

Diploma Thesis

Timber-lightweight concrete floor construction: Numerical description of bearing behavior

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Holz-Holzleichtbeton-Verbunddecken: Numerische Beschreibung des Kurzzeittragverhaltens

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Florian Chmelik, BSc

Matr.Nr.: 1125246

unter der Anleitung von

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

Institut für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/259, A-1040 Wien

Wien, im Oktober 2017

Danksagung

Ich bedanke mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. Alireza Fadai, welcher mir bei meiner Arbeit immer mit Rat und Tat zur Seite stand, und Herrn Dipl.-Ing. Christoph Radlherr, meinem zweiten Betreuer für seine hilfreiche Unterstützung. In diesem Sinne möchte ich mich auch noch bei meiner Frau und meinen Eltern für die liebevolle Unterstützung in jeder Lebenslage bedanken.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit thematisiert die möglichst realitätsnahe numerische Beschreibung des Kurzzeittragverhaltens von Holz-Beton-Verbundsystemen mittels der Finite Elemente Methode.

Als Basis für die Finite Elemente Methode dienen die aktuell in den Normen verankerten Nachweismethoden und Berechnungsmethoden von Schraubenherstellern. Daher beschäftigt sich der erste Teil der Arbeit mit den Grundlagen und der Anwendung der Finite Elemente Methode. Dabei wird auf nachgiebige Verbindungsmittel, die Quertragwirkung und das Kurz- und Langzeitverhalten eingegangen, welche für die Anwendung (Modellbildung) benötigt werden.

Die Grundlage der Finite Elemente Methode sind die Last-Verschiebungsdiagramme der Verbindungsmittel, welche als Arbeitslinie der Schraubverbindung bezeichnet werden. Diese werden für eine möglichst realitätsnahe Modellierung, welches die Querschnitte mittels Stäbe nachbildet, hinterlegt. Dadurch ist ein sehr gut angenähertes Verformungsverhalten und eine gute Verteilung der Steifigkeiten im Verbundquerschnitt zu erhalten. Dies wird durch die realitätsnahe Berücksichtigung des elastischen und plastischen Bereiches der Verbindungsmittel geschaffen.

Darauf aufbauend wird zur Verifikation der Finite Elemente Methode eine Parameterstudie zur Ermittlung der Einflüsse von maßgebenden Parametern und Grundvoraussetzungen für das Kurzzeittragverhalten durchgeführt. Dabei werden Untersuchungen zur mitwirkenden Breite, Querschnittsabmessungen, dem Ausnutzungsgrad des Systems und dem effektiven Verbindungsmittelabstand geführt, welche nachfolgend mittels eines Vergleiches von experimentellen Forschungsergebnissen verifiziert werden. Damit wird im Speziellen das Gamma Verfahren, experimentelle Forschungsergebnisse und die Finite Elemente Methode verglichen und Unterschiede aufgezeigt.

Die erhaltenen Ergebnisse der Verifikationen ermöglichen eine Abgabe von Empfehlungen für die Modellierung und Nachweisführung von Holz-Beton-Verbundsystem mit Schraubverbindungen durch eine numerische Beschreibung des Verbundsystems. Weiters kann eine Aussage über die Auslastung und Anordnung der verwendeten Verbindungