

DIPLOMA THESIS

Resource-efficient timber-concrete composite floors for use in the timber high-rise buildings

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Ressourceneffiziente Holz-Beton-Verbund-Decken zum Einsatz bei Holzhochhäusern

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Peter Rädler, BSc

Matr.Nr.: 01225490

unter der Anleitung von

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alireza Fadai**

Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Christoph Radlherr**

Institut für Architekturwissenschaften,
Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/259-2, A-1040 Wien

Wien, im November 2018

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn **Associate Prof. Dipl.-Ing Dr.techn. Alireza Fadai** vom Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, da er mir diese Arbeit ermöglicht und dabei auch stets bestmöglich unterstützt hat. In zahlreichen Besprechungen waren seine Ideen und Anregungen äußerst hilfreich für die Lösung der verschiedenen Problemstellungen.

Ebenso möchte ich meinen Dank an Herrn **Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Deix** vom Institut für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit aussprechen, der mich während der Versuchsphase stets gut betreut hat.

Ein weiteres Dankeschön gebührt Herrn **Dr. Johann Scheibenreiter** von der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH der mich ebenfalls während der Versuchsphase, aber auch während der Versuchsauswertung und darüber hinaus bestens betreut hat und immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner **Familie, Freunden** und **Studienkollegen** bedanken, die mich stets während der gesamten Studienzzeit unterstützt haben und ohne die der Ablauf des Studiums in dieser Art und Weise nicht möglich gewesen wäre.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die hier vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt sowie der Literatur wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Wien, am 22.11.2018

Peter Rädler

Kurzfassung

In der heutigen Zeit steigt das Bestreben nach „nachhaltigem Bauen“ immer mehr. Durch diesen Trend rücken zusätzlich zu den ökonomischen auch die ökologischen Faktoren immer weiter in den Fokus des sozialen Interesses, wodurch der Einsatz von heimischen Hölzern auch für tragende Komponenten im Hochhausbau in Ballungsräumen verstärkt wird. Diese Anwendung bringt zusätzlich zu den statischen Kriterien auch eine Reihe hoher Anforderungen in den Bereichen Brandschutz, Schallschutz, Schwingungsreduzierung, etc. mit sich.

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll eine Holz-Beton-Verbund-Decke entwickelt werden, die zum Einsatz bei Holzhochhäusern für den Bürobetrieb im urbanen Raum geeignet ist. Dabei sollen Spannweiten zwischen 8 und 12 Metern abgedeckt werden und als Holzkomponente der Hochleistungs-Holzwerkstoff Furnierschichtholz (LVL - Laminated Veneer Lumber) eingesetzt werden.

Zu Beginn werden die hohen konstruktiven Anforderungen an tragende Bauteile im Holzhochhausbau aus den gültigen Richtlinien und Normen recherchiert und Überlegungen zur bestmöglichen Umsetzung mit Hilfe der Holz-Beton-Verbund-Technologie angestellt.

Anhand des definierten Anforderungsprofils wird eine Parameterstudie durchgeführt, mit dem Ziel eine ressourceneffiziente Lösung für die untersuchten Spannweiten zu finden. Dabei wird die Ressourceneffizienz im Sinne der Gesamtheit untersucht, d.h. die Konstruktion, die Konstellation der Materialien und die Bauweise werden betrachtet.

Um die statische Bemessung im Zuge der Parameterstudie möglichst realitätsgetreu auszuführen, werden experimentelle Untersuchungen in Form von Kleinteile-Scherversuchen durchgeführt. Dabei werden Werte für die Tragfähigkeit und das Verschiebemodul für den nachgiebigen Verbund zwischen Furnierschichtholz und Beton mittels stiftförmigen Verbindungsmittel eruiert. Diese dienen als Eingangsparameter für die statische Bemessung der Holz-Beton-Verbund-Decke.

Zum Schluss wird eine Vergleichsstudie zwischen den ermittelten Lösungsvarianten für die Spannweiten 8 bis 12 Meter durchgeführt und die im Zuge der Arbeit erlangten Erkenntnisse und Ergebnisse diskutiert und kritisch betrachtet.

Abstract

Nowadays the desire for "sustainable building" is increasing more and more. Besides economic factors, the environment is therefore becoming more relevant to the social conscience. Local wood is also increasingly being used in load-bearing components in high-rise buildings in urban areas. In addition to the static criteria, this practice brings with it a number of stringent requirements, such as fire protection, sound insulation, vibration reduction, etc.

This thesis aims to develop timber-concrete composite floors for use in timber high-rise buildings for office purposes in urban areas. Spans between 8-12 meters will be covered and used as wooden components of the high-performance material laminated veneer lumber – LVL.

First, the high structural requirements for load-bearing components in timber high-rise buildings will be researched using the valid guidelines and standards. Thereafter, considerations will be made to find the best possible implementation with the help of timber-concrete composite technology.

Based on the defined requirement profile, a parameter study will be done with the aim of finding a resource-efficient solution for the examined spans of the ceiling. This process will investigate the resource efficiency in terms of the construction of the cross-sectional dimensions, the constellation of the materials and the method of construction.

In order to perform the static design as part of the parameter study, as realistically as possible, experimental investigations will be carried out in the form of shear tests. The idea is to get values for the load capacity and the module of displacement for the composite between laminated veneer lumber and concrete connected by bolt-shaped connecting means. These values are used as input parameters for the static design of the timber-concrete composite floors.

Finally, a comparative study is done for the different solution variants of the investigated span-range from 8 to 12 meters. To conclude, the findings and results are discussed and considered critically.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Forschungsfrage	2
2 Motivation für den Einsatz von Holz im urbanen Hochbau	4
2.1 Ressourceneffizienz / Ökobilanz	4
2.2 Grenzen der Wirtschaftlichkeit von Holzdecken	6
3 Anforderungen an Decken im Holzhochhausbau	8
3.1 OIB-RL 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit	9
3.2 OIB RL 2: Brandschutz	10
3.3 OIB-RL 5: Schallschutz	16
3.3.1 Anforderungen an den Schallschutz von Außenbauteilen	17
3.3.2 Anforderungen an den Luftschallschutz innerhalb von Gebäuden	17
3.3.3 Anforderungen an den Trittschallschutz von Gebäuden	18
3.3.4 Einhaltung der Schallschutz-Anforderungen mittels Holz-Beton-Verbund Technologie	18
3.4 Schwingungen	19
3.4.1 Bemessungsregeln zum Schwingungsnachweis nach Eurocode 5	19
3.4.1.1 Querverteilungswirkung	20
3.4.1.2 Frequenzkriterium	21
3.4.1.3 Steifigkeitskriterium	21
3.4.1.4 Schwingungsbeschleunigung (Beschleunigungskriterium)	22
3.5 Ausblick	23
4 Beschreibung der Deckenkomponenten	24
4.1 Furnierschichtholz - LVL (Laminated Veneer Lumber)	24
4.2 Betonplatte	30
4.2.1 Betonfestigkeitsklassen	31
4.2.2 Anforderungen an die Betonplatte aus den diversen Zulassungen	31
4.2.3 zeitabhängiges Materialverhalten	32
4.3 Verbindungsmittel	33
4.3.1 allgemeine Erklärung zur Zulassung	34

4.3.2	Arten von Verbindungsmittel.....	35
4.3.2.1	Fertigteil-Verbinder (FT-Verbinder) der Firma Würth.....	37
4.3.2.2	Schubkerven.....	39
4.3.2.3	Holz-Beton-Verbund-Schrauben mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung.....	40
4.4	Element- bzw. Systembauweise für das Baukastensystem	44
5	Experimentelle Untersuchung	48
5.1	Allgemeines.....	48
5.2	Definition der Versuchsreihen.....	49
5.2.1	Versuchsreihe: 45°	50
5.2.2	Versuchsreihe: 30°	52
5.2.3	Versuchsreihe: FT.....	53
5.3	Beschreibung der Materialien.....	54
5.3.1	Furnierschichtholz – LVL	54
5.3.1.1	Ermittlung der Rohdichte	55
5.3.1.2	Ermittlung der Holzfeuchte.....	55
5.3.2	Beton	57
5.3.2.1	Betonrezeptur.....	57
5.3.2.2	Festigkeitsermittlung der diversen Betonmischungen	58
5.4	Versuchsaufbau.....	58
5.5	Versuchsablauf	60
5.6	Versuchsauswertung	61
5.6.1	Auswertung Versuchsreihe: 45°	63
5.6.2	Auswertung Versuchsreihe: 30°	65
5.6.3	Auswertung Versuchsreihe: FT	67
5.7	Interpretation der Ergebnisse.....	69
5.8	Vergleich: Versuchsergebnisse / Formeln lt. Zulassung	73
5.8.1	Wertevergleich Versuchsreihe: 45°	74
5.8.2	Wertevergleich Versuchsreihe: FT.....	75
6	Parameterstudie	77
6.1	Ziel der Parameterstudie.....	77
6.2	Umsetzung der Zielvorgabe (Ablaufschema)	78
6.2.1	Auswahl der Deckenspannweite.....	78
6.2.2	Auswahl der Deckenparameter	78
6.2.3	Nachweisführung.....	81
6.2.4	Ergebnisanalyse der Nachweisführung.....	88
6.2.5	Ressourcenermittlung	88
6.2.6	Materialkostenkalkulation.....	89
6.2.7	Ermittlung der finalen Lösung.....	93

6.3	Parameterstudie für 12m Deckenspannweite.....	95
6.3.1	Lösung I /12m.....	95
6.3.1.1	Deckenparameter; 12m	95
6.3.1.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 12m	96
6.3.1.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung I/12m	97
6.3.2	Lösung II / 12m	97
6.3.2.1	Deckenparameter; 12m	97
6.3.2.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 12m	98
6.3.2.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung II/12m.....	100
6.3.3	Lösung III /12m.....	101
6.3.3.1	Deckenparameter; 12m	101
6.3.3.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 12m	102
6.3.3.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung III /12m.....	103
6.3.4	Gegenüberstellung der Varianten für 12m Deckenspannweite	104
6.3.5	finale Lösung; 12m Deckenspannweite	105
6.4	Parameterstudie für 10m Deckenspannweite.....	107
6.4.1	Lösung I /10m.....	107
6.4.1.1	Deckenparameter; 10m	107
6.4.1.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 10m	108
6.4.1.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung I/10m	109
6.4.2	Lösung II /10m	109
6.4.2.1	Deckenparameter; 10m	109
6.4.2.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 10m	110
6.4.2.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung II/10m.....	111
6.4.3	Lösung III /10m.....	113
6.4.3.1	Deckenparameter; 10m	113
6.4.3.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 10m	114
6.4.3.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung III /10m.....	115
6.4.4	Gegenüberstellung der Varianten für 10m Deckenspannweite.....	116
6.4.5	finale Lösung; 10m Deckenspannweite	117
6.5	Parameterstudie für 8m Deckenspannweite	118
6.5.1	Lösung I/8m.....	118
6.5.1.1	Deckenparameter; 8m.....	118
6.5.1.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 8m	119
6.5.1.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung I /8m.....	120
6.5.2	Lösung II/8m	121
6.5.2.1	Deckenparameter; 8 m	121
6.5.2.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 8 m	122
6.5.2.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung II /8m	123

6.5.3	Lösung III /8m	124
6.5.3.1	Deckenparameter; 8 m	124
6.5.3.2	Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 8m	125
6.5.3.3	Ergebnisanalyse der Variante: Lösung III /8m.....	126
6.5.4	Gegenüberstellung der Varianten für 8 m Deckenspannweite	127
6.5.5	finale Lösung; 8 m Deckenspannweite.....	128
6.6	Vergleichsstudie über die untersuchten Spannweiten.....	129
7	Diskussion der Ergebnisse	132
8	Schlussfolgerung und Ausblick.....	136
	Abbildungsverzeichnis.....	137
	Tabellenverzeichnis.....	139
	Literaturverzeichnis.....	141

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung einer Holz-Beton-Verbund-Decke für den Einsatz bei Holzhochhäusern im urbanen Raum. Die Hauptnutzung dieser Holzhochhäuser soll der Bürobetrieb sein. Es werden in dieser Arbeit Holz-Beton-Verbund-Konstruktionen rein für den Einsatz bei Neubauten entwickelt und keine Anwendung dieser Technologie bei Deckensanierungen untersucht.

Zu Beginn soll die Intention und Motivation für die Etablierung von Holzkonstruktionen auch in städtischen Gebieten behandelt und kritisch im Sinne der Wirtschaftlichkeit betrachtet werden.

Im Anschluss werden die Anforderungen an Deckenkonstruktionen im Hochhausbau durch Recherche der gültigen Richtlinien und Normen sowie sonstigen literarischen Quellen eruiert und dokumentiert. Zu diesen Anforderungen werden an dieser Stelle Überlegungen zur Umsetzung angestellt, aber auch der aktuelle Forschungsstand anhand von bereits verwirklichten Bauwerken dargelegt.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse über das Anforderungsprofil und die gegebenen Vorgaben können nun detaillierte Überlegungen für mögliche Deckenausführungen und Bauweise formuliert werden. Weiters werden die in Frage kommenden Materialien und deren Festigkeitseigenschaften sowie mögliche Verbindungsmittelvarianten recherchiert und genauer untersucht.

Für diese Holz-Beton-Verbund-Deckenentwicklung wird für die Holzkomponente der Konstruktion der Hochleistungs-Holzwerkstoff Furnierschichtholz (LVL) vorgesehen. Da kaum direkte Erfahrungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln kombiniert mit LVL bei Holz-Beton-Verbund-Konstruktionen vorhanden sind, werden umfangreiche experimentelle Untersuchungen anhand von Kleinteile-Scherversuchen durchgeführt. Dabei werden Versuchsprüfungen an drei Versuchsreihen zu je fünf Prüfkörpern getätigt. Zwischen den Versuchsreihen wird der Verbindungsmitteltyp und die Anordnung des Verbindungsmittels bezogen auf den Einschraubwinkel variiert, mit dem Ziel Berechnungsparameter für die statische Bemessung zu erhalten.

Anschließend kann die eigentliche Entwicklung mit Hilfe einer Parameterstudie durchgeführt werden. Die bis dato erlangten Erkenntnisse und Feststellungen ermöglichen ein sinnvolles Einschränken der Eingangsparameter. Umgesetzt wird die Parameterstudie durch ein umfassendes EXCEL-Programm bzw. durch das Stabstatikprogramm RSTAB der Firma Dlubal Software GmbH. Diese vorab gewählten Eingangsparameter sind die Ausgangslage der

Parameterstudie. Anhand dieser wird die statische Bemessung sowie die Nachweisführung diverser Anforderungen mittels normativ verankerter Berechnungsverfahren durchgeführt. Um ein redundantes Ergebnis für die Nachweise zu erhalten werden mehrere Berechnungsverfahren, abhängig vom Verbund zwischen Holz und Beton, angewendet und die unabhängigen Ergebnisse auf Plausibilität geprüft. Das Ziel ist dabei für die untersuchten Deckenspannweiten, im Bereich zwischen 8 bis 12 Metern, Lösungsvarianten zu entwickeln und anhand der ermittelten Ressourcen sowie einer Materialkostenkalkulation zu bewerten.

Zum Schluss werden die diversen Lösungsvarianten für die unterschiedlichen Spannweiten verglichen und die Ergebnisse diskutiert. Anhand der Lösungsfindung für die untersuchten Spannweiten in der Parameterstudie und der anschließenden Vergleichsstudie über die Lösungsvarianten sowie der Ergebnisdiskussion wird die in *Kapitel 1.2* formulierte *Forschungsfrage* beantwortet. Weiters werden bestehende Lücken sowie Zukunftshypothesen beschrieben.

1.2 Forschungsfrage

Mit welchen Ressourcen bzw. in welcher **Konstellation** der Materialien, **Konstruktion** und **Bauweise** ist es effizient möglich Holz-Beton-Verbund-Decken im Holzhochhausbau mit folgenden Anforderungen und Vorgaben umzusetzen:

- Deckenspannweiten von 8m, 10m und 12m sollen genau untersucht werden aber auch eine Empfehlung für dazwischenliegende Spannweiten abgegeben werden.
- Die Gebäudenutzung soll hauptsächlich der Bürobetrieb sein. D.h. es sind die dementsprechenden Nutzlasten lt. Nutzungskategorie anzusetzen.
- Es gelten die Anforderungen für Deckenkonstruktionen im Hochhausbau entsprechend den OIB - Richtlinien und europaweit gültigen Bemessungsregeln im Bauwesen, welche in den Eurocodes festgehalten sind.
- Um Ressourcen im Sinne der Holzmenge einzusparen soll der Holz-Hochleistungswerkstoff Furnierschichtholz (LVL - Laminated Veneer Lumber) eingesetzt werden. Durch höchste Werkstofffestigkeiten ermöglicht LVL eine sehr schlanke und somit materialeinsparende Bauweise. Zusätzlich zu LVL aus Nadelholz soll auch der Einsatz von LVL aus Laubholz in Betracht gezogen werden, da mit Laubholz noch höhere Festigkeitswerte erreicht werden können.

Schlüsselwörter dieser Fragestellung sind Konstellation, Konstruktion und Bauweise. Die Bedeutung dieser Wörter im Zusammenhang mit dem effizienten Einsatz von Ressourcen in dieser Diplomarbeit wird darum separat hervorgehoben.

Konstellation: Der Begriff Konstellation definiert, welche Festigkeiten der Komponenten Furnierschichtholz und Beton in Kombination mit welcher Art von Verbindungsmittel zwischen den beiden Komponenten für die untersuchte Deckenspannweite die effektivste und effizientesten Lösungsvariante darstellt.

Konstruktion: Beschreibt den Aufbau und die Dimensionen der tragenden Konstruktion des Deckenquerschnitt. D.h. welche Querschnittsabmessungen von Beton und Holz sind erforderlich, um in erster Linie die statischen Nachweise zu erfüllen aber auch den Anforderungen an Brandschutz, Schallschutz, etc. gerecht zu werden.

Bauweise: Es gibt bereits eine Vielzahl an Holz-Beton-Verbund-Deckensystemen auf dem Markt. Entscheidend in Bezug auf das Endergebnis ist es zu hinterfragen durch welche Deckenausführung (Flachdecke oder Rippendecke) kombiniert mit welcher Bauweise (Fertigteil-Bauweise, Halfertigteil-Bauweise, Element- bzw. Systembauweise) am Ende des Tages die Ressourcen am effizientesten genutzt werden können.

2 Motivation für den Einsatz von Holz im urbanen Hochbau

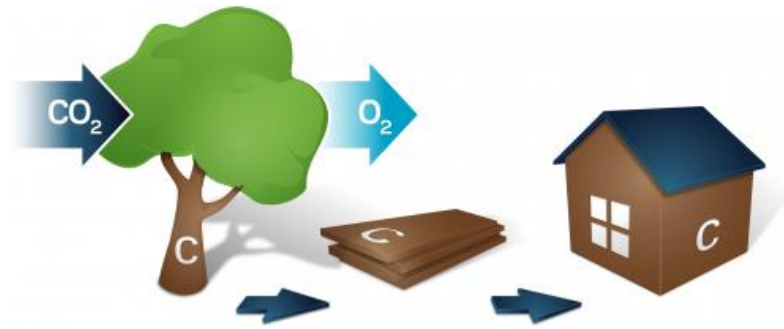
Nach Berechnungen der Internationalen Energieagentur (IEA) ist neben dem Industrie- und Verkehrssektor vor allem der Gebäudebereich für den globalen Energieverbrauch verantwortlich. Diese Kalkulationen ergeben, dass alle Gebäude der Welt ca. ein Drittel des globalen Energieverbrauchs, sowie ca. ein Fünftel aller CO₂-Emissionen verursachen. Anhand diese Tatsache sollten die Alarmglocken schon lange begonnen haben zu Läuten – es sind speziell im Bauwesen neue Wege gefragt. In der Vergangenheit konzentrierte man sich darauf Gebäude während des Betriebs energieeffizienter zu machen. Heutzutage ist ein Umdenken gefordert und somit wird vermehrt der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet. D.h. es haben mehrere Faktoren einen essentiellen Einfluss auf die gesamte Energieeffizienz eines Gebäudes:

- der Einfluss der verwendeten Baustoffe auf die Umwelt bei der Herstellung
- das Verhalten des Gebäudes im Betrieb
- die Umweltverträglichkeit beim Rückbau des Gebäudes bzw. beim Entsorgen und Recyclen der Baustoffe

Bei genauer Betrachtung dieser drei Aspekte wird schnell klar, dass Holz ein sehr „ressourceneffizientes“ Material ist und einen positiven Einfluss auf die „Ökobilanz“ eines Bauwerks hat. Diese beiden Begriffe werden im folgenden *Kapitel 2.1 Ressourceneffizienz / Ökobilanz* genauer erläutert. [1]

2.1 Ressourceneffizienz / Ökobilanz

Holz wächst in unserer Region, aber auch in vielen anderen Regionen der Welt ohne Zuführung separater Herstellungsenergie und ist somit eine „nachwachsende/unendliche Ressource“. In der Wachstumsphase filtert Holz das Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) aus der Luft. Dabei wird der Kohlenstoff aus dem CO₂ im Holz gespeichert und durch eine chemische Reaktion aus Wasser und CO₂ entsteht Sauerstoff, welcher an die umgebende Atmosphäre abgegeben wird.[2]

Abbildung 2.1: Holz reduziert CO₂ [2]

In Österreichs Wäldern sind insgesamt etwa 800 Millionen Tonnen Kohlenstoff gespeichert, was ca. drei Milliarden Tonnen gebundenem CO₂ entspricht. Somit bindet der Wald das 35-fache der CO₂ Menge, die in Österreich jährlich ausgestoßen wird. Dies sei nur am Rande erwähnt, um zu veranschaulichen, dass es sich um nennenswerte Zahlen handelt.

Während der Nutzung bleibt diese Speicherwirkung bestehen. D.h. durch das Verwenden von Holz als Baustoff wirkt das Gebäude über die gesamte Lebensdauer klimaentlastend. Erst beim Verbrennen bzw. beim Verrotten gibt das Holz den vorher gespeicherten Kohlenstoff in Form von CO₂ in gleicher Menge wieder an die Umgebung ab. Dieser Prozess weist auf ein klimaneutrales Verhalten hin – die CO₂-Bilanz ist wieder die gleiche wie zu Beginn. Nur bei der Verarbeitung und durch die Transportwege ist ein zusätzlicher Energieeinsatz von endlichen Ressourcen notwendig, welcher aber vergleichsweise gering ist. Im Gegensatz dazu werden bei anderen Baustoffen, wie Beton, Stahl oder Ziegel bereits bei der Herstellung enorme Mengen an CO₂ in die Umgebung freigesetzt und zusätzlich durch weite Transportwege Energie verbraucht.

Hier sei noch erwähnt, dass je mehr Holz als Bau- oder Werkstoff andere CO₂ verursachende Materialien ersetzt, desto mehr CO₂ Emissionen können verhindert werden, da die Produktion dieser Materialien verringert werden kann. Dies nennt sich Substitutionseffekt.

Holzprodukte sind sogenannte Kreislaufprodukte. D.h. nach der Erstnutzung kann das Holz rückgebaut werden und zum Beispiel als Ausgangsmaterial für Holzwerkstoffe wie Span- oder Faserplatten verwendet werden. Auch während der Sekundärnutzung bleibt das CO₂ gebunden. Am Ende des „Lebensweges“ können Holzprodukte thermisch genutzt werden. Erst da geben sie die in ihnen gespeicherte Sonnenenergie CO₂-neutral ab. Andere Baustoffe hingegen verbrauchen fossile und somit nicht erneuerbare Energie, bei ihrer Entsorgung. [3]

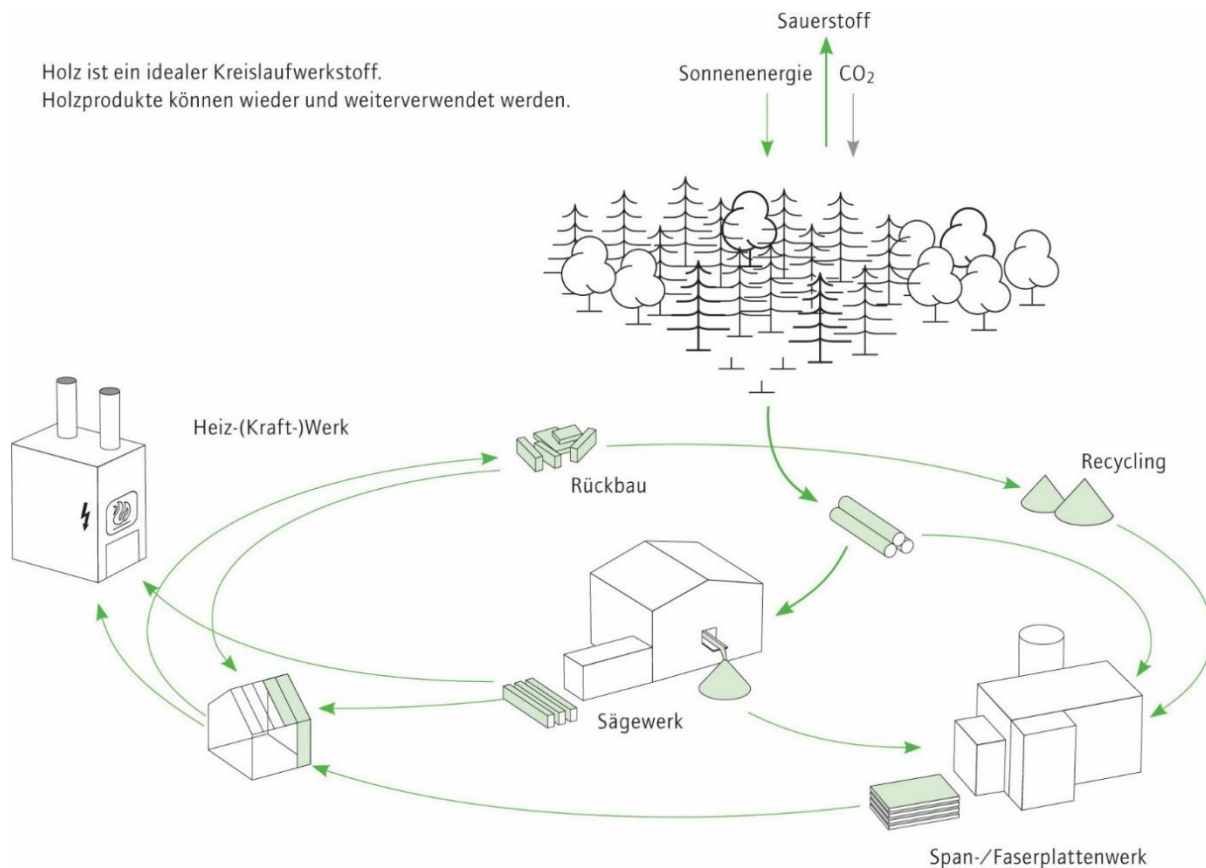


Abbildung 2.2: Kreislaufwerkstoff Holz [3]

Diese oben genannten Aspekte lassen darauf schließen, dass durch den vermehrten Einsatz von Holz ressourceneffizientes Bauen gewährleistet wird und in Summe Holzprodukte im Gegensatz zu anderen Baustoffen, eine positive CO₂-Bilanz sowie Ökobilanz, aufweisen. Somit reduziert der Baustoff Holz den ökologischen Fußabdruck nachhaltig.

2.2 Grenzen der Wirtschaftlichkeit von Holzdecken

Im Holzbau gibt es viele verschiedene Varianten und Ausführungen von Decken. Die Möglichkeit der Vorfertigung und der trockenen Bauweise, sowie die Einsparung von Gewicht und die bereits in *Kapitel 2.1* behandelten Vorteile in der Ökobilanzierung haben alle Ausführungstypen gemeinsam. Gerade durch die Typenvielfalt ist es wichtig zu erkennen, welches Deckensystem die vorgegebenen Anforderungen am besten erfüllen kann. Bei einer falschen Wahl kann es schnell zu einem unwirtschaftlichen Ergebnis kommen.

Welches System das Wirtschaftlichste ist, hängt von verschiedenen Faktoren, wie der Deckenspannweite, den Anforderungen an Brand- und Schallschutz, etc. ab. Das steht in direktem Zusammenhang mit der Nutzungskategorie. Aber auch visuelle Anforderungen und Vorgaben

von Seiten der Gebäudetechnik, sowie die Produktionsmöglichkeiten im Sinne der Vorfertigung sind entscheidend. Im Grunde sollten mehrere Aufgaben bzw. Anforderungen parallel abgedeckt werden, um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass je weniger Schichten ein Deckenaufbau hat, desto wirtschaftlicher ist er. Weiters ist eine frühe Detailplanung mit gleichzeitiger Betrachtung von Montage und Vorfertigung, sowie des Materialeinsatzes sehr hilfreich, um auf mögliche Änderungen frühzeitig zu reagieren.

Bei Betrachtung des Tragsystems ist die Deckenspannweite in Kombination mit den Querschnittsabmessungen und den verwendeten Materialien und Verbindungsmittel entscheiden für den tatsächlichen Ressourcenbedarf und somit auch für die Wirtschaftlichkeit. Hierzu wird speziell für Anwendung von Holz-Beton-Verbund-Decken im Holzhochhausbau in *Kapitel 6* eine *Parameterstudie* durchgeführt. [4]

3 Anforderungen an Decken im Holzhochhausbau

In den letzten Jahren werden weltweit immer mehr Projekte, bei denen Holzgebäude über die Hochhausgrenze hinauswachsen, umgesetzt. In Dornbirn (Vorarlberg) wurde im Jahr 2012 das erste achtgeschossige Holzgebäude Österreichs, das an die Hochhausgrenze reicht, errichtet. Umgesetzt wurde dieses Bauwerk mit dem Namen LCT ONE – Life Cycle Tower von der CREE GmbH, einem Tochterunternehmen der Rhomberg Gruppe. Zudem stellt es den Prototypen für die speziell entwickelte Holz-Element- bzw. Systembauweise dar, bei der Holz-Beton-Verbund Deckenelemente zum Einsatz kamen. Derzeit wird in der Seestadt Aspern in Wien das Hoho Wien vom Unternehmen cetus Baudevelopment GmbH errichtet. Das 24-geschossige Holzhochhaus soll noch dieses Jahr fertiggestellt werden und gilt dann temporär als höchstes Holzgebäude der Welt. Auch hier kommt ein System von vorgefertigten seriellen Bauteilen, bestehend aus Stützen, Unterzügen, Decken- und Fassadenelementen zum Einsatz, wobei sich ebenfalls die Holz-Beton-Verbund Technologie für die Deckenelemente durchgesetzt hat. [5],[6]

Solche Pilotprojekte beweisen, dass auch mit dem immer noch mit Vorurteilen behafteten Werkstoff Holz die hohen Anforderungen im Hochhausbau erfüllt werden können.

Die Möglichkeit derart hohe Gebäude aus Holz zu errichten wird durch den *Eurocode 5* [7] geschaffen. In den dort verfassten Normen ist die Konstruktion und Bemessung von Hochbauten und unter welchen Voraussetzungen vielgeschossige Holzgebäude realisiert werden können EU-weit geregelt und festgelegt.

In Österreich bilden seit 2007 die *Richtlinien des österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB-Richtlinien)* [8] die neue Basis für Harmonisierung bautechnischer Vorschriften der einzelnen Bundesländer und führte somit zu einer Änderung der Baugesetze der Länder.

OIB-Richtlinien	Bezeichnung
OIB-RL 1	Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
OIB-RL 2	Brandschutz
OIB-RL 2.1	Brandschutz bei Betriebsbauten
OIB-RL 2.2	Brandschutz bei Garagen, überdachten Stellplätzen und Parkdecks
OIB-RL 2.3	Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m
OIB-RL 3	Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
OIB-RL 4	Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit
OIB-RL 5	Schallschutz

OIB-RL 6	Energieeinsparung und Wärmeschutz
	Begriffsbestimmungen
	Zitierte Normen und sonstige technische Regelwerke

Tabelle 3.1: OIB-Richtlinien /aktueller Stand: 2015 [8]

Welche Richtlinien speziell bei Geschoßdecken im Hochhausbau, eingehalten werden müssen und wie diese mit Hilfe der Holz-Beton-Verbund Technologie umgesetzt werden können bzw. welche Vor- und Nachteile damit verbunden sind, wird in den folgenden Absätzen näher erörtert.

3.1 OIB-RL 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit

In dieser Richtlinie wird darauf hingewiesen, dass die Bemessung von statisch relevanten Bauteilen gemäß *ÖNORM EN 1990* bzw. *ÖNROM EN 1990/NA* [9], [10] durchzuführen ist. D.h. das Tragwerk ist über die Grenzzustände zu bemessen. Es ist zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) zu unterscheiden. Die Grenzzustände, die die Sicherheit von Personen und/oder die Sicherheit des Tragwerks betreffen, sind als Grenzzustände der Tragfähigkeit einzustufen. Die Nachweise im ULS werden im Anwendungsfall Holz-Beton-Verbund-Decken über Spannungsnachweise geführt. Jene Grenzzustände, die die Funktion des Tragwerks unter Gebrauchsbedingungen, das Wohlbefinden der Nutzer oder das Erscheinungsbild des Bauwerks betreffen gehören zu den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit. Für die SLS-Nachweise gelten Kriterien wie, Verformungen und Verschiebungen, Schwingungen und Schäden, die die Dauerhaftigkeit und die Funktionsfähigkeit des Tragwerks beeinflussen.

Weiters sind Einwirkungen auf das Tragwerk lt. *ÖNORM EN* bzw. *B 1991-1-1* [11], [12] anzusetzen. Da die Hauptnutzung des Gebäudes der Bürobetrieb sein soll, wird für die Nutzfläche die Nutzungskategorie B – Büroflächen definiert. Die entsprechenden Lasten sind im *Eurocode 1 aus der Tabelle 6.2-Nutzlasten auf Decken, Balkonen und Treppen im Hochbau* [11] zu entnehmen.

Aus statischer Sicht bieten Holz-Beton-Verbund-Konstruktionen einen entscheidenden Vorteil. Die spezifischen Werkstoffeigenschaften der einzelnen Bestandteile Holz, Beton und den Verbindungsmittel werden optimal ausgenutzt. Wird ein, als Einfeld-System gespanntes Deckenelement, betrachtet so übernimmt der Holzanteil die Übertragung der Zugkräfte, die Druckkräfte werden von der Betonplatte an der Deckenoberseite übertragen und die Scherkräfte in der Fuge werden von den entsprechenden Verbindungsmitteln übernommen.

Durch diese Konstruktionsweise werden hohe Systemsteifigkeiten- und festigkeiten erreicht. Der Betonanteil kann im Vergleich zu Massivdecken um bis zu 60% reduziert werden und somit kommt es zu erheblichen Gewichteinsparungen. Trotz der geringen Masse sind die

Durchbiegungen der Decke vergleichsweise klein, da eine hohe Biegesteifigkeit gewährleistet werden kann. [13]

Welche konkrete Konstruktion mit welchem Verbindungsmittel für die, in dieser Diplomarbeit geforderte Anwendung das zielführendste Ergebnis bringt, wird später genauer betrachtet.

3.2 OIB RL 2: Brandschutz /

OIB RL 2.3: Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m

Grundlage für den Brandschutz im Hochbau bildet die Einstufung eines Gebäudes in eine sogenannte Gebäudeklasse (GK). Die Einstufung erfolgt über die Höhe und die Fläche des Gebäudes in fünf Klassen bzw. für Gebäude mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m wurde ein separater Unterpunkt in den OIB-Richtlinien eingeführt. Je nachdem in welche Gebäudeklasse ein Gebäude eingestuft wird, sind entsprechende Anforderungen an Bauteile und Baustoffe zu erfüllen.

Die relevanten Gebäudeklassen für Decken, die im Hochhausbau zum Einsatz kommen sind somit die GK 5 mit maximal sechs oberirdischen Geschoßen, aber auch die erhöhten Anforderungen sobald das Gebäude über sechs oberirdische Geschoße aufweist bzw. ein Fluchtniveau von 22 m überschreitet. In der *OIB - Richtlinie 2 in der Tabelle 1a* [8] sind diese allgemeinen Anforderungen angeführt:

Gebäudeklassen (GK)	GK 5 ≤ 6	GK 5 > 6
	oberirdische Geschoße	
4 Decken und Dachschrägen mi einer Neigung ≤ 60°		
4.1 Decken über dem obersten Geschoß	R 60	R 60
4.2 Trenndecken über dem obersten Geschoß	REI 60	REI 60
4.3 Trenndecken über sonstigen oberirdischen Geschoßen	REI 90	REI 90 und A2
4.4 Decken innerhalb von Wohnungen bzw. Betriebseinheiten in oberirdischen Geschoßen	R60	R 90 und A2

Tabelle 3.2: Auszug aus der OIB-RL 2 / Tabelle 1a [8]

Für Gebäude mit bis zu sechs oberirdischen Geschossen muss somit die Bauteilanforderung REI 90 erfüllt sein. Darüber hinaus kommt zusätzlich zu REI 90 noch die Bauproduktanforderung A2 dazu.

Die Kurzbezeichnung REI ist Bestandteil der Norm *DIN EN 13501-2* [14] und beschreibt den Feuerwiderstand eines Bauteils über folgende Kriterien:

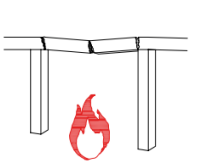
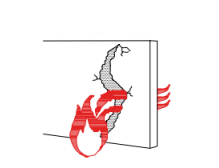
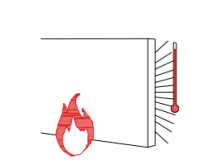
Tragfähigkeit (R)	
Raumabschluss (E)	
Wärmedämmung (I)	

Abbildung 3.1: Kriterien des Feuerwiderstands eines Bauteils [14]

Diese Bezeichnung wird immer in Verbindung mit einer Zeitangabe in Minuten angegeben, die beschreibt wie lange das jeweilige Kriterium erfüllt bleibt.

Für Trenndecken in der GK 5 mit maximal sechs oberirdischen Geschossen gilt die Klassifizierung REI 90 – D.h. die Tragfähigkeit, die raumabschließende Funktion und die Wärmedämmung muss im Brandfall für mindestens 90 Minuten erhalten bleiben.

Für Trenndecken in der GK 5, die mehr wie sechs oberirdische Geschosse besitzen, kommt zusätzlich zu der Feuerwiderstandsklasse REI 90 noch die Bezeichnung A2 hinzu. Sie ist Bestandteil der Norm *DIN EN 13501-1* [15] und beschreibt das Brandverhalten von Bauprodukten. Hierzu erfolgt die Einteilung in die sieben Euroklassen (A1, A2, B, C, D, E, F), wobei die Klasse A2 „nichtbrennbare mit Anteilen von brennbaren Baustoffen“ beschreibt. Weiters werden noch Unterklassen für Rauchentwicklung (s = smoke; Klassen s1, s2, s3), brennendes Abtropfen/Abfallen (d= droplets; Klassen d0, d1, d2) und besondere Klassen für Bodenbeläge (fl = floorings) angeführt.

KZ	Brandverhalten des Baustoffs
A1	nichtbrennbar ohne Anteile von brennbaren Baustoffen; kein Beitrag zum Brand
A2	nichtbrennbar mit Anteilen von brennbaren Baustoffen; kein Beitrag zum Brand

B	schwer entflammbar, sehr begrenzter Beitrag zum Brand
C	schwer entflammbar, begrenzter Beitrag zum Brand
D	Normal entflammbar, hinnehmbarer Beitrag zum Brand
E	Normal entflammbar, hinnehmbares Brandverhalten
F	leicht entflammbar, keine Leistung festgestellt

Tabelle 3.3: Benennung der Kurzzeichen des Brandverhaltens von Baustoffen [15]

Einhaltung der Brandschutz-Anforderungen mittels Holz-Beton-Verbund Technologie

Da die Anforderungen an Bauteile im urbanen Hochhausbau, was den Brandschutz betrifft, sehr hoch sind, benötigt es einen strukturierten Lösungsweg, um mit Hilfe von Holzkonstruktionen alle Anforderungen erfüllen zu können.

Eine positive Erneuerung in der aktuellen OIB-RL 2 [8] ist, dass speziell in der Gebäudeklasse 5 mit Gebäuden bis maximal sechs oberirdischen Geschoßen, die Anforderung an nichtbrennbare Baustoffe, teilweise entfernt und durch schwer entflammbare Materialien ersetzt wurde. Diese Änderung erleichtert das normgerechte Umsetzen von Holztragwerken.

Da durch den natürlichen Baustoff Holz ein gesundes Raumklima geschaffen wird und es einen hohen Wohlfühlfaktor mit sich bringt, wird oft von Seiten des Bauherrn gefordert, dass die Holzkonstruktion sichtbar bleibt und nicht mit einer Brandschutzbekleidung aus zum Beispiel Gipskartonplatten GKF beplankt wird. Dies erschwert das Einhalten der Brandschutzanforderungen, da durch eine Brandschutzbekleidung der Beginn des Abbrandes der statisch wirksamen Bauteile um eine Zeitspanne verzögert werden kann. Dies ist in der *ÖNORM EN 1995-1-2* [16] festgehalten.

Generell kommt bei der Ermittlung des Feuerwiderstandes von Holzbauteilen für tragende Bauteile die sogenannte „Warmbemessung“ zum Einsatz. Sie basiert auf der üblichen „Kaltbemessung“, allerdings wird mit

- abgeminderten Einwirkungen,
- modifizierten Festigkeiten und
- reduzierten Querschnitten gerechnet.

Für die Ermittlung des Bemessungswertes der Einwirkung im Brandfall E_{d,\dot{f}_i} werden charakteristischen Werte für ständige und veränderliche Einwirkungen verwendet. D.h. die Teilsicherheitsbeiwerte fließen mit dem Faktor „1“ in die Berechnung ein und wirken somit nicht lasterhöhend. Die Kombinationsbeiwerte bleiben bestehen. Wurde der Bemessungswert für die Einwirkung bereits für Normaltemperatur (Kaltbemessung) ermittelt, darf vereinfachend lt.

ÖNORM B 1995-1-2 [17] dieser Wert mit einem Abminderungsfaktor η_{fi} multipliziert werden. Dieser Abminderungsfaktor für den Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall kann lt. Norm errechnet werden. Empfohlene Werte sind 0,6 bzw. 0,7 für Bereiche mit größeren Nutzlasten.

Die Bemessungswerte für Materialkennwerte für Holz im Brandfall sind ebenfalls anhand derselben Norm zu ermitteln. Dabei wird mit 20%-Fraktile einer Festigkeitseigenschaft f_{20} bzw. einer Steifigkeitseigenschaft S_{20} (Elastizitätsmodul $E_{0,2}$ oder Schubmodul $G_{0,2}$) bei Normaltemperatur gerechnet. Zur Ermittlung dieses 20%-Fraktilwert der mechanischen Beanspruchbarkeit kann vereinfacht der charakteristische Wert der Beanspruchbarkeit R_k mit einem materialspezifischen Faktor k_{fi} kombiniert werden. Für den Holzwerkstoff Furnierschichtholz gilt: $k_{fi} = 1,1$. Der 20%-Fraktilwert R_{20} entspricht dann gleichzeitig auch dem Bemessungswert für den entsprechenden Materialkennwert im Brandfall $R_{d,fi}$ ($f_{d,fi}$ oder $S_{d,fi}$). Dies gilt aber nur unter der Voraussetzung, dass der Modifikationsbeiwert im Brandfall $k_{mod,fi}$, sowie der Teilsicherheitswert für Holz im Brandfall $\gamma_{m,fi}$, gleich „1“ gesetzt werden, was in der Norm auch so nahegelegt wird.

Werden tragende Holzelemente direkt dem Feuer ausgesetzt, ist in der ÖNORM EN 1995-1-2 [16] eine Abbrandrate in Abhängigkeit von der Holzart bzw. dem Holzwerkstoff definiert. Diese Abbrandrate multipliziert mit der Zeit der Brandbeanspruchung, diese entspricht in diesem Anwendungsfall der geforderten Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten, ergibt eine Abbrandtiefe. Wird nun der Ausgangsquerschnitt um diese Abbrandtiefe reduziert und der Nachweis $E_{d,fi} \leq R_{d,fi}$ ist trotzdem erfüllt, sind die Brandschutzanforderungen erfüllt.

Weiters muss beachtet werden, dass, wie bereits erwähnt, für Hochhäuser der GK 5 mit mehr wie sechs oberirdischen Geschoßen, zusätzlich zur Feuerwiderstandsklasse REI 90 auch die Baustoffklasse A2 gilt.

In der OIB-RL 2.3 [8] ist zu dieser Thematik aber folgende Vorbemerkung festgehalten:

Werden in dieser Richtlinie Anforderungen an die Feuerwiderstandsklasse in Verbindung mit Anforderungen an Baustoffe der Klasse A2 gestellt, gilt dies auch als erfüllt, wenn

- *die für die Tragfähigkeit wesentlichen Bestandteile der Bauteile der Klasse A2 entsprechen und*
- *die sonstigen Bestandteile aus Baustoffen der Klasse B bestehen. Raumabschließende Bauteile müssen zusätzlich – wenn ein Durchbrand nicht ausgeschlossen werden kann – beidseitig mit Baustoffen der Klasse A2 dicht abgedeckt sein.*

Durch folgende Überlegungen können die Vorteile der Holz-Beton-Verbund-Decken Konstruktion sinnvoll genutzt werden und eine zielführende Lösung, die den Brandschutzanforderungen entspricht, gefunden werden:

Wie oben angeführt ist in der Norm definiert, dass im Brandfall die Einwirkungen auf das Deckentragwerk um den Abminderungsfaktor η_{fi} verringert werden können. D.h. unter Brandbeanspruchung muss die Deckenkonstruktion nur noch ca. zwei Drittel der Belastung unter Normalbedingungen standhalten. Weiters werden auf der Widerstandsseite die Materialkennwerte um den materialspezifischen Faktor k_{fi} erhöht. Diese beiden Punkte haben positive Auswirkungen auf die Nachweisführung.

Wie im *Kapitel 1.1 Zielsetzung* beschrieben, wird für die Holz-Beton-Verbund-Decke (HBV-Decke) der Holzwerkstoff Furnierschichtholz (LVL) verwendet. Gerade bei der Ausführung einer HBV-Rippendecke mit LVL fallen die Rippenquerschnitte schmal und hoch aus. Dies kann zur Folge haben, dass nach Abzug der ermittelten Abbrandtiefe die Fläche des Restbalkenquerschnitt einer Rippe nur noch einen geringen Prozentanteil des ursprünglichen Rippenquerschnitts ausmacht oder rechnerisch sogar ganz abgebrannt ist.

Um den Anforderungen im Brandfall dennoch gerecht zu werden stehen folgende vier Überlegungen im Raum:

- Die Rippenquerschnitte werden paarweise aneinander positioniert, um einen gedrungenen Querschnitt zu erhalten. Ziel ist es nach der geforderten Bandeinwirkungsdauer von 90 Minuten einen größeren Restquerschnitt zu behalten und dadurch den Brandnachweis positiv zu führen.
- Ist die paarweise Anordnung nicht möglich oder die Sichtbarkeit der Holzkonstruktion nicht gefordert, besteht, wie bereits erwähnt, die Möglichkeit die LVL-Rippen mit einer Brandschutzbekleidung zu beplanken. Bei einer doppelten Beplankung von zwei Gipskartonplatten GKF mit einer Stärke von je 12,5 mm kann lt. Norm der Beginn des Abbrands der statisch wirksamen Bauteile um 49 Minuten verzögert werden und schlussendlich bei einer 90-minütigen Brandeinwirkung die ideelle Abbrandtiefe von 70 mm auf 48,2 mm je feuerzugewandter Rippenseite reduziert werden. Da die Abbrandtiefe durch die Beplankung nur um 21,8mm reduziert werden kann, führt diese Maßnahme bei schmalen Holzrippen nicht zwangsläufig zur Erfüllung der geforderten REI 90.
- Eine weitere Überlegung ist es, die Betonplatte an der Deckenoberseite so zu dimensionieren und zu bemessen, dass sie die Einwirkungen im Brandfall für die geforderte Zeit von 90 Minuten selbstständig, ohne Beitrag des Holzanteils, abtragen kann. Dies wird durch ermitteln einer zusätzlichen Bewehrung parallel zu den LVL-Rippen erreicht, wodurch die Spannrichtung der Betonplatte geändert wird. Dies ist aber für große Spannweiten kaum oder gar nicht realitätsnah und ist mehr eine theoretische Möglichkeit, die in der Praxis vermutlich keine Anwendung findet.
- Falls durch diese drei Ansätze die Anforderungen an den Brandschutz nicht erreicht werden können, d.h. statt dem geforderten Feuerwiderstand von REI 90 nur 60 oder 30

Minuten erreicht werden, können diese oben formulierten Überlegungen auch mit einem Löschesystem wie zum Beispiel einer Sprinkleranlage kombiniert werden um den geforderten Feuerwiderstand doch noch zu erreichen. Lt. *OIB-Richtlinie 2.3* [8] ist ab einem Fluchtniveau von 32m eine Löschanlage generell verpflichtend zu installieren. Wird von der Richtlinie abgewichen kann dies auch schon früher der Fall sein.

Da die HBV-Decke auch als Trenndecke zum Einsatz kommt und somit ein brandabschnittbildendes Bauteil darstellt, sind auch die Anforderungen an den Raumabschluss (E) einzuhalten. Die flächige und dicht ausgeführte Stahlbetonplatte bildet einen sehr guten Abschluss gegenüber Rauch. Bei HBV-Fertigteilelementen muss hier darauf geachtet werden, dass die Fugen zwischen den einzelnen Elementen abgedichtet werden. Im Auflagerbereich sind Sturzträger, ebenfalls aus Stahlbeton, die über die komplette Deckenhöhe reichen, vorgesehen. Auf diesen Betonrippen wird die Decke auf beiden Seiten aufgelagert. Sie dienen der Lastein- bzw. Durchleitung in die Wände ohne das Holzbauteile quer zur Faser belastet werden. Außerdem sind sie Teil des Brandschutzkonzepts und ermöglichen die geschoßweise Trennung der Holzkonstruktion auch in der Fassadenebene, was zum Erreichen der geforderten Brandschutzwerte unbedingt notwendig ist.

