungen an Anpassbarkeit in Kleinbereichen und einen entsprechenden Zuschnitt. Im Gegenzug zieht der Aufbau seine Vorteile besonders daraus, dass er aus bereits bekannten und verfügbaren Baumaterialien besteht und eine Erweiterung der Holz-Beton-Verbunddecke darstellt. Entsprechend ist er besonders nahe an der baupraktischen Ausführbarkeit.

Der nun vorgeschlagene Gegenentwurf für ein Holzleichtbeton-Deckensystem sieht vor, dass die Zugkräfte im unteren Bereich des Aufbaus durch Holz-Zugbewehrungen übernommen werden, die in eine leichte Holzwollebeton-Verbundzwischenenschicht eingelassen sind. Darauf wird eine HLB- oder Beton-Druckschicht aufgebracht. Die beiden Holzleichtbeton/Beton Schichten können in zwei kurz aufeinanderfolgenden Betonierabschnitten verarbeitet werden, sodass ein direkter Betonverbund entsteht. Als unterer Abschluss dient eine HLB-Schalungsebene, die auch für den Brandschutz der Konstruktion herangezogen wird und verputzt, verkleidet oder sichtbar ausgeführt werden kann.

Der Vorteil dieses Aufbaus besteht darin, dass weniger plattenförmiger Holzleichtbeton und günstigere Holzprodukte eingesetzt werden. Letztere bieten dazu die Möglichkeit, durch Anordnung und Variierung der Anzahl und Dimension auf unterschiedliche Belastungssituationen gezielt eingehen zu können. Demnach agieren die Holz-Zugelemente ähnlich wie Bewehrungen in herkömmlichen Stahlbetondecken. Ein Nachteil des Systems ist auch leicht zu erkennen, da voraussichtlich keine großen Lasten und Spannweiten damit sinnvoll realisiert werden können. Das ist aber auch nicht zwingend erforderlich, da eine Positionierung als ökologische Alternative zu Stahlbetondecken bei Spannweiten bis etwa 7m, zum Beispiel im Wohnungsbau, mit vergleichbaren Kosten vorstellbar ist. Dabei machen Schall- und Brandschutzleistung des Systems es auch gegenüber Holzdeckensystemen konkurrenzfähig. Eine solche Konstruktion wäre etwa wie folgt konfiguriert:

Spannweite: $l = 6 \text{ m}$

Betrachteter Deckenabschnitt: 1 m

Lasten Wohnbau: Nutzlast 3 kN/m^2 + Bodenaufbau $1,4 \text{ kN/m}^2$ + Konstruktion $1,6 \text{ kN/m}^2$

Daraus folgt Abschätzung der tragenden Schichten:

Maximales Moment: $M_{\max} = q \cdot l^2 / 8 = 6,0 \cdot 6^2 / 8 = 27 \text{ kNm}$

Abstand der Mittelachsen von Zug- und Druckzone: $e = 20 \text{ cm}$

Maximale Krafteinwirkung in Zug- und Druckzone: $F = M_{\max} / e = 27 / 0,2 = 135 \text{ kN}$

Teilsicherheitsbeiwert Lasten: $\gamma_F = 1,40$

Querschnittfläche Beton: $A = 500 \text{ cm}^2$

Vorhandene Druckspannung: $\sigma_{S,d1} = F \cdot \gamma_F / A = 0,378 \text{ kN/cm}^2$

Grenznormalspannung (Druck) Holzleichtbeton: $\sigma_{R,d1} = 0,53 \text{ kN/cm}^2$

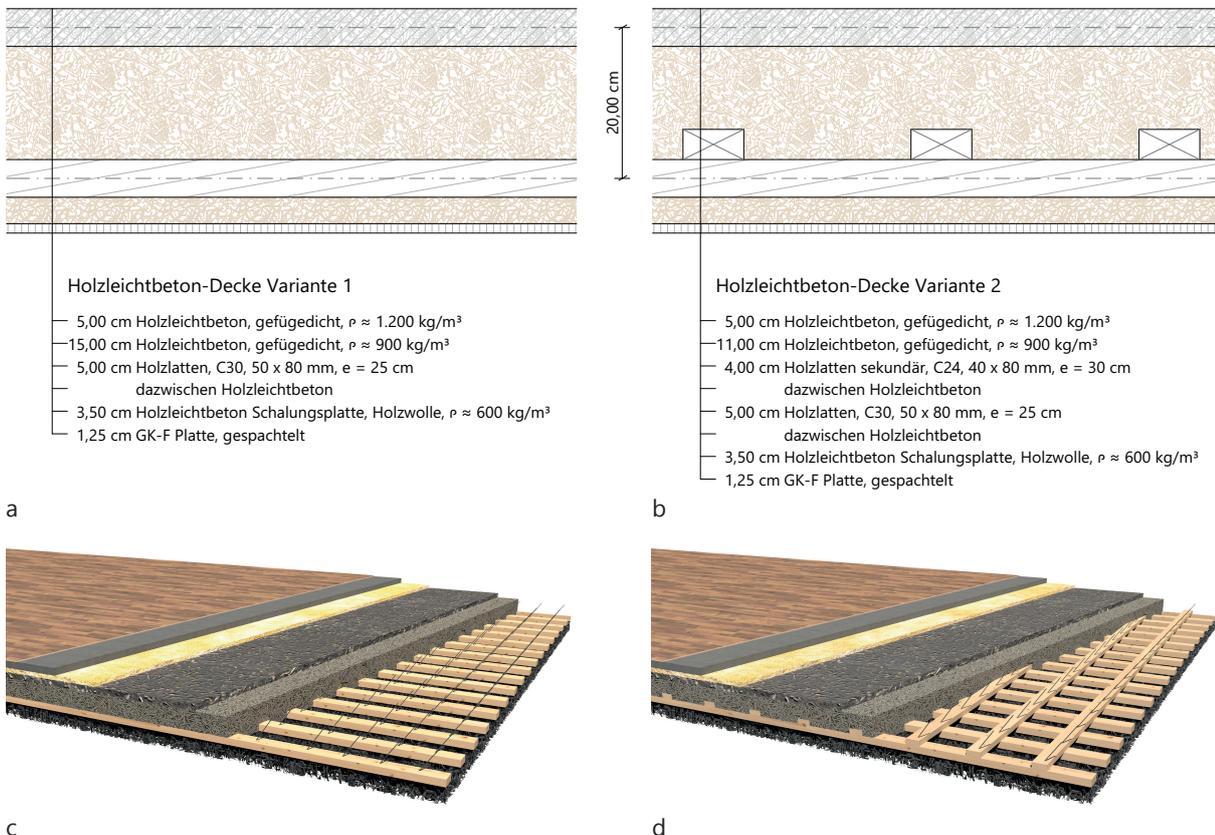
Querschnittfläche Holz: $A = 192 \text{ cm}^2$

Vorhandene Zugspannung: $\sigma_{S,d2} = F \cdot \gamma_F / A = 0,984 \text{ kN/cm}^2$

Grenznormalspannung (Zug) Holz C30: $\sigma_{R,d2} = 1,1 \text{ kN/cm}^2$

Es zeigt sich also, dass das System tragfähig ist, auch wenn bei einer Spannweite von 6 Metern bereits ein Lattenachsmaß von nur noch 25cm notwendig wird. Daraus abgeleitet wird der Einsatz von Holz zugstäben ab einer Spannweite von 7 bis 8 Metern, je nach auftretender Last, unlogisch, da sie dann bereits dicht gedrängt aneinander liegen müssten. Entsprechend ist es sinnvoller ab diesen Belastungen eine Holzplatte zu verwenden. Auch sagt die Tragfähigkeitsabschätzung wenig über die Durchbiegung, also die Gebrauchstauglichkeit, aus.

Die Kraftübertragung zwischen Holz und Beton erfolgt über HBV-Schrauben und den Holzleichtbeton. In einer alternierenden Ausführung können quer zu den Hauptlatten auch sekundäre Holzlatten verlegt werden. Sie würden dabei eine gute Kraftübertragung (Verschiebung) zwischen Holzleichtbeton und Holzlatten herstellen. Das Prinzip funktioniert dabei ähnlich wie die Latten bei der BSP-HLB-B-Verbunddecke, jedoch ist die Verzahnung als stabiler anzunehmen, da die Sekundärlatten rundum mit Holzleichtbeton umschlossen sind. Diese Holzquerschnitte können zusätzlich noch für eine Tragwirkung in einer zweiten Spannrichtung herangezogen werden. Da sie prinzipiell näher an der Betonschicht angeordnet sind, wäre die Leistungsfähigkeit allerdings geringer als jene der primären Holz-Zugbewehrung. Gleichzeitig stellt sich auch die Frage inwieweit die Holzleichtbeton-Verbindungsschicht auch Anteile der Zug- und Druckkräfte aufnimmt, beziehungsweise aufnehmen kann. Um dazu eine fundierte Aussage machen zu können sind jedoch Versuche mit dem vorgeschlagenen System, sowie den dazu eingesetzten Holzleichtbetonen, notwendig.



a Aufbau Variante 1, einachsrig; b Aufbau Variante 2, zweiachsrig; c Schaubild Variante 1; d Schaubild Variante 2

Die Montage einer solchen Konstruktion kann auf zwei prinzipiell unterschiedliche Arten erfolgen. Einerseits können zuerst die Latten auf den Wänden aufgelegt und anschließend die HLB-Schalungsplatten von unten aufgeschraubt werden. Demgegenüber steht eine Vorfertigung der Lattung und Schalung im Werk oder auf der Baustelle. Diese würden dann als Elemente angeliefert und verlegt werden, bevor die HLB-Zwischenschicht und der Beton der Druckzone aufgebracht wird. Bei beiden Varianten müsste eine mehrmalige Unterstellung der Schalung erfolgen, da die Latten alleine sehr wenig Tragwirkung entfalten und somit die Lasten durch das Betonieren und ihr Eigengewicht nicht halten könnten. Alternativ können auch die gesamten Elemente im Werk vorgefertigt werden. Dadurch hätte man eine bessere Kontrolle über das Abbinden der Komponenten und weniger Probleme mit der Unterstellung. Allerdings führt dies auch zu einem wesentlich größeren Transportgewicht.

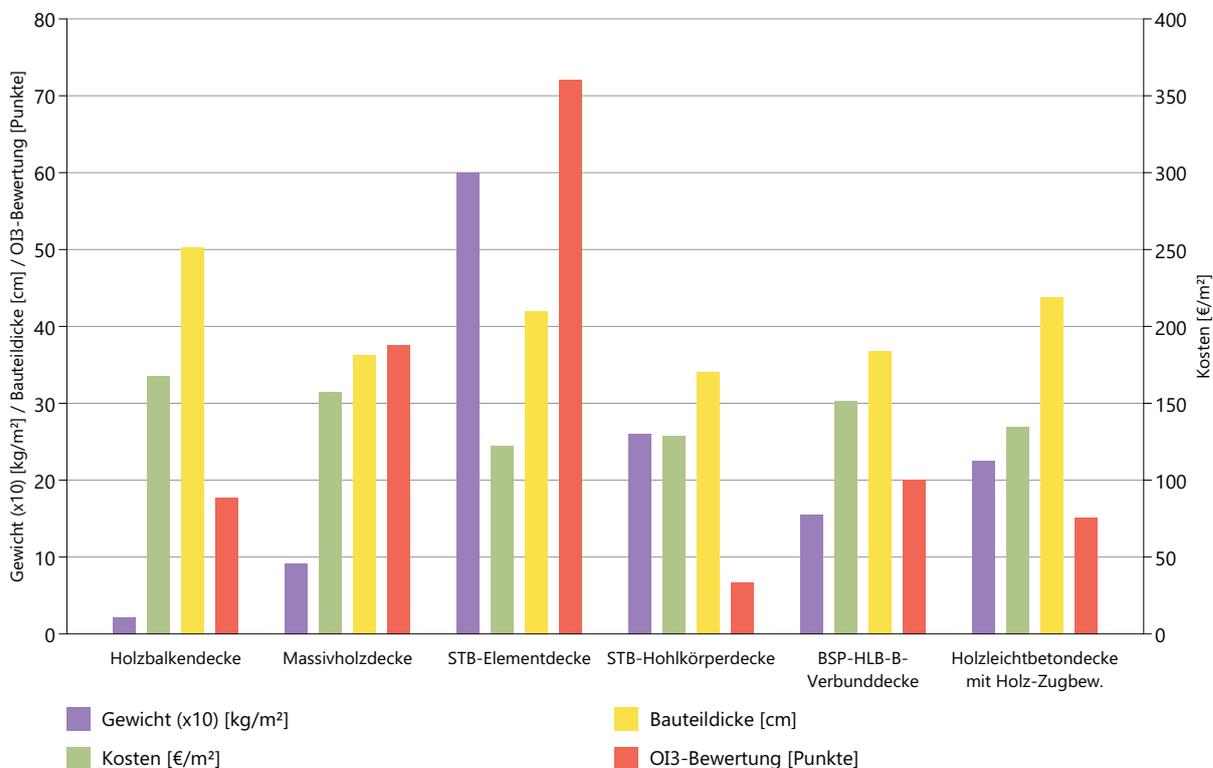


Abb. 59: Diagramm Vergleich Holzleichtbetondecke mit Holz-Zugbewehrung und andere Bauweisen

Vergleicht man diesen Deckenaufbau mit jenem der BSP-HLB-B-Verbunddecke anhand des Referenz-Wohngebäudes, so ist die Holzleichtbetondecke mit Holz-Zugbewehrung dicker und auch entsprechend schwerer. Allerdings fällt die Ökobilanz besser aus, da das Gewicht und die Dicke vorrangig aus dem Holzleichtbeton resultieren. Im Vergleich zu den anderen Deckenbauweisen zeigt das Abschneiden durchaus Parallelen mit jenem der HLB-Verbunddecke, wobei die Bauteilstärke größer ist, aber die ermittelten Kosten geringer. Letztere sind dabei bestenfalls als Richtwert anzusehen, da für den Holzleicht-Ortbeton in der Deckenkonstruktion nur Abschätzungen aufgrund vorhandener Produkte vorgenommen wurden und keinerlei baupraktische Erfahrungen über das Verarbeiten einer geeigneten Mischung, der nötigen

Unterstützungen und besonders der Kosten eines solchen Systems vorliegen. Gänzlich unbetrachtet sind außerdem die Kosten für die Erforschung, Entwicklung und behördliche Zulassung eines solchen Systems. Insgesamt ist davon auszugehen, dass mit mehr Holzeinsatz in der Zugzone die Bauteildicke reduziert werden kann.

5.3.2 Holzleichtbeton Wandelemente

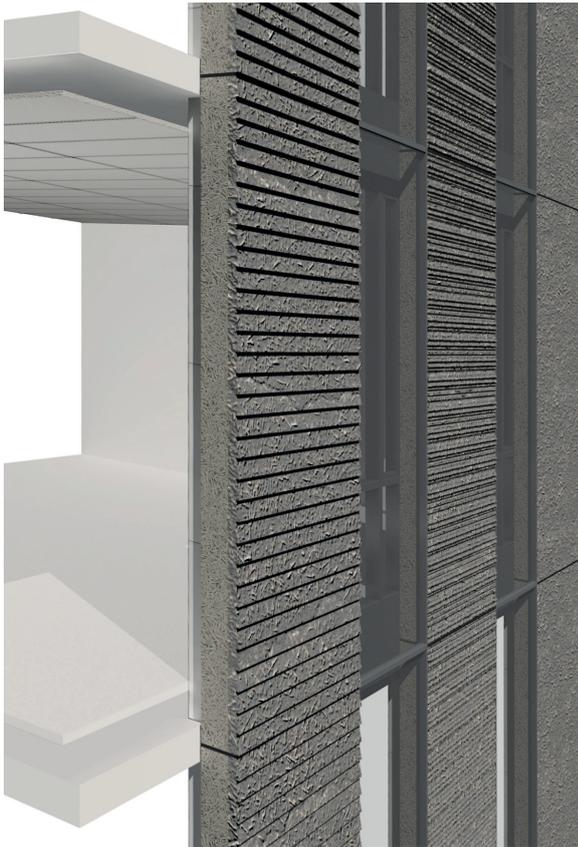


Abb. 60: Holzleichtbeton Fassadenelemente mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen

In der vorhergehenden Ausführung zur Decke wurde bereits angeführt, dass unterschiedliche Holzleichtbetonmischungen durch aufeinanderfolgendes Betonieren in dieselbe Schalungsform miteinander verbunden werden können. Dies ist auch in Kombination mit anderen Betonen vorstellbar. Bei konventionellem Beton ergibt dies wenig Sinn, da nur Unterschiede in der Festigkeit oder der Oberfläche zu erzielen wären und diese den Mehraufwand von mehrschichtigen Betonteilen nicht rechtfertigen. Beim Holzleichtbeton allerdings können mit abnehmender Dichte bessere Wärmedämmwerte erzielt werden. Entsprechend kann ein mehrschichtiger Aufbau sinnvoll sein um einen bestimmten U-Wert zu erreichen und gleichzeitig einen geschlossenen äußeren Abschluss, der sonst offenen Gefügestruktur, herzustellen. Ein

konkreter Anwendungsfall hierfür sind Gebäudefassaden.

Die Ausführung kann dabei in Elementen erfolgen, bei denen zunächst eine geschlossene Schicht Holzspanbeton und anschließend eine dickere, offenporige Lage Holzwollebeton betoniert wird. Darauf kann, je nach Erfordernis, wiederum dünn Holzspanbeton, dickerer, belastbarer Holzleichtbeton oder tragfähiger Stahl-/ Normalbeton als tragende Wand aufgebracht werden. Alternativ wird das Element innen offen ausgeführt um auf eine bestehende Wand montiert zu werden oder um raumseitig offen die Raumakustik zu verbessern. Der seitliche Abschluss des Holzwollebetons sollte flächig verspachtelt werden, um einen klaren Anschluss für die Fugenausbildung zu erhalten.

Im Anfangsstadium der Entwicklung erscheint es zielführend, dass für sämtliche Bauteilschichten der gleiche Zement eingesetzt wird um Unverträglichkeiten, beziehungsweise nachteilige chemische Reaktionen der Zemente (und ihrer Zusätze) untereinander und in Kombination

mit dem Holzzuschlag zu vermeiden. Sobald die Eigenschaften der eingesetzten Hölzer und Zemente und die Vorgänge bei ihrer Erhärtung definiert sind, können auch andere Zemente in Betracht gezogen werden. In weiterer Folge können zur Verbesserung der Dämmeigenschaften auch zusätzliche Dämmplatten in den Aufbau integriert werden. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei an den bereits verfügbaren Holzwollebeton-Sandwich-Schalungsplatten.

Die Vorteile des Aufbaus liegen in den kürzeren Montagezeiten, da weniger unterschiedliche Materialien, beziehungsweise Bauteilschichten verbaut werden müssen. Gleichzeitig sind die Aufbauten, bei denen nur Holzleichtbeton zum Einsatz kommt, vergleichsweise sehr leicht und können entsprechend einfach transportiert und versetzt werden. Elemente, die auch tragende Wandschichten enthalten, werden während der Bauphase ähnlich montiert wie derzeit Betonfertigteile. Dabei können sie als tragende Außenwand genauso fungieren, wie als alleinig das Element tragend. Ein weiterer Vorteil des Systems ist die gute Bearbeitbarkeit von Holzleichtbeton. So können Verbindungsmittel für andere Bauteile, wie zum Beispiel Fenster, direkt und einfach in die Elemente geschraubt werden. Nachteile sind insofern gegeben, dass hohe Dämmwerte, wie sie für Niedrigenergie- oder Passivhäuser gefordert sind, mit dem alleinigen Einsatz von Holzwollebeton als Dämmstoff nur mit sehr dicken Bauteilen zu erreichen sind. Bei der alternativen Erweiterung mit anderen Dämmstoffen, die in das Gefüge eingebunden sind, lässt sich darauf schließen, dass dieser Aufbau insgesamt weniger stabil ist und somit zusätzliche Verankerungen der Schichten untereinander bedingt.

Eine weitere Abwandlung des Systems ist ähnlich zu den Außenwänden der Firma Träulit, kombiniert diese jedoch mit einem ein- oder beidseitigem Abschluss mit Holzspanbeton. Ein Einsatzzweck hierfür ist als raumbildendes Element zwischen Stützen bei Gewerbe-, Lager- oder Industriehallen. Dafür werden in den Bauteilen Aussparungen vorgesehen um Stahlbeton-, Stahlhohlkasten- oder Holzstützen aufnehmen zu können, oder es werden bei der Montage Nuten gefräst um Stahl-I-Profile einzuschieben. Diese beiden Methoden haben den Vorteil, dass die tragende Struktur allseitig vor äußeren Einflüssen geschützt ist. Das bedeutet einen Schutz vor Brandeinwirkungen, chemischen Angriffen und Witterungserscheinungen. Das Element überzeugt dabei mit der Beständigkeit

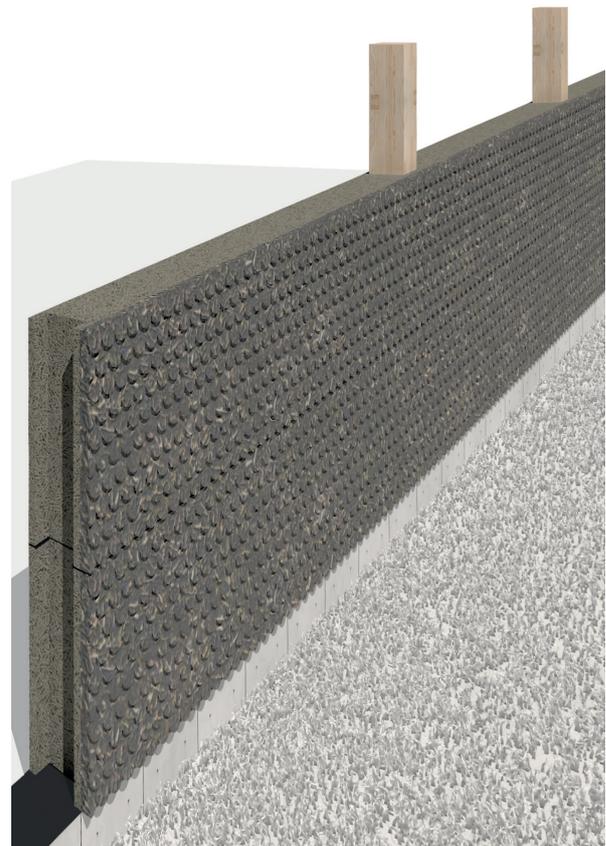


Abb. 61: Holzleichtbeton Wandelemente eingeschoben zwischen Holzstützen

des äußeren Abschlusses und gleichzeitig guten Wärmedämmeigenschaften. Es muss stabil genug sein um das Eigengewicht der Wandelemente abzuleiten und Windkräfte auf die Stützen zu übertragen. Dafür kann es notwendig sein, abhängig von der Höhe der zu errichtenden Wand, dass die äußeren Abschlüsse aus Holzspanbeton dicker ausgeführt werden. Innenseitig kann die Struktur des Holzwollebetons auch offen belassen werden um die Schallsituation des Raumes zu verbessern.

Neben all diesen Eigenschaften bietet der offenporige Holzleichtbeton mit seiner Speichermasse auch die Möglichkeit die Temperierung und die Luftfeuchtigkeit im Gebäude positiv zu beeinflussen. Dies ist einerseits interessant um den Aufwand für die Kühlung zu reduzieren und andererseits relevant für die Lagerung von verderblichen Waren, die bestimmte klimatische Bedingungen erfordern. Zum Erreichen, beziehungsweise Unterschreiten der Mindestanforderung an den U-Wert laut OIB-Richtlinie 6 von $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ist mit einer benötigten Dicke von 23cm Holzwollebeton zu rechnen. Mit 38cm Holzwollebeton dagegen erzielt man einen U-Wert von $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ und erfüllt somit die Kriterien der aktuellen EnEV 2016 für den Neubau. Der Einsatz einer 5cm starken XPS-Platte reduziert in beiden Fällen die benötigte Gesamtdämmstärke um 6cm auf 17cm, beziehungsweise 32cm. Bei allen betrachteten Konstruktionen ist der Hitzeschutz als sehr gut anzusehen, da ein sehr hoher Wert für die Temperaturamplitudendämpfung erreicht wird.

Zuletzt gilt es auch den ökologischen Vorteil des Einsatzes von Holz herauszustreichen. Bei Industriehallen werden häufig Metallplatten zur Verkleidung eingesetzt, da diese kostenschonend und langlebig sind. Am Ende ihres Lebenszyklus werden sie zwar wieder recycelt, benötigen dabei allerdings viel Energie für die Erhitzung und Verarbeitung. Im Gegensatz dazu benötigt Holzleichtbeton deutlich weniger Energie bei der Erzeugung und speichert, mit seinem Holzanteil, das Treibhausgas CO_2 . Dagegen ist eine Wiederverwertung des Abbruchmaterials, beziehungsweise von daraus entstehenden Reststoffen noch nicht etabliert. Ein Vorteil ist dabei, dass die Bauteile rein aus Holzleichtbeton bestehen und nicht mit anderen Betonen vermischt sind. Es ist also nicht zwingend eine Auftrennung verschiedener Baustoffe erforderlich. Ein Ziel des Systems wäre es unbrauchbar gewordene Wandelemente wieder in neue Elemente zu verarbeiten. Daneben weisen Untersuchungen der Beständigkeit des Materials auch auf ein positives Langzeitverhalten hin, weshalb die primäre Nutzungsphase möglichst lang gehalten werden kann. Auch der bereits baupraktisch erprobte Einsatz von zementgebundenen Spanplatten bei Fassaden unterstreicht diese Einschätzung. Zusätzlich gilt es anzudenken abgebrochene Elemente aufzubereiten, also zum Beispiel die Oberflächenschicht zu erneuern, und wieder einzusetzen. Nachteilig ist beim vorgestellten System der Austausch einzelner Elemente. Dieser würde eine aufwendige Demontage mehrerer Bauteile bedingen. Alternativ können die Wandelemente auch in einen inneren und äußeren Teil getrennt werden, welche separat montiert und demontiert werden können.

Wurden sie auch bei der Konzeptionierung des vorliegenden Ansatzes nicht aktiv betrachtet,

so fällt doch eine Ähnlichkeit zum System LütkeTon und zu Leichtbeton-Sandwichenlementen auf. Ersteres besteht aus einer tragenden Leichtbetonschicht mit vorgesetztem Holzwollebeton als Dämmebene. Hierbei wird bereits gezeigt, dass eine Verbindung von zwei Betonschichten durch direkt aufeinanderfolgendes Betonieren erfolgen kann. Der wesentliche Unterschied zu diesem System ist einerseits der Abschluss des Dämmelements mit einer Schicht Holzleichtbeton als Fassade. Daneben unterscheidet sich auch der Ansatz der tragfähigen Innenwandscheibe, da bei dem hier vorliegenden Ansatz vorgeschlagen wird ebenfalls Holzleichtbeton einzusetzen. Die Leichtbeton-Sandwichenlemente, wie sie zum Beispiel von G.tecz Engineering entwickelt werden, schließen eine Porenbetonschicht zwischen zwei Betonplatten ein. Das System ist durchwegs ähnlich zum hier vorgeschlagenen HLB-Sandwichenlement. Es unterscheidet sich zunächst im Baustoff und der damit verbundenen ökologischen Verträglichkeit. Darüber hinaus wird in der vorliegenden Arbeit auch ein konkreter Einsatzzweck im Hallenbau vorgestellt. Beides Systeme zeigen, dass der verfolgte Ansatz prinzipiell interessant und realisierbar ist.

5 VORSCHLÄGE ZUM EINSATZ VON HOLZLEICHTBETON

5.3 FINDEN EINER MATERIALTYPISCHEN HOLZLEICHTBETONBAUWEISE

6 PROOF OF CONCEPT - MACHBARKEITSNACHWEIS

Im vorangegangenen Kapitel wurden verschiedene Konzepte vorgestellt, die teilweise vorhandene Produkte und bekannte Systeme neu miteinander kombinieren und andererseits neue Ideen zum Einsatz von Holzleichtbetonen darstellen. Wiederkehrend dabei ist der Ansatz, dass verschiedene Holzleichtbetone durch gemeinsames Betonieren verbunden werden. Daneben ist die Überlegung, dass der HLB seine Stärken vor allem durch den kombinierten Einsatz mehrerer seiner positiven Eigenschaften ausspielen kann. Die entsprechenden Konstruktionen wurden hier bisher nur theoretisch vorgestellt. Um ihre Machbarkeit nachzuweisen werden in weiterer Folge Versuchskörper erstellt. Ein weiteres Ziel dabei ist es erste Erkenntnisse aus der Verarbeitung und über die Eigenschaften der Endprodukte zu erhalten. Im Speziellen handelt es sich dabei um Proben für die Holzleichtbeton Wandelemente.

6.1 HERSTELLUNG DES VERSUCHSKÖRPERS

Entsprechend der Ausführungen in 5.3.2 wird ein Abschnitt eines Holzleichtbeton Wandelements mit innenliegender Betontragschicht ausgeführt. Es wurde ein Schalungskörper aus Siebdruckplatten mit den inneren Abmessungen von 31 x 31 x 28 cm hergestellt. Der Fassadenabschluss des Probekörpers sollte die vier Gestaltungsprinzipien laut 2.3.3 repräsentieren. Entsprechend wurde der Boden der Schalung mit einer Matrize aus Eigenproduktion und drei Siebdruckplatten mit den Abmessungen von jeweils 15 x 15 cm gebildet. Dazwischen wurden Holzleisten von 1 cm Breite angeordnet. Sämtliche offenen Holzflächen wurden einschichtig mit Klarlack versiegelt um ein Eindringen des Zementleims und eine entsprechende Verbindung mit dem Probekörper zu verhindern.

In einem Vorversuch wurde ein geeignetes Mischungsverhältnis von Zement, Holz und Wasser entwickelt. Dabei wurden die Erkenntnisse von Krippner und Röser berücksichtigt. Die geforderten Mischungen sollten vor allem gut verarbeitbar sein und eine durchmischte, aber geschlossene Oberflächenstruktur aufweisen. Die zu erzielende Festigkeit war nicht ausschlaggebend. Mit dem Vorversuch wurde auch festgelegt, welche Mengen an Ausgangsstoffen für ein zu erzielendes Volumen benötigt werden. Die festgelegten Mischungsverhältnisse finden sich im Anhang (S. 135f.). Sämtliche eingesetzten Holzzuschläge wurden nass, nach eintägiger Wasserlagerung verarbeitet. Das Mischen der Massen erfolgte händisch.

Beim Betonieren des Probekörpers wurden zuerst drei Felder mit der HLB-Mischung I in einer Dicke von 2 cm ausgeführt, wobei der Masse in einem Feld Pigment hinzugefügt wurde. Danach wurde das vierte Feld mit der HLB-Mischung II gefüllt und eine zusätzliche 2 cm starke Verbindungsschicht über die gesamte Fläche des Probekörpers gegossen. Diese Schichten wurden jeweils händisch, mit einer druckverteilenden Platte verdichtet. Darauf folgte eine, zum Zeitpunkt des Befüllens, ca. 8cm dicke Schicht aus Holzwollebeton der HLB-Mischung III. Diese wurde aufgelockert und nicht verdichtet eingebracht. Abschließend wurde eine ca. 4 cm starke Schicht Normalbeton eingebracht und mit der Kelle glatt gestrichen. Das Einbringen

der verschiedenen Mischungen erfolgte in einem Abstand von maximal 30 Minuten. Der Probekörper wurde vier Tage in der Schalung belassen um genügend Festigkeit zu entwickeln, sodass Beschädigungen der Fassadenmuster durch die Matrize beim Ausschalen vermieden werden.