In der Regel werden Geschoßdecken nicht ausgedämmt. Sollte dies aber doch der Fall sein, können für die Wärmedämmung (I) nichtbrennbare Dämmstoffe wie zum Beispiel Steinwolle oder Glaswolle eingesetzt werden, um den Brandschutzanforderungen gerecht zu werden.

Durch dieses Konzept ist das Einhalten der hohen brandschutztechnischen Anforderungen im Hochhausbau mittels HBV-Decke möglich. Bei dem bereits erwähnten Prototyp LCT-Life Cycle Tower der Firma CREE GmbH kam ein ähnliches Deckensystem zum Einsatz. Anstelle der LVL-Rippen kamen hier Brettschichtholz-Träger zum Einsatz. Weiters ist die Deckenspannweite auf 9,45m beschränkt. Das Brandschutz wurde unter anderem über eine Sprinkleranlage gewährleistet. An diesen Deckenelementen wurde der Prüfnachweis anhand von Brandversuchen nach *DIN EN 13501* [15], [14] durchgeführt und die Einhaltung der Widerstandsklasse REI 90 bzw. sogar darüber hinaus bestätigt. [18]



Abbildung 3.2: Deckenelement LCT-Life Cycle Tower, Dornbirn [18]

3.3 OIB-RL 5: Schallschutz

Der Schallschutz ist speziell bei Deckenkonstruktionen eine sehr wesentliche, bauphysikalische Größe. Es wird je nach Medium, in dem sich der Schall fortsetzt, zwischen Luftschall und Körperschall unterschieden. Luftschall wird, wie der Name schon sagt, über die Luft ausgebreitet. Der Körperschall entsteht durch Anregung von festen Körpern. Der Trittschall ist im Bauwesen und im Hinblick auf Deckenkonstruktionen die übliche Form des Körperschalls. Er entsteht im Bauteil und wird von diesem als Luftschall abgestrahlt. Wichtig ist, schon bei der Festlegung der Konstruktion und der Anschlüsse zu berücksichtigen, dass Luft- und Trittschall nicht nur über den direkten Weg, sondern auch über die Flanken übertragen werden. In der nachstehenden *Abbildung 3.3* sind die diversen Schallübertragungen abgebildet. Wobei der direkte Schallübertragungsweg mit D_d und die Beiträge der Flankenübertragungswege mit F_f , D_f und F_d beschriftet sind. [19]

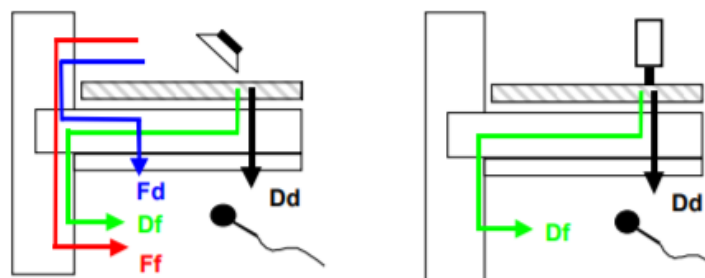


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Beiträge zur Schallübertragung:

links: Luftschallübertragung; rechts: Trittschalübertragung [19]

In der *OIB-Richtlinie 5* [8] sind drei unterschiedliche Schallschutzanforderungen angeführt, die auch für Deckenkonstruktion einzuhalten sind:

3.3.1 Anforderungen an den Schallschutz von Außenbauteilen

Dieser Punkt betrifft den Luftschallschutz, wird aber für die hier vorgesehene Anwendung von HBV-Decken nur am Rande erwähnt. In der *OIB-Richtlinie 5* [8] ist dazu angeführt, dass bei Bürogebäuden und der Gleichen für die Schalldämmung der Außenbauteile folgende Werte **nicht unterschritten** werden dürfen:

Mindest erforderliche Schalldämmung von Außenbauteilen f. Bürogebäude u. dgl.	
Decken und Wände gegen nicht ausgebaute Dachräume	42 dB

Tabelle 3.4: Auszug aus der OIB-Richtlinie 5 / Punkt 2.2.4 [8]

D.h. das Bauschalldämm-Maß R_w muss mindestens 42dB betragen.

3.3.2 Anforderungen an den Luftschallschutz innerhalb von Gebäuden

Lt. *OIB-RL 5* [8] müssen Wände, Decken und Einbauten zwischen Räumen so bemessen werden, dass bedingt durch die Schallübertragung durch den Trennbauteil und über die flankierenden Bauteile folgende Werte der bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ **nicht unterschritten** werden:

Mindest erforderliche bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ in Gebäuden		
zu	aus	$D_{nT,w}$ ohne Verbindung durch Türen, Fenster oder sonstige Öffnungen
Aufenthaltsräumen	Nebenzimmern; anderer Nutzungseinheiten	55 dB

Tabelle 3.5: Auszug aus der OIB-Richtlinie 5 / Punkt 2.3 [8]

Als andere Nutzungseinheiten sind unter anderem auch Verwaltungs- und Bürogebäude zu sehen.

Der Unterschied zwischen der bewerteten und der normalen Standard-Schallpegeldifferenz ist, dass bei der bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz auch die Schallübertragung über die Flanken und nicht nur durch das Bauteil berücksichtigt wird.

3.3.3 Anforderungen an den Trittschallschutz von Gebäuden

Der bewertete Standard-Trittschallpegel L'_{nTW} in Räumen darf folgenden Wert **nicht überschreiten**:

Höchst zulässiger bewerteter Standard-Trittschallpegel L'_{nTW}		
in	aus	L'_{nTW}
	Räumen anderer Nutzungseinheiten	
Aufenthaltsräumen	(u.a. Bürogebäude)	48 dB

Tabelle 3.6: Auszug aus der OIB-Richtlinie 5 / Punkt 2.5 [8]

Dieser Wert ist ohne Berücksichtigung eines Gehbelages zu erfüllen, außer er ist dauerhaft.

3.3.4 Einhaltung der Schallschutz-Anforderungen mittels Holz-Beton-Verbund Technologie

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, um die notwendigen Schalldämmwerte zur Einhaltung der Schallschutzanforderungen zu erreichen, entweder durch einen mehrschichtigen Aufbau oder durch Einbringung von Flächengewicht. Je mehr Masse vorhanden ist, desto vorteilhafter ist das im Hinblick auf die Schallschutzeigenschaften. Ein HBV-Decke ist zwar deutlich leichter als eine massive Stahlbetondecke, aber durch die beschwerende Betonschicht ist eine gute Grundlage für den Schallschutz gegeben. Wird nun der Fußbodenaufbau bestehend aus einer Trittschalldämmung, einem schwimmenden Estrich und dem Fußbodenbelag eingebaut, entsteht ein sogenanntes Masse-Feder-Masse-System. Der schwimmende Estrich und die Betonschicht der HBV-Konstruktion stellen die beiden massehaltigen Bauteile dar. Durch die Trittschalldämmung, die wie eine Feder wirkt, werden diese beiden Bauteile entkoppelt. Es entsteht ein mehrschaliges Bauteil, bei welchem eine bessere Schalldämmung zu erwarten ist, als bei einem einschaligen Bauteil gleicher Gesamtmasse.

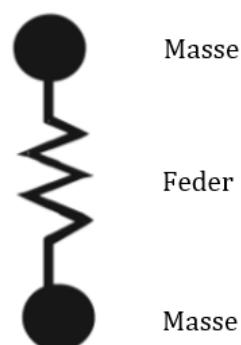


Abbildung 3.4: Masse-Feder-Masse-System; schematische Darstellung

Besonderes Augenmerk gilt den Bauteilanschlüssen zwischen Decke und Wand, da auch eine Schallübertagung über die Flanken stattfindet. Hier muss auf eine exakte Bauteilausführung geachtet werden. Kleine Mängel können fatale Auswirkungen auf die Schallübertragung haben. Zum Beispiel sollten Befestigungsmittel, wie Schrauben oder Winkel immer mit Dämpfungselementen montiert werden, damit die Schallübertragung minimal bleibt. [20]

3.4 Schwingungen

Verschiedene Vorgänge oder Gegebenheiten können dazu führen, dass ein Deckenelement zu schwingen beginnt. Auf der einen Seite entstehen Schwingungsprobleme durch den Trend der Baukonstruktionsoptimierung. Schlanke Konstruktionen mit hohen Ausnutzungen führen zu geringen Steifigkeiten und Massen. Das führt zu vermehrt schwingungsanfälligen Bauteilen. Auf der anderen Seite entstehen Schwingungen in Deckenelementen auch durch Erregermechanismen, wie gehen oder laufen, synchrone Bewegungen von Personen, Maschinenanregungen oder auch durch Anregungen zufolge Erdbeben. Schwingungen, die durch letzteres entstehen, sind sogenannte wegangeregte Schwingungen. Für diesen Fall, welcher zum Versagen des Tragwerks führen kann, muss bei der Bemessung der Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) berücksichtigt werden. Für alltägliche kraftangeregte Schwingungen, die durch Personen oder maschinell induziert werden, gilt der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS). Für diese häufig auftretenden Schwingungen ist in der *ÖNORM EN bzw. B 1995-1-1* [7], [21] speziell für Holz- und Holz-Beton-Verbund-Decken ein Nachweiskonzept definiert worden. [22]

3.4.1 Bemessungsregeln zum Schwingungsnachweis nach Eurocode 5

Um den Nachweis durchführen zu können, müssen einige Randbedingungen erfüllt werden. Die Decke muss eine Flächenmasse von über 50 kg/m^2 aufweisen und in eine Nutzungskategorie nach *ÖNORM B 1991-1-1* [12] eingeteilt werden können. Außerdem müssen gewisse konstruktive Anforderungen erfüllt werden (*siehe Tabelle 3.7*). Je nach Anwendung kann eine von drei Deckenklassen festgelegt werden. [7] Im vorliegenden Anwendungsfall – Geschoßdecke für ein Holzhochhaus mit Bürobetrieb (Nutzungskategorie B) – liegt die *Deckenklasse I* vor, welche die höchsten Anforderung an das Schwingungsverhalten stellt.

konstruktive Anforderungen		Deckenklasse I	Deckenklasse II
Holzbalkendecken	mit Nassestrich	Aufbau schwimmend auf schwerer Schüttung *)	Aufbau schwimmend (auch ohne Schüttung)
	mit Trockenestrich	spezieller Nachweis erforderlich	Aufbau schwimmend auf schwerer Schüttung*)
flächige Massivholzdecken (z.B. Brettsperrholz-/Brettstapeldecken)	mit Nassestrich	Aufbau schwimmend auf schwerer und leichter Schüttung	Aufbau schwimmend (auch ohne Schüttung)
	mit Trockenestrich	Aufbau schwimmend auf schwerer Schüttung*)	Aufbau schwimmend auf schwerer Schüttung*)

Tabelle 3.7: Auszug: Deckenklassen / konstruktive Anforderungen [7]

*) Als schwere Schüttung wird eine Schüttung mit einer Flächenmasse von mindestens 60 kg/m^2 bezeichnet.

Für den Schwingungsnachweis sind grundsätzlich drei Anforderungen zu erfüllen:

- das **Frequenzkriterium**; die erste Eigenfrequenz um Resonanz durch „gehen“ zu vermeiden
- das **Steifigkeitskriterium**; zum Vermeiden von großen Schwingungsamplituden durch eine Punktlast ($F=1 \text{ kN}$)
- die **Schwingungsbeschleunigung** (Beschleunigungskriterium); spezielle Bewertung von Decken mit niedrigen Frequenzbereichen

Bevor diese Kriterien überprüft werden können, muss aber kontrolliert werden, ob eine Querverteilungswirkung vorhanden ist. [7], [21]

3.4.1.1 Querverteilungswirkung

Eine Querverteilungswirkung ist gegeben, wenn das Verhältnis der Biegesteifigkeit quer zur Deckenspannrichtung EI_q zur Biegesteifigkeit in Längsrichtung EI_l größer oder gleich 5% entspricht. Die Biegesteifigkeiten bei einer Holz-Beton-Verbund-Decke können über das **γ - Verfahren** ermittelt werden. Näher Informationen darüber sind im *Kapitel 6.2.3 Nachweisführung* zu finden.

Da für den Schwingungsnachweis eine dynamische Betrachtung des Deckensystems vorliegt, darf der Einfluss des schwimmenden Zementestrichs auf die Tragfähigkeit, im Gegensatz zu statischen

Untersuchungen, mitberücksichtigt werden - die Biegesteifigkeit des Estrichs wird einfach dazu addiert. Bei einer Rippendeckenausführung bestehen die Anteile quer zur Hauptrichtung nur aus den Biegesteifigkeiten der Betonplatte und des Estrichs. In Längsrichtung darf die Steifigkeit des Estrichs auch berücksichtigt werden, wird aber oft vernachlässigt, um auf der sicheren Seite zu liegen. [7], [21]

Die Querverteilungswirkung hat großen Einfluss auf das Frequenzkriterium.

Ein Punkt des es zu beachten gilt ist, dass bei der Element- bzw. Systembauweise einzelne Deckenelemente Mann an Mann positioniert werden. Um hier ein Querverteilungswirkung zu gewährleisten muss ein Verbund zwischen den einzelnen Deckenelementen hergestellt werden. Ein Beispiel dafür liefert der Life Cycle Tower. Details dazu sind in *Kapitel 4.4 Element- bzw. Systembauweise* für das Baukastensystem beschreiben.

3.4.1.2 Frequenzkriterium

Beim Frequenzkriterium wird die erste Eigenfrequenz f_1 näherungsweise ermittelt. Dazu sind im *Eurocode 5* [7] Berechnungsformeln angegeben. Abhängig davon, ob eine Querverteilungswirkung gegeben ist oder nicht, wird diese dann auch in der Berechnungsformel für die erste Eigenfrequenz berücksichtigt. Je nach Deckenklasse darf ein gewisser Wert für f_1 nicht unterschritten werden, um das Kriterium zu erfüllen, mit dem Ziel Resonanz zu vermeiden.

	Deckenklasse I	Deckenklasse II	Deckenklasse III
Grenzwert für das Frequenzkriterium	$f_1 \geq f_{gr} = 8 \text{ Hz}$	$f_1 \geq f_{gr} = 6 \text{ Hz}$	keine Anforderung

Tabelle 3.8: Auszug ÖNORM B 1995-1-1:2015 Tabelle NA.7.2-E4 [21]

Für die Deckenklasse I muss f_1 mindesten 8 Hz betragen.

3.4.1.3 Steifigkeitskriterium

Für das Steifigkeitskriterium wird die größte vertikal Anfangsdurchbiegung w_{stat} zufolge einer statischen Einzellast von 1 kN an einer ungünstigen Stelle ermittelt. Es muss dabei die mitwirkende Breite b_F näherungsweise ermittelt und berücksichtigt werden.

	Deckenklasse I	Deckenklasse II	Deckenklasse III
Grenzwert für das Steifigkeitskriterium	$w_{stat} \leq w_{gr} = 0,25 \text{ mm}$	$w_{stat} \leq w_{gr} = 0,5 \text{ mm}$	keine Anforderung

Tabelle 3.9: Auszug ÖNORM B 1995-1-1:2015 Tabelle NA.7.2-E4 [21]

Um das Kriterium zu erfüllen, darf für die Deckenklasse I die Anfangsdurchbiegung w_{stat} den Grenzwert $w_{gr} = 0,25 \text{ mm}$ nicht überschreiten.

3.4.1.4 Schwingungsbeschleunigung (Beschleunigungskriterium)

Wird das Frequenzkriterium nicht erfüllt, aber ein Mindestwert für die erste Eigenfrequenz von $f_{1,\min} \geq 4,5$ Hz eingehalten, so wird die Schwingungsbeschleunigung begrenzt. Hierzu wird der Effektivwert der Schwingungsbeschleunigung a_{rms} herangezogen. Er entspricht der, über die Anregungsdauer gemittelten Beschleunigung, die durch Gehen einer Person entsteht. Diese Einwirkung kann als Fourier-Reihe beschrieben werden, wobei der Resonanzfall untersucht wird und das System als Einmassenschwinger angenommen wird. Vereinfacht darf dieser Effektivwert a_{rms} auch über einen Formelwert lt. *Eurocode 5* [7] ermittelt werden.

	Deckenklasse I	Deckenklasse II	Deckenklasse III
Grenzwert für das Schwingungsbeschleunigung (Effektivwert)	$a_{\text{rms}} \leq a_{\text{gr}} = 0,05 \text{ m/s}^2$	$a_{\text{rms}} \leq a_{\text{gr}} = 0,10 \text{ m/s}^2$	keine Anforderung

Tabelle 3.10: Auszug ÖNORM B 1995-1-1:2015 Tabelle NA.7.2 [21]

In diesem Fall ist für die Deckenklasse I der Schwingungsnachweis erfüllt, wenn der Grenzwert $a_{\text{gr}} = 0.05 \text{ m/s}^2$ nicht überschritten wird und zusätzlich das Steifigkeitskriterium eingehalten wird.

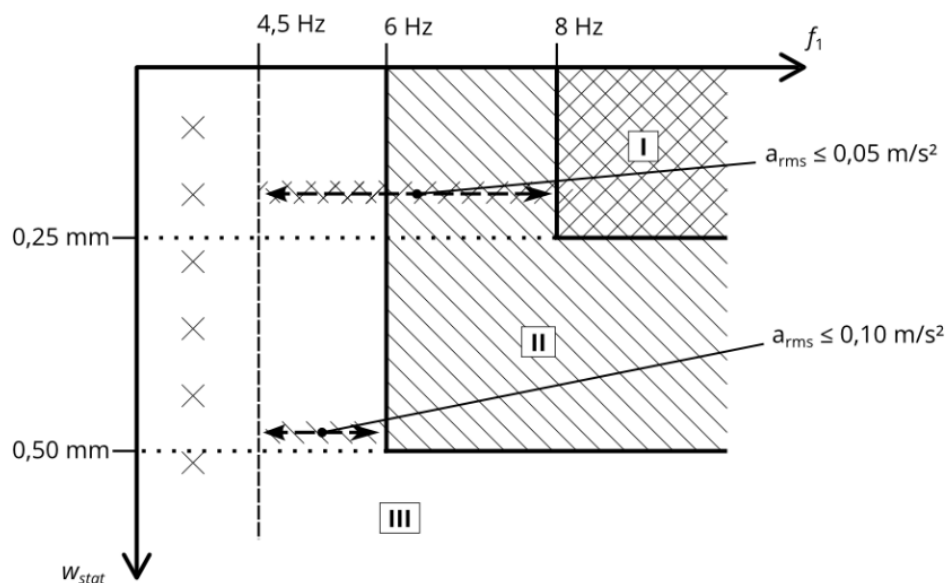


Abbildung 3.5: Einteilung in die Deckenklassen nach den Eurocode 5 Anforderungen [23]

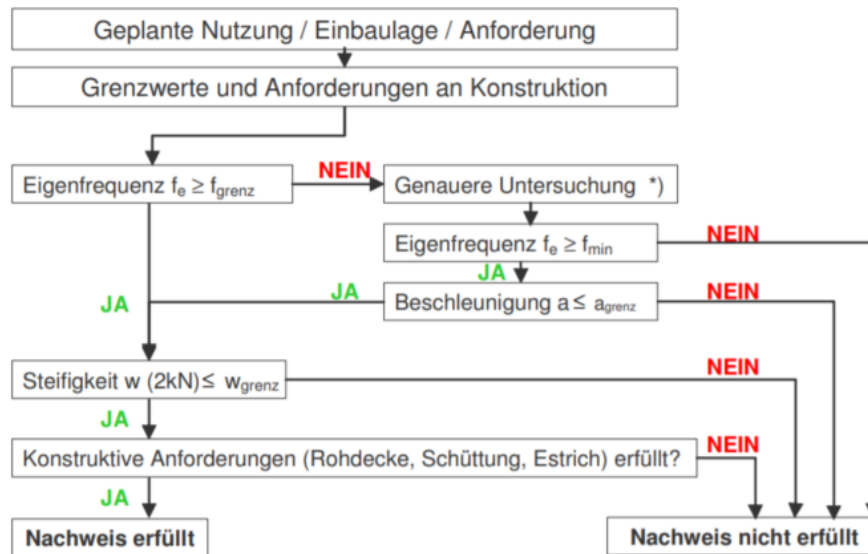


Abbildung 3.6: Übersicht über den Schwingungsnachweis von HBV-Decken [24]

*) Die genauere Untersuchung entspricht dem Beschleunigungskriterium. Dieser Weg führt oft bei schweren Holzdecken, wie zum Beispiel HBV-Decken zum Ziel.

3.5 Ausblick

Wie die oben ausführlich beschriebenen Punkte zeigen, ist es mit Holz-Beton-Verbund-Decken sehr wohl möglich, die in den Richtlinien und Normen definierten Anforderungen für Decken im Hochhausbau zu erfüllen. Nicht nur aus statischer Sicht, sondern auch die bauphysikalischen Eigenschaften, wie Schallschutz, Brandschutz und Wärmeschutz entsprechen den Vorgaben.

Es ist nun entscheidend die Vorurteile in den Köpfen der Planer, den Ausführenden und den Behörden gegenüber dem Baustoff Holz im Zusammenhang mit Bauvorhaben im urbanen Raum aus dem Weg zu schaffen und so zu kommunizieren und darzustellen, dass die Anforderungen mit der Wahl einer Holz-Beton-Verbund-Variante als gesichert angenommen werden. Es besteht derzeit noch ein Informationsdefizit, aber das betrifft alle Bauteile im Holzbau.

4 Beschreibung der Deckenkomponenten

Grundsätzlich sind bei Holz-Beton-Verbund-Decken zwei grundlegend unterschiedliche **Konstruktionskonzepte für Neubauten** möglich, die aber auch dementsprechend unterschiedliche Anwendungsbereiche abdecken:

- Die **Holz-Beton-Verbund Flachdecke**, bestehend aus einer flächigen, massiven Holzschicht aus zum Beispiel Brettstapeln, Brettsperrholz (CLT- Cross Laminated Timber) oder Furnierschichtholzplatten (LVL) und einer sich darauf befindenden Betonschicht. Dieser Konstruktionsaufbau ermöglicht geringe Konstruktionshöhen und ist wirtschaftlich sinnvoll bei Spannweiten zwischen ca. 5 m und 8 m. [25]
- Die **Holz-Beton-Verbund Rippendecke**, wird, wie der Name schon sagt, aus Holzrippen, bestehend aus zum Beispiel Brettschichtholz (BSH) oder ebenfalls Furnierschichtholz-Rippen (LVL), hergestellt. Auf diese Rippen, die je nach Anwendung unterschiedliche Abstände zueinander aufweisen, ist die Betonschicht positioniert. Die Betonschicht ist mit den Holzrippen nachgiebig verbunden und bildet eine sogenannte Plattenbalkenkonstruktion. Die einzelnen Rippen weisen in der Regel eher schmale aber hohe Querschnitte auf, um ein höheres Flächenträgheitsmoment zu erreichen. Somit entstehen zwangsläufig höhere Deckenkonstruktionen, was diese Ausführung aber auch für größere Spannweiten ab ca. 6 m wirtschaftlich macht. [25]

In dieser Arbeit liegen die Anforderungen bei Spannweiten zwischen 8m und 12m für Einfeld-Decken im Holzhochausbau (*siehe Kapitel 1.1 Zielsetzung*). D.h. in den folgenden Kapiteln wird sowohl bei der Beschreibung der Deckenkomponenten, also auch bei der Berechnung bzw. Entwicklung vermehrt auf die Holz-Beton-Verbund Rippendecke eingegangen, da bei so großen Spannweiten die Flachdecken-Variante aus wirtschaftlicher Sicht von vornherein die zweite Wahl ist.

In den folgenden Subkapiteln werden die einzelnen Deckenkomponenten, welche für die Entwicklung der Decke in dieser Diplomarbeit in Betracht gezogen werden, genauer behandelt und eine sehr innovative Umsetzungsmöglichkeit speziell für große Projekte im urbanen Raum näher beschrieben.

4.1 Furnierschichtholz - LVL (Laminated Veneer Lumber)

In der Vergangenheit wurden bereits Projekte, wie zum Beispiel der bereits erwähnte LCT-Life Cycle Tower in Dornbirn umgesetzt, bei denen HBV-Rippendecken mit einem ähnlichen Anforderungsprofil, wie in dieser Arbeit beschrieben, eingesetzt wurden. Diese wurden aber

größtenteils mit Rippen aus Brettschichtholz (BSH) verwirklicht. Derzeit ist aber noch kein bzw. sehr wenig „Know-How“ bei der Umsetzung von HBV-Konstruktionen in Verbindung mit LVL mit Deckenspannweiten bis 12 m vorhanden.

In den letzten Jahren wurden außerdem in der Herstellung von LVL große Fortschritte gemacht. Firmen wie Stora Enso, Steico, Metsä Group, etc. haben, durch Anschaffen von automatisierten Fertigungsstraßen große Summen in die Produktion investiert, um den steigenden Bedarf abdecken zu können.

Herstellprozess:

Die Produktion basiert auf einer speziellen Schältechnologie. Dabei werden große Rundhölzer zuerst in heißem Wasser gelagert und dann auf 3mm starke Furniere geschält. Anschließend werden die Furniere maschinell nach Dichte, Feuchtigkeit und Elastizitätsmodul vermessen und in einer spezifischen Reihenfolge angeordnet. Diese geordneten Furniere werden dann unter Druck und Hitze wasserfest verklebt. Durch den Verarbeitungsprozess werden die natürlichen Fehlstellen des Holzes, wie Äste, minimiert und verteilt, sowie bei der Verklebung auf eine Dicke von 3mm begrenzt. [26]

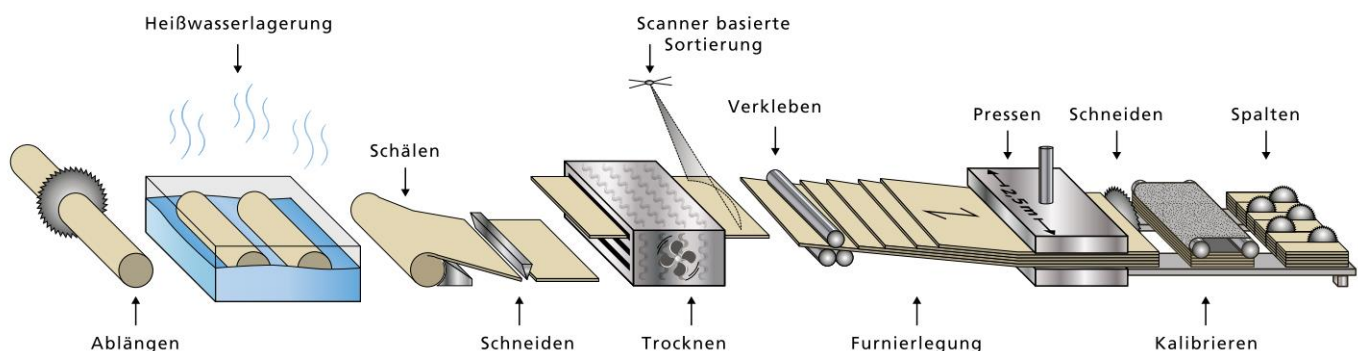


Abbildung 4.1: Furnierschichtholz – Herstellungsprozess [26]

LVL ist ein hochbelastbarer Holzwerkstoff, der sich trotz des geringen Gewichts durch hohe Festigkeit und Tragfähigkeit auszeichnet. Durch diese Eigenschaften können Deckentragwerke mit sehr schlanken Holzquerschnitten realisiert werden, wodurch Material eingespart wird. Ein weiteres Merkmal ist die außerordentliche Dimensionsstabilität dieses Holzwerkstoffs. D.h. das Verdrehen des Querschnitts, wie es bei massivem Vollholz vorkommt, bleibt aus und auch Quell- und Schwindverhalten kann weitestgehend unterbunden werden. Da die Produktionsfeuchte bei nur 9% liegt, kommt es auch zu keinem oder nur geringem Trocknungsschwind lt. Herstellerangaben.

Für die Produktion von LVL wird von den meisten Unternehmen überwiegend Fichte- oder Kiefernholz verwendet. Es werden verschiedene Arten von LVL-Produkten hergestellt, dabei wird zwischen zwei Hauptsorten unterschieden:

- Bei der ersten Hauptsorte haben alle Furnierlagen dieselbe Faserrichtung, wodurch die Festigkeitseigenschaften des Produkts verbessert werden. Somit ist es prädestiniert für stabförmige Bauteile und Balkenkonstruktionen.
- Die zweite Hauptsorte wird für Platten- und Scheibenkonstruktionen verwendet, bei denen es auf die Schubfestigkeit ankommt. Bei diesem Produkt werden ca. 20% der Furnierlagen kreuzweise verklebt, was die Tragfähigkeit beim Einsatz als Platte und die Formstabilität erhöht. [26]

In dieser Diplomarbeit, mit dem Hauptaugenmerk auf HBV-Rippendecken, kommt somit die zuerst genannte Hauptsorte zur Anwendung. Für das Deckentragwerk werden LVL-Balken verwendet, die durch ihre hochkante Positionierung, die Last als Scheibe abtragen.

Die verschiedenen Hersteller haben für dieses Produkt für Balkenkonstruktionen unterschiedliche Produktbezeichnungen. In *Tabelle 4.1* wird konkret auf die Produkte von drei Firmen, die LVL-Balken aus Fichten bzw. Kieferholz herstellen, eingegangen. Diese fließen später auch in die Berechnung ein.



Abbildung 4.2: LVL - Laminated Veneer Lumber [27]


Unternehmen	Produktbezeichnung	Zentrale	Homepage
Stora Enso	 storaenso	Typ S oder S - Grade	Finnland www.storaenso.com
Steico	 STEICO Das Naturbausystem	LVL R	Deutschland www.steico.com
Metsä Group	 MetsäWood	Kerto - S	Finnland www.mestagroup.fi

Tabelle 4.1: Produktbezeichnungen der Herstellerfirmen

Des Weiteren gibt es auch Unternehmen, die sich auf die Herstellung von LVL aus Buchenholz spezialisiert haben. Buchenholz ist zwar um ca. ein Drittel schwerer als Fichtenholz, da aber die Festigkeitseigenschaften des Holzwerkstoffs LVL durch den Einsatz von Buche signifikant höher sind, ist es sinnvoll diesen ebenfalls in der, in *Kapitel 6* durchgeführten, *Parameterstudie* zu berücksichtigen. Ein namhafter Hersteller dieses Produkts ist die Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG. Es wird unter dem Namen „BauBuche“ vertrieben, wobei zwei unterschiedliche Werkstoffausführungen produziert werden. Diese sind für Träger- bzw. Balkenkonstruktionen, welche in diese Arbeit vorrangig betrachtet werden, anwendbar.


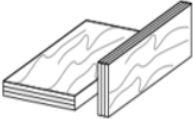
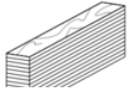
Unternehmen	Produktbezeichnung	Zentrale	Homepage
Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG	 Pollmeier		Deutsch- land www.pollmeier.com
		BauBuche Träger S	
		BauBuche Träger GL70 bzw. Träger GL75	

Tabelle 4.2: Produktbezeichnungen der Firma Pollmeier Massivholz GmbH&Co.KG

In der folgenden Tabelle werden die Festigkeitseigenschaften dieser fünf Furnierschichthölzer miteinander verglichen:

Eigenschaft	Kürzel	Bemessungswerte		
		Stora Enso Typ S	Steico LVL R	Metsä Gr. Kerto-S
Biegung zur Faser [N/mm ²]	f _{m,0,k}	44	44	44
Exponent für Gr. [-]	s	0,15	0,15	
Biegung zur Faser [N/mm ²]	f _{m,0,flat,k}	50	50	50
Zug zur Faser [N/mm ²]	f _{t,0,k}	35	36	35
Zug ⊥ zur Faser [N/mm ²]	f _{t,90,k}	0,8	0,9	0,8
Druck zur Faser [N/mm ²]	f _{c,0,k}	35	40	35
Druck ⊥ zur Faser [N/mm ²]	f _{c,90,k}	6	7,5	6
Schub hochkant [N/mm ²]	f _{v,0,k}	4,1	4,6	4,1
Schub flachkant [N/mm ²]	f _{v,0,k}	2,3	2,6	
Elastizitätsmodul [N/mm ²]	E _{0,mean}	13.800	14.000	13.800
	E _{0,k}	11.600	12.000	11.600
Schubmodul [N/mm ²]	G _{edge,mean}	600	600	600
	G _{edge,k}	400	400	
Dichte [kg/m ³]	ρ _{mean}	510	550	510
	ρ _k	480	480	480

Tabelle 4.3: Vergleich Festigkeitseigenschaften LVL - Teil 1 [27], [26], [28]

Eigenschaft	Kürzel	Bemessungswerte	
		Pollmeier BauBuche S	Pollmeier BauBuche GL75*)
Biegung zur Faser [N/mm ²]	f _{m,0,k}	75	75
Exponent für Gr. [-]	s		
Biegung zur Faser [N/mm ²]	f _{m,0,flat,k}		70
Zug zur Faser [N/mm ²]	f _{t,0,k}	60	55
Zug ⊥ zur Faser [N/mm ²]	f _{t,90,k}	1,5	0,6
Druck zur Faser [N/mm ²]	f _{c,0,k}	57,5	49,5
Druck ⊥ zur Faser [N/mm ²]	f _{c,90,k}	14	8,5
Schub hochkant [N/mm ²]	f _{v,0,k}	8	4
Schub flachkant [N/mm ²]	f _{v,0,k}		
Elastizitätsmodul [N/mm ²]	E _{0,mean}	16.800	16.800
	E _{0,k}	14.900	15.300

Schubmodul [N/mm ²]	G _{edge,mean}	760	850
	G _{edge,k}		760
Dichte [kg/m ³]	ρ _{mean}	800	730
	ρ _k	730	680

Tabelle 4.4: Vergleich Festigkeitseigenschaften LVL -Teil 2 [29]

*) Während dem Verfassen dieser Diplomarbeit wurde das Produkt „Träger GL70“ mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-837 (siehe Tabelle 4.5) adaptiert auf den „Träger GL75“ mit der Europäischen Technischen Bewertung ETA-14/0354 (siehe Tabelle 4.6).

Der Vergleich der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaft der unterschiedlichen LVL-Hersteller zeigt, dass die Produkte aus Nadelholz (Fichte, Kiefer) annähernd die gleichen Eigenschaften aufweisen. Durch den Einsatz von Laubholz in Form von Buchen-Furnierschichtholz können Festigkeiten sowie Steifigkeiten essentiell verbessert werden. Das hat die logische Folge, dass die Querschnittsabmessungen der LVL-Rippen (LVL-Balken) beim Einsatz der „BauBuche“ optimiert werden können. Im Kapitel 6 Parameterstudie wird dies genauer untersucht.

In Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 sind Holzprodukte aus Furnierschichtholz LVL angeführt, die über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) bzw. über eine Europäische Technische Bewertung (ETA) verfügen. Die Bedeutung von Bauprodukten mit einer Zulassung wird im Kapitel 4.3.1 allgemeine Erklärung zur Zulassung genauer erläutert.

Zulassungsnr.	Zulassungsinhaber	Verbindungsmittel	gültig bis
Z-9.1-100	Metsaliitto Cooperative	Zusammengesetzte Bauteile aus Furnierschichtholz "Kerto S" und "Kerto Q"	06/2021
Z-9.1-539	WoodTrade F. Hecht GmbH	Brettschichtholz aus Furnierschichtholzlamellen	06/2020
Z-9.1-678	UGRA TIMBER HOLDING	"UGRA"-Furnierschichtholz	10/2020
Z-9.1-837	Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH	Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz	12/2018
Z-9.1-838	Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH	Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabformiger und flachiger Tragwerke "Platte BauBuche S" und "Platte BauBuche Q"	09/2018
Z-9.1-842	STEICO SE	Furnierschichtholz "STEICOLVL R", "STEICOLVL RS", "STEICOLVL RL" und "STEICOLVL X"	01/2019

Z-9.1-847	Metsaliitto Cooperative	Furnierschichtholz "Kerto-S", "Kerto-Q" und "Kerto-Qp" nach EN 14374	05/2019
Z-9.1-870	STEICO SE	Zusammengesetzte Bauteile aus STEICO LVL Furnierschichtholz – G LVL R	05/2022
Z-9.1-880	Stora Enso	Verwendung von Furnierschichtholzern "LVL by Stora Enso Typ S" und "LVL by Stora Enso Typ X"	05/2023
Z-9.1-811	Modern Lumber Technology Ltd.	Furnierschichtholz "Ultralam R", "Ultralam RS" und "Ultralam X"	05/2020
Z-9.1-291	Metsaliitto Cooperative	Furnierschichtholz "Kerto-T" und "Kerto-L"	06/2021

Tabelle 4.5: aktuelle Holzprodukte aus Furnierschichtholz LVL mit abZ (Stand: 17.8.2018) [30]

Zulassungsnr.	Zulassungsinhaber	Verbindungsmittel	gültig ab/seit
ETA-07/0029	Metsaliitto Cooperative	Vorgefertigte Holzelemente Kerto-Ripa	11/2015
ETA-14/0354	Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH	Träger BauBuche GL75	07/2018

Tabelle 4.6: aktuelle Holzprodukte aus Furnierschichtholz LVL mit ETA (Stand: 17.8.2018) [31]

Grundsätzlich ist für Furnierschichtholz keine ETA notwendig, es gibt die harmonisierte Norm *EN 14374* [32], welche von den Herstellern anzuwenden ist. Ausgenommen davon sind abweichende Produkte, für welche eine ETA benötigt wird, wie zum Beispiel für das LVL-Produkt aus Hartholz der Firma Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH.

4.2 Betonplatte

Die Grundlagen der Deckenkomponente Beton wurde in bereits abgeschlossenen Diplomarbeiten schon ausführlich behandelt, darum wird in dieser Arbeit nur kurz darauf eingegangen. Detaillierte Angaben dazu sind zum Beispiel in der Arbeit von *Herrn Dipl.-Ing. Florian Hölzl* mit dem Titel *Ressourceneffiziente Verbundsysteme bei Holz-Beton-Verbund-Rippendecken* [33] zu finden.

4.2.1 Betonfestigkeitsklassen

Die wichtigste, statisch relevante Eigenschaft des Betons, die darum hier kurz angesprochen wird, ist die hohe Druckfestigkeit. Nach dieser Eigenschaft erfolgt auch die Bezeichnung bzw. die Einteilung der unterschiedlichen Betonsorten in die sogenannten Betonfestigkeitsklassen. In der Betonbezeichnung lt. *ÖNORM B 4710-1* [34] wird zuerst die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} angeführt, gefolgt von der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$. Die Werte beziehen sich auf die mittlere Betondruckfestigkeit für ein Betonalter von 28 Tagen. Für die Berechnung können die zulässigen Spannungswerte und weitere Festigkeitseigenschaften aus der *ÖNORM EN 1992-1-1 Tabelle 3.1* [35] entnommen werden.

Kenngröße	Festigkeitsklassen für Normalbeton				
	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50
char. Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} [N/mm ²]	20	25	30	35	40
char. Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ [N/mm ²]	25	30	37	45	50
char. Betonzugfestigkeit $f_{ck,0.05}$ [N/mm ²]	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5
Elastizitätsmodul Beton E_{cm} [N/mm ²]	30.000	31.000	33.000	34.000	35.000

Tabelle 4.7: Auszug ÖNORM EN 1992-1-1 Tabelle 3.1: Festigkeits- und Formänderungskennwerte für Beton [35]

Eine weitere Unterteilmöglichkeit von Beton sind die Expositionsklassen. Dabei werden die Einwirkungen aus verschiedenen Umweltbedingungen berücksichtigt. Die Rede ist von der Widerstandsfähigkeit des jeweiligen Betonbauteils gegen chemische und physikalische Einwirkungen, um eine gewisse Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Die Expositionsklasse spielt aber in dem, in dieser Diplomarbeit behandelten, Anwendungsfall nur eine untergeordnete Rolle, da es sich bei Geschoßdecken um „Bauteile in Innenräumen mit üblicher Luftfeuchte“ handelt und somit keine extremen Umgebungsbedingungen vorherrschen – es ist in der Regel die Expositionsklasse XC1 einzuhalten. [35]

4.2.2 Anforderungen an die Betonplatte aus den diversen Zulassungen

Bei der Planung einer Holz-Beton-Verbund-Decke sind einige Anforderungen an die Betonplatte vorgegeben. Diese einzuhaltenden Parameter sind in den Zulassungen der diversen Verbindungsmittel, die den Verbund zwischen Beton- und Holzbauteil gewährleisten, genau beschrieben. Folgende Anforderungen sind einzuhalten:

- Der Beton muss mindestens der Festigkeitsklasse C 20/25 entsprechen.
- Die Nenngröße des Größtkorns des Betonzugschlags der Betonplatte darf 16 mm nicht überschreiten.
- Die Dicke der Betonplatte darf maximal 70 % der Höhe des Holzbauteils betragen.

- Für Verbundschrauben mit \varnothing 8mm muss die Dicke der Betonplatte mindestens 50mm betragen; für Verbundschrauben mit \varnothing 10mm muss die Dicke der Betonplatte mindestens 70mm betragen.
- Die Dicke der Betonplatte darf höchstens 300mm betragen.
- Im Bereich der Verbindungsmittel ist in der Betonplatte eine Mindestbewehrung anzuordnen. Mindestens eine Betonstahlmatte DIN 488-4 – B500A – 150x6, sofern die Bemessung keinen höheren Bewehrungsgrad verlangt. Die Bewehrung ist unterhalb der Verbundschraubenköpfe anzuordnen.
- Ab einer Plattendicke von >100mm und bei der Ausführung als Fertigteilplatten ist eine Zusatzbewehrung anzuordnen. [30], [31]

Beim Einsatz von HBV-Decken bei Neubauten unterscheidet man grundsätzlich zwischen Halbfertigteil-Decken und Fertigteil-Decken. Auf diese Thematik wird später in *Kapitel 4.3.2.3 Holz-Beton-Verbund-Schrauben mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung* noch näher eingegangen. Im Hinblick auf die Betonplatte ist entscheidend, ob sie als Fertigteil auf die Baustelle oder in ein Werk geliefert wird, wo sie dann montiert wird. Oder ob sie direkt auf der Baustelle, in Form einer Halbfertigteil-Variante, betoniert wird. Wenn die zuletzt genannte Ausführung durchgeführt wird, muss die komplette Deckenkonstruktion bis zum Erreichen einer ausreichenden Betonfestigkeit unterstützt werden. Andernfalls kann es, durch die zusätzliche Auflast des Frischbetons, der im nassen Zustand natürlich keine Last abtragen kann, zu unnötig großen Verformungen kommen.

4.2.3 zeitabhängiges Materialverhalten

Zu den zeitabhängigen Einflüssen zählen das Kriechen und das Schwinden bzw. Quellen von Beton. Unter Kriechen versteht man die Verformungszunahme trotz zeitlich konstanter Lasteinwirkung. Schwinden bzw. Quellen hingegen ist komplett unabhängig von der Lasteinwirkung, hier kommt es zu Volumenänderungen im Beton durch den schwankenden Wasserhaushalt.

Gerade bei Verbundbauteilen sind diese Einflüsse sehr wesentlich, da sich die verschiedenen Materialien unterschiedlich verhalten. In dieser Arbeit wird eine HBV-Decke betrachtet, welche als Einfeldträger ausgeführt ist - somit statisch bestimmt. In der Regel reagiert ein statisch bestimmtes System auf zeitabhängige Materialverhalten mit zunehmenden Verformungen ohne, dass sich die Spannungen im Querschnitt ändern. Da es sich hier um eine Verbundkonstruktion handelt, welche sich, wie bereits erwähnt, durch unterschiedliches Materialverhalten auszeichnet, kommt es hier zu einer Behinderung der zeitverzögerten Verformung. Dies führt zu Zwängen im Bauteilinneren, welche Auswirkungen auf die Eigenspannungen des Bauteils haben. D.h. das System ist zwar äußerlich statisch bestimmt, aber innerlich statisch unbestimmt. Das

zeitverzögerte Verhalten des Bauteils wird hauptsächlich durch die Betonplatte hervorgerufen, da LVL nur geringes zeitverzögertes Verhalten aufweist. Zusätzlich zu den ansteigenden Verformungen kann es zur Spannungumlagerung zwischen den Teilquerschnitten kommen. Im schlimmsten Fall entzieht sich eine Komponente ganz der Belastungsaufnahme. Aus diesem Grund ist es bei Verbundkonstruktionen essentiell, das zeitabhängige Verhalten der Materialien zu kennen und in der Bemessung auf Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit zu berücksichtigen. In *Eurocode 5* [21] sind dazu Bemessungsansätze angeführt bzw. wird in der später folgenden *Parameterstudie* im *Kapitel 6* noch darauf eingegangen. [36]

4.3 Verbindungsmittel

Ein wesentlicher konstruktiver Punkt bei Holz-Beton-Verbund-Deckenkonstruktionen ist, wie der Name schon sagt, der Verbund zwischen Holz und Beton. Optimal wäre ein starrer Verbund zwischen den beiden Baustoffen, dies ist aber aufgrund der Nachgiebigkeit des Holzes und der jeweiligen Verbundausführung nicht umsetzbar. Bei theoretisch vollkommen starrem Verbund kommt es zu keiner Relativverschiebung in der Verbundfuge. Somit würde die Holz-Beton-Konstruktion statisch gesehen als ein monolithisches Bauteil wirken. In der Realität kommt es aber zu einer Relativverschiebung in der Schub- bzw. Verbundfuge. Dies wird als nachgiebiger Verbund bezeichnet. Die Größe dieser Nachgiebigkeit wird über ein Verschiebungsmodul K_{ser} definiert, das angibt welche Kraft notwendig ist, um eine definierte Verschiebung zu erzeugen. Um die Verschiebung in der Fuge zwischen Holz und Beton möglichst gering zu halten, ist ein hohes Verschiebungsmodul gewünscht. Zusätzlich ist ein duktileres Verhalten des Verbindungsmittels vorteilhaft, da dadurch Kraftspitzen, durch Verteilung der Kraft auf die Verbindungsmittel, vermieden werden. Außerdem kommt es zu keinem spröden Versagen des Bauteils. In *Abbildung 4.3* ist eine ideale Arbeitslinie eines Verbindungsmittels dargestellt. [37]

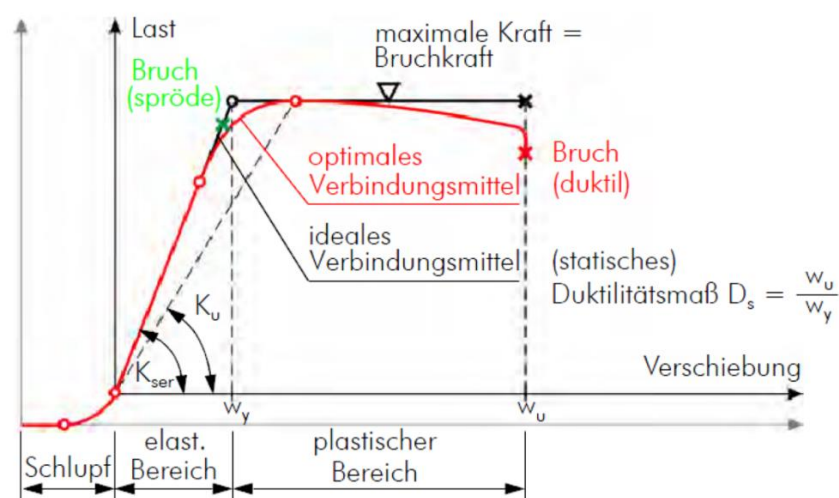


Abbildung 4.3: ideale Arbeitslinie eines Verbindungsmittels [37]

Die Wahl des Verbindungsmittels wird in erster Linie aufgrund des jeweiligen Anwendungsfalls und der sich daraus ergebenden konstruktiven Gegebenheiten getroffen. Des Weiteren wird zwischen Verbindungsmittel mit Zulassung und Verbindungsmittel ohne Zulassung unterschieden. Bevor die diversen möglichen Verbindungsmittel aufgezählt werden und jene, die speziell für den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall in Frage kommen, beschrieben werden, wird im folgenden Unterpunkt die Bedeutung einer Zulassung kurz erklärt.

4.3.1 allgemeine Erklärung zur Zulassung

Für Bauprodukte, die von den bestehenden Normen abweichen oder genauer:

- es liegt keine harmonisierte Norm vor
- wesentliche Leistungsmerkmale von der harmonisierten Norm werden nicht abgedeckt
- das in der harmonisierten Norm vorgesehene Bewertungsverfahren für ein Leistungsmerkmal ist nicht geeignet

besteht die Möglichkeit durch Erbringen von Prüfungen und technischen Nachweisen eine Zulassung für das Bauprodukt zu erhalten, welches einen sicheren Vertrieb des Produkts ermöglicht und diesen essentiell vereinfacht. Für den untersuchten Anwendungsfall einer HBV-Decke bestehen bereits Zulassungen sowohl für Verbindungsmittel in Form von Verbundschrauben, als auch für den Holzwerkstoff LVL. [38]

Die Prüfung und Bewertung der Bauprodukte und die Ausstellung der jeweiligen Zulassung wird durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) vorgenommen. Dabei unterscheidet man zwischen zwei wesentlichen Zulassungsmöglichkeiten.

Das nationale Zulassungsdokument wird als allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) bezeichnet und ist zum Vertrieb von Bauprodukten und Bauarten auf dem nationalen Markt auf Grundlage der Landesbauordnung geeignet. Die Geltungsdauer von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen beträgt in der Regel fünf Jahre, kann aber durch Antragstellung verlängert werden. Durch das Erhalten einer abZ, darf das Bauprodukt mit dem Ü-Zeichen versehen werden.

Für eine europaweite Vermarktung von Bauprodukten und Bausätzen eignet sich das Zulassungsdokument mit dem Namen Europäische Technische Bewertung (European Technical Assessment – ETA). Bis 2013 hatte ETA die Bedeutung „European Technical Approval“ mit einer Gültigkeit von 5 Jahren und oblag der Grundlage der Bauproduktrichtlinie. Danach würde diese durch die EU-Bauprodukteverordnung (BPVo) ersetzt. Seitdem sind Europäische Technische Bewertungen zeitlich unbefristet und gelten solange das Produkt selbst nicht verändert wird und sich keine relevanten Änderungen in den Normbezügen, Prüfgrundlagen und technischen Erkenntnissen ergeben. Veraltete ETAs sind noch bis zum Ablauf gültig bzw. werden bei

Verlängerung auf den neuen Modus erweitert. Wird eine ETA vom DIBt ausgestellt, darf das Produkt mit einer CE-Kennzeichnung versehen werden und erhält dadurch uneingeschränkten Zugang zum europäischen Markt.

Besitzt ein Bauprodukt eine vom Prüfinstitut ausgestellte Zulassung bzw. Bewertung, sind die für die Berechnung notwendigen Werte und Parameter bereits im Vorhinein festgelegt und genehmigt. Werden Bauprodukte, in diesem Fall Verbindungsmittel oder Holzwerkstoffe ohne eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder einer Europäischen Technischen Bewertung für die HBV-Konstruktion verwendet, ist eine Zustimmung der Behörde bzw. des Prüfinstitutes im Einzelfall einzuholen. Dies ist mit zusätzlichen Kosten und erhöhtem Zeitaufwand verbunden und kann den Planungsaufwand und das Planungsrisiko erhöhen. [33], [38]

4.3.2 Arten von Verbindungsmittel

In *Tabelle 4.8* und *Tabelle 4.9* werden alle Verbindungsmittel von Holz-Beton-Verbund-Deckenkonstruktionen, die derzeit über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung abZ oder eine Europäische Technische Bewertung ETA verfügen aufgelistet.

Zulassungsnummer	Zulassungsinhaber	Verbindungsmittel	gültig bis
Z-9.1-342	SFS intec AG	SFS VB Schrauben als Verbindungsmittel in HBV-Konstruktionen	10/2020
Z-9.1-445	Sieglinde Amrath; Timco DE	Timco II und III Schrauben als Verbindungsmittel für das Timco HBV-System	11/2022
Z-9.1-557	TiComTec GmbH	HBV-System mit eingeklebten HBV-Schubverbindern	06/2020
Z-9.1-474	VEIT DENNERT KG	Dennert Holz-Beton Verbundelemente	09/2021
Z-9.1-603	Com-Ing AG	TCC Schrauben als Verbindungsmittel für das TCC HBV-System	08/2020
Z-9.1-845	Schmid Schrauben Hainfeld GmbH	Star-Drive und RAPID Schrauben als Verbindungsmittel für das Schmid Schrauben HBV-System	04/2019
Z-9.1-851	Com-Ing AG	BiFRi Verbund-Anker als Verbindungsmittel für das Friedrich HBV-System	03/2020
Z-9.1-857	Elascon GmbH	SFix-3 Schubfix-Schraube als Verbindungsmittel für das Elascon HBV-System	10/2020
Z-9.1-861	SIHGA® GmbH	Hobet Schrauben als Verbindungsmittel für HBV-Systeme	05/2021
Z-9.1-862	PMJ-tec AG	PMJ-6090 Schrauben als Verbindungsmittel in HBV-Systemen	06/2021

Tabelle 4.8: aktuelle Verbindungsmittel mit einer abZ (Stand: 18.8.2018) [30]

Zulassungsnr.	Zulassungsinhaber	Verbindungsmittel	gültig ab/seit
ETA-13/0699	SFS intec AG	SFS VB Schrauben als Verbindungsmittel in HBV-Konstruktionen	06/2018
ETA-13/0029	Adolf Würth GmbH & Co. KG	Selbstbohrende Schrauben zur Verwendung in HBV-Bauteilen	07/2017
ETA-18/0264	Elascon GmbH	SFix-3 Schubfix-Schraube als Verbindungsmittel für das Elascon HBV-System	09/2018
ETA-12/0373	Schmid Schrauben Hainfeld GmbH	Schmid Schrauben RAPID; STARDRIVE und SP	11/2017
ETA-16/0864	E.u.r.o.Tec GmbH	Holz-Beton-Verbund Befestigungstechnik	11/2016

Tabelle 4.9: aktuelle Verbindungsmittel mit einer ETA (Stand: 18.8.2018) [31]

Unter anderem sind folgende Verbindungsmittel ohne allgemeine bauaufsichtliche Zulassung in der Praxis gebräuchlich:

- Eingeklebte Stahlstäbe
- Verbindungen mittels Nägel oder Sechskantschrauben
- Nagelplattenverbindungen
- System Peter Cox
- Tecnaria Conector (Kopfbolzendübel)
- Dübelleisten
- BVD-Bertsche-Verbundanker
- Balkenschuhe
- Unbewehrte, bewehrte oder vorgespannte Betonnocken
- Kerven
- Klebeverbindungen
- Haftverbindungen
- Flachstahlschloss (Zulassung bereits abgelaufen) [37]

In den folgenden Unterkapiteln werden nun jene Verbindungsmittel detailliert beschrieben, die für den, in dieser Arbeit beschriebenen Anwendungsfall, in Frage kommen. Bzw. wurden für die Fertigteil-Verbinder von der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG kombiniert mit den RAPID®

Vollgewinde-Schrauben und die Holz-Beton-Verbundschrauben RAPID® T-Con der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH *experimentelle Untersuchungen* anhand von Scherversuchen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in *Kapitel 5* ausgewertet und diskutiert.

4.3.2.1 Fertigteil-Verbinder (FT-Verbinder) der Firma Würth

Seit 2012 ist der sogenannte Fertigteil-Verbinder der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG und dem SWG Schraubenwerk Gaisbach GmbH auf dem Markt erhältlich. Es ist ein Schraubensystem für HBV-Deckenkonstruktionen, das sich sowohl durch seine hohe Tragfähigkeit bei nachgiebigem Verbund zwischen Holz und Beton, als auch durch die Möglichkeit eines hohen Vorfertigungsgrades auszeichnet.

Der FT-Verbinder wirkt als Schubverbinder, der in die Betonplatte eingegossen wird und es ermöglicht durch die fertige Betonplatte in einem flachen Einschraubwinkel von 30° eine selbstbohrende Schraube zu setzen, um den Verbund zwischen Holz und Beton herzustellen. Er besteht aus einer Kunststoffbuchse, bei der kopfseitig eine Stahlplatte angeordnet ist, welche für die zum Einsatz kommende Vollgewindeschraube mit Senkkopfausführung als Unterlagscheibe dient.

Der Beton leitet über diese Stahlplatte die Last durch Pressung in den Schraubenkopf der ASSY® plus Vollgewindeschraube der Firma Würth oder eine bauähnliche Schraube ein, welche im darunterliegenden Holzbauteil verankert ist. Durch die Lastumlenkung entsteht eine resultierende Kraft, die senkrecht zur Bauteilfuge wirkt und folglich einen Anpressdruck erzeugt. Dies erhöht den Reibwiderstand zwischen Holz und Beton. [39]



Abbildung 4.4: Fertigteil-Verbinder der Firma Würth [39]

Diese Art des Verbundes ermöglicht es, Betonplatten mit den inkludierten und an den richtigen Stellen positionierten FT-Verbindern getrennt vom Holzbau vorzufertigen. Die vorgefertigten Fertigteil-Betonplatten können dann entweder noch im Werk mit den Holzrippen bzw. Massivholzplatten zu HBV-Elementen verschraubt werden oder was die derzeit gängigere Variante ist, auf die Baustelle transportiert werden und dort auf der bereits verlegten Holzkonstruktion positioniert und mit dieser nachträglich vor Ort verschraubt werden.

Unmittelbar nachdem die Schrauben gesetzt werden, wird die Verbundwirkung aktiviert. Diese Verbundmöglichkeit bringt einige positive Aspekte mit sich:

- Die Aushärtungs- und Trocknungszeiten des Betons entfallen komplett.
- Es kommt zu keinem Feuchteintrag in das Holzbauteil.
- Auf die Trennlage, in der Regel eine Polyethylen-Folie, zum Schutz des Holzes kann verzichtet werden und somit wird der Reibwiderstand zwischen Holz und Beton erhöht, was statisch gesehen positiv zu bewerten ist.
- Es gibt keine Verschmutzungen der Holzbauteile, durch Wasserausscheidungen des Betons; somit bleibt die Sichtqualität der Deckenunterseite ohne zusätzlichen Aufwand erhalten.
- Durch den hohen Vorfertigungsgrad können Transport- und Montagezeiten sowie die Bauzeit drastisch reduziert werden.
- Beim Aushärten kommt es zum Schwinden des Betons. Ist der Verbund während des Aushärtens schon hergestellt, wird der Betonschwund gehindert. Das macht sich in Form von Zwängen bzw. Eigenspannungen in der Hybridkonstruktion bemerkbar. In der Berechnung wird dies durch das Ansetzen einer zusätzlichen horizontalen äußeren Last simuliert. Bei vorgefertigten „trocken“ montierten Betonplatten kann diese Last vernachlässigt werden, da das Schwinden zum Montagezeitpunkt größtenteils bereits abgeschlossen ist.
- Da die Betonplatte als Fertigteil montiert wird und sofort nach dem Setzen der Schrauben der Verbund hergestellt ist, trägt diese unmittelbar nach der Montage zur Lastabtragung bei und es kann auf eine zusätzliche Unterstützung der Decke in der Betonier- und Aushärtphase verzichtet werden. Dies spart Zeit und erhöht die Wirtschaftlichkeit der Verbundkonstruktion.

Ein allgemeiner Nachteil im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit bei stiftförmigen Verbindungsmittel für diese Anwendung ist, dass eine hohe Anzahl an Verbindungsmittel benötigt wird und trotzdem nur eine verhältnismäßig geringe Tragfähigkeit erreicht wird. Dadurch entstehen hohe Montagekosten. Diesem negativen Aspekt kann mit dem FT-Verbinder durch die erhöhte Tragfähigkeit der einzelnen Verbindungselemente entgegengewirkt werden. Das wird erreicht durch die vergrößerte Schubfläche mit Hilfe der integrierten Metalplatte, die vergrößerten Schraubendimensionen und den flachen Einschraubwinkel von 30° zur Scherfuge.

Alternativ besteht auch die Möglichkeit den FT-Verbinder für den Verguss mit Nassbeton auf der Baustelle einzusetzen und dadurch die Anzahl der benötigten Verbindungsmittel zu reduzieren.



Abbildung 4.5: Montage einer Fertigteilplatte mit FT-Verbindern auf einer Balkenlage [39]

4.3.2.2 Schubkerven

Schubkerven sind quer zur Deckenspannrichtung angeordnete Einfräsungen im Holzbauteil, die dann beim Betonieren der Betonplatte ausgegossen werden. Durch Druck an den Kontaktflächen zwischen Holz und Beton werden die Schubkräfte übertragen. Da die Druckkraft exzentrisch übertragen wird, wird oft eine vertikal angeetzte Schraube, als Abhebesicherung des Betons, in der Kerbe angeordnet. Diese zusätzlich angeordneten Schrauben sollten aber wenn möglich vermieden werden, da es mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist.

Kerven sind Kontaktverbindungen, die über sehr hohe Werte für Steifigkeit und Tragfähigkeit verfügen. Dadurch lässt sich die Querschnittshöhe der Verbundkonstruktion reduzieren, wodurch sie auch Anwendung bei weitgespannten Bauteilen finden.

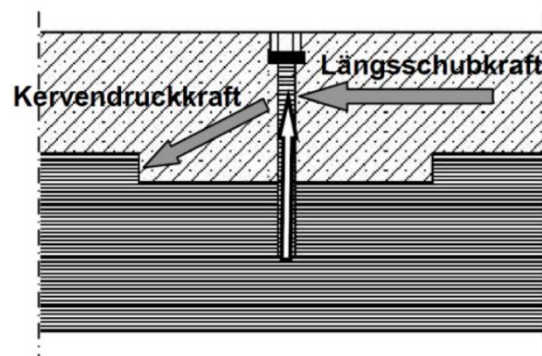


Abbildung 4.6: Darstellung der Schubkraftübertragung zwischen Holz und Beton bei Kerven [37]

Die Anwendung von Schubkerven als Verbindungsmittel in HBV-Konstruktionen ist aufgrund dessen, dass nur eine geringe Anzahl an Kerven notwendig ist und die Herstellung auf der Abbundanlage keinen großen Aufwand darstellt, vermutlich das Günstigste und somit wirtschaftlichste Verbindungsmittel.

Kerven sind prädestiniert für die Anwendung bei flächigen HBV-Decken aus Massivholz, wie zum Beispiel Brettstapeldecken, da die Kerven über die komplette Deckenbreite reichen und somit große Kontaktflächen zwischen Holz und Beton zustande kommen.

Wie bereits bekannt, sind LVL-Rippen die Fixkomponente der Holz-Beton-Verbund Konstruktionsentwicklung in dieser Diplomarbeit. Da die Kervertiefe in der Regel zwischen 3cm und 5cm liegt und die LVL-Rippenquerschnitte eher schmal ausfallen, kommt nur eine kleine Kervenseitenfläche zustande. Über diese Fläche wird die Schubkraft eingeleitet und dadurch der Verbund zwischen Holz und Beton hergestellt. [40], [37]

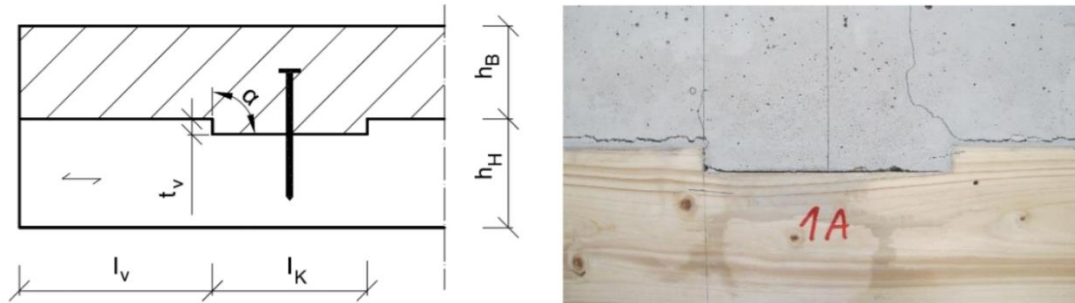


Abbildung 4.7: Kervenparameter (links); Darstellung einer Kervenverbindung (rechts) [40]

Beim Life Cycle Tower in Dornbirn, besteht die HBV-Deckenkonstruktion aus Balken- bzw. Rippendeckenelementen mit einer maximalen Deckenspannweite von 9,45m. Als Verbindungsmittel wurde eine Kombination zwischen Kerven und Schrauben verwendet. Für die Holzrippen kamen hier Brettschichtholzträger mit einer Breite von 24 cm zum Einsatz. [41]

Mit Hilfe der statischen Nachweisführung (siehe Kapitel 6.2.3 Nachweisführung) gilt es herauszufinden, ob beim hier behandelten Anwendungsfall eine Kervelösung trotz der schmal ausfallenden LVL-Rippen möglich bzw. sinnvoll ist.

4.3.2.3 Holz-Beton-Verbund-Schrauben mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung

Wie in Tabelle 4.8 und Tabelle 4.9 angeführt, sind einige Verbindungsmittel auf dem Markt, die über eine abZ oder ETA verfügen. Die meisten dieser Verbindungsmittel sind unterschiedliche Ausführungen von HBV-Schrauben. In diesem Unterpunkt wird die Wirkungsweise bzw. die Anwendung von diesen Schrauben kurz erläutert und anschließend etwas genauer auf die Ausführung der HBV-Schrauben RAPID® T-Con der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH [Z-9.1-845], sowie die RAPID® Vollgewinde-Schrauben [ETA-12/0373] ebenfalls von Schmid Schrauben Hainfeld GmbH im Vergleich mit den Assy® plus Vollgewinde-Schrauben der Firma Würth [ETA-13/0029] eingegangen. Diese Schrauben waren auch Teil der Scherversuche, welche in Kapitel 5 Experimentelle Untersuchung detailliert behandelt werden.

Mit Hilfe dieser Art von Verbundschrauben werden vermehrt HBV-Decken im Halfertigteil-Verfahren hergestellt. D.h. auf die bereits montierte Unterkonstruktion aus Holz, welche als Flachdecke, aus z.B. CLT - Cross Laminated Timber oder Rippendecke aus Holzwerkstoff-Balken ausgeführt ist, wird der Beton auf der Baustelle vergossen. Bei Flachdecken kommen in der Regel

andere Verbindungsmittel, wie z.B. HBV-Schubverbinder oder Flachstahlschlösser zum Einsatz. Die Verbundschrauben finden oft für HBV-Rippendecken Verwendung. Bei Rippendecken wird vor dem Betonieren eine sogenannte „verlorene Schalung“ auf die Balken montiert und zum Schutz vor dem Feuchteintrag durch den Beton eine Folie verlegt. Anschließend werden die Verbundschrauben, je nach Montageart eingeschraubt bevor dann die Betonplatte betoniert wird. Mit „Montageart“ ist der Schraubenneigungswinkel sowie die Schraubenanordnung gemeint, durch die das Schubverhalten wesentlich beeinflusst wird. Wie in *Kapitel 4.2.2 Anforderungen an die Betonplatte aus den diversen Zulassungen* bereits erwähnt wurde, muss bei dieser Variante die Konstruktion für die Dauer der Betonaushärtung gestützt werden. [37], [39]

Es gibt verschiedenste Montageweisen der Verbundschrauben. Diese beiden oben angeführten Schraubentypen dürfen lt. Zulassung nur im 90° Winkel zur Scherfuge und somit auf Abscherung beansprucht oder im Winkel von 45° (30°) auf Zug beansprucht montiert werden. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass Reibkräfte in der Scherfuge zwischen Beton und Holz übertragen werden können. D.h. es entsteht ein zusätzlicher Scherwiderstand, der sich aus der entstehenden Kraft orthogonal zur Scherfuge F_c multipliziert mit dem Reibungskoeffizienten μ berechnet (siehe *Abbildung 4.8(a)*).

Andere Schraubenhersteller wie z.B. SFS intec AG geben unter anderem auch eine überkreuzte, paarweise Schraubenanordnung ($45^\circ/135^\circ$) an, wie in *Abbildung 4.8(b)* ersichtlich. Dadurch werden die Schrauben sowohl auf Zug als auch auf Druck beansprucht. Hier darf diese zusätzliche Scherkraft nicht angesetzt werden, da sich kein Anpressdruck zwischen Holz und Beton ausbildet. [42]

In der *Abbildung 4.8* befindet sich zwischen den Bauteilkomponenten Holz und Beton keine verlorene Schalung und keine Schutzfolie, wie im vorherigen Absatz beschrieben. Wie dies umgesetzt werden kann und warum es positive Auswirkungen auf das Schubverhalten hat wird in *Kapitel 4.4 Element- bzw. Systembauweise* für das Baukastensystem sowie im folgenden Absatz beschrieben.

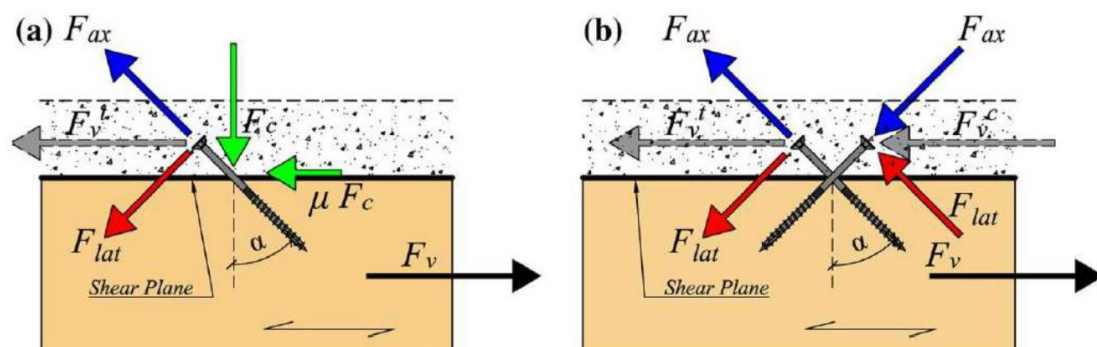


Abbildung 4.8: Kräfteausbildung bei Scherbeanspruchung: (a) überwiegend auf Zug beanspruchte Schrauben (b)

Überkreuzanordnung: Zug- und Druckbeanspruchung der Schrauben [42]

In der Diplomarbeit von *Herrn Dipl.-Ing. Christian Bosnjak* mit dem Titel: *Entwicklung praxisorientierter Bemessungshilfen zur Steigerung der Ressourcen- und Materialeffizienz der Holz-Beton-Verbunddecken* [42] wurden anhand von Kleinteil-Scherversuchen diverse Schraubenanordnungen und Schraubenneigungswinkel untersucht und mit bereits bestehenden Ergebnissen von vorhergehenden Versuchen verglichen. Zusammenfassend kam man hier zu folgendem Ergebnis:

- Durch Erhöhen des Schraubendurchmessers sind nur minimale Verbesserungen der Schubsteifigkeit oder Traglast zu erreichen. Größeren Einfluss hat die Einbindetiefe l_{ef} der Schraube im Holzwerkstoff. Dies ist lt. Diplomarbeit von *Herrn Dipl.-Ing. Bosnjak* abhängig vom Verhältnis Einbindetiefe l_{ef} zum Schraubendurchmesser d . Ab einem Verhältnis >9 wird durch eine weitere Steigerung von l_{ef} kein Vorteil mehr erzielt. D.h. für Schraubendurchmesser im Bereich von 8 bis 10mm, wie sie für diesen Anwendungsfall üblich sind, ist eine maximale Einschraubtiefe von 100 mm mehr als ausreichend.
- Je flacher der Neigungswinkel (Winkel zwischen Scherfuge und Schraubenachse), desto größer ist der Normkraftanteil in der Schraube. Dies erhöht die Steifigkeit der Verbindung, jedoch muss die Anordnung so gewählt sein, dass die Schrauben auf Zug beansprucht werden.
- Werden Schrauben aufgrund ihrer Anordnung überwiegend auf Druck beansprucht, sind Parameter wie Betondeckung, Betonfestigkeit und Betonsteifigkeit entscheidend für das Schubverhalten der Verbindung. Die erreichten Festigkeits- bzw. Steifigkeitswerte können aber nicht annähernd mit zugbeanspruchten Schrauben mithalten. Dazu kommt, dass in den meisten Zulassungen eine Schraubenanordnung, die eine Zugbeanspruchung hervorruft, vorgeschrieben ist.
- Durch überkreuzte Schraubenanordnungen (Zug/Druck) können gute Ergebnisse erzielt werden. Sie schneiden jedoch im Vergleich schlechter ab, als auf Zug angeordnete Schrauben. Für die Anwendung als Durchlaufträger, bei welcher eine Druckbeanspruchung der Schrauben kaum vermieden werden kann, ist eine überkreuzte Anordnung im Bereich des Mittelaflagers am effektivsten. In dieser Arbeit werden aber nur Decken betrachtet, die über ein Feld gespannt sind.
- Es ist empfehlenswert auf die verlorene Schalung und die Schutzfolie zu verzichten falls es konstruktiv möglich ist bzw. es die Gegebenheiten zulassen. Die Schalung trägt nichts zur Biegesteifigkeit des Hybridbauteils bei, durch diese Zwischenschicht entsteht aber ein Spalt, der unabhängig von der Schraubenanordnung dazu neigt, sowohl die Maximalkraft als auch das Verschiebemodul zu reduzieren. Durch die Folie wird verhindert, dass sich ein Reibwiderstand zwischen der Beton- und Holzoberfläche ausbildet. Das wiederum hat

negative Auswirkungen auf das Scherverhalten der Schubfuge. Die Fertigteil-Elementbauweise bietet dafür eine Möglichkeit (siehe Kapitel 4.4). [42]

4.3.2.3.1 RAPID® T-Con Holz-Beton-Verbundschraube [Z-9.1-845]

Die Rapid® T-Con HBV-Schraube ist ein Produkt der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH. Es ist eine selbstbohrende HBV-Schraube mit einem Durchmesser von 8 mm und wird in den gängigen Längen von 155 mm und 205 mm hergestellt. Lt. Zulassung darf sie im Winkel zwischen 90° (L=155mm) und 45° (L=205mm) eingeschraubt werden. Sie wird bis zum Gewindeende in die Unterkonstruktion aus Holz (inkl. Schalung und Folie falls vorhanden) eingedreht (ca. 130mm) und anschließend wird die noch herausstehende Schraubenlänge (min. 65mm) in der Betonplatte vergossen und dadurch der Verbund hergestellt. In der Berechnung darf lt. Zulassung eine maximale Einbindetiefe l_{ef} im Holzbauteil von 100 mm angesetzt werden. [30]

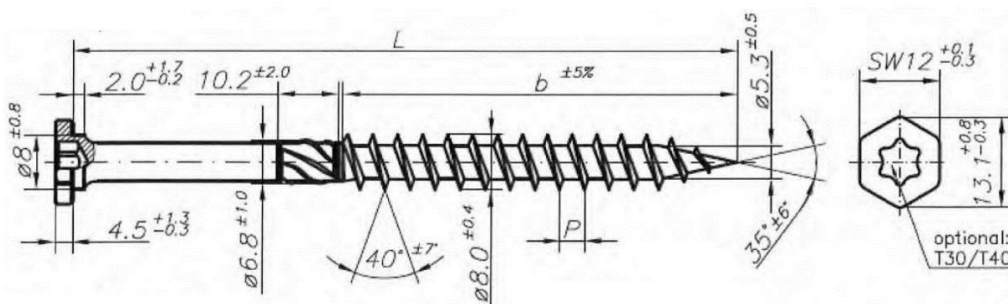


Abbildung 4.9: RAPID® T-Con HBV-Schraube [30]

4.3.2.3.2 Vergleich RAPID® VG-Schraube [ETA-12/0373] / Assy® plus VG-Schraube [ETA-13/0029]

Die RAPID® VG-Schraube wird von der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH und die Assy® plus VG-Schraube von der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG produziert. Zweiteres sind, lt. ETA, Schrauben für Holz-Beton-Verbund-Konstruktionen die, gleich wie im vorherigen Absatz 4.3.2.3.1 beschrieben, in einem Verbundbauteil zur Anwendung kommen. Diese dürfen im Winkel von 90°, 45° oder 30° (nur in Kombination mit FT-Verbinder) zur Schubfuge montiert werden. Zusätzlich zu dieser Anwendung, kann die Assy® plus VG-Schraube auch in Kombination mit dem FT-Verbinder (siehe Kapitel 4.3.2.1) eingesetzt werden. In dieser Anwendung, wie sie auch in dieser Arbeit vorliegt, ist der Schraubenkopf als Senkkopf ausgeführt, um die Kraft vom einbetonierten FT-Verbinder in die Schraube einzuleiten. Die Schrauben werden mit Ø 8 mm und Längen zwischen 150 und 600mm bzw. mit Ø 10 mm und Längen zwischen 200 und 800mm hergestellt. Für die FT-Verbinder müssen Schrauben mit Ø 10mm verwendet werden. Der FT-Verbinder ist nicht eigenständig bewertet worden. Eine grundlegende Bewertung ist aber in der ETA für die Assy® plus VG-Schraube [ETA-13/0029] inkludiert. [31]

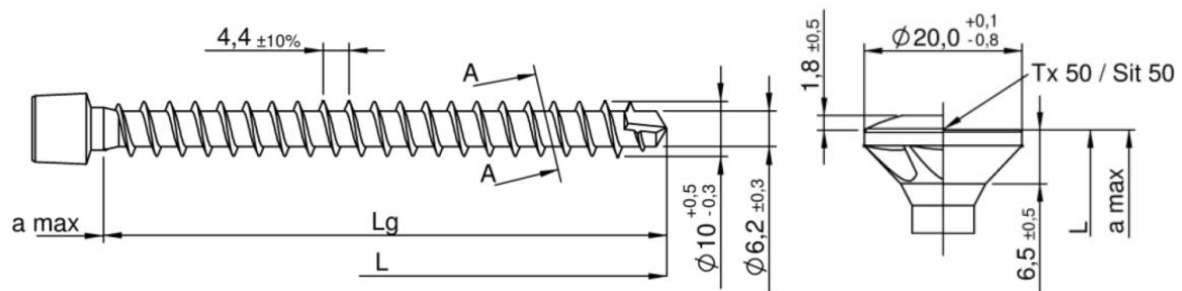


Abbildung 4.10: Assy® plus VG-Schraube / Abmessungen Senkkopf für \varnothing 10 mm [31]

Die RAPID® VG-Schrauben hingegen sind in der ETA als Verbindungen in tragenden Holzbauwerken zwischen Holzbauteilen bzw. zwischen diesen Bauteilen und Stahlteilen definiert. Die Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH hat aus diesem Grund einen ETA-Werte-Vergleich zwischen diesen beiden Vollgewindeschrauben durchgeführt, um zu prüfen ob, die RAPID® VG-Schraube auch zur Anwendung in HBV-Systemen geeignet ist. Der Vergleich ergibt, dass die RAPID® VG-Schraube in allen wesentlichen Parametern sogar besser abschneidet, nur die Senkkopf-abmessungen sind etwas kleiner (siehe *Abbildung 4.11*). Somit wurde, in Absprache mit der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH beschlossen, für die, in *Kapitel 5* beschriebenen Kleinteile-Scherversuche mit FT-Verbinder, die RAPID® VG-Schraube mit den Abmessungen \varnothing 10mm und L=200mm einzusetzen. Diese Schraube wird in vielen Dimensionen hergestellt, wie in der Zulassung ETA-12/0373 ersichtlich ist. [31]

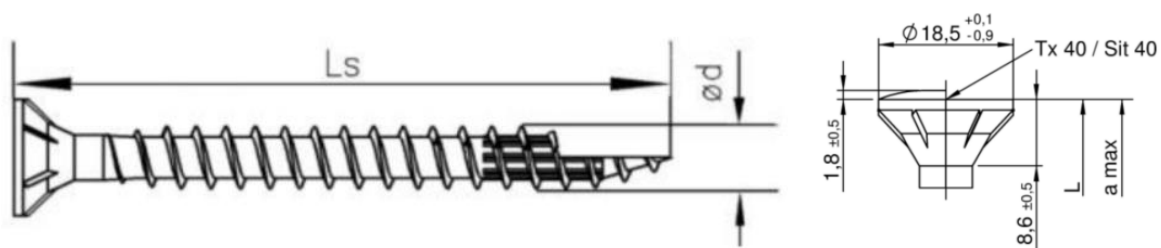


Abbildung 4.11: RAPID® VG-Schraube / Abmessungen Senkkopf für \varnothing 10 mm [31]

4.4 Element- bzw. Systembauweise für das Baukastensystem

Eine sehr innovative Möglichkeit einer Holz-Beton-Verbund-Konstruktion wird über eine Art Baukastensystem erzielt und bringt speziell für den Holzhochhausbau einige Erleichterungen und Vorteile bei der Umsetzung von HBV-Lösungen mit sich. Dabei werden HBV-Deckenelemente aber auch Wandelemente mit transportfähigen Abmessungen im Werk hergestellt. Die Deckenelementlänge entspricht dabei der Spannweite der jeweiligen Decke und der Breitenraster wird so gewählt, dass ein möglichst einfacher Transport der Elemente gewährleistet werden kann. Hier ist es vorteilhaft die Breite so zu wählen, dass die Elemente in der Einbaulage übereinander gestapelt werden können und nicht hochkant transportiert werden müssen, um Transportschäden an den Elementen zu vermeiden. Die fertigen Deckenelemente

werden dann auf die Baustelle transportiert, mit dem Kran eingehoben und je nach System montiert.

Die durchgehende Betonplatte, inklusive den beidseitig angeordneten Sturzträgern aus Stahlbeton (*siehe Abbildung 4.13*) ist sehr vorteilhaft im Hinblick auf den Raumabschluss (E) und ist generell hilfreich, um die Feuerwiderstandskriterien zu erfüllen. Diese Thematik wurde bereits in *Kapitel 3.2 OIB-RL 2.3 Brandschutz* detailliert behandelt.

Durch die elementweise Vorfertigung kann bei der Anwendung von HBV-Schrauben auch auf die verlorene Schalung und die Schutzfolie verzichtet werden. Hierzu gibt es zwei praxiserfahrene Umsetzungsvarianten für Rippendecken.

- Eine Möglichkeit ist es im ersten Schritt die Verbundschrauben in die Holzbalken einzuschrauben. Anschließend werden die Balken umgekehrt in das Schalbett eingetaucht bis die Schrauben gerade vollständig im Beton versinken. Bis der Beton ausgehärtet ist, müssen die Holzbalken nun in dieser Position gehalten werden. Danach kann das fertige Holz-Beton-Verbund-Element aus der Schalung genommen werden und ist montier- bzw. transportbereit. Der Nachteil bei dieser Fertigungsvariante ist, dass eine sehr hohe Genauigkeit bei der Herstellung der Elemente gefordert ist. [39]
- Eine weitere Produktionsvariante, welche für den LCT-Life Cycle Tower in Dornbirn von der Firma CREE GmbH (Tochterunternehmen der Rhomberg-Gruppe) entwickelt wurde, ist folgende: Die Basis für die Vorfertigung bildet eine Stahlschalung, die dem Elementraster entspricht. In diese Stahlschalung werden die Holzwerkstoff-Balken positioniert und die jeweiligen Verbindungsmittel, wie zum Beispiel HBV-Schrauben gesetzt. Anschließend wird sowohl über die komplette Elementfläche aber auch stirnseitig die notwendige Stahlbewehrung positioniert. In einem letzten Schritt wird der Beton vergossen. Nach dem Aushärten ist das Deckenelement einsatzbereit. Beim Life Cycle Tower wurden dieses Produktionsverfahren angewendet aber, wie bereits erwähnt, die Elemente aus Brettschichtholzträgern und der Verbund über Schubkernen kombiniert mit Verbundschrauben hergestellt. Dieses Verfahren ist aber auch auf andere Bauteile, wie in diesem Fall LVL-Rippen, umlegbar. [41], [5]

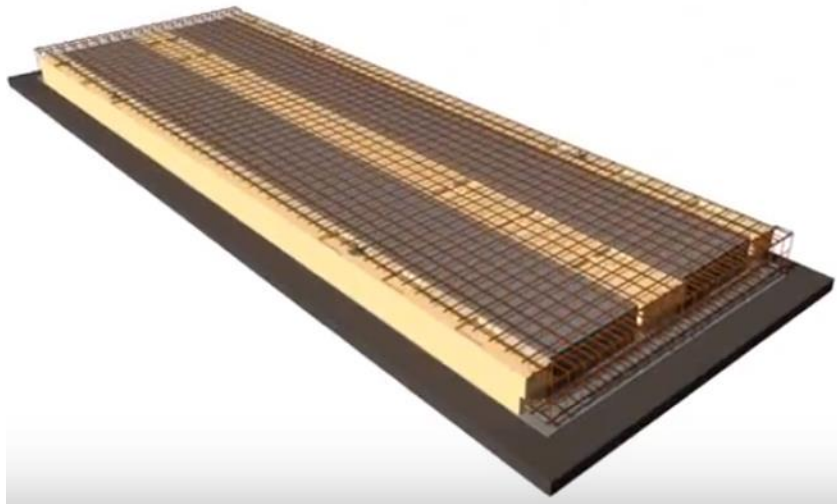


Abbildung 4.12: Herstellung eines Deckenelements in der Stahlschalung [41]

Entscheidend bei der Elementbauweise ist, dass nach dem Einbringen der einzelnen Deckenelemente ein Verbund zwischen diesen hergestellt wird, um eine monolithische Decke und somit eine kontinuierliche Lastabtragung zu erhalten. Dafür ist es erfahrungsgemäß ausreichend, wenn der Verbund nur in der Ebene der Betonplatte hergestellt wird. Um dies zu gewährleisten wird die Stahlschalung so konzipiert, dass in der Betonplatte des HBV-Elements seitlich Ausnehmungen (*siehe Abbildung 4.13*) entstehen, welche nach dem Positionieren bzw. Aneinanderreihen der Elemente vergossen werden und dadurch ein Verbund zwischen den Elementen entsteht. Eine weitere Lösung wäre, die Mann an Mann positionierten LVL-Rippen der einzelnen Deckenelemente gegeneinander zu verschrauben. [41], [5]



Abbildung 4.13: Ausnehmungen zum Herstellen des Verbunds der einzelnen Deckenelemente / Sturzträger aus Stahlbeton [41]

Ein entscheidender Vorteil der Elementbauweise in Kombination mit Verbundschrauben ist, dass der Platzmangel am Deckenrand, um die Schrauben statisch gesehen optimal zu setzen (auf Zug beansprucht), wegfällt. Grund dafür ist, dass die Deckenelemente monierbereit auf die Baustelle geliefert werden und die Verbundschrauben nicht Vorort auf der bereits eingebauten Holzkonstruktion gesetzt werden müssen. Diese hier einfach zu umgehende Problematik wurde, in der bereits erwähnten Diplomarbeit von *Herrn Dipl.-Ing. Christian Bosnjak* [42], detailliert behandelt.

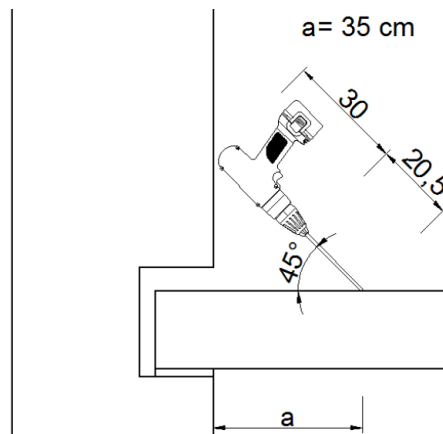


Abbildung 4.14: Problematik beim Setzen der HBV-Verbundschrauben am Deckenrand bei der Fertigteil-Bauweise [42]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Bauablauf durch den hohen Vorfertigungsgrad mit Hilfe der Element- bzw. Systembauweise, rein bezogen auf die Deckenelemente, wesentlich vereinfacht wird. Zielführend ist diese Bauweise für vielgeschossige Bauwerke, mit einer großen Deckenfläche. Dies ist auf die aufwendige Vorarbeit, die notwendig ist, um die Elemente herzustellen (Herstellen der Stahlschalung, etc.), zurückzuführen. Das ist nur dann rentabel, wenn eine hohe Stückzahl an Elementen produziert werden muss und die Spannweiten überdurchschnittlich groß sind. Sind diese Anforderungen gegeben, kann durch die industrielle Herstellung viel präziser gearbeitet werden. Die Aushärtezeiten auf der Baustelle fallen weg und die Deckenelemente können auf der Baustelle innerhalb kürzester Zeit verlegt werden. Dazu kommen die bereits erwähnten Benefits, die das Einhalten der hohen Anforderungen im Holzhochhausbau ermöglichen. Durch dieses System werden einige entscheidende Kernfragen dieser Arbeit abgedeckt. Deshalb wird auch der *Parameterstudie*, die im *Kapitel 6* behandelt wird, die Element- bzw. Systembauweise zu Grunde gelegt.

Einen entscheidenden Nachteil bringt diese Bauweise aber mit sich. Sie setzt eine zur Verfügung stehende Fertigungshalle mit ausreichend Lagerkapazität voraus. Ist dies nicht erfüllt, ist die Umsetzung in dieser Art und Weise nicht möglich.

5 Experimentelle Untersuchung

5.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Kapitels wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zum Verbund zwischen Furnierschichtholzrippe (LVL-Rippen) und Betonplatte mittels stiftförmigen Verbindungsmittel getätigt. Diese Untersuchungen wurden anhand von Scherversuchen durchgeführt. Ziel dabei ist es die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten der untersuchten Holz-Beton-Verbund-Varianten zu ermitteln. Die Auswertung der Versuche liefert Werte für die Höchstlast F_{\max} und das Verschiebemodul k_s . Diese Werte sind notwendig, um die statische Bemessung der Holz-Beton-Verbund-Decken durchführen zu können.

Es wurden Kurzzeit-Scherversuche an drei Versuchsreihen zu je fünf Prüfkörper durchgeführt. Dabei wurden für alle Versuchskörper LVL-Rippen der Firma Stora Enso Typ-S (S-Grade) verwendet. Die Versuchsreihen unterscheiden sich in der Ausführung und Anordnung der HBV-Schrauben.

Die experimentellen Untersuchungen werden entsprechend den Anforderungen des Europäischen Bewertungsdokuments EAD 1330090-00-0303 [43] durchgeführt. Davon sind unter anderem auch die Güte und Form der Prüfkörper sowie die Versuchsanordnung betroffen. Dieses Dokument definiert das Bewertungsverfahren zum Erlangen einer Europäischen Technischen Bewertung (European Technical Assessment – ETA) für stiftförmige Verbindungsmittel zum Einsatz bei HBV-Konstruktionen.

Die Kubatur der Prüfkörper wurde in Anlehnung an die Diplomarbeit von *Dipl.-Ing. Christian Bosnjak* mit dem Titel: *Entwicklung praxisorientierter Bemessungshilfen zur Steigerung der Ressourcen- und Materialeffizienz der Holz-Beton-Verbunddecken* [42] konzipiert. Sie entspricht der Form eines Plattenbalkens, wie es auch in der realen Anwendung als HBV-Deckenelement für eine Rippendecke der Fall ist. Auf eine verlorene Schalung und eine PE-Folie, um das Holz vor einem Feuchteintrag zu schützen, wurde bewusst verzichtet. Auf diese Thematik wird noch genauer eingegangen. Alle Prüfkörper haben versuchsreihenübergreifend die gleiche Geometrie. Diese ist symmetrisch, um die Versuchsdurchführung zu vereinfachen. Die LVL-Rippe befindet sich in der Prüfkörpermitte und auf beiden Seiten wird seitlich die Betonplatte angeordnet (*siehe Kapitel 5.2*).

Somit werden für jeden Prüfkörper zwei Betonplatten mit den Abmessungen 400mm x 300mm benötigt. Die Stärke der Betonplatte beträgt 70mm. Sowie einer LVL-Rippe 400mm x 250mm und einer Stärke von 63mm.

5.2 Definition der Versuchsreihen

Der Umfang dieser experimentellen Untersuchung umfasst, wie bereits erwähnt, drei Versuchsreihen zu je fünf Versuchskörpern. Die ersten beiden Versuchsreihen wurden mittels Halbfertigteil-Bauweise hergestellt und unterscheiden sich nur durch den Einschraubwinkel der HBV-Schrauben. Für die 3. Versuchsreihe wurden Betonfertigteile mit einbetonierten Fertigteil-Verbindern hergestellt und der Verbund zwischen Holz und Beton durch nachträgliches Verschrauben aktiviert. Für alle Versuchskörper wurden vier HBV-Schrauben zur Herstellung des Verbunds verwendet, d.h. zwei Stück pro Scherfuge. Bei allen Versuchsreihen werden die Verbundschrauben so angeordnet, dass sie überwiegend auf Zug und Abscherung beansprucht werden.

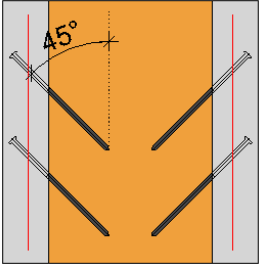
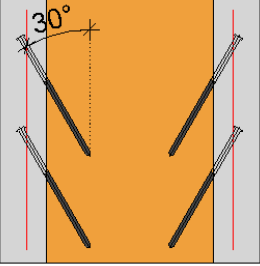
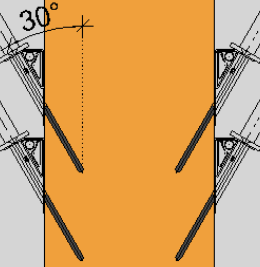
<p>Versuchsreihe: 45° Prüfkörper: 45-1 bis 45-5 Einschraubwinkel: 45° Verbindungsmittel: HBV Schrauben RAPID® T-Con Ø8x205/130 mm</p>	
<p>Versuchsreihe: 30° Prüfkörper: 30-1 bis 30-5 Einschraubwinkel: 30° Verbindungsmittel: HBV Schrauben RAPID® T-Con Ø8x205/130 mm</p>	
<p>Versuchsreihe: FT Prüfkörper: FT-1 bis FT-5 Einschraubwinkel: 30° Verbindungsmittel: Fertigteil-Verbinder + RAPID® VG-Schr. Ø10 x200 mm</p>	

Abbildung 5.1: Übersicht der Versuchsreihen

Der angegebene Einschraubwinkel bezieht sich immer auf den Winkel zwischen Schraubenachse und Verbundfuge.

In den folgenden Unterpunkten werden Aufbau und Geometrie beschrieben und visualisiert, sowie der Herstellungsprozess näher erläutert. Da die verwendeten Materialien für alle Versuchskörper abgesehen von den Verbindungsmitteln ident sind, werden diese separat in *Kapitel 5.3 Beschreibung der Materialien* detailliert behandelt.

5.2.1 Versuchsreihe: 45°

Für die Probekörper 45-1 bis 45-5 wurden jeweils 4 Stück von den Holz-Beton-Verbund-Schrauben RAPID® T-Con Ø 8 x 205/130 mm der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH mit der Zulassung Z-9.1-845 verwendet (genau Beschreibung siehe *Kapitel 4.3.2.3.1*). In der *Abbildung 5.2: Versuchsreihe: 45°; Fertigungszeichnung und 3D-Modell* ist die genaue Geometrie ersichtlich.

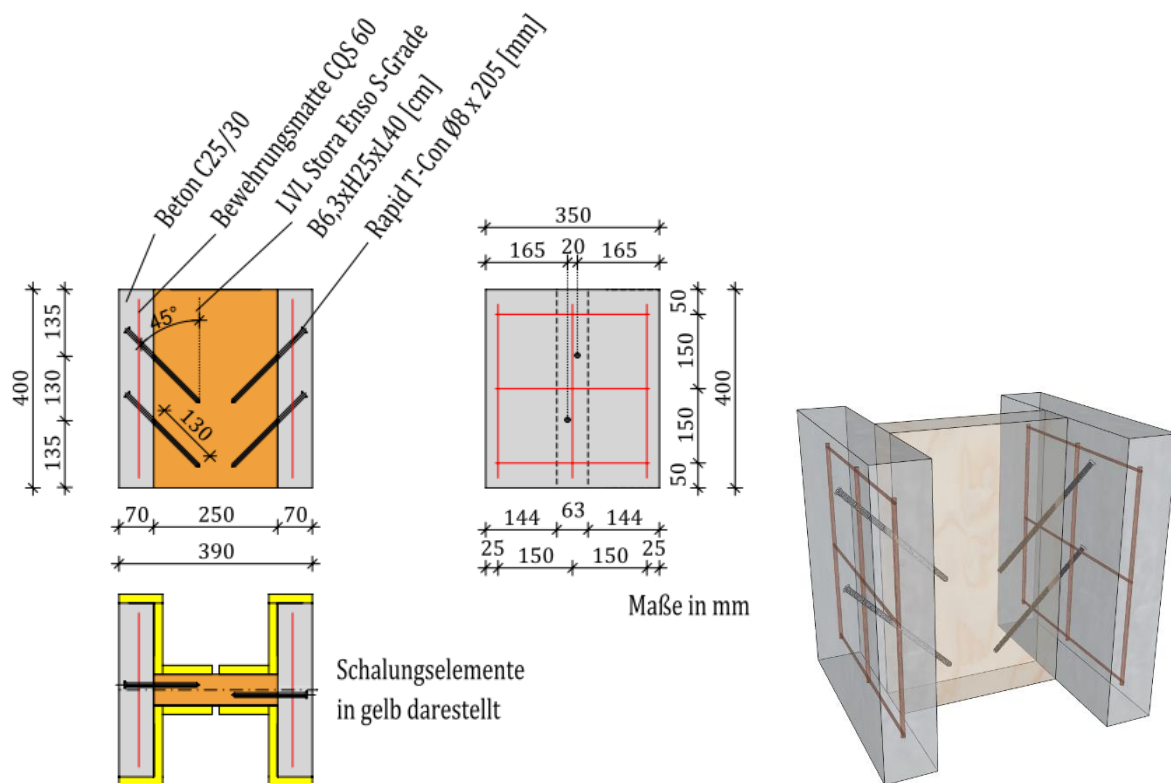


Abbildung 5.2: Versuchsreihe: 45°; Fertigungszeichnung und 3D-Modell

Bei der Herstellung der Probekörper 45-1 bis 45-5 wurden zuerst die Schalelemente zugeschnitten und einseitig auf die, bereits auf die Länge von 400 mm, zugesägte LVL-Rippe geschraubt, sodass der Grund der Schalung genau eine Ebene mit der längeren Stirnseite des LVLs bildet. Anschließend wurden die oben genannten HBV-Schrauben lt. Fertigungszeichnung und mittels einer Schablone als Einschraubhilfe unter einem Winkel von 45° lt. Vorgaben der Schraubenzulassung ohne vorbohren verschraubt. Auf eine verlorene Schalung und eine PE-Folie wurde verzichtet. Im nächsten Schritt wurde das Baustahlgitter CQS 60 inklusive Distanzhalter, um die Betondeckung einzuhalten in der eingöhlten Schalung positioniert und anschließend

wurde der bereits vorbereitete Frischbeton C 25/30 in die Schalung gegossen und auf der Rüttelplatte verdichtet. Nach kurzer Aushärtezeit von ca. 1-2 Tagen ist die Anfangsfestigkeit gegeben und die Schalung konnte auf der gegenüberliegenden Seite montiert werden. Anschließend wurden die gleichen Arbeitsschritte nochmals durchgespielt. Nach dem Ausschalen und einer Aushärtezeit von ca. 28 Tagen waren die Probekörper bereit für die Durchführung der Scherversuche.