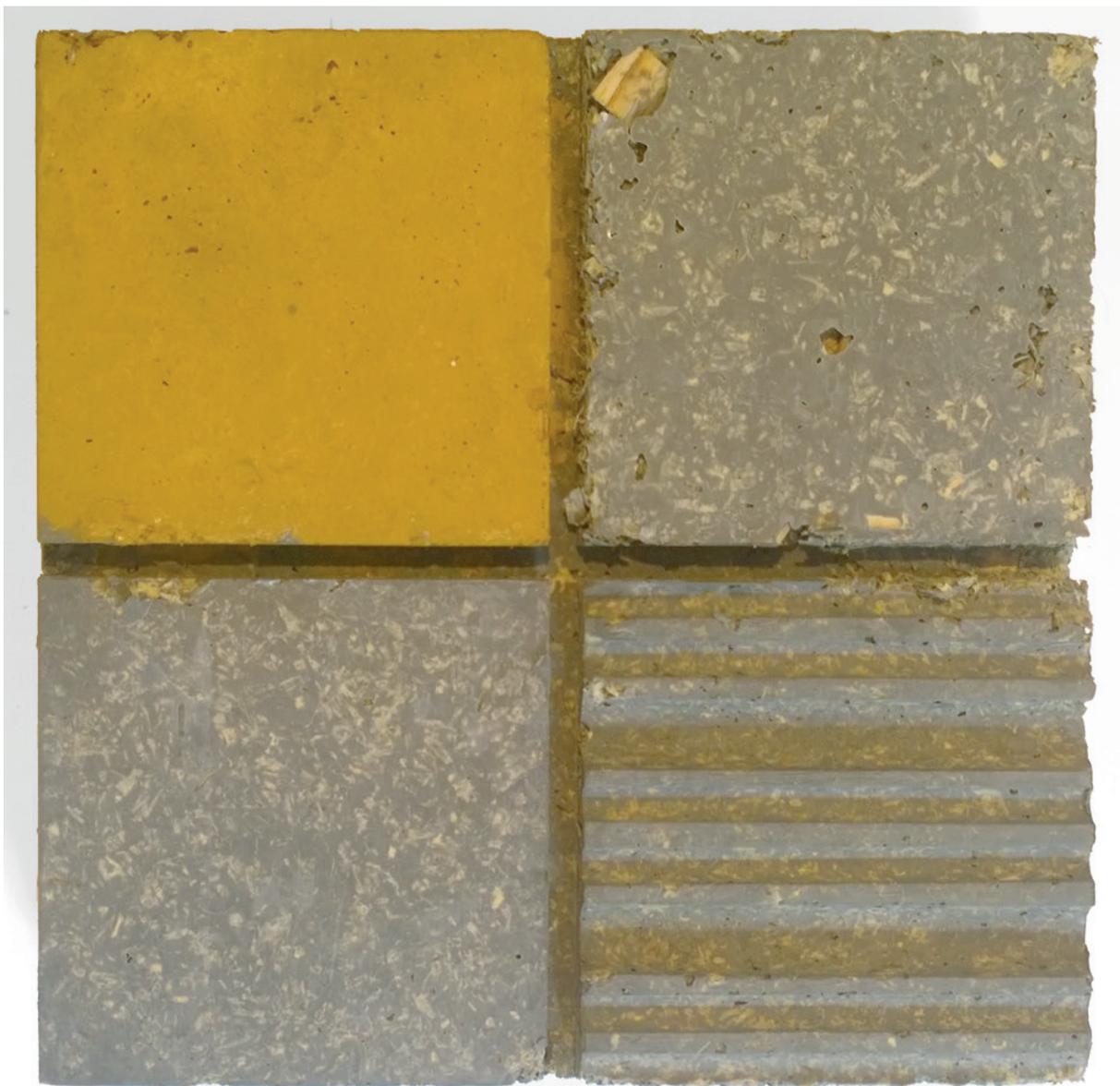


Abb. 62: Probekörper Fassadenansicht laut den vier Gestaltungsprinzipien Modellierung, Strukturdefinition, Körnung und Farbigkeit

6.2 ERKENNTNISSE

Während der Herstellung des Probekörpers wurden folgende Beobachtungen gemacht:

- Obwohl die Vorversuche verdichtet wurden, entstand nur an der Unterseite eine geschlossene, glatte Oberfläche. Das ist erklärbar durch die Setzung des Zements. Für die Fertigung von Fassadenelementen ist daher die Anordnung der Schichten beim Betonieren zu beachten. Soll eine glatte Oberfläche hergestellt werden muss der entsprechende Beton zuunterst eingefüllt werden.
- Bei den HLB-Mischungen wurde gezielt weniger Anmachwasser zum Ansetzen des Zements verwendet, um durch das im Holz gespeicherte Wasser nicht zu viel Feuchtigkeit in den Frischbeton einzubringen. Die Menge wurde dabei so gewählt, dass das Anmischen gerade noch möglich war. Gleichzeitig wurde der Holzzuschlag nass aber abgetropft eingesetzt. Dennoch fiel beim Abfüllen der Masse ein geringer Anteil an überschüssigem Anmachwasser auf. Ein Vorkomprimieren des Holzes, um schwach gebundenes Wasser auszudrücken, erscheint sinnvoll.
- Generell wurde die Methodik des gewässerten Holzzuschlags gewählt, da die eingesetzten Holzspäne sehr stark saugfähig sind. Entsprechend wäre bei trockenem Einsatz des Holzes dem Zement zu viel Wasser entzogen worden.
- Die Holzleichtbetone konnten einfach händisch gemischt werden. Diese Mischmethode war besonders bei der Holzwolle vorteilhaft, da sich die einzelnen Späne teilweise stark verzahnt zu Nestern verformt hatten und so aufgelockert und vollflächig mit Zement bedeckt werden konnten. Der Normalbeton war aufgrund seiner Masse deutlich schwerer zu durchmischen.
- Besonders deutlich ist die Setzung der Holzwollebeton-Schicht durch das Einbringen des Normalbetons aufgefallen. Im Vorfeld wurde zwar erwartet, dass es aufgrund des Gewichts des Normalbetons zu einer weiteren Verdichtung kommt, allerdings war das tatsächliche



Abb. 63: Probekörper Wandaufbau mit Schichtung der Materialien

Ausmaß dieser über den Erwartungen. Das gilt vor allem wenn man beachtet, dass nur ca. 4 cm Normalbeton eingesetzt wurden und diese bei realen Wandelementen bei 10 cm und mehr liegen dürften. Dadurch kann es zu so einer starken Verdichtung kommen, dass der Holzwollebeton Teile seiner Dämmeigenschaften einbüßt. Ein möglicher Lösungsansatz für diese Problematik ist vorgefertigte, fertig abgebundene, Holzwolledämmplatten einzusetzen. Dies steht aber mit der Idee des chemischen Verbunds der einzelnen Bauteilschichten durch gemeinsames Betonieren im Widerspruch. Alternativ kann man daher den Ansatz verfolgen den Holzwollebeton auf die gewünschte Dichte zu komprimieren und einige Zeit erhärten zu lassen, bevor der Normalbeton beigefügt wird. Ziel wäre dabei eine ausreichende Frühfestigkeit zu erreichen um mit dem zusätzlichen Gewicht keine weitere Komprimierung zu verursachen, dabei aber gleichzeitig noch ein Restmaß an Reaktionsfähigkeit vorzufinden, damit sich die Schichten miteinander verbinden.

- Während des Abbindevorgangs konnte stets eine geringfügig niedrigere Temperatur des Probekörpers im Vergleich zu den umgebenden Oberflächen gemessen werden. Dies steht im Zusammenhang mit dem hohen Wasseranteil, der durch das feuchte Holz in die Mischungen eingebracht wurde. Die Austrocknung erfolgte langsam, erkennbar und stetig.

7 EINORDNUNG IN AKTUELLE TENDENZEN

Wie bereits ausgeführt ist die Erforschung und Konzeptionierung des Holzleichtbetons auch immer in Relation zu anderen Baumaterialien zu sehen. Dabei ist es naturgemäß so, dass diese ebenfalls einer ständigen Weiterentwicklung unterworfen sind. Daneben gibt es aber auch andere, neue Materialien, die, genauso wie der HLB, erforscht werden. Begleitet werden beide Vorgänge durch die Erarbeitung neuer Fertigungsmethoden. Im Spannungsfeld dieser Fortschritte gilt es den Holzleichtbeton einzuordnen, um seine Zukunftschancen abschätzen zu können.

Einer der vielversprechendsten neuen Baustoffe sind Karbonfasern. Sie werden aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit, vor allem bei Zugbeanspruchungen, in zukünftigen Konstruktionen eine wesentliche Rolle spielen. Schon jetzt wird das Material in der Baupraxis verwendet und weiter als Bewehrungsstab oder -Fasern in Verbindung mit Beton entwickelt. Dabei nähern sich die Kosten kontinuierlich an eine wirtschaftliche Ausführbarkeit an. Daneben sind es vor allem biologische Materialien die, getrieben von dem Gedanken des ökologischen Bauens, eine Entwicklung durchmachen. In erster Linie sind das bekannte Baustoffe wie Lehm und Stroh, die erforscht und anders als bekannt eingesetzt werden. Gleichzeitig entstehen aber auch bisher unbekannte Materialien, wie Mauersteine, die aus Pilzen heranwachsen. Derzeit sind diese Stoffe zwar Nischenprodukte, aber mit Potenzial zum weiteren Ausbau ihrer Marktrelevanz. Ferner werden Kunststoffe, die durch ihre Vielfältigkeit und die Möglichkeit der Anpassung an verschiedenste Anforderungen punkten, weiterhin zunehmend auch als Baumaterial betrachtet.

Mit diesen Materialien verbunden sind auch neue Fertigungstechniken, wie das Verweben von Karbonfasern zu tragfähigen Strukturen. Damit wird die Leistungsfähigkeit des Materials und der Technik gezeigt. Die konkreten Anwendungsfälle für dreidimensional gewebte Gebilde sind jedoch begrenzt. Anders sieht die Entwicklung im Bereich des 3D-Drucks von Gebäuden oder Bauteilen aus. Sie ist in einer frühen Praxisphase angelangt, in der bereits Produkte hergestellt und vertrieben werden. Für das Formgebungsverfahren gibt es auch verschiedene Ansätze welche Materialien verwendet werden. Diese, meist Betone oder Kunststoffe, müssen auf das Verfahren hin optimiert werden.

Schlussendlich gibt es auch innerhalb des Betonbaus signifikante Entwicklungen. Hier ist es vor allem der ultrahochfeste Beton, der für zukünftige Anwendungen immer interessanter wird. Schon jetzt ermöglicht der Baustoff Fassadenelemente mit ungeahnten Gestaltungsmöglichkeiten. Der Vorteil liegt in seiner Festigkeit, die dünnere Strukturen ermöglicht. Parallel dazu drängen Ökobetone in den Markt, die mit Zementen, die weniger umweltschädlich sind, agieren oder Betonreststoffe als Zuschlag für neue Betonbauteile heranziehen. Beides Themen, die einen verantwortungsvolleren Umgang mit dem Beton einmahnen.

In diesem, kurz umrissenen, Spannungsfeld bewegt sich also der Holzleichtbeton. Dabei kann er nicht mit spektakulären Forschungspavillonen oder hohen Belastbarkeiten punkten. Der Holzleichtbeton ist eher ein rationales Material, dass seine Vorteile durch die Kombination

von verschiedenen positiven Eigenschaften zieht. So ist er zum Beispiel nicht das beste Dämmmaterial, aber er ist ein sehr gutes, beständiges, brandschützendes Dämmmaterial mit guter Wärmespeicherkapazität und Tragfähigkeit. Auch sind seine Charakteristika nicht ausreichend um sämtliche Anwendungen des Betons als leichteres und ökologischeres Material zu übernehmen, aber es gibt Bereiche in denen der Einsatz möglich und sogar sinnvoll ist.

Neben dieser generellen Einordnung gilt es die Entwicklung des Holzleichtbetons und seiner Produkte immer weiter voranzutreiben. In diesem Zusammenhang zielführend sind auch die aktuellen Forschungen an der TU München zur Verarbeitung von Holzleichtbetonen mithilfe von 3D-Druckverfahren. (vgl. [71]) Diese zeigen, dass der HLB mit modernen Fertigungstechniken verarbeitet werden kann und machen somit darauf aufmerksam auch neue Materialien in Kombination mit neuen Techniken zu denken. Daneben sind es vor allem die Hersteller, die alternative Einsatzfelder ihrer Produkte erproben. Dieser Ansatz der Erweiterung von Einsatzmöglichkeiten vorhandener Fabrikate oder der teilweisen Weiterentwicklung des Baustoffs aufgrund der langjährigen Erfahrung, die ein Hersteller mit ihm gesammelt hat, ist entscheidend für die kurz- und mittelfristige Entwicklung des Holzleichtbetons. Neue, tragfähige Holzleichtbetone aus der Forschung können nur schwer ihren Weg in den Markt finden, da sie kaum wahrgenommen werden. Dagegen haben etablierte HLB-Erzeugnisse mit neuem Verwendungszweck einen grundlegenden Bekanntheitsgrad und ihre Hersteller die nötigen Vermarktungsmöglichkeiten, dass diese baupraktisch eingesetzt werden können.

Mehr noch als all diese baupraktischen und bauphysikalischen Überlegungen ist es die Gestaltungsfähigkeit, die den Holzleichtbeton in der Architektur interessant macht. So sind die Ausdrucksmöglichkeiten, die der Brutalismus aufgezeigt hat, seit längerer Zeit getrübt, da moderne Stahlbetonbauten zusätzliche Dämmungen benötigen, die die Betonform verunklären. Hier bietet die Entwicklung des Holzleichtbetons die Möglichkeit reine Betonstrukturen zu bilden, die auch bauphysikalisch und ökologisch verantwortungsvoll agieren. Gleichzeitig erweitert der Holzleichtbeton auch das Vokabular der Oberflächengestaltung mit sichtbaren Holzfragmenten. Daneben ist es die Ausstrahlung des Materials, die ihn interessant erscheinen lassen. Sie ist wärmer als jene von herkömmlichem Beton. Somit ist der populäre Einsatz bei Wohngebäuden, aufgrund seiner Oberfläche, nicht mehr zwingend mit einer kalten, harten Ausstrahlung verbunden, sondern wird eine angenehmere Atmosphäre generiert.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Holzleichtbeton und vorhandene Produkte daraus sind in der Baupraxis in einem relevanten Ausmaß präsent. Darüber hinaus zeigen diverse Forschungen aber auch deutlich, dass es weitere Möglichkeiten zum Einsatz des Holzleichtbetons gibt. Dafür sprechen auch die positiven Eigenschaften des Materials, welches zum Wärmeschutz, Schallschutz und dem ökologisch verträglichen Einsatz von Ressourcen beiträgt. Unter diesen Gesichtspunkten wurden Konstruktionen mit Holzleichtbetonelementen mit gängigen konventionellen Bauweisen verglichen. Im Speziellen waren dies BSP-HLB-Beton-Verbunddecken, Holzkonstruktionen mit HLB-Beplankung und Mantelbetonsteine. Für all diese Systeme konnte gezeigt werden, dass sie bei typischen Einsatzfeldern wirtschaftlich, ökologisch und im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit konkurrenzfähig sind. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass der Holzleichtbeton Vorteile daraus zieht, dass er verschiedene Aufgabenbereiche übernehmen kann. Am besten wird dies anhand der Holzständerwandkonstruktion gezeigt. Die konventionelle Holzständerwand ist billiger, dünner und ökologischer. Durch den gezielten Einsatz von Holzleichtbeton unter der Ausnutzung seiner Festigkeit, Dämmfähigkeit und Brandbeständigkeit ist das System, mit geringem Mehraufwand, deutlich besser vor sommerlicher Überhitzung geschützt.

Diese Analysen haben zu mehreren Erkenntnissen für die Entwicklung neuer Holzleichtbeton-Bauweisen geführt. So ist markant, dass keine Systeme mit einer hauptsächlichen Tragwirkung des HLB existieren, obwohl Forschungsergebnisse über die Festigkeit des Materials den Schluss zulassen, dass dies möglich ist. Daneben sind es vor allem die Kosten und Ökofaktoren der eingesetzten, vorhandenen Holzleichtbetonplatten, die verbessert werden müssen. Dabei ist wesentlich, dass Forschungsansätze mit existierenden Produkten realisiert werden, was auch prinzipiell zielbringend ist für eine praxisnahe Untersuchung, diese aber auf andere Einsatzfelder hin optimiert sind. Die Entwicklung von auf den Einsatzzweck abgestimmten Holzleichtbetonen würde dabei zu Vorteilen führen. Neben diesen generellen Erkenntnissen wurden auch noch Ergebnisse in einzelnen Teilbereichen gewonnen.

Aus der Gesamtheit der Analyse wiederum konnten Ansatzpunkte für neue Einsatzmöglichkeiten des Holzleichtbetons entwickelt werden. Am nächsten an der baupraktischen Ausführbarkeit liegen dabei jedenfalls Holz(-ständer-)konstruktionen mit HLB-Beplankungen. Sie sind sinnvoll, ihre Machbarkeit wurde, zum Beispiel beim Projekt green:house, bewiesen und sie werden teilweise bereits von der Industrie propagiert. Daneben sind es die HLB-Trennwände, die nahe an der Realisierbarkeit dran sind und in Teilen bereits, zum Beispiel von der Firma Träullit, produziert werden. Die anderen vorgestellten Konzepte sind aufgrund ihrer Auslegung grundsätzlich konkurrenzfähig und versprechen Vorteile zu bringen, müssen aber vor ihrem Einsatz noch grundlegend erforscht werden. Bei den Holzleichtbeton gefüllten Mantelbetonsteinen ist zuvorderst ein Transport-HLB zu entwickeln, der geeignet verarbeitet werden können muss um den gesamten Schalungskörper ideal auszufüllen. Gleichzeitig muss eine geeignete Festigkeit

mit möglichst hohem Holzanteil unter realen Bedingungen gewährleistet werden. Nach dieser Entwicklung verspricht der HLB eine ökologischere, besser wärmedämmende und leichtere Bauweise als mit Normalbeton für klein- bis mittelgeschossige Bauvorhaben.

Die gezeigte Holzleichtbetondecke mit Holz-Zugbewehrung benötigt neben abgestimmten HLB-Mischungen vor allem eine Überprüfung und Verbesserung der Kraftübertragung zwischen Holz und Holzleichtbeton. Daneben gilt es auch in Versuchen herauszufinden, inwieweit der HLB Zugkräfte aufnimmt und somit die Holzbewehrungselemente reduziert werden können. Diese Deckenbauweise verlangt also nach zusätzlicher intensiver Forschungsarbeit bevor eine Ausführung angedacht werden kann. Im Gegenzug stellte sie eine kostengünstigere und ökologisch vorteilhaftere Variante einer Holzleichtbetondecke dar. Sie ist eine Weiterentwicklung der Brettsperrholz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecke, welche in der Analyse bereits gute Ergebnisse erzielte, mit dem Ziel die nachteiligen Kosten- und Umwelteinflüsse der Brettsperrholzplatte bei geringen bis mittleren Spannweiten zu umgehen. Das letzte vorgestellte System der Holzleichtbeton Wandelemente zielt darauf ab ein Bauteil mit zwar verschiedenen Schichten mit spezialisierten Aufgaben zu generieren, diese aber mit dem gleichen Material herzustellen und in einem Element zu vereinen. Dadurch kommt es zu wesentlichen Einsparungen bei der Montagezeit. Da das System in ähnlichen Variationen bereits eingesetzt wird ist seine baupraktische Tauglichkeit ersichtlich. Um die Durchführbarkeit dieser Überlegungen zu demonstrieren und einen Anstoß sowie erste Erkenntnisse für weitere Forschungsarbeiten zu leisten, wurde abschließend ein Probekörper eines solchen Wandelements hergestellt. Der erzeugte Körper demonstriert die Machbarkeit des Konzepts.

Rückblickend auf die These, die zum Beginn dieser Arbeit aufgestellt wurde, dass es noch weitere, vorteilhaftere Einsatzmöglichkeiten für den Holzleichtbeton gibt, konnte gezeigt werden, dass diese bestehen und es lohnend ist sie weiter zu erforschen. Gleichzeitig wurden keine fundamental neuen Ansätze geliefert, was zeigt, dass der Holzleichtbeton bereits gut durchdacht und erforscht ist. Anstatt dessen konnten Felder aufgezeigt werden, in denen es lohnend ist die Entwicklung des Materials voranzutreiben, da es hier seine Stärken ideal ausspielen kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dabei die Erkenntnis gewonnen, dass der Vorteil des Holzleichtbetons insbesondere in der kombinierten Anwendung seiner positiven Eigenschaften liegt. Diese sind Leichtigkeit, Dauerhaftigkeit, Brandbeständigkeit, Wärmedämmung, Schallschutz, Anpassungsfähigkeit, ökologische Verträglichkeit und vor allem ein breites Spektrum an gestalterischen Ausdrucksmöglichkeiten.

Mit all diesen Vorteilen ist es unschwer zu erkennen, dass der Einsatz des Holzleichtbetons im Hochbau erstrebenswert ist und in Zukunft weiter vorangetrieben werden muss. In Konkurrenz steht der HLB dabei mit anderen Leichtbetonen, die grundsätzlich eine ähnliche Entwicklung durchmachen, darin allerdings schon wesentlich weiter in die Ausführung, also die Baupraxis, vorgedrungen sind. Für den Holzleichtbeton wäre es also angebracht Experimentalbauten oder Versuchspavillons zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Materials zu errichten. Dabei

gilt es sämtliche Vorteile, vor allem auch die Tragfähigkeit, herauszustreichen. Mit solchen Demonstrationsobjekten wären neue Einsatzfelder für den Holzleichtbeton zu erschließen. Daneben sind es die stete Weiterentwicklung vorhandener Produkte und das Interesse von Herstellern neue Absatzmärkte zu erschließen, die den breiteren Einsatz von Holzleichtbeton kurz- und mittelfristig bestimmen.

9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

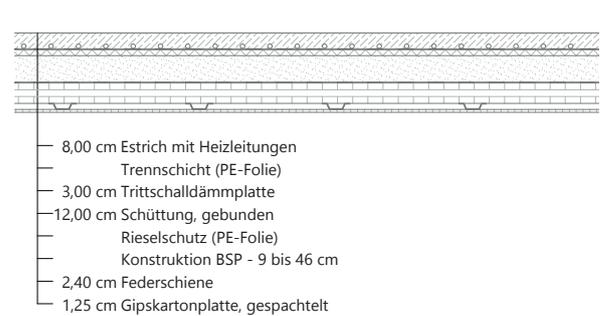
9.1.1 Aufbauten

9.1.1.1 Einfamilien-Reihenhaus

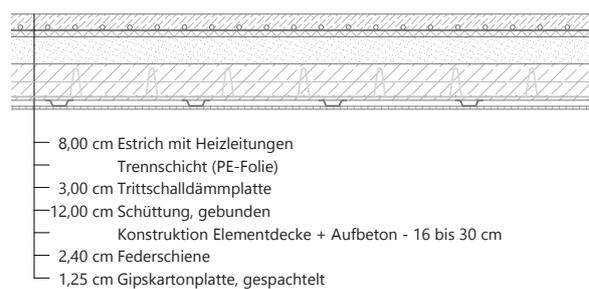
Holzbalkendecke, ähnlich dataholz [54] gdrnx03a



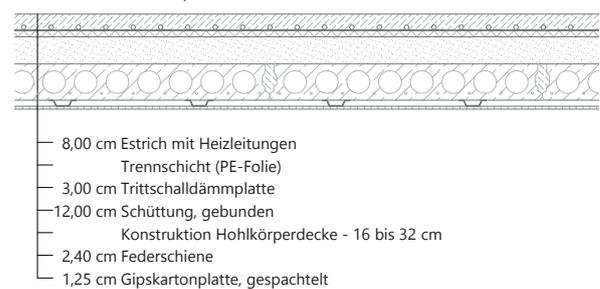
BSP-Massivholzdecke, ähnlich dataholz [54] gdmnxn02



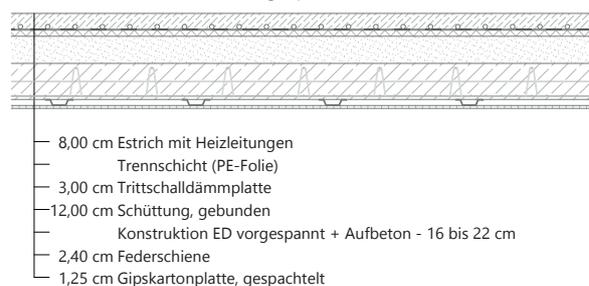
Stahlbeton-Elementdecke



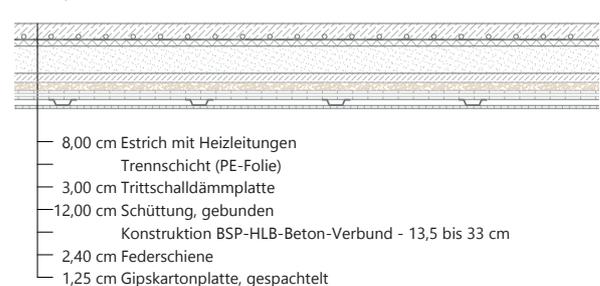
Stahlbeton-Hohlkörperdecke



Stahlbeton-Elementdecke, vorgespannt



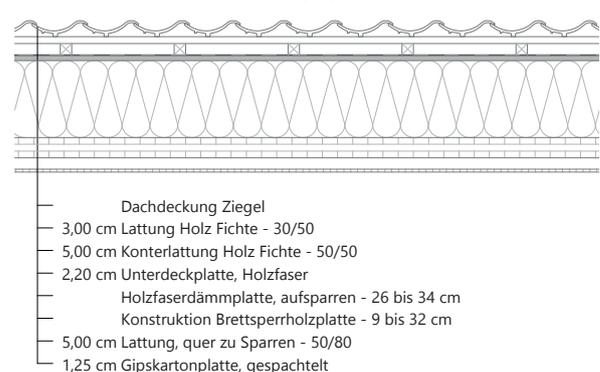
Brettspertholz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecke



Holz Sparrendach, ähnlich dataholz [54] sdrhzi06a



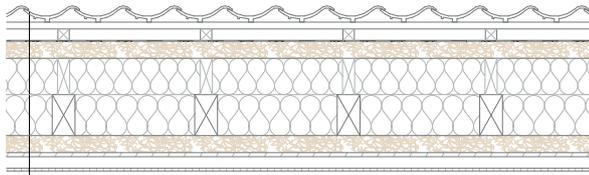
Massivholzdach, ähnlich dataholz [54] sdmhzi01a



9 ANHANG

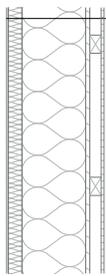
9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

Holz Sparrendach, zusätzlich beplankt mit Holzleichtbetonplatten



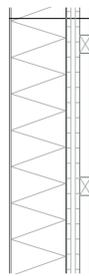
- Dachdeckung Ziegel
- 3,00 cm Lattung Holz Fichte - 30/50
- 5,00 cm Konterlattung Holz Fichte - 50/50
- Unterdachbahn
- 7,50 cm Holzleichtbetonplatte - Holzwolle
- Konstruktion Holzsparren - 10/18 bis 20/52, e=0,625m
- 34,00 cm dazwischen Wärmedämmung Glaswolle
- 7,50 cm Holzleichtbetonplatte - Holzwolle
- 1,80 cm OSB-Platte, luftdicht verklebt
- 5,00 cm Lattung, quer zu Sparren - 50/80
- 1,25 cm Gipskartonplatte, gespachtelt

Holzständerwand, ähnlich dataholz [54] awrhh07a



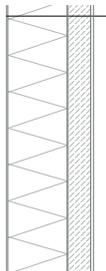
- 0,70 cm Putzsystem
- 6,00 cm Holzfaserdämmplatte
- Holzständer - 8/28 bis 10/30, e=0,625m
- dazwischen Wärmedämmung Glaswolle 28 bis 30 cm
- 1,80 cm OSB-Platte, luftdicht verklebt
- 5,00 cm Lattung, quer zu Ständer - 50/80
- 1,25 cm Gipskartonplatte, gespachtelt

Massivholzwand, ähnlich dataholz [54] awrhh07a



- 0,70 cm Putzsystem
- 24,00 cm Wärmedämmung EPS
- 0,40 cm Klebstoff
- Brettsperrholzplatte - 5,7 bis 7,2 cm
- 5,00 cm Lattung, quer zu Ständer - 50/80
- 1,25 cm Gipskartonplatte, gespachtelt

Betonwandfertigteil, bewehrt



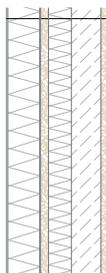
- 0,50 cm Kunstharzputz
- 26,00 cm Wärmedämmung EPS
- 0,40 cm Klebstoff, mineralisch
- 10,00 cm Betonfertigteil, bewehrt
- 1,20 cm Gipsputz

Leichtbetonwandfertigteil, bewehrt



- 0,50 cm Kunstharzputz
- 24,00 cm Wärmedämmung EPS
- 0,40 cm Klebstoff, mineralisch
- 20,00 cm Fertigteil, Leichtbeton bewehrt
- 1,20 cm Gipsputz

Mantelbetonsteinwand



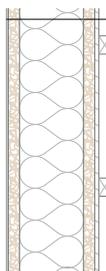
- 0,50 cm Kunstharzputz
- 14,00 cm Wärmedämmung EPS
- 0,40 cm Klebstoff, mineralisch
- 3,50 cm Mantelbetonstein - Schalungsebene
- 10,00 cm Mantelbetonstein - Wärmedämmung EPS
- 13,00 cm Konstruktion Ortbeton
- 3,50 cm Mantelbetonstein - Schalungsebene
- 1,20 cm Gipsputz

Hochlochziegelmauer



- 2,00 cm Leichtmörtelputz
- 50,00 cm HLZ mit integrierter Dämmung in Dünnbettmörtel
- 1,20 cm Gipsputz

Holzständerwand, zusätzlich beplankt mit Holzleichtbeton



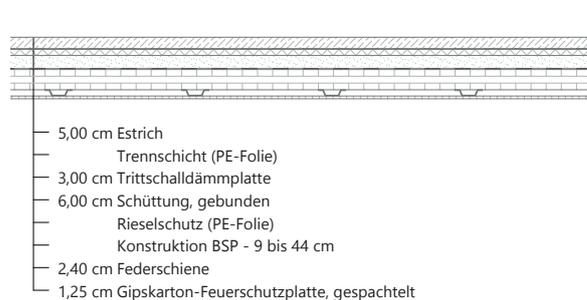
- 0,70 cm Putzsystem
- 5,00 cm Holzleichtbetonplatte - Holzwolle
- Holzständer - 10/28 bis 14/28, e=0,625m
- 28,00 cm dazwischen Wärmedämmung Glaswolle
- 5,00 cm Holzleichtbetonplatte - Holzwolle
- 1,80 cm OSB-Platte, luftdicht verklebt
- 5,00 cm Lattung, quer zu Ständer - 50/80
- 1,25 cm Gipskartonplatte, gespachtelt

9.1.1.2 Wohngebäude

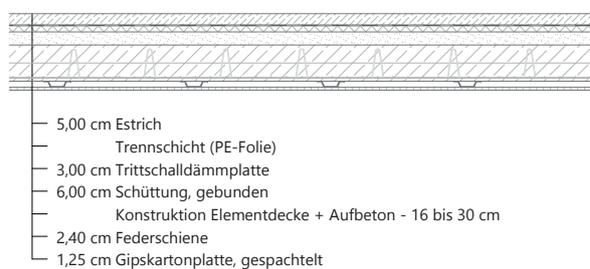
Holzbalkendecke, ähnlich dataholz [54] gdrnx03a



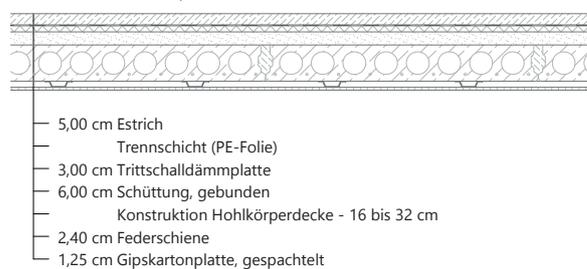
BSP-Massivholzdecke, ähnlich dataholz [54] gdmnrx02



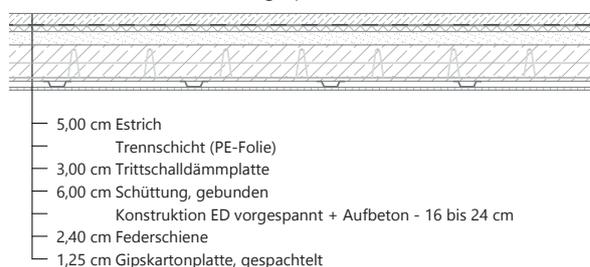
Stahlbeton-Elementdecke



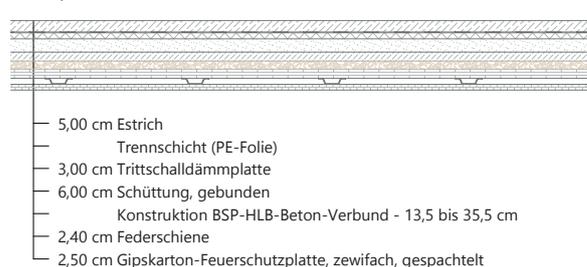
Stahlbeton-Hohlkörperdecke



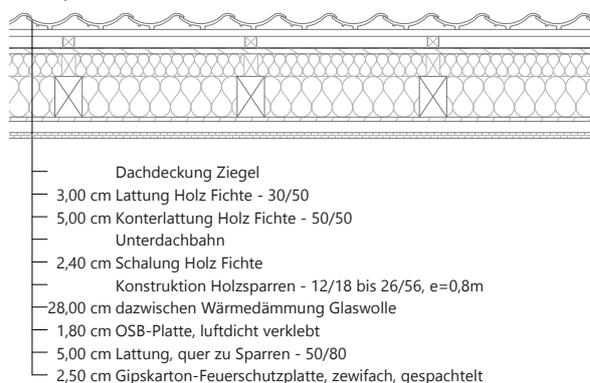
Stahlbeton-Elementdecke, vorgespannt



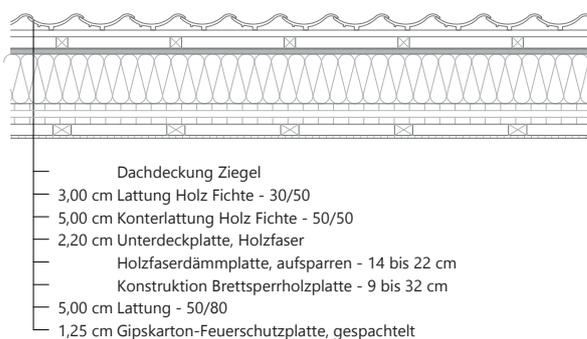
Brettspertholz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecke



Holz Sparrendach, ähnlich dataholz [54] sdrhzi06a



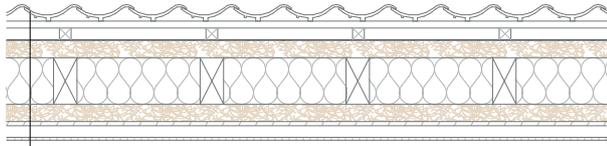
Massivholzdach, ähnlich dataholz [54] sdmhzi01a



9 ANHANG

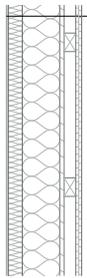
9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

Holz Sparrendach, zusätzlich beplankt mit Holzleichtbetonplatten



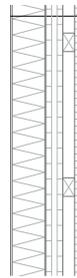
- Dachdeckung Ziegel
- 3,00 cm Lattung Holz Fichte - 30/50
- 5,00 cm Konterlattung Holz Fichte - 50/50
- Unterdachbahn
- 7,50 cm Holzleichtbetonplatte - Holzwolle
- Konstruktion Holzsparren - 10/20 bis 20/56, $e=0,625 - 0,8m$
- 20,00 cm dazwischen Wärmedämmung Glaswolle
- 7,50 cm Holzleichtbetonplatte - Holzwolle
- 1,80 cm OSB-Platte, luftdicht verklebt
- 5,00 cm Lattung, quer zu Sparren - 50/80
- 1,25 cm Gipskarton-Feuerschutzplatte, gespachtelt

Holzständerwand, ähnlich dataholz [54] awrhi07a



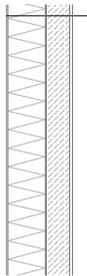
- 0,70 cm Putzsystem
- 6,00 cm Holzfaserdämmplatte
- Holzständer - 12/16 bis 16/16, $e=0,625m$
- 16,00 cm dazwischen Wärmedämmung Glaswolle
- 1,80 cm OSB-Platte, luftdicht verklebt
- 5,00 cm Lattung, quer zu Ständer - 50/80
- 2,50 cm Gipskarton-Feuerschutzplatte, zweifach, gespachtelt

Massivholzwand, ähnlich dataholz [54] awrhi07a



- 0,70 cm Putzsystem
- 14,00 cm Wärmedämmung EPS
- 0,40 cm Klebstoff
- Brettsperrholzplatte - 7,2 bis 9,4 cm
- 5,00 cm Lattung, quer zu Ständer - 50/80
- 2,50 cm Gipskarton-Feuerschutzplatte, zweifach, gespachtelt

Betonwandfertigteil, bewehrt



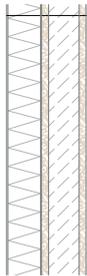
- 0,50 cm Kunstharzputz
- 16,00 cm Wärmedämmung EPS
- 0,40 cm Klebstoff, mineralisch
- 10,00 cm Betonfertigteil, bewehrt
- 1,20 cm Gipsputz

Leichtbetonwandfertigteil, bewehrt



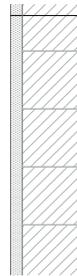
- 0,50 cm Kunstharzputz
- 14,00 cm Wärmedämmung EPS
- 0,40 cm Klebstoff, mineralisch
- 20,00 cm Fertigteil, Leichtbeton bewehrt
- 1,20 cm Gipsputz

Mantelbetonsteinwand



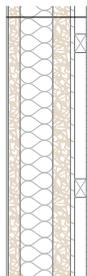
- 0,50 cm Kunstharzputz
- 14,00 cm Wärmedämmung EPS
- 0,40 cm Klebstoff, mineralisch
- 3,00 cm Mantelbetonstein - Schalungsebene
- 12,00 cm Konstruktion Ortbeton
- 3,00 cm Mantelbetonstein - Schalungsebene
- 1,20 cm Gipsputz

Hochlochziegelmauer



- 5,00 cm Wärmedämmputz
- 38,00 cm HLZ in Dünnbettmörtel
- 1,20 cm Gipsputz

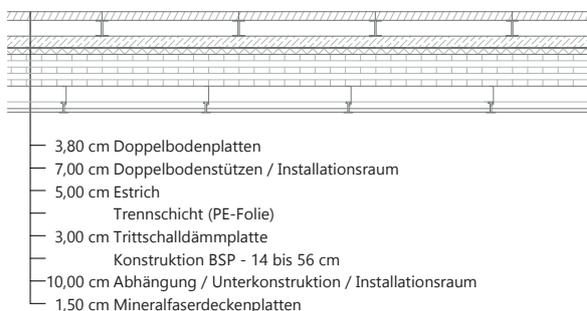
Holzständerwand, zusätzlich beplankt mit Holzleichtbeton



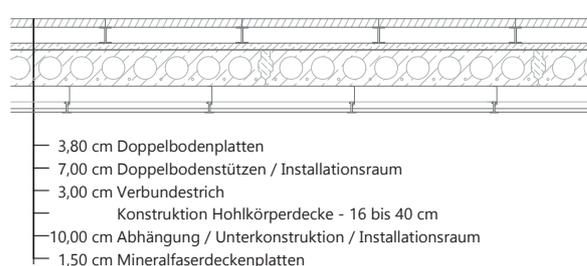
- 0,70 cm Putzsystem
- 5,00 cm Holzleichtbetonplatte - Holzwolle
- Holzständer - 12/14 bis 16/16, $e=0,625m$
- 14,00 cm dazwischen Wärmedämmung Glaswolle
- 7,50 cm Holzleichtbetonplatte - Holzwolle
- 1,80 cm OSB-Platte, luftdicht verklebt
- 5,00 cm Lattung, quer zu Ständer - 50/80
- 2,50 cm Gipskarton-Feuerschutzplatte, zweifach, gespachtelt

9.1.1.3 Gewerbe-/ Bürogebäude

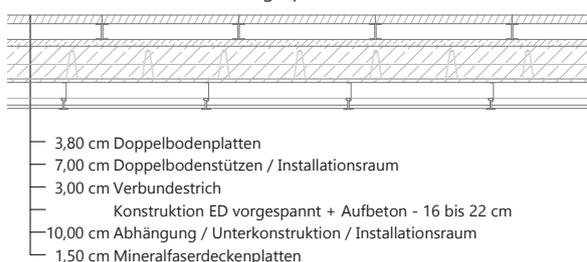
BSP-Massivholzdecke



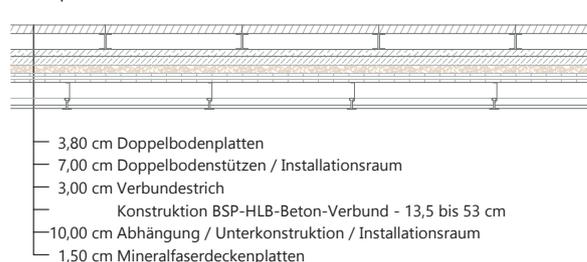
Stahlbeton-Hohlkörperdecke



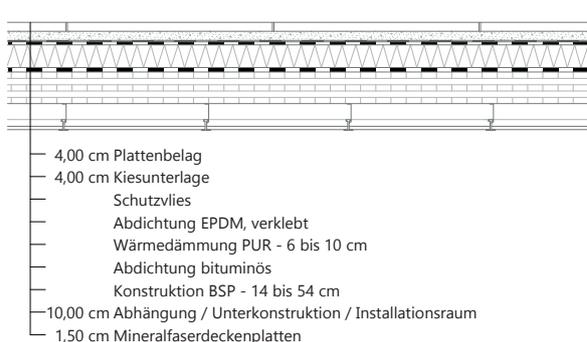
Stahlbeton-Elementdecke, vorgespannt



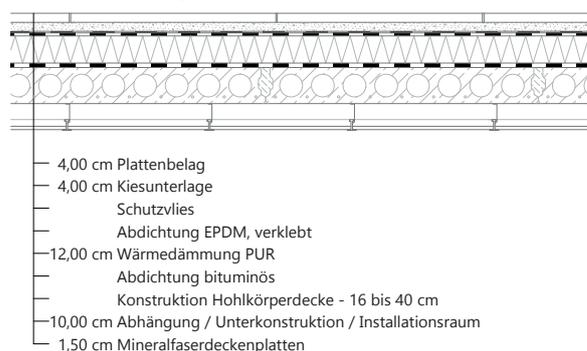
Brettsper Holz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecke



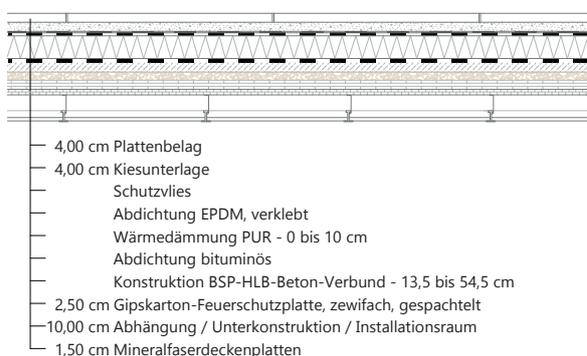
BSP-Massivholz-Flachdach



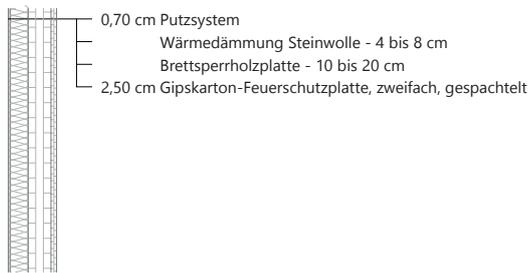
Stahlbeton-Hohlkörper-Flachdach



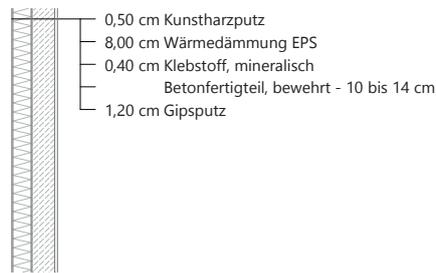
Brettsper Holz-Holzleichtbeton-Beton-Verbund-Flachdach



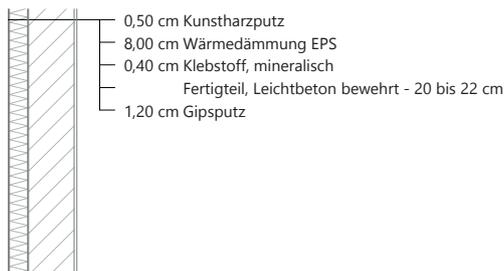
Massivholzwand, ähnlich dataholz [54] awrhi07a



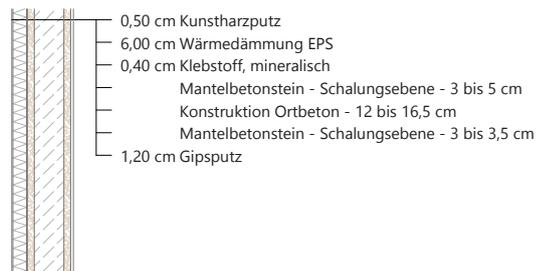
Betonwandfertigteil, bewehrt



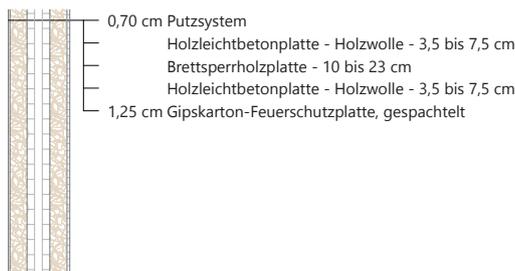
Leichtbetonwandfertigteil, bewehrt



Mantelbetonwand



Massivholzwand, beplankt mit Holzleichtbeton



9.1.2 Bezugsquellen für Materialkennndaten

Die Daten für die OI3-Indikatoren (PENRT, GWP 100 Σ , AP) wurden aus der Datenbank baubook [25] bezogen. Soweit vorhanden wurden dazu produktspezifische Kennwerte verwendet. Alternativ wurden die Richtwerte für das Material / Produkt herangezogen. Die Werte für den Transport entstammen der Datenbank ökobaudat [19]. Ebenfalls aus diesen beiden Datenbanken wurden die Werte für die Dichte der Baustoffe bezogen.

Die Kennwerte für die Kosten wurden aus BKI Baukosten 2016 [55] und Preislisten verschiedener Hersteller entnommen. Alle Preise verstehen sich Netto ohne Steuer, fertig geliefert und montiert. Nachfolgend ist die Erfassung dieser Kosten dokumentiert:

- Abdichtung bituminös: [55], LB 021 Nr. 7, 9€/m²
- Abdichtung EPDM: [55], LB 021 Nr. 32, 23€/m²
- Beton-Fertigteilwandelement: [61] angepasst lt. [58]
- Beton-Fertigteilwandelement, Leichtbeton: [61] und [58] angepasst lt. [62]
- Beton Ortbeton für Mantelbetonsteine: [55], LB 013 Nr. 30, 124€/m³
- Brettsperrholzplatte: [56] (Platte+Abbund+Transportschlaufen) + Lieferung und Montage laut Telefoninterview mit Stora Enso und analog zu Betonfertigteilen (Anpassung hinsichtlich Gewicht und Transportmaße)

- Dachdeckung Ziegel: [55], LB 020 Nr. 46, 27€/m²
- Dämmung Dach, Glaswolle Zwischensparren: [55], LB 020 Nr. 6, Anpassung Dicke laut [56]
- Dämmung EPS, 10cm und weniger: [55], LB 023 Nr. 66 (Anp. Dicke lt. Nr. 66-72)
- Dämmung EPS, 14cm: [55], LB 023 Nr. 67, 34€/m²
- Dämmung EPS, 16cm: [55], LB 023 Nr. 67 & 68 Mittelwert, 38€/m²
- Dämmung EPS, 24cm: [55], LB 023 Nr. 70, 50€/m²
- Dämmung EPS, 26cm: [55], LB 023 Nr. 70 & 71 Mittelwert, 52€/m²
- Dämmung Glaswolle: [55], LB 016 Nr. 14 (Red. Dicke laut [56]), 11,64€/m²
- Dämmung Holzfaser-Dämmplatte: [55], LB 020 Nr. 10 (Anp. Dicke lt. [60] und Marktrecherche)
- Dämmung Holzfaser-Fassadendämmplatte: [55], LB 016 Nr. 59, 25€/m²
- Dämmung Holzfaser-Unterdeckplatte: [55], LB 020 Nr. 21, 16€/m²
- Dämmung PUR: [55], LB 021 Nr. 11, 23€/m² (Anp. Dicke lt. Marktrecherche)
- Dämmung Steinwolle, 8cm (inkl. Putz): [55], LB 023, Nr. 89, (Anp. Dicke lt. Nr. 86-89)
- Doppelboden Platten und Stützen: [55], LB 039 Nr. 8, 115€/m²
- Estrich, mit Heizleitungen: [55], LB 025 Nr. 31, 19€/m²
- Estrich, schwimmend: [55], LB 025 Nr. 29, 14€/m²
- Estrich, Verbund: [55], LB 025 Nr. 39, geringere Dicke, 14€/m²
- GK-Platte Dach, einfach (inkl. Lattung): [55], LB 039 Nr. 24, 29€/m²
- GK/F-Platte Decke, einfach (inkl. Federschiene): [55], LB 039 Nr. 7, 34€/m²
- GKF-Platte Dach, zweifach (inkl. Lattung): [55], LB 039 Nr. 25, 38€/m²
- GK/F-Platte Decke, zweifach (inkl. Federschiene): [55], LB 039 Nr. 7 + Mehrpreis 2. Lage lt. Mittelwert der Differenzen von Nr. 9 & 12 und Nr. 81 & 82
- GKF-Platte, zweifach, EI 90: [55], LB 039 Nr. 86, große Flächen auf Platten, 57€/m²
- Heizsystemträger mit Trennschicht (PE) und TDP: [55], LB 025 Nr. 15, 8€/m²
- HLB Dämmplatte: [59], skontiert lt. Marktrecherche + Montage [55]
- HLB Holzspanbetonplatte für Verbunddeckenelement: [59], skontiert lt. Marktrecherche
- HLZ mit integrierter Dämmung: [55], LB 012 Nr. 60, 99€/m² (Anp. Dicke lt. [63] und Marktrecherche)
- Holzträger (BSH): [55], LB 016 Nr. 7, 777€/m² + LB 016, Nr. 12, 13€/m
- Holzträger (KVH): [55], LB 016 Nr. 6, 436€/m³ + LB 016 Nr. 11, 8€/m
- Konterlattung 50/50: [55], LB 020 Nr. 28, 6€/m²
- Lattung 30/50: [55], LB 020 Nr. 29, 5€/m²
- Leichtmörtelputz: [55], LB 023 Nr. 93, 29€/m²
- Mantelbetonstein mit Dämmung: [55], LB 012 Nr. 64, 52€/m² (Anp. lt. [59])
- Mineralfaserdecke abgehängt mit Unterkonstruktion [55], LB 039 Nr. 1, 27€/m²
- OSB-Platte 1,2cm: [55], LB 016 Nr. 24, 16€/m²
- OSB-Platte 1,8cm: [55], LB 016 Nr. 24&25 Mittelwert, 19,50€/m²

- OSB-Platte, verklebt: [55], LB 020 Nr. 39, 21€/m²
- Plattenbelag Terrasse: [55], LB 014 Nr. 18, 73€/m²
- Putz Innenputz Gips: [55], LB 023 Nr. 36, 14€/m²
- Putzsystem: [55], LB 023 Nr. 94, 15€/m²
- Rieselschutz (PE): [55], LB 028 Nr. 7, 1€/m²
- Schalung: [55], LB 020 Nr. 34, 18€/m²
- Schüttung, gebunden: [55], LB 025 Nr. 7, 8 & 9, Delta, 2€/m² + 1,22€/cm
- STB-Elementdecke: [58] + Aufbeton [55], LB 013 Nr. 53, 130€/m³
- STB-Elementdecke, vorgespannt: [58] + Aufbeton [55], LB 013 Nr. 53, 130€/m³
- STB-Hohlkörperdecke: [58] + Vergussbeton [55], LB 013 Nr. 53, 130€/m³
- Trittschalldämmplatte: [55], LB 025 Nr. 14, 3€/m²
- Unterdachbahn: [55], LB 020 Nr. 23, 5€/m²

9.1.3 Berechnungsmethodik

9.1.3.1 Tragwerke

Die Dimensionierung der Tragwerke erfolgte im Hinblick auf die bestmögliche Ausnutzung der Tragfähigkeit. Zur Bemessung wurden die ermittelten Lasten herangezogen und jeweils ein Deckenstreifen von einem Meter breite, der einachsig gespannt und zweiseitig linear gelagert ist, betrachtet. Besondere Belastungen, wie Anpralllasten oder Beanspruchungen während der Bauphase, sowie möglicherweise vorhandene, bauplatzspezifische Anforderungen wurden nicht berücksichtigt. Je nach Konstruktion wurden die tragenden Elemente wie folgt bemessen:

- Holzbalkendecke: Dimensionierung laut Bemessungstabellen des ITI der TU Wien [64, S. 3-7], bei höheren Spannweiten wurde das Tragwerksprogramm RuckZuck 6.0 eingesetzt.
- Brettsperr-Massivholzdecke: Dimensionierung laut Bemessungstabellen des Herstellers KLH [65, S. 8f.] im Vergleich mit den Bemessungstabellen des ITI der TU Wien [64, S.8], bei höheren Spannweiten wurde das Tragwerkstool (Excel) des Herstellers KLH verwendet.
- Stahlbeton-Elementdecke: Dimensionierung mit dem Tragwerksprogramm RFEM 5 der Firma Dlubal mit dem Zusatzmodul RF-Beton im Vergleich mit den Bemessungstabellen des ITI der TU Wien [64, S.27]
- Stahlbeton-Hohlkörperdecke: Dimensionierung laut Bemessungstabellen der Firma Oberndorfer [66]
- Vorgespannte Stahlbeton-Elementdecke: Dimensionierung laut Bemessungstabellen der Firma Oberndorfer [66]
- Brettsperrholz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecke: Dimensionierung auf Grundlage der von Hofer vorgestellten Berechnungsmethodik [46, S.79-90].
- Holz-Sparrendach: Dimensionierung laut Bemessungstabellen des ITI der TU Wien [64, S. 3-7], bei höheren Spannweiten wurde das Tragwerksprogramm RuckZuck 6.0 eingesetzt.
- Brettsperr-Massivholzdach: Dimensionierung laut Bemessungstabellen des Herstellers

KLH [65, S. 16f.], bei höheren Spannweiten wurde das Tragwerkstool (Excel) des Herstellers KLH verwendet.

- Holzständerwand: Dimensionierung laut Bemessungstabellen des ITI der TU Wien [64, S.10f.]
- Brettsperr-Massivholzwand: Dimensionierung laut Bemessungstabellen des Herstellers KLH [65, S. 4.], bei höheren Lasten wurde das Tragwerkstool (Excel) des Herstellers KLH verwendet.
- Betonwandfertigteil: Dimensionierung mit dem Tragwerksprogramm RFEM 5 der Firma Dlubal mit dem Zusatzmodul RF-Beton unter Berücksichtigung der Mindestdicken der Bemessungstabellen des ITI der TU Wien [64, S.36]
- Leichtbetonwandfertigteil: Dimensionierung mit dem Tragwerksprogramm RFEM 5 der Firma Dlubal mit dem Zusatzmodul RF-Beton unter Berücksichtigung der Mindestdicken der Bemessungstabellen des ITI der TU Wien [64, S.36]
- Mantelbetonwand: Dimensionierung mit dem Tragwerksprogramm RFEM 5 der Firma Dlubal mit dem Zusatzmodul RF-Beton
- Ziegelwand: Dimensionierung mit dem Bemessungstool (Excel) der Firma Wienerberger

9.1.3.2 OI3-Indikatoren

Die Berechnung erfolgte anhand des OI3-Berechnungsleitfadens des IBO [67]. Zur Ermittlung der Kennwerte für die einzelnen Schichten eines Bauteilaufbaus wurde die Schichtdicke mit der Dichte und dem jeweiligen Materialkennwert multipliziert. Die OI3-Punkte des Aufbaus wurden aus den Summen der Kennwerte der Schichten entsprechend folgender Formel [67, S.9] ermittelt:

$$OI3_{KON} = 1/3 OI_{PEIne} + 1/3 OI_{GWP} + 1/3 OI_{AP}$$

Zur besseren Einschätzbarkeit der Auswirkungen einzelner Teile der Aufbauten wurden außerdem die Indikatoren für die Bauteilschichten entsprechend folgender Formel [67, S.12] ausgewertet:

$$\Delta OI3_{BS} = \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{1}{10} \cdot (PEIne)_{BS} + \frac{1}{2} (GWP)_{BS} + \frac{100}{0,25} (AP)_{BS} \right]$$

9.1.3.3 Bauphysikalische Kennwerte

Es wurden folgende Bauphysikalische Werte errechnet:

- U-Wert: Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) wird herangezogen um die Dämmwirkung eines Bauteils zu bewerten. Die Berechnung erfolgte nach der allgemeinen Formel:

$$U = 1 / R_T \quad \text{wobei gilt: } R_T = R_{si} + R_{\text{Bauteilschichten}} + R_{se}$$

Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe wurden dafür aus Baubook [25] sowie den Datenblättern einzelner Produkte entnommen.

- Hitzeschutz: Der Schutz vor sommerlicher Überhitzung ist abhängig von vielen Faktoren wie Sonneneinstrahlung, Verschattung, Fensterflächen und Gebäudegeometrie. Entsprechend werden meist Gebäudesimulationen durchgeführt um den Hitzeschutz zu bewerten. Um dennoch eine Abschätzung vornehmen zu können werden folgende Kennwerte verglichen:
 - Wärmespeicherfähigkeit: Ist ein Indikator dafür wie schnell sich ein Bauteil erwärmt. Maßgebend sind Dichte und spezifische Wärmekapazität des Baustoffs. Besonders die raumseitigen Schichten sind für den Hitzeschutz relevant.
 - Phasenverschiebung: Die Zeitspanne, die die äußere Aufheizung benötigt um durch den Bauteil ins Innere zu wandern.
 - Temperaturamplitudendämpfung: Beschreibt die Dämpfung, die der Wärmeeintrag beim Durchdringen des Bauteils erfährt.

Für die Werte gilt je höher sie sind desto besser ist der Hitzeschutz gewährleistet. Bei der Phasenverschiebung jedoch liegt das Optimum zwischen 10-12h um die Nachtauskühlung ausnutzen zu können. [68] Die Berechnung erfolgte mithilfe des tabellarischen U-Wert-Rechners der Webseite <https://www.u-wert.net/> [68]

9.1.3.4 Kombination

Zur Errechnung der Werte für die kombinierten Ergebnisse der Bauweisen wurden folgende Regeln angewandt, beziehungsweise Kombinationen erstellt:

- Holzrahmenbauweise: Holzständerwand + Holzbalkendecke + Holzsparrendach
- Massivholzbauweise: Brettsperrholzwand + BSP-Decke + BSP-Dach (falls nicht verfügbar Sparrendach)
- Betonbauweise: Betonfertigteilwand + Vorgespannte Elementdecke (f.n.v. Hohlkörperdecke) + Sparrendach / Hohlkörperdach bei Bürogebäude
- Leichtbetonbauweise: Leichtbetonwandfertigteil + Hohlkörperdecke + Sparrendach / Hohlkörperdach bei Bürogebäude
- Mantelbetonbauweise: Mantelbetonwand + Hohlkörperdecke + Sparrendach / Hohlkörperdach bei Bürogebäude
- Ziegelbauweise: Hochlochziegelwand + Elementdecke (f.n.v. Hohlkörperdecke) + Sparrendach
- Holzleichtbetonbauweise: Holzständerwand mit HLB beplankt + BSP-HLB-B-Verbunddecke + Holzsparrendach mit HLB beplankt
- Holzleichtbeton-Massivholzbauweise: BSP-/Massivholzwand mit HLB beplankt + BSP-HLB-B-Verbunddecke + BSP-HLB-B-Verbunddach

9.1.4 Übersichtstabellen für die errechneten Kennzahlen

Die Daten der nachfolgenden Tabellen sind die Grundlage für die Auswertungsdiagramme. Zunächst folgen die Kennzahlen entsprechend der Bauteilaufbauten und ihrer Materialien. Dabei ist immer die geringste Spannweite angegeben. Im Anschluss finden sich die Werte der Referenzgebäude unterteilt nach Spannweite.

EINFAMILIEN - REIHENHAUS							
Baustoff	Dicke	Gewicht	Kosten	PENRT	GWP 100 Σ	AP	$\Delta OI3$
DECKEN							
<i>Holz - Tramdecke, lt. Dataholz gdrnxa03a</i>							
Heizestrich	7,00 cm	1,47 kN/m ²	€ 19,00	155,8 MJ	18,7 kg	0,035 kg	12,97
Leitungen für Fußbodenheizung			s.u.	168,3 MJ	11,6 kg	0,010 kg	8,88
Trennschicht (PE)	0,05 cm		s.u.	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 8,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	12,00 cm	0,54 kN/m ²	€ 16,64	118,8 MJ	16,7 kg	0,042 kg	12,29
Rieselschutz (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
OSB-Platte	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 19,50	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Konstruktion, Holzträger	(16 - 48 cm)	(0,1 - 0,6 kN/m ²)	€ 16,72	22,7 MJ	-13,5 kg	0,008 kg	-0,36
dazwischen Dämmeinlage Glaswolle	10,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 11,64	64,7 MJ	3,4 kg	0,021 kg	5,58
OSB-Platte	1,20 cm	0,08 kN/m ²	€ 16,00	66,8 MJ	-9,0 kg	0,016 kg	2,91
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmittel (Ann. 60 Stk./m ²)				2,5 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,20
Summe	45,05 cm	2,33 kN/m²	€ 142,50	829,0 MJ	21,7 kg	0,198 kg	21,25
<i>Holz - BSP Massivholzdecke, lt. Dataholz gdmnxxn02</i>							
Heizestrich	7,00 cm	1,47 kN/m ²	€ 19,00	155,8 MJ	18,7 kg	0,035 kg	12,97
Leitungen für Fußbodenheizung			s.o.	168,3 MJ	11,6 kg	0,010 kg	8,88
Trennschicht (PE)	0,05 cm		s.o.	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 8,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	12,00 cm	0,54 kN/m ²	€ 16,64	118,8 MJ	16,7 kg	0,042 kg	12,29
Rieselschutz (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Konstruktion, BSP-Platte	(9 - 46 cm)	(0,2 - 1,6 kN/m ²)	€ 55,70	414,0 MJ	-45,0 kg	0,130 kg	23,58
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmittel (Ann. 30 Stk./m ²)				1,2 MJ	0,1 kg	0,000 kg	0,10
Summe	35,05 cm	2,12 kN/m²	€ 134,34	987,4 MJ	9,1 kg	0,256 kg	32,22
<i>Beton - Stahlbeton-Elementdecke</i>							
Heizestrich	7,00 cm	1,47 kN/m ²	€ 19,00	155,8 MJ	18,7 kg	0,035 kg	12,97
Leitungen für Fußbodenheizung			s.o.	168,3 MJ	11,6 kg	0,010 kg	8,88
Trennschicht (PE)	0,05 cm		s.o.	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 8,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	12,00 cm	0,54 kN/m ²	€ 16,64	118,8 MJ	16,7 kg	0,042 kg	12,29
Konstruktion, ED+Betonverguss	(16 - 30 cm)	(4 - 7,5 kN/m ²)	€ 57,65	664,0 MJ	64,4 kg	0,172 kg	55,75
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmittel (Ann. 30 Stk./m ²)				1,2 MJ	0,1 kg	0,000 kg	0,10
Summe	26,00 cm	2,12 kN/m²	€ 135,29	1209,9 MJ	117,6 kg	0,295 kg	62,88
<i>Beton - Stahlbetondecke, Fertigteil-Hohlkörper</i>							
Heizestrich	7,00 cm	1,47 kN/m ²	€ 19,00	155,8 MJ	18,7 kg	0,035 kg	12,97
Leitungen für Fußbodenheizung			s.o.	168,3 MJ	11,6 kg	0,010 kg	8,88
Trennschicht (PE)	0,05 cm		s.o.	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 8,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	12,00 cm	0,54 kN/m ²	€ 16,64	118,8 MJ	16,7 kg	0,042 kg	12,29
Konstruktion, Hohlkörperdecke	(16 - 32 cm)	(2,6 - 4,7 kN/m ²)	€ 76,75	184,7 MJ	25,2 kg	0,051 kg	17,19
Vergussbeton	0,0060 m ³ /m ²	(12,00 kg/m ²)	s.o.	7,6 MJ	1,1 kg	0,002 kg	0,73
Bewehrung	7,5 Stk./m	(0,78 kg/Stk)	s.o.	3,7 MJ	0,6 kg	0,001 kg	0,36
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmittel (Ann. 30 Stk./m ²)				1,2 MJ	0,1 kg	0,000 kg	0,10
Summe	26,00 cm	2,12 kN/m²	€ 154,39	742,0 MJ	80,2 kg	0,177 kg	25,42

9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

<i>Beton - Vorgespannte Stahlbeton-Elementdecke</i>							
Heizestrich	7,00 cm	1,47 kN/m ²	€ 19,00	155,8 MJ	18,7 kg	0,035 kg	12,97
Leitungen für Fußbodenheizung			s.o.	168,3 MJ	11,6 kg	0,010 kg	8,88
Trennschicht (PE)	0,05 cm		s.o.	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 8,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	12,00 cm	0,54 kN/m ²	€ 16,64	118,8 MJ	16,7 kg	0,042 kg	12,29
Konstruktion, vorg. ED+Betonverguss	(16 - 24 cm)	(4 - 6 kN/m ²)	€ 64,92	664,0 MJ	64,4 kg	0,172 kg	55,75
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmitel (Ann. 30 Stk./m ²)				1,2 MJ	0,1 kg	0,000 kg	0,10
Summe	26,00 cm	2,12 kN/m²	€ 142,56	1209,9 MJ	117,6 kg	0,295 kg	62,88
<i>Holzleichtbeton - BSP-HLB-Beton-Verbunddecke</i>							
Heizestrich	7,00 cm	1,47 kN/m ²	€ 19,00	155,8 MJ	18,7 kg	0,035 kg	12,97
Leitungen für Fußbodenheizung			s.o.	168,3 MJ	11,6 kg	0,010 kg	8,88
Trennschicht (PE)	0,05 cm		s.o.	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 8,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	12,00 cm	0,54 kN/m ²	€ 16,64	118,8 MJ	16,7 kg	0,042 kg	12,29
Konstruktion, Beton	(4 - 6 cm)	(0,8 - 1,3 kN/m ²)	€ 5,20	53,4 MJ	8,0 kg	0,015 kg	5,14
Konstruktion, HLB	(3,5 - 18,5 cm)	(0,2 - 1 kN/m ²)	€ 16,96	57,3 MJ	-7,9 kg	0,023 kg	3,61
Konstruktion, BSP	(6 - 16,2 cm)	(0,3 - 0,8 kN/m ²)	€ 47,76	276,0 MJ	-30,0 kg	0,086 kg	15,72
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmitel (Ann. 50 Stk./m ²)				2,1 MJ	0,1 kg	0,001 kg	0,17
Summe	39,50 cm	2,12 kN/m²	€ 147,56	933,4 MJ	23,3 kg	0,248 kg	31,67
DÄCHER							
<i>Holz - Sparrendach, lt. Dataholz sdrhzi06a</i>							
Dachdeckung Ziegel		0,45 kN/m ²	€ 27,00	200,3 MJ	11,6 kg	0,031 kg	12,77
Lattung Holz Fichte (30/50)	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 5,00	14,5 MJ	-5,2 kg	0,005 kg	0,27
Konterlattung Holz Fichte (50/50)	5,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 6,00	24,2 MJ	-8,6 kg	0,008 kg	0,45
Unterdachbahn	0,10 cm		€ 5,00	14,6 MJ	0,5 kg	0,001 kg	0,76
Schalung Holz Fichte	2,40 cm	0,11 kN/m ²	€ 18,00	46,5 MJ	-16,5 kg	0,016 kg	0,87
Dämmung Glaswolle	42,00 cm	0,07 kN/m ²	€ 38,43	295,7 MJ	15,7 kg	0,098 kg	25,53
Dazw. Konstruktion Holzträger	(16 - 52 cm)	(0,1 - 0,7 kN/m ²)	€ 15,72	22,7 MJ	-13,5 kg	0,008 kg	-0,36
OSB, luftdicht verklebt	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 21,00	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 29,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmitel (Ann. 100 Stk./m ²)				4,2 MJ	0,3 kg	0,001 kg	0,33
Summe	60,55 cm	0,91 kN/m²	€ 165,15	781,8 MJ	-38,1 kg	0,207 kg	10,93
U-Wert	0,10 W/m²K						
<i>Holz - Brettsper Holzplatte, lt. Dataholz sdmhzi01a</i>							
Dachdeckung Ziegel		0,45 kN/m ²	€ 27,00	200,3 MJ	11,6 kg	0,031 kg	12,77
Lattung Holz Fichte (30/50)	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 5,00	14,5 MJ	-5,2 kg	0,005 kg	0,27
Konterlattung Holz Fichte (50/50)	5,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 6,00	24,2 MJ	-8,6 kg	0,008 kg	0,45
Unterdeckplatte, Holzfaser	2,20 cm	0,04 kN/m ²	€ 16,00	63,4 MJ	-3,5 kg	0,018 kg	3,87
Holzfaserdämmplatte, Aufsp.	34,00 cm	0,37 kN/m ²	€ 57,00	538,6 MJ	-30,1 kg	0,150 kg	32,89
Konstruktion Brettsper Holzplatte	(9 - 32cm)	(0,5 - 1,5 kN/m ²)	€ 55,70	414,0 MJ	-45,0 kg	0,130 kg	23,58
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 29,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmitel (Ann. 80 Stk./m ²)				3,3 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,27
Summe	59,45 cm	1,03 kN/m²	€ 195,70	1317,3 MJ	-89,5 kg	0,355 kg	40,04
U-Wert	0,10 W/m²K						
<i>Holzleichtbeton - Sparrendach, beplankt mit HLB, ähnlich Dataholz sdrhzi06a</i>							
Dachdeckung Ziegel		0,45 kN/m ²	€ 27,00	200,3 MJ	11,6 kg	0,031 kg	12,77
Lattung Holz Fichte (30/50)	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 5,00	14,5 MJ	-5,2 kg	0,005 kg	0,27
Konterlattung Holz Fichte (50/50)	5,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 6,00	24,2 MJ	-8,6 kg	0,008 kg	0,45
Unterdachbahn	0,10 cm		€ 5,00	14,6 MJ	0,5 kg	0,001 kg	0,76
Holzleichtbetonplatte	7,50 cm	0,41 kN/m ²	€ 30,96	122,7 MJ	-17,0 kg	0,049 kg	7,74
Dämmung Glaswolle	34,00 cm	0,05 kN/m ²	€ 31,16	234,7 MJ	12,4 kg	0,078 kg	20,26
Dazw. Konstruktion Holzträger	(18 - 52 cm)	(0,1 - 0,6 kN/m ²)	€ 16,81	25,5 MJ	-15,2 kg	0,010 kg	-0,41
Holzleichtbetonplatte	7,50 cm	0,41 kN/m ²	€ 30,96	122,7 MJ	-17,0 kg	0,049 kg	7,74
OSB, luftdicht verklebt	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 21,00	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 29,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmitel (Ann. 100 Stk./m ²)				4,2 MJ	0,3 kg	0,001 kg	0,33
Summe	49,15 cm	1,60 kN/m²	€ 202,89	922,6 MJ	-60,6 kg	0,269 kg	20,22
U-Wert	0,10 W/m²K						