Abbildung 5.3: Bildergalerie: Prüfkörperherstellung in der Halbfertigteil-Bauweise

5.2.2 Versuchsreihe: 30°

Die für Probekörper 30-1 bis 30-5 wurden die gleichen HBV-Schrauben mit ebenfalls vier Stück pro Probekörper wie in *Kapitel 5.2.1 Versuchsreihe: 45°* verwendet. Der Unterschied zwischen den beiden Versuchsreihen ist, dass in der hier beschriebenen Versuchsreihe die Schrauben unter einem Winkel von 30° eingeschraubt werden.

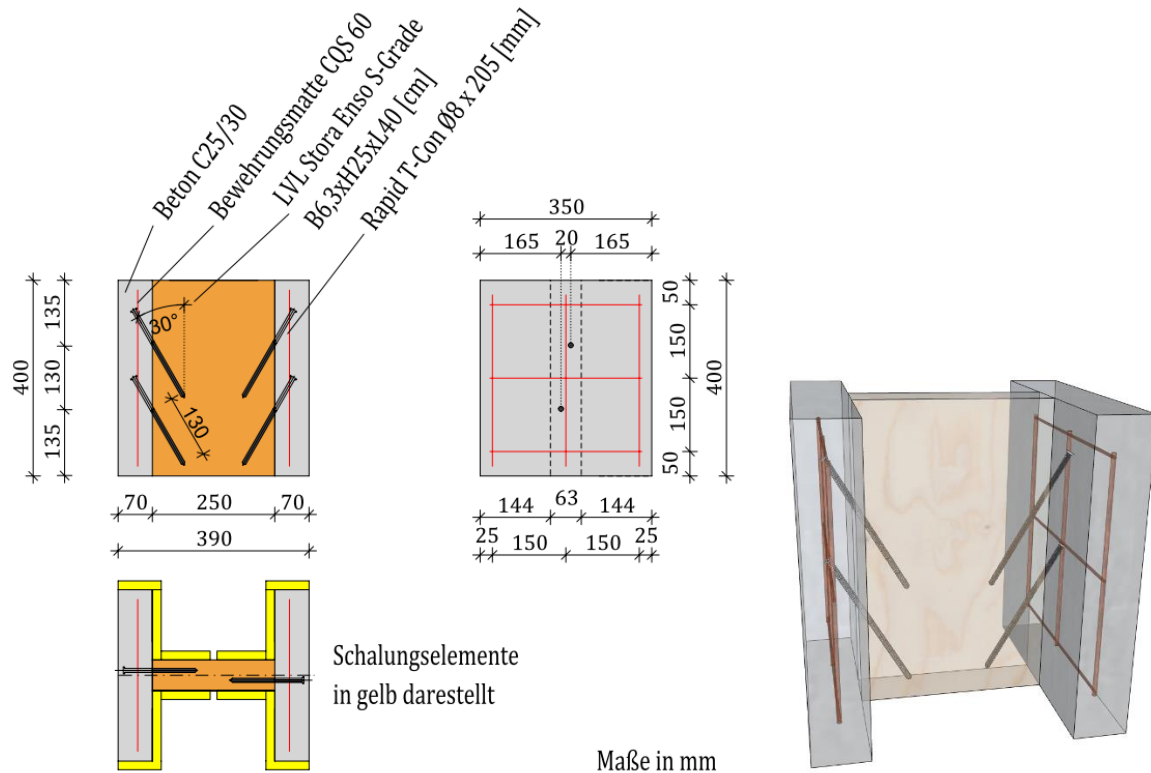


Abbildung 5.4: Versuchsreihe: 30°; Fertigungszeichnung und 3D-Modell

Die Herstellung der Probekörper für die Versuchsreihe 30° ist ebenfalls ident wie in *Kapitel 5.2.1 Versuchsreihe: 45°* und kann dort nachgelesen werden.

5.2.3 Versuchsreihe: FT

Die Probekörper FT-1 bis FT-5 wurden in der Fertigteil-Bauweise hergestellt. Für jeden Probekörper wurden zwei Betonfertigteilplatten produziert und jeweils zwei Fertigteil-Verbinder der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG mit einbetoniert – vier pro Probekörper (genaue Beschreibung siehe *Kapitel 4.3.2.1 Fertigteil-Verbinder (FT-Verbinder) der Firma Würth*). Der Verbund zwischen Holz und Beton wurde mit den RAPID® VG-Schraube der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH mit der Zulassung ETA-12/0373 hergestellt. Diese wurden bereits in *Kapitel 4.3.2.3.2* genauer behandelt. In der *Abbildung 5.5* ist die genau Geometrie ersichtlich.

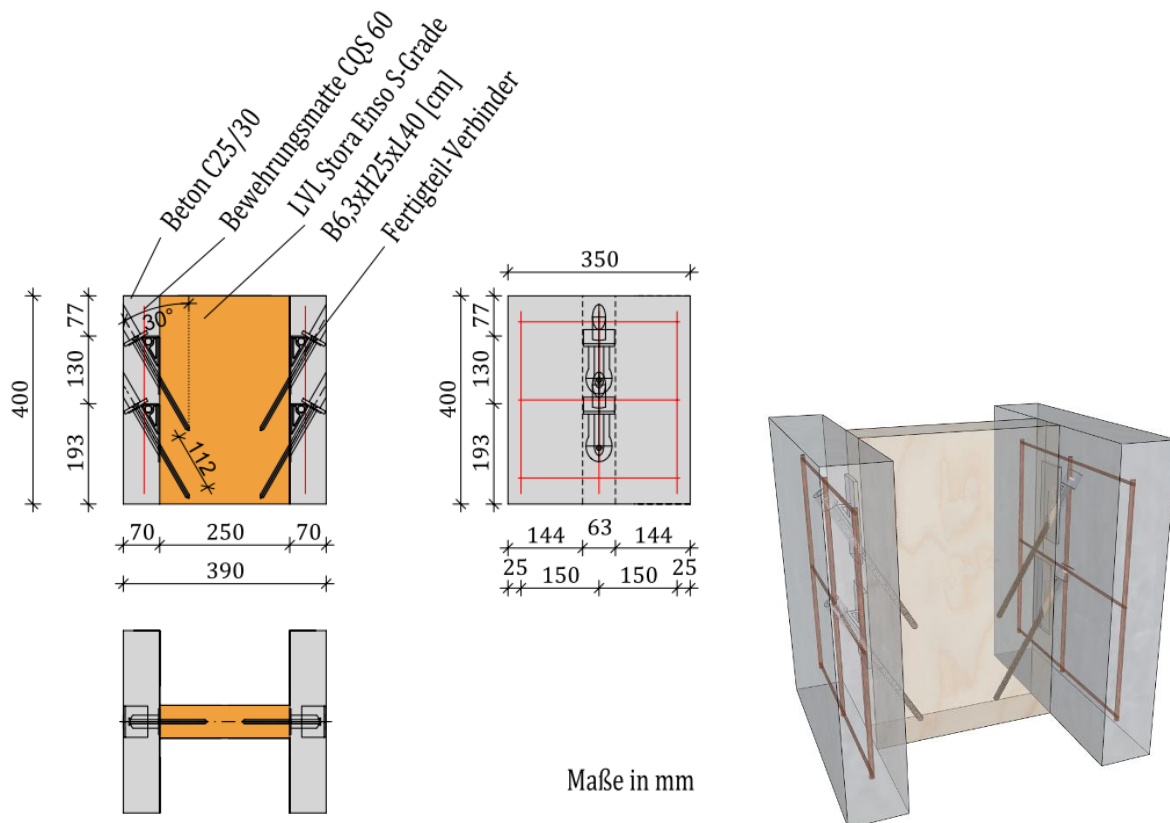


Abbildung 5.5: Versuchsreihe: FT; Fertigungszeichnung und 3D-Modell

Beim Herstellen der Probekörper FT-1 bis FT-5 wurde zuerst die Schalung für die Betonfertigteile zusammengeschaubt. Im nächsten Schritt wurde die Position für die FT-Verbinder eingemessen, um diese dann dort an der Schalung zu befestigen. Dann wurde wieder das Baustahlgitter CQS 60 inklusive Distanzhalter in der mit Schalöl versehenen Schalung positioniert und anschließend der Frischbeton C 25/30 eingebracht. Nach dem Ausschalen und Aushärten der Betonfertigteile konnten diese dann mit Schraubzwingen an der LVL-Rippe temporär an der entsprechenden Position befestigt werden. Im letzten Schritt wurden dann die oben genannten Vollgewindeschrauben mit Senkkopf durch die FT-Verbinder ohne vorbohren in die LVL-Rippe eingeschraubt und dadurch ein sofortiger Verbund hergestellt.

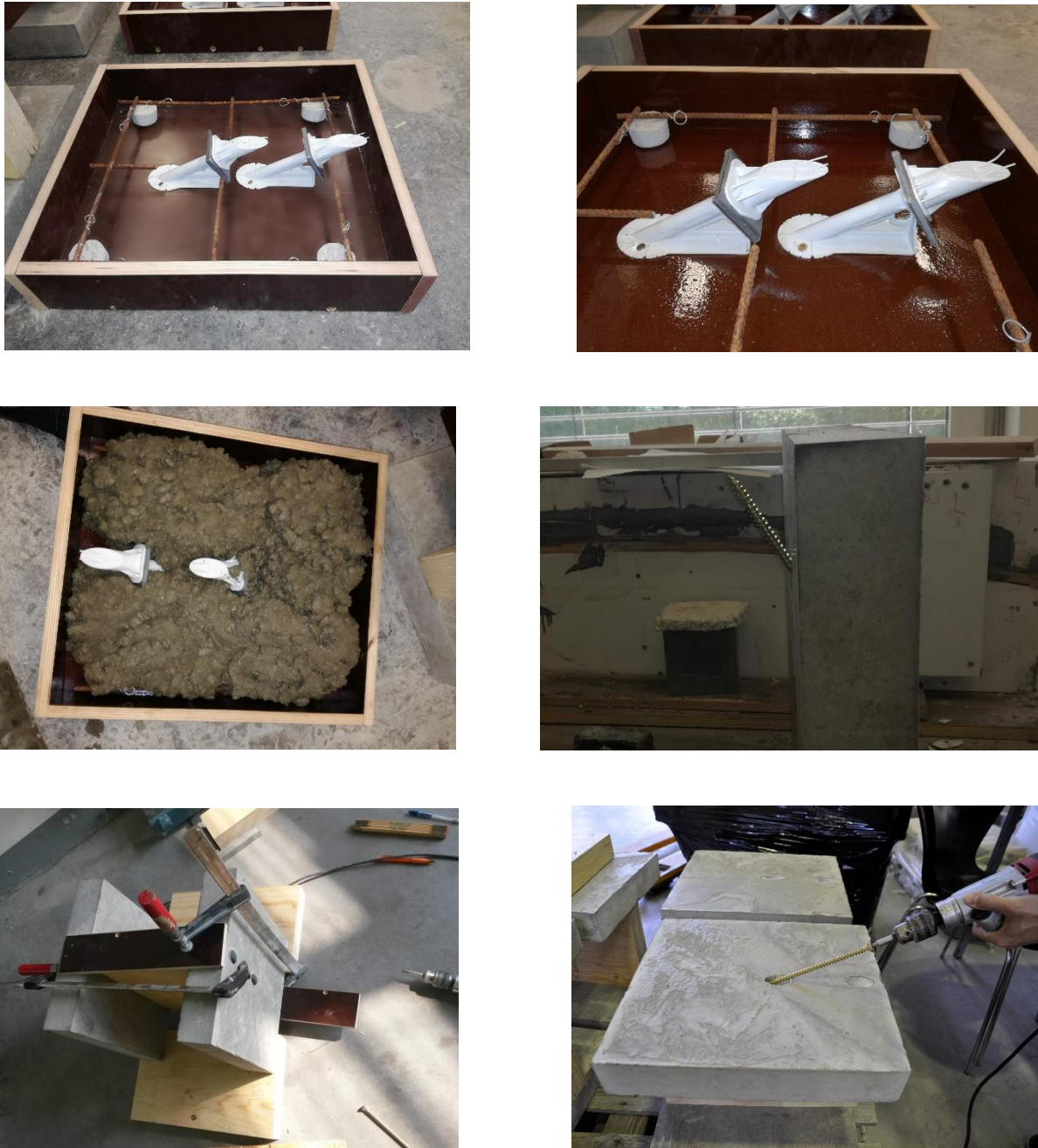


Abbildung 5.6: Bildergalerie: Prüfkörperherstellung in der Fertigteilbauweise

5.3 Beschreibung der Materialien

5.3.1 Furnierschichtholz – LVL

Die Holz-Rippen der Probekörper bestehen, wie bereits erwähnt, aus LVL der Firma Stora Enso Typ -S (S-Grade) mit den Standard-Lieferabmessungen 63 x 250 mm im Querschnitt und 400 mm Länge.

5.3.1.1 Ermittlung der Rohdichte

Alle Versuchskörper wurden aus dem Holz der gleichen Liefercharge hergestellt. Die Rohdichte des Furnierschichtholzes wurde nach *DIN 52182: Bestimmung der Rohdichte* [44] bestimmt. Um einen Wert für die Rohdichte zu erhalten wurde von zehn zugeschnittenen Holzproben dieser Charge das Volumen und das Gewicht ermittelt. Daraus konnte die Dichte errechnet und anschließend der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt werden.

Probennr.:	Probenabmessungen:				
	Masse [kg]	Länge [cm]	Breite [cm]	Höhe [cm]	Dichte [kg/m ³]
1	10.45	130.5	6.02	24.95	533.14
2	10.21	126.7	6.3	25	511.64
3	10.49	130.85	6.32	24.97	508.00
4	10.53	130.95	6.25	25	514.64
5	10.43	129.65	6.15	25.13	520.53
6	11.15	132.3	6.33	24.91	534.49
7	10.21	128.4	6.3	24.95	505.88
8	10.58	130.8	6.1	24.95	531.47
9	10.93	130	6.39	24.95	527.36
10	10.87	131.45	6.32	24.95	524.42

Mittelwert der Rohdichte:	<u>521.16 kg/m³</u>
Standardabweichung der Rohdichte:	<u>10.63 kg/m³</u>

Tabelle 5.1: Ermittlung der Rohdichte des LVL

5.3.1.2 Ermittlung der Holzfeuchte

Für die Ermittlung der Holzfeuchte wurden zwei Verfahren angewendet. An den Prüfkörpern direkt wurde die Holzfeuchte nach *DIN EN 13183-2: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz; Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren* [45] gemessen. Bei diesem Messverfahren handelt es sich um eine Schätzung und somit muss mit Messfehlern gerechnet werden. Um den tatsächlichen Feuchtegehalt der LVL-Charge vor dem Betonieren zu ermitteln, wurde das Verfahren nach *DIN EN 13183-1: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz; Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren* [46] angewendet. Dabei wurde zuerst die feuchte Masse m_F und nach dem Trocknungsvorgang bei 105° im Trockenschrank und anschließendem Abkühlen im Exsikkator bei 0% Luftfeuchtigkeit die Trockenmasse m_T ermittelt. Mit Hilfe dieser Werte konnte dann nach *DIN EN 13183-1* [46] eine Holzfeuchte von 9,75% errechnet werden.

Bei der elektrischen Widerstands-Messung kam die Erkenntnis, dass die Messwerte immer um ein paar Prozent zu hoch sind im Vergleich zu dem Wert aus dem Darrverfahren, welches die tatsächliche Holzfeuchte ermittelt. Darum wurden ein paar Probemessungen an dem gleichen

Stück Holz mit dem Widerstandsmessgerät durchgeführt, an dem auch das Darrverfahren angewendet wurde. Dabei konnte eine Differenz von 2,8% Holzfeuchte zwischen den Beiden Verfahren ermittelt werden. Dieser Delta-Wert wurde dann bei allen weiteren Messungen an den Prüfkörpern, welche mit Hilfe der elektrischen Widerstands-Messungen durchgeführt wurden, abgezogen.



Abbildung 5.7: Holzfeuchteermittlung nach DIN EN 13183-2 [45]

Feuchteintrag durch das Betonieren ohne Schutzfolie:

Bei allen Probekörpern wurde, wie bereits bekannt, auf eine Folie, die vor einem Feuchteintrag in den Holzwerkstoff durch das Betonieren schützen soll, verzichtet. Um die tatsächlichen Auswirkungen zu überprüfen, wurde nach der Versuchsdurchführung bei einem Probekörper die Betonplatte inklusive Verbindungsmittel entfernt, um anschließend diverse Messungen durchzuführen. Dabei wurde die Feuchte direkt auf der Kontaktfläche zwischen Holz und Beton gemessen. Dort wurde ein hoher Feuchtegehalte von über 20% Holzfeuchte ermittelt. Anschließend wurden in Abständen von 1,5 cm zur Kontaktfläche weitere Feuchtemessungen durchgeführt, um zu ermitteln in welche Tiefe der Feuchteintrag einen Einfluss hat bzw. ob im Bereich der Einbindetiefe der Schraube der Feuchteintrag hoch ist. Das Ergebnis der Messung (siehe *Abbildung 5.8: Überprüfen des Feuchteintrags durch das Betonieren*) zeigt, dass der Holzfeuchtegehalt nur oberflächlich wesentlich zunimmt, aber im Inneren des Holzquerschnitts nur geringe Zunahmen der Feuchte zu verzeichnen sind. Somit spielt der Feuchteintrag in das Holz durch den Betoniervorgang ohne Folie bei LVL eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Tragfähigkeit der Verbindungsmittel.

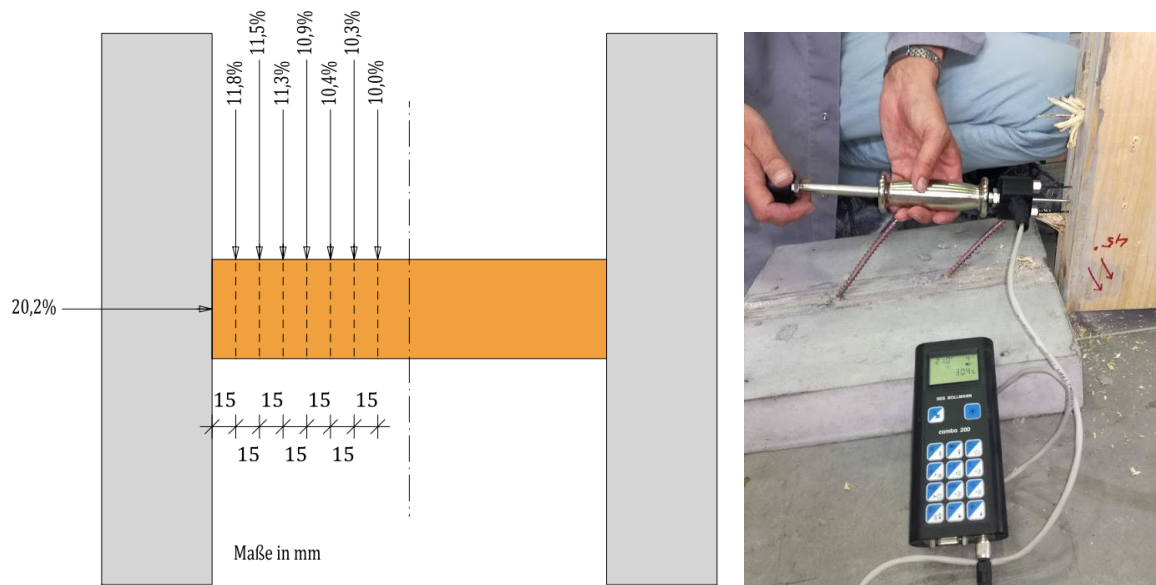


Abbildung 5.8: Überprüfen des Feuchteintrags durch das Betonieren

5.3.2 Beton

5.3.2.1 Betonrezeptur

Für die Prüfkörper wurde für die angestrebte Festigkeitsklasse C 25/30 die nachstehende Betonmischung mit einem Größtkorn von 16 mm gewählt.

Festigkeitsklasse: C 25/30 XC3				
Mischungsvolumen: 0.06 m ³				
Bestandteile	kg/Mischung		Komponenten	Trockengewicht
	[kg]			[kg/m ³]
Zuschlag	34.4	24.0%	Sand RK 0/1	573.8
	17.2	12.0%	Kies RK 1/4	286.9
	18.4	12.8%	Kies RK 4/8	306
	44.8	31.2%	Kies RK 8/16	746.0
Zement	18	12.5%	CEM II 42.5 N	300
Wasser	10.8	7.5%	Frischwasser	180.0
Zusatzstoff	0	0.0%		
Zusatzmittel	0.0	0.0%		
Luft	0	0.0%		
Summe	143.6	100.0%		2392.7

Tabelle 5.2: Betonrezeptur – C 25/30

5.3.2.2 Festigkeitsermittlung der diversen Betonmischungen

Die Festigkeitseigenschaften des Betons für die Probekörper wurden *nach ÖNROM EN 12390-1: Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen* [47] ermittelt. Dabei wurden Druckprüfungen an Prüfwürfeln mit einer Seitenlänge von 150mm durchgeführt. Beim der Mischung Nr. 5 wurde ein Betonwürfel mit der Seitenlänge 100mm hergestellt, da nicht mehr genügend Restbeton über war. Die ermittelte Dichte und Druckfestigkeit der diversen Mischungen sind in *Tabelle 5.3* angeführt.

Datum der Würfelprüfungen: 4.9.2018

Mischung Nr.	Datum der Mischung	Versuchsreihe/ Probekörper	Masse [g]	Bruchkraft [kN]	Dichte [kg/m ³]	Festigkeit [N/mm ²]
1	25.07.2018	45-1 bis 45-5 Betonplatte 1	7530.8	1039.91	2231.3	46.2
2	25.07.2018	30-1 bis 30-5 Betonplatte 1	7922.3	1102.79	2347.3	49.0
3	01.08.2018	FT-1 bis FT-5 Betonplatte 1	7817.6	1051.85	2316.3	46.7
4	01.08.2018	45-1 bis 45-5 Betonplatte 2	7947.1	1083.57	2354.7	48.2
5	01.08.2018	30-1 bis 30-5 Betonplatte 2	2276.5	540.65	2276.5	54.1
6	06.08.2018	FT-1 bis FT-5 Betonplatte 2	7838.1	1010.45	2322.4	44.9

Tabelle 5.3: Betonfestigkeitsermittlung nach ÖNORM EN 12390-1 [47]

5.4 Versuchsaufbau

Alle Probekörper für die drei Versuchsreihen wurden im Labor in den Aspanggründen, 1030 Wien des Instituts für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit hergestellt und auch geprüft.

Die Scherversuche wurden an einer kalibrierten Universalprüfmaschine Zwick 250 mit einer Höchstlast von 250kN durchgeführt. Die Krafteinleitung erfolgt über Antriebsspindeln, welche die Kraft zentral in den Probekörper einleiten. Die Kraft wird mit der Kraftmessdose C6A mit einer Messgenauigkeit von 0,5 kN bis zu einer Belastung von 500 kN gemessen.

Die relativen Verschiebungen in der Scherfuge der Prüfkörper in Quer- und Längsrichtung wurden von vier, am Prüfkörper angebrachten, Wegaufnehmern erfasst. Zwei Stück für die

Verschiebungsmessung in Querrichtung mit einem Messbereich von $\pm 2,5\text{mm}$ und zwei Stück für die Verschiebungsmessung in Längsrichtung mit einem Messbereich von $\pm 25\text{mm}$. Bei der Auswertung wurde jeweils der Mittelwert aus den Wegaufnehmern in Quer- und Längsrichtung gebildet. Die Messdatenerfassung wurde mit Hilfe des Erfassungswerkzeugs Quantum X der Firma HBM GmbH durchgeführt.

Die Datenauswertung erfolgt durch das Programm CATMAN_AP V 3.4.1.

Die Prüfkörper liegen mit den Stirnflächen der Betonplatten auf den stationären Auflagerpunkten auf. Der Stempel mit der Kraftmessdose drückt auf die Stirnfläche der LVL-Rippe und schert diese gegen die Betonbauteile, welche über die HBV-Schrauben mit der LVL-Rippe verbunden sind, ab (siehe *Abbildung 5.9: Versuchsaufbau in den Aspanggründen*).

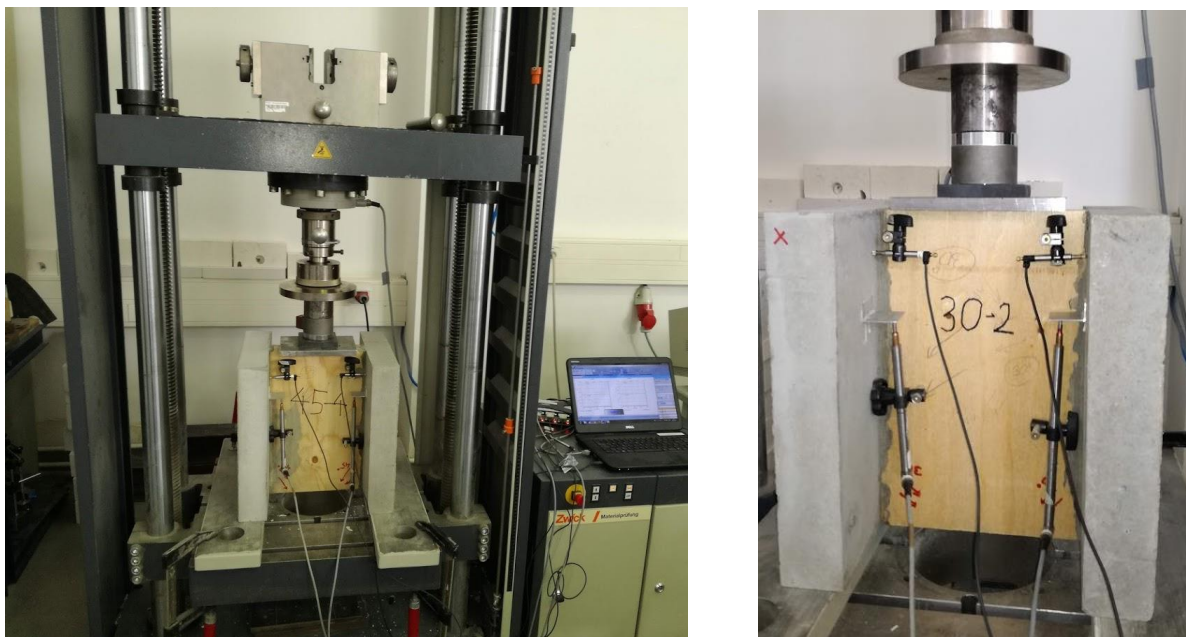


Abbildung 5.9: Versuchsaufbau in den Aspanggründen

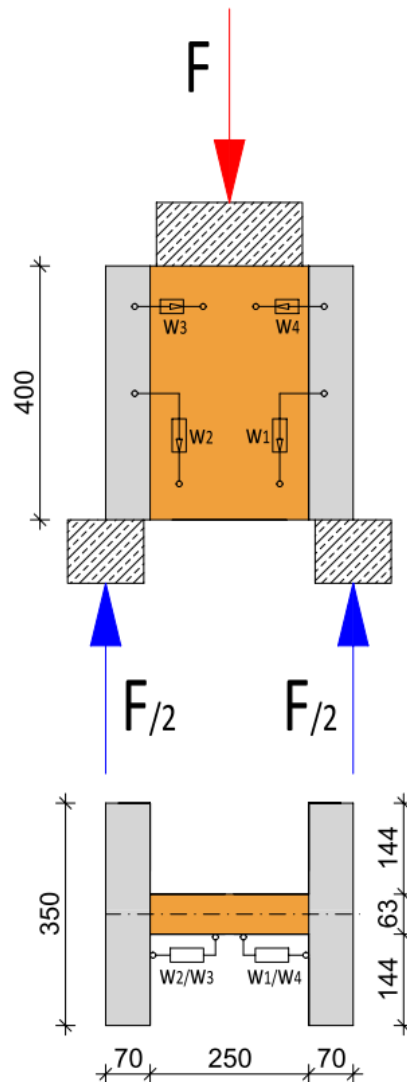


Abbildung 5.10: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

5.5 Versuchsablauf

Die Probekörperprüfungen werden nach *ÖNORM EN 26891: Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten* [48] durchgeführt.

Die Belastungsgeschwindigkeit wird mit Hilfe der definierten Höchstlast F_{est} (estimate) berechnet. F_{est} wird über Erfahrungen, Berechnungen oder Vorprüfungen festgelegt und falls erforderlich bei den darauffolgenden Prüfungen angepasst. Angeglichen werden muss F_{est} dann, wenn bei bereits durchgeführten Prüfkörpern der Mittelwert der Höchstlasten um mehr als 20% vom festgelegten Wert für F_{est} abweicht.

Das Belastungsverfahren wurde nach *Abbildung 5.11* durchgeführt. Zuerst wird die Last $0,4 F_{est}$ aufgebaut und 30 Sekunden konstant gehalten. Anschließend wird die Last auf $0,1 F_{est}$ reduziert und erneut 30 Sekunden konstant gehalten. Dann wird erneut gesteigert bis die Bruchlast oder eine Verschiebung von 15 mm erreicht wird. Weiters ist unterhalb von $0,7 F_{est}$ eine konstante Belastungsgeschwindigkeit von $0,2 F_{est}$ pro Minute $\pm 25\%$ einzuhalten und darüber die Verschiebungsgeschwindigkeit so zu wählen, dass die Bruchlast oder einer Verschiebung von 15mm weitere 3 bis 5 Minuten in Anspruch nimmt (Gesamtprüfzeit je Probekörper sollte zwischen 10 und 15 Minuten liegen).

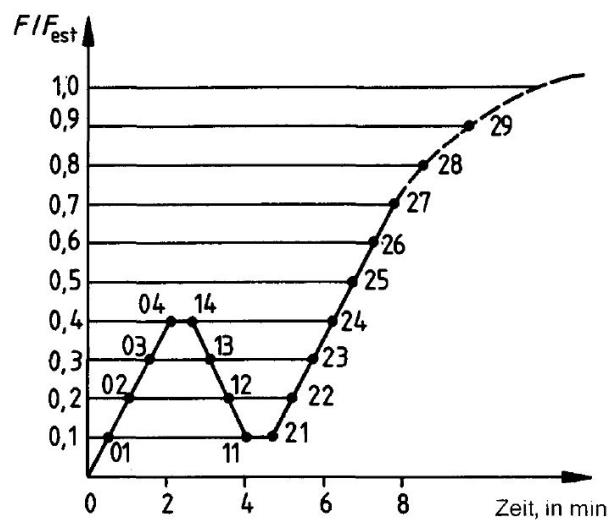


Abbildung 5.11: Belastungsverfahren nach ÖNORM EN 26891 [48]

Die Prüfungen zeigen, dass die Höchstlast F_{max} bei allen Probekörpern vor dem Auftreten der maximalen Verschiebung von 15 mm erreicht wurde. [48]

5.6 Versuchsauswertung

Das Ergebnis des Versuchsablaufs sind Last-Verschiebungsdiagramme der Prüfkörper. Bei der Erstellung dieser Diagramme kam die Erkenntnis, dass spätestens nach einer Verschiebung von ca. 5mm die Höchstlast erreicht wurde. Anhand der Diagramme kann nun für jeden Versuchskörper entsprechend *EN 26891* [48] die Höchstlast F_{max} , das Verschiebungsmodul k_s und das Anfangsverschiebemodul k_i ermittelt werden. Das Verschiebungsmodul k_s und das Anfangsverschiebemodul k_i errechnet sich dabei aus der geschätzten Höchstlast F_{est} und den Messwerten der Verschiebung beim Erreichen der Belastung $0,1 F_{est}$ und $0,4 F_{est}$ – v_{01} und v_{04}

$$k_i = \frac{0,4 F_{est}}{v_i} \quad (5.1)$$

$$k_s = \frac{0,4 F_{est}}{v_{i,mod}} \quad (5.2)$$

$$v_i = v_{04} \quad (5.3)$$

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3} (v_{04} - v_{01}) \quad (5.4)$$

Die ermittelten Werte F_{max} , k_s und k_i beziehen sich auf den gesamten Probekörper. Um Werte bezogen auf eine Schraube zu erhalten, müssen die ermittelten Zahlen noch durch die Anzahl der Schrauben pro Probekörper dividiert werden, dabei gilt die Annahme, dass alle Schrauben die gleiche Belastung erfahren. Für alle Probekörper wurden 4 Schrauben verwendet.

Um für jede Versuchsreihe ein Ergebnis für die Schraubentragfähigkeit $F_{max,k}$ und das Verschiebemodul K_{ser} zu erhalten, werden die charakteristischen Werte der einzelnen Prüfkörper nach *ÖNORM EN 14358: Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte* [49] für die jeweilige Versuchsreihe ausgewertet. $F_{max,k}$ entspricht dabei dem unteren 5%-Quantilwert der Festigkeitswerte F_{max} . K_{ser} errechnet sich aus dem Mittelwert der Steifigkeitswerte k_s . Diese Werte beziehen sich auf eine gesamte Versuchsreihe.

Zusätzlich zur maximalen Höchstlast und dem Verschiebemodul jeweils pro Verbindungsmittel können auch Erkenntnisse zu den Versagensmechanismen der verschiedenen Versuchskörper hilfreiche Aussagen beinhalten, die entscheidend bei der Bemessung von HBV-Decken mit stiftförmigen Verbindungsmittel sind.

5.6.1 Auswertung Versuchsreihe: 45°

Für den ersten Versuchskörper 45-1 der Versuchsreihe 45° wurde F_{est} mit 160 kN definiert. Diese Annahme war viel zu hoch und darum wurde, für die restlichen Probekörper 45-2 bis 45-5, die geschätzte Höchstlast auf 110 kN reduziert. In *Abbildung 5.12* sind die Last-Verschiebungskurven der Versuchskörper aus der Versuchsreihe 45° dargestellt.

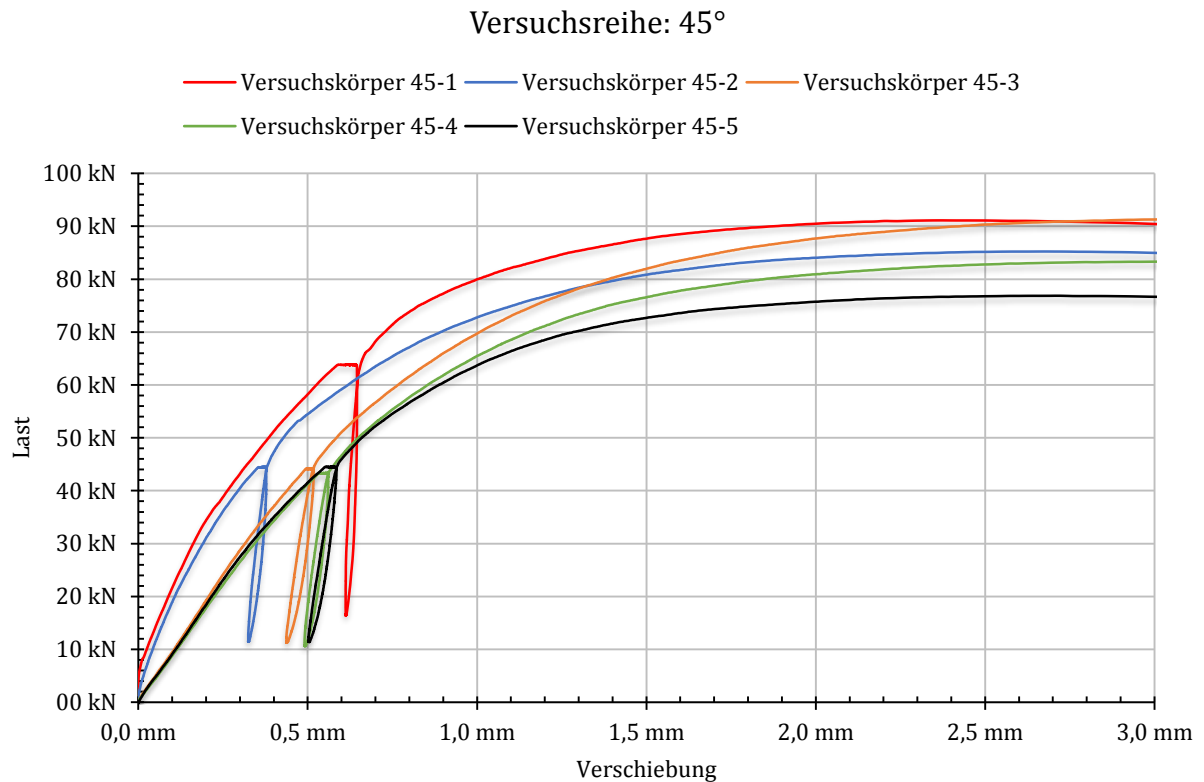


Abbildung 5.12: Last-Verschiebungsdiagramm; Versuchsreihe: 45°

Aus der folgenden Tabelle kann das Ergebnis der Gesamtauswertung für die Versuchsreihe 45° nach *ÖNORM EN 14358* [49] entnommen werden.

		Versuchsreihe: 45°				
Probenbezeichnung		45-1	45-2	45-3	45-4	45-5
Schraubenanzahl	n [Stk.]	4 Stück				
Betondicke	d [mm]	70 mm				
Schraubenanordnung	α [°]	45°				
Scherkraft je Probekörper	$F_{max,PK}$ [kN]	91.12	85.23	91.40	83.31	76.87
Scherkraft je Schraube	$F_{max,SHR}$ [kN]	22.78	21.31	22.85	20.83	19.22
Verschiebungsmodul je Probekörper	$k_{s,PK}$ [kN/mm]	82.40	106.00	89.20	76.77	78.60

Verschiebungsmodul je Schraube	$k_{s,SHR}$ [kN/mm]	20.60	26.50	22.30	19.19	19.65
Würfeldruckfestigkeit (Betonplatte 1 / Betonplatte 2)	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	46.2 / 48.2				
Rohdichte LVL	ρ_{LVL} [kg/m ³]	521.16				
Holzfeuchte	u [%]	11.20	11.20	11.60	10.90	11.10
Versagensmechanismus	Holzversagen: Schraubenauszug aus LVL					

charakt. Festigkeit gem. EN 14358:	$F_{max,k} = 17.88$ kN	$K_{ser} = 21.66$ kN/mm
-------------------------------------------	------------------------------------------	-------------------------------------------

Tabelle 5.4: Auswertung Versuchsreihe: 45° nach EN 14358 [49]

Bei der Versuchsserie 45° wurde bei allen fünf Versuchskörpern der gleiche Versagensmechanismus festgestellt. Im Zuge des Versuchs konnte das Ausziehen der Schrauben aus dem Holz beobachtet werden – Holzversagen.

5.6.2 Auswertung Versuchsreihe: 30°

Bei der Prüfung des ersten Versuchskörpers wurde die mit 110 kN definierte Höchstlast von der Versuchsreihe 45° beibehalten. Dabei kam die Erkenntnis, dass die erreichte Höchstlast F_{\max} über 20% von F_{est} abweicht. Aus diesem Grund wurde für die vier weiteren Probekörper dieser Versuchsreihe die Höchstlast auf 90kN herabgesetzt.

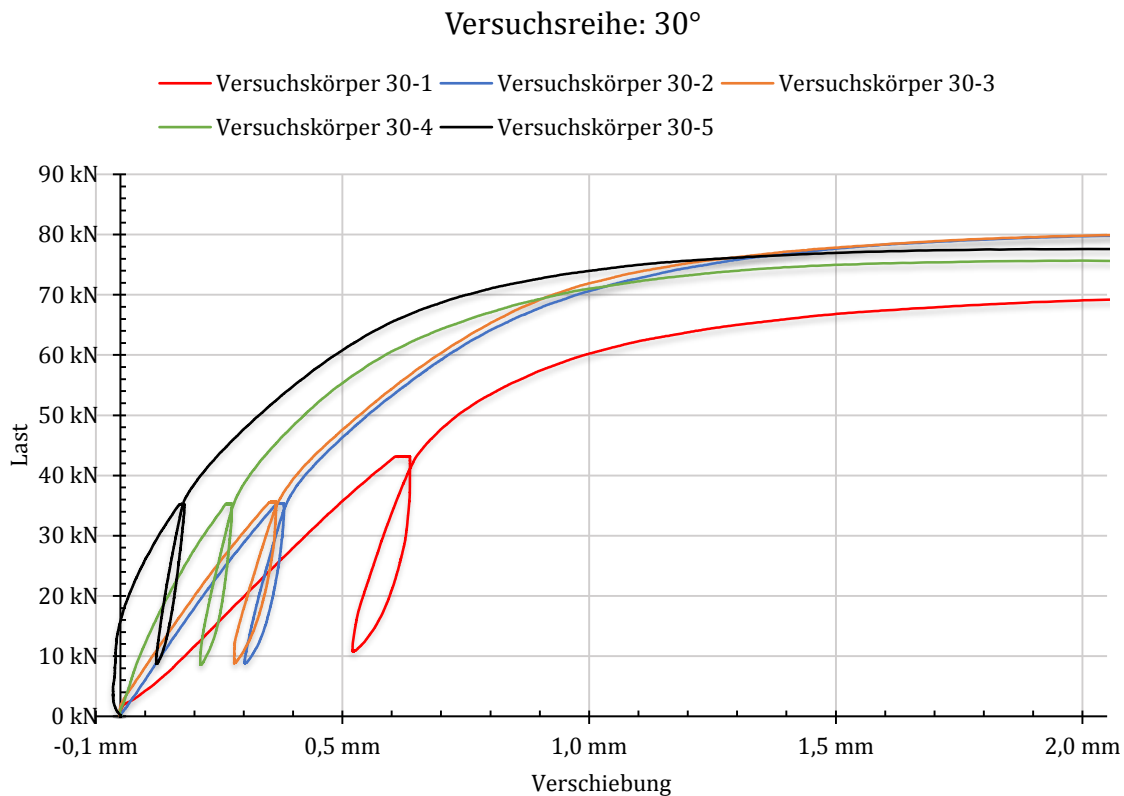


Abbildung 5.13: Last-Verschiebungsdiagramm; Versuchsreihe: 30°

In der *ÖNORM EN 26891* [48] ist angemerkt, dass viele Last-Verschiebungskurven anfänglich konvex ansteigen und dadurch zu Beginn eine negative Verschiebung aufweisen. Grund dafür können unter anderem Messungenauigkeiten zu Beginn der Versuchsdurchführung sein. Dies ist auch beim Probekörper 30-5 der Fall. Aus diesem Grund wurde die Auswertung für diese Kurve modifiziert. D.h. das Verschiebemodul wurde nicht *nach der Formel (5.2)* ermittelt, sondern im linearen positiven Verlauf der Kurve vor dem Erreichen von $0,4 F_{\text{est}}$. Diese modifizierte Auswertung wurde angewendet, um den „Ausreißer“ anzupassen und damit das Gesamtergebnis für diese Versuchsreihe nicht zu verfälschen.

Die Werte für den Probekörper 30-1 werden als „Ausreißer mit großer Abweichung“ angesehen und nicht in die Auswertung mit einbezogen. In der *Tabelle 5.5* sind sie aber trotzdem rot angeführt.

		Versuchsreihe: 30°				
Probenbezeichnung		30-1	30-2	30-3	30-4	30-5
Schraubenanzahl	n [Stk.]			4 Stück		
Betondicke	d [mm]			70 mm		
Schraubenanordnung	α [°]			30°		
Scherkraft je Probekörper	$F_{\max,PK}$ [kN]	69.64	80.05	80.19	75.68	77.61
Scherkraft je Schraube	$F_{\max,SHR}$ [kN]	17.41	20.01	20.05	18.92	19.40
Verschiebungsmodul je Probekörper	$k_{s,PK}$ [kN/mm]	77.8	113.0	111.0	138.0	135.0 *)
Verschiebungsmodul je Schraube	$k_{s,SHR}$ [kN/mm]	19.45	28.25	27.75	34.50	33.75
Würfeldruckfestigkeit (Betonplatte 1 / Betonplatte 2)	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]			49.0 / 54.1		
Rodichte LVL	ρ_{LVL} [kg/m ³]			521.16		
Holzfeuchte	u [%]	10.80	10.50	11.10	10.90	11.10
Versagensmechanismus		Holzversagen: Schraubenauszug aus LVL				

charakt. Festigkeit gem. EN 14358:	$F_{\max,k} = 17.30$ kN	$K_{ser} = 31.15$ kN/mm
-------------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------

Tabelle 5.5: Auswertung Versuchsreihe:30° nach EN 14358 [49]

*) Wert wurde durch die modifizierte Auswertung ermittelt.

Die roten Werte (Versuchskörper 30-1) sind nicht in die Auswertung miteinbezogen

Bei der Versuchsserie 30° konnte wiederum bei allen fünf Versuchskörpern der gleiche Versagensmechanismus festgestellt werden. Es handelt sich dabei ebenfalls um das Ausziehen der Schrauben aus dem Holz – Holzversagen – wie schon bei der Versuchsreihe 45°.

5.6.3 Auswertung Versuchsreihe: FT

Für die Versuchsreihe FT (Fertigteil-Verbinder) wurden die größten Werte für die Höchstlast F_{\max} und das Verschiebemodul k_s erwartet. Aus diesem Grund wurde F_{est} zu Beginn der Versuchsreihe beim Prüfkörper höher angesetzt, u. zw. mit 160kN. Bei diesem Versuch versagte der Prüfkörper schon vor Erreichen von $0,4 F_{\text{est}}$. Für die Prüfkörper FT-2 bis FT-5 wurde die geschätzte Höchstlast mit 80kN angesetzt.

Versuchsreihe: FT (Diagramm Teil 1)

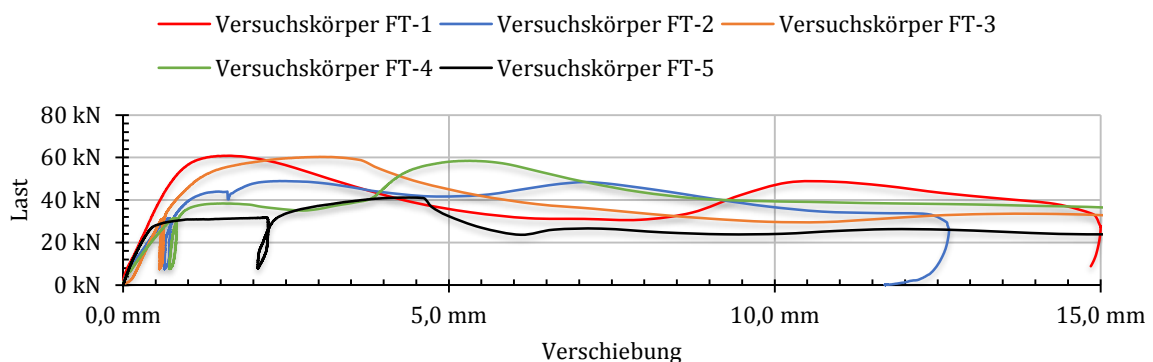


Abbildung 5.14: Last-Verschiebungsdiagramm; Versuchsreihe: FT – Teil 1

Aufgrund des unregelmäßigen Verlaufs des Last-Verschiebungsdiagramms werden zur besseren Veranschaulichung zwei verschiedene Varianten des Diagramms dargestellt.

Versuchsreihe: FT (Diagramm Teil 2)

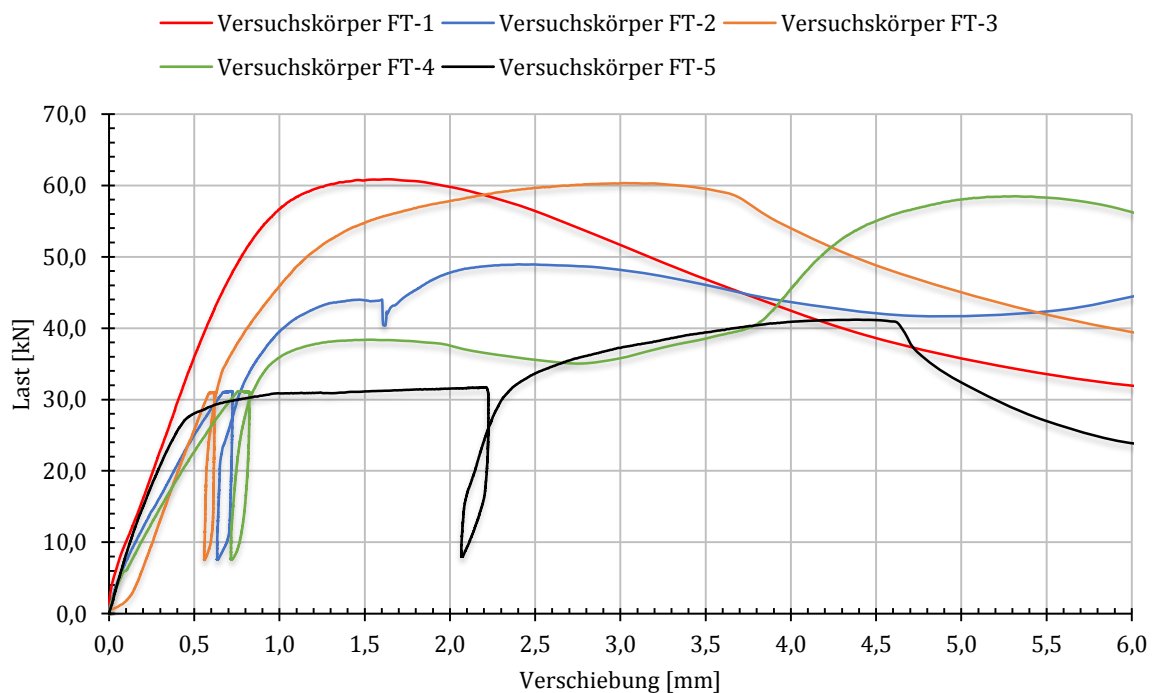


Abbildung 5.15: Last-Verschiebungsdiagramm; Versuchsreihe: FT – Teil 2

Für die Probekörper FT-1 und FT-5 wurde auch eine modifizierte Auswertung angewendet um plausible Werte für das Verschiebemodul k_s zu erhalten und auch das Ergebnis dieser Probekörper in die Gesamtauswertung nach *ÖNORM EN 14358* [49] einfließen zu lassen. Für FT-1 (rot) wurde das Verschiebemodul im linearen Bereich unterhalb von $0,4 F_{est}$ mit $F_{est} = 80\text{kN}$ ermittelt. Bei der Versuchsdurchführung des Probekörpers FT-5 (schwarz) wurde trotz konstant gehaltener Kraft bei $0,4 F_{est}$ eine zunehmende Verschiebung aufgezeichnet. Zur Berechnung des Verschiebemodul k_s wurde der linear verlaufende Bereich vor Erreichen von $0,4 F_{est}$ herangezogen.