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

AUSSENWÄNDE							
<i>Holz - Ständerwand, ähnlich Dataholz awrhh07a</i>							
Putzsystem	0,70 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	13,8 MJ	1,6 kg	0,004 kg	1,21
Holzfaserdämmplatte	6,00 cm	0,09 kN/m ²	€ 25,00	129,6 MJ	-7,2 kg	0,036 kg	7,91
Dämmung Glaswolle	28,00 cm	0,04 kN/m ²	€ 20,94	180,5 MJ	9,6 kg	0,060 kg	15,58
Dazw. Konstruktion Holzständer	(28 - 30 cm)	(0,2 - 0,3 kN/m ²)	€ 28,95	40,6 MJ	-24,2 kg	0,015 kg	-0,65
OSB, luftdicht verklebt	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 21,00	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 29,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmitel (Ann. 60 Stk./m ²)				2,5 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,20
Summe	42,75 cm	0,47 kN/m²	€ 139,89	526,2 MJ	-42,6 kg	0,153 kg	-5,44
U-Wert	0,12 W/m²K						
<i>Holz - Massivholzwand BSP, ähnlich KLH Passivhauswand</i>							
Putzsystem	0,70 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	13,8 MJ	1,6 kg	0,004 kg	1,21
Wärmedämmung EPS	24,00 cm	0,04 kN/m ²	€ 50,00	356,0 MJ	15,0 kg	0,054 kg	21,52
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Konstruktion Brettspertholzplatte	(5,7 - 7,2 cm)	(0,3 - 0,4 kN/m ²)	€ 51,79	262,2 MJ	-28,5 kg	0,082 kg	14,93
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 29,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmitel (Ann. 60 Stk./m ²)				2,5 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,20
Summe	37,05 cm	0,31 kN/m²	€ 145,79	716,4 MJ	-18,8 kg	0,159 kg	5,59
U-Wert	0,12 W/m²K						
<i>Beton - Fertigteil mit WDVS</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	26,00 cm	0,04 kN/m ²	€ 52,00	385,7 MJ	16,3 kg	0,058 kg	23,32
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Konstruktion Beton, Fertigt. bew.	10,00 cm	2,50 kN/m ²	€ 77,75	415,0 MJ	40,3 kg	0,107 kg	34,84
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 MJ	0,0 MJ	1,10
Summe	38,10 cm	2,85 kN/m²	€ 158,75	952,3 MJ	64,6 kg	0,201 kg	32,91
U-Wert	0,12 W/m²K						
<i>Beton - Leichtbeton Fertigteil mit WDVS</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	24,00 cm	0,04 kN/m ²	€ 50,00	356,0 MJ	15,0 kg	0,054 kg	21,52
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Konstruktion Leichtbeton, Fertigt. bew.	20,00 cm	2,60 kN/m ²	€ 122,87	681,2 MJ	92,3 kg	0,221 kg	67,59
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
Summe	46,10 cm	2,95 kN/m²	€ 201,87	1188,8 MJ	115,4 kg	0,310 kg	63,87
U-Wert	0,12 W/m²K						
<i>Beton - Mantelbetonwandensystem mit WDVS, lt. VELOX ET 30</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	14,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 34,00	207,7 MJ	8,8 kg	0,031 kg	12,55
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Mantelbetonstein-Schalungsplatte	3,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 97,59	464,4 MJ	13,4 kg	0,103 kg	31,46
Mantelbetonstein-WD EPS	10,00 cm	0,02 kN/m ²	s.o.				
Konstruktion Ort beton, unbew.	13,00 cm	2,73 kN/m ²	€ 16,12			siehe Oben	
Mantelbetonstein-Schalungsplatte	3,50 cm	0,26 kN/m ²	s.o.				
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
Summe	46,10 cm	3,53 kN/m²	€ 176,71	823,7 MJ	30,2 kg	0,170 kg	18,77
U-Wert	0,12 W/m²K						
<i>Ziegel - HLZ mit Hohlraumdämmung</i>							
Leichtmörtelputz	2,00 cm	0,17 kN/m ²	€ 29,00	116,3 MJ	12,3 kg	0,033 kg	10,29
Konstruktion HLZ	50,00 cm	3,00 kN/m ²	€ 132,28	996,0 MJ	82,2 kg	0,360 kg	94,90
Dünnbettmörtel			s.o.	162,0 MJ	6,5 kg	0,026 kg	9,90
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
Summe	53,20 cm	3,33 kN/m²	€ 175,28	1291,9 MJ	102,0 kg	0,421 kg	79,85
U-Wert	0,12 W/m²K						
<i>Holzleichtbeton - Ständerwand, beidseitig HLB beplankt, ähnlich Dataholz awrhh07a</i>							
Putzsystem	0,70 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	13,8 MJ	1,6 kg	0,004 kg	1,21
Holzwoledämmplatte	5,00 cm	0,19 kN/m ²	€ 22,21	76,1 MJ	-2,5 kg	0,017 kg	4,37
Dämmung Glaswolle	28,00 cm	0,04 kN/m ²	€ 20,94	173,9 MJ	9,6 kg	0,060 kg	15,36
Dazw. Konstruktion Holzständer			€ 32,86	50,8 MJ	-30,2 kg	0,019 kg	-0,81
Holzwoledämmplatte	5,00 cm	0,19 kN/m ²	€ 22,21	76,1 MJ	-2,5 kg	0,017 kg	4,37
OSB, luftdicht verklebt	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 21,00	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 29,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmitel (Ann. 60 Stk./m ²)				2,5 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,08
Summe	46,75 cm	0,76 kN/m²	€ 163,22	552,4 MJ	-46,5 kg	0,154 kg	-5,10
U-Wert	0,12 W/m²K						

9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

WOHNGEBÄUDE							
Baustoff	Dicke	Gewicht	Kosten	PENRT	GWP 100 Σ	AP	ΔOI3
DECKEN							
<i>Holz - Tramdecke, lt. Dataholz gdrnxa03a, L_{n,w} 50dB / R_w 67dB</i>							
Estrich	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 14,00	111,3 MJ	13,3 kg	0,025 kg	9,26
Trennschicht (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 3,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	6,00 cm	0,27 kN/m ²	€ 9,32	59,4 MJ	8,4 kg	0,021 kg	6,14
Rieselschutz (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
OSB-Platte	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 19,50	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Konstruktion, Holzträger	(16 - 48 cm)	(0,1 - 0,7 kN/m ²)	€ 16,72	22,7 MJ	-13,5 kg	0,008 kg	-0,36
dazwischen Dämmeinlage Glaswolle	10,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 11,64	64,7 MJ	3,4 kg	0,021 kg	5,58
OSB-Platte	1,20 cm	0,08 kN/m ²	€ 16,00	66,8 MJ	-9,0 kg	0,016 kg	2,91
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GKF-Platte, zweifach	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 41,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Verbindungsmittel (Ann. 80 Stk./m ²)				3,3 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,27
Summe	38,30 cm	1,75 kN/m²	€ 133,18	606,4 MJ	-1,2 kg	0,164 kg	5,50
<i>Holz - BSP Massivholzdecke, lt. Dataholz gdmnxn02, Ln,W 65dB / Rw 54dB</i>							
Estrich	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 14,00	111,3 MJ	13,3 kg	0,025 kg	9,26
Trennschicht (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 3,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	6,00 cm	0,27 kN/m ²	€ 9,32	59,4 MJ	8,4 kg	0,021 kg	6,14
Rieselschutz (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Konstruktion, BSP-Platte	(9 - 46 cm)	(0,2 - 1,6 kN/m ²)	€ 55,70	414,0 MJ	-45,0 kg	0,130 kg	23,58
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GKF-Platte, einfach	1,25 cm	0,10 kN/m ²	€ 35,00	39,4 MJ	1,8 kg	0,005 kg	2,32
Verbindungsmittel (Ann. 30 Stk./m ²)				1,2 MJ	0,1 kg	0,000 kg	0,10
Summe	27,05 cm	1,44 kN/m²	€ 119,02	724,6 MJ	-15,7 kg	0,217 kg	14,08
<i>Beton - Stahlbeton-Elementdecke</i>							
Estrich	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 14,00	111,3 MJ	13,3 kg	0,025 kg	9,26
Trennschicht (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 3,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	6,00 cm	0,27 kN/m ²	€ 9,32	59,4 MJ	8,4 kg	0,021 kg	6,14
Konstruktion, ED+Betonverguss	(16 - 30 cm)	(4 - 7,5 kN/m ²)	€ 57,65	664,0 MJ	64,4 kg	0,172 kg	55,75
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmittel (Ann. 30 Stk./m ²)				1,2 MJ	0,1 kg	0,000 kg	0,10
Summe	34,00 cm	1,43 kN/m²	€ 118,97	937,7 MJ	92,3 kg	0,254 kg	44,15
<i>Beton - Stahlbetondecke, Fertigteile-Hohlkörper</i>							
Estrich	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 14,00	111,3 MJ	13,3 kg	0,025 kg	9,26
Trennschicht (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 3,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	6,00 cm	0,27 kN/m ²	€ 9,32	59,4 MJ	8,4 kg	0,021 kg	6,14
Konstruktion, Hohlkörperdecke	(16 - 32 cm)	(2,6 - 4,7 kN/m ²)	€ 76,75	184,7 MJ	25,2 kg	0,051 kg	17,19
Vergussbeton	0,0060 m ³ /m ²	(12,00 kg/m ²)	s.o.	7,6 MJ	1,1 kg	0,002 kg	0,73
Bewehrung	7,5 Stk/m	(0,78 kg/Stk)	s.o.	3,7 MJ	0,6 kg	0,001 kg	0,36
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmittel (Ann. 30 Stk./m ²)				1,2 MJ	0,1 kg	0,000 kg	0,10
Summe	34,00 cm	1,43 kN/m²	€ 138,07	469,8 MJ	54,9 kg	0,137 kg	6,68
<i>Beton - Vorgespannte Stahlbeton-Elementdecke</i>							
Estrich	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 14,00	111,3 MJ	13,3 kg	0,025 kg	9,26
Trennschicht (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 3,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	6,00 cm	0,27 kN/m ²	€ 9,32	59,4 MJ	8,4 kg	0,021 kg	6,14
Konstruktion, vorg. ED+Betonverguss	(16 - 24 cm)	(4 - 6 kN/m ²)	€ 64,92	664,0 MJ	64,4 kg	0,172 kg	55,75
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GK-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 34,00	30,0 MJ	1,3 kg	0,004 kg	1,72
Verbindungsmittel (Ann. 30 Stk./m ²)				1,2 MJ	0,1 kg	0,000 kg	0,10
Summe	34,00 cm	1,43 kN/m²	€ 126,24	937,7 MJ	92,3 kg	0,254 kg	44,15

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

Holzleichtbeton - BSP-HLB-Beton-Verbunddecke							
Estrich	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 14,00	111,3 MJ	13,3 kg	0,025 kg	9,26
Trennschicht (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 3,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	6,00 cm	0,27 kN/m ²	€ 9,32	59,4 MJ	8,4 kg	0,021 kg	6,14
Konstruktion, Beton	(4 - 6 cm)	(0,8 - 1,3 kN/m ²)	€ 5,20	53,4 MJ	8,0 kg	0,015 kg	5,14
Konstruktion, HLB	(3,5 - 18,5 cm)	(0,2 - 1 kN/m ²)	€ 16,96	57,3 MJ	-7,9 kg	0,023 kg	3,61
Konstruktion, BSP	(6 - 16,2 cm)	(0,3 - 0,8 kN/m ²)	€ 47,76	276,0 MJ	-30,0 kg	0,086 kg	15,72
Federschiene	2,70 cm		s.u.	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
GKF-Platte, zweifach	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 41,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Verbindungsmitel (Ann. 80 Stk./m ²)				3,3 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,27
Summe	32,75 cm	1,54 kN/m²	€ 138,24	711,3 MJ	0,5 kg	0,214 kg	15,95
DÄCHER							
Holz - Sparrendach, lt. Dataholz sdrhzi06a							
Dachdeckung Ziegel		0,45 kN/m ²	€ 27,00	200,3 MJ	11,6 kg	0,031 kg	12,77
Lattung Holz Fichte (30/50)	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 5,00	14,5 MJ	-5,2 kg	0,005 kg	0,27
Konterlattung Holz Fichte (50/50)	5,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 6,00	24,2 MJ	-8,6 kg	0,008 kg	0,45
Unterdachbahn	0,10 cm		€ 5,00	14,6 MJ	0,5 kg	0,001 kg	0,76
Schalung Holz Fichte	2,40 cm	0,11 kN/m ²	€ 18,00	46,5 MJ	-16,5 kg	0,016 kg	0,87
Dämmung Glaswolle	28,00 cm	0,04 kN/m ²	€ 26,20	192,2 MJ	10,2 kg	0,064 kg	16,59
Dazw. Konstruktion Holzträger	(18 - 56 cm)	(0,1 - 0,8 kN/m ²)	€ 18,77	30,6 MJ	-18,2 kg	0,011 kg	-0,49
OSB, luftdicht verklebt	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 21,00	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GKF-Platte, zweifach	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 38,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Verbindungsmitel (Ann. 100 Stk./m ²)				4,2 MJ	0,3 kg	0,001 kg	0,33
Summe	47,80 cm	1,00 kN/m²	€ 164,97	735,0 MJ	-46,0 kg	0,182 kg	4,78
U-Wert	0,15 W/m ² K						
Holz - Brettsperrholzplatte, lt. Dataholz sdmhzi01a							
Dachdeckung Ziegel		0,45 kN/m ²	€ 27,00	200,3 MJ	11,6 kg	0,031 kg	12,77
Lattung Holz Fichte (30/50)	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 5,00	14,5 MJ	-5,2 kg	0,005 kg	0,27
Konterlattung Holz Fichte (50/50)	5,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 6,00	24,2 MJ	-8,6 kg	0,008 kg	0,45
Unterdeckplatte, Holzfaser	2,20 cm	0,04 kN/m ²	€ 16,00	63,4 MJ	-3,5 kg	0,018 kg	3,87
Holzfaserdämmplatte, Aufsp.	22,00 cm	0,24 kN/m ²	€ 39,00	348,5 MJ	-19,5 kg	0,097 kg	21,28
Konstruktion Brettsperrholzplatte	(9 - 32cm)	(0,5 - 1,5 kN/m ²)	€ 55,70	414,0 MJ	-45,0 kg	0,130 kg	23,58
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GKF-Platte, einfach	1,25 cm	0,10 kN/m ²	€ 30,00	39,4 MJ	1,8 kg	0,005 kg	2,32
Verbindungsmitel (Ann. 80 Stk./m ²)				3,3 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,27
Summe	47,45 cm	0,91 kN/m²	€ 178,70	1136,6 MJ	-78,4 kg	0,304 kg	29,02
U-Wert	0,15 W/m ² K						
Holzleichtbeton - Sparrendach, beplankt mit HLB, ähnlich Dataholz sdrhzi06a							
Dachdeckung Ziegel		0,45 kN/m ²	€ 27,00	200,3 MJ	11,6 kg	0,031 kg	12,77
Lattung Holz Fichte (30/50)	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 5,00	14,5 MJ	-5,2 kg	0,005 kg	0,27
Konterlattung Holz Fichte (50/50)	5,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 6,00	24,2 MJ	-8,6 kg	0,008 kg	0,45
Unterdachbahn	0,10 cm		€ 5,00	14,6 MJ	0,5 kg	0,001 kg	0,76
Holzleichtbetonplatte	7,50 cm	0,41 kN/m ²	€ 30,96	122,7 MJ	-17,0 kg	0,049 kg	7,74
Dämmung Glaswolle	20,00 cm	0,03 kN/m ²	€ 18,93	131,2 MJ	7,0 kg	0,043 kg	11,33
Dazw. Konstruktion Holzträger	(20 - 56 cm)	(0,1 - 0,6 kN/m ²)	€ 17,90	28,4 MJ	-16,9 kg	0,011 kg	-0,45
Holzleichtbetonplatte	7,50 cm	0,41 kN/m ²	€ 30,96	122,7 MJ	-17,0 kg	0,049 kg	7,74
OSB, luftdicht verklebt	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 21,00	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GKF-Platte, einfach	1,25 cm	0,09 kN/m ²	€ 30,00	39,4 MJ	1,8 kg	0,005 kg	2,32
Verbindungsmitel (Ann. 100 Stk./m ²)				4,2 MJ	0,3 kg	0,001 kg	0,33
Summe	51,15 cm	1,57 kN/m²	€ 192,75	831,3 MJ	-67,2 kg	0,237 kg	11,83
U-Wert	0,15 W/m ² K						
AUSSENWÄNDE							
Holz - Ständerwand, ähnlich Dataholz awrhi07a							
Putzsystem	0,70 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	13,8 MJ	1,6 kg	0,004 kg	1,21
Holzfaserdämmplatte	6,00 cm	0,09 kN/m ²	€ 25,00	129,6 MJ	-7,2 kg	0,036 kg	7,91
Dämmung Glaswolle	16,00 cm	0,03 kN/m ²	€ 14,94	103,1 MJ	5,5 kg	0,034 kg	8,90
Dazw. Konstruktion Holzständer	(16 cm)	(0,2 - 0,3 kN/m ²)	€ 23,58	34,8 MJ	-20,7 kg	0,013 kg	-0,55
OSB, luftdicht verklebt	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 21,00	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GKF-Platte, zweifach	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 38,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Verbindungsmitel (Ann. 80 Stk./m ²)				3,3 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,27
Summe	32,00 cm	0,57 kN/m²	€ 137,52	492,7 MJ	-40,8 kg	0,133 kg	-9,04
U-Wert	0,19 W/m ² K						

9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

<i>Holz - Massivholzwand BSP, ähnlich KLH Passivhauswand</i>							
Putzsystem	0,70 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	13,8 MJ	1,6 kg	0,004 kg	1,21
Wärmedämmung EPS	14,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 34,00	207,7 MJ	8,8 kg	0,031 kg	12,55
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Konstruktion Brettsperrholzplatte	(7,2 - 9,4 cm)	(0,4 - 0,5 kN/m ²)	€ 55,68	331,2 MJ	-36,0 kg	0,104 kg	18,86
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GKF-Platte, zweifach	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 38,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Verbindungsmitel (Ann. 60 Stk./m ²)				2,5 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,20
Summe	29,80 cm	0,41 kN/m²	€ 142,68	685,8 MJ	-30,2 kg	0,165 kg	3,46
U-Wert	0,19 W/m²K						
<i>Beton - Fertigteil mit WDVS</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	16,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 38,00	237,4 MJ	10,0 kg	0,036 kg	14,35
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Konstruktion Beton, Fertig. bew.	10,00 cm	2,50 kN/m ²	€ 77,75	415,0 MJ	40,3 kg	0,107 kg	34,84
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
Summe	28,10 cm	2,83 kN/m²	€ 144,75	803,9 MJ	58,3 kg	0,178 kg	23,95
U-Wert	0,19 W/m²K						
<i>Beton - Leichtbeton Fertigteil mit WDVS</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	14,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 34,00	207,7 MJ	8,8 kg	0,031 kg	12,55
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Konstruktion Leichtbeton, Fertig. bew.	20,00 cm	2,60 kN/m ²	€ 122,87	681,2 MJ	92,3 kg	0,221 kg	67,59
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
Summe	36,10 cm	2,93 kN/m²	€ 185,87	1040,5 MJ	109,1 kg	0,288 kg	54,90
U-Wert	0,20 W/m²K						
<i>Beton - Mantelbetonwandsystem mit WDVS, lt. VELOX TT18</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	14,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 34,00	207,7 MJ	8,8 kg	0,031 kg	12,55
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Mantelbetonelement-Schalungsplatte	3,00 cm	0,17 kN/m ²	€ 73,19	260,5 MJ	15,3 kg	0,069 kg	20,37
Konstruktion Ortbeton, unbew.	12,00 cm	2,52 kN/m ²	€ 14,88				
Mantelbetonelement-Schalungsplatte	3,00 cm	0,23 kN/m ²	s.o.	siehe Oben			
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
Summe	34,10 cm	3,24 kN/m²	€ 151,07	619,8 MJ	32,1 kg	0,135 kg	7,68
U-Wert	0,19 W/m²K						
<i>Ziegel - HLZ mit Hohlraumdämmung</i>							
Wärmedämmputz	5,00 cm	0,15 kN/m ²	€ 29,00	99,2 MJ	10,5 kg	0,028 kg	8,77
Konstruktion HLZ	38,00 cm	2,47 kN/m ²	€ 104,35	524,4 MJ	41,5 kg	0,117 kg	40,02
Dünnbettmörtel			s.o.	129,6 MJ	5,2 kg	0,020 kg	7,92
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
Summe	44,20 cm	2,77 kN/m²	€ 147,35	770,8 MJ	58,2 kg	0,168 kg	21,48
U-Wert	0,20 W/m²K						
<i>Holzleichtbeton - Ständerwand, beidseitig HLB beplankt, ähnlich Dataholz awrhh07a</i>							
Putzsystem	0,70 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	13,8 MJ	1,6 kg	0,004 kg	1,21
Holzwoolledämmplatte	5,00 cm	0,19 kN/m ²	€ 22,21	76,1 MJ	-2,5 kg	0,017 kg	4,37
Dämmung Glaswolle	14,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 13,94	83,6 MJ	4,4 kg	0,028 kg	7,22
Dazw. Konstruktion Holzständer			€ 21,38	30,5 MJ	-18,1 kg	0,011 kg	-0,49
Holzwoolledämmplatte	7,50 cm	0,28 kN/m ²	€ 30,96	114,2 MJ	-3,7 kg	0,025 kg	6,56
OSB, luftdicht verklebt	1,80 cm	0,12 kN/m ²	€ 21,00	100,2 MJ	-13,5 kg	0,025 kg	4,37
Lattung Holz Fichte (50/80)	5,00 cm	0,04 kN/m ²	s.u.	29,0 MJ	-10,3 kg	0,010 kg	0,55
GKF-Platte, zweifach	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 38,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Verbindungsmitel (Ann. 80 Stk./m ²)				3,3 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,27
Summe	36,50 cm	0,94 kN/m²	€ 162,49	529,5 MJ	-38,2 kg	0,131 kg	-7,64
U-Wert	0,20 W/m²K						

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

BÜRO-/GEWERBEBEBAUWEISE							
Baustoff	Dicke	Gewicht	Kosten	PENRT	GWP 100 Σ	AP	ΔOI3
DECKEN							
<i>Holz - BSP Massivholzdecke</i>							
Doppelbodenplatte	3,80 cm	0,42 kN/m ²	€ 115,00	459,9 MJ	3,3 kg	0,045 kg	21,83
Doppelbodenstütze	7,00 cm	0,01 kN/m ²	s.o.	19,3 MJ	1,3 kg	0,005 kg	1,55
Versiegelung				s.o.	3,2 MJ	0,001 kg	0,20
Estrich	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 14,00	111,3 MJ	13,3 kg	0,025 kg	9,26
Trennschicht (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 3,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Konstruktion, BSP-Platte	(9 - 46 cm)	(0,2 - 1,6 kN/m ²)	€ 78,93	644,0 MJ	-70,0 kg	0,202 kg	36,68
Abhängung / Tragkonstruktion	10,00 cm	0,02 kN/m ²	s.u.	62,4 MJ	4,3 kg	0,021 kg	5,62
Mineralfaserdeckenplatte	1,50 cm	0,04 kN/m ²	€ 27,00	85,7 MJ	7,7 kg	0,056 kg	11,67
Verbindungsmittel (Ann. 15 Stk./m ²)				0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
Summe	44,35 cm	1,56 kN/m²	€ 238,93	1457,6 MJ	-35,1 kg	0,387 kg	57,98
<i>Beton - Stahlbetondecke, Fertigteil-Hohlkörper</i>							
Doppelbodenplatte	3,80 cm	0,42 kN/m ²	€ 115,00	459,9 MJ	3,3 kg	0,045 kg	21,83
Doppelbodenstütze	7,00 cm	0,01 kN/m ²	s.o.	19,3 MJ	1,3 kg	0,005 kg	1,55
Versiegelung				s.o.	3,2 MJ	0,001 kg	0,20
Verbundestrich	3,00 cm	0,63 kN/m ²	€ 14,00	66,8 MJ	8,0 kg	0,015 kg	5,56
Konstruktion, Hohlkörperdecke	(16 - 32 cm)	(2,6 - 4,7 kN/m ²)	€ 76,75	184,7 MJ	25,2 kg	0,051 kg	17,19
Vergussbeton	0,0060 m ³ /m ²	(12,00 kg/m ²)	s.o.	7,6 MJ	1,1 kg	0,002 kg	0,73
Bewehrung	7,5 Stk/m	(0,78 kg/Stk)	s.o.	3,7 MJ	0,6 kg	0,001 kg	0,36
Abhängung / Tragkonstruktion	10,00 cm	0,02 kN/m ²	s.u.	62,4 MJ	4,3 kg	0,021 kg	5,62
Mineralfaserdeckenplatte	1,50 cm	0,04 kN/m ²	€ 27,00	85,7 MJ	7,7 kg	0,056 kg	11,67
Verbindungsmittel (Ann. 15 Stk./m ²)				0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
Summe	41,30 cm	1,12 kN/m²	€ 232,75	893,9 MJ	51,7 kg	0,198 kg	28,42
<i>Beton - Vorgespannte Stahlbeton-Elementdecke</i>							
Doppelbodenplatte	3,80 cm	0,42 kN/m ²	€ 115,00	459,9 MJ	3,3 kg	0,045 kg	21,83
Doppelbodenstütze	7,00 cm	0,01 kN/m ²	s.o.	19,3 MJ	1,3 kg	0,005 kg	1,55
Versiegelung				s.o.	3,2 MJ	0,001 kg	0,20
Verbundestrich	3,00 cm	0,63 kN/m ²	€ 14,00	66,8 MJ	8,0 kg	0,015 kg	5,56
Konstruktion, vorg. ED+Betonverguss	(16 - 24 cm)	(4 - 6 kN/m ²)	€ 64,92	664,0 MJ	64,4 kg	0,172 kg	55,75
Abhängung / Tragkonstruktion	10,00 cm	0,02 kN/m ²	s.u.	62,4 MJ	4,3 kg	0,021 kg	5,62
Mineralfaserdeckenplatte	1,50 cm	0,04 kN/m ²	€ 27,00	85,7 MJ	7,7 kg	0,056 kg	11,67
Verbindungsmittel (Ann. 15 Stk./m ²)				0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
Summe	41,30 cm	1,12 kN/m²	€ 220,92	1361,9 MJ	89,2 kg	0,315 kg	65,89
<i>Holzleichtbeton - BSP-HLB-Beton-Verbunddecke</i>							
Doppelbodenplatte	3,80 cm	0,42 kN/m ²	€ 115,00	459,9 MJ	3,3 kg	0,045 kg	21,83
Doppelbodenstütze	7,00 cm	0,01 kN/m ²	s.o.	19,3 MJ	1,3 kg	0,005 kg	1,55
Versiegelung				s.o.	3,2 MJ	0,001 kg	0,20
Verbundestrich	3,00 cm	0,63 kN/m ²	€ 14,00	66,8 MJ	8,0 kg	0,015 kg	5,56
Konstruktion, Beton	(4 - 6 cm)	(0,8 - 1,3 kN/m ²)	€ 5,20	53,4 MJ	8,0 kg	0,015 kg	5,14
Konstruktion, HLB	(3,5 - 17,5 cm)	(0,2 - 1 kN/m ²)	€ 16,96	57,3 MJ	-7,9 kg	0,023 kg	3,61
Konstruktion, BSP	(6 - 12 cm)	(0,3 - 0,8 kN/m ²)	€ 47,43	276,0 MJ	-30,0 kg	0,086 kg	15,72
GKF-Platte, zweifach	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 57,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Abhängung / Tragkonstruktion	10,00 cm	0,02 kN/m ²	s.u.	62,4 MJ	4,3 kg	0,021 kg	5,62
Mineralfaserdeckenplatte	1,50 cm	0,04 kN/m ²	€ 27,00	85,7 MJ	7,7 kg	0,056 kg	11,67
Verbindungsmittel (Ann. 100 Stk./m ²)				4,2 MJ	0,3 kg	0,001 kg	0,33
Summe	41,30 cm	1,32 kN/m²	€ 282,59	1166,9 MJ	-1,2 kg	0,279 kg	39,53

9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

DÄCHER							
<i>Holz - Brettsperrholzplatte, ähnlich Dataholz fdmnti01a</i>							
Plattenbelag	4,00 cm	0,90 kN/m ²	€ 73,00	51,9 MJ	9,9 kg	0,014 kg	5,32
Kiesunterlage	4,00 cm	0,72 kN/m ²	s.o.	7,5 MJ	0,5 kg	0,003 kg	0,80
Schutzvlies	0,10 cm		s.o.	43,0 MJ	1,4 kg	0,004 kg	2,22
Abdichtung, EPDM	0,20 cm	0,02 kN/m ²	€ 23,00	163,3 MJ	4,9 kg	0,019 kg	8,73
Kleber			s.o.	12,9 MJ	0,5 kg	0,002 kg	0,75
Dämmplatte PUR	10,00 cm	0,03 kN/m ²	€ 19,17	282,0 MJ	12,9 kg	0,053 kg	18,63
Abdichtung, bituminös	0,40 cm	0,04 kN/m ²	€ 9,00	204,8 MJ	6,3 kg	0,035 kg	12,51
Konstruktion Brettsperrholzplatte	(14 - 54cm)	(0,5 - 1,5 kN/m ²)	€ 78,93	644,0 MJ	-70,0 kg	0,202 kg	36,68
Abhängung / Tragkonstruktion	10,00 cm	0,02 kN/m ²	s.u.	62,4 MJ	4,3 kg	0,021 kg	5,62
Mineralfaserdeckenplatte	1,50 cm	0,04 kN/m ²	€ 27,00	85,7 MJ	7,7 kg	0,056 kg	11,67
Verbindungsmitel (Ann. 15 Stk./m ²)				0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
Summe	44,20 cm	1,77 kN/m²	€ 230,10	1558,1 MJ	-21,4 kg	0,410 kg	66,65
U-Wert	0,19 W/m ² K						
<i>Beton - Stahlbetondecke, Fertigteil-Hohlkörper</i>							
Plattenbelag	4,00 cm	0,90 kN/m ²	€ 73,00	51,9 MJ	9,9 kg	0,014 kg	5,32
Kiesunterlage	4,00 cm	0,72 kN/m ²	s.o.	7,5 MJ	0,5 kg	0,003 kg	0,80
Schutzvlies	0,10 cm		s.o.	43,0 MJ	1,4 kg	0,004 kg	2,22
Abdichtung, EPDM	0,20 cm	0,02 kN/m ²	€ 23,00	163,3 MJ	4,9 kg	0,019 kg	8,73
Kleber			s.o.	12,9 MJ	0,5 kg	0,002 kg	0,75
Dämmplatte PUR	12,00 cm	0,04 kN/m ²	€ 23,00	338,4 MJ	15,5 kg	0,064 kg	22,36
Abdichtung, bituminös	0,25 cm	0,03 kN/m ²	€ 9,00	134,5 MJ	1,2 kg	0,015 kg	6,65
Konstruktion, Hohlkörperdecke	(16 - 32 cm)	(2,6 - 4,7 kN/m ²)	€ 76,75	184,7 MJ	25,2 kg	0,051 kg	17,19
Vergussbeton	0,0060 m ³ /m ²	(12,00 kg/m ²)	s.o.	7,6 MJ	1,1 kg	0,002 kg	0,73
Bewehrung	7,5 Stk/m	(0,78 kg/Stk)	s.o.	3,7 MJ	0,6 kg	0,001 kg	0,36
Abhängung / Tragkonstruktion	10,00 cm	0,02 kN/m ²	s.u.	62,4 MJ	4,3 kg	0,021 kg	5,62
Mineralfaserdeckenplatte	1,50 cm	0,04 kN/m ²	€ 27,00	85,7 MJ	7,7 kg	0,056 kg	11,67
Verbindungsmitel (Ann. 15 Stk./m ²)				0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,05
Summe	48,05 cm	1,76 kN/m²	€ 231,75	1096,2 MJ	72,9 kg	0,253 kg	46,11
U-Wert	0,20 W/m ² K						
<i>Holzleichtbeton - BSP-HLB-Beton-Verbund</i>							
Plattenbelag	4,00 cm	0,90 kN/m ²	€ 73,00	51,9 MJ	9,9 kg	0,014 kg	5,32
Kiesunterlage	4,00 cm	0,72 kN/m ²	s.o.	7,5 MJ	0,5 kg	0,003 kg	0,80
Schutzvlies	0,10 cm		s.o.	43,0 MJ	1,4 kg	0,004 kg	2,22
Abdichtung, EPDM	0,20 cm	0,02 kN/m ²	€ 23,00	163,3 MJ	4,9 kg	0,019 kg	8,73
Kleber			s.o.	12,9 MJ	0,5 kg	0,002 kg	0,75
Dämmplatte PUR	10,00 cm	0,04 kN/m ²	€ 19,17	282,0 MJ	12,9 kg	0,053 kg	18,63
Abdichtung, bituminös	0,25 cm	0,03 kN/m ²	€ 9,00	134,5 MJ	1,2 kg	0,015 kg	6,65
Konstruktion, Beton	(4 - 6 cm)	(0,8 - 1,3 kN/m ²)	€ 0,25	53,4 MJ	8,0 kg	0,015 kg	5,14
Konstruktion, HLB	(3,5 - 17,5 cm)	(0,2 - 1 kN/m ²)	€ 16,96	57,3 MJ	-7,9 kg	0,023 kg	3,61
Konstruktion, BSP	(6 - 12 cm)	(0,3 - 0,8 kN/m ²)	€ 47,43	276,0 MJ	-30,0 kg	0,086 kg	15,72
GKF-Platte, zweifach, EI 90	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 57,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Abhängung / Tragkonstruktion	10,00 cm	0,02 kN/m ²	s.u.	62,4 MJ	4,3 kg	0,021 kg	5,62
Mineralfaserdeckenplatte	1,50 cm	0,04 kN/m ²	€ 27,00	85,7 MJ	7,7 kg	0,056 kg	11,67
Verbindungsmitel (Ann. 100 Stk./m ²)				4,2 MJ	0,3 kg	0,001 kg	0,33
Summe	46,05 cm	1,96 kN/m²	€ 272,80	1312,8 MJ	17,4 kg	0,324 kg	53,49
U-Wert	0,19 W/m ² K						
AUSSENWÄNDE							
<i>Holz - Massivholzwand BSP, ähnlich Dataholz awmopi01a</i>							
Putzsystem	0,70 cm	0,10 kN/m ²	s.u.	13,8 MJ	1,6 kg	0,004 kg	1,21
Dämmung Steinwolle	8,00 cm	0,08 kN/m ²	€ 54,16	171,2 MJ	15,4 kg	0,113 kg	23,32
Konstruktion Brettsperrholzplatte	(10 - 20 cm)	(0,4 - 0,5 kN/m ²)	€ 61,57	460,0 MJ	-50,0 kg	0,144 kg	26,20
GKF-Platte, zweifach, EI 90	2,50 cm	0,20 kN/m ²	€ 57,00	78,8 MJ	3,7 kg	0,010 kg	4,63
Verbindungsmitel (Ann. 50 Stk./m ²)				2,1 MJ	0,1 kg	0,001 kg	0,17
Summe	21,20 cm	0,38 kN/m²	€ 172,73	725,9 MJ	-29,2 kg	0,271 kg	19,20
U-Wert	0,33 W/m ² K						
<i>Beton - Fertigteil mit WDVS</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	8,00 cm	0,01 kN/m ²	€ 24,89	118,7 MJ	5,0 kg	0,018 kg	7,17
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Konstruktion Beton, Fertiggt. bew.	10,00 cm	2,50 kN/m ²	€ 77,75	415,0 MJ	40,3 kg	0,107 kg	34,84
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
Summe	20,10 cm	2,82 kN/m²	€ 131,64	685,3 MJ	53,3 kg	0,160 kg	16,77
U-Wert	0,36 W/m ² K						