		Versuchsreihe: FT				
Probenbezeichnung		FT-1	FT-2	FT-3	FT-4	FT-5
Schraubenanzahl	n [Stk.]	4 Stück				
Betondicke	d [mm]	70 mm				
Schraubenanordnung	α [°]	30°				
Scherkraft je Probekörper	$F_{max,PK}$ [kN]	60.85	48.94	60.32	58.47	41.19
Scherkraft je Schraube	$F_{max,SHR}$ [kN]	15.21	12.24	15.08	14.62	10.30
Verschiebungsmodul je Probekörper	$k_{s,PK}$ [kN/mm]	64.9 *)	43.2	65.6	39.7	61.0 *)
Verschiebungsmodul je Schraube	$k_{s,SHR}$ [kN/mm]	16.20	10.80	16.40	9.90	15.30
Würfeldruckfestigkeit (Betonplatte 1 / Betonplatte 2)	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	46.7 / 44.9				
Rohdichte LVL	ρ_{LVL} [kg/m ³]	521.16				
Holzfeuchte	u [%]	9.80	10.80	10.00	10.30	10.20
Versagensmechanismus		Holzversagen: Schraubenauszug aus LVL bzw. Spalten des LVLs				

charakt. Festigkeit gem. EN 14358:	$F_{max,k} = 8.75 \text{ kN}$	$K_{ser} = 13.71 \text{ kN/mm}$
-------------------------------------------	-------------------------------------------------	---------------------------------------------------

Tabelle 5.6: Auswertung Versuchsreihe: FT nach EN 14358 [49]

*) Werte wurden durch die modifizierte Auswertung ermittelt.

5.7 Interpretation der Ergebnisse

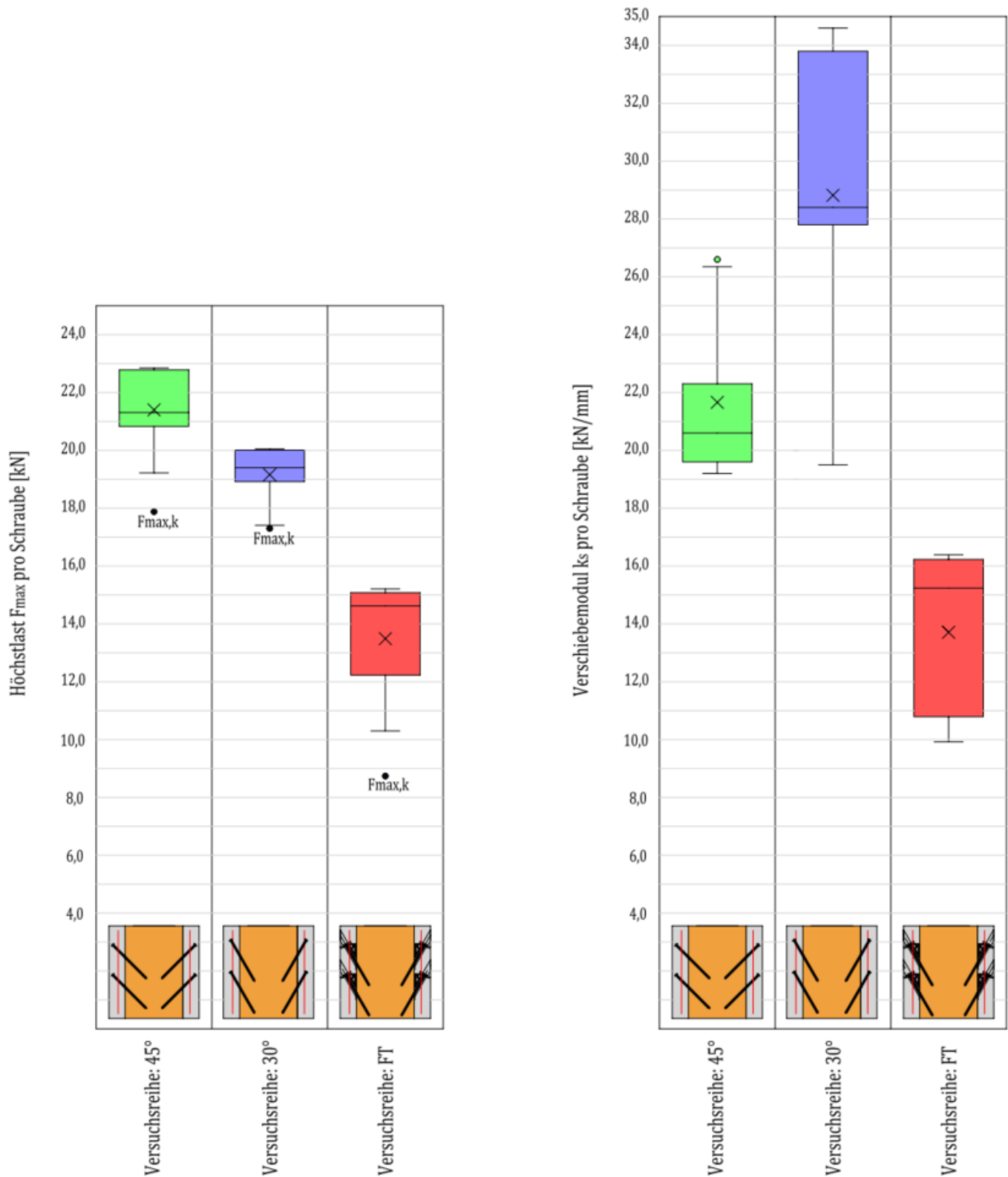


Abbildung 5.16: Vergleich Höchstlast F_{max} und Verschiebemodul k_s pro Schraube mittels Boxplot - Darstellung

Die Boxplot-Darstellung zeigt auf, wie signifikant die Unterschiede der Ergebnisse sind. Ein wesentliches Merkmal dafür ist, dass sich die Boxen der drei Versuchsreihen nicht überlappen.

charakteristische Festigkeit gem. EN 14358:		
Versuchsreihe: 45°	$F_{\max,k} = 17.88 \text{ kN}$	$K_{\text{ser}} = 21.66 \text{ kN/mm}$
Versuchsreihe: 30°	$F_{\max,k} = 17.30 \text{ kN}$	$K_{\text{ser}} = 31.15 \text{ kN/mm}$
Versuchsreihe: FT	$F_{\max,k} = 8.75 \text{ kN}$	$K_{\text{ser}} = 13.71 \text{ kN/mm}$

Tabelle 5.7: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse nach EN 14358

Vergleich der Versuchsreihen

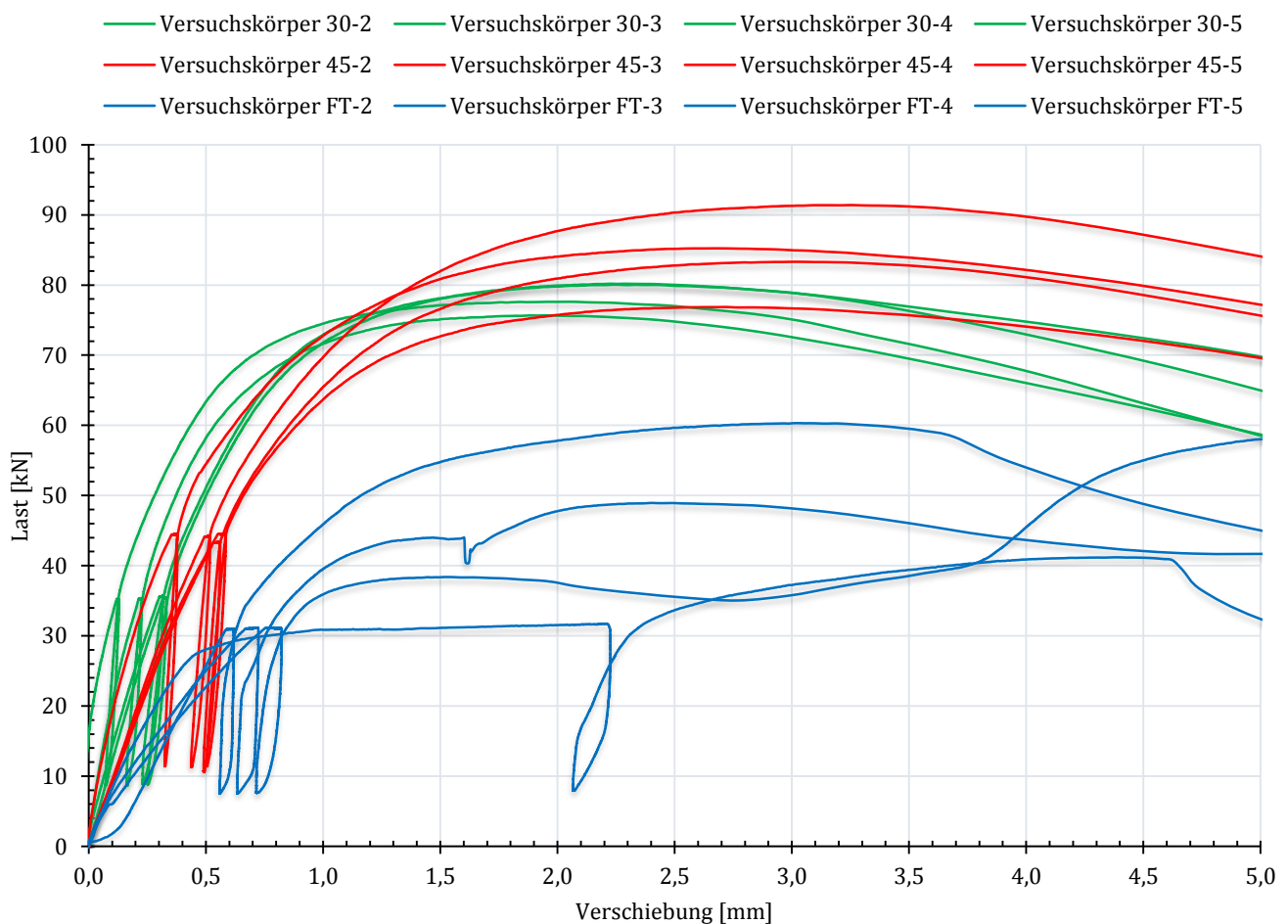


Abbildung 5.17: Last-Verschiebungsdiagramm aller Versuchsreihen (30°; 45°; FT)

In *Abbildung 5.17* wurden nur die Last-Verschiebungskurven jener Probekörper einer Versuchsreihe dargestellt, die die gleiche definierte Höchstlast F_{est} aufweisen.

Die Versuchsreihen 30° und 45° unterscheiden sich nur durch den Einschraubwinkel der HBV-Schrauben. Beim Betrachten der Ergebnisse fällt auf, dass bei der Versuchsreihe 30° die

Höchstlast geringer ist, als bei 45°. Eine mögliche Begründung ist folgende: Bei beiden Versuchsreihen ist der Versagensmechanismus immer das Ausziehen der Schrauben aus dem Holz. Durch den flachen Einschraubwinkel von 30° entsteht eine größere Normalkraft in der Schraube, als bei 45°. Weiters ist bei den 45° eingeschraubten Verbindungsmitteln der Anteil der Beanspruchung auf Abscherung höher wie bei 30°. Das hat die Folge, dass ein größeres Biegemoment in der Schraube entsteht und dadurch ein Fließmoment M_y aktiviert wird, wodurch ein größerer Anteil der Belastung durch die Schraube abgetragen werden kann - somit kommt es bei dem flacheren Einschraubwinkel von 30° bei einer geringeren Last zum Versagen im Holz.

Das Verschiebemodul k_s ist aber bei den 30° verschraubenden HBV-Schrauben wesentlich höher als bei 45°. Bei Betrachtung der *Abbildung 5.17: Last-Verschiebungsdiagramm aller Versuchsreihen (30°; 45°; FT)* ist erkennbar, dass die Kurven bei den Probekörpern 30-2 bis 30-5 steiler ansteigen als bei den Probekörpern 45-2 bis 45-5. D.h. bei der Versuchsreihe 30° tritt im Gegensatz zur Versuchsreihe 45° bis zum Erreichen der Bruchlast nur eine minimale Verschiebung auf, das ein hohes Verschiebemodul zur Folge hat. Dies bedeutet aber auch, dass bei 30° ein „sprödes“ bzw. plötzliches Versagen eintritt. Bei der 45°-Verschraubung ist im Gegensatz dazu ein minimal duktileres Verhalten erkennbar.

Bei der Versuchsreihe FT ist sowohl die Höchstlast als auch das Verschiebemodul niedriger wie erwartet. In den Last-Verschiebungskurven sind große Unterschiede zwischen den einzelnen Probekörpern ersichtlich. Hypothesen für dieses unerwartete Ergebnis werden in den folgenden Absätzen angestellt.

Das Monieren der Fertigteil-Betonplatten mit der LVL-Rippe gestaltete sich nicht ganz einfach, da die Probekörper relativ klein sind. Beim Einschrauben der Schrauben mit \varnothing 10mm und einer Länge von 200mm kam es teilweise zu Komplikationen. Diese Herstellungsungenauigkeiten könnten Einfluss auf die Versuchsdurchführung und das Versuchsergebnis haben. Hier sei angemerkt, dass in der realen Anwendung die Fertigteilplatten wesentlich größer sind und durch ihr hohes Eigengewicht Komplikationen beim Einschrauben ausgeschlossen werden können.

Bei allen fünf Prüfkörpern (FT-1 bis FT-5) kam es zum Holzversagen. Zusätzlich zum Versagensmechanismus „Ausziehen der Schraube aus dem LVL“ konnte nach der Versuchsdurchführung auch ein „Spalten der LVL-Rippe“ festgestellt werden. Möglicherweise waren die Randabstände der RAPID® VG-Schrauben \varnothing 10 x 200mm zu gering und dies führte zu einem Spalten der LVL-Rippe (siehe *Abbildung 5.18*).

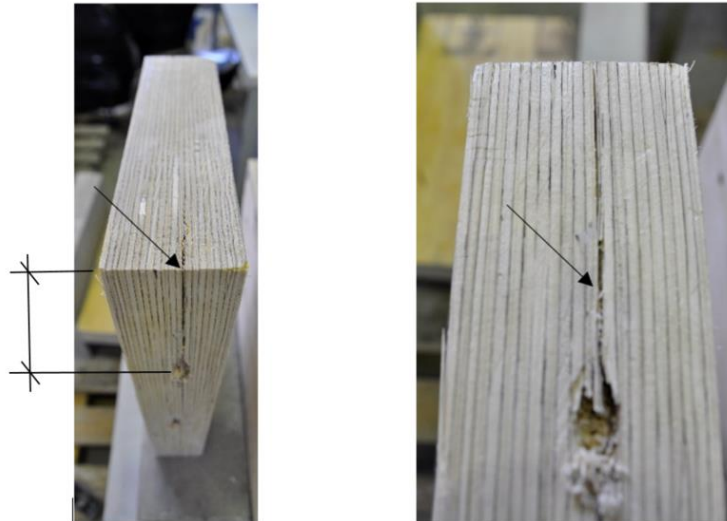


Abbildung 5.18: Versagensmechanismus: Spalten der LVL-Rippe

Abbildung 5.19 zeigt einen Schnitt durch den Schraubkanal in die LVL-Rippe. Durch das Auftrennen des LVLs soll dargestellt werden, welche Auswirkungen das Eindrehen der beiden Schraubentypen bzw. Schraubendimensionen auf das Holz hat und was für Unterschiede ersichtlich sind.

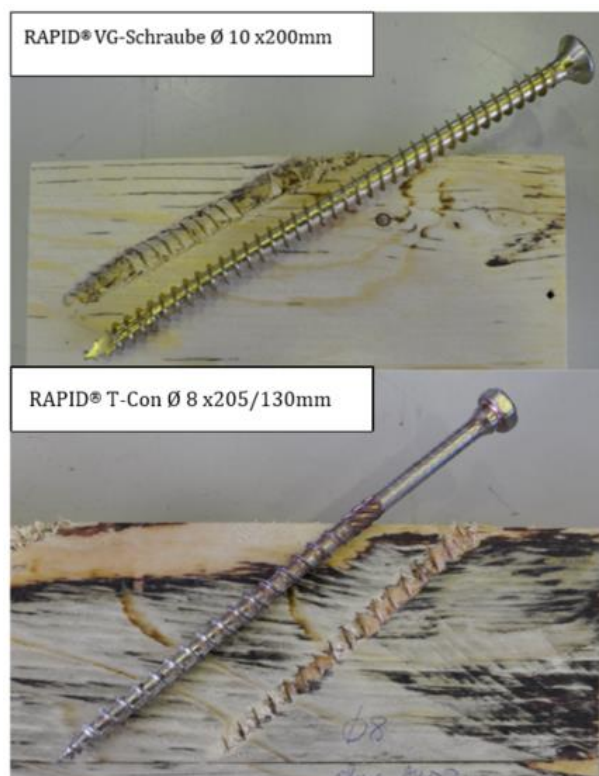


Abbildung 5.19: Schnitt durch den Schraubkanal

Eine weitere Überlegung, warum die Werte für K_{ser} und $F_{max,k}$ bei der Versuchsreihe FT wesentlich geringer sind, wie bei den anderen beiden Versuchsreihen ist, dass durch den größeren

Durchmesser und die geringere Gewindesteigung die Furnierschichten durch das Eindrehen so beschädigt werden, dass dies negative Auswirkungen auf den Auszieh Widerstand und in weiterer Folge auf die Verbundwirkung zwischen Holz und Beton hat.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Ergebnis für die Versuchsreihe FT nicht eindeutig erklärbar ist. Um eindeutiger Erkenntnisse zu erhalten ist es notwendig ergänzende Versuche durchzuführen. Hilfreiche Information würden durch reine Ausziehversuche an Einzelschrauben mit den Durchmessern 8mm und 10mm gewonnen werden. Die dadurch ermittelten Schrauben-Ausziehparameter könnten dann mit den Werten aus den Zulassungen verglichen werden und auf Plausibilität geprüft werden.

Die Aussage lt. Literaturrecherche, dass durch den Einsatz von Fertigteil-Verbindern die Anzahl der stiftförmigen Verbindungsmittel reduziert werden kann, kann anhand des derzeitigen Ergebnislage nicht bestätigt werden. [39]

5.8 Vergleich: Versuchsergebnisse / Formeln lt. Zulassung

In den Zulassungen der Verbindungsmittel, die für die Scherversuche verwendet wurden sind Berechnungsformeln für die Schraubentragfähigkeit F_k und das Verschiebemodul K_{ser} angegeben die für die statische Bemessung hinzugezogen werden. Diese Berechnungsformeln beschreiben aber nicht genau die Verbundsituation wie sie in den durchgeführten Scherversuchen vorliegt, da das verwendet LVL über eine andere Rohdichte bzw. andere Festigkeitseigenschaften verfügt. Um dem entgegen zu wirken ist in der ETA-12/0373 [31] eine Formel zur Rohdichtekorrektur angegeben. Dieser Korrekturfaktor k_{dens} (siehe Formel (5.5)) wird nur für die Berechnung der Schraubentragfähigkeit angewendet und nicht für das Verschiebemodul. Diese Rohdichtekorrektur ist auch normativ in der *ÖNORM B 1995-1-1 im Kapitel 8.7 Verbindung mit Holzschrauben* [21] verankert.

$$k_{dens} = \left(\frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} \quad (5.5)$$

ρ_k ...charakteristische Rohdichte in kg/m^3

Somit ist es sinnvoll einen Vergleich zwischen den errechneten und den experimentell ermittelten Werten, der in den Scherversuchen verwendeten Verbindungsmittel, anzustellen.

5.8.1 Wertevergleich Versuchsreihe: 45°

Es werden nur die Werte für die Versuchsreihe 45° verglichen. Grund dafür ist, dass in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-845 für den Wert der charakteristischen Schraubentragfähigkeit je Schraube (Rapid® T-Con HBV-Schraube) nur eine Berechnungsformel für einen Schraubenneigungswinkel von 45° angegeben ist (*siehe Gleichung (6.8)*). Für die Berechnung des Verschiebemoduls ist in der ETA-12/0373 eine etwas aktuellere Gleichung zu finden. Dabei wird der Schraubendurchmesser d mit der Einbindetiefe l_{ef} und einem Faktor 25 multipliziert. Diese Gleichung gilt für Holzbauteile aus Nadelholz und ist lt. Zulassung unabhängig vom Winkel zwischen Schraubenachse und Verbundfuge.

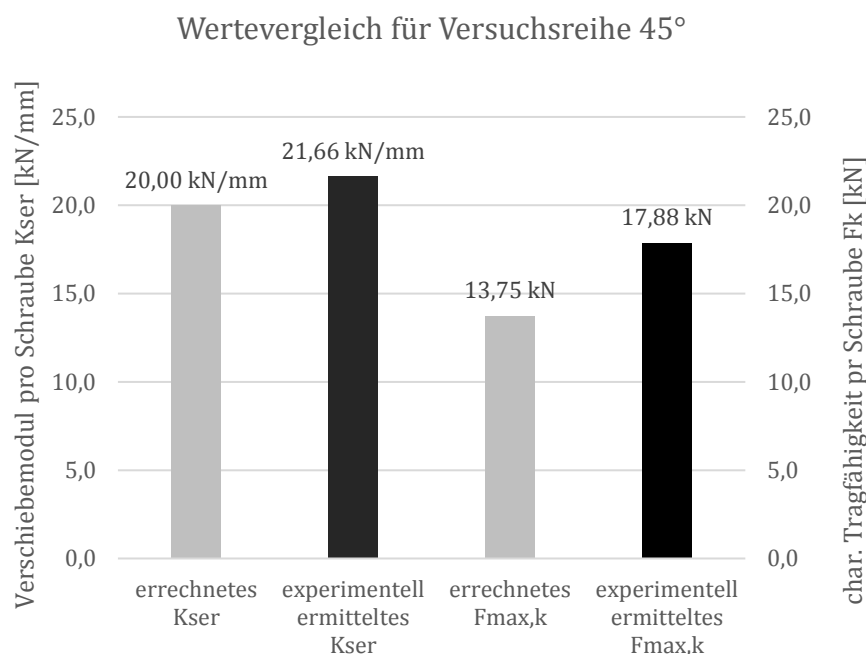


Abbildung 5.20: Vergleich der errechneten und experimentell ermittelten Werte für Versuchsreihe 45°

Der Vergleich zeigt, dass die Ergebnisse, die durch die Berechnungsformeln aus der Zulassung ermitteln wurden, eine sehr gute Näherung an die experimentell ermittelten Werte darstellt. Betrachtet man zusätzlich auch die Scherversuchs-Auswertung für die Versuchsreihe 30°, so sind im Hinblick auf beide Versuchsreihen (30°, 45°) die errechneten Werte für F_k und K_{ser} konservativ und somit auf der sicheren Seite.

Dazu sei noch angemerkt, dass die Scherversuche Werte für die Verbundfuge liefern. Um Werte in Schraubenachse zu erhalten müssen die Werte für K_{ser} und $F_{max,k}$ noch mit dem Faktor „Wurzel aus 2“ multipliziert werden. Die berechneten Werte sind aber auch ohne Korrektur der experimentell ermittelten Ergebnisse auf der sicheren Seite.

Am Rande sei noch auf die Anmerkung in der allgemein bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-845 verwiesen. Darin ist angeführt, dass für die Einbindetiefe l_{ef} maximal ein Wert von 100mm eingesetzt werden darf. In den Versuchsreihen 30° und 45° beträgt die tatsächliche Einbindetiefe 130mm. Würde dieser Wert für die Berechnung hinzugezogen werden, ist das Rechenergebnis nach wie vor konservativ, aber nur dann, wenn die experimentell ermittelten Ergebnisse mit dem vorher genannten Faktor „Wurzel aus 2“ multipliziert werden.

5.8.2 Wertevergleich Versuchsreihe: FT

In der ETA-13/0029 sind Berechnungsformeln für das Verschiebemodul K_{ser} und die charakteristische Schraubentragfähigkeit F_k für die Assy® plus VG-Schraube mit einem Neigungswinkel von 30° in Kombination mit dem Fertigteil-Verbinder angegeben. Dort ist auch vermerkt, dass Assy® plus VG-Schrauben mit \varnothing 10mm, die unter 30° zwischen Schraubenachse und Verbindungsfuge eingesetzt werden, stets zusammen mit FT-Verbindern einzubauen sind. Für die Scherversuche wurden an Stelle dieser oben genannten Schrauben die RAPID® VG-Schrauben \varnothing 10 x 200mm der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH eingesetzt. Der ETA-Wertevergleich, der in Kapitel 4.3.2.3.2 *Vergleich RAPID® VG-Schraube [ETA-12/0373] / Assy® plus VG-Schraube [ETA-13/0029]* beschrieben ist, zeigt, dass die beiden Schraubentypen gleichwertig bzw. die RAPID® VG-Schraube sogar besser abschneidet. Somit ist der Wertevergleich mit den Berechnungsformeln der ETA-13/0029 gerechtfertigt.

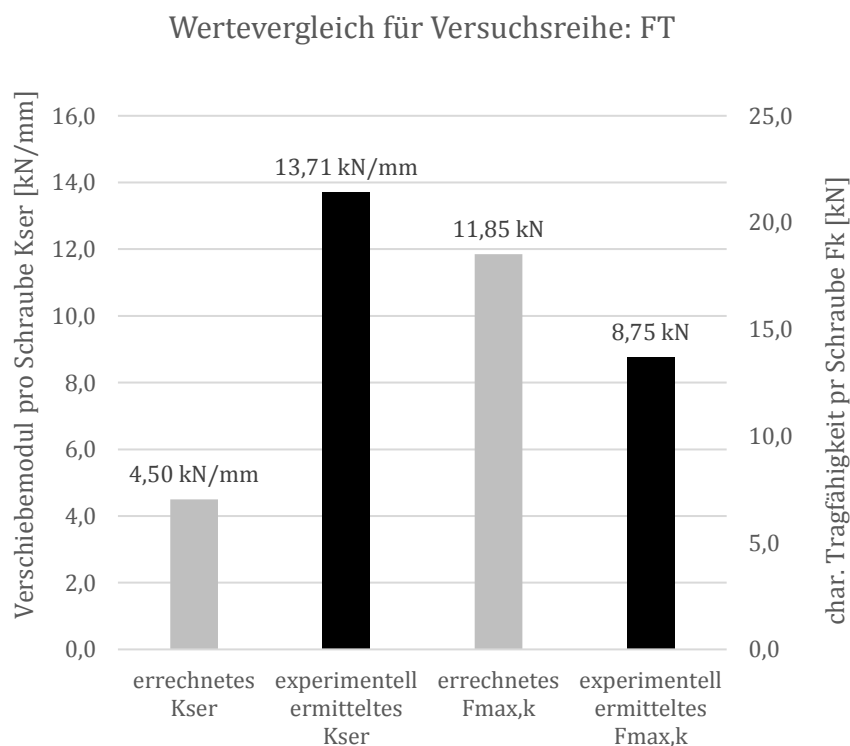


Abbildung 5.21: Vergleich der errechneten und experimentell ermittelten Werte für Versuchsreihe FT

Der Vergleich zeigt, dass die Berechnungsformel für K_{ser} (Faktor 45 multipliziert mit der Einbindetiefe l_{ef}) einen sehr konservativen Wert liefert. Die errechnete charakteristische Schraubentragfähigkeit F_k hingegen ist höher als das Ergebnis aus den Scherversuchen und somit auf der **unsicheren Seite**. Der dazugehörige Berechnungsapparat ist etwas komplexer und kann darum in der ETA13/0029 [38] nachgelesen werden. In diesem Berechnungsapparat ist ein Einfluss durch die Reibung über einen Reibungskoeffizienten $\mu = 0,25$ vorgesehen. Wird dieser Reibungseinfluss ignoriert ergibt die Berechnung für F_k ein Wert von 10,4 kN. Dieses Ergebnis ist immer noch auf der unsicheren Seite. Es bestätigt sich aber, dass der Reibungseinfluss in der Berechnungsformel für diese Anwendung nicht korrekt ist.

Auch für die Versuchsreihe FT wurde für l_{ef} nicht die tatsächliche Einbindetiefe von 112 mm eingesetzt, sondern 100 mm. Da die Berechnungsformel für K_{ser} sehr konservativ ist, wäre es unbedenklich den tatsächlichen Wert einzusetzen. Für die Ermittlung von F_k ist es aber nicht ratsam, da das Ergebnis dadurch noch unsicherer werden würde.

6 Parameterstudie

6.1 Ziel der Parameterstudie

Mit Hilfe dieser Parameterstudie sollen für die Deckenspannweiten 8m, 10m und 12m die optimalen Deckenquerschnitte ermittelt werden. Diese sollen bestmöglich ausgenutzt werden und dabei den geringstmöglichen Ressourcenaufwand hervorrufen. Ziel dieser Studie ist es, die Parameter

- Querschnittsabmessungen der tragenden Deckenbauteile aus Holz und Beton
- Materialien, im Sinne von Holzwerkstoffen mit unterschiedlichen Festigkeiten und Steifigkeiten sowie Betonfestigkeitsklassen und
- Verbindungsmittelarten, die den Verbund zwischen Holz und Beton herstellen

so flexibel zu halten, damit diese auf verschiedenste Arten miteinander kombiniert werden können. Am Ende des Tages soll für die jeweilige Spannweite der optimale Hybrid-Querschnitt, der allen Richtlinien und Anforderungen entspricht, aber trotzdem ressourceneffizient und auch wirtschaftlich ist, gefunden werden.

Wie im *Kapitel 1 Einleitung* festgehalten, werden in dieser Arbeit speziell HBV-Decken zum Einsatz bei Holzhochhäusern behandelt. Dies verlangt die Einhaltung hoher Anforderungen und Richtlinien, die bereits in den vorhergehenden Kapiteln diskutiert wurden. Dazu wurden auch größtenteils Lösungsansätze bzw. Lösungen sowie Umsetzungsmöglichkeiten beschrieben. Aus diesem Grund werden folgende sinnvolle Einschränkungen in der Parametervariation getroffen:

- Für die Holzbauteile kommt der in *Kapitel 4.1* behandelte Holzwerkstoff *LVL* zur Anwendung und wird aufgrund der hohen Deckenspannweiten in Form von Rippendecken eingesetzt.
- Als Verbindungsmittel wird zwischen Schraubmöglichkeiten (siehe *Kapitel 4.3.2.1 Fertigteil-Verbinder (FT-Verbinder)* der Firma Würth & *4.3.2.3 Holz-Beton-Verbund-Schrauben mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung*) und dem Verbund über Schubkerven (siehe *Kapitel 4.3.2.2 Schubkerven*) variiert.
- Die Ressourcenermittlung bzw. Materialkostenkalkulation wird für transportierbare Deckenelemente, wie im *Kapitel 4.4 Element- bzw. Systembauweise* für das Baukastensystem beschrieben, durchgeführt.

6.2 Umsetzung der Zielvorgabe (Ablaufschema)

Um die Parameterstudie für unterschiedliche Querschnittsvarianten im Hinblick auf die Kostenkalkulation und die benötigten Ressourcen vergleichbar zu halten, ist es notwendig zur Lösungsfindung immer das gleiche Prozedere zu durchlaufen. Zu diesem Zweck dient das in *Abbildung 6.4* dargestellte Flussdiagramm. In diesem Flussdiagramm ist das *Ablaufschema für die Lösungsfindung durch die Parameterstudie* visualisiert. Umgesetzt wird die Parameterstudie durch ein umfassendes EXCEL-Programm bzw. durch das Stabstatikprogramm RSTAB der Firma Dlubal Software GmbH. Im folgenden Absatz wird dieses Ablaufschema und dessen Umsetzung beschrieben und durchzuführende Schritte erklärt.

6.2.1 Auswahl der Deckenspannweite

Vor Beginn der Deckenquerschnittsermittlung durch die Parameterstudie gilt es zu entscheiden für welche Spannweite ein optimierter Querschnitt ermittelt werden soll. In dieser Arbeit wird die Parameterstudie für Spannweiten von 8m, 10m und 12m durchgeführt.

6.2.2 Auswahl der Deckenparameter

Um die Berechnung durchzuführen muss vorab eine Parameterwahl getroffen werden. Hierzu sind für die Querschnittsdimensionen, die verwendeten Materialien und die Verbindungsmittel für den Verbund zwischen dem Holz- und dem Betonbauteil folgende Eingaben variabel möglich:

Querschnittsdimensionen:

- Deckenelementlänge (=Deckenspannweite)
- Deckenelementbreite
- Höhe/Stärke der Betonplatte
- Breite der LVL-Rippe
- Höhe der LVL-Rippe
- Anzahl der LVL-Rippen pro Deckenelement

Die Deckenelementhöhe sowie der lichte Abstand zwischen den LVL-Rippen bzw. das Rippensprungmaß werden dann selbstständig ermittelt. Somit sind die vorläufigen geometrischen Abmessungen des Deckenelements festgelegt.

Weitere Eingabeparameter, die den Querschnitt der Decke betreffen und die zum Erstellen der Lastaufstellung notwendig sind, sind die Angaben zum Fußbodenaufbau. Dazu besteht die Möglichkeit Dickenangaben für Bodenbelag, Nassestrich und Trittschalldämmung, sowie – falls

vorhanden – gebundene Schüttung, verlorene Schalung, Wärmedämmung und Gipskartonplatten, auszuwählen.

Materialien:

Für das Betonbauteil können unterschiedliche Betonfestigkeitsklassen (*siehe Kapitel 4.2.1 Betonfestigkeitsklassen*) ausgewählt werden. Je nach Auswahl fließen die entsprechenden Materialfestigkeitskennwerte in die Berechnung ein.

Das Material für die LVL-Rippen wird anhand der diversen Furnierschichtholz-Herstellern ausgewählt. Dazu besteht die Auswahlmöglichkeit zwischen folgenden Herstellern und Produkten:

- Stora Enso Typ S (S-Grade) bzw. Typ S re-glue
- Steico LVL R bzw. G LVL R
- Mensä Group Kerto-S
- Pollmeier GmbH BauBuche Träger S bzw. BauBauche Träger GL75

Genaue Angaben zu den verschiedenen LVL-Produkten und deren Materialkennwerten sowie den zugehörigen Zulassungen sind in *Kapitel 4.1 Furnierschichtholz - LVL (Laminated Veneer Lumber)* zu finden. Entscheidend bei der Parameterauswahl ist, dass nur Holzquerschnittabmessungen ausgewählt werden, die auch vom jeweiligen Hersteller so produziert und lieferbar sind. Die Firmen Stora Enso und Steico bieten die Möglichkeit ihre Produkte Typ S und LVL R, welche in den Standard-Lieferabmessungen erhältlich sind, zu verleimen und dadurch „aufzudoppeln“. Ziel dabei ist es flexiblere Querschnittsabmessungen zu erhalten – solche Produkte laufen dann unter den Namen Typ S re-glue bzw. G LVL R. Die Materialkennwerte bleiben dieselben.

In *Tabelle 6.3* sind die gängigen Abmessungen aufgelistet.

Art und Anzahl der Verbindungsmittel:

Die Verbindungsmittelauswahl ist auf einen Verbund mittels HBV-Schrauben oder Schubkerven mit folgenden Auswahlmöglichkeiten beschränkt:

- Schmid Schrauben H. GmbH HBV Schrauben RAPID® T-Con Ø 8 x 205/130mm
- Adolf Würth GmbH & Co. KG Fertigteil-Verbinder *in Kombination mit*
Schmid Schrauben H. GmbH RAPID® VG-Schraube Ø 10 x 200mm
- Schubkerven

Wiederum sind hier spezifische Angaben zu den Verbindungsmitteln im *Kapitel 4.3 Verbindungsmittel* zu finden.

Für die statische Bemessung der HBV-Decke sind Werte für das Anfangsverschiebemodul K_{ser} und die charakteristische Schraubentragfähigkeit F_k erforderlich. Diese sind für die oben angeführten Verbindungsmittel, ausgenommen für die Schubkerven, in der dazugehörigen Zulassung zu finden. Da aber keine oder nur wenig Erfahrungen mit diesen Verbindungsmitteln in Kombination mit LVL vorhanden sind, wurden im Zuge dieser Diplomarbeit Kleinversuche in Form von Scherversuchen durchgeführt, um anhand dieser *experimentellen Untersuchungen* Werte für die statische Berechnung zu ermitteln (*siehe Kapitel 5*). In *Tabelle 6.1* sind diese experimentell ermittelten Werte für die Schrauben-Verbindungsmittel aufgelistet. Ebenfalls in *Tabelle 6.1* zu finden ist das Verbschiebemodul für einen Verbund über Schubkerven. Hierzu wurden keine Versuche durchgeführt. In der Literatur gibt es zahlreiche Versuche zur Ermittlung der Verschiebungsmoduln von eingefrästen Kerven, diese weisen aber eine relativ große Varianz auf. Informationen darüber sind u. a. in der Dissertation „*Trag- und Verformungsverhalten von Kerven bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken*“ von *Frau Birgit Christiane Michelfelder* [50] zu finden. Für die statische Bemessung im Falle einer Kervenanwendung wird ein Verschiebemodul von 1.000.000 N/mm angenommen, was einer konservativen Annahme entspricht. Dieser Wert wird in der Arbeit „*Bemessungsregeln und Ausführungshinweise für Schubkerven im Holz-Beton-Verbundbau*“ von *Schönborn, Flach und Feix* [51] in dieser Größenordnung angeführt und ist durch experimentelle Ermittlung nach *ÖNORM EN 26891* [48] entstanden.

Verbindungsmittel	Schrauben- anordnung	char. Schubtrag- fähigkeit je Schraube [kN]	Verschiebungs- modul [N/mm]
HBV Schrauben RAPID® T-Con Ø8 x205/130mm	45° (zugbeansprucht)	17,88	21.66
HBV Schrauben RAPID® T-Con Ø8 x205/130mm	30° (zugbeansprucht)	17,30	31.15
FT-Verbinder + Vollgew. Schr. RAPID® VG-Schr. Ø 10 x200mm	30° (zugbeansprucht)	8,75	13.71
Schubkerven	-	-	1.000.000

Tabelle 6.1: charakteristische Schubtragfähigkeit F_k (T_k) und Verschiebemodul K_{ser} der angeführten Verbindungsmittel

6.2.3 Nachweisführung

Anhand der nun vorhandenen Ausgangsparameter werden die diversen statischen sowie sicherheitstechnischen Nachweise durchgeführt. Um die Lastaufstellung zu vervollständigen wird eine Nutzlast auf das Deckentragwerk angesetzt. Die HBV-Decke soll als Geschoßdecke für ein Holzhochhaus mit Bürobetrieb zur Anwendung kommen, d.h. nach *ÖNORM EN 1991-1-1 Tabelle 6.1* [12] fällt das Tragwerk in die Nutzungskategorie B für Bürogebäude und ist mit einer Flächenlast vom $3,0 \text{ kN/m}^2$ zu belasten. Zusätzlich wird nach *ÖNORM EN 1991-1-1* [12] noch ein Trennwandzuschlag von $0,8 \text{ kN/m}^2$ angesetzt.

Die statische Bemessung des zweischichtigen Aufbaus der HBV-Deckenelemente erfolgt anhand des **γ - Verfahrens** für nachgiebig verbundene Biegestäbe. Es handelt sich dabei um ein kontinuierliches Berechnungsverfahren welches normativ in der *ÖNORM B 1995-1-1* [21] verankert ist. Dabei wird eine effektive Biegesteifigkeit für den Gesamtquerschnitt über die Summe der Eigensteifigkeitswerte vom Holz- bzw. Betonquerschnitt sowie der Steineranteile kombiniert mit dem Abminderungsfaktor γ ermittelt (siehe Gleichung (6.1) und (6.2)).

$$(EI_{ef}) = \sum (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (6.1)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \pi^2 \frac{E_i A_i s_i}{K_i l^2}} \quad (6.2)$$

(EI_{ef})	...effektive Biegesteifigkeit des Verbundquerschnittes
E_i	...E - Modul des Teilquerschnitts
I_i	...Eigentragheitsmoment des Teilquerschnittes
A_i	...Fläche des Teilquerschnittes
a_i	...Schwerpunktastand des Teilquerschnittes zur ideellen Schwerachse
γ_i	...Abminderungsfaktor für den Steineranteil des Teilquerschnittes
K_i	...Verschiebungsmodul des Verbindungsmittels
s_i	...effektiver Abstand der Verbindungsmittel
l	...Abstand der Momentennullpunkte

Mit Hilfe dieser effektiven Biegesteifigkeit und den maßgebenden Schnittgrößen, errechnet aus den Einwirkungen auf das Tragwerk, können nun die Nachweise für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit geführt werden.

Für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit ergeben sich für den Hybridquerschnitt drei nachweisrelevante Bereiche: der Betonquerschnitt, der Holzquerschnitt und die Verbindungsmittel. Am Betonquerschnitt werden die Nachweise der zulässigen maximalen

Randspannung sowie der zulässigen Randspannung in der Fuge geführt. Am Holzquerschnitt erfolgen die Nachweise der zulässigen Schwerpunkts-, Biegerand- und Schubspannungen.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden die Nachweise über die zulässige Durchbiegung (elastische Anfangsdurchbiegung; gesamte Enddurchbiegung) und dem Schwingungsnachweis nach *ÖNORM EN bzw. B 1995-1-1* [7], [21] (siehe auch 3.4.1 Bemessungsregeln zum Schwingungsnachweis nach Eurocode 5) geführt.

Der Einfluss der Kriechverformung und das Schwinden des Betons sowie Kriechverformungen und Feuchteänderungen im Holz sind zu berücksichtigen. Aus diesem Grund sind die Nachweise für den Anfangszustand bzw. zum Zeitpunkt $t=0$ (Kurzzeiteinwirkung) sowie für den Zeitpunkt $t=\infty$ (Langzeiteinwirkung) zu führen. Dies wird durch Abmindern des jeweiligen Elastizitätsmoduls der beiden Baustoffe und des Verschiebemoduls der Verbindungsmittel simuliert. Die Faktoren zur Abminderung für die Nutzungsklasse 1 sind in *Tabelle 6.2* zu finden. Weiters ist zu beachten, dass bei stiftförmigen Verbindungsmittel das K_{ser} für den Grenzzustand der Tragfähigkeit, um ein Drittel abzumindern ist. [7]

	SLS (t=0)	ULS (t=0)	SLS (t=∞)	ULS (t=∞)
Beton	E_{cm}	E_{cm}	$\frac{E_{cm}}{3,5}$	$\frac{E_{cm}}{3,5}$
Holzwerkstoff	$E_{0, mean}$	$E_{0, mean}$	$\frac{E_{0, mean}}{3,5}$	$\frac{E_{0, mean}}{3,5}$
stiftförmige Verbindungsmittel	K_{ser}	$\frac{2}{3} K_{ser}$	$\frac{K_{ser}}{1,6}$	$\frac{2}{3} K_{ser}$ $1,6$

Tabelle 6.2: Mittelwerte der Baustoffeigenschaften und reduzierte Werte in Abhängigkeit von der Lastdauer für die Nutzungsklasse 1 [52]

Um ein redundantes Ergebnis für die Nachweise zu erhalten wurde die Nachweisführung neben dem γ - **Verfahren** noch zusätzlich mit weiteren Berechnungsverfahren durchgeführt. Anschließend wurden die unabhängigen Ergebnisse auf Plausibilität geprüft.

Zu diesem Zweck bieten sich abhängig von der Verbindungsmittelart zwei Berechnungsverfahren an. Im Falle eines Verbunds über stiftförmige Verbindungsmittel wird das sogenannte **Schubanalogieverfahren** angewendet und bei einem Verbund über Schubkerven erfolgt die Berechnung über die Modellierung eines **Stabwerkmodells**. Für beide Berechnungsverfahren wird ein Finite Elemente-Programm benötigt, wofür, wie bereits erwähnt, die Stabstatiksoftware RSTAB verwendet wurde.

Beim **Schubanalogieverfahren**, welches in der *ÖNORM EN bzw. B 1995-1-1* [7], [21] verankert ist, wird der Verbundquerschnitt - in diesem Fall zwei nachgiebig miteinander verbundene Teilquerschnitte - in einen ideellen Rechenquerschnitt transformiert, wobei die Grundlage für die Transformation die einzelnen Steifigkeitswerte des Verbundquerschnitts bilden. Die Umwandlung erfolgt auf zwei Ebenen A und B. Ebene A ist schubstarr und die Biegesteifigkeit entspricht der Summe der Steifigkeiten der beiden Teilquerschnitte. Die Biegesteifigkeit der Ebene B setzt sich aus den Steineranteilen der Teilquerschnitte zusammen. Zusätzlich erhält Ebene B eine Schubnachgiebigkeit des Gesamtquerschnitts. In Ebene B fließt das Zusammenwirken des gesamten Verbundquerschnitts ein. Die beiden „Ersatzträger“ werden gelenkig gekoppelt und erfahren somit die gleiche Durchbiegung. Diese entspricht der tatsächlichen Verformung des Deckentragwerks (*siehe Abbildung 6.1*: . Nun können mit Hilfe des Stabstatikprogramms die Schnittgrößen des ideellen Rechenquerschnitts separat für Ebene A und Ebene B ermittelt werden. Durch Rücktransformation dieser Schnittgrößen werden dann Rückschlüsse auf die Spannungen in den einzelnen Teilquerschnitten des Hybridbauteils gezogen. [53] Diese werden dann mit dem Ergebnis aus dem γ - Verfahren verglichen.