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

<i>Beton - Leichtbeton Fertigteil mit WDVS</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	7,00 cm	0,01 kN/m ²	€ 23,34	103,8 MJ	4,4 kg	0,016 kg	6,28
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Konstruktion Leichtbeton, Fertig. bew.	20,00 cm	2,60 kN/m ²	€ 122,87	681,2 MJ	92,3 kg	0,221 kg	67,59
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
<i>Summe</i>	<i>29,10 cm</i>	<i>2,92 kN/m²</i>	<i>€ 175,20</i>	<i>936,6 MJ</i>	<i>104,7 kg</i>	<i>0,272 kg</i>	<i>48,62</i>
<i>U-Wert</i>	<i>0,35 W/m²K</i>						
<i>Beton - Mantelbetonwandssystem mit WDVS, lt. VELOX TT18, TT22 und GT25</i>							
Kunstharzputz	0,50 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	111,2 MJ	5,2 kg	0,027 kg	8,19
Wärmedämmung EPS	6,00 cm	0,01 kN/m ²	€ 21,78	89,0 MJ	3,8 kg	0,013 kg	5,38
Klebstoff	0,40 cm	0,06 kN/m ²	s.o.	22,8 MJ	1,9 kg	0,005 kg	1,79
Mantelbetonelement-Schalungsplatte	3,00 cm	0,17 kN/m ²	€ 73,19	260,5 MJ	15,3 kg	0,069 kg	20,37
Konstruktion Ortbeton, unbew.	12,00 cm	2,52 kN/m ²	€ 14,88	siehe Oben			
Mantelbetonelement-Schalungsplatte	3,00 cm	0,23 kN/m ²	s.o.	siehe Oben			
Gipsputz	1,20 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,00	17,6 MJ	1,0 kg	0,003 kg	1,10
<i>Summe</i>	<i>26,10 cm</i>	<i>3,23 kN/m²</i>	<i>€ 138,85</i>	<i>501,1 MJ</i>	<i>27,1 kg</i>	<i>0,117 kg</i>	<i>0,50</i>
<i>U-Wert</i>	<i>0,35 W/m²K</i>						
<i>Holzleichtbeton - Massivholzwand, beidseitig HLB beplankt</i>							
Putzsystem	0,70 cm	0,10 kN/m ²	€ 15,00	13,8 MJ	1,6 kg	0,004 kg	1,21
Holzwoolledämmplatte	7,50 cm	0,28 kN/m ²	€ 30,96	114,2 MJ	-3,7 kg	0,025 kg	6,56
Konstruktion Brettsperrholzplatte	(10 - 23 cm)	(0,4 - 0,5 kN/m ²)	€ 61,57	460,0 MJ	-50,0 kg	0,144 kg	26,20
Holzwoolledämmplatte	7,50 cm	0,28 kN/m ²	€ 30,96	114,2 MJ	-3,7 kg	0,025 kg	6,56
GKF-Platte, einfach	1,25 cm	0,10 kN/m ²	€ 30,00	39,4 MJ	1,8 kg	0,005 kg	2,32
Verbindungsmitel (Ann. 50 Stk./m ²)				2,1 MJ	0,1 kg	0,001 kg	0,17
<i>Summe</i>	<i>26,95 cm</i>	<i>0,76 kN/m²</i>	<i>€ 168,49</i>	<i>743,6 MJ</i>	<i>-53,9 kg</i>	<i>0,204 kg</i>	<i>6,68</i>
<i>U-Wert</i>	<i>0,34 W/m²K</i>						

9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

EINFAMILIEN-REIHENHAUS												
		LASTEN			Spannweite 3 m							
		Nutzlasten	Ständige Lasten			Konstruktion		Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
DECKE	BALKEN BETON HOZ	Balkendecke	2,0 kN/m ²	2,3 kN/m ²	von Material von Konstruktion abhängig von Material und Spannweite	C24, 10/16, e=0,8m	4,4 kN/m ²	9 kg/m ²	€ 142,50	45,05 cm	21,3	
		BSP / Massivholzdecke				3 Schicht, 9cm	4,6 kN/m ²	45 kg/m ²	€ 134,34	35,05 cm	32,2	
		Stahlbeton-Elementdecke				16cm, C 25/30	8,1 kN/m ²	400 kg/m ²	€ 125,52	42,00 cm	62,9	
		Hohlkörperdecke				Nicht verfügbar						
		Elementdecke, vorgespannt				VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	8,1 kN/m ²	400 kg/m ²	€ 139,51	42,00 cm	62,9	
DACH	HOLZ HOLZ HOLZ	BSP-HLB-Beton-Verbund	1,4 kN/m ²	0,9 kN/m ²	3s, 6cm / 3,5cm / 4cm	5,4 kN/m ²	133 kg/m ²	€ 147,56	39,50 cm	31,7		
		Sparrendach			C24, 10/16, e=0,8m	2,4 kN/m ²	9 kg/m ²	€ 165,15	60,55 cm	10,9		
		BSP / Massivholzdach			3 Schicht, 9cm	2,9 kN/m ²	45 kg/m ²	€ 195,70	59,45 cm	40,1		
		Sparrendach (HLB beplankt)			C24, 10/18, e=0,8m	3,1 kN/m ²	10 kg/m ²	€ 202,89	65,15 cm	20,2		
					C24, 8/28, e=0,625m	18,4 kN/m	16 kg/m ²	€ 139,89	42,75 cm	-5,4		
WAND	HOLZ BETON HOLZ HOLZ HOLZ HOLZ HOLZ HOLZ HOLZ HOLZ	Holzständerwand	0,5 kN/m ²	0,3 kN/m ²	C24, 8/28, e=0,625m	18,4 kN/m	16 kg/m ²	€ 139,89	42,75 cm	-5,4		
		BSP / Massivholzwand			3 Schicht, 5,7cm	19,5 kN/m	29 kg/m ²	€ 145,49	37,05 cm	5,6		
		Beton + WDV			10cm, C16/20	39,6 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9		
		Leichtbeton			20cm, LC12/13	40,2 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9		
		Mantelbetonwandelemente			ET30, 13cm C16/20	43,7 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8		
		Hochlochziegel			HLZ, 50cm, gedämmt	42,5 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9		
					C24, 10/28, e=0,625	24,1 kN/m	20 kg/m ²	€ 163,22	46,75 cm	-5,1		

Spannweite 4 m						Spannweite 5 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
C24, 12/18, e=0,8m	4,5 kN/m ²	12 kg/m ²	€ 145,55	47,05 cm	21,0	C24, 16/22, e=0,8m	4,5 kN/m ²	20 kg/m ²	€ 152,96	51,05 cm	20,3
3 Schicht, 12cm	4,7 kN/m ²	60 kg/m ²	€ 144,79	38,05 cm	40,1	5 Schicht, 16,2cm	4,9 kN/m ²	80 kg/m ²	€ 165,08	42,25 cm	50,6
18cm, C 25/30	8,6 kN/m ²	450 kg/m ²	€ 128,12	44,00 cm	69,9	20cm, C 25/30	9,1 kN/m ²	500 kg/m ²	€ 132,58	46,00 cm	76,8
VSD-8-16-M	6,7 kN/m ²	260 kg/m ²	€ 147,79	42,00 cm	25,4	VSD-8-16-M	6,7 kN/m ²	260 kg/m ²	€ 146,33	42,00 cm	25,4
VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	8,1 kN/m ²	400 kg/m ²	€ 138,29	42,00 cm	62,9	VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	8,1 kN/m ²	400 kg/m ²	€ 137,56	42,00 cm	62,9
3s, 6cm / 3,5cm / 4cm	5,4 kN/m ²	133 kg/m ²	€ 147,23	39,50 cm	31,7	3s, 6cm / 3,5cm / 4cm	5,4 kN/m ²	133 kg/m ²	€ 147,03	39,50 cm	31,7
C24, 12/20, e=0,8m	2,4 kN/m ²	14 kg/m ²	€ 168,20	60,55 cm	10,1	C24, 14/24, e=0,8m	2,5 kN/m ²	19 kg/m ²	€ 172,13	60,55 cm	9,1
3 Schicht, 10,8cm	3,0 kN/m ²	54 kg/m ²	€ 192,87	59,25 cm	42,8	5 Schicht, 14,5cm	3,2 kN/m ²	73 kg/m ²	€ 217,80	62,92 cm	52,5
C24, 14/22, e=0,8m	3,2 kN/m ²	17 kg/m ²	€ 208,56	65,15 cm	18,9	GL24h, 14/28, e=0,8m	3,2 kN/m ²	22 kg/m ²	€ 233,89	65,15 cm	31,1
C24, 10/30, e=0,625m	23,8 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,2	C24, 10/30, e=0,625m	29,2 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,2
3 Schicht, 5,7cm	25,5 kN/m	29 kg/m ²	€ 145,49	37,05 cm	5,6	3 Schicht, 5,7cm	32,4 kN/m	29 kg/m ²	€ 145,49	37,05 cm	5,6
10cm, C16/20	48,7 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9	10cm, C16/20	58,6 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9
20cm, LC12/13	43,9 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9	20cm, LC12/13	50,6 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9
ET30, 13cm C16/20	47,4 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8	ET30, 13cm C16/20	54,1 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8
HLZ, 50cm, gedämmt	46,2 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9	HLZ, 50cm, gedämmt	52,9 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9
C24, 10/28, e=0,625	30,4 kN/m	20 kg/m ²	€ 163,22	46,75 cm	-5,1	C24, 10/28, e=0,625	36,8 kN/m	20 kg/m ²	€ 163,22	46,75 cm	-5,1

Spannweite 6 m						Spannweite 7 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
GL 24h, 14/28, e=0,8m	4,6 kN/m ²	22 kg/m ²	€ 176,85	57,05 cm	33,5	GL 24h, 18/28, e=0,8m	4,6 kN/m ²	28 kg/m ²	€ 187,73	57,05 cm	36,7
5 Schicht, 20cm	5,1 kN/m ²	100 kg/m ²	€ 180,45	46,05 cm	61,0	7 Schicht, 20,8cm	5,2 kN/m ²	104 kg/m ²	€ 185,36	46,85 cm	63,1
24cm, C 25/30	10,1 kN/m ²	600 kg/m ²	€ 138,89	50,00 cm	90,8	26cm, C 25/30	10,6 kN/m ²	650 kg/m ²	€ 144,14	52,00 cm	97,7
VSD-8-16-M	6,7 kN/m ²	260 kg/m ²	€ 145,35	42,00 cm	25,4	WB-8-20-B	7,8 kN/m ²	365 kg/m ²	€ 160,45	46,00 cm	32,7
VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	8,1 kN/m ²	400 kg/m ²	€ 137,07	42,00 cm	62,9	VSE 12+10, C 40/50; C 25/30	9,6 kN/m ²	550 kg/m ²	€ 140,50	48,00 cm	83,8
3s, 6m / 5cm / 5cm	5,7 kN/m ²	162 kg/m ²	€ 153,44	42,00 cm	34,5	3s, 6cm / 7,5cm / 5cm	6,0 kN/m ²	185 kg/m ²	€ 162,10	44,50 cm	37,1
GL24h, 12/32, e=0,8m	2,5 kN/m ²	22 kg/m ²	€ 194,50	60,55 cm	21,5	GL24h, 16/36, e=0,8m	2,6 kN/m ²	32 kg/m ²	€ 211,84	60,55 cm	25,9
5 Schicht, 18cm	3,3 kN/m ²	90 kg/m ²	€ 228,16	64,45 cm	59,8	7 Schicht, 20,8cm	3,5 kN/m ²	104 kg/m ²	€ 240,95	67,25 cm	67,1
GL24h, 16/32, e=0,8m	3,3 kN/m ²	29 kg/m ²	€ 244,23	65,15 cm	33,9	GL24h, 18/36, e=0,8m	3,4 kN/m ²	36 kg/m ²	€ 256,79	67,15 cm	38,3
C24, 10/30, e=0,625m	34,4 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,2	C24, 10/30, e=0,625m	40,4 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,9
3 Schicht, 5,7cm	39,8 kN/m	29 kg/m ²	€ 145,49	37,05 cm	5,6	3 Schicht, 5,7cm	46,7 kN/m	29 kg/m ²	€ 145,49	37,05 cm	5,6
10cm, C16/20	71,3 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9	10cm, C16/20	83,4 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9
20cm, LC12/13	57,3 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9	20cm, LC12/13	69,7 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9
ET30, 13cm C16/20	60,8 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8	ET30, 13cm C16/20	73,2 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8
HLZ, 50cm, gedämmt	59,6 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9	HLZ, 50cm, gedämmt	72,0 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9
C24, 12/28, e=0,625	44,7 kN/m	24 kg/m ²	€ 167,12	46,75 cm	-5,5	C24, 12/28, e=0,625	52,7 kN/m	24 kg/m ²	€ 167,12	46,75 cm	-5,5

Spannweite 8 m						Spannweite 9 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
GL 24h, 22/32, e=0,8m	4,7 kN/m ²	40 kg/m ²	€ 207,16	61,05 cm	42,6	GL 24h, 22/36, e=0,8m	4,8 kN/m ²	45 kg/m ²	€ 215,70	65,05 cm	45,3
7 Schicht, 26cm	5,4 kN/m ²	130 kg/m ²	€ 209,10	52,05 cm	76,8	7 Schicht, 28cm	5,5 kN/m ²	140 kg/m ²	€ 217,82	54,05 cm	82,0
30cm, C 25/30	11,6 kN/m ²	750 kg/m ²	€ 153,06	56,00 cm	111,7	Nicht verfügbar					
WB-8-20-C	7,8 kN/m ²	365 kg/m ²	€ 159,93	46,00 cm	32,7	VSD-5-26,5-B	7,9 kN/m ²	375 kg/m ²	€ 176,72	52,50 cm	33,4
VSE 12+10, C 40/50; C 25/30	9,6 kN/m ²	550 kg/m ²	€ 139,98	48,00 cm	83,8	Nicht verfügbar					
3s, 7,8cm / 7,5cm / 5cm	6,2 kN/m ²	209 kg/m ²	€ 166,29	46,30 cm	41,8	3s, 7,8cm / 10cm / 5cm	6,3 kN/m ²	218 kg/m ²	€ 174,98	48,80 cm	44,4
GL24h, 16/40, e=0,8m	2,7 kN/m ²	36 kg/m ²	€ 216,74	60,55 cm	27,4	GL24h, 16/44, e=0,8m	2,7 kN/m ²	40 kg/m ²	€ 222,31	62,55 cm	28,9
7 Schicht, 24,8cm	3,7 kN/m ²	124 kg/m ²	€ 261,47	69,25 cm	75,6	7 Schicht, 28cm	3,8 kN/m ²	140 kg/m ²	€ 270,34	72,45 cm	84,0
GL24h, 18/40, e=0,65m	3,4 kN/m ²	41 kg/m ²	€ 273,78	71,15 cm	38,7	GL28h, 18/44, e=0,8m	3,4 kN/m ²	40 kg/m ²	€ 270,77	75,15 cm	40,4
C24, 10/30, e=0,625m	46,4 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,9	C24, 10/30, e=0,625m	52,2 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,9
3 Schicht, 5,7cm	55,5 kN/m	29 kg/m ²	€ 145,49	37,05 cm	5,6	3 Schicht, 7,2cm	64,1 kN/m	36 kg/m ²	€ 149,68	38,55 cm	9,5
10cm, C16/20	98,8 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9	10cm, C16/20	85,1 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9
20cm, LC12/13	77,4 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9	20cm, LC12/13	85,7 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9
ET30, 13cm C16/20	80,8 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8	ET30, 13cm C16/20	89,2 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8
HLZ, 50cm, gedämmt	79,6 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9	HLZ, 50cm, gedämmt	88,0 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9
C24, 12/28, e=0,625	61,0 kN/m	24 kg/m ²	€ 167,12	46,75 cm	-5,5	C24, 12/28, e=0,625	68,4 kN/m	24 kg/m ²	€ 167,12	46,75 cm	-5,5

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

Spannweite 10 m						Spannweite 11 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
GL 24h, 22/40, e=0,8m	4,8 kN/m ²	50 kg/m ²	€ 224,25	69,05 cm	48,0	GL 24h, 22/44, e=0,8m	4,9 kN/m ²	54 kg/m ²	€ 232,80	73,05 cm	50,8
8 Schicht, 32cm	5,7 kN/m ²	160 kg/m ²	€ 236,30	58,05 cm	92,5	Kasten 2x3s,12cm + 8/18,e=0,6m	5,4 kN/m ²	130 kg/m ²	€ 235,75	68,05 cm	72,6
VSD-5-26,5-B	7,9 kN/m ²	375 kg/m ²	€ 176,40	52,50 cm	33,4	VSD-5-26,5-C	7,9 kN/m ²	375 kg/m ²	€ 181,28	52,50 cm	33,4
3s, 10,8cm / 12,5cm / 5cm	6,6 kN/m ²	246 kg/m ²	€ 191,13	54,30 cm	54,8	3s, 10,8cm / 15cm / 5cm	6,7 kN/m ²	256 kg/m ²	€ 199,84	56,80 cm	57,4
GL24h, 22/44, e=0,8m	2,9 kN/m ²	54 kg/m ²	€ 247,95	62,55 cm	36,2	GL24h, 20/48, e=0,8m	2,9 kN/m ²	54 kg/m ²	€ 247,17	66,55 cm	38,3
8 Schicht, 32cm	4,0 kN/m ²	160 kg/m ²	€ 285,30	74,45 cm	92,6	Nicht verfügbar					
GL24h, 20/48, e=0,8m	3,5 kN/m ²	54 kg/m ²	€ 287,09	79,15 cm	42,1	GL28h, 20/48, e=0,625m	3,7 kN/m ²	69 kg/m ²	€ 313,20	79,15 cm	51,8
C24, 10/30, e=0,625m	59,0 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,9	C24, 10/30, e=0,625m	64,8 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,9
3 Schicht, 7,2cm	73,7 kN/m	36 kg/m ²	€ 149,68	38,55 cm	9,5	3 Schicht, 7,2cm	69,0 kN/m	36 kg/m ²	€ 149,68	38,55 cm	9,5
10cm, C16/20	93,7 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9	10cm, C16/20	101,3 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9
20cm, LC12/13	94,3 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9	20cm, LC12/13	101,9 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9
ET30, 13cm C16/20	97,8 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8	ET30, 13cm C16/20	105,4 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8
HLZ, 50cm, gedämmt	96,6 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9	HLZ, 50cm, gedämmt	104,2 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9
C24, 12/28, e=0,625	78,3 kN/m	24 kg/m ²	€ 167,12	46,75 cm	-5,5	C24, 14/28, e=0,625	87,7 kN/m	28 kg/m ²	€ 171,03	46,75 cm	-5,9

Spannweite 12 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
GL 24h, 22/48, e=0,8m	4,9 kN/m ²	59 kg/m ²	€ 241,34	77,05 cm	53,5
Kasten 2x3s,12cm + 10/22,e=0,6m	5,5 kN/m ²	136 kg/m ²	€ 241,87	72,05 cm	81,2
VSD-4-32-B	8,8 kN/m ²	470 kg/m ²	€ 186,19	58,00 cm	40,1
5s, 12cm / 15cm / 6cm	7,2 kN/m ²	307 kg/m ²	€ 206,78	59,00 cm	61,8
GL24h, 20/52, e=0,8m	2,9 kN/m ²	59 kg/m ²	€ 254,94	70,55 cm	36,6
GL28h, 20/52, e=0,625m	3,7 kN/m ²	75 kg/m ²	€ 323,14	83,15 cm	54,1
C24, 10/30, e=0,625m	71,1 kN/m	22 kg/m ²	€ 146,72	44,75 cm	-5,9
3 Schicht, 7,2cm	75,8 kN/m	36 kg/m ²	€ 149,68	38,55 cm	9,5
10cm, C16/20	117,5 kN/m	250 kg/m ²	€ 158,75	38,10 cm	32,9
20cm, LC12/13	118,1 kN/m	260 kg/m ²	€ 201,87	46,10 cm	63,9
ET30, 13cm C16/20	121,6 kN/m	273 kg/m ²	€ 176,71	46,10 cm	18,8
HLZ, 50cm, gedämmt	120,4 kN/m	300 kg/m ²	€ 175,28	53,20 cm	79,9
C24, 14/28, e=0,625	100,0 kN/m	28 kg/m ²	€ 171,03	46,75 cm	-5,9

9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

WOHNUNGBÄUDE																																		
		LASTEN			Spannweite 3 m																													
		Nutzlasten	Ständige Lasten		Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3																								
DECKE	BETON	Balkendecke	3,0 kN/m²	1,8 kN/m²	C24, 10/16, e=0,8m	4,8 kN/m²	9 kg/m²	€ 133,18	38,30 cm	5,5																								
											BSP / Massivholzdecke	1,4 kN/m²	3 Schicht, 9cm	4,9 kN/m²	45 kg/m²	€ 119,02	27,05 cm	14,1																
																			Stahlbeton-Elementdecke	16cm, C 25/30	8,4 kN/m²	400 kg/m²	€ 109,20	34,00 cm	44,2									
																										Hohlkörperdecke	Nicht verfügbar	VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	8,4 kN/m²	400 kg/m²	€ 123,19	34,00 cm	44,2	
																																		Elementdecke, vorgespannt
BSP-HLB-Beton-Verbund	1,5 kN/m²	C24, 12/18, e=0,8m	3,1 kN/m²	12 kg/m²	€ 164,97	47,80 cm	4,8																											
DACH	HLB	Sparrendach	2,0 kN/m²	0,9 kN/m²	C24, 10/20, e=0,8m	3,7 kN/m²	11 kg/m²	€ 192,75	51,15 cm	11,8																								
											BSP / Massivholzdach	1,0 kN/m²	10cm, C16/20	119,2 kN/m	250 kg/m²	€ 144,75	28,10 cm	24,0																
																			Sparrendach (HLB beplankt)	0,3 kN/m²	20cm, LC12/13	120,4 kN/m	260 kg/m²	€ 185,87	36,10 cm	54,9								
																											Holzständerwand	0,6 kN/m²	C24, 12/16, e=0,625m	61,4 kN/m	14 kg/m²	€ 137,52	32,00 cm	-9,0
Beton + WDV5	0,3 kN/m²	10cm, C16/20	119,2 kN/m	250 kg/m²	€ 144,75	28,10 cm	24,0																											
Leichtbeton	0,3 kN/m²	20cm, LC12/13	120,4 kN/m	260 kg/m²	€ 185,87	36,10 cm	54,9																											
Mantelbetonwandelemente	0,7 kN/m²	TT18, 12cm C16/20	124,1 kN/m	252 kg/m²	€ 151,07	34,10 cm	7,7																											
Hochlochziegel	0,3 kN/m²	HLZ, 38cm	116,6 kN/m	228 kg/m²	€ 147,35	44,20 cm	21,5																											
HLB	Z	Ständerkonstruktion (HLB beplankt)	0,9 kN/m²	C24, 12/14, e=0,625	76,8 kN/m	14 kg/m²	€ 162,49	36,50 cm	-7,6																									

Spannweite 4 m						Spannweite 5 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
C24, 14/18, e=0,8m	4,9 kN/m²	14 kg/m²	€ 138,19	40,30 cm	5,0	C24, 16/22, e=0,8m	4,9 kN/m²	20 kg/m²	€ 143,64	44,30 cm	4,6
3 Schicht, 10,8cm	5,0 kN/m²	54 kg/m²	€ 122,30	28,85 cm	18,8	5 Schicht, 14cm	5,1 kN/m²	70 kg/m²	€ 142,05	32,05 cm	26,6
18cm, C 25/30	8,9 kN/m²	450 kg/m²	€ 111,80	36,00 cm	51,1	20cm, C 25/30	9,4 kN/m²	500 kg/m²	€ 116,26	38,00 cm	58,1
VSD-8-16-M	7,0 kN/m²	260 kg/m²	€ 131,47	34,00 cm	6,7	VSD-8-16-M	7,0 kN/m²	260 kg/m²	€ 130,01	34,00 cm	6,7
VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	8,4 kN/m²	400 kg/m²	€ 121,97	34,00 cm	44,2	VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	8,4 kN/m²	400 kg/m²	€ 121,24	34,00 cm	44,2
3s, 6cm / 3,5cm / 4cm	5,9 kN/m²	133 kg/m²	€ 137,91	32,75 cm	16,0	3s, 6cm / 3,5cm / 4cm	5,9 kN/m²	133 kg/m²	€ 137,71	32,75 cm	16,0
C24, 12/22, e=0,8m	3,1 kN/m²	15 kg/m²	€ 166,28	47,80 cm	4,7	GL24h, 18/28, e=0,8m	3,3 kN/m²	28 kg/m²	€ 204,88	47,80 cm	21,0
3 Schicht, 10,8cm	3,5 kN/m²	54 kg/m²	€ 175,87	47,25 cm	31,8	5 Schicht, 14cm	3,6 kN/m²	70 kg/m²	€ 198,80	50,45 cm	40,2
C24, 16/22, e=0,8m	3,8 kN/m²	20 kg/m²	€ 201,03	53,15 cm	11,5	GL24h, 18/28, e=0,8m	3,9 kN/m²	28 kg/m²	€ 236,80	59,15 cm	28,0
C24, 12/16, e=0,625m	79,8 kN/m	14 kg/m²	€ 137,52	32,00 cm	-9,0	C24, 14/16, e=0,625m	99,4 kN/m	16 kg/m²	€ 139,75	32,00 cm	-9,1
3 Schicht, 7,2cm	82,8 kN/m	36 kg/m²	€ 142,68	29,80 cm	3,5	3 Schicht, 7,2cm	104,4 kN/m	36 kg/m²	€ 142,68	29,80 cm	3,5
10cm, C16/20	147,7 kN/m	250 kg/m²	€ 144,75	28,10 cm	24,0	10cm, C16/20	176,8 kN/m	250 kg/m²	€ 144,75	28,10 cm	24,0
20cm, LC12/13	132,1 kN/m	260 kg/m²	€ 185,87	36,10 cm	54,9	20cm, LC12/13	157,0 kN/m	260 kg/m²	€ 185,87	36,10 cm	54,9
TT18, 12cm C16/20	135,8 kN/m	252 kg/m²	€ 151,07	34,10 cm	7,7	TT18, 12cm C16/20	160,7 kN/m	252 kg/m²	€ 151,07	34,10 cm	7,7
HLZ, 38cm	128,3 kN/m	228 kg/m²	€ 147,35	44,20 cm	21,5	HLZ, 38cm	153,2 kN/m	228 kg/m²	€ 147,35	44,20 cm	21,5
C24, 12/14, e=0,625	98,5 kN/m	14 kg/m²	€ 162,49	36,50 cm	-7,6	C24, 14/14, e=0,625	120,3 kN/m	14 kg/m²	€ 164,45	36,50 cm	-8,0

Spannweite 6 m						Spannweite 7 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
GL 24h, 14/28, e=0,8m	5,0 kN/m²	22 kg/m²	€ 167,53	50,30 cm	17,7	GL 24h, 22/28, e=0,8m	5,1 kN/m²	35 kg/m²	€ 189,29	50,30 cm	24,1
5 Schicht, 18,2cm	5,4 kN/m²	91 kg/m²	€ 157,51	36,25 cm	37,6	7 Schicht, 20,8cm	5,5 kN/m²	104 kg/m²	€ 170,27	38,85 cm	44,4
24cm, C 25/30	10,4 kN/m²	600 kg/m²	€ 122,57	42,00 cm	72,0	26cm, C 25/30	10,9 kN/m²	650 kg/m²	€ 127,82	44,00 cm	79,0
VSD-8-16-M	7,0 kN/m²	260 kg/m²	€ 129,03	34,00 cm	6,7	WB-8-20-B	8,1 kN/m²	365 kg/m²	€ 144,13	38,00 cm	13,9
VSE 10+8 C 40/50; C 25/30	8,9 kN/m²	450 kg/m²	€ 116,65	36,00 cm	51,2	VSE 12+10, C 40/50; C 25/30	9,9 kN/m²	550 kg/m²	€ 124,18	40,00 cm	65,1
3s, 6m / 7,5cm / 4cm	6,1 kN/m²	155 kg/m²	€ 151,57	36,75 cm	20,1	3s, 6cm / 7,5cm / 5cm	6,3 kN/m²	176 kg/m²	€ 152,78	37,75 cm	21,4
GL24h, 18/32, e=0,8m	3,3 kN/m²	32 kg/m²	€ 211,87	51,80 cm	23,2	GL24h, 18/36, e=0,8m	3,4 kN/m²	36 kg/m²	€ 218,87	55,80 cm	25,4
5 Schicht, 18cm	3,8 kN/m²	90 kg/m²	€ 211,16	52,45 cm	48,7	7 Schicht, 20,8cm	4,0 kN/m²	104 kg/m²	€ 223,95	55,25 cm	56,1
GL24h, 18/32, e=0,8m	3,9 kN/m²	32 kg/m²	€ 243,79	63,15 cm	30,2	GL24h, 20/36, e=0,8m	4,0 kN/m²	41 kg/m²	€ 257,78	67,15 cm	34,7
C24, 14/16, e=0,625m	118,2 kN/m	16 kg/m²	€ 139,75	32,00 cm	-9,1	C24, 14/16, e=0,625m	139,4 kN/m	16 kg/m²	€ 139,75	32,00 cm	-9,1
3 Schicht, 8cm	128,9 kN/m	40 kg/m²	€ 143,79	30,60 cm	5,6	3 Schicht, 8cm	152,5 kN/m	40 kg/m²	€ 143,79	30,60 cm	5,6
10cm, C16/20	214,6 kN/m	250 kg/m²	€ 144,75	28,10 cm	24,0	10cm, C16/20	266,0 kN/m	250 kg/m²	€ 144,75	28,10 cm	24,0
20cm, LC12/13	181,6 kN/m	260 kg/m²	€ 185,87	36,10 cm	54,9	20cm, LC12/13	228,4 kN/m	260 kg/m²	€ 185,87	36,10 cm	54,9
TT18, 12cm C16/20	185,4 kN/m	252 kg/m²	€ 151,07	34,10 cm	7,7	TT18, 12cm C16/20	232,1 kN/m	252 kg/m²	€ 151,07	34,10 cm	7,7
HLZ, 38cm	177,8 kN/m	228 kg/m²	€ 147,35	44,20 cm	21,5	HLZ, 38cm	224,6 kN/m	228 kg/m²	€ 147,35	44,20 cm	21,5
C24, 14/14, e=0,625	145,9 kN/m	14 kg/m²	€ 164,45	36,50 cm	-8,0	GL24h, 14/14, e=0,625	173,0 kN/m	14 kg/m²	€ 184,00	36,50 cm	0,4

Spannweite 8 m						Spannweite 9 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
GL 24h, 24/32, e=0,8m	5,2 kN/m²	43 kg/m²	€ 204,05	54,30 cm	28,6	GL 24h, 24/36, e=0,8m	5,2 kN/m²	49 kg/m²	€ 213,38	58,30 cm	31,6
7 Schicht, 24,8cm	5,7 kN/m²	124 kg/m²	€ 186,15	42,85 cm	54,9	7 Schicht, 28cm	5,8 kN/m²	140 kg/m²	€ 202,66	46,05 cm	63,3
30cm, C 25/30	11,9 kN/m²	750 kg/m²	€ 136,74	48,00 cm	92,9	Nicht verfügbar					
WB-8-20-C	8,1 kN/m²	365 kg/m²	€ 143,61	38,00 cm	13,9	VSD-5-26,5-B	8,2 kN/m²	375 kg/m²	€ 160,40	44,50 cm	14,7
VSE 12+12, C 40/50; C 25/30	10,4 kN/m²	600 kg/m²	€ 123,66	42,00 cm	72,0	Nicht verfügbar					
3s, 7,8cm / 10cm / 5cm	6,5 kN/m²	198 kg/m²	€ 165,72	42,05 cm	28,7	3s, 9cm / 10cm / 5cm	6,6 kN/m²	204 kg/m²	€ 167,84	43,25 cm	31,8
GL24h, 22/40, e=0,8m	3,5 kN/m²	50 kg/m²	€ 241,40	59,80 cm	32,7	GL24h, 22/44, e=0,8m	3,5 kN/m²	54 kg/m²	€ 249,95	63,80 cm	35,4
7 Schicht, 24,8cm	4,2 kN/m²	124 kg/m²	€ 244,47	57,25 cm	64,6	7 Schicht, 28cm	4,3 kN/m²	140 kg/m²	€ 253,34	60,45 cm	73,0
GL24h, 22/40, e=0,8m	4,1 kN/m²	50 kg/m²	€ 273,32	71,15 cm	39,7	GL28h, 22/44, e=0,8m	4,1 kN/m²	54 kg/m²	€ 280,87	75,15 cm	41,1
C24, 16/16, e=0,625m	161,4 kN/m	18 kg/m²	€ 141,98	32,00 cm	-9,2	C24, 16/16, e=0,625m	182,3 kN/m	18 kg/m²	€ 141,98	32,00 cm	-9,2
3 Schicht, 9,4cm	180,1 kN/m	47 kg/m²	€ 148,48	32,00 cm	9,2	3 Schicht, 9,4cm	207,0 kN/m	47 kg/m²	€ 148,48	32,00 cm	9,2
10cm, C16/20	312,2 kN/m	250 kg/m²	€ 144,75	28,10 cm	24,0	10cm, C16/20	286,7 kN/m	250 kg/m²	€ 144,75	28,10 cm	24,0
20cm, LC12/13	257,0 kN/m	260 kg/m²	€ 185,87	36,10 cm	54,9	20cm, LC12/13	287,9 kN/m	260 kg/m²	€ 185,87	36,10 cm	54,9
TT18, 12cm C16/20	260,8 kN/m	252 kg/m²	€ 151,07	34,10 cm	7,7	TT18, 12cm C16/20	291,6 kN/m	252 kg/m²	€ 151,07	34,10 cm	7,7
HLZ, 38cm	253,2 kN/m	228 kg/m²	€ 147,35	44,20 cm	21,5	HLZ, 38cm	284,1 kN/m	228 kg/m²	€ 147,35	44,20 cm	21,5
GL24h, 14/14, e=0,625	202,0 kN/m	14 kg/m²	€ 184,00	36,50 cm	0,4	GL24h, 16/16, e=0,625	228,2 kN/m	18 kg/m²	€ 184,65	36,00 cm	1,2

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

Spannweite 10 m						Spannweite 11 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
GL 24h, 24/40, e=0,8m	5,3 kN/m ²	54 kg/m ²	€ 222,70	62,30 cm	34,6	GL 24h, 24/44, e=0,8m	5,3 kN/m ²	59 kg/m ²	€ 232,02	66,30 cm	37,6
8 Schicht, 32cm	6,0 kN/m ²	160 kg/m ²	€ 221,17	50,05 cm	73,8	Kasten 2x3s,12cm + 8/16,e=0,6m	5,7 kN/m ²	129 kg/m ²	€ 226,55	58,05 cm	58,8
VSD-5-26,5-B	8,2 kN/m ²	375 kg/m ²	€ 160,08	44,50 cm	14,7	VSD-5-26,5-C	8,2 kN/m ²	375 kg/m ²	€ 164,96	44,50 cm	14,7
3s, 10,8cm / 12,5cm / 5cm	6,8 kN/m ²	227 kg/m ²	€ 180,31	47,55 cm	39,1	3s, 12cm / 15cm / 5cm	7,0 kN/m ²	246 kg/m ²	€ 196,19	51,25 cm	44,8
GL28h, 22/48, e=0,8m	3,6 kN/m ²	59 kg/m ²	€ 258,49	67,80 cm	38,1	GL28h, 24/52, e=0,8m	3,7 kN/m ²	70 kg/m ²	€ 267,04	71,80 cm	44,1
8 Schicht, 32cm	4,5 kN/m ²	160 kg/m ²	€ 268,30	62,45 cm	81,5	Nicht verfügbar					
GL28h, 24/48, e=0,8m	4,2 kN/m ²	65 kg/m ²	€ 298,74	79,15 cm	46,9	GL24h, 20/52, e=0,625m	4,3 kN/m ²	75 kg/m ²	€ 316,14	83,15 cm	52,0
C24, 16/16, e=0,625m	203,7 kN/m	18 kg/m ²	€ 141,98	32,00 cm	-9,2	GL24h, 16/16, e=0,625m	226,1 kN/m	18 kg/m ²	€ 165,23	32,00 cm	1,7
3 Schicht, 9,4cm	236,9 kN/m	47 kg/m ²	€ 148,48	32,00 cm	9,2	3 Schicht, 9,4cm	240,4 kN/m	47 kg/m ²	€ 148,48	32,00 cm	9,2
10cm, C16/20	315,3 kN/m	250 kg/m ²	€ 144,75	28,10 cm	24,0	10cm, C16/20	344,6 kN/m	250 kg/m ²	€ 144,75	28,10 cm	24,0
20cm, LC12/13	316,5 kN/m	260 kg/m ²	€ 185,87	36,10 cm	54,9	20cm, LC12/13	345,8 kN/m	260 kg/m ²	€ 185,87	36,10 cm	54,9
TT18, 12cm C16/20	320,2 kN/m	252 kg/m ²	€ 151,07	34,10 cm	7,7	TT18, 12cm C16/20	349,5 kN/m	252 kg/m ²	€ 151,07	34,10 cm	7,7
HLZ, 38cm	312,7 kN/m	228 kg/m ²	€ 147,35	44,20 cm	21,5	HLZ, 38cm	342,0 kN/m	228 kg/m ²	€ 147,35	44,20 cm	21,5
GL24h, 16/16, e=0,625	259,8 kN/m	18 kg/m ²	€ 184,65	36,00 cm	1,2	GL24h, 16/16, e=0,625	292,0 kN/m	18 kg/m ²	€ 184,65	36,00 cm	1,2

Spannweite 12 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
GL 24h, 24/48, e=0,8m	5,4 kN/m ²	65 kg/m ²	€ 241,35	70,30 cm	40,6
Kasten 2x3s,12cm + 8/20,e=0,6m	5,8 kN/m ²	136 kg/m ²	€ 230,67	62,05 cm	60,1
VSD-4-32-B	9,1 kN/m ²	470 kg/m ²	€ 169,87	50,00 cm	21,4
5s, 12cm / 17,5cm / 6cm	7,3 kN/m ²	281 kg/m ²	€ 206,21	54,75 cm	48,7
GL28h, 26/56, e=0,8m	3,8 kN/m ²	82 kg/m ²	€ 297,34	75,80 cm	50,6
GL28h, 20/56, e=0,625m	4,2 kN/m ²	63 kg/m ²	€ 326,09	87,15 cm	53,9
GL24h, 16/16, e=0,625m	249,2 kN/m	18 kg/m ²	€ 165,23	32,00 cm	1,7
3 Schicht, 9,4cm	265,1 kN/m	47 kg/m ²	€ 148,48	32,00 cm	9,2
10cm, C16/20	408,5 kN/m	250 kg/m ²	€ 144,75	28,10 cm	24,0
20cm, LC12/13	409,7 kN/m	260 kg/m ²	€ 185,87	36,10 cm	54,9
TT18, 12cm C16/20	413,4 kN/m	252 kg/m ²	€ 151,07	34,10 cm	7,7
HLZ, 38cm	405,8 kN/m	228 kg/m ²	€ 147,35	44,20 cm	21,5
GL28h, 16/16, e=0,625	328,3 kN/m	18 kg/m ²	€ 184,65	36,00 cm	1,2

9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

BÜRO- / GEWERBEGEBÄUDE										
		LASTEN			Spannweite 4 m	Kosten	Dicke	OI3		
		Nutzlasten	Ständige Lasten	Konstruktion						
DECKE	H HLB BEL-	BSP / Massivholzdecke	5,0 kN/m²	1,6 kN/m²	5 Schicht, 14cm	7,3 kN/m²	70 kg/m²	€ 238,93	44,35 cm	58,0
		Hohlkörperdecke		1,1 kN/m²	VSD-8-16-M	8,7 kN/m²	260 kg/m²	€ 232,75	41,30 cm	28,4
		Elementdecke, vorgespannt		1,1 kN/m²	VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	10,1 kN/m²	400 kg/m²	€ 220,92	41,30 cm	65,9
		BSP-HLB-Beton-Verbund		1,3 kN/m²	3s, 6cm / 3,5cm / 4cm	7,6 kN/m²	133 kg/m²	€ 282,59	41,30 cm	39,5
DACH	H HLB B	BSP / Massivholzdecke	4,8 kN/m²	1,8 kN/m²	5 Schicht, 14cm	7,3 kN/m²	70 kg/m²	€ 230,10	44,30 cm	66,7
		Hohlkörperdecke		1,8 kN/m²	VSD-8-16-M	9,2 kN/m²	260 kg/m²	€ 231,75	48,05 cm	46,1
		BSP-HLB-Beton-Verbund		2,0 kN/m²	3s, 6cm / 3,5cm / 4cm	8,1 kN/m²	133 kg/m²	€ 272,80	46,05 cm	53,5
		BSP / Massivholzwand		0,4 kN/m²	3 Schicht, 10cm	306,4 kN/m	50 kg/m²	€ 172,73	21,20 cm	19,2
WAND	H BETON HLB	Beton + WDV5	Lasten aus Konstruktion abhängig von Material und Spannweite	0,3 kN/m²	10cm, C16/20	449,2 kN/m	250 kg/m²	€ 131,64	22,10 cm	16,8
		Leichtbeton		0,3 kN/m²	20cm, LC12/13	404,4 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5
		Mantelbetonwandelemente		0,7 kN/m²	TT 18, 12cm, C16/20	418,6 kN/m	300 kg/m²	€ 138,85	26,10 cm	0,5
		BSP (HLB beplankt)		0,8 kN/m²	3 Schicht, 10cm	331,6 kN/m	50 kg/m²	€ 168,49	26,95 cm	6,7

Spannweite 5 m						Spannweite 6 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
5 Schicht, 18,2cm	7,5 kN/m²	91 kg/m²	€ 254,32	48,55 cm	69,0	7 Schicht, 20,8cm	7,6 kN/m²	104 kg/m²	€ 267,05	51,15 cm	75,8
VSD-8-16-M	8,7 kN/m²	260 kg/m²	€ 231,29	41,30 cm	28,4	VSD-8-16-B	8,7 kN/m²	260 kg/m²	€ 236,36	41,30 cm	28,4
VSE 8+8 C 40/50; C 25/30	10,1 kN/m²	400 kg/m²	€ 220,19	41,30 cm	65,9	VSE 10+10 C 40/50; C 25/30	11,1 kN/m²	500 kg/m²	€ 211,33	45,30 cm	79,8
3s, 6cm / 5cm / 5cm	7,9 kN/m²	162 kg/m²	€ 288,94	43,50 cm	42,4	3s, 6cm / 7,5cm / 5cm	8,1 kN/m²	176 kg/m²	€ 297,55	46,30 cm	44,9
5 Schicht, 14,5cm	7,3 kN/m²	73 kg/m²	€ 231,90	44,80 cm	68,0	5 Schicht, 18,2cm	7,5 kN/m²	91 kg/m²	€ 245,36	48,50 cm	77,7
VSD-8-16-M	9,2 kN/m²	260 kg/m²	€ 230,29	48,05 cm	46,1	VSD-8-16-B	9,2 kN/m²	260 kg/m²	€ 235,36	48,05 cm	46,1
3s, 6cm / 5cm / 5cm	8,4 kN/m²	162 kg/m²	€ 277,84	48,55 cm	56,3	3s, 6cm / 7,5cm / 5cm	8,5 kN/m²	176 kg/m²	€ 282,60	49,05 cm	55,2
3 Schicht, 12cm	389,8 kN/m	60 kg/m²	€ 180,01	23,20 cm	24,4	3 Schicht, 12cm	472,5 kN/m	60 kg/m²	€ 180,01	23,20 cm	24,4
10cm, C16/20	548,8 kN/m	250 kg/m²	€ 131,64	22,10 cm	16,8	10cm, C16/20	698,5 kN/m	250 kg/m²	€ 131,64	22,10 cm	16,8
20cm, LC12/13	492,3 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5	20cm, LC12/13	580,3 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5
TT 18, 12cm, C16/20	506,5 kN/m	300 kg/m²	€ 138,85	26,10 cm	0,5	TT 18, 12cm, C16/20	594,5 kN/m	300 kg/m²	€ 138,85	26,10 cm	0,5
3 Schicht, 12cm	425,2 kN/m	60 kg/m²	€ 175,77	28,95 cm	11,9	3 Schicht, 12cm	513,5 kN/m	60 kg/m²	€ 175,77	28,95 cm	11,9

Spannweite 7 m						Spannweite 8 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
7 Schicht, 24,8cm	7,8 kN/m²	124 kg/m²	€ 282,90	55,15 cm	86,3	7 Schicht, 28cm	8,0 kN/m²	140 kg/m²	€ 299,40	58,35 cm	94,7
WB-8-20-C	9,8 kN/m²	365 kg/m²	€ 245,36	45,30 cm	35,7	VSD-6-20-C	9,0 kN/m²	285 kg/m²	€ 252,24	45,30 cm	30,0
VSE 12+10 C 40/50; C 25/30	11,6 kN/m²	550 kg/m²	€ 218,86	47,30 cm	86,8	Nicht verfügbar					
3s, 9m / 7,5cm / 5cm	8,2 kN/m²	191 kg/m²	€ 303,89	49,30 cm	52,8	3s, 9m / 12,5cm / 5cm	7,9 kN/m²	157 kg/m²	€ 321,32	54,30 cm	58,0
7 Schicht, 20,8cm	7,6 kN/m²	104 kg/m²	€ 254,28	51,10 cm	80,7	7 Schicht, 23cm	7,7 kN/m²	115 kg/m²	€ 262,02	53,30 cm	86,5
WB-8-20-C	10,2 kN/m²	365 kg/m²	€ 244,36	52,05 cm	53,4	VSD-6-20-C	9,4 kN/m²	285 kg/m²	€ 251,24	52,05 cm	47,6
3s, 10,8cm / 7,5cm / 5cm	8,8 kN/m²	200 kg/m²	€ 292,69	53,85 cm	67,8	3s, 10,8cm / 12,5cm / 5cm	9,0 kN/m²	227 kg/m²	€ 306,27	56,85 cm	69,2
3 Schicht, 12cm	561,5 kN/m	60 kg/m²	€ 180,01	23,20 cm	24,4	5 Schicht, 12,8cm	652,1 kN/m	64 kg/m²	€ 193,12	24,00 cm	26,5
10cm, C16/20	847,8 kN/m	250 kg/m²	€ 131,64	22,10 cm	16,8	10cm, C16/20	774,4 kN/m	250 kg/m²	€ 131,64	22,10 cm	16,8
20cm, LC12/13	741,7 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5	20cm, LC12/13	776,2 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5
TT 18, 12cm, C16/20	755,9 kN/m	300 kg/m²	€ 138,85	26,10 cm	0,5	TT 18, 12cm, C16/20	790,4 kN/m	300 kg/m²	€ 138,85	26,10 cm	0,5
5 Schicht, 12,8cm	607,3 kN/m	64 kg/m²	€ 180,13	27,75 cm	11,8	5 Schicht, 15,8cm	674,2 kN/m	79 kg/m²	€ 180,55	28,25 cm	17,9

Spannweite 9 m						Spannweite 10 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
7 Schicht, 32cm	8,2 kN/m²	160 kg/m²	€ 317,90	62,35 cm	105,1	Kasten 2x5s,12cm + 8/18,e=0,6m	7,9 kN/m²	130 kg/m²	€ 343,35	72,35 cm	90,2
VSD-5-26,5-B	9,9 kN/m²	375 kg/m²	€ 261,52	51,80 cm	36,1	VSD-5-26,5-C	9,9 kN/m²	375 kg/m²	€ 266,35	51,80 cm	36,4
3s, 10,8cm / 12,5cm / 6cm	8,8 kN/m²	248 kg/m²	€ 326,33	56,80 cm	63,2	5s, 12,5cm / 15cm / 6cm	9,0 kN/m²	270 kg/m²	€ 351,28	61,30 cm	71,0
7 Schicht, 26cm	7,9 kN/m²	130 kg/m²	€ 277,89	56,30 cm	94,4	8 Schicht, 30cm	8,1 kN/m²	150 kg/m²	€ 292,58	60,30 cm	101,1
VSD-5-26,5-B	10,3 kN/m²	375 kg/m²	€ 260,52	58,55 cm	54,1	VSD-5-26,5-C	10,3 kN/m²	375 kg/m²	€ 265,35	58,55 cm	54,1
3s, 10,8cm / 15cm / 6cm	9,4 kN/m²	261 kg/m²	€ 314,96	60,35 cm	73,1	5s, 14cm / 15cm / 6cm	9,3 kN/m²	257 kg/m²	€ 331,05	59,05 cm	73,1
5 Schicht, 15,8cm	751,3 kN/m	79 kg/m²	€ 195,62	25,00 cm	28,6	5 Schicht, 15,8cm	811,0 kN/m	79 kg/m²	€ 195,12	25,00 cm	28,6
10cm, C16/20	945,8 kN/m	250 kg/m²	€ 131,64	22,10 cm	16,8	10cm, C16/20	1045,3 kN/m	250 kg/m²	€ 131,64	22,10 cm	16,8
20cm, LC12/13	947,6 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5	20cm, LC12/13	1047,1 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5
TT 18, 12cm, C16/20	961,8 kN/m	300 kg/m²	€ 138,85	26,10 cm	0,5	TT 18, 12cm, C16/20	1061,3 kN/m	300 kg/m²	€ 138,85	26,10 cm	0,5
5 Schicht, 15,8cm	828,2 kN/m	79 kg/m²	€ 180,55	28,25 cm	17,9	5 Schicht, 18cm	936,8 kN/m	90 kg/m²	€ 186,61	29,95 cm	23,3

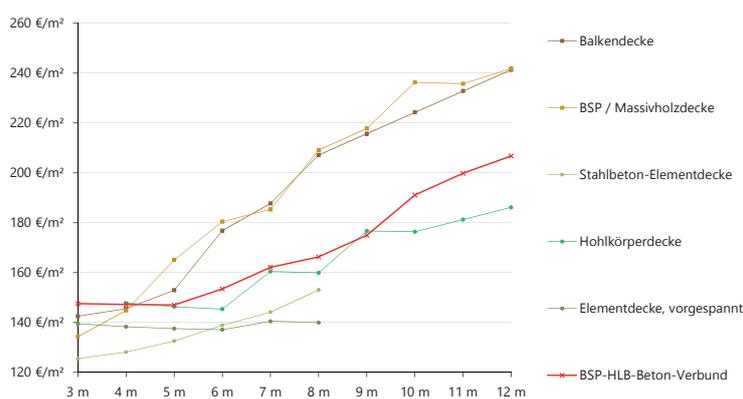
Spannweite 11 m						Spannweite 12 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3	Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr.	Kosten	Dicke	OI3
Kasten 2x5s,12cm + 10/22,e=0,6m	7,9 kN/m²	136 kg/m²	€ 353,17	76,35 cm	93,4	Kasten 2x5s,12cm + 12/26,e=0,6m	8,0 kN/m²	142 kg/m²	€ 365,08	80,35 cm	97,3
VSD-4-32-B	10,8 kN/m²	470 kg/m²	€ 271,15	57,30 cm	43,2	VSD-4-32-C	10,8 kN/m²	470 kg/m²	€ 279,48	57,30 cm	43,2
5s, 14cm / 17,5cm / 6cm	9,2 kN/m²	291 kg/m²	€ 363,72	65,30 cm	77,5	5s, 14,5cm / 20cm / 7cm	9,6 kN/m²	328 kg/m²	€ 373,81	69,30 cm	82,7
8 Schicht, 32cm	8,2 kN/m²	160 kg/m²	€ 301,32	62,30 cm	106,4	Kasten 2x5s,14cm + 8/18,e=0,6m	8,1 kN/m²	150 kg/m²	€ 333,78	72,30 cm	101,1
VSD-4-32-B	11,3 kN/m²	470 kg/m²	€ 270,15	64,05 cm	60,9	VSD-4-32-C	11,3 kN/m²	470 kg/m²	€ 278,48	64,05 cm	60,9
5s, 14cm / 20cm / 6cm	9,6 kN/m²	284 kg/m²	€ 348,50	64,05 cm	78,2	5s, 16cm / 22,5cm / 7cm	10,1 kN/m²	329 kg/m²	€ 361,16	67,55 cm	83,6
5 Schicht, 16cm	897,1 kN/m	80 kg/m²	€ 195,65	25,20 cm	29,1	5 Schicht, 18cm	983,2 kN/m	90 kg/m²	€ 203,43	27,20 cm	34,3
12cm, C16/20	1258,2 kN/m	300 kg/m²	€ 134,44	22,10 cm	23,7	12cm, C20/25	1367,2 kN/m	300 kg/m²	€ 134,44	22,10 cm	23,7
20cm, LC12/13	1251,0 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5	20cm, LC12/13	1360,0 kN/m	260 kg/m²	€ 175,20	30,10 cm	49,5
TT 18, 12cm, C16/20	1265,2 kN/m	300 kg/m²	€ 138,85	26,10 cm	0,5	TT 22, 15cm, C16/20	1387,7 kN/m	375 kg/m²	€ 145,02	30,10 cm	5,0
5 Schicht, 20cm	1053,5 kN/m	100 kg/m²	€ 187,39	29,95 cm	26,8	5 Schicht, 20cm	1192,3 kN/m	100 kg/m²	€ 187,39	29,95 cm	26,8

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN

Spannweite 14 m					
Konstruktion	Lasten	Gew. Konstr	Kosten	Dicke	OI3
Kasten 2x5s,14cm + 14/28,e=0,6m	8,2 kN/m ²	168 kg/m ²	€ 382,41	86,35 cm	111,1
VSD-4-40-C	11,3 kN/m ²	520 kg/m ²	€ 288,78	65,30 cm	46,6
5s, 20cm / 25cm / 8cm	10,4 kN/m ²	403 kg/m ²	€ 415,86	80,80 cm	103,5
Kasten 2x5s,14cm + 12/26,e=0,6m	8,2 kN/m ²	162 kg/m ²	€ 355,53	80,30 cm	109,0
VSD-4-40-C	11,8 kN/m ²	520 kg/m ²	€ 287,78	72,05 cm	64,3
5s, 20cm / 27,5cm / 7cm	10,7 kN/m ²	396 kg/m ²	€ 390,40	77,55 cm	100,5
5 Schicht, 20cm	1177,9 kN/m	100 kg/m ²	€ 206,29	27,20 cm	33,7
14cm, C20/25	1664,1 kN/m	350 kg/m ²	€ 137,24	24,10 cm	30,7
22cm, LC12/13	1652,5 kN/m	286 kg/m ²	€ 180,12	32,10 cm	56,3
GT 25, 16,5cm, C16/20	1682,3 kN/m	413 kg/m ²	€ 149,05	31,60 cm	6,7
7 Schicht, 23cm	1492,1 kN/m	115 kg/m ²	€ 195,06	31,45 cm	33,3

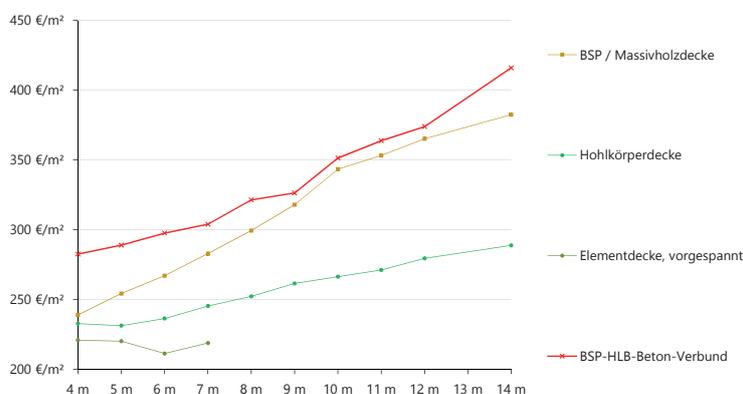
9.1.5 Dokumentation Ergebnisgraphen

Im folgenden sind die Diagramme abgebildet, die nicht direkt im Hauptteil verwendet wurden. Ihre Inhalte sind bereits in die Betrachtungen der Analyse eingeflossen. Daher werden sie nur kurz beschrieben und wesentliche Abweichungen aufgezeigt.



Kosten Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Deckenfläche

Die niedrigen Kosten, ähnlich wie beim Wohngebäude, resultieren aus der optimalen Ausnutzung der Baustoffe. Trotzdem kann im Vergleich zur STB-Elementdecke kein Vorteil realisiert werden. Gegenüber Holzdecken sind aber klare Minderkosten zu erkennen.

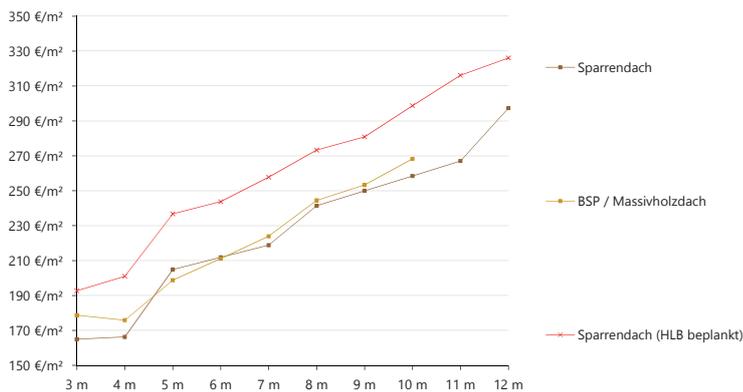


Kosten Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Deckenfläche

Der Einsatz von Holzleichtbeton führt hier zu Mehrkosten, die in den Preisen für die HLB-Platten begründet sind. Auch eine Kurzanalyse einer Variante mit weniger HLB und mehr BSP- und Beton-Anteilen lieferte gleiche, oder schlechtere Resultate.

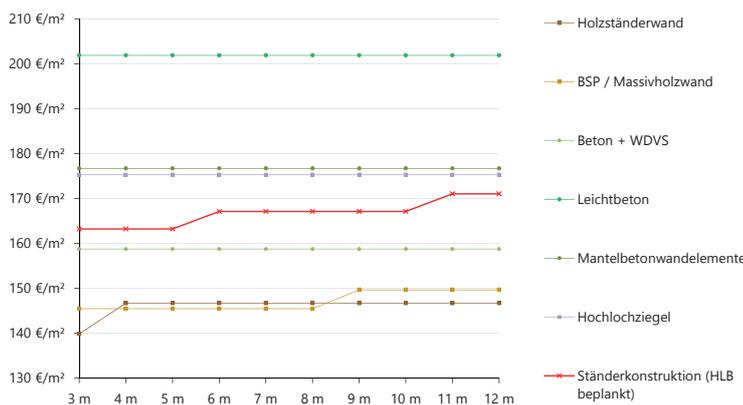
9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN



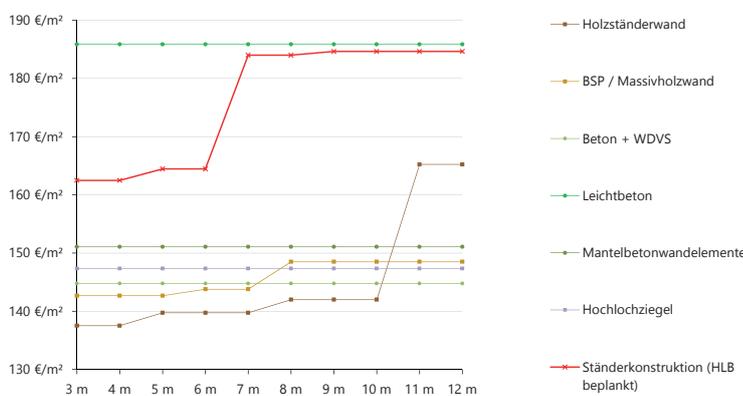
Kosten Wohngebäude pro Quadratmeter Dachfläche

Klar erkennbar ist der beinahe parallele Verlauf der Graphen der Sparrendächer. Aufgrund der höheren Lasten kommt es zu geringfügig besseren Resultaten für das Massivholzdach als beim EF-RH.



Kosten Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Wandfläche

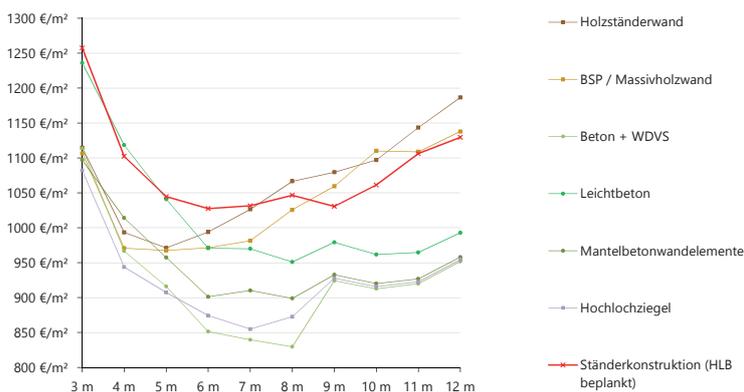
Die Graphen sind sehr konstant über die verschiedenen Spannweiten, da die Lasten stets in einem vergleichsweise niedrigen Bereich sind. Aufgrund des höheren Gewichts der Konstruktion mit HLB müssen stärkere Querschnitte, mit höheren Kosten herangezogen werden.



Kosten Wohngebäude pro Quadratmeter Wandfläche

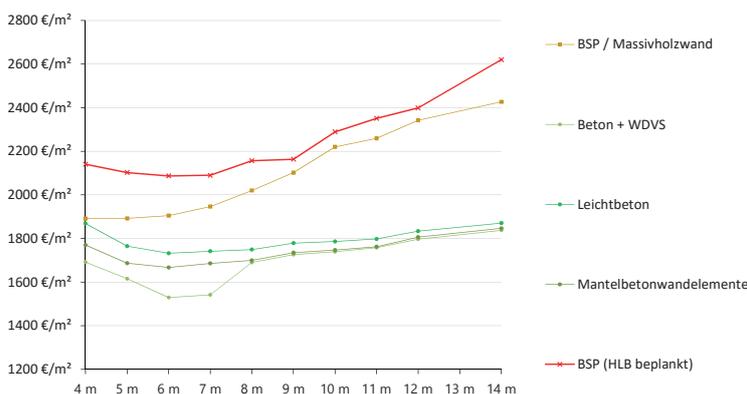
Der sprunghafte Anstieg der Kosten bei den Ständerwandsystemen ist mit dem Einsatz von Brettschichtholz zu erklären. Auch hier erkennt man, dass bei weniger Lasten aus den Decken schon ein höher tragfähiges System gewählt werden muss, aufgrund der Lasten aus der HLB-Beplankung.

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN



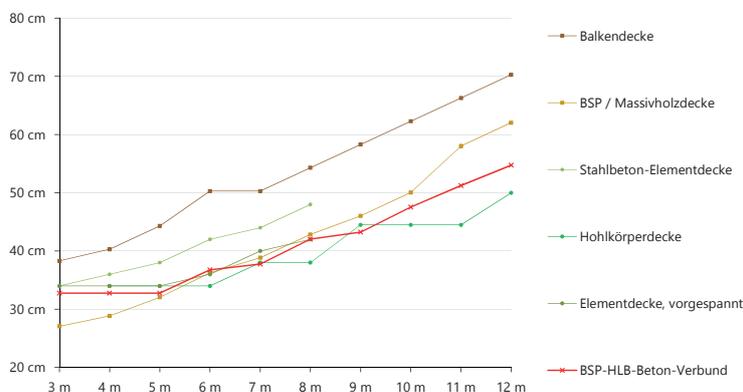
Kombinierte Kosten Wohngebäude pro Quadratmeter Grundfläche

Obwohl der Verlauf der Graphen über die Spannweiten ähnlich ist zu jenem beim EF-RH ist die Streuung doch stärker. Vor allem bei den Spannweiten ab 10 Metern treten die Unterschiede deutlich hervor. Das liegt auch am Betondeckensystem, da hier nur noch Hohlkörperdecke betrachtet werden.



Kombinierte Kosten Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Grundfläche

Der Abstand der HLB-Konstruktion zu den anderen Bauweisen manifestiert sich bei hohen Belastungen besonders deutlich. Vor allem die besonders günstige Hohlkörperdecke ist äußerst konkurrenzfähig.

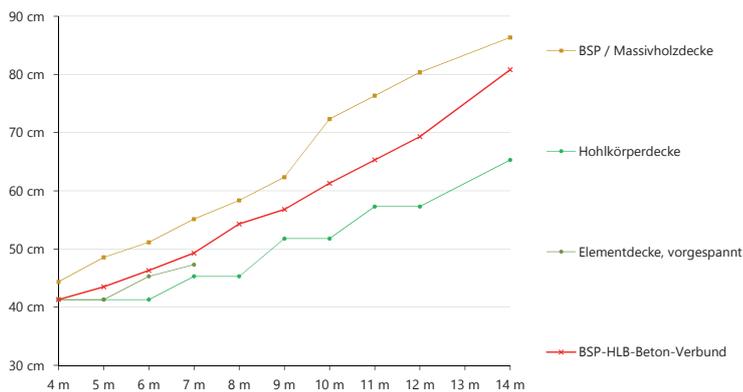


Deckenstärke Wohngebäude

Die Relation der Systeme untereinander, sowie deren Verlauf sind sehr ähnlich zu den Ergebnissen des EF-RH. Je mehr Belastung die Systeme zu tragen haben, desto klarer ist der Vorteil der BSP-HLB-B-Verbunddecke.

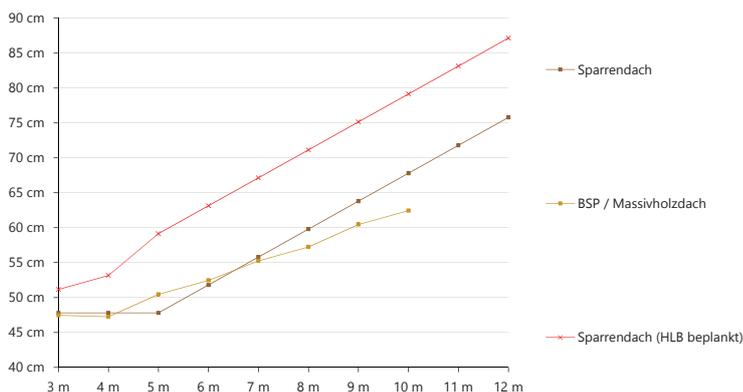
9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN



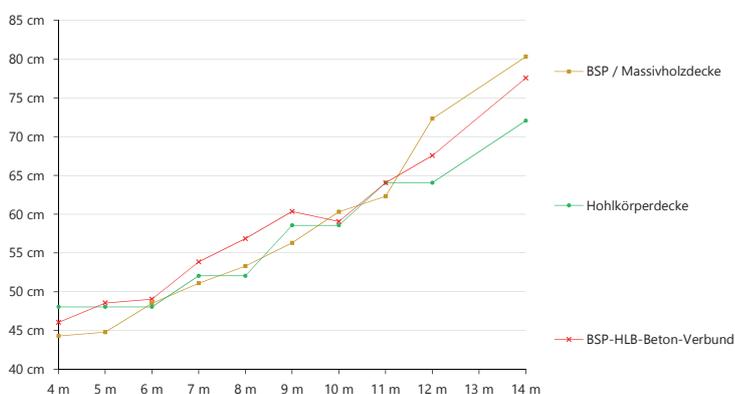
Deckenstärke Gewerbe-/Bürogebäude

Bei sehr hohen Belastungen kann der HLB-Verbund nicht mit der Leistungsfähigkeit der Hohlkörperdecke mithalten. Dennoch ist ein klarer Vorteil gegenüber herkömmlichen Massivholzdecken zu erkennen.



Dachdicke Wohngebäude

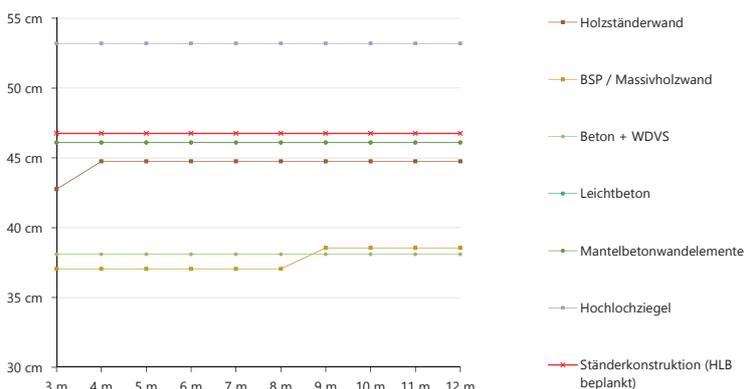
Aufgrund des geforderten U-Werts ist wesentlich die Tragkonstruktion für die Dicke der Sparrendächer verantwortlich. Dies ist gekennzeichnet durch den linearen Anstieg. Gleichzeitig können dadurch mit dem Massivholzdach teilweise geringe Stärken realisiert werden.