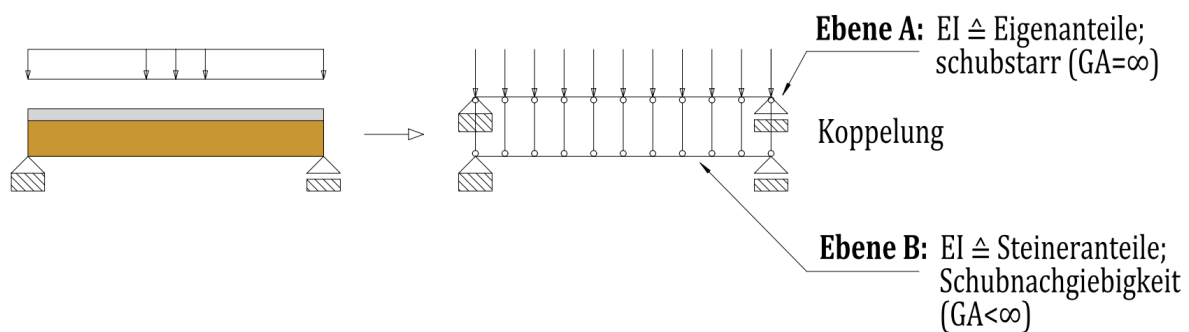


Abbildung 6.1: Grundprinzip des Schubanalogieverfahrens

Die Modellierung mit Hilfe eines **Stabwerksmodells** ist besonders geeignet für Hybridkonstruktionen, bei denen der Verbindungsmittelabstand sehr groß ist. Dabei handelt es sich um ein diskontinuierliches Berechnungsverfahren. Bei einem Verbund über Kerfen werden zwischen drei bis fünf Kerfen pro halber Deckenspannweite eingesetzt. Aus diesem Grund ist dieses Berechnungsverfahren auch prädestiniert für diese Anwendung, da es möglich ist im Gegensatz zum γ - Verfahren und Schubanalogieverfahren bei Stabwerksmodellen die Verbindungsmittel in ihrer realen Lage abzubilden. Dabei werden zuerst die tatsächlichen Holz- und Betonquerschnitte getrennt voneinander als Stabelemente in Deckenlängsrichtung modelliert und analog dem Schubanalogieverfahren mit gelenkigen Koppelstäben verbunden, um die gleiche Durchbiegung beider Stäbe zu erhalten. Anschließend werden an den realen Positionen der Kerfen die Koppelstäbe zwischen den Stabzügen vom Holz- und Betonquerschnitt durch Stabelemente ersetzt, welche auf Höhe der Verbundfuge ein Endgelenk aufweisen. Die

Kervenpositionen wurden dabei über den idealisierten Schubfluss einer Gleichstreckenlast ermittelt. [54]

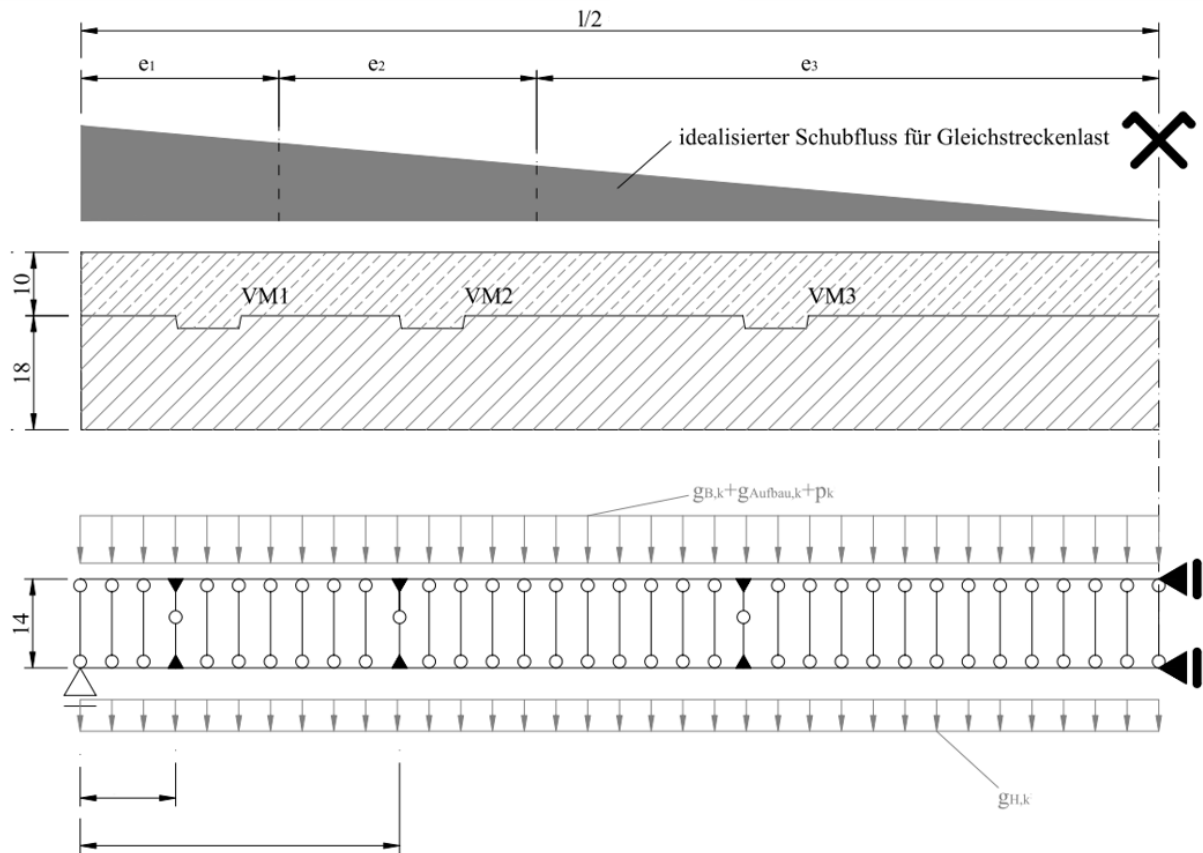


Abbildung 6.2: Beispiel Stabwerksmodell inkl. idealisiertem Schubfluss [54]

Die Schubnachgiebigkeit der Verbindungsmittel wird anhand der Biegesteifigkeiten der Stabelemente berücksichtigt. Diese errechnen sich aus der Geometrie des Verbundträgers (siehe Abbildung 6.3) sowie des Verschiebemodus K_{ser} bei Berücksichtigung der Gurtsteifigkeiten mit Hilfe der Gleichung (6.3).

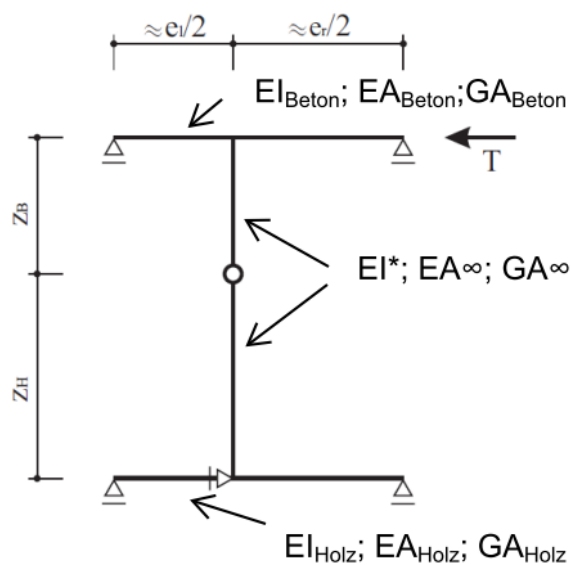


Abbildung 6.3: statisches Ersatzsystem unter Berücksichtigung der Gurtsteifigkeit [54]

$$EI^* = \frac{z_B^3 + z_H^3}{\frac{3}{K_S} - \frac{e_l^3 + e_r^3}{2 * (e_l + e_r)^2} * \left(\frac{z_B^2}{E_B * I_B} + \frac{z_H^2}{E_H * I_H} \right)} \quad (6.3)$$

- EI^* ...Biegesteifigkeit des Verbindungsmittels
- K_S ...Verschiebungsmodul des Verbindungsmittels
- z_B ... Abstand zwischen Gelenk und Beton-Schwerachse
- z_H ... Abstand zwischen Gelenk und Holz-Schwerachse
- e_l ... Abstand zum nächsten linken Koppelstab (linken Verbindungsmittel)
- e_r ... Abstand zum nächsten rechten Koppelstab (rechten Verbindungsmittel)

Bei einem Verbund über Schubkerven entspricht e_l und e_r jeweils der linken und der rechten Vorholzlänge der gerade betrachteten Kerne.

Vorteilhaft bei dieser Rechenmethode ist, dass die tatsächlich vorliegenden Schnittgrößenverläufe ohne Nachlaufrechnung am Stabwerksmodell direkt abgelesen werden können. Aufgrund der punktuellen Anordnung der Verbindungsmittel sowie der exzentrischen Übertragung der Schubkraft kommt es zu Sprüngen im Normalkraft-, Querkraft- und Momentenverlauf, welche maßgebend für die Nachweisführung sind oder sein können. [54]

Beim Vergleich der, über die Schnittgrößen der Teilquerschnitte ermittelten, Spannungen mit dem γ - Verfahren, welches mit einem kontinuierlichen Verbund rechnet, kam die Erkenntnis, dass das γ - Verfahren für Verbindungsmittel mit großen, unregelmäßigen Abständen auf der unsicheren Seite liegt, d.h. zu geringe Schnittgrößen liefert. Zielführend wäre hier das Ergebnis mit einem Modellbeiwert zu beaufschlagen.

Für den Nachweis der Verbindungsmittel kann für den Verbund über Kerfen durch die Sprünge im Normalkraftverlauf beim Stabwerksmodell für jede Kerfe eine Normalkraftbelastung eruiert werden. Die Nachweise werden dann über die Bemessungsgleichungen für Schubkerfen aus der Publikation „Bemessungsregeln und Ausführungshinweise für Schubkerfen im Holz-Beton-Verbundbau“ von Schönborn, Flach und Feix [51] geführt. Dabei werden vier Versagensmechanismen kontrolliert:

- Versagen des Holzes durch Druckstauchung (Holzpressung Kerfenflanke)

$$F_{Druck,Holz,d} = f_{Modell,1} \cdot A_{Verbindung} \cdot f_{c,\alpha,d} \cdot k\alpha \quad (6.4)$$

$f_{Modell,1}$...Formfaktor; für Durchstauchung Holz gleich 1,2
$A_{Verbindung}$...für die Kraftübertragung genutzte Holzfläche
$f_{c,\alpha,d}$... Druckfestigkeit des Holzes unter einem Winkel α zur Faser
$k\alpha$...Korrekturbeiwert; Annahme: $k\alpha = 1$

- Abscheren des Vorholzes

$$F_{Abscher,Holz,k} = f_{Modell,2} \cdot b_v \cdot t_v \cdot 8 \cdot f_{v,k} \quad (6.5)$$

$f_{Modell,2}$...Formfaktor; für Abscheren Vorholz gleich 1,0
b_v	...Breite der Kerfe
t_v	...Tiefe der Kerfe
$f_{v,k}$...charakteristischer Wert der Schubspannung

- Konsolenversagen des Betons

$$F_{Teilflächenpressung} = f_{Modell,3} \cdot b_v \cdot t_v \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{l}{180} \quad (6.6)$$

$f_{Modell,3}$...Formfaktor; für Konsolenversagen Beton gleich 2,25
b_v	...Breite der Kerfe
t_v	...Tiefe der Kerfe
f_{ck}	...charakteristischer Betondruckfestigkeit
l	...Längenkorrekturfaktor; Einfluss der Kerfenlänge auf die auftretende Spaltzugspannung

- Abscheren des Betons

$$F_{Abscher,Holz,k} = f_{Modell,4} \cdot 2,4 \cdot b_v \cdot l_v \cdot \tau_{Rd} \quad (6.7)$$

$$\text{mit } \tau_{Rd} = 0,09 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}}$$

$f_{Modell,4}$...Formfaktor; für Abscheren Beton gleich 2,25
b_v	...Breite der Kerne
l_v	...Länge der Kerne
f_{ck}	...charakteristischer Betondruckfestigkeit

Bei stabförmigen Verbindungsmittel wird der Nachweis über die charakteristische Schubtragfähigkeit pro Schraube geführt. Dieser Wert wird entweder durch *experimentelle Untersuchung* in Form vom Scherversuchen (*siehe Kapitel 5*) ermittelt oder über eine Formel, welche in der jeweiligen Schraubenzulassung angeführt ist, errechnet. Zum Beispiel für die RAPID® T-Con Holz-Beton-Verbundschraube [Z-9.1-845] mit 45° Scherzug-Beanspruchung gilt folgende Gleichung. [52]

$$F_k = 100 \cdot l_{ef} \cdot k_{dens} \quad (6.8)$$

F_k	...charakteristische Schraubentragfähigkeit pro Schraube in N
l_{ef}	...Gewindelänge im Holzbauteil mit der Schraubenspitze in mm; maximal jedoch 100 mm
k_{dens}	...Rohdichte-Korrekturfaktor (<i>siehe Formel (5.5)</i>)

Dabei wird die Einwirkung auf eine Schraube über den Schubfluss in der Verbundfuge ermittelt.

Die Nachweisführung für die Warmbemessung, d.h. für die Bemessung im Brandfall wird ebenfalls über das γ – Verfahren geführt. Im Falle einer alleinigen Brandlastabtragung durch die Betonplatte, wird die notwendige Längsbewehrung nach *ÖNORM EN 1992-1-1* [35] ermittelt. Das konkrete Brandschutzkonzept, wurde bereits in *Kapitel 3.2* ausführlich behandelt.

6.2.4 Ergebnisanalyse der Nachweisführung

Im Anschluss an die Nachweisführung gilt es zu eruieren, ob die Parameterwahl zu Beginn zielführend war oder nicht. Dabei sind drei unterschiedliche Zustände möglich:

- Alle Nachweise und somit alle Anforderungen an das Deckenelement sind erfüllt. D.h. die gewählten Deckenparameter bilden eine potenzielle Lösung für das Anforderungsprofil.
- Die Nachweise sind teilweise erfüllt. Ist das der Fall, stellt sich die Frage ob anhand von internen Maßnahmen, d.h. durch Optimieren der Parameterwahl die noch offenen Nachweise erfüllt werden können und somit eine potentielle Lösung entsteht. Die zweite Option ist, dass sich durch die bereits erfüllten Nachweise eine sinnvolle „Teillösung“ ergibt, welche kombiniert mit zusätzlichen externen Maßnahmen zu einer potentiellen Lösung führt.

Ein Beispiel für eine interne Maßnahme wäre, wenn durch Erhöhen der Estrichhöhe der Schwingungsnachweis erfüllt wird.

Wenn alle Nachweise erfüllt sind und für den Brandfall statt der geforderten REI 90 nur ein geringerer Brandwiderstand nachgewiesen werden kann, wäre eine externe Maßnahme das Kombinieren mit einer aktiven Brandschutzanlage (z.B. Sprinkler-System). Dies kann auch zielführend im Sinne der Wirtschaftlichkeit sein oder es wird sogar explizit ein Löschesystem gefordert.

- Kein Nachweis ist erfüllt. Ist das der Fall, war die Wahl der Deckenparameter nicht zielführend und es ist somit keine Lösungsoption.

Die visuelle Darstellung zu der Erklärung ist in *Abbildung 6.4: Ablaufschema für die Lösungsfindung durch die Parameterstudie* zu finden.

6.2.5 Ressourcenermittlung

Ist die Ergebnisanalyse abgeschlossen, d.h. sind für alle drei untersuchten Spannweiten mehrere potenziellen Lösungen gefunden worden, werden im nächsten Schritt die Ressourcen, die für die Herstellung von einem Deckenelement mit der untersuchten Spannweite benötigt werden, ermittelt. Dabei werden die benötigten Kubikmeter pro Deckenelement vom jeweiligen Material (Stahlbeton und Furnierschichtholz) sowie die benötigte Anzahl an Verbindungsmitteln errechnet. Mit dem Wert, der die Ressourcenmenge pro Deckenelement beschreibt, wird dann untersucht welche der zuvor ermittelten Lösungsvarianten die Ressourceneffizienteste ist.

6.2.6 Materialkostenkalkulation

Um die HBV-Deckenentwicklung auch mit anderen Deckenkonstruktionen vergleichen zu können, macht es Sinn eine Materialkostenkalkulation durchzuführen. Entscheidend dabei ist, dass nur die Materialkosten monetär bewertet werden und es sich um keine detaillierte Kostenkalkulation handelt. Des Weiteren wird ersichtlich in welcher Relation Ressourceneffizienz und Kosteneffizienz bei den untersuchten Spannweiten zueinander stehen.

Zu diesem Zweck wurden Richtwerte für aktuelle Kubikmeterpreise von LVL und Stahlbeton eingeholt. Weiters wurden Preise für die stiftförmigen Verbindungsmittel und die Kosten für den Kervenabbund recherchiert.

Mit Hilfe der bereits ermittelten Ressourcenmenge pro Deckenelement, ist es nun möglich eine grobe Kostenkalkulation für ein Deckenelement aufzustellen bzw. daraus dann ein Quadratmeterpreis für eine HBV-Decke der jeweiligen Spannweite grob zu ermitteln. Zu beachten ist, dass zusätzlich benötigte Materialien nach dem Einbringen der einzelnen Deckenelemente abhängig vom konstruktiven System nicht berücksichtigt werden. Gemeint ist an dieser Stelle zum Beispiel der Vergussmörtel, welcher notwendig ist um die Betonfugen zu schließen und somit die monolithische Scheibenwirkung der gesamten HBV-Decke zu aktivieren.

Weiters wird auch der Fußbodenaufbau in der Materialkostenkalkulation nicht berücksichtigt, sondern nur die benötigten Ressourcen für das Deckenelement. Grund dafür ist, dass sich der Fußbodenaufbau abhängig vom Deckenelement-Querschnitt nur marginal, wenn überhaupt, ändert und somit keinen relevanten Einfluss auf die Materialkostendifferenz der unterschiedlichen Lösungsvarianten hat.

Sind die Materialkosten für die unterschiedlichen Lösungsvarianten ermittelt, kann daraus die kosteneffizienteste Lösung eruiert werden.

In der *Tabelle 6.3*: Auflistung der Standard-Lieferabmessungen und aktuelle Preise der diversen LVL – Hersteller sind Richtwerte für aktuelle Preise pro Kubikmeter sowie die Standard-Lieferabmessungen der diversen LVL-Hersteller aufgelistet, welche über E-Mailkorrespondenz mit den Firmen eingeholt wurden. Es ist zu berücksichtigen, dass hier von einem linearen Preisverlauf unabhängig von der Menge ausgegangen wird.

Die aktuellen Transportbetonpreise für die diversen Betonfestigkeitsklassen sind in *Tabelle 6.4* aufgelistet. Diese sind aus der Preisliste der Firma Rohrdorfer Transportbeton GmbH entnommen (gültig seit 1.1.2018) und gelten für den Raum Wien, NÖ-Nord, NÖ-Süd und Burgenland.[55]

Für die Kalkulation der Stahlbetonplatte wurde 20% auf die aktuellen Transportbetonpreise aufgeschlagen. Dies entspricht einer konservativen Kalkulation.

Die Preise für die HBV-Schrauben bzw. für die FT-Verbinder lt. Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH sind in der *Tabelle 6.5* angeführt, wobei wieder von einem linearen Preisverlauf ausgegangen wird.

Informationen zu den Kosten für den Kervenabbund wurden mit Hilfe der Diplomarbeit von *Herrn Dipl.-Ing. Stefan Hölzl* mit dem Titel: *Wirtschaftliche Betrachtung von Holz-Beton-Verbund-Decken* [37] ermittelt. In dieser Arbeit wurden Kosten anhand von Herstellerangaben für Holzträger mit Schubkerven und für Holzträger ohne Schubkerven eingeholt. Durch Umrechnen kann somit ein Wert von 16 Euro pro Laufmeter Kerbe ermittelt werden.

Im Falle einer Teillösung sind zusätzliche Kosten für die externen Maßnahmen zu berücksichtigen, die notwendig sind um aus einer „sinnvollen Teillösung“ eine „potenzielle Lösung“ zu erhalten (*siehe Abbildung 6.4*: Ablaufschema für die Lösungsfindung durch die Parameterstudie). Am häufigsten werden zusätzliche externe Maßnahmen zur Einhaltung der Brandschutzanforderungen benötigt. Zu diesem Zweck wurden folgende Preisangaben recherchiert:

Für eine Brandschutzbekleidung in Form von 12,5 mm starken Feuerschutzplatten aus Gipskarton *GKF gem. ÖNORM B 3410, Typ DF gem. ÖNORM EN 520* [56] konnte anhand der Preisliste der Trockenbaufirma Knauf KG ein Preis von 4,55 Euro pro Quadratmeter recherchiert werden (gültig seit 1.1.2018). [57]

Bei der Recherche eines Quadratmeterpreises für ein aktives Brandschutzsystem in Form einer Löschanlage konnten drei aussagekräftige Quellen gefunden werden. Bei der ersten Quelle handelt es sich um eine Publikation aus dem Jahr 2008 des internationalen Stahlkonzerns ArcelorMittal. Hier wird für ein Sprinklersystem mit einem Preis von 28 bis 42 Euro pro Quadratmeter Brutto Grundfläche (BGF) kalkuliert.[58] Die zweite Quelle sind Vortragsunterlagen der ETH Zürich aus dem Jahr 2010. Investitionskosten für eine Sprinkleranlage eines Neubaus werden hier mit 10 bis 25 Euro pro Quadratmeter angegeben.[59] Eine weitere Quelle aus dem Jahr 2018 stammt aus einem Interview mit Frau Dipl.-Ing. Tanja Höfer von der Firma kppk ZT GmbH. In dem Interview wurden aktuelle Preisangaben der Firma Accuro Brandschutzanlagen GmbH von 35 Euro pro Quadratmeter genannt. Zu diesen genannten Quadratmeterpreisen fallen noch Anschaffungskosten für eine Pumpenzentrale von ca. 100.000 Euro an. Dieser Betrag ist aber abhängig von der Brandabschnittsgröße und wird in dieser Materialkostenkalkulation nicht berücksichtigt. Die ersten beiden Quellen beruhen rein auf Internetrecherche. Dadurch dass die zuletzt genannte Quelle die aktuellste und seriöseste ist und mit der Publikation des Stahlkonzerns ArcelorMittal [58] übereinstimmt, wird für die Materialkostenkalkulation der Betrag von 35 Euro pro Quadratmeter herangezogen.

Alle angeführten Preisangaben sind exklusive Mehrwertsteuer und unter Annahme eines linearen Preisverlaufes zu sehen.

LVL Hersteller	LVL Typ	Standard-Lieferabmessungen			Preise lt. E-Mail-Verkehr (exkl. MwSt.) [€/m ³]
		Länge [m]	Dicke [mm]	Breite/Höhe [mm]	
STEICO	LVL R	9,0 12,0	39 45 75	200	650,00 -750,00
				220	
				240	
				300	
				360	
				400	
				STEICO	
Stora Enso	Typ S / S-Grade	min 2,5 max 24,0	27 30 33 39 45 51 57 63 69 75	200	derzeit keine Preisangaben vorhanden
				240	
				250	
				260	
				300	
				350	
				360	
				400	
				450	
				500	
				600	
Stora Enso	re-glue Typ S /S-Grade (verklebte QS aus den Standard- Lieferabmessungen) keine genaueren Angaben vorhanden				derzeit keine Preisangaben vorhanden
Mensä Group	Kerto - S	min 2,0 max. 25,0	27 33 39 45 51 57 63 75	200	unverb. Angabe: ca. 780,00
				225	
				260	
				300	
				360	
				400	
				450	
				500	
				600	

Pollmeier Massivholz GmbH	Träger BauBuche S	6,0		1820	600,00
		12,0	40	(muss zuge-	
		13,5	60	schnitten	
		16,0		werden)	
		18,0			
Pollmeier Massivholz GmbH	Träger BauBuche GL75			120	700,00
			50	160	
		12,0	100	280	
		13,5	120	320	
		16,0	160	360	
		18,0	200	400	
			240	440	
			280	480	
			300	520	
				600	

Tabelle 6.3: Auflistung der Standard-Lieferabmessungen und aktuelle Preise der diversen LVL – Hersteller

Betonfestig- keitsklasse	Kurzbezeichnung / Expositionsklasse	Standardzement	Konsistenz	Preise (exkl. MwSt.) [€/m³]
C 20/25	XC1	CEM II 42.5 N	C0 bis F45	90,00 €
C 25/30	XC1	CEM II 42.5 N	C0 bis F45	91,00 €
C 30/37	XC1	CEM II 42.5 N	C0 bis F45	95,00 €
C 35/45	XC1	CEM II 42.5 N	C0 bis F45	103,00 €
C 40/45	XC1	CEM II 42.5 R /52,5N	C0 bis F45	107,00 €

Tabelle 6.4: Auszug Preisliste Transportbeton (Fa. Rohrdorfer Transportbeton GmbH; Stand: 1.1.2018)

Verbindungsmittel-hersteller	Verbindungsmittel-typ	Preise (exkl. MwSt.) [€/Stk.]
Schmid Schrauben Hainfeld GmbH	HBV Schraube RAPID® T-Con Ø8x205/130mm	0,80 €
Schmid Schrauben Hainfeld GmbH	Vollgewindeschraube RAPID® VG Ø10x200mm	1,10 €
Adolf Würth GmbH & Co. KG	Fertigteil-Verbinder	4,04 €

Tabelle 6.5: Preise für stiftförmige Verbindungsmittel

6.2.7 Ermittlung der finalen Lösung

Durch den Vergleich der ressourceneffizientesten mit der kosteneffizientesten Lösung für die jeweilige Deckenspannweite kann dann ermittelt bzw. entschieden werden, welche der beiden Lösungen am meisten positive Aspekte aufweist und somit die finale Lösung ist. Bzw. kann eruiert was für Unterschiede zwischen einer selbstständigen Lösung und einer Lösung, welche mit einer externen Maßnahme kombiniert werden muss, auffallen.

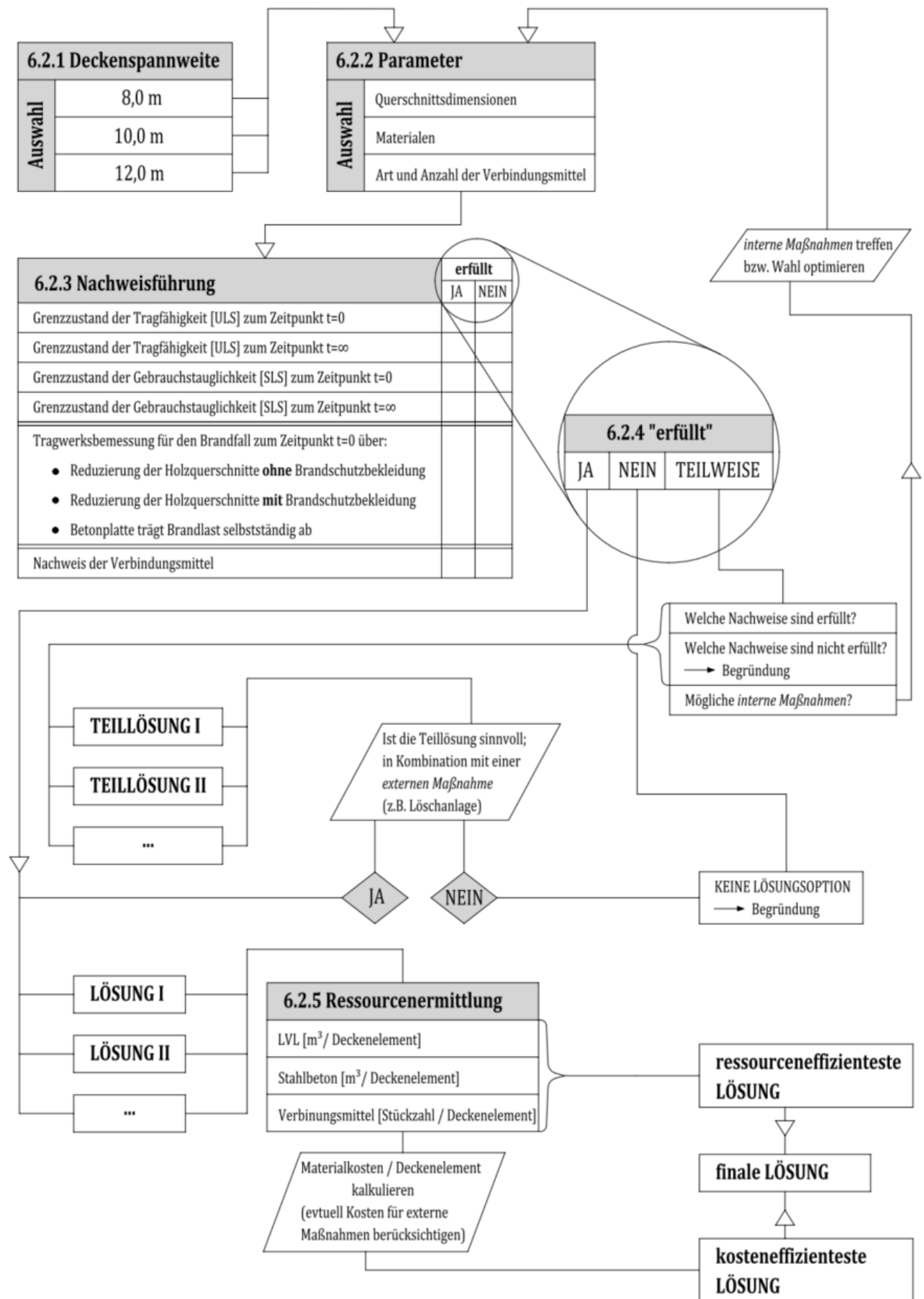


Abbildung 6.4: Ablaufschema für die Lösungsfindung durch die Parameterstudie

6.3 Parameterstudie für 12m Deckenspannweite

6.3.1 Lösung I /12m

6.3.1.1 Deckenparameter; 12m

Deckenparameter:	
Deckenelementabmessungen:	
Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	12 m
Deckenelementbreite	2.5 m
Deckenelementhöhe	43 cm
Beton:	
Betonfestigkeitsklasse	C25/30
Höhe/Stärke der Betonplatte	11 cm
Holz:	
LVL-Hersteller	Pollmeier GmbH
LVL-Typ	BauBuche Träger GL75
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	20 bzw. 40 cm
Höhe der LVL-Rippe	32 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4 (3) Stk.
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel	
Art des Verbindungsmittels	Schubkerven
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	8 Stk.
Abmessungen der Verbindungsmittel:	
Kervlänge	20 cm
Kervtiefe	4 cm
Kervbreite (Summe über die Rippenanzahl)	80 cm (4 x 20 cm)
Gesamtkervbreite pro Deckenelement [lfm/DE]	6.4 lfm/DE

Tabelle 6.6: Deckenparameter für Lösung I/12m; 12m Deckenspannweite

6.3.1.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 12m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m ³ /DE]	3,3 m ³
LVL Menge pro Deckenelement [m ³ /DE] bzw. [lfm/DE]	3.072 m ³ 48 lfm
Ressourcen pro m² Deckenfläche [m³/m²]:	
Beton	0,11 m ³ /m ²
LVL	0,1024 m ³ /m ²

Tabelle 6.7: Ressourcenermittlung für Lösung I/12m; 12m Deckenspannweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte	
Einheitspreis [C25/30]	91,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	300,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€ / DE]	60,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	360,00 €
LVL-Rippen	
Einheitspreis [BauBuche Träger GL75]	700,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€ / DE]	2.150,00 €
Verbindungsmittel	
Einheitspreis [Schubkerven]	16,00 €/lfm.
Verbindungsmittelkosten pro Deckenelement [€ / DE]	102,00 €
gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€ / DE]	2.613,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche [€ / m ²]	87,00 €/m²

Tabelle 6.8: Materialkostenermittlung für Lösung I/12m; 12m Deckenspannweite

Bei dieser Lösung wird der Verbund über Schubkerven gewährleistet, darum fallen keine zusätzlichen Ressourcen für die Verbindungsmittel an. Materialkosten werden aber in Form von Aufwandskosten kalkuliert, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten.

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 43cm erreicht.

6.3.1.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung I/12m

Durch die Parameterwahl für die Lösung I der Parameterstudie für eine Spannweite vom 12m konnten alle relevanten Nachweise, welche in *Kapitel 6.2.3 Nachweisführung* beschrieben sind, erfüllt werden bis auf den Kervennachweis „Abscheren des Betons“ von *Schönborn, Flach und Feix*. [51] Diese Variante gilt aber trotzdem als vollwertige Lösung, da durch günstiges Verlegen des Bewehrungsstahles in der Kerne oder zusätzliche Positionierung einer auf Abscherung beanspruchten Schraube am Kervengrund (*siehe Abbildung 4.6*) der Nachweis problemlos erfüllt werden kann.

Die Rippen werden bei dieser Lösung paarweise montiert, um einen gedrungenen Querschnitt zu erhalten. Dies hat den Vorteil, dass beim Brandnachweis der Abbrandquerschnitt bei einer 90-minütigen Brandeinwirkung von 75% auf 50% reduziert werden kann und somit die geforderten Brandschutzanforderungen nach *ÖNROM EN bzw. B 1995-1-1* [7], [21] erfüllt sind.

Weiters ausschlaggebend für die Parameterwahl waren die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Beim Nachweis für die Kurzzeiteinwirkung ($t=0$) werden hier 90% der zulässigen Durchbiegung erreicht und für die Langzeiteinwirkung ist die Auslastung noch höher. Der Schwingungsnachweis wird über der Querverteilungswirkung (*siehe Absatz 3.4.1.1*) gewährleistet.

6.3.2 Lösung II / 12m

6.3.2.1 Deckenparameter; 12m

Deckenparameter:

Deckenelementabmessungen:

Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	12 m
Deckenelementbreite	2,5 m
Deckenelementhöhe	51 cm

Beton:

Betonfestigkeitsklasse	C25/30
Höhe/Stärke der Betonplatte	11 cm

Holz:	
LVL-Hersteller	Pollmeier GmbH
LVL-Typ	BauBuche Träger GL75
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	10 bzw. 20 cm
Höhe der LVL-Rippe	40 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4(3) Stk.
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel	
Art des Verbindungsmittels	Schubkerven
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	10 Stk.
Abmessungen der Verbindungsmittel:	
Kervnlänge	20 cm
Kerventiefe	5 cm
Kervnenbreite (Summe über die Rippenanzahl)	40 cm (4 x 10cm)
Gesamtkervnenbreite pro Deckenelement [lfm/DE]	4 lfm/DE

Tabelle 6.9: Deckenparameter für Lösung II/12m; 12m Deckenspannweite

6.3.2.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 12m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m ³ /DE]	3,3 m ³
LVL Menge pro Deckenelement [m ³ /DE] bzw. [lfm/DE]	1,92 m ³ 48 lfm
Ressourcen pro m ² Deckenfläche [m ³ /m ²]:	
Beton	0,11 m ³ /m ²
LVL	0,064 m ³ /m ²

Tabelle 6.10: Ressourcenermittlung für Lösung II/12m; 12m Deckenspannweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte	
Einheitspreis [C25/30]	91,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€/ DE]	300,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€/ DE]	60,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€/ DE]	360,00 €
LVL-Rippen	
Einheitspreis [BauBuche Träger GL75]	700,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€/ DE]	1344,00 €
Verbindungsmittel	
Einheitspreis [Schubkerven]	16,00 €/l/m.
Verbindungsmittelkosten pro Deckenelement [€/ DE]	64,00 €
kombiniert mit aktiver Brandschutzanlage	
Einheitspreis [Sprinklersystem-Anschaffungskosten]	35,0 €/m ² BGF
Kosten für Sprinkleranlage pro Deckenelementfläche [€/ DE]	1050,00 €
gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€/ DE]	1.768,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche [€/ m ²]	59,00 €/m²
Materialkosten pro Deckenelement inkl. Sprinklerkosten [€/ DE]	2.818,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche inkl. Sprinklerkosten [€/ m ²]	94,00 €/m²

Tabelle 6.11: Materialkostenermittlung für Lösung II/12m; 12m Deckenspannweite

Bei dieser Lösung wird der Verbund über Schubkerven gewährleistet, darum fallen keine zusätzlichen Ressourcen für die Verbindungsmittel an. Materialkosten werden aber in Form von Aufwandskosten kalkuliert, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten. Zusätzlich werden Kosten für das Sprinkler-System (externe Maßnahme) aufgeschlagen, welches notwendig ist, um die Brandschutzanforderungen zu erfüllen.

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 51cm erreicht.

6.3.2.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung II/12m

Bei dieser Variante wurde bei der Parameterwahl darauf geachtet den Querschnitt der LVL-Rippen aus „BauBuche Träger GL75“ zu reduzieren, da dies den kostenintensivsten Posten darstellt. Zu diesem Zweck wurde ein höherer aber dafür schmalerer Querschnitt verwendet, wodurch ein höheres Flächenträgheitsmoment erreicht wird. Dies hat positive Auswirkungen auf die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Die Berechnung zeigt geringere Auslastungen im Bereich der Durchbiegungen. Der Schwingungsnachweis wird wiederum über die Querverteilungswirkung nachgewiesen.

Aufgrund des schmäleren LVL-Querschnitts konnten zu Beginn die *Kervennachweise* nach Schönborn, Flach und Feix [51] nicht erfüllt werden. Das Erhöhen der Kerventiefe von 4cm auf 5cm und eine zusätzliche Kerbe pro halber Deckenspannweite und Rippe ermöglicht eine positive Nachweisführung bis auf „Abscheren des Betons“.[51] Dies ist aber gleich zu behandeln wie es im Absatz 6.3.1.3 bereits beschrieben wurde.

Die Rippen werden ebenfalls paarweise angeordnet, wobei die vorhandenen Lieferabmessungen der Firma Pollmeier GmbH es erlauben in der Elementmitte eine Rippe mit 40 x 20cm und am Elementrand jeweils eine Rippe mit 40 x 10cm anzuordnen. Dadurch können statische Vorteile erzielt werden.

Trotz dieser Anordnung kann nur ein Brandwiderstand von R 60 erreicht werden, da aufgrund des abgebrannten Querschnitts nur noch eine geringe Restkerventiefe überbleibt und diese nicht ausreicht um die *Kervennachweise* nach Schönborn, Flach und Feix für die *Warmbemessung* zu erfüllen.[51] Somit ist diese Variante als Teillösung zu sehen. In Kombination mit einer aktiven Brandschutzanlage (Sprinkler-System) wird diese Teillösung zu einer potentiellen Lösung aufgewertet. Eine weitere externe Maßnahme wäre eine Brandschutzbekleidung der LVL-Rippen, wodurch die Anforderungen an den Brandschutz ebenfalls erfüllt werden können.

Alle weiteren geforderten Nachweise sind gewährleistet, wobei zu beachten ist, dass die „Randspannung in der Fuge“ im Beton eine geringe Zugbeanspruchung hervorrufen kann und somit eine entsprechende Längsbewehrung nach ÖNORM EN 1992-1-1 [35] zu dimensionieren ist.

6.3.3 Lösung III /12m

6.3.3.1 Deckenparameter; 12m

Deckenparameter:	
Deckenelementabmessungen:	
Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	12 m
Deckenelementbreite	2,5 m
Deckenelementhöhe	61 cm
Beton:	
Betonfestigkeitsklasse	C25/30
Höhe/Stärke der Betonplatte	11 cm
Holz:	
LVL-Hersteller	Mestä Group
LVL-Typ	Kerto-S
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	7,5 cm
Höhe der LVL-Rippe	50 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4 Stk.
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel	
Art des Verbindungsmittels	HBV-Schrauben
Schraubenhersteller	Schmid Schrauben H. GmbH
Schraubentyp	Rapid® T-Con Ø8x205/130mm
Schraubenanordnung	45° Zug-Scher-Beanspruchung
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	90 Stk.

Tabelle 6.12: Deckenparameter für Lösung III/12m; 12m Deckenspannweite

6.3.3.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 12m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m ³ /DE]	3,3 m ³
LVL Menge pro Deckenelement [m ³ /DE] bzw. [lfm/DE]	1,8 m ³ 48 lfm
Verbindungsmittellanzahl pro Deckenelement [Stk./DE]	ca. 360 Stk.
Ressourcen pro m ² Deckenfläche [m ³ /m ²]; [Stk./m ²]	
Beton	0,11 m ³ /m ²
LVL	0,06 m ³ /m ²
Verbindungsmittel (HBV-Schrauben)	12 Stk./m ²

Tabelle 6.13: Ressourcenermittlung für Lösung III/12m; 12m Deckenspannweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte	
Einheitspreis [C25/30]	91,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	300,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€ / DE]	60,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	360,00 €
LVL-Rippen	
Einheitspreis [Mestä Group, Kerto-S]	780,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€ / DE]	1404,00 €
Verbindungsmittel	
Einheitspreis [RAPID®T-Con Ø8x205/130mm]	0,80 €/Stk.
Verbindungsmittelkosten pro Deckenelement [€ / DE]	288,00 €
kombiniert mit aktiver Brandschutzanlage	
Einheitspreis [Sprinklersystem-Anschaffungskosten]	35,0 €/m ² BGF
Kosten für Sprinkleranlage pro Deckenelementfläche [€ / DE]	1.050,00 €

gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€ / DE]	2.052,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche [€ / m ²]	68,00 €/m²
Materialkosten pro Deckenelement inkl. Sprinklerkosten [€ / DE]	3.102,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche inkl. Sprinklerkosten [€ / m ²]	103,00 €/m²

Tabelle 6.14: Materialkostenermittlung für Lösung III/12m; 12m Deckenspannweite

Zusätzliche Kosten für das Sprinkler-System (externe Maßnahme) werden aufgeschlagen, welches notwendig ist, um die Brandschutzanforderungen zu erfüllen.

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 61cm erreicht.

6.3.3.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung III /12m

Für diese Querschnittsvariante wurde LVL aus Fichtenholz von der Firma Mestä Group mit den HBV-Schrauben RAPID® T-Con 8x205/130mm kombiniert. Aufgrund der niedrigeren Festigkeitswerte wie bei der „BauBuche“, musste der Holzquerschnitt auf 50 cm erhöht werden. Die Anzahl der Rippen bleibt dabei bei vier Stück pro Deckenelement. Bei Mestä Group aber auch bei den anderen gängigen Herstellern von LVL aus Fichtenholz sind im Rahmen der Standard-Lieferabmessungen die Rippenstärken auf 7,5cm beschränkt. Es besteht jedoch die Möglichkeit Standardquerschnitte zusammen zu leimen und somit „aufzudoppeln“, was bei manchen Herstellern mit einem Aufpreis verbunden ist. Von Mestä Group gibt es dazu aber keine Angaben, darum werden keine Zusatzkosten mitkalkuliert.

Die LVL Rippen werden hier ebenfalls paarweise angeordnet, d.h. in der Elementmitte werden zwei verleimte 7,5 x 50cm Rippen positioniert und am Elementrand jeweils eine. Aufgrund der schmalen Holzquerschnitte können auch hier die Brandschutzanforderungen nicht erfüllt werden. Es wird sogar rechnerisch nur ein Brandwiderstand zwischen R 30 und R 60 erreicht. Somit kann diese Variante allein auch nur als Teillösung gewertet werden.

Darum muss die Lösung III/12m auch mit aktiven Brandschutzmaßnahmen in Form eines Sprinkler-Systems kombiniert werden. Eine Beplankung der LVL-Rippen mit Gipskartonplatten GKF reicht in diesem Fall nicht aus, um REI 90 zu erreichen.

Ansonsten werden alle relevanten Nachweise erfüllt. Beim Betrachten der Verbindungsmittel fällt auf, dass sehr viele Schrauben notwendig sind, um den Tragfähigkeitsnachweis der Verbindungsmittel zu gewährleisten. Dies ist mit hohem Montageaufwand verbunden, wodurch die Kosten steigen. In der Auswertung werden aber nur Materialkosten und kein Personalaufwand berücksichtigt.

6.3.4 Gegenüberstellung der Varianten für 12m Deckenspannweite

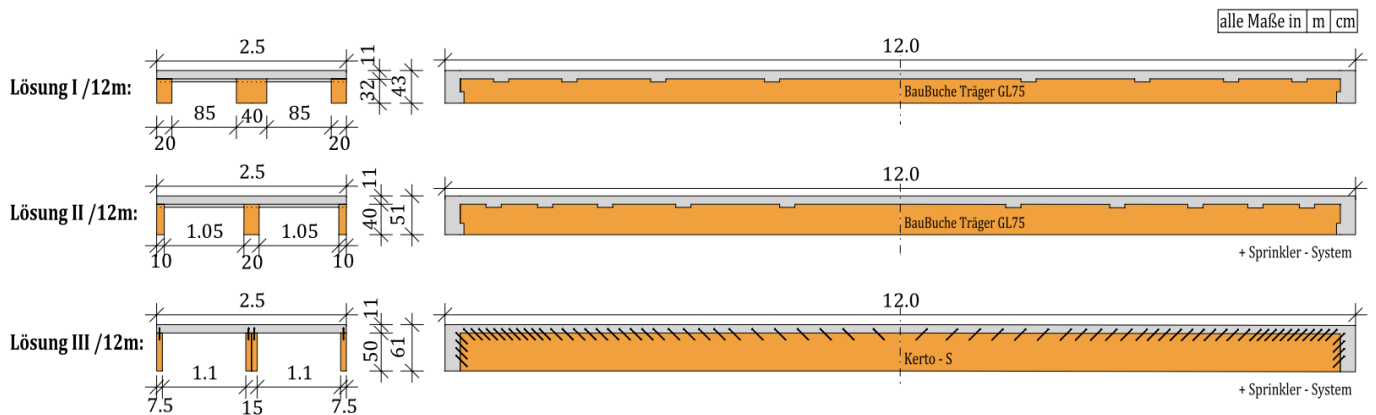


Abbildung 6.5: Darstellung der Varianten für 12m Deckenspannweite

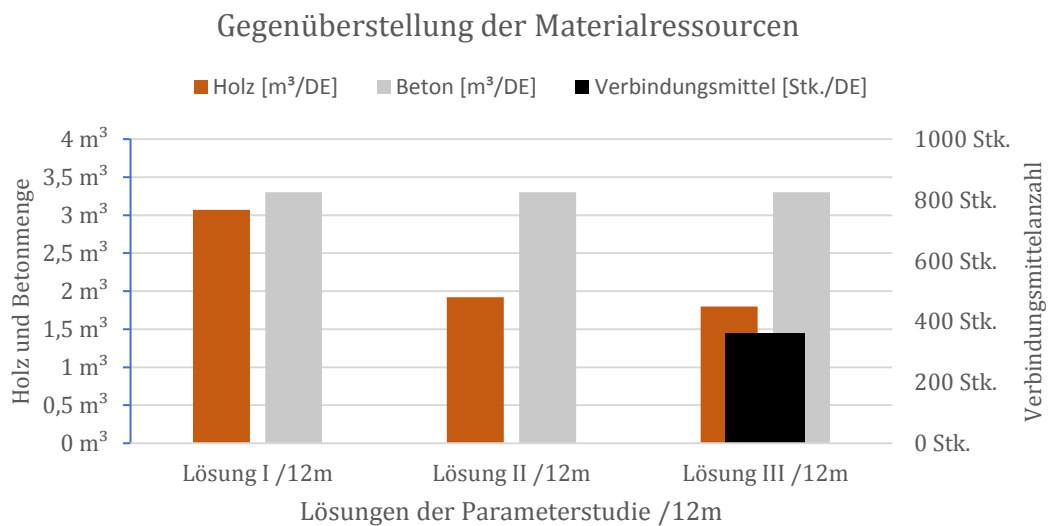


Abbildung 6.6: Gegenüberstellung der Materialressourcen /12m Deckenspannweite

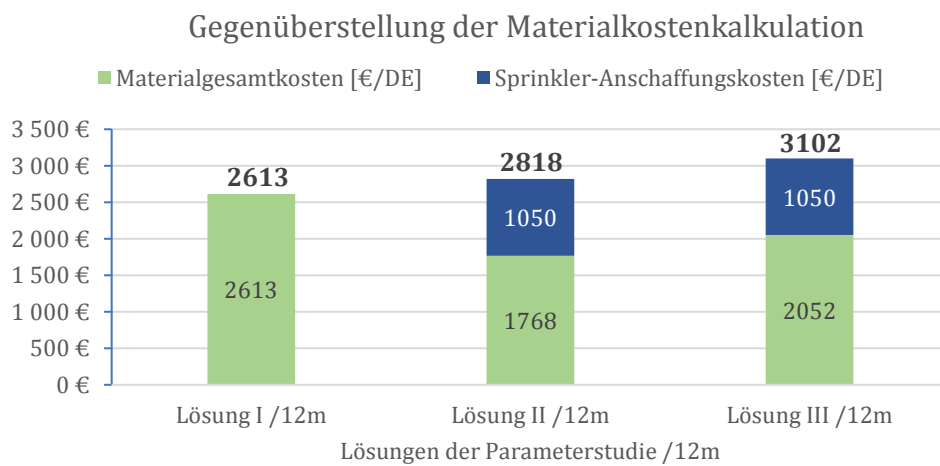


Abbildung 6.7: Gegenüberstellung der Materialkostenkalkulation /12m Deckenspannweite

6.3.5 finale Lösung; 12m Deckenspannweite

Ist kein Sprinkler-System für die Umsetzung des Bauvorhabens gefordert, so ist die **Lösung I /12m** die kosteneffizienteste Lösung, da sie selbstständig bestehen kann. Die **Lösung II /12m** ist die ressourceneffizienteste Lösung bezogen auf den Materialbedarf für ein Deckenelement, muss aber mit einer Löschanlage kombiniert werden, was auch einen Ressourcenaufwand bedeutet. Falls die Anforderungen ein Löschesystem verlangen, ist diese Lösung somit die zielführende. Nachstehend sind 3D-Modelle für bei Lösungsvarianten dargestellt.

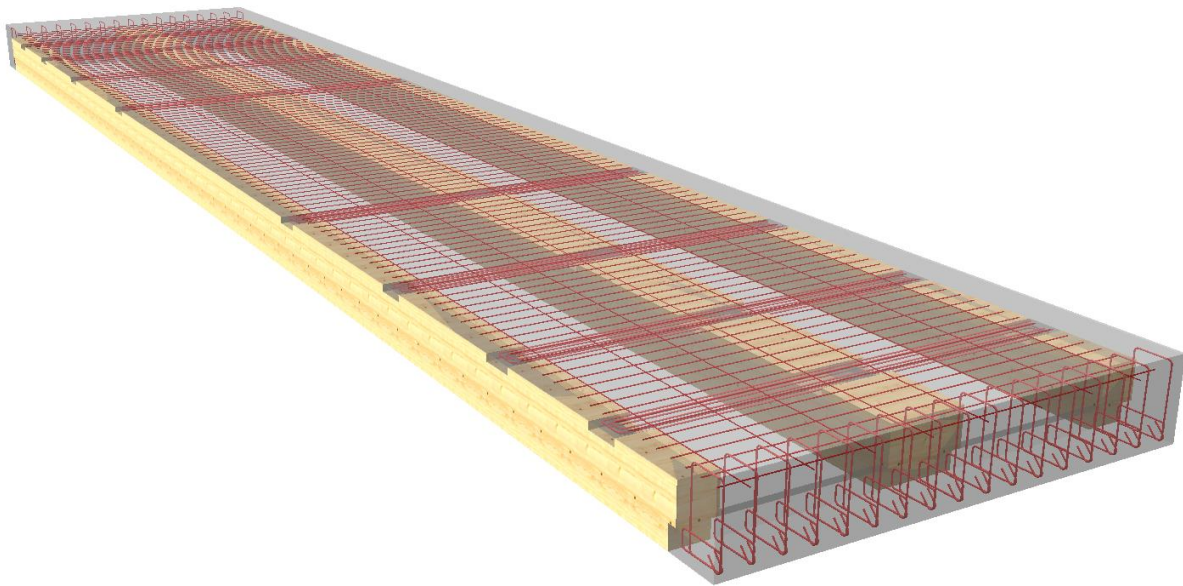


Abbildung 6.8: Darstellung Lösung I /12m (selbstständige Lösung)

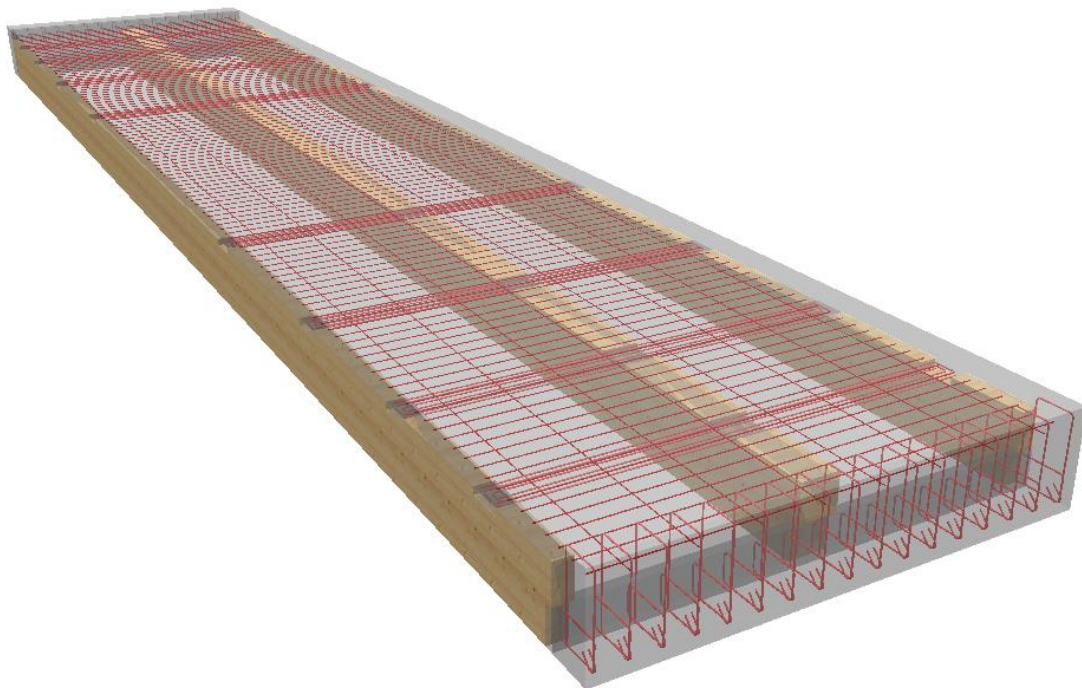


Abbildung 6.9: Darstellung Lösung II /12m (Sprinkler-System erforderlich)

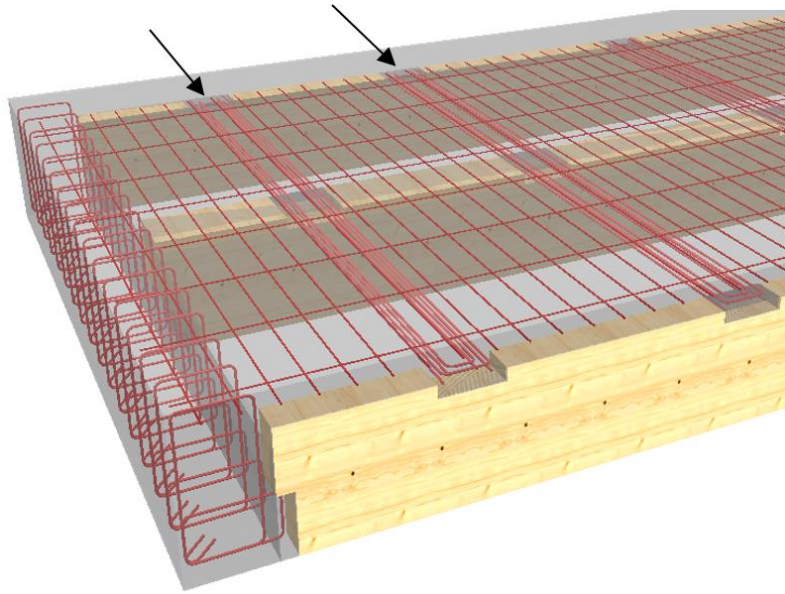


Abbildung 6.10: Kervendetail inklusive Bewehrungsstahl

6.4 Parameterstudie für 10m Deckenspannweite

6.4.1 Lösung I /10m

6.4.1.1 Deckenparameter; 10m

Deckenparameter:	
Deckenelementabmessungen:	
Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	10 m
Deckenelementbreite	2,5 m
Deckenelementhöhe	36 cm
Beton:	
Betonfestigkeitsklasse	C25/30
Höhe/Stärke der Betonplatte	8 cm
Holz:	
LVL-Hersteller	Pollmeier GmbH
LVL-Typ	BauBuche Träger GL75
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	16 bzw. 32 cm
Höhe der LVL-Rippe	28 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4 (3) Stk.
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel	
Art des Verbindungsmittels	Schubkerven
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	8 Stk.
Abmessungen der Verbindungsmittel:	
Kervnlänge	20 cm
Kerventiefe	3,5 cm
Kervnenbreite (Summe über die Rippenanzahl)	64 cm (4 x 16cm)
Gesamtkervnenbreite pro Deckenelement [lfm/DE]	5.12 lfm/DE

Tabelle 6.15: Deckenparameter für Lösung I/10m; 10m Deckenspannweite

6.4.1.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 10m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m^3/DE]	2,0 m^3
LVL Menge pro Deckenelement [m^3/DE] bzw. [lfm/DE]	1,792 m^3 40 lfm
Ressourcen pro m^2 Deckenfläche [m^3/m^2]	
Beton	0,08 m^3/m^2
LVL	0,0717 m^3/m^2

Tabelle 6.16: Ressourcenermittlung für Lösung I/10m; 10m Deckenspannweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte	
Einheitspreis [C25/30]	91,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	182,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€ / DE]	36,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	218,00 €
LVL-Rippen	
Einheitspreis [BauBuche Träger GL75]	700,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€ / DE]	1.254,00 €
Verbindungsmittel	
Einheitspreis [Schubkerven]	16,00 €/lfm
Verbindungsmittelkosten pro Deckenelement [€ / DE]	82,00 €
gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€ / DE]	1.554,00 €
Materialkosten pro m^2 Deckenfläche [€ / m ²]	62,00 €/m²

Tabelle 6.17: Materialkostenermittlung für Lösung I/10m; 10m Deckenspannweite

Bei dieser Lösung wird der Verbund über Schubkerven gewährleistet, darum fallen keine zusätzlichen Ressourcen für die Verbindungsmittel an. Materialkosten werden aber in Form von Aufwandskosten kalkuliert, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten.

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 36cm erreicht.

6.4.1.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung I/10m

Bei Lösung I/ 10m konnte im Vergleich zu Lösung I /12m die Beton- und Holzquerschnitte wesentlich reduziert werden. Die Kerventiefe konnte ebenfalls auf 3,5cm verringert werden. Diese Querschnittsvariante bildet eine sichere Lösung, bei der alle Nachweise erfüllt sind. Auch hier hat sich die paarweise Anordnung der LVL-Rippen bewehrt, um den Brandnachweis zu erfüllen. Bei dieser Variante bestünde aber auch die Möglichkeit in der Elementmitte ein BauBuche GL75 Träger mit den Abmessungen 28 x 30 cm zu platzieren und am Elementrand jeweils ein Träger mit dem Querschnitt 28 x 16 cm.

Zwei Punkte sind jedoch zu beachten: Der Zementestrichdicke sollte mindestens 6 cm betragen, um eine Querverteilungswirkung zu gewährleisten und somit den Schwingungsnachweis zu erfüllen bzw. müssen zur Erreichung der Querverteilungswirkung auch ein Verbund zwischen den Betonplatten der Deckenelemente vorhanden werden. Dies kann zum Beispiel durch vergießen hergestellt werden (*siehe Kapitel 4.4*), wird aber in dieser Arbeit nicht detailliert behandelt. Der Kervennachweis „Abscheren des Betons“ [51] kann auch hier nicht ganz erfüllt werden. In *Kapitel Ergebnisanalyse der Variante: Lösung I/12m* ist die notwendige Maßnahme dafür bereits beschrieben.

6.4.2 Lösung II /10m

6.4.2.1 Deckenparameter; 10m

Deckenparameter:

Deckenelementabmessungen:

Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	10 m
Deckenelementbreite	2,5 m
Deckenelementhöhe	51 cm

Beton:

Betonfestigkeitsklasse	C35/45
Höhe/Stärke der Betonplatte	11 cm

Holz:	
LVL-Hersteller	Pollmeier GmbH
LVL-Typ	BauBuche Träger S
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	6 cm
Höhe der LVL-Rippe	40 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4 Stk.
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel:	
Art des Verbindungsmittels	HBV-Schrauben
Schraubenhersteller	Schmid Schrauben H. GmbH
Schraubentyp	RAPID®T-Con Ø8x205/130mm
Schraubenanordnung	45° Zug-Scher-Beanspruchung
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	92 Stk.

Tabelle 6.18: Deckenparameter für Lösung II/10m; 10m Deckenspannweite

6.4.2.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 10m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m ³ /DE]	2,75 m ³
LVL Menge pro Deckenelement [m ³ /DE] bzw. [lfm/DE]	0,96 m ³ 40 lfm
Verbindungsmittelanzahl pro Deckenelement [Stk./DE]	ca. 370 Stk.
Ressourcen pro m ² Deckenfläche [m ³ /m ²]; [Stk./m ²]	
Beton	0,11 m ³ /m ²
LVL	0,0384 m ³ /m ²
Verbindungsmittel (HBV-Schrauben)	ca. 15 Stk./m ²

Tabelle 6.19: Ressourcenermittlung für Lösung II/10m; 10m Deckenspannweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte	
Einheitspreis [C35/45]	103,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€/ DE]	283,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€/ DE]	57,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€/ DE]	340,00 €
LVL-Rippen	
Einheitspreis [BauBuche Träger S]	600,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€/ DE]	576,00 €
Verbindungsmittel	
Einheitspreis [RAPID®T-Con Ø8x205/130]	0,80 €/Stk.
Verbindungsmittelkosten pro Deckenelement [€/ DE]	296,00 €
gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€/ DE]	1.212,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche [€/ m ²]	48,50 €/m²

Tabelle 6.20: Materialkostenermittlung für Lösung II/10m; 10m Deckenspannweite

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 51cm erreicht.

6.4.2.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung II/10m

Bei dieser Deckenausführung wurden sehr schmale LVL-Rippen aus dem Material „BauBuche Träger S“ verwendet, dafür eine dickere Betonplatte. Aufgrund der schmalen Rippen ist nur eine Schraubenlösung zur Herstellung des Verbunds möglich, da zu geringe Kervenseitenflächen vorhanden sind um die *Kervennachweise* nach *Schönborn, Flach und Feix* [51] für 10m Deckenspannweite zu erfüllen.

Der Schwingungsnachweis nach *Eurocode 5* [7], [21] kann aufgrund des hohen Betonanteil und dessen Masse problemlos erfüllt werden. Auch alle anderen geforderten Nachweise liefern ein positives Ergebnis. Diese Lösungsvariante wäre auch mit Fichtenholz mit ähnlichen Querschnittsabmessungen realisierbar, nur im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für Langzeiteinwirkungen wäre die zulässige Durchbiegung um etwa 10% überschritten. Aber die günstigen Kubikmeterpreise der „BauBuche“ trotz besserer Festigkeitswerte machen diesen Werkstoff sowohl ressourcen- als auch kosteneffizienter.

6.4.3 Lösung III /10m

6.4.3.1 Deckenparameter; 10m

Deckenparameter:	
Deckenelementabmessungen:	
Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	10 m
Deckenelementbreite	2,5 m
Deckenelementhöhe	40 cm
Beton:	
Betonfestigkeitsklasse	C25/30
Höhe/Stärke der Betonplatte	8 cm
Holz:	
LVL-Hersteller	Pollmeier GmbH
LVL-Typ	BauBuche Träger GL75
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	10 cm bzw. 20 cm
Höhe der LVL-Rippe	32 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4(3) Stk.
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel:	
Art des Verbindungsmittels	Schubkerven
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	10 Stk.
Abmessungen der Verbindungsmittel:	
Kervenzlänge	20 cm
Kerventiefe	4 cm
Kervenzbreite (Summe über die Rippenanzahl)	40 cm (4 x 10 cm)
Gesamtkervenzbreite pro Deckenelement [lfm/DE]	4 lfm/DE

Tabelle 6.21: Deckenparameter für Lösung III/10m; 10m Deckenspannweite

6.4.3.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 10m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m ³ /DE]	2,0 m ³
LVL Menge pro Deckenelement [m ³ /DE] bzw. [lfm/DE]	1,28 m ³ 40 lfm
Ressourcen pro m ² Deckenfläche [m ³ /m ²]	
Beton	0,08 m ³ /m ²
LVL	0,0512 m ³ /m ²

Tabelle 6.22: Ressourcenermittlung für Lösung III /10m; 10m Deckenspannweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte:	
Einheitspreis [C25/30]	91,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	182,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€ / DE]	36,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	218,00 €
LVL-Rippen:	
Einheitspreis [BauBuche Träger GL75]	700,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€ / DE]	896,00 €
Verbindungsmittel:	
Einheitspreis [Schubkerven]	16,00 €/lfm
Verbindungsmittelkosten pro Deckenelement [€ / DE]	64,00 €
kombiniert mit aktiver Brandschutzanlage:	
Einheitspreis [Sprinklersystem-Anschaffungskosten]	35 €/m ² BGF
Kosten für Sprinkleranlage pro Deckenelementfläche [€ / DE]	875,00 €

gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€ / DE]	1.178,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche [€ / m ²]	47,00 €/m²
Materialkosten pro Deckenelement inkl. Sprinklerkosten [€ / DE]	2.0530,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche inkl. Sprinklerkosten [€ / m ²]	82,00 €/m²

Tabelle 6.23: Materialkostenermittlung für Lösung III /10m; 10m Deckenspannweite

Bei dieser Lösung wird der Verbund über Schubkerven gewährleistet, darum fallen keine zusätzlichen Ressourcen für die Verbindungsmittel an. Materialkosten werden aber in Form von Aufwandskosten kalkuliert, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten. Zusätzlich werden Kosten für das Sprinkler-System (externe Maßnahme) aufgeschlagen, welches notwendig ist, um die Brandschutzanforderungen zu erfüllen.

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 40cm erreicht.

6.4.3.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung III /10m

Die Lösung III /10m ist sehr ähnlich der Variante in *Kapitel 6.3.2 Lösung II / 12m*. Aufgrund der um 2m geringeren Deckenspannweite konnte Betonplattenstärke um 3cm und die LVL-Rippenhöhe um 8cm reduziert werden. Um die *Kervennachweise* nach *Schönborn, Flach und Feix* [51] erfüllen zu können muss die LVL-Rippenbreite von 10 cm beibehalten werden. Diese Lösung ist ebenfalls nur in Kombination mit einem Sprinkler-System eine vollwertige potentielle Lösung. Genauere Informationen sind im *Kapitel 6.3.2.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung II/12m* nachzulesen.

6.4.4 Gegenüberstellung der Varianten für 10m Deckenspannweite

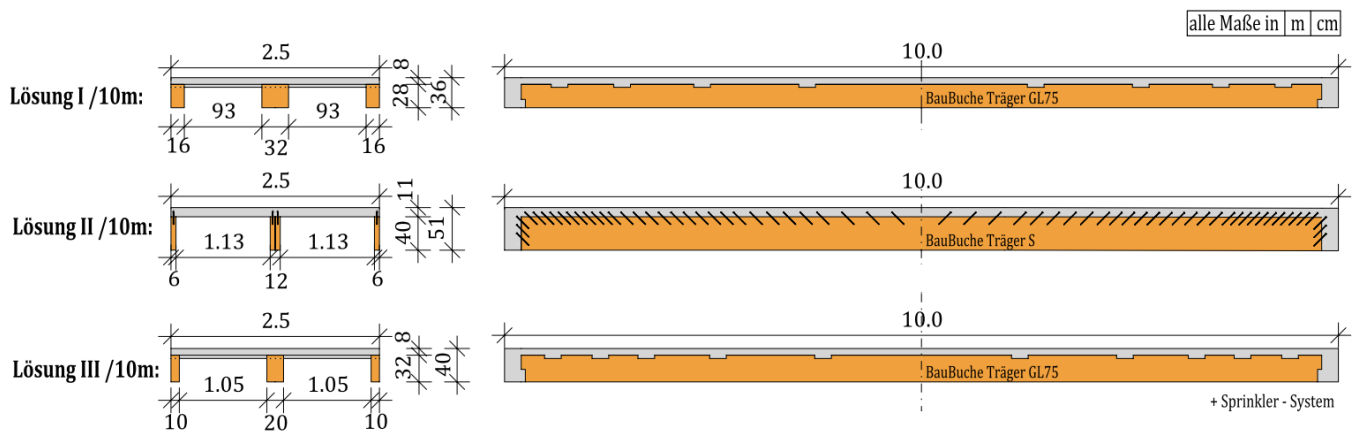


Abbildung 6.12: Darstellung der Varianten für 10m Deckenspannweite

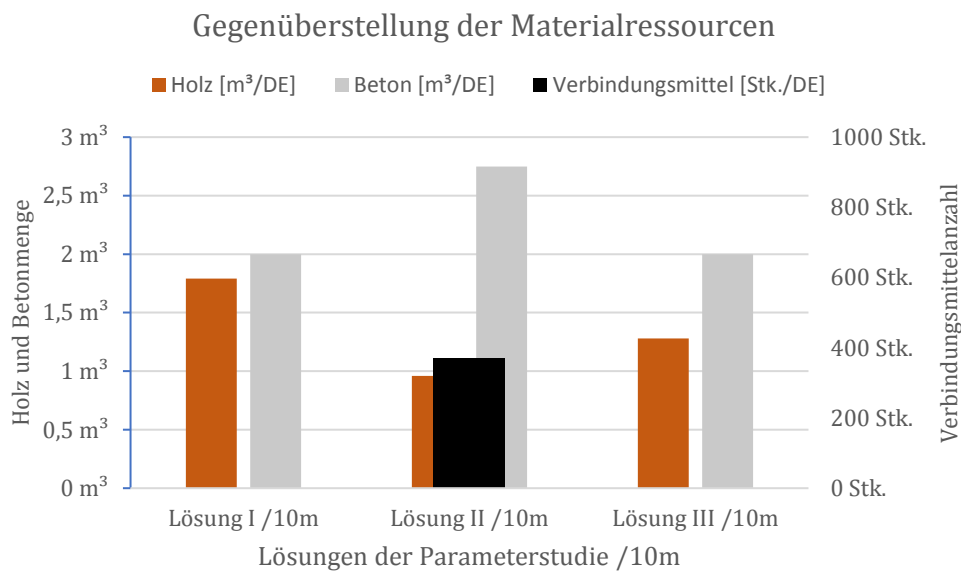


Abbildung 6.13: Gegenüberstellung der Materialressourcen /10m Deckenspannweite

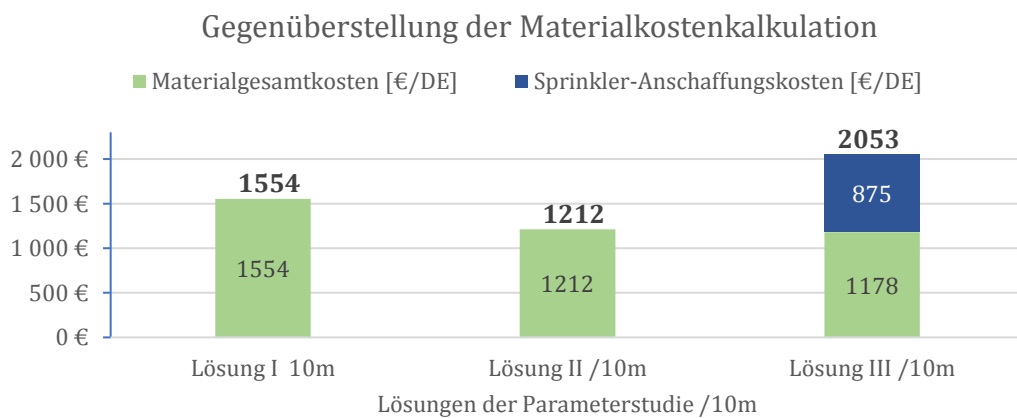


Abbildung 6.14: Gegenüberstellung der Materialkostenkalkulation /10m Deckenspannweite

6.4.5 finale Lösung; 10m Deckenspannweite

Die Lösung II /10m stellt keine praxisrelevante Lösungsvariante dar und steht daher hier nicht zur Wahl. Die Wahl zwischen **Lösung I /10m** und **Lösung III /10m** ist abhängig vom Bauvorhaben. Ist eine Löschanlage verpflichtend zu installieren, so fällt die Wahl auf Lösung III/10m. Wenn keine Löschanlage vorgesehen werden muss ist die Lösung I/10m kosteneffizienter. In *Abbildung 6.15: Darstellung der finalen Lösung für 10m Deckenspannweite* wird die Lösung III /10m, welche mit einem Sprinkler-System kombiniert werden muss. Diese ist optisch sehr ähnlich zu Lösung I /12m (*siehe Abbildung 6.9*).

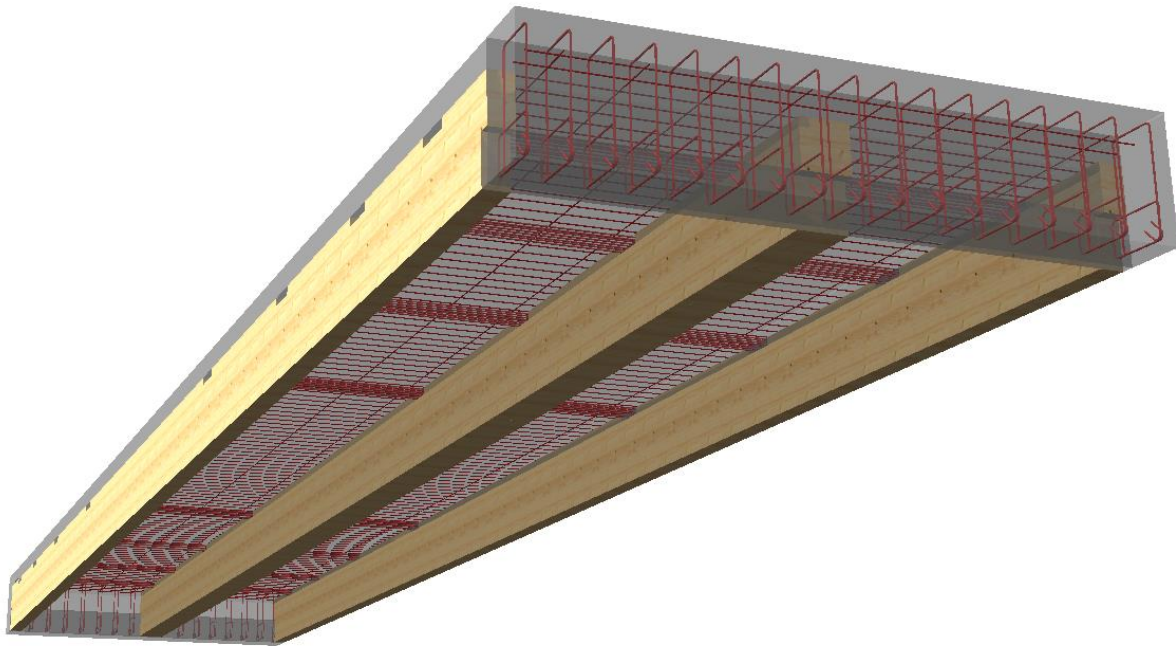


Abbildung 6.15: Darstellung der finalen Lösung für 10m Deckenspannweite (Sprinkler-System erforderlich)

6.5 Parameterstudie für 8m Deckenspannweite

6.5.1 Lösung I/8m

6.5.1.1 Deckenparameter; 8m

Deckenparameter:	
Deckenelementabmessungen:	
Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	8 m
Deckenelementbreite	2,5 m
Deckenelementhöhe	32 cm
Beton:	
Betonfestigkeitsklasse	C25/30
Höhe/Stärke der Betonplatte	8 cm
Holz:	
LVL-Hersteller	Pollmeier GmbH
LVL-Typ	BauBuche Träger GL75
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	12 bzw. 24 cm
Höhe der LVL-Rippe	24 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4 Stk. (3 Stk.)
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel:	
Art des Verbindungsmittels	Schubkerven
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	8 Stk.
Abmessungen der Verbindungsmittel:	
Kervnlänge	20 cm
Kerventiefe	4 cm
Kervnenbreite (Summe über die Rippenanzahl)	48 cm (4 x 12 cm)
Gesamtkervnenbreite pro Deckenelement [lfm/DE]	3,84 lfm/DE

Tabelle 6.24: Deckenparameter für Lösung I /8m; 8 m Deckenspannweite

6.5.1.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 8m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m ³ /DE]	1,6 m ³
LVL Menge pro Deckenelement [m ³ /DE] bzw. [lfm/DE]	0,9216 m ³ 32 lfm
Ressourcen pro m ² Deckenfläche [m ³ /m ²]	
Beton	0,08 m ³ /m ²
LVL	0,0461 m ³ /m ²

Tabelle 6.25: Materialkostenermittlung für Lösung I /8m; 8m Deckenspannweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte:	
Einheitspreis [C25/30]	91,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	146,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€ / DE]	29,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	175,00 €
LVL-Rippen:	
Einheitspreis [BauBuche Träger GL75]	700,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€ / DE]	645,00 €
Verbindungsmittel:	
Einheitspreis [Schubkerven]	16,00 €/lfm
Verbindungsmittelkosten pro Deckenelement [€ / DE]	61,00 €
gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€ / DE]	881,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche [€ / m ²]	44,00 €/m²

Tabelle 6.26: Materialkostenermittlung für Lösung I /8m; 8m Deckenspannweite

Bei dieser Lösung wird der Verbund über Schubkerven gewährleistet, darum fallen keine zusätzlichen Ressourcen für die Verbindungsmittel an. Materialkosten werden aber in Form von Aufwandskosten kalkuliert, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten.

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 32 cm erreicht.

6.5.1.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung I /8m

Das Ziel für diese Lösungsvariante ist es ohne externe Maßnahmen eine funktionierende Lösung zu erreichen. Die minimale Betonplattenstärke für HBV-Decken liegt bei 70 mm lt. allgemeiner bauaufsichtlicher *Zulassung Z-9.1-845*. [52] Diese beschreibt aber den Verbund über HBV-Schrauben. Der Einfachheit halber wird das als allgemeines Minimum angesehen.

Der Verbund wird bei dieser Lösung über Schubkerven hergestellt. Die Anordnung erfolgt wieder paarweise bzw. am Elementrand mit jeweils eine LVL-Rippe 12 x 24cm, welche dann mit dem angrenzenden Deckenelement Mann an Mann liegt und eine LVL-Rippe 24 x 24cm in der Elementmitte. Alle erforderlichen Nachweise konnten nachgewiesen werden. Maßgebend sind hier die *Kervennachweise* nach *Schönborn, Flach und Feix* [51] für die *Warmbemessung*. Für ein Brandkonzept bei REI 90, bei dem die Holzbauteile im Brandfall noch eine tragende Funktion erfüllen müssen, ist eine Balkenbreite von 2 x 12cm Mann an Mann bzw. 24cm sehr an der Grenze. Nach Abzug der ideellen Abbrandtiefe nach 90-minütiger Brandeinwirkung bleibt eine Restbalkenbreite von 10 cm über. Um den Kervennachweis im Brandfall zu erfüllen, muss eine Vorholzlänge von mindestens 40 cm gewährleistet sein, die Kerventiefe von 4cm eingehalten werden und die Betonplatte mindestens 8 cm stark sein. Außerdem muss von einer geringen Zugbeanspruchung auf der Betonplatten-Unterseite ausgegangen werden und somit eine Längsbewehrung nach *ÖNORM EN 1992-1-1* [35] dimensioniert werden.

Bei Betrachtung der Rippenhöhe ist noch etwas Reserve vorhanden. Hier ist man aber an die Standard-Lieferabmessungen gebunden, da bei der nächst kleineren verfügbaren Querschnittshöhe von „BauBuche Träger GL75“ die Nachweisführung negativ ausfällt.

6.5.2 Lösung II/8m

6.5.2.1 Deckenparameter; 8 m

Deckenparameter:	
Deckenelementabmessungen:	
Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	8 m
Deckenelementbreite	2,5 m
Deckenelementhöhe	39 cm
Beton:	
Betonfestigkeitsklasse	C 25/30
Höhe/Stärke der Betonplatte	7 cm
Holz:	
LVL-Hersteller	Pollmeier GmbH
LVL-Typ	BauBuche Träger S
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	6 cm
Höhe der LVL-Rippe	32 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4 Stk.
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel:	
Art des Verbindungsmittels	HBV-Schrauben
Schraubenhersteller	Schmid Schrauben GmbH
Schraubentyp	RAPID® T-Con Ø8x205/130mm
Schraubenanordnung	45° Zug-Scher-Beanspruchung
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	54 Stk.

Tabelle 6.27: Deckenparameter für Lösung II /8m; 8 m Deckenspannweite

6.5.2.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 8 m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m ³ /DE]	1,4 m ³
LVL Menge pro Deckenelement [m ³ /DE] bzw. [lfm/DE]	0,6144 m ³ 32 lfm
Verbindungsmittellanzahl pro Deckenelement [Stk./DE]	ca. 220 Stk.
Ressourcen pro m ² Deckenfläche [m ³ /m ²]; [Stk./m ²]	
Beton	0,09 m ³ /m ²
LVL	0,03072 m ³ /m ²
Verbindungsmittel (HBV-Schrauben)	ca. 11 Stk./m ²

Tabelle 6.28: Materialkostenermittlung für Lösung II/8m; 8m Deckenspannweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte	
Einheitspreis [C25/30]	91,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	144,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€ / DE]	29,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	173,00 €
LVL-Rippen	
Einheitspreis [BauBuche Träger S]	600,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€ / DE]	369,00 €
Verbindungsmittel	
Einheitspreis [RAPID®T-Con Ø8x205/130mm]	0,80 €/Stk.
Verbindungsmittelkosten pro Deckenelement [€ / DE]	176,00 €
kombiniert mit aktiver Brandschutzanlage	
Einheitspreis [Sprinklersystem-Anschaffungskosten]	35,0 €/m ² BGF
Kosten für Sprinkleranlage pro Deckenelementfläche [€ / DE]	700,00 €

gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€ / DE]	718,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche [€ / m ²]	36,00 €/m²
Materialkosten pro Deckenelement inkl. Sprinklerkosten [€ / DE]	1.418,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche inkl. Sprinklerkosten [€ / m ²]	71,00 €/m²

Tabelle 6.29: Materialkostenermittlung für Lösung II/8m; 8m Deckenspannweite

Zusätzlich werden Kosten für das Sprinkler-System (externe Maßnahme) aufgeschlagen, das notwendig ist, um die Brandschutzanforderungen zu erfüllen.

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 39 cm erreicht.

6.5.2.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung II /8m

Die Lösung II/8m ist vergleichbar mit der Lösung im Kapitel 6.4.2 *Lösung II /10m*. Details zur Nachweisführung können in dem erwähnten Kapitel nachgelesen werden. Es werden die gleichen Materialien für Holzrippen und Verbund verwendet. Die Querschnittsabmessungen können aufgrund der um 2 Meter kürzeren Spannweite reduziert werden. Die LVL-Rippenbreite von 6cm darf nicht mehr verschmälert werden, da lt. *allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Z-9.1-845* [52] der Randabstand der Schrauben rechtwinklig zur Faser mindestens 30 mm betragen muss und das bei mittig angesetzten Schrauben gerade der Fall ist.

Die Erkenntnis aus Lösung II/10m ist, dass das Konzept der Lastabtragung über die Betonplatte im Brandfall kein praxisrelevantes Ergebnis liefert. Somit hat man sich von dieser Idee bei dieser Lösung wieder distanziert. Die Betonfestigkeitsklasse wurde wieder auf C 25/30 reduziert und die Betonplatte auf das Minimum von 7cm verschmälert.

Die Brandschutzanforderungen können dadurch nicht selbstständig erfüllt werden, darum muss ein Sprinkler-System in die Kalkulation aufgenommen werden.

6.5.3 Lösung III /8m

6.5.3.1 Deckenparameter; 8 m

Deckenparameter:	
Deckenelementabmessungen:	
Deckenelementlänge(=Deckenspannweite)	8 m
Deckenelementbreite	2,5 m
Deckenelementhöhe	37 cm
Beton:	
Betonfestigkeitsklasse	C25/30
Höhe/Stärke der Betonplatte	7 cm
Holz:	
LVL-Hersteller	STEICO
LVL-Typ	LVL R bzw. G LVL R
Rippen- bzw. Balkenabmessungen:	
Breite der LVL-Rippe	7,5cm bzw. 15cm
Höhe der LVL-Rippe	30 cm
Anzahl der Rippen pro Deckenelement	4 (3) Stk.
Rippenanordnung	paarweise
Verbindungsmittel:	
Art des Verbindungsmittels	Schubkerven
Anzahl der Verbindungsmittel pro Rippe	8 Stk.
Abmessungen der Verbindungsmittel:	
Kervenzlänge	20 cm
Kerventiefe	5 cm
Kervenzbreite (Summe über die Rippenanzahl)	300 cm (4 x 7,5 cm)
Gesamtkervenzbreite pro Deckenelement [lfm/DE]	2,4 lfm/DE

Tabelle 6.30: Deckenparameter für Lösung III /8m; 8 m Deckenspannweite

6.5.3.2 Ressourcenermittlung / Materialkostenermittlung; 8m

Mengenermittlung:	
Betonmenge pro Deckenelement [m ³ /DE]	1,4 m ³
LVL Menge pro Deckenelement [m ³ /DE] bzw. [lfm/DE]	0,72 m ³
Ressourcen pro m ² Deckenfläche [m ³ /m ²]	
Beton	0,07 m ³ /m ²
LVL	0,036 m ³ /m ²

Tabelle 6.31: Materialkostenermittlung für Lösung III/8m; 8m Deckenspanweite

Materialkostenermittlung:	
Betonplatte:	
Einheitspreis [C25/30]	91,00 €/m ³
Betonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	127,00 €
Bewehrung pro Deckenelement (Annahme: 20% der Betonkosten) [€ / DE]	25,00 €
Stahlbetonkosten pro Deckenelement [€ / DE]	153,00 €
LVL-Rippen:	
Einheitspreis [LVL R]	650,00 €/m ³
Einheitspreis [G LVL R]	1.000,00 €/m ³
LVL-Kosten pro Deckenelement [€ / DE]	594,00 €
Verbindungsmitel:	
Einheitspreis [Schubkerven]	16,00 €/lfm
Verbindungsmitelkosten pro Deckenelement [€ / DE]	38,00 €
kombiniert mit aktiver Brandschutzanlage:	
Einheitspreis [Sprinklersystem-Anschaffungskosten]	35,0 €/m ² BGF
Kosten für Sprinkleranlage pro Deckenelementfläche [€ / DE]	700,00 €

gesamte Materialkosten:	
Materialkosten pro Deckenelement [€ / DE]	785,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche [€ / m ²]	39,00 €/m²
Materialkosten pro Deckenelement inkl. Sprinklerkosten [€ / DE]	1485,00 €
Materialkosten pro m ² Deckenfläche inkl. Sprinklerkosten [€ / m ²]	74,00 €/m²

Tabelle 6.32: Materialkostenermittlung für Lösung III/8m; 8m Deckenspannweite

Bei dieser Lösung wird der Verbund über Schubkerven gewährleistet, darum fallen keine zusätzlichen Ressourcen für die Verbindungsmittel an. Materialkosten werden aber in Form von Aufwandskosten kalkuliert, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten. Zusätzlich werden Kosten für das Sprinkler-System (externe Maßnahme) aufgeschlagen, das notwendig ist, um die Brandschutzanforderungen zu erfüllen.

Es wird eine Deckenelementhöhe ohne Fußbodenaufbau von 37cm erreicht.

6.5.3.3 Ergebnisanalyse der Variante: Lösung III /8m

Diese Lösungsvariante ist vergleichbar mit folgenden Varianten: 6.3.2 Lösung II / 12m und 6.4.3 Lösung III /10m. Bei 8 m Deckenspannweite sind die *Kervennachweise* nach Schönborn, Flach und Feix [51] für die Kaltbemessung auch mit einer Rippenbreite 7,5cm erfüllt. Wobei die Auslastung sehr hoch ist und eine Kervertiefe von 5 cm und eine Vorholzlänge von 40cm eingehalten werden muss. Somit kann LVL aus Fichtenholz eingesetzt werden. Für die Auslegung wurde das Material der Firma Steico eingesetzt. In Elementmitte wird eine Rippe aus G LVL R 15 x 30cm und am Elementrand jeweils eine Rippe aus LVL R 7,5 x 30cm positioniert. Der Brandschutz kann nicht selbstständig erfüllt werden, somit ist eine externe Maßnahme in Form eines Sprinkler-Systems notwendig. Detailliertere Beschreibungen sind in den Ergebnisanalysen der oben genannten, vergleichbaren Lösungsvarianten zu finden.

6.5.4 Gegenüberstellung der Varianten für 8 m Deckenspannweite

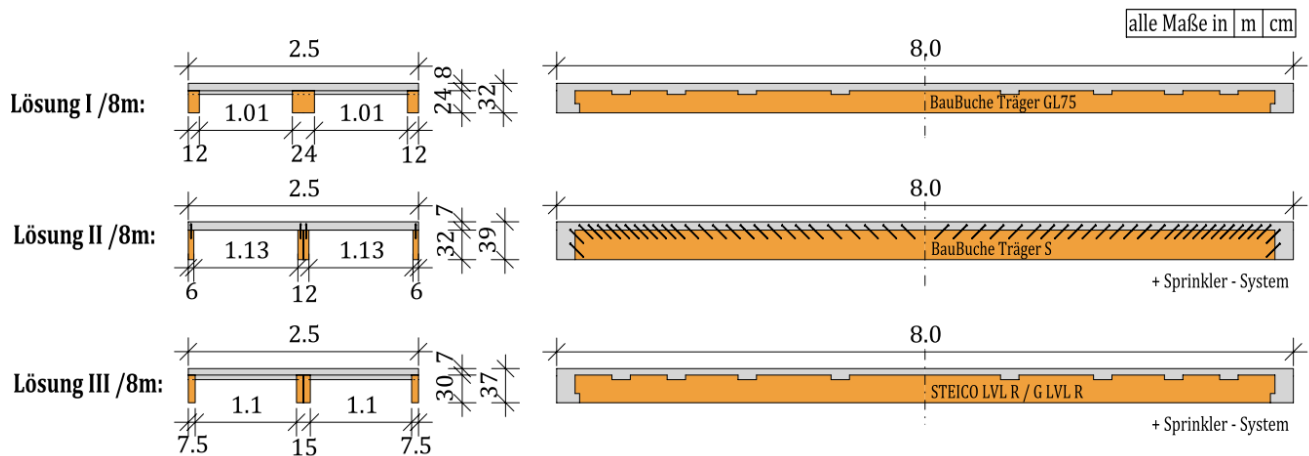


Abbildung 6.16: Darstellung der Varianten für 8 m Deckenspannweite

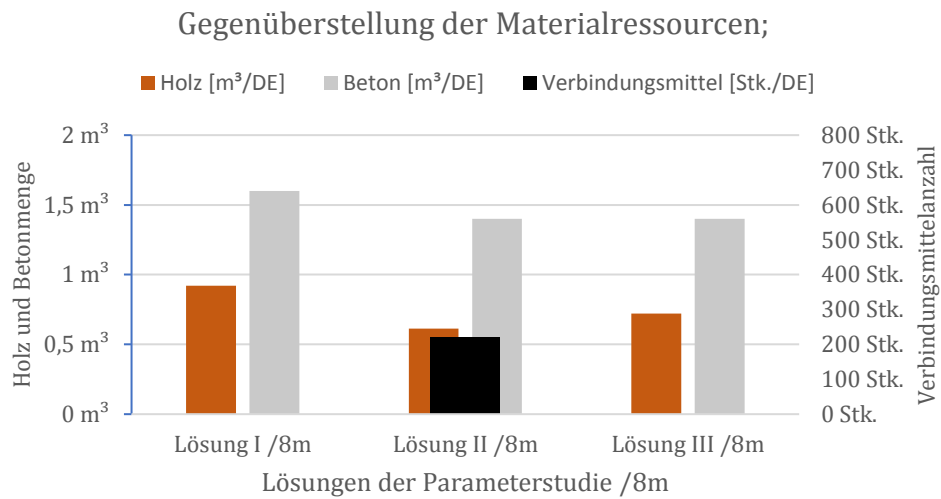


Abbildung 6.17: Gegenüberstellung der Materialressourcen /8m Deckenspannweite

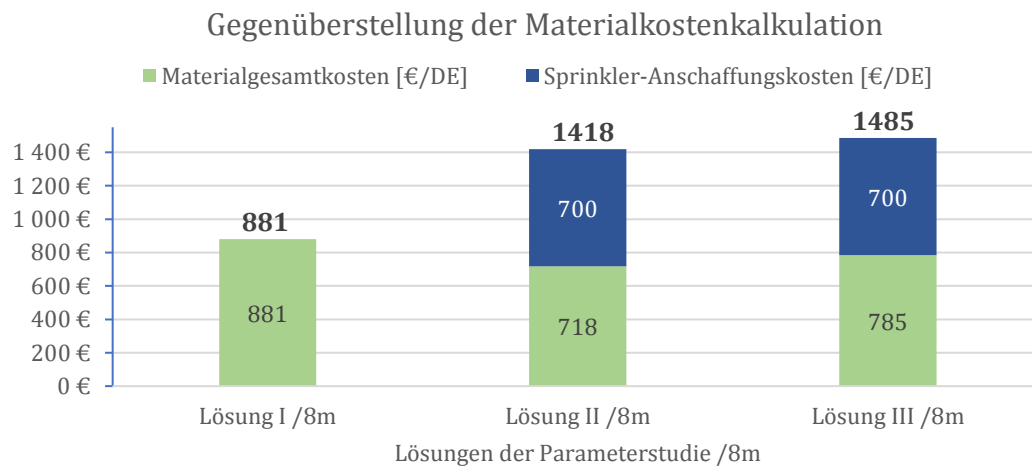


Abbildung 6.18: Gegenüberstellung der Materialkostenkalkulation /8m Deckenspannweite

6.5.5 finale Lösung; 8 m Deckenspannweite

Wiederum sind zwei Lösungen zu betrachten. Wenn keine Sprinkleranlage gefordert ist, dann ist die eigenständige **Lösung I/8m** die lukrativste Lösung. Ist eine Sprinkleranlage vorgeschrieben, wäre hier die Wahl die **Lösung II/8m**. Die Lösung II/8m ist zwar nicht die ressourceneffektivste Lösung aber, da das LVL der kostenintensivste Posten des Deckenelements darstellt und in dieser Variante sehr schmale Querschnitte verwendet werden, ist es aus finanzieller Sicht die effizienteste Lösung. Umgesetzt werden kann sie aber nur in Kombination mit einer Löschanlage. Aus statischer Sicht könnte durch die schmalen Holzquerschnitte ein Verdrehungsproblem entstehen. Dies gilt es zu überprüfen, wurde aber in dieser Arbeit nicht behandelt.

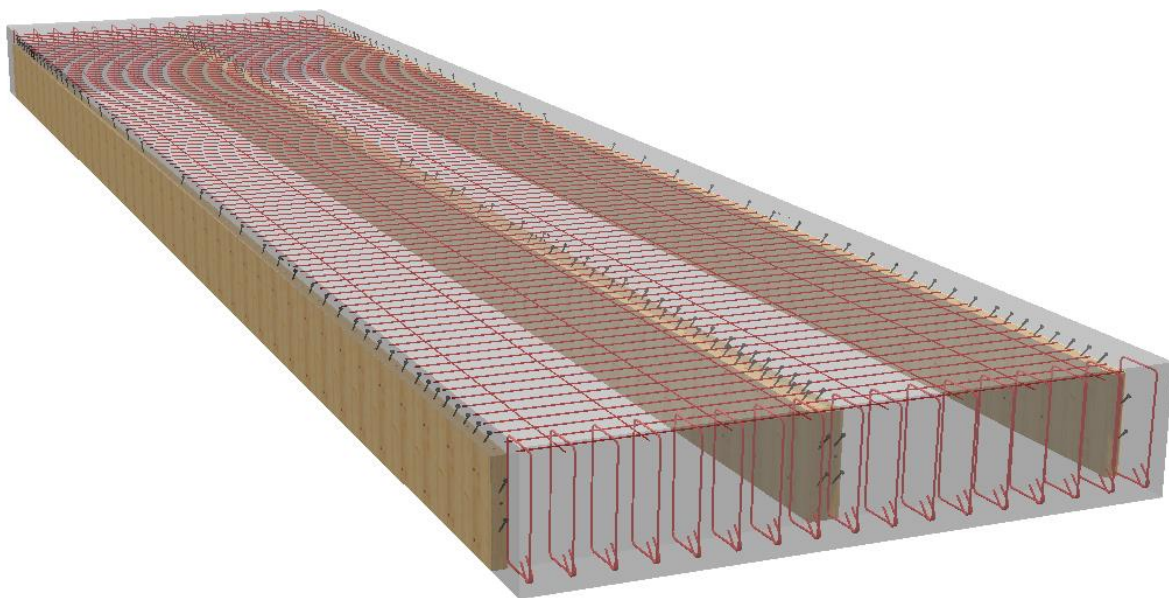


Abbildung 6.19: Darstellung der finalen Lösung für 8m Deckenspannweite; 8m

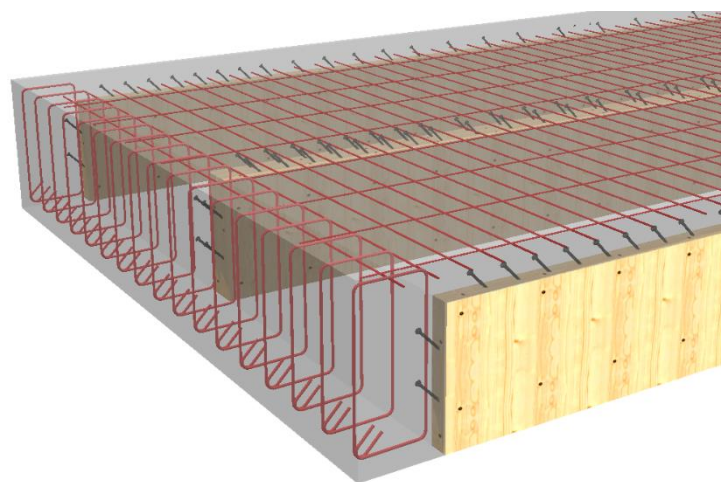


Abbildung 6.20: Detail der finalen Lösung; 8m

6.6 Vergleichsstudie über die untersuchten Spannweiten

In diesem Kapitel werden die anhand der Parameterstudie entwickelten Lösungsvarianten für die untersuchten Spannweiten von 8m, 10m und 12m miteinander verglichen. Ziel dabei ist es Aussagen über den Ressourcenverbrauch und die Materialkosten eines Deckenelements mit einer Breite von 2,5m in Abhängigkeit von der Deckenspannweite zu treffen. Ein weiteres untersuchtes Kriterium ist die Deckenelementhöhe in Abhängigkeit von der Deckenspannweite. Da für jede untersuchte Spannweite drei potenzielle Lösungen ermittelt wurden, werden in den Diagrammen die Veränderungen über die Spannweiten in Form eines Spektrums angegeben. D.h. aus den drei Lösungsvarianten pro Deckenspannweite wird jeweils das Maxima und das Minima des untersuchten Kriteriums (Ressourcenverbrauch, Materialkosten oder Deckenelementhöhe) in den folgenden Diagrammen dargestellt. Somit ergibt sich beim Betrachten der untersuchten Spannweiten ein Bereich – Spektrum – in welchem sich der gerade untersuchte Aufwandswert bzw. der statische Parameter (Aufbauhöhe des Deckenelements) bewegt.

Entscheidend dabei ist zu bedenken, dass die Vergleichsstudie „nur“ die im Zuge dieser Diplomarbeit entwickelten Lösungsvarianten betrachtet. Mit Hilfe des entwickelten EXCEL-Tools könnte die Parameterstudie noch erweitert werden und wesentlich mehr Lösungsvarianten eruiert werden. Das würde aber den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen. Während der Parameterstudie wurde bei der Lösungsentwicklung zwar darauf geachtet ein Optimum zu finden, aber es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei weiterer Betrachtung eine ressourceneffizientere bzw. kosteneffizientere und somit lukrativere Lösung gefunden werden könnte.

In Bezug auf die Materialkostenkalkulation sei nochmals erwähnt, dass tatsächlich nur die Materialpreise kalkuliert wurden, mit Ausnahme bei einem Verbund über Schubkerven. Da hier keine zusätzlichen Ressourcen benötigt werden, wurden zusätzliche Kosten für den Abbund kalkuliert. Weiters wurden Kosten für eine aktive Brandschutzanlage (Sprinkler-System) in die Kalkulation einbezogen, falls dies erforderlich ist, um die Brandschutzanforderungen einhalten zu können. Dabei handelt es sich bei der Sprinkleranlage um reine Anschaffungskosten ohne die Instandhaltungskosten. Bei diesen beschriebenen Kosten handelt es sich zwar nicht direkt um Materialkosten, sie müssen aber berücksichtigt werden damit alle Lösungen als ebenbürtig angesehen werden können und dadurch miteinander vergleichbar bleiben.

In den folgenden drei Diagrammen sind die Ergebnisse der Vergleichsstudie dargestellt.