Dachdicke Gewerbe-/Bürogebäude

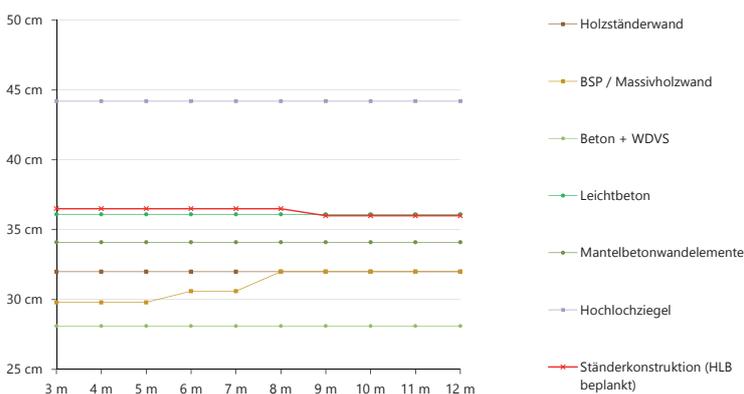
Der Einsatz von Holz und HLB in der Decken-Tragkonstruktion führt zu besseren Dämmwerten dieser und ermöglicht eine Reduzierung der Dämmstoffdicke. Im Idealfall gelingt damit sogar eine geringe Dachdicke als mit dem hochleistungsfähigen Hohlkörpertragwerk.

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN



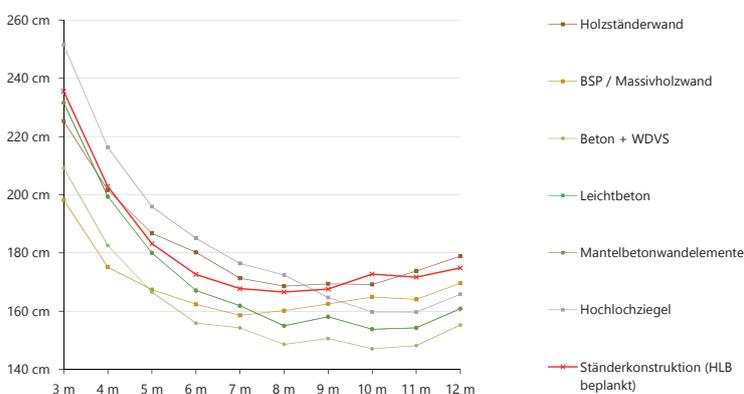
Wandstärke Einfamilien-Reihenhaus

Die Dämmleistung des HLB ersetzt nur geringe Teile der Wärmedämmung, weshalb diese zusätzlichen Schichten zu einer insgesamt höheren Bauteildicke führen.



Wandstärke Wohngebäude

Bei der Belastung durch eine Deckenspannweite von 9 Metern ist ein geringer Rückgang der Wandstärke des HLB-Systems zu bemerken. Dieser ist bedingt durch eine Reduzierung der HLB-Platte aufgrund der Ständermaße und der Dämmstoffdicke.

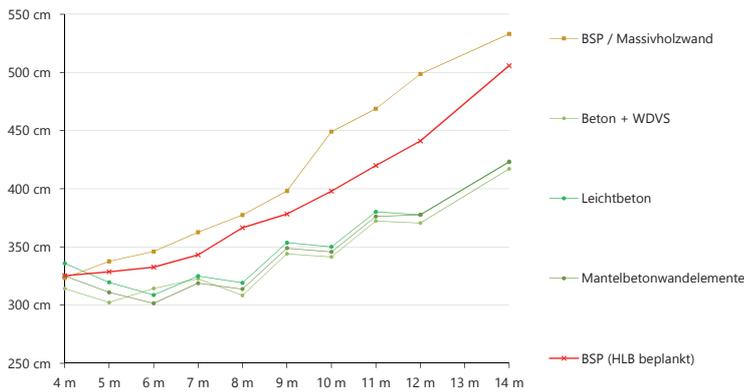


Kombinierte Bauteildicke Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Grundfläche

Die HLB-Bauweise ist relativ dick, was durch die Wand und Dachsysteme und den relativ geringen Anteil des Deckensystems beim EF-RH bedingt ist. Dadurch ist auch die geringe Streuung der Ergebnisse untereinander zu erklären.

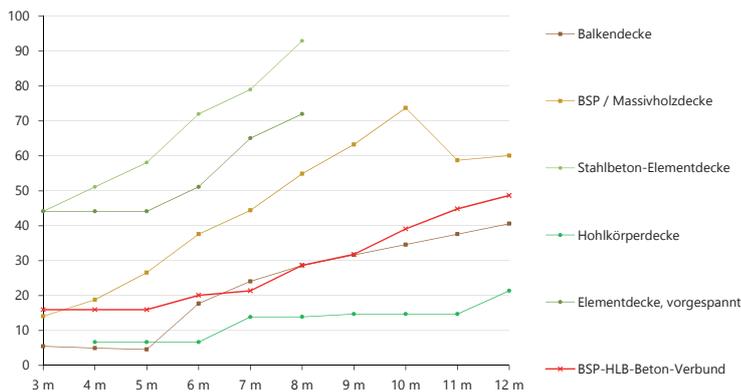
9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN



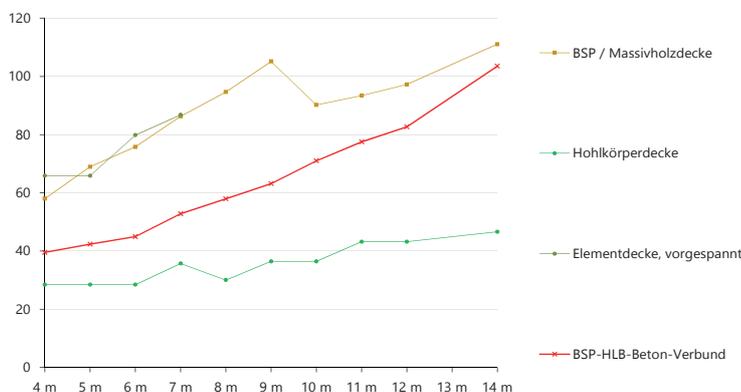
Kombinierte Bauteildicke Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Grundfläche

Die Wahl des Wandsystems hat wenig Auswirkungen auf die gesamte Dicke der Bauweise bei den STB-Systemen. Gleichzeitig ist der Verlauf der Graphen sehr ähnlich zu jenen der Deckenkonstruktionen.



Punkte lt. OI3 Wohngebäude pro Quadratmeter Deckenfläche

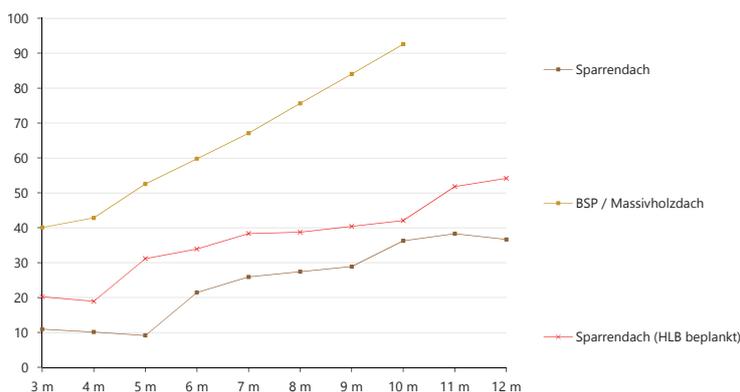
Ein ähnlicher Verlauf, wie beim EF-RH mit guten Ergebnissen für das HLB-System.



Punkte lt. OI3 Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Deckenfläche

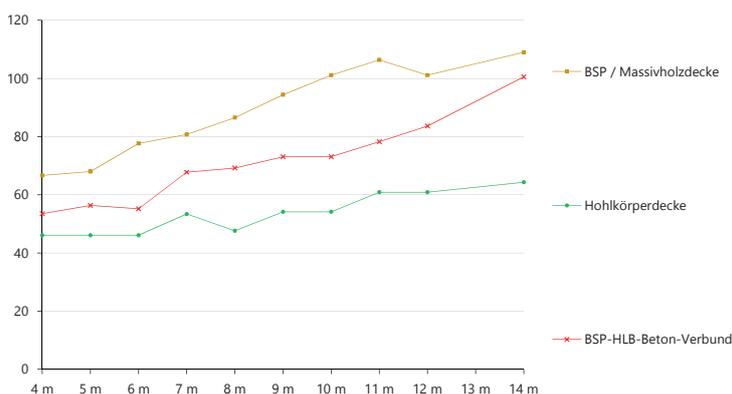
Aufgrund des höheren Materialeinsatzes und der verschiedenen Verarbeitungs- und Verbindungsprozesse fällt insgesamt die Bilanz des HLB-Verbundes teils deutlich schlechter aus als jene der quasi einschichtigen Hohlkörperdecke.

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN



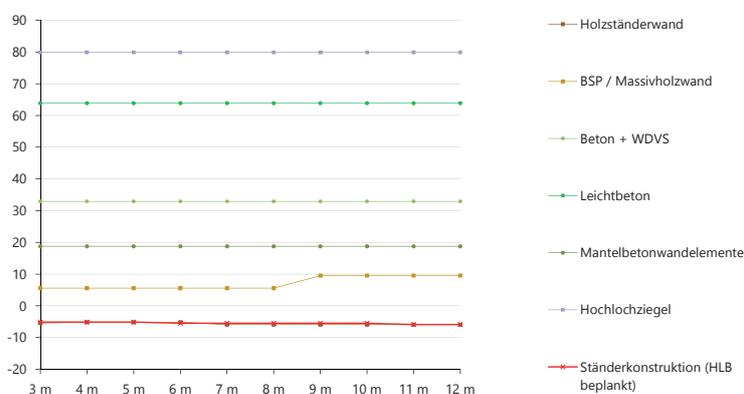
Punkte lt. OI3 Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Dachfläche

Im Vergleich zum Wohngebäude sind die Ergebnisse geringfügig klarer differenzierbar, da ein wenig mehr die Konstruktion als die Dämmleistung im Vordergrund steht.



Punkte lt. OI3 Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Dachfläche

Ähnlich wie bei der Decke führt auch beim Dach der höhere Materialeinsatz zu schlechteren Resultaten des HLB. Durch die Kompensation des Dämmstoffes fällt die Differenz allerdings wesentlich schwächer aus.

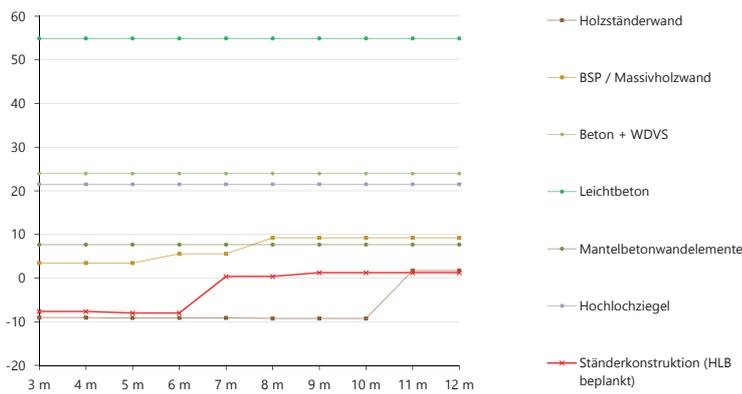


Punkte lt. OI3 Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Wandfläche

Das überdurchschnittlich gute Ergebnis des HLB-Systems ist vorrangig auf die Holzständerkonstruktion zurückzuführen. Gleichzeitig kompensiert der HLB direkt die Einsparung bei der Glaswolle-Dämmung.

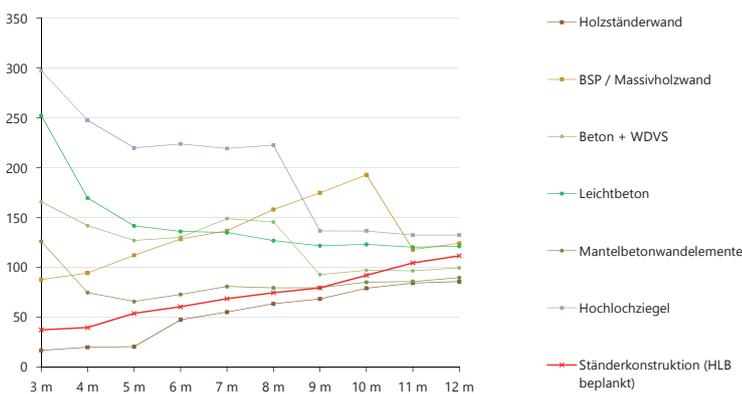
9 ANHANG

9.1 VORGEHENSWEISE ZUR GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUWEISEN



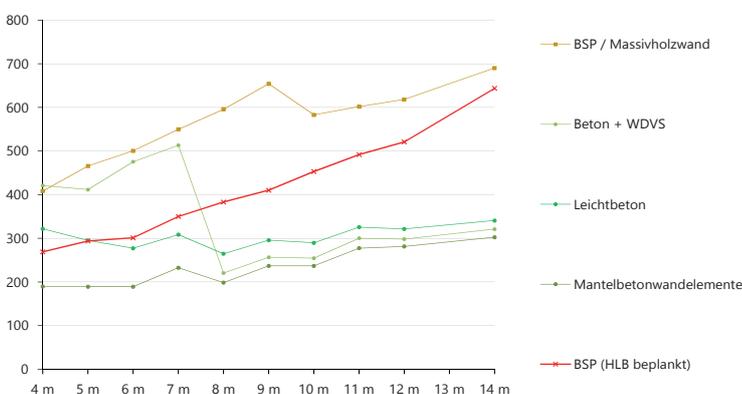
Punkte lt. OI3 Wohngebäude pro Quadratmeter Wandfläche

Die sprunghafte Verschiebung der Bewertungsergebnisse bei den Ständerwerken erfolgt analog zum Einsatz von Brettschicht- anstelle von Konstruktionsvollholz. Dabei verlangt der Einsatz von HLB eher schon bei geringeren Nutzlasten nach BSH.



Kombinierte Punkte lt. OI3 Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Grundfläche

Konstant gute Ergebnisse bei Decken und Wänden führen beim EF-RH und dessen geringen Lasten auch in der Kombination zu einer guten Ökobilanz.



Kombinierte Punkte lt. OI3 Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Grundfläche

Im Vergleich zu den anderen beiden Gebäudetypen ist das Abschneiden des HLB-Systems hier besonders bei hohen Belastungen schlecht. Dennoch lieferte es eine bessere Leistung als das konventionelle Massivholzsystem.

9.2 BERECHNUNG HOLZLEICHTBETONDECKE

Bei der Berechnung der Werte für die Holzleichtbetondecke mit Holz-Zugbewehrung wurde gleich vorgegangen wie bei der vorhergehenden Analyse der verschiedenen Baukonstruktionen. Für den vor Ort hergestellten Holzleichtbeton und die Verschraubung lagen allerdings keine Kostenwerte vor. Diese wurden wie folgt ermittelt:

- HBV-Schrauben: Kosten lt. Pipoh [22, S. 164] und laut BKI [55] LB 013 Nr. 133 Stundensatz Helfer Betonbau, 10,30€/m²
- Holzleichtbeton in Ortbetonausführung:
Zeitaufwand lt. [55] LB 013 Nr. 53, 0,80 h/m³
Kosten für Herstellung laut Zeitaufwand und [55] LB 013 Nr. 133 Stundensatz Facharbeiter Betonbau, 36€/m³

Materialaufwand nach Mischung Agreslith C laut Marktrecherche:

Zement 300kg CEM II 32,5 R: 40,50€

Holzfaseraggregat 20 Säcke: 136€

Wasser 180l: 0,17€

Gesamt Materialaufwand 176,67€/m³

Gesamtaufwand Holzleichtbeton in Ortbetonausführung: 212,67€/m³

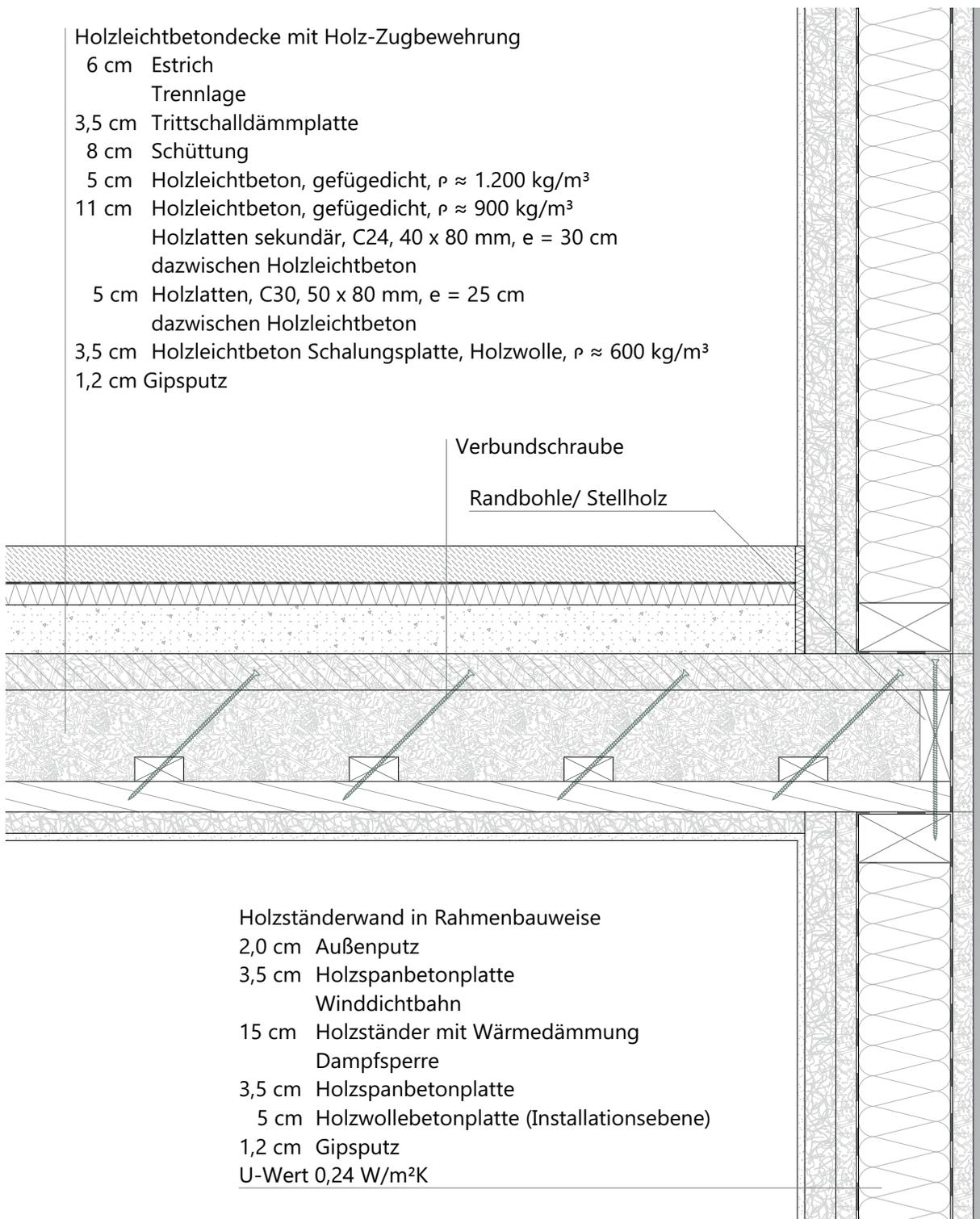
Die sonstige Berechnung erfolgte analog zur Analyse und ergab die folgenden Werte.

<i>Holzleichtbetondecke mit Holz-Zugbewehrung</i>							
Estrich	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 14,00	111,3 MJ	13,3 kg	0,025 kg	9,26
Trennschicht (PE)	0,05 cm		€ 1,00	27,5 MJ	0,9 kg	0,003 kg	1,51
Trittschalldämmplatte	3,00 cm	0,02 kN/m ²	€ 3,00	43,7 MJ	3,9 kg	0,029 kg	5,95
Schüttung, zementgebunden	6,00 cm	0,27 kN/m ²	€ 9,32	59,4 MJ	8,4 kg	0,021 kg	6,14
Konstruktion, Beton	5,00 cm	1,05 kN/m ²	€ 6,50	66,8 MJ	10,0 kg	0,019 kg	6,42
Konstruktion, HLB	15,00 cm	0,99 kN/m ²	€ 39,13	306,3 MJ	-42,5 kg	0,121 kg	19,31
Konstruktion, Holzlatten	5,00 cm	0,07 kN/m ²	€ 13,58	4,5 MJ	-2,7 kg	0,002 kg	-0,07
Schalungsplatte	3,50 cm	0,16 kN/m ²	€ 14,81	4,3 MJ	-0,1 kg	0,001 kg	0,24
Verbundschrauben			€ 10,30	0,6 MJ	0,0 kg	0,000 kg	0,04
GKF-Platte, einfach	1,25 cm	0,10 kN/m ²	€ 23,00	39,4 MJ	1,8 kg	0,005 kg	2,32
Verbindungsmitel (Ann. 80 Stk./m ²)				3,3 MJ	0,2 kg	0,001 kg	0,27
Summe	43,80 cm	3,71 kN/m²	€ 134,64	667,0 MJ	-6,7 kg	0,227 kg	15,06

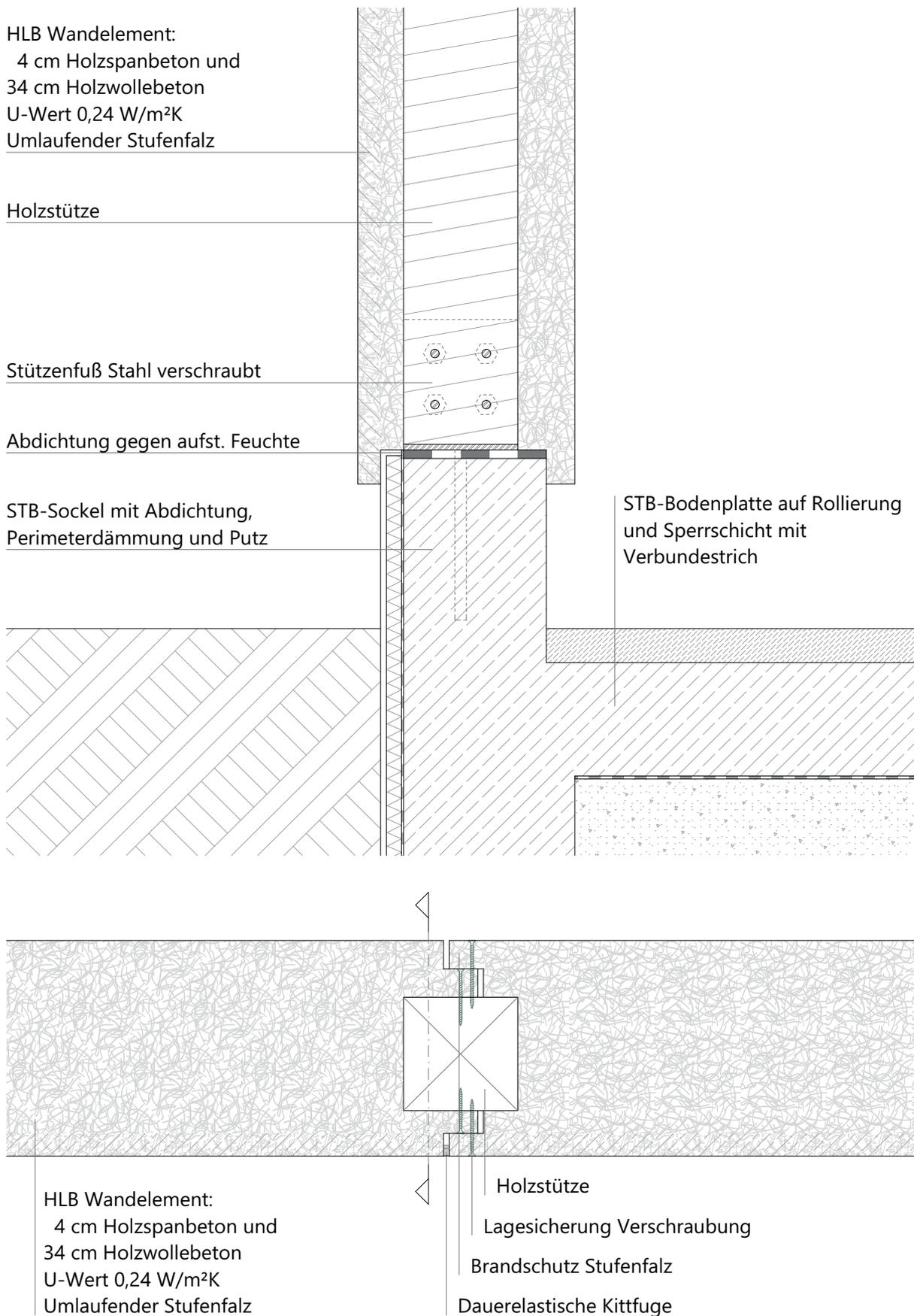
9.3 DETAILS FÜR DIE VORGESTELLTEN KONSTRUKTIONEN

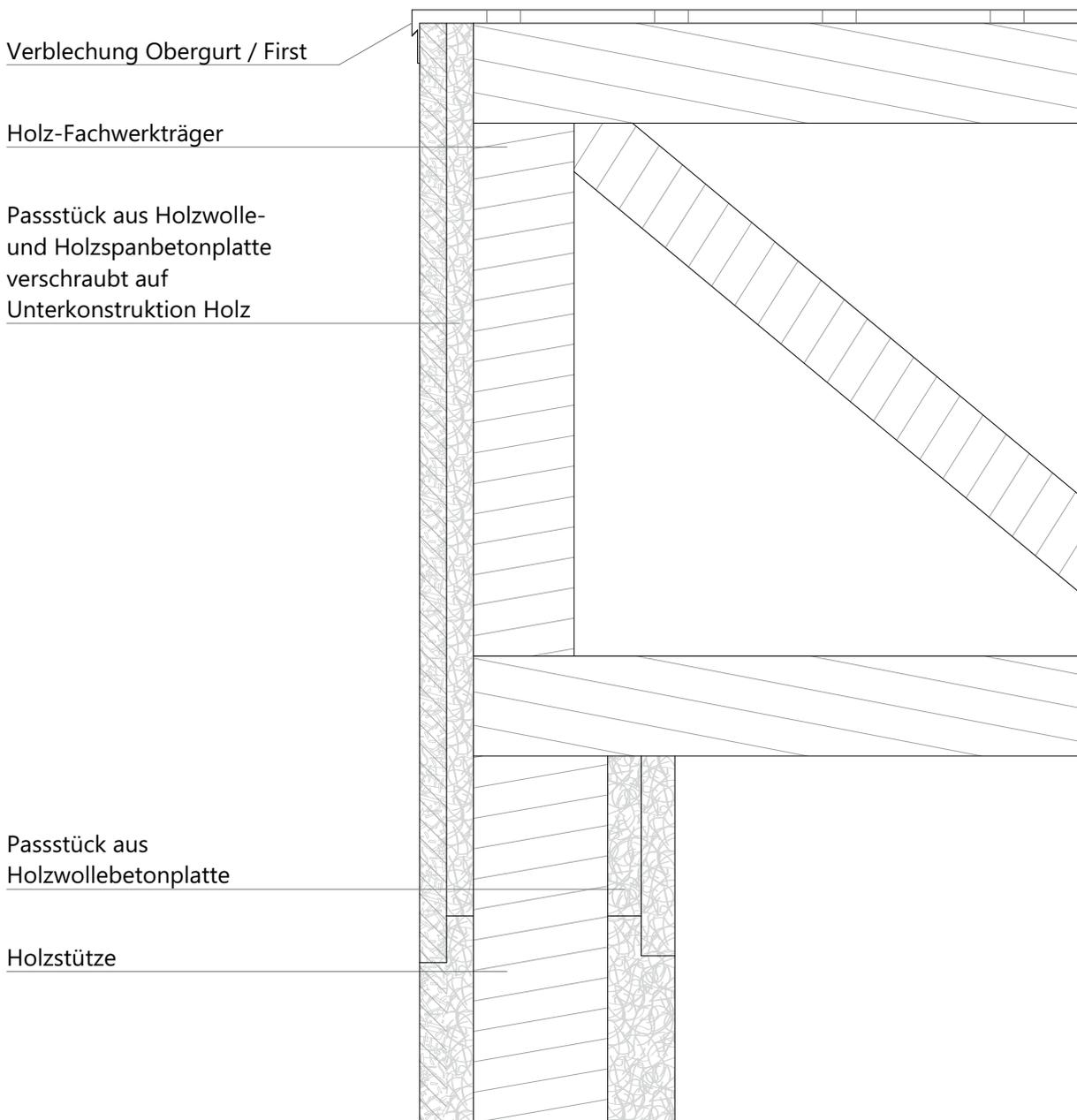
Neu entwickelte Konstruktionen verlangen neben ihrer generellen Konzeption auch die Betrachtung von Anschlüssen zu anderen Bauteilen um Ihre Sinnhaftigkeit zu beweisen. Gezeigt werden daher nachfolgend Details zu den im Kapitel 5 vorgestellten HLB-Bauweisen.

9.3.1 HLB-Decke mit Holz-Zugbewehrung, Anschluss an Holzrahmenbau



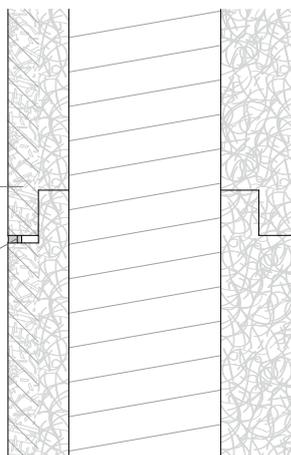
9.3.2 HLB-Wandelement für Hallenbau - Sockel, Elementstoss und Dach



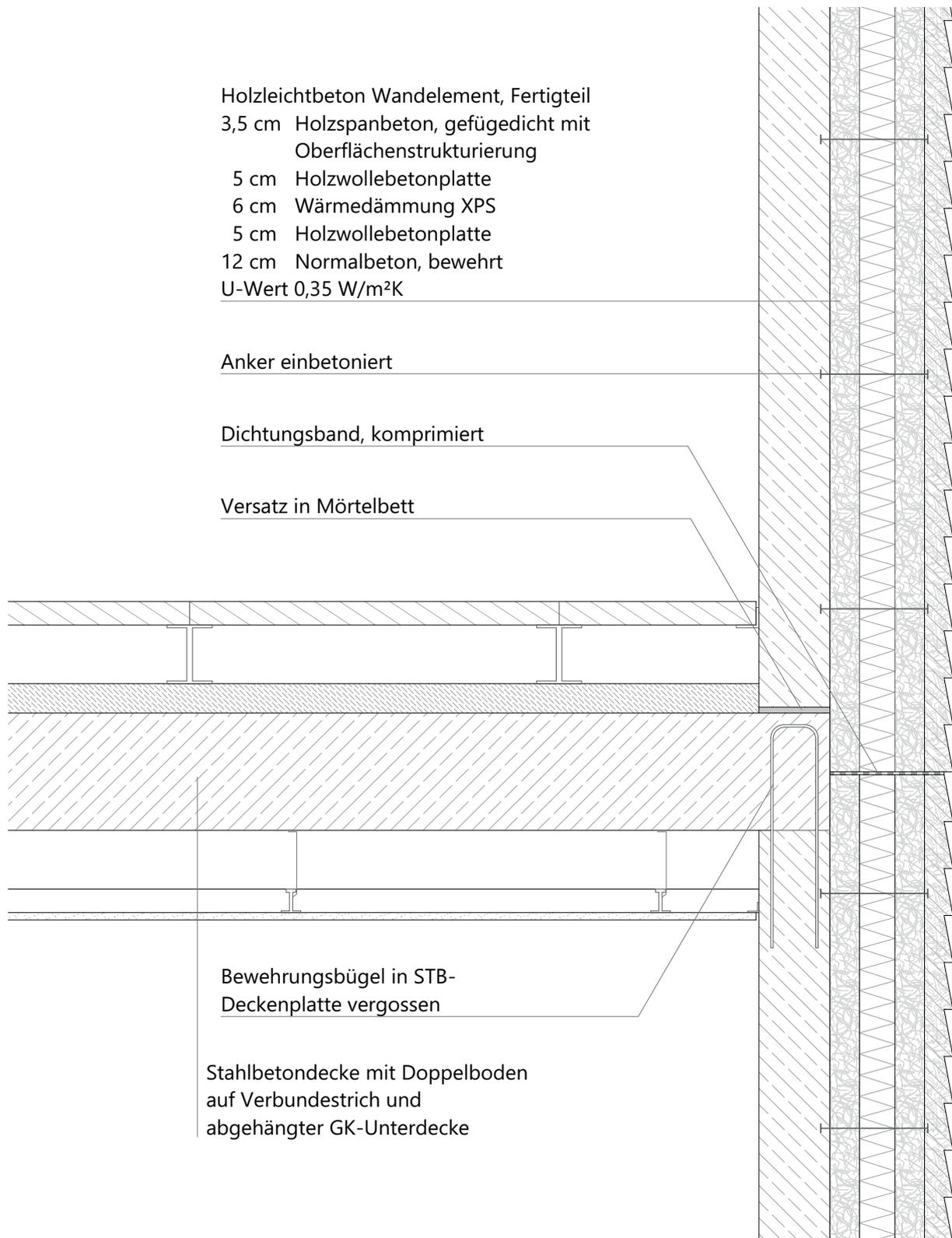


HLB Wandelement:
4 cm Holzspanbeton und
34 cm Holzspanbeton
U-Wert 0,24 W/m²K
Umlaufender Stufenfalz

Dauerelastische Kittfuge

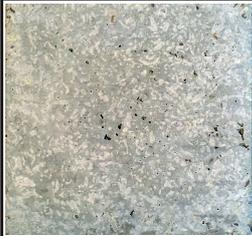


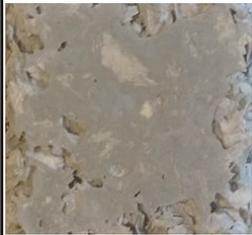
9.3.3 HLB-Wandelement für Bürobau - Deckenanschluss



9.4 REZEPTUREN HOLZLEICHTBETON FÜR VERSUCHE

Im Folgenden sind die Rezepturen der verschiedenen Mischungen für den Machbarkeitsnachweis angeführt, wie sie im Kapitel 6 besprochen wurden.