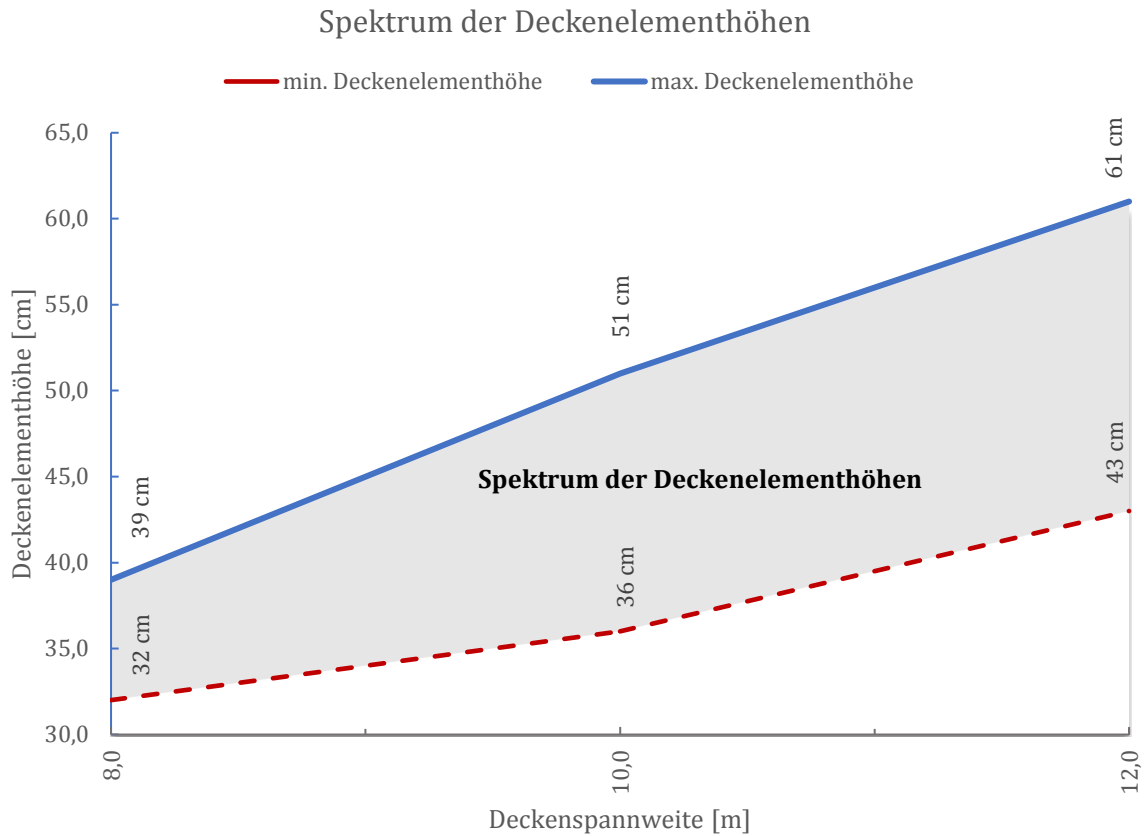


Abbildung 6.21: Spektrum der Deckenelementhöhen

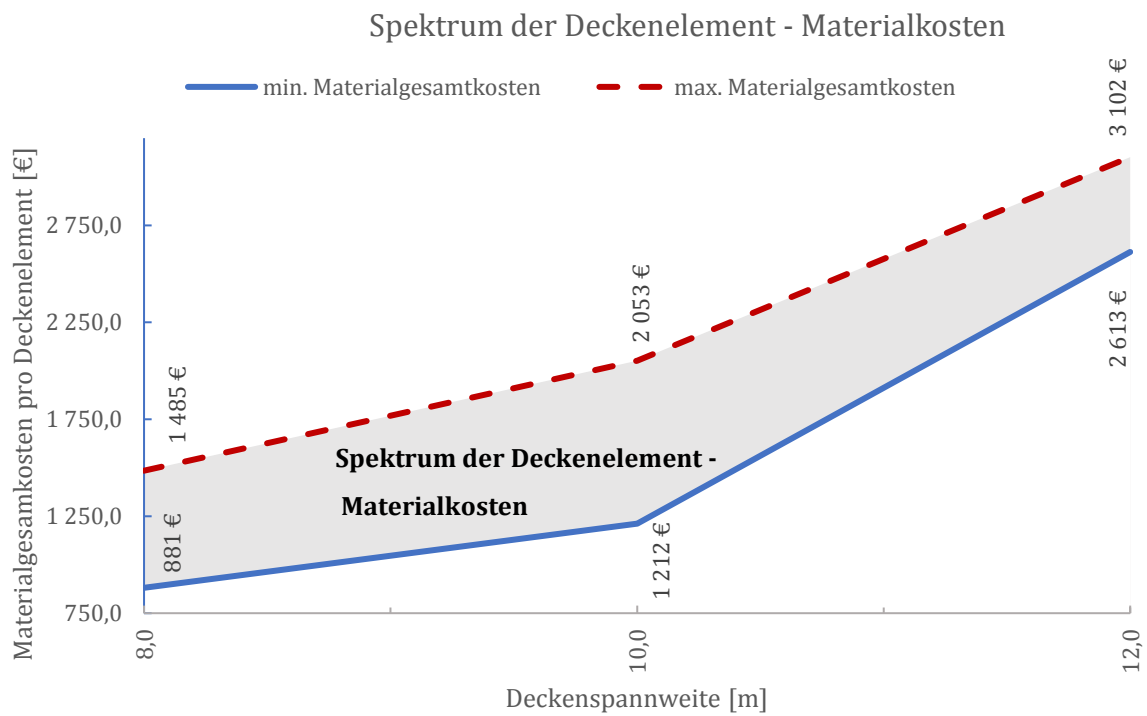


Abbildung 6.22: Spektrum der Materialkosten pro Deckenelement

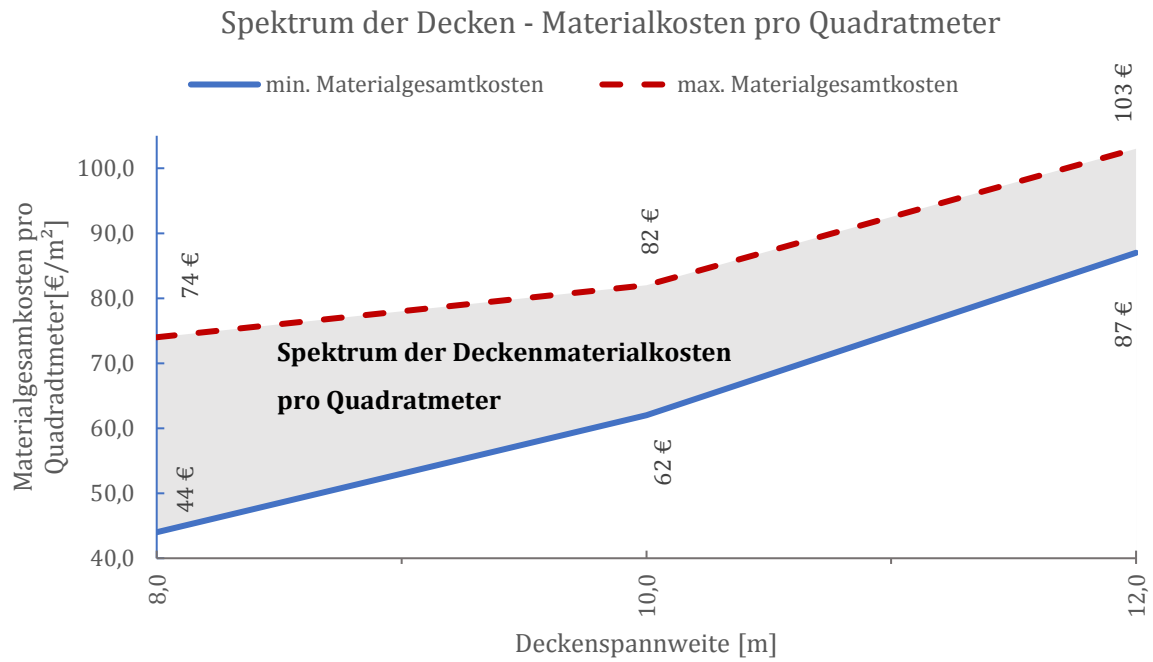


Abbildung 6.23: Spektrum der Materialkosten pro Quadratmeter Deckenelement

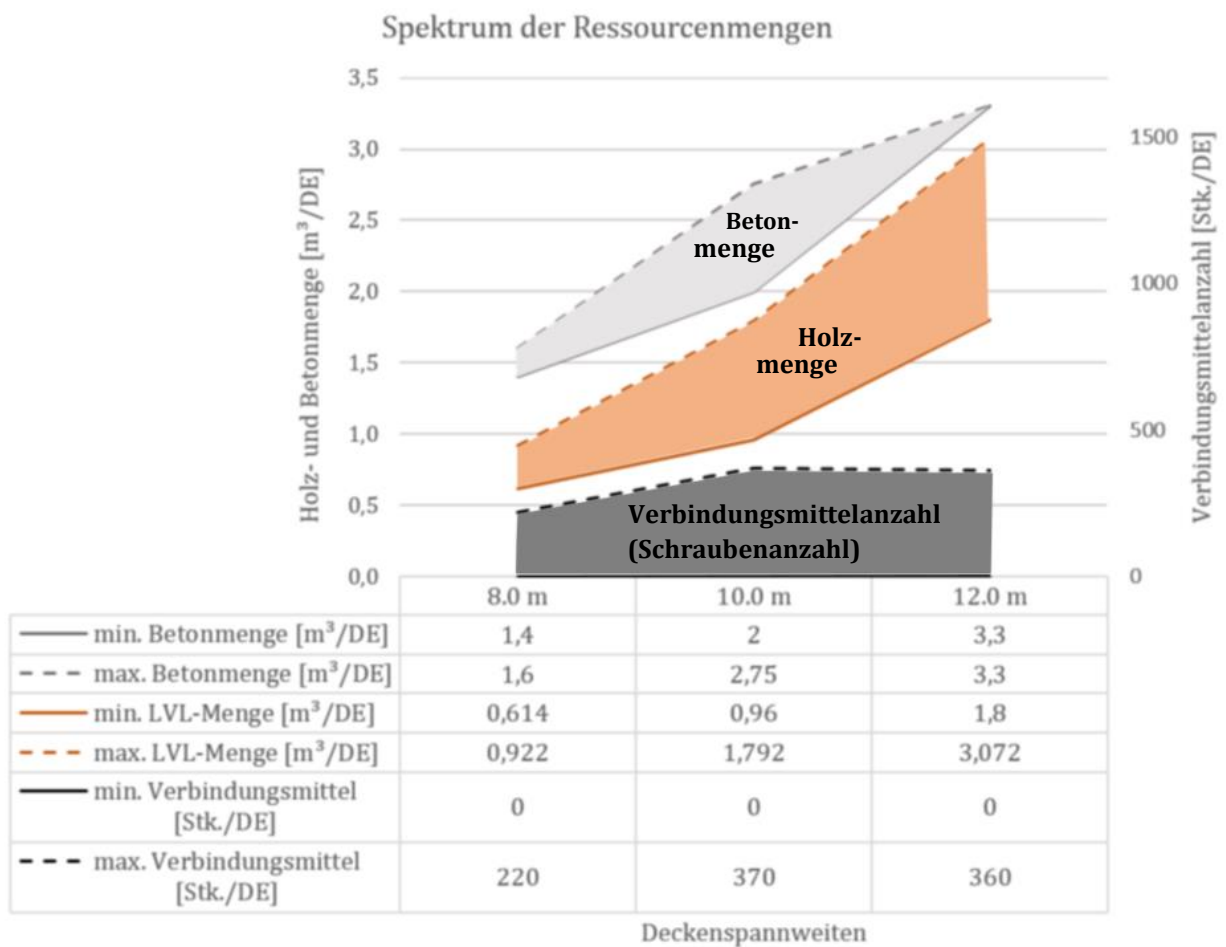


Abbildung 6.24: Spektrum der Ressourcenmengen pro Deckenelement

7 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse, die im Zuge der Lösungsentwicklung durch die Parameterstudie erlangt wurden, diskutiert. Zudem werden zu Beginn die Diagrammdarstellungen aus dem *Kapitel 6.6 Vergleichsstudie über die untersuchten Spannweiten* interpretiert und auch Lücken in der Ergebnisfindung angesprochen bzw. auf mögliche ergänzende Untersuchungen hingewiesen sowie Empfehlungen abgegeben.

Aus dem Spektrum der Deckenelementhöhen zwischen 8m und 12m, dargestellt in *Abbildung 6.21*, kann entnommen werden, dass die Deckenelementhöhe annähernd linear mit der Spannweite zunimmt. Zwischen 10m und 12m ist die Minimum-Kurve etwas steiler, d.h. die Mindestdeckenelementhöhe steigt minimal schneller an wie zwischen 8m und 10m. Um die Deckenelementhöhe abzuschätzen ist die lineare Interpolation zwischen 8m und 12m aber eine sehr gute Näherung.

Beim Betrachten des Spektrums der Materialkosten ist es entscheidend, dass die Materialkosten pro Quadratmeter verglichen werden und nicht die Deckenelementkosten, da mit steigender Spannweite auch die Deckenelementfläche steigt und darum die direkte Vergleichbarkeit verloren geht. In *Abbildung 6.23* ist das Spektrum über die Decken-Materialkosten pro Quadratmeter dargestellt. Es ist ein ähnliches Verhalten wie bei den Deckenelementhöhen zu erkennen. Die Mindestmaterialkosten steigen zwar ab 10m Spannweite schneller an wie davor, da der Knick aber sehr flach ist, ist ein linearer Kostenanstieg zwischen 8m und 12m auf jeden Fall eine sinnvolle Annahme. Aus diesem Diagramm kann außerdem folgendes entnommen werden: Die blaue Kurve, sprich die Mindestmaterialkosten, beschreibt nur Lösungen die die Brandschutzanforderungen eigenständig, d.h. ohne externe Maßnahmen wie ein Sprinkler-System, erfüllen können. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass es für diese Art von HBV-Konstruktionen immer kosteneffizienter ist die LVL-Querschnitte nach der Warmbemessung für REI 90 auszulegen, als sehr schlank zu konstruieren und von vornherein eine Löschanlage einzuplanen. Das gilt aber natürlich nur, wenn für das jeweilige Bauvorhaben keine Löschanlage verpflichtend ist. Die rot-strichlierte Linie beschreibt Lösungen, welche bereits die Anschaffungskosten für ein Sprinklersystem inkludiert haben. Dazu lässt sich sagen, dass bei 8m Deckenspannweite die Anschaffungskosten des Sprinkler-Systems annähernd 50% der Materialgesamtkosten ausmachen; im Vergleich dazu bei 12m sind es ca. 35%.

In Bezug auf die Ressourcenmenge können folgende Aussagen getroffen werden: Durch das Einplanen einer Sprinkleranlage kann die Holzmenge auf ein Minimum reduziert werden, sodass gerade die Nachweise der Kaltbemessung erfüllt sind. Diese Minimierung des Holzquerschnitts hat zur Folge, dass schmale aber hohe Rippen zum Einsatz kommen. Wenn der Verbund zwischen Holz und Beton über Schubkerven erfolgen soll, ist aber eine Mindestbreite der LVL-Rippen erforderlich, da sonst die Kervennachweise nach *Schönborn, Flach und Feix* [51] nicht erfüllt

werden können. Schubkerven sind grundsätzlich und gerade für Neubauten eine effiziente Verbundvariante. Es werden keine zusätzlichen Ressourcen benötigt, die Herstellung erfolgt einfach und kostengünstig auf der Abbundanlage, es ist nur eine geringe Stückzahl notwendig und es ist kein zusätzlicher Personalaufwand nötig. Beim Verbund über HBV-Schrauben kann die Rippenbreite weiter auf 60mm reduziert werden falls es die Nachweisführung zulässt. Es ist lt. Zulassung ein Randabstand von 30mm erforderlich. Bei stiftförmigen Verbindungsmittel ist eine hohe Anzahl notwendig und der Personalaufwand für das Setzen der Schrauben ist auch nicht zu unterschätzen. Dies wurde aber, wie bereits erwähnt, in der Materialkostenkalkulation nicht berücksichtigt. Aber aufgrund dessen, dass die Kosten für die LVL-Rippen den Hauptanteil der Materialkosten des Deckenelements ausmachen und durch den Verbund über Schrauben minimale Holzquerschnitte möglich sind, ist auch eine ressourcen- sowie kosteneffiziente Lösung auch mit HBV-Schrauben für Neubauten möglich (*siehe 6.5.2 Lösung II/8m*). Hier sei aber nochmals erwähnt, dass durch das Minimieren des Holzquerschnitts eine Löschanlage zwingend notwendig ist, um den Anforderungen an den Brandschutz gerecht zu werden. Und die Installation einer Löschanlage ist natürlich zwangsläufig auch mit einem Ressourcenaufwand verbunden, ist aber oft eine Grundvoraussetzung im Hochhausbau. Beim Betrachten der Betonplatte lässt sich sagen, dass von 12m auf 10m Spannweite die Stärke der Platte um 3cm (von 11cm auf 8cm) reduziert werden konnte, auf eine Spannweite von 8m aber kaum eine weitere Reduzierung möglich ist. Grund dafür ist, dass neben der lt. Zulassung vorgeschriebenen Mindeststärke von 7cm, der *Schwingungsnachweis nach Eurocode 5* [7] bei einer weiteren Reduktion nicht mehr erfüllt ist.

In den folgenden Absätzen werden eigenständige Erkenntnisse angesprochen und diskutiert.

Paarweise Anordnung der LVL-Rippen:

Zu Beginn der Arbeit wurde beabsichtigt, die LVL-Rippen gleichmäßig auf die Deckenfläche aufzuteilen. Durch die Entscheidung für die Systembauweise bzw. Deckenelementbauweise und die hohe Brandschutzanforderung REI 90 wurde eine „paarweise Anordnung“ der LVL-Rippen in Betracht gezogen. Paarweise deswegen, da die LVL-Hersteller für Nadelholz in den Standard-Lieferabmessungen eine maximale Rippenbreite von 75mm angeben. Gründe für diese Rippenpositionierung sind auf der einen Seite die folgenden: Im Zuge der statischen Bemessung hat sich eine Rippenanzahl von vier Stück pro Deckenelement (2,5m Breite) bewehrt. Um ein optisch gleichmäßiges Bild zu erhalten, ist es zielführend in der Elementmitte zwei Rippen zusammen zu schieben und am Elementrand jeweils eine Rippe vorzusehen. Werden dann die Deckenelemente Mann an Mann positioniert, erhält man eine gleichmäßige Deckenuntersicht. Auf der anderen Seite wird durch das „Aufdoppeln“ der Rippenquerschnitt gedrängter und dadurch wird die Brandwiderstandsdauer erhöht. Der Restbalkenquerschnitt ist nach Abzug der ideellen Abbrandtiefe somit größer und kann mehr Last abtragen. Hinzu kommt die Erkenntnis, dass einige Nadelholz-LVL-Hersteller die Möglichkeit bieten einzelne Rippen miteinander zu verleimen bzw. sind beim Laubholz-LVL-Hersteller Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG

flexiblere Querschnittsabmessungen erhältlich. Somit ist die aufgedoppelte Rippe in der Deckenelementmitte auch ein eigenständiges Bauteil, was aus statischer Sicht von Vorteil ist. Diese beschriebene konstruktive Lösung wurde für alle Lösungsvarianten angewendet. Ob die LVL-Rippen von zwei Mann an Mann liegenden Deckenelementen zusätzlich miteinander zu verbinden sind oder ob der Verbund in der Ebene der Betonplatte für ein monolithisches Deckensystem ausreicht, gilt es in einer ergänzenden statischen Untersuchung zu eruieren.

Buchen-Furnierschichtholz:

Eine wesentliche Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass der Einsatz von LVL aus Laubholz viele Vorteile mit sich bringt. Die Entwicklung von HBV-Decken dieser Art und für die Anwendung, wie sie in dieser Arbeit vorliegt, rückt dadurch einen entscheidenden Schritt nach vorn. Die Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG stellt zwei Produkte, mit den Bezeichnungen „BauBuche Träger S“ und „BauBuche Träger GL75“ her, die für diese Anwendung prädestiniert sind (Details siehe Kapitel 4.1). Die Rohdichte ist zwar um ca. ein Drittel höher wie beim Nadelholz, aber durch die signifikant höheren Festigkeits- und Steifigkeitswerte können die Querschnittsabmessungen wesentlich reduziert werden und dadurch wird die Ressourceneffizienz verbessert. Die Preisrecherche direkt bei den LVL-Herstellern ergibt, dass die Preise für die „BauBuche“ problemlos mit jenen der Nadelholz-LVL-Hersteller mithalten können und teilweise sogar darunter liegen. Zusätzlich sind noch wesentlich flexiblere Standard-Lieferabmessungen erhältlich (siehe Tabelle 6.3: Auflistung der Standard-Lieferabmessungen und aktuelle Preise der diversen LVL – Hersteller). Somit sind auch im Hinblick auf die Kosteneffizienz nur Vorteile zu verzeichnen.

Einsparung an Holzressourcen durch den Einsatz von LVL:

Im Zuge der Diplomarbeit wird des Öfteren auf den Prototyp der Firma Cree GmbH, den Life Cycle Tower – LCT One hingewiesen, da der Deckenaufbau und die Bauweisen sich sehr ähneln. Beim LCT One werden anstelle von LVL Brettschichtholzbalken (BSH) verwendet. Die maximale Spannweite liegt bei 9,45m. Pro Deckenelement werden bei dieser Entwicklung vier BSH-Balken mit einem Querschnitt von 28 x 24 cm eingesetzt. Für das Brandschutzkonzept ist eine Sprinkleranlage vorgesehen. Um die Vorteile des oben beschriebenen Hochleistungs-Holzwerkstoff Buchen-Furnierschichtholz hervorzuheben, wird in diesem Absatz angeführt in welcher Größenordnung die Holzmengen-Einsparungen durch den Einsatz der „BauBuche“ im Vergleich zu BSH aus Nadelholz liegen können. Verglichen werden Lösungsvarianten die durch die Parameterstudie entstanden sind bezogen auf die umgesetzte Deckenkonstruktion beim LCT One. Der Vergleich zeigt, dass die Holzmengensparnis bei einer eigenständigen Lösung, ohne die Notwendigkeit einer externen Maßnahme wie ein Sprinkler-System, im Bereich von 50% liegt und durch den Einsatz einer Löschanlage sogar auf 65 bis 70% reduziert werden kann.

Brandschutzanforderungen im Holzhochhausbau:

Da die Brandschutzanforderungen sehr hoch sind, haben sie einen sehr großen Einfluss auf die Konstruktion und in weiterer Folge auf die Ressourcen- und Kosteneffizienz. Speziell bei der Anwendung der „Methode mit reduziertem Holzquerschnitt“ nach *ÖNORM EN 1995-1-2* [17] ist eine Überdimensionierung der LVL-Rippen notwendig um den Anforderungen gerecht zu werden. Die Holzforschung Austria gibt an, dass lt. Erfahrungswerten für einen Brandwiderstand von R 90 die Dimensionen der Holzquerschnitte nach der Kaltbemessung um 4cm erhöht werden müssen. [60] Das bedeutet für die schmalen LVL-Rippen eine Querschnittsvergrößerung von teilweise über 50%. Aus diesem Grund kam die Überlegung der Brandlastabtragung über die Stahlbetonplatte, wodurch das Brandkonzept unabhängig vom Holzbauteil wäre. Dies ist zwar theoretisch möglich, erfordert aber einen sehr hohen Bewehrungsgrad der schmalen Betonplatte und ist somit nicht praxisrelevant. Ergänzende Untersuchungen mit Faserbeton anstatt Stahlbeton könnten eventuell zu einer sinnvollen Lösung führen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Brandbemessung nach *Eurocode 5* [16] sehr viele Sicherheiten beinhaltet und dadurch zusätzliche Ressourcen verbraucht werden. Wenn die Möglichkeit besteht einen Prüfnachweis anhand von Brandversuchen nach *DIN EN 13501* [15], [14] durchzuführen, ist dies vorteilhaft. Beim LCT One wurden Brandversuche nach *DIN EN 13501* durchgeführt.

Elementbauweise / Systembauweise:

Die Element - bzw. Systembauweise ist ein Kernpunkt dieser Diplomarbeit. Die gesamte *Parameterstudie* in *Kapitel 6* und somit auch die gesamte Lösungsfindung beruht auf der Entwicklung von Deckenelementen für die Elementbauweise. Die ersten Anzeichen, dass diese Art der Bauweise zielführend sein könnte, sind im Titel dieser Arbeit zu finden: „*Ressourceneffiziente HBV-Decken zum Einsatz im Holzhochhausbau*“. Das Schlagwort Hochhaus beinhaltet, dass es sich um ein mehrgeschoßiges Haus handelt, welches über eine große Gesamtdeckenfläche verfügt. Wie bereits in *Kapitel 4.4 Element- bzw. Systembauweise* für das Baukastensystem erwähnt, ist für die Elementbauweise eine aufwändige Vorarbeit notwendig um die Deckenelemente aber auch Wandelemente herzustellen. Dieser Aufwand ist nur dann rentabel bzw. wirtschaftlich, wenn eine hohe Stückzahl an Elementen gefordert ist, was bei Hochhäusern in der Regel der Fall ist. Weiters wurden bzw. werden aktuelle Holz-Bauvorhaben in dieser Größenordnung, wie der Life Cycle Tower One in Dornbirn, das Illwerke Zentrum im Montafon (Vorarlberg) oder das HoHo Wien ebenfalls in der Elementbauweise hergestellt. Das weist darauf hin, dass sich diese Bauweise für diese Anwendung bereits bewährt hat. Negativ behaftet ist die Tatsache, dass diese Bauweise eine zur Verfügung stehende Fertigungshalle und ausreichend Lagerkapazität voraussetzt, sowie den Transport sperriger Elemente mit sich bringt. Eine Überlegung für zukünftige Projekt wäre eine temporäre Fertigungshalle bzw. ein Fertigungszelt direkt auf der Baustelle. Dies ist natürlich nur möglich, wenn genügend Platz vorhanden ist. Der Transport der vorgefertigten Elemente sowie der Bedarf einer externen Fertigungshalle würde aber entfallen.

8 Schlussfolgerung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist, eine HBV-Decke für den Holzhochhausbau zu entwickeln, die allen Anforderungen, wie sie in *Kapitel 1 Einleitung* beschrieben sind, entspricht und dabei möglichst ressourceneffizient im Hinblick auf die Konstellation der Komponenten, Konstruktion des Querschnitts und Bauweise ist. In Bezug auf die Kosten wurden rein die Materialkosten der unterschiedlichen Lösungsvarianten kalkuliert und untereinander verglichen, mit dem Ziel im Bereich der untersuchten Spannweiten von 8 bis 12 Meter ein Materialkostenspektrum zu erhalten und einen Trend zu erkennen.

Konstruktive Lücken, die noch nicht genau behandelt wurden und wo es auf jeden Fall noch ergänzender Untersuchungen bedarf, sind die detaillierte konstruktive Ausführung der Sturzbalken aus Stahlbeton, die als Auflager für die Deckenelemente dienen und wesentlich Bestandteil des Brandschutzkonzeptes sind. Weiters ist die Ausführung des Verbunds zwischen den Deckenelementen, um ein monolithisches Deckensystem zu erhalten noch nicht genau untersucht worden. Ein weiterer konstruktiver Punkt, der noch offen ist und den es zu untersuchen gilt sind Deckendurchbrüche. In diesem Bereich bedarf es noch an Forschung im Hinblick auf die Statik und die effektivste Umsetzung.

Ob dieses entwickelte Produkt konkurrenzfähig in Bezug auf andere Hybriddeckenkonstruktionen, Holzdeckenkonstruktion oder andere Arten von Decken ist, ist ein weiterer Punkt, den es anhand von Studien zu untersuchen gilt.

Abschließend noch ein positiver Aspekt aus ökologischer Sicht betrachtet:

Diese Diplomarbeit befasst sich mit Hybridkonstruktionen in Form von Holz-Beton-Verbund-Decken die nur über mechanische Verbindungsmittel die Werkstoffe Holz und Beton zu einem Hybridbauteil vereinen. Im Falle eines Gebäudeabrisses bzw. Rückbaus ist somit ein einfaches Trennen der Werkstoffe möglich. Dadurch ist auch das Recyclen problemlos möglich, was wiederum im Sinne der Umwelt ist.

Zitat: Architekt Prof. Dipl.-Ing. Hermann Kaufmann

„Holz ist während der Entwicklung des Bauwesens als moderner Werkstoff in Vergessenheit geraten, da es mit vielen Vorurteilen behaftet ist. Die Zukunft für das Bauen mit Holz beginnt erst. Einerseits aus ökologischen Gründen, aber andererseits auch aus emotionalen und ästhetischen Gründen.“ [61]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Holz reduziert CO ₂ [2]	5
Abbildung 2.2: Kreislaufwerkstoff Holz [3].....	6
Abbildung 3.1: Kriterien des Feuerwiderstands eines Bauteils [14]	11
Abbildung 3.2: Deckenelement LCT-Life Cycle Tower, Dornbirn [18].....	16
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Beiträge zur Schallübertragung:	16
Abbildung 3.4: Masse-Feder-Masse-System; schematische Darstellung.....	18
Abbildung 3.5: Einteilung in die Deckenklassen nach den Eurocode 5 Anforderungen [23].....	22
Abbildung 3.6: Übersicht über den Schwingungsnachweis von HBV-Decken [24]	23
Abbildung 4.1: Furnierschichtholz – Herstellungsprozess [26].....	25
Abbildung 4.2: LVL - Laminated Veneer Lumber [27].....	26
Abbildung 4.3: ideale Arbeitslinie eines Verbindungsmittels [37]	33
Abbildung 4.4: Fertigteil-Verbinder der Firma Würth [39]	37
Abbildung 4.5: Montage einer Fertigteilplatte mit FT-Verbindern auf einer Balkenlage [39]	39
Abbildung 4.6: Darstellung der Schubkraftübertragung zwischen Holz und Beton bei Kerven [37]	39
Abbildung 4.7: Kervenparameter (links); Darstellung einer Kervenverbindung (rechts) [40]	40
Abbildung 4.8: Kräfteausbildung bei Scherbeanspruchung [42].....	41
Abbildung 4.9: RAPID® T-Con HBV-Schraube [30].....	43
Abbildung 4.10: Assy® plus VG-Schraube / Abmessungen Senkkopf für Ø 10 mm [31].....	44
Abbildung 4.11: RAPID® VG-Schraube / Abmessungen Senkkopf für Ø 10 mm [31].....	44
Abbildung 4.12: Herstellung eines Deckenelements in der Stahlschalung [41].....	46
Abbildung 4.13: Ausnahmen zum Herstellen des Verbunds der einzelnen	46
Abbildung 4.14: Problematik beim Setzen der HBV-Verbundschrauben	47
Abbildung 5.1: Übersicht der Versuchsreihen	49
Abbildung 5.2: Versuchsreihe: 45°; Fertigungszeichnung und 3D-Modell.....	50
Abbildung 5.3: Bildergalerie: Prüfkörperherstellung in der Halffertigteil-Bauweise	51
Abbildung 5.4: Versuchsreihe: 30°; Fertigungszeichnung und 3D-Modell.....	52
Abbildung 5.5: Versuchsreihe: FT; Fertigungszeichnung und 3D-Modell	53
Abbildung 5.6: Bildergalerie: Prüfkörperherstellung in der Fertigteilbauweise.....	54
Abbildung 5.7: Holzfeuchteermittlung nach DIN EN 13183-2 [45].....	56
Abbildung 5.8: Überprüfen des Feuchteintrags durch das Betonieren	57
Abbildung 5.9: Versuchsaufbau in den Aspengründen.....	59
Abbildung 5.10: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus.....	60
Abbildung 5.11: Belastungsverfahren nach ÖNORM EN 26891 [48].....	61
Abbildung 5.12: Last-Verschiebungsdiagramm; Versuchsreihe: 45°	63
Abbildung 5.13: Last-Verschiebungsdiagramm; Versuchsreihe: 30°	65
Abbildung 5.14: Last-Verschiebungsdiagramm; Versuchsreihe: FT – Teil 1.....	67

Abbildung 5.15: Last-Verschiebungsdiagramm; Versuchsreihe: FT – Teil 2.....	67
Abbildung 5.16: Vergleich Höchstlast F_{max} und Verschiebemodul k_s ; Boxplot - Darstellung.....	69
Abbildung 5.17: Last-Verschiebungsdiagramm aller Versuchsreihen (30°; 45°; FT).....	70
Abbildung 5.18: Versagensmechanismus: Spalten der LVL-Rippe.....	72
Abbildung 5.19: Schnitt durch den Schraubkanal.....	72
Abbildung 5.20: Vergleich der errechneten und experimentell ermittelten Werte; VR: 45°.....	74
Abbildung 5.21: Vergleich der errechneten und experimentell ermittelten Werte: VR: FT.....	75
Abbildung 6.1: Grundprinzip des Schubanalogieverfahrens.....	83
Abbildung 6.2: Beispiel Stabwerksmodell inkl. idealisiertem Schubfluss [54].....	84
Abbildung 6.3: statisches Ersatzsystem unter Berücksichtigung der Gurtsteifigkeit [54].....	85
Abbildung 6.4: Ablaufschema für die Lösungsfindung durch die Parameterstudie.....	94
Abbildung 6.5: Darstellung der Varianten für 12m Deckenspannweite.....	104
Abbildung 6.6: Gegenüberstellung der Materialressourcen /12m Deckenspannweite.....	104
Abbildung 6.7: Gegenüberstellung der Materialkostenkalkulation /12m Deckenspannweite.....	104
Abbildung 6.8: Darstellung Lösung I /12m (selbstständige Lösung).....	105
Abbildung 6.9: Darstellung Lösung II /12m (Sprinkler-System erforderlich).....	105
Abbildung 6.10: Kervendetail inklusive Bewehrungsstahl.....	106
Abbildung 6.11: Dimensionierung der Betonplatte für die Lastabtragung im Brandfall; L II/10m.....	112
Abbildung 6.12: Darstellung der Varianten für 10m Deckenspannweite.....	116
Abbildung 6.13: Gegenüberstellung der Materialressourcen /10m Deckenspannweite.....	116
Abbildung 6.14: Gegenüberstellung der Materialkostenkalkulation /10m Deckenspannweite.....	116
Abbildung 6.15: Darstellung der finalen Lösung für 10m Spannweite (Sprinkler-System).....	117
Abbildung 6.16: Darstellung der Varianten für 8 m Deckenspannweite.....	127
Abbildung 6.17: Gegenüberstellung der Materialressourcen /8m Deckenspannweite.....	127
Abbildung 6.18: Gegenüberstellung der Materialkostenkalkulation /8m Deckenspannweite.....	127
Abbildung 6.19: Darstellung der finalen Lösung für 8m Deckenspannweite; 8m.....	128
Abbildung 6.20: Detail der finalen Lösung; 8m.....	128
Abbildung 6.21: Spektrum der Deckenelementhöhen.....	130
Abbildung 6.22: Spektrum der Materialkosten pro Deckenelement.....	130
Abbildung 6.23: Spektrum der Materialkosten pro Quadratmeter Deckenelement.....	131
Abbildung 6.24: Spektrum der Ressourcenmengen pro Deckenelement.....	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: OIB-Richtlinien /aktueller Stand: 2015 [8].....	9
Tabelle 3.2: Auszug aus der OIB-RL 2 / Tabelle 1a [8].....	10
Tabelle 3.3: Benennung der Kurzzeichen des Brandverhaltens von Baustoffen [15]	12
Tabelle 3.4: Auszug aus der OIB-Richtlinie 5 / Punkt 2.2.4 [8]	17
Tabelle 3.5: Auszug aus der OIB-Richtlinie 5 / Punkt 2.3 [8].....	17
Tabelle 3.6: Auszug aus der OIB-Richtlinie 5 / Punkt 2.5 [8].....	18
Tabelle 3.7: Auszug: Deckenklassen / konstruktive Anforderungen [7].....	20
Tabelle 3.8: Auszug ÖNORM B 1995-1-1:2015 Tabelle NA.7.2-E4 [21].....	21
Tabelle 3.9: Auszug ÖNORM B 1995-1-1:2015 Tabelle NA.7.2-E4 [21].....	21
Tabelle 3.10: Auszug ÖNORM B 1995-1-1:2015 Tabelle NA.7.2 [21].....	22
Tabelle 4.1: Produktbezeichnungen der Herstellerfirmen.....	27
Tabelle 4.2: Produktbezeichnungen der Firma Pollmeier Massivholz GmbH&Co.KG	27
Tabelle 4.3: Vergleich Festigkeitseigenschaften LVL - Teil 1 [27], [26], [28].....	28
Tabelle 4.4: Vergleich Festigkeitseigenschaften LVL -Teil 2 [29].....	29
Tabelle 4.5: aktuelle Holzprodukte aus Furnierschichtholz LVL mit abZ (Stand: 17.8.2018) [30]	30
Tabelle 4.6: aktuelle Holzprodukte aus Furnierschichtholz LVL mit ETA (Stand: 17.8.2018) [31]	30
Tabelle 4.7: Auszug ÖNORM EN 1992-1-1 Tabelle 3.1: Festigkeitswerte für Beton [35]	31
Tabelle 4.8: aktuelle Verbindungsmittel mit einer abZ (Stand: 18.8.2018) [30]	35
Tabelle 4.9: aktuelle Verbindungsmittel mit einer ETA (Stand: 18.8.2018) [31].....	36
Tabelle 5.1: Ermittlung der Rohdichte des LVL.....	55
Tabelle 5.2: Betonrezeptur – C 25/30	57
Tabelle 5.3: Betonfestigkeitsermittlung nach ÖNORM EN 12390-1 [47].....	58
Tabelle 5.4: Auswertung Versuchsreihe: 45° nach EN 14358 [49].....	64
Tabelle 5.5: Auswertung Versuchsreihe:30° nach EN 14358 [49].....	66
Tabelle 5.6: Auswertung Versuchsreihe: FT nach EN 14358 [49]	68
Tabelle 5.7: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse nach EN 14358.....	70
Tabelle 6.1: charakteristische Schubtragfähigkeit $F_K(T_K)$ und Verschiebemodul K_{ser}	80
Tabelle 6.2: Mittelwerte der Baustoffeigenschaften und reduzierte Werte in	82
Tabelle 6.3: Auflistung der Standard-Lieferabmessungen und aktuelle Preise der LVL–Hersteller....	92
Tabelle 6.4: Auszug Preisliste Transportbeton (Stand: 1.1.2018)	92
Tabelle 6.5: Preise für stiftförmige Verbindungsmittel	93
Tabelle 6.6: Deckenparameter für Lösung I/12m; 12m Deckenspannweite.....	95
Tabelle 6.7: Ressourcenermittlung für Lösung I/12m; 12m Deckenspannweite.....	96
Tabelle 6.8: Materialkostenermittlung für Lösung I/12m; 12m Deckenspannweite	96
Tabelle 6.9: Deckenparameter für Lösung II/12m; 12m Deckenspannweite	98
Tabelle 6.10: Ressourcenermittlung für Lösung II/12m; 12m Deckenspannweite	98

Tabelle 6.11: Materialkostenermittlung für Lösung II/12m; 12m Deckenspannweite	99
Tabelle 6.12: Deckenparameter für Lösung III/12m; 12m Deckenspannweite.....	101
Tabelle 6.13: Ressourcenermittlung für Lösung III/12m; 12m Deckenspannweite	102
Tabelle 6.14: Materialkostenermittlung für Lösung III/12m; 12m Deckenspannweite.....	103
Tabelle 6.15: Deckenparameter für Lösung I/10m; 10m Deckenspannweite	107
Tabelle 6.16: Ressourcenermittlung für Lösung I/10m; 10m Deckenspannweite	108
Tabelle 6.17: Materialkostenermittlung für Lösung I/10m; 10m Deckenspannweite.....	108
Tabelle 6.18: Deckenparameter für Lösung II/10m; 10m Deckenspannweite	110
Tabelle 6.19: Ressourcenermittlung für Lösung II/10m; 10m Deckenspannweite	110
Tabelle 6.20: Materialkostenermittlung für Lösung II/10m; 10m Deckenspannweite	111
Tabelle 6.21: Deckenparameter für Lösung III/10m; 10m Deckenspannweite.....	113
Tabelle 6.22: Ressourcenermittlung für Lösung III /10m; 10m Deckenspannweite.....	114
Tabelle 6.23: Materialkostenermittlung für Lösung III /10m; 10m Deckenspannweite	115
Tabelle 6.24: Deckenparameter für Lösung I /8m; 8 m Deckenspannweite	118
Tabelle 6.25: Materialkostenermittlung für Lösung I /8m; 8m Deckenspannweite	119
Tabelle 6.26: Materialkostenermittlung für Lösung I /8m; 8m Deckenspannweite	119
Tabelle 6.27: Deckenparameter für Lösung II /8m; 8 m Deckenspannweite.....	121
Tabelle 6.28: Materialkostenermittlung für Lösung II/8m; 8m Deckenspannweite.....	122
Tabelle 6.29: Materialkostenermittlung für Lösung II/8m; 8m Deckenspannweite.....	123
Tabelle 6.30: Deckenparameter für Lösung III /8m; 8 m Deckenspannweite	124
Tabelle 6.31: Materialkostenermittlung für Lösung III/8m; 8m Deckenspannweite	125
Tabelle 6.32: Materialkostenermittlung für Lösung III/8m; 8m Deckenspannweite	126

Literaturverzeichnis

- [1] proHolz Austria,
[online]: <http://www.proholz.at/co2-klima-wald/co2-bilanz/bauen-mit-holz-ist-aktiver-klimaschutz/> [Zugriff: 10/2018].
- [2] www.klima-holz-mensch.de,
[online]: <http://www.klima-holz-mensch.de/holz-reduziert-co2> [Zugriff: 10/2018].
- [3] proHolz Austria,
[online]: <http://www.proholz.at/co2-klima-wald/co2-speicher-wald/wald-und-holz-sind-co2-langzeitspeicher/> [Zugriff: 10/2018].
- [4] proHolz Austria,
Zuschnitt 54; Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz [Ausgabe: 06/2014].
- [5] proHolz Austria,
[online]: <http://www.proholz.at/architektur/detail/lct-one/> [Zugriff: 10/2018].
- [6] proHolz Austria,
[online]: <http://www.proholz.at/architektur/detail/hoho-wien-aspersn-seestadt/> [Zugriff: 10/2018].
- [7] ÖNORM EN 1995-1-1: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. 2015.
- [8] Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-Richtlinien;
[online]: <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien> [Stand: 2015].
- [9] ÖNORM EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung. 2012.
- [10] ÖNORM B 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung; Nationaler Anhang. 2013.
- [11] ÖNORM EN 1991-1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke. 2010.
- [12] ÖNORM B 1991-1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke; Nationaler Anhang. 2017.
- [13] 10. Internationales Holzbau-Forum:
Holz-Beton-Verbund als starre und duktile Verbindung. 2004.
- [14] DIN EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2 Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen. 2016.
- [15] DIN EN 13501-1: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten. 2017.
- [16] ÖNORM EN 1995-1-2: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten–Teil 1-2: Allgemeine Regeln-Tragwerksbemessung für den Brandfall. 2010.
- [17] ÖNORM B 1995-1-2 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten–Teil 1-2: Allgemeine Regeln-Tragwerksbemessung für den Brandfall; Nationaler Anhang. 2011.
- [18] CREE by Rhomberg GmbH,
[online]: <https://www.creebyrhomberg.com/de/> [Zugriff: 10/2018].

- [19] Dr.-Ing. Andreas Rabold, Schallschutz von Holzbalkendecken. Biel, 2012.
- [20] Adolf Würth GmbH & Co.KG,
Holz-Beton-Verbunddecken - Konstruktionsvarianten und Bemessung. Künzelsau, 2018.
- [21] ÖNORM B 1995-1-1: Bemessung von Konstruktionen und Holzbauten;
Nationaler Anhang, 2015.
- [22] Dipl.-Ing. Alex Müllner,
[Vortragsfolien]: Schwingungen im Holzbau; Holzbau. TU Wien, SS2018.
- [23] www.bemessung.at,
[online]: <http://www.bemessung.at/wordpress/2015/06/23/schwingungen-und-nachweise/> [Zugriff: 10/2018].
- [24] Patricia Hamm,
Schwingungen bei Holzdecken – Konstruktionsregeln für die Praxis. Beaune, 2012.
- [25] 21. Internationales Holzbau-Forum:
Holz-Beton-Verbundsysteme Vergleich und Tendenzen. 2015.
- [26] Konstruktionsheft STEICO LVL / Furnierschichtholz [Stand: 07/2018].
- [27] LVL by Stora Enso - Typ S (S-Grade) [Datenblatt].
- [28] Mestä Group; Kerto - S [Datenblatt].
- [29] www.pollmeier.com,
[online]: <https://www.pollmeier.com/de/produkte/baubuche/ueber-baubuche.html#gref>
[Zugriff: 10/2018].
- [30] Deutsches Institut für Bautechnik-DIBt, Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen-abZ
[online]: https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/NAT_n/zv_referat_15/SVA_9.htm
[Stand: 10/2018].
- [31] Deutsches Institut für Bautechnik-DIBt, ETA-Verzeichnis
[online]: https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/ETA_n/vSVA_9003.htm
[Stand: 10/2018].
- [32] ÖNORM EN 14374: Holzbauwerke - Furnierschichtholz (LVL) - Anforderungen. 2016.
- [33] Dipl.-Ing. Florian Hölzl:
Diplomarbeit: Ressourceneffiziente Verbundsysteme bei Holz-Beton-Verbund-Rippendecken; TU Wien 2018.
- [34] ÖNORM B 4710-1: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität - Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton. 2018.
- [35] ÖNORM EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. 2011.
- [36] U. Kuhlmann, J. Schänzlin, B. Michelfelder, Berechnung von Holz-Beton-Verbunddecken. Berlin, 2004.

- [37] Dipl.-Ing. Stefan Hölzl:
Diplomarbeit: Wirtschaftliche Betrachtung von Holz-Beton-Verbund-Decken; TU Graz 2014“.
- [38] Deutsches Institut für Bautechnik-DIBt,
[online]: <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/zulassungen-etas-und-mehr/>;
[Zugriff: 08/2018].
- [39] Ernst Henning:
ql²/8 - Holz-Beton-Verbund-Decken, Konstruktionsvarianten und Bemessungen,
Adolf Würth GmbH & Co. KG. 09/2016.
- [40] S. Mönch, K. Kudla, U. Kuhlmann,
Holz-Beton-Verbundkonstruktionen mit Kernen – Tragfähigkeit und Steifigkeit.
Stuttgart, 2016“. [9. Europäischer Kongress EBH 2016].
- [41] www.hkarchitekten.at,
[online]: <https://www.hkarchitekten.at/projekt/lct-one/> [Zugriff: 10/2018].
- [42] Dipl.-Ing. Christian Bosnjak:
Diplomarbeit: Entwicklung praxisorientierter Bemessungshilfe zur Steigerung der
Ressourcen- und Materialeffizienz der Holz-Beton-Verbunddecken. TU Wien, 2018.
- [43] European Organisation for Technical Assessment, EAD 130090-00-0303:
Holz-Beton-Verbundsystem mit stiftförmigen Verbindungsmitteln. 2018.
- [44] DIN 52182: Bestimmung der Rohdichte. 1976“.
- [45] DIN EN 13183-2: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz;
Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren. 2002“.
- [46] DIN EN 13183-1: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz;
Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. 2002.
- [47] ÖNROM EN 12390-1: Prüfung von Festbeton -
Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen. 2012“.
- [48] ÖNORM EN 26891: Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln -
Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des
Verformungsverhaltens. 1991.
- [49] ÖNORM EN 14358: Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte.
2016.
- [50] Birgit Christiane Michelfelder:
Dissertation: Trag- und Verformungsverhalten von Kernen bei Brettstapel-Beton-
Verbunddecken. Universität Stuttgart, 2006.
- [51] Schönborn F., Flach M., Feix J.: Bemessungsregeln und Ausführungshinweise für
Schubkernen im Holz-Beton-Verbundbau. Berlin, 2011.
- [52] Deutsches Institut für Bautechnik-DIBt:
Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-845: Star-Drive und RAPID Schrauben als
Verbindungsmittel für das Schmid Schrauben HBV-System. 2014.

-
- [53] Winter S., Kreuzinger H., Mestek P.
Flächen aus Brettstapeln, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen. Lehrstuhl für
Holzbau und Baukonstruktionen. TU München, 2008.
- [54] Rautenstrauch K., Grosse M., Hartnack R., Lehmann S,
Modellierung von diskontinuierlich verbundenen Holz – Beton – Verbundkonstruktionen.
Teil 1: Kurzzeittragverhalten. Bautechnik 80, Heft 8. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2003.
- [55] Preisliste Rohrdorfer Transportbeton GmbH
[online]: https://www.rohrdorfer.at/2478_DE.pdf?exp=24582682872900
[Stand: 1.1.2018].
- [56] ÖNORM B 3410: Gipsplatten für Trockenbausysteme - Arten, Anforderungen und Prüfungen.
2016.
- [57] Preisliste Lieferprogramm Knauf KG
[online]: <https://katalog.machacek.at/images/downloads/Knauf%20Lieferprogramm%20Preisliste%20ab%2001.01.2018.pdf> [Stand: 1.1.2018].
- [58] ArcelorMittal, Kosten im Stahlbau, Basisinformationen Deutschland 2008
[online]: http://www.constructalia.com/repository/transfer/de/05278213ENLACE_PDF.pdf
[Zugriff: 10/2018].
- [59] Prof. Dr. Mario Fontana,
Möglichkeiten des Brandschutzes in intelligenten Gebäuden. ETH Zürich, 2010
[online]: http://www.brand-feuer.de/images/9/91/Moeglichkeiten_des_brandschutzes_in_intelligenten_gebaeuden.pdf [Zugriff: 10/2018].
- [60] Dipl.-HTL-Ing. Irmgard Matzinger;
Holzforschung Austria, Brandverhalten von Holzkonstruktionen; Holzbau 2, TU Wien. 2018.
- [61] ARD Mediathek: Planet Wissen,
[Dokumentation]: Holz - Alter Baustoff, neu gedacht. (15.10.2018).