Rezeptur HLB-Mischung I						
Holzspäne, Zement & Wasser						
Bemerkungen: Gesucht wurde eine Rezeptur, die sich gut verarbeiten lässt, die Ecken und Kanten der Schalungsform gut ausfüllt und eine glatte geschlossene Oberfläche generiert. Gleichzeitig sollte ein hoher, sichtbarer Holzanteil vorliegen. Anforderungen an die Druckfestigkeit bestanden nur insoweit, dass das Material stabil ist, aber keinen Belastungen im Hinblick auf eine Druckfestigkeitsprüfung standhalten muss. An die Wärmedämmeigenschaften wurden keine Anforderungen gestellt.						
RF	Ausführung	Produkt	Holzart	Menge		Erzieltes Volumen
				Trocken	Nass	
1	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N WT 38	Der Schwarze - Lafarge	-	500 g		1350 cm ³
2	Wasser	TW-Wien	-		180 g	
3	Holzspäne	Alpenspan	Fichte	141 g	793 g	
Anmerkungen: Einem Drittel der Mischung wurden 25g des Pigments Eisenoxidgelb zugefügt.						
Verarbeitung: Die Masse wurde händisch gemischt und verdichtet.						
Erzielte Kennwerte				Schalungsseite	Ungeschalte Seite	
Frischbetondichte	720 kg/m ³					
Dichte (Probekörper)						
W/Z-Wert	0,36					

Rezeptur HLB-Mischung II						
Holzspäne, Holzhackschnitzel, Zement & Wasser						
Bemerkungen: Die Ziele dieser Rezepturen waren die Selben, wie jener der vorhergehenden. Es sollten allerdings zusätzlich gröbere Holzspäne integriert werden um eine andere Oberflächenstruktur zu erhalten. Dafür wurde das Verhältnis von gesamten Holzzuschlag Nass zu Zement beibehalten.						
RF	Ausführung	Produkt	Holzart	Menge		Erzieltes Volumen
				Trocken	Nass	
1	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N WT 38	Der Schwarze - Lafarge	-	900 g		2372 cm ³
2	Wasser	TW-Wien	-		330 g	
3	Holzspäne	Alpenspan	Fichte	216 g	1208 g	
4	Holzhackschnitzel	Eigenproduktion	Fichte	140 g	185 g	
Anmerkungen:						
Verarbeitung: Die Masse wurde händisch gemischt und verdichtet.						
Erzielte Kennwerte				Schalungsseite	Ungeschalte Seite	
Frischbetondichte	750 kg/m ³					
Dichte (Probekörper)						
W/Z-Wert	0,37					

Rezeptur HLB-Mischung III						
Holzwolle, Zement & Wasser						
Bemerkungen: Es sollte eine Holzwollebetonmischung hergestellt werden, die durch ihre offene Struktur Luftporen bildet und als Wärmedämmmaterial fungiert. Dabei sollte die Festigkeit ausreichend sein um die Verbindung der restlichen Bauteilschichten zu gewährleisten und trotz den Lasten des Normalbetons eine offene Struktur zu erhalten. Aufgrund der guten Resultate der vorhergehenden Mischungen im Hinblick auf die Bedeckung der Holzanteile mit Zement wurde ein ähnliches Verhältnis zwischen Holz und Zement gewählt.						
RF	Ausführung	Produkt	Holzart	Menge		Erzieltes Volumen
				Trocken	Nass	
1	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N WT 38	Der Schwarze - Lafarge	-	600 g		5766 cm ³
2	Wasser	TW-Wien	-		200 g	
3	Holzwolle			150 g	900 g	
Anmerkungen:						
Verarbeitung: Die Masse wurde händisch gemischt. Es fand keine direkte Verdichtung statt						
Erzielte Kennwerte			Schalungsseite		Ungeschalte Seite	
Frischbetondichte	274 kg/m ³					
Dichte (Probekörper)						
W/Z-Wert	0,33					

Rezeptur HLB-Mischung III						
Sand, Kies, Zement & Wasser						
Bemerkungen: Es wurde ein Normalbeton hergestellt. Als Zuschlag wurden kleine Korngrößen gewählt, da nur eine dünne Schicht für den Probekörper vorgesehen wurde. Das Verhältnis von Zuschlag zu Zement beträgt 1:4, wobei das Verhältnis von Sand zu Kies 1:1 beträgt. Es wurden keine besondere Anforderungen an die Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit oder Oberflächenstruktur gestellt.						
RF	Ausführung	Produkt	Holzart	Menge		Erzieltes Volumen
				Trocken	Nass	
1	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N WT 38	Der Schwarze - Lafarge	-	1500 g		4325 cm ³
2	Wasser	TW-Wien	-		600 g	
3	Kies			3000 g		
4	Sand			3000 g		
Anmerkungen:						
Verarbeitung: Die Masse wurde händisch gemischt und verdichtet. Der Glattstrich erfolgte mit einer Kelle.						
Erzielte Kennwerte			Schalungsseite		Ungeschalte Seite	
Frischbetondichte	1556 kg/m ³					
Dichte (Probekörper)						
W/Z-Wert	0,40					

10. VERZEICHNISSE

10.1. LITERATURVERZEICHNIS

[1] Marcus Vitruvius POLLIO (1. Jhdt. v. Chr.), Franz REBER (1865), De architectura libri decem / Zehn Bücher über Architektur, Marixverlag GmbH, Wiesbaden (2009)

[2] Roland KRIPPNER (2004), Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden, Dissertation an der technischen Universität München, Institut für Entwerfen und Bautechnik, München

[3] Waltraud STÖLLINGER (2013), Ansätze zu einer nachhaltigen Architektur am Beispiel Holzspanbeton, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie, Wien

[4] G. J. VAN ELTEN, ELTOMATION BV (2006), Report of the 10th Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference, Beitrag Session 7, 4. Vortrag: Produktion of wood wool cement board and wood strand cement board (Eltoboard) on one plant and applications of the products, IIBCC, São Paulo, http://www.iibcc.biz/wp-content/uploads/2015/11/iibcc_o7-3.pdf (28.06.2016)

[5] UNBC Wood Concrete Marketing Team, Sorin PASCA, Ron THRING, Ian HARTLEY, Sungchul CHOI, Alex NG, Mountain Pine Beetle Wood Concrete, UNBC University of northern british columbia, Prince George, <http://www.unbc.ca/wood-concrete> (13.03.2016)

[6] Hans-Wolf REINHARDT (2010), Ingenieurbaustoffe, 2. Auflage, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin

[7] Martin HÖBARTH (2006), Holzzahlen Vorrat, Verbreitung und Aufkommen von Baumarten in Österreich, Zuschnitt Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz, Sechster hrgang, Nr.23, proHolz Austria

[8] Redaktioneller Beitrag (2013), Der österreichische Wald, Zuschnitt Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz, Dreizehnter Jahrgang, Nr.51, proHolz Austria

[9] Johannes PREM, Raphaela BEER (2016), Holzeinschlagsmeldung über das Kalenderjahr 2015 (in Erntefestmetern ohne Rinde -EFM O.R.), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

[10] Andrea STEINEGGER, Margot SCHATZL (2016), Branchenbericht 2015, Fachverband der Holzindustrie Österreichs, Wien

[11] Alfred TEISCHINGER, Robert STINGL, Viktoria BERGER und Alexander EDER (2015), Studie für pro:Holz Austria, Erhebung des Holzbauanteils aller österreichischen Bauvorhaben, Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, Department für Material - wissenschaften und Prozesstechnik, Universität für Bodenkultur, Wien

[12] U. SCHNEIDER, Heinrich BRUCKNER, Monika OSWALD, Hubert KIRCHBERGER (2012), Wiener Baustofflehre Blätter: Bindemittel, 21. Auflage, E. Bölskey, H. Bruckner, TU Wien Institut 206-1, Wien

- [13] ÖNORM EN 197-1:2011 10 15, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- [14] WOPFINGER Baustoffindustrie GmbH (2016), SLAGSTAR, Technische Unterlagen, Waldegg/Wopfing, http://www.slagstar.at/front_content.php?idcat=857 (02.03.2016)
- [15] Felix FRIEMBICHLER, Frank HUBER, Sebastian SPAUN, Johannes STEIGENBERGER, Ursula JUS, Cathérine STUZKA (2012) Die Zementerzeugung in Österreich, 4.Auflage, Zement+Beton Handels- und Werbeges.m.b.H im Auftrag der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Wien
- [16] F. C. JORGE, C. PEREIRA, J. M. F. FERREIRA (2004) Wodd-cement composites: a review, Holz als Roh und Werkstoff: European journal of wood and wood products, 62. Auflage, Ausgabe 5, Seite 370-377, Springer Verlag, Berlin
- [17] ETERNIT Aktiengesellschaft (2013), Eternit Holzzementplatten DURIPANEL Planung und Anwendung, Ausgabe 03, Heidelberg, http://www.eternit.de/downloads/downloads/dl/file/id/227/eternit_ausbau_pa_duripanel_2009.pdf (29.06.2016)
- [18] Christoph RADLHERR (2015), Brandverhalten von Holz-Beton Verbundkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung zementgebundener Platten aus Holzleichtbeton: experimentelle und numerische Untersuchungen, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Architekturwissenschaften, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Wien
- [19] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit - Referat Bauingenieurwesen, Nachhaltiges Bauen, Bauforschung (2016), ÖKOBAUDAT, Berlin, <http://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html> (29.06.2016)
- [20] Katharina POMBERGER (2015), Ressourceneffiziente Bauweise am Beispiel von Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Architekturwissenschaften, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Wien
- [21] FirmenABC Marketing GmbH (2016), Firmendatenbank auf Grundlage von Daten von Wirtschaftsauskunftei Creditreform, Eugendorf, <http://www.firmenabc.at/> (29.06.2016)
- [22] Marcus-Alexander PIPOH (2015), Holzleichtbeton-Verbundelemente: wirtschaftliche Studien, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Architekturwissenschaften, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Wien
- [23] Alexander STÄHL (2011), Cement-bonded wood composite as structural element in internal walls, Diplomarbeit an der Luleå university of technology, department of civil, environmental and natural resources engineering, Luleå / Wien
- [24] Knauf Insulation GmbH (2015), Heraklith, Broschüre Tiefgaragen und Technikräume sicher Dämmen, Fürnitz, http://www.knaufinsulation.at/sites/at.knaufinsulation.net/files/Broschuere_Tiefgaragen-Technikraeume_03-2014_Update-07-2015_web.pdf (21.03.2016)
- [25] baubook GmbH, Energieinstitut Vorarlberg, IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie (2016), baubook Ökoindex-Plattform, Dornbirn / Wien, <https://www.baubook.at/oekoindex/> (30.06.2016)

[26] Frank RÖSER (2010), Analyse verschiedener Einflussfaktoren auf die Betondruckfestigkeit von Holzbeton aus industriell gefertigten Holzspänen, Diplomarbeit an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Massivbau, Darmstadt

[27] Kenneth SCHERNBERGER (2011), Holzspanbeton-Verbunddecken: Übersicht bestehender Ansätze sowie Entwicklung und Versuche mit handelsüblichen Holzspänen, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie, Wien

[28] Agresta Technologies (2015), Agreslith-C A mineralized wood aggregate, technische Dokumentation, Pouxieux, <http://www.agresta.fr/en/construction/8-agreslith-c-wood-aggregate-for-lightweight-concrete.html> (16.08.2015)

[29] Redaktioneller Beitrag (2015), Beton so leicht wie Holz, Prof. Dr. Roland Krippner über Holzleichtbeton, Betonlana Report, Architekten-Blog für Südtirol, Betonlana GmbH, Lana, <http://www.betonlana-report.com/beton-so-leicht-wie-holz/> (04.07.2016)

[30] Knauf AMF Deckensysteme GmbH (2016), Heradesign, Referenzen Produkte, Produktbild Heradesign, Ferndorf, <http://www.heradesign.com/heradesign-deutsch/> (04.07.2016)

[31] ILA Systembau (2016), Das ILA-System, Tragwerk, Neckarsulm, <http://www.ila-systembau.de/Das-ILA-System/> (06.07.2016)

[32] CIDEM Hranice a.s. (2016), CETRIS, Eigenschaften der Cetriz Platten, Hranice na Moravé, <http://www.cetris.cz/de/systeme/fusboden-systeme/platte-cetris-basic/> (06.07.2016)

[33] CEMWOOD GmbH (2016), CEMWOOD, Technologie, Eigenschaften, Magdeburg, <http://www.cemwood.de/de/technologie/mechanische-eigenschaften/> (06.07.2016)

[34] Walter STAMM-TESTE, Katja FISCHER, Jessica CHRISTOPH (2011), Experimentalbau green:house Projekterläuterung, Professur Entwerfen und Wohnungsbau, Bauhaus Universität Weimar, Weimar

[35] Toni BRANDAU (2013), Baudokumentation Experimentalbau green:house, Seminardokumentation an der Professur Entwerfen und Baukonstruktion, Bauhaus Universität Weimar, Weimar

[36] Friedrich KLEIN (2015), Telefoninterview mit Friedrich Klein, Prokurist/ technischer Leiter Betonwerke Knecht, Wien/ Metzingen

[37] Jessica CHRISTOPH (2015), Schriftliche Anfragebeantwortung durch Jessica Christoph, wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur Entwerfen und Wohnungsbau, Bauhaus Universität Weimar, Wien/ Weimar

[38] TRÄULLIT AB (2016), Träullit, About us, Österbymo, <http://www.traullit.se/en/about-us/> (07.07.2016)

[39] TRÄULLIT AB (2010), Träullit House - Well-insulated, homogeneous walls with short construction time, Informationsbroschüre, Österbymo

- [40] TRÄULLIT AB (2012), Husbyggnation med helväggselement (Wohnungsbau mit Mauerelementen), Informationsfilm, Österbymo, <http://www.traullit.se/video/byggnation-med-helvaggselement/> (07.07.2016)
- [41] Mattias RÜCKERT (2015), Schriftliche Anfragebeantwortung durch Mattias Rückert, Nike Architektur / Träullit, Wien/ Staffanstorp
- [42] TRÄULLIT AB (2008), Takkonstruktion av Träullit (Dachkonstruktion von Träullit), Informationsbroschüre, Österbymo
- [43] TRÄULLIT AB (2015), Byggvarudeklaration (Bauproduktdeklaration), Österbymo
- [44] Eltomation B.V. (2015), Our Products, Large WWC Wall Element Plant, Barneveld, <https://www.eltomation.com/eng/our-products/large-wwc-wall-element-plant> (08.07.2016)
- [45] Ernst Edelhart KIRCHMAYER (2012), Beitrag zur Entwicklung von Holz-Holzbeton-Betonverbunddecken, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie, Wien
- [46] Thomas HOFER (2013), Experimentelle und analytische Untersuchungen des Tragverhaltens von Holz-Holzleichtbeton-Sandwich-Deckenbauweisen, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Architekturwissenschaften, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Wien
- [47] Sepehr SETOODEH JAHROMY (2015), Beitrag zur Bemessung von Wandkonstruktionen in Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Architekturwissenschaften, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Wien
- [48] ÖNORM B 1991-1-1:2011 12 01, Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen
- [49] ÖNORM B 1991-1-3: 2013 09 01, Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten, Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1991-1-3, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen
- [50] ÖNORM B 1991-1-4: 2013 05 01, Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-4 und nationale Ergänzungen
- [51] Österreichisches Institut für Bautechnik (2015), OIB-Richtlinie 2, Brandschutz, OIB-330.2-011/15, Ausgabe März 2015, Wien
- [52] Österreichisches Institut für Bautechnik (2015), OIB-Richtlinie 5, Schallschutz, OIB-330.5-002/15, Ausgabe März 2015, Wien
- [53] Österreichisches Institut für Bautechnik (2015), OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz, OIB-330.6-009/15, Ausgabe März 2015, Wien

- [54] Verein Holzforschung Austria - Österreichische Gesellschaft für Holzforschung (2016), dataholz, Katalog bauphysikalisch und ökologisch geprüfter Holzbauteile, Wien, <http://dataholz.com/> (14.07.2016)
- [55] Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH (2016), BKI Baukosten 2016 Neubau - Statistische Kostenkennwerte für Positionen, BKI Baukosteninformationszentrum, Stuttgart
- [56] KNAUF INSOLATION (2015), Knauf Insulation Preisliste Hochbau Österreich 2016, Knauf Insolation GmbH, Fürnitz
- [57] STORA ENSO (2015), Preisliste CLT - Cross Laminated Timber 2016, Stora Enso Austria GmbH, Wien
- [58] OBERNDORFER (2015), Preisliste 2016, Franz Oberndorfer GmbH & CoKG, Gunskirchen
- [59] VELOX Bausysteme (2015), Produkt- & Systempreisliste 2016, Velox Werk GesmbH, Maria Rojach
- [60] STEICO (2016), Lieferprogramm und Preisliste 2016, Steico SE, Feldkirchen
- [61] ROHRDORFER (2015), RBW Beton in Perfektion - Preise 2015, RBW Rohrdorfer Betonwerke GmbH & Co. KG, Zeilarn
- [62] ASAMER (2015), Preislisten 2015, Asamer Kies- und Betonwerke GmbH, Ohlsdorf
- [63] WIENERBERGER (2015), Porotherm/ Terca Preisliste 2016, Wienerberger Ziegelindustrie GmbH, Hennersdorf
- [64] Alireza FADAI, Kamyar TAVOUSSI, Sladjana PETRUSIC (2015), Skriptum Tragwerkslehre Bemessungstabellen, Insitut für Architekturwissenschaften, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Technische Universität Wien, Wien
- [65] KLH Massivholz GmbH (2012), Vorbemessungstabellen, Version 01/2012, KLH Massivholz GmbH, Katsch an der Mur
- [66] OBERNDORFER (2015), Hans SPREITZER, decke. wand. fertigteilbau. - Produktkatalog, Franz Oberndorfer GmbH & CoKG, Gunskirchen
- [67] IBO (2016), Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, OI3-Indikatoren, Stand März 2016, Version 3.1, IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Wien
- [68] Ralf PLAG (2011), u-wert.net UG (2016), U-Wert-Rechner, Berechnung des Hitzeschutzes, u-wert.net UG, Forst, <https://www.u-wert.net/berechnung/u-wert-rechner/> (10.08.2016)
- [69] ETERNIT (2012), Duripanel, Technische Dokumentation, Eternit (Schweiz) AG, Niederurnen, http://www.swisspearl.ch/Medien/Produkte/Interior/TechnischeDokus/Duripanel_Doku_de.pdf (19.08.2016)

[70] HERAKLITH, EMOT'ON (2006), Die Heraklith Kompaktbauweise mit Tonputz, Technische Information, Heraklith AG & EMOT'ON Ton- Innenputze GmbH und Aktiv-Innenausbau-system, Fürnitz & St. Veit im Mühlkreis, http://www.oekohaus.net/images/Qualinetzwerk/Downloads/Innenputz-EMOTON_07-2006_A.pdf (18.08.2016)

[71] Klaudius HENKE, Daniel TALKE (2016), Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben: Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, München

[72] REPOXIT (2005), ABC Steinholz-Belag, Informationsbroschüre mit technischen Daten, Repoxit AG, Winterthur

[73] CELENIT (2006), Determinazione del potere fonoisolante di un elemento in laboratorio secondo la norma uni EN ISO 140-3 (Bestimmung der Schallreduzierung eines Elements nach der Norm EN ISO 140-3), Prüfzeugnisse der Messungen des Schalldämmmaßes, Durchgeführt an der Fakultät für Ingenieurwesen der technischen Universität Padua, Celenit Spa, Padua

[74] Albert SEILER (2016), Interview mit Albert Seiler, Firmenpräsentation Knauf Insulation, Arnwiesen

[75] Michael GASSER (2004), Deponierung und Verwertungsmöglichkeiten von magnesitgebundener Holzwohle, Diplomarbeit an der Universität Graz, Institut für Innovations und Umweltmanagement, Graz

[76] Wilhelm SCHOLZ, Wolfram HIESE (2007), Baustoffkenntnis, 16. Auflage, Werner Verlag, Köln

10.2. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Arbeitslinie und Vergleich Belastung zu Gewicht von Holz und Stahl Quelle: Grafik TS, Arbeitslinien: Harald EGGER, Hermann BECK, Peter MANDL (1996), Tragwerkselemente, das neue Grundlagenbuch zum Entwerfen von Bauteilen, mit 6 Tabellen, Teubner Verlag, Stuttgart (Seite 80f.)	5
Abb. 2: Benötigte Primärenergie und Treibhauspotenzial gebräuchlicher Baustoffe Quelle: Grafik TS, zugrundeliegendes Datenmaterial von baubook [25]	8
Abb. 3: Gewichts- und Volumenanteile der Ausgangsstoffe an Holzleicht- und Normalbeton Quelle: Grafik TS, Hintergrundbilder: Holzleichtbeton Krippner [2], Abbildung 8.24, Seite 156; Normalbeton BWN - NEUMÜLLER - GESTALTUNGSBETON (2016), Oberflächenmuster, Normalbeton grau, Haid, http://www.bwn.at/upload/content/Oberflaechen/Normalbeton-grau-gestrahlt1.JPG (22.09.2016); Mischungsdaten: Röser [26], Serie A58, Seite A-XVII	14
Abb. 4: Druck- und Zugfestigkeit in Relation zum Holzanteil am Gesamtgewicht der Mischung Quelle: Grafik TS, zugrundeliegendes Datenmaterial [2] und [26]	16

Abb. 5: Druckfestigkeit in Relation zum Holzanteil am Gesamtgewicht unter Zugabe von Sand Quelle: Grafik TS, zugrundeliegendes Datenmaterial [2], [26], [27] und [28]	17
Abb. 6: Druckfestigkeit in Relation zum Holzanteil am Gesamtgewicht unter Verwendung von Zusätzen Quelle: Grafik TS, zugrundeliegendes Datenmaterial [3] und [26]	17
Abb. 7: Gemittelte Werte der spezifischen Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der gemittelten Probedichte Quelle: Krippner [2] Abbildung 5.10, Seite 52	19
Abb. 8: Beispielhafte Modellierung der Oberfläche; a Wellenförmig; b Vor- und Rücksprünge; c organisierte Kleinsonderschalungsformen Quelle: a Krippner [2] Abbildung 10.4.1c, Seite 200; b Krippner [29]; c Stöllinger [3], Platte 6, Seite 212	20
Abb. 9: Beispielhafte Strukturierung der Oberfläche; a Späne grob; b Holzwolle fein; c beinahe geschlossen mit sichtbaren Einschlüssen Quelle: a Schernberger [27], Abbildung 95, Seite 58; b Heradesign [30]; c Stöllinger [3], Platte 12, Seite 225	20
Abb. 10: Beispielhafte Holzpartikelgrößen; a Späne gemischt; b Späne mittel; c Holzwolle fein; d Holzwolle grob Quelle: a Krippner [2], Abbildung 7.31, Seite 96; b Krippner [2], Abbildung 8.24, Seite 156; c Heradesign superfine [30], d Heradesign makro [30]	21
Abb. 11: Beispielhafte Farbigkeit; a Schwarz; b Blau; c Rot; d Weiß mit Rottönen Quelle: a Stöllinger [3], Platte 10, Seite 222; b Stöllinger [3], Platte 8, Seite 220; c Krippner [2], Abbildung 10.3.4c, Seite 199; d Stöllinger [3], Platte 7, Seite 216	21
Abb. 12: Produktionsstandort Ferndorf Quelle: Grafik TS, Kartenmaterial http://www.bing.com/maps/ (04.07.2016)	24
Abb. 13: Produktionsschritte Verarbeitung zu Holzwolle; a Zufuhr abgelängtes Material; b Rotationshobel; c Weitertransport Holzwolle Quelle: Knauf AMF Deckensysteme GmbH (2015), Heradesign Imagefilm, a Min. 1:14; b Min. 1:20; c Min. 1:25	25
Abb. 14: Pressen des Holzwolle-Magnesit-Wasser-Gemischs zwischen den Walzen der Bandformanlage Quelle: Knauf AMF Deckensysteme GmbH (2015), Heradesign Imagefilm, Min. 1:57	25
Abb. 15: Ringankerschalung aus Holzspanbetonplatten Quelle: VELOX Werk GesmbH (2016), Produkte, Mauerrost, http://www.velox.at/de/produkteleistungen/fertigschalungen/mauerrost/ (05.07.2016)	29
Abb. 16: Mantelbetonstein aus Holzspanbeton mit integrierter Dämmung Quelle: Durisol UK (2016), Specifying Durisol, D365s, http://www.durisoluk.com/how-to-build-with-durisol/specifying-durisol/ (05.07.2016)	30

Abb. 17: Montage eines Mantelbetonwandelements Quelle: VELOX Werk GesmbH (2016), Referenzen, http://www.velox.at/en/references/prefabricated-products/ , (05.07.2016)	30
Abb. 18: Verschiedene Plattenstärken Zementspanplatte Quelle: AMROC Baustoffe GmbH (2016), Zementspanplatten, Allgemeines, http://www.amroc.de/de/allgemeines.html (06.07.2016)	30
Abb. 19: Verarbeitung des Materials zu Estrich Quelle: Agresta Technologies (2016), Verarbeitungsvideo "Faire une chape légère et isolante en béton de bois - AGRESLITH-C", Min. 2:42	31
Abb. 20: Einbringen der Schüttung Quelle: CEMWOOD GmbH (2014), Referenzen, Neubau Fachwerkhaus in Brackel, http://www.cemwood.de/de/referenzen/neubau-fachwerkhaue-brackel/ (06.07.2016)	31
Abb. 21: Arten von Holzwolledämmplatten; a Holzwolledämmplatte; b Sandwichplatte mit Steinwolle; c Mehrschichtplatte mit EPS Dämmlage Quelle: Knauf AG (2016), Knauf Sortiment Fibre, http://www.knauf.ch/de/sortiment/fibre/#lex-247930_1_3 (05.07.2016); a Fibralth; b Fibra-Roc leicht35; c Fibra ultra Typ 2	32
Abb. 22: Kleinformatige Akustik- Paneele Quelle: JWA design (2015), BAUX Acoustic Tiles, Triangle, http://www.jwadesign.com/calgary-interior-design-trends/ (05.07.2016)	33
Abb. 23: Lärmschutzwände aus Holzwollebeton; a Offenporige Oberfläche; b Holzwolle auf Trägerbeton; c Schallschutzanlage in gebogener Ausführung Quelle: Betonwerk Rieder GmbH (2016), Geschäftsbereiche, Lärmschutz, Downloads, http://www.rieder.at/geschaeftsbereiche/infrastruktur/laermschutz-442/ (06.07.2016); a Rieder 360°; b Infrastruktur Broschüre; c Folder Großer Bogen	34
Abb. 24: Südfassade mit Eingang green:house Quelle: WILO SE (2012), Dortmund, Christopher Waluga (2012), Beton aus Holz – Das green:house der Bauhaus-Universität, mapolis architektur + BIM, München, http://architektur.mapolismagazin.com/lehrstuhl-entwerfen-und-wohnungsbau-greenhouse-weimar (06.07.2016)	35
Abb. 25: Wandaufbau Projekt green:house Quelle: WILO SE (2012), Dortmund, Christopher Waluga (2012), Beton aus Holz – Das green:house der Bauhaus-Universität, mapolis architektur + BIM, München, http://architektur.mapolismagazin.com/lehrstuhl-entwerfen-und-wohnungsbau-greenhouse-weimar (06.07.2016)	35
Abb. 26: Innenansicht green:house; a Rohbau vor Verkleidung; b Fertiggestellter Innenausbau Quelle: a Otto Knecht GmbH (2011), Forschung, Experimentalbau, Metzingen, http://www.knecht.de/de/unternehmen/forschung.html (08.12.2015); b Brandau [35] Abb. 104, Seite 73	37

Abb. 27: Einfamilienhaus von Trällit in Sommen Quelle: Trällit AB (2016), Referenser, Helväggselement (Wandelement), http://www.trallit.se/reference/helvaggselement-sommen/ , (07.07.2016)	37
Abb. 28: Innenwandelemente; a Aufbau; b Montage Quelle: TRÄULLIT [40]; a Min. 3:45; b Min. 4:09	38
Abb. 29: System Trällit Wandelementbauweise Quelle: TRÄULLIT [39], Seite 6	38
Abb. 30: Aufbau Trällit Dachelement Quelle: Trällit AB (2016), Broschyren (Broschüren), Miljöinformation (Umweltinformationen), Sund skolmiljö (gesunde Schulumgebung), Informationsbroschüre, http://www.trallit.se/files/2012/12/Traullit-sund-skolmiljo.pdf (08.07.2016)	39
Abb. 31: Ausgewählte Wandaufbauten laut Krippner; a Speichermasse innen und Wärmedämmung außen (HLB+BS+HLB); b Wärmedämmung außen mit Zusatzdämmung (BS+WD+HLB); c Nichttragendes Wandpaneel (HLB+Vakuum-Dämmplatte+HLB) Quelle: Krippner [2]; a Abbildung 8.28, Seite 158; b+c Abbildung 8.29 + 8.32, Seite 159	41
Abb. 32: Aufbau Brettsperrholz-Holzleichtbeton-Beton-Verbunddecke; a Schichtverbindung mittels Verschraubung; b Kraftübertragung mittels Lattung, ohne Aufbetonschicht Quelle: Schernberger [27]; a Abbildung 181, Seite 100; b Abbildung 185, Seite 102	43
Abb. 33: Belastungsversuche Holzträger mit Holzleichtbeton- und Beton-Verbund; a Aufbau eines Versuchskörpers mit Stahlprofilen; b Bruchversagen im Belastungsversuch; c Verformung Hineinziehen der Schraube in das Holz durch Belastung Quelle: Fotos von TS aufgenommen am 25.01.2016 bei Versuchen von Haximustafa und der TU Wien an der HBLuVA Camillo Sitte, Wien	45
Abb. 34: Druckversuche mit BSP-HLB Kombinationen; a HLB nicht direkt Druckbelastet; b HLB direkt Druckbelastet Quelle: Setoodeh Jahromy [47]; a Abbildung 3-12, Seite 54; b Abbildung 3-14, Seite 56	45
Abb. 35: Varianten von holzverstärkten Holzleichtbetonwänden; a Holzständer mit Diagonalverstrebung in HLB-Verguss; b Holzfachwerk mit HLB-Füllung in vorgefertigten Nuten Quelle: Setoodeh Jahromy [47]; a Seite 131, Jerg Blanckenhorn (1978), Patent Fachwerk- Wandelement, Bremen; b Seite 150, Karl Weinmann (2007), Plattenförmiges Bauelement, Reutlingen	48
Abb. 36: Schematische Darstellung Referenzgebäude Einfamilien-Reihenhaus Quelle: TS (Verfasser)	51
Abb. 37: Schematische Darstellung Referenzgebäude Wohngebäude Quelle: TS	51
Abb. 38: Schematische Darstellung Referenzgebäude Gewerbe- bzw. Bürogebäude Quelle: TS	52

Abb. 39: Diagramm Kosten Wohngebäude pro Quadratmeter Deckenfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	54
Abb. 40: Diagramm Kosten pro Quadratmeter Dachfläche; a Einfamilien-Reihenhaus; b Gewerbe-/Bürogebäude Quelle: Analyse und Grafik TS	55
Abb. 41: Diagramm Kosten Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Wandfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	56
Abb. 42: Diagramm kombinierte Kosten Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Grundfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	57
Abb. 43: Diagramm Deckenstärke Einfamilien-Reihenhaus Quelle: Analyse und Grafik TS	58
Abb. 44: Diagramm Dachdicke Einfamilien-Reihenhaus Quelle: Analyse und Grafik TS	59
Abb. 45: Diagramm Wanddicke Gewerbe-/Bürogebäude Quelle: Analyse und Grafik TS	59
Abb. 46: Diagramm kombinierte Bauteilstärke Wohngebäude pro Quadratmeter Grundfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	60
Abb. 47: Diagramm Punkte lt. OI3 Einfamilien-Reihenhaus pro Quadratmeter Deckenfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	61
Abb. 48: Diagramm Punkte lt. OI3 Wohngebäude pro Quadratmeter Dachfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	62
Abb. 49: Diagramm Punkte lt. OI3 Gewerbe-/Bürogebäude pro Quadratmeter Wandfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	63
Abb. 50: Diagramm Punkte lt. OI3 Wohngebäude kombiniert pro Quadratmeter Grundfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	64
Abb. 51: Diagramm Gewicht der Bauweisen pro Quadratmeter Geschossfläche Quelle: Analyse und Grafik TS	65
Abb. 52: Holzständerwand in Rahmenbauweise; a Konventionell mit Putzfassade und Installationsebene; b Einfache Erweiterung mit HLB als Dämmung; c Alternative Bepankung mit HLB; d Zusätzliche HLB-Installationsebene Quelle: Grafik TS	70

Abb. 53: Diagramm bauphysikalische Kennwerte zum Hitzeschutz von Ständerwänden mit Holzleichtbeton Quelle: Berechnung TS & U-Wert.net [68]; Grafik TS	71
Abb. 54: Diagramm Kosten, Gewicht und Bauteildicke von Ständerwänden mit Holzleichtbeton Quelle: Analyse und Grafik TS	72
Abb. 55: Holzleichtbetontrennwände; a Massivelemente mit GK- / HLB-Beplankung; b Metallständerwand mit Holzwolle-/ Holzspanbeton-Beplankung Quelle: Grafik TS	74
Abb. 56: Mantelbetonsteinwand mit Holzleichtbeton-Verguss Quelle: Analyse und Grafik TS	76
Abb. 57: Betonbank "Concreta"; a Original der Firma Runge; b Übersetzung in Holzleichtbeton Quelle: a Runge GmbH & Co. KG, Produkte, Betonbank Concreta, Osnabrück, http://runge-bank.de/modelle/betonbank-concreta (18.09.2016); b Grafik TS, Design RMP - Stephan Lenzen (Bonn) + Runge Designteam	77
Abb. 58: Holzleichtbetondecke mit Holz-Zugbewehrung; a Aufbau Variante 1, einachsig; b Aufbau Variante 2, zweiachsig; c Schaubild Variante 1; d Schaubild Variante 2 Quelle: Analyse und Grafik TS	80
Abb. 59: Diagramm Vergleich Holzleichtbetondecke mit Holz-Zugbewehrung und andere Bauweisen Quelle: Analyse und Grafik TS	81
Abb. 60: Holzleichtbeton Fassadenelemente mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen Quelle: Grafik TS	82
Abb. 61: Holzleichtbeton Wandelemente eingeschoben zwischen Holzstützen Quelle: Grafik TS	83
Abb. 62: Probekörper Fassadenansicht laut den vier Gestaltungsprinzipien Modellierung, Strukturdefinition, Körnung und Farbigkeit Quelle: Foto TS	88
Abb. 63: Probekörper Wandaufbau mit Schichtung der Materialien Quelle: Foto TS	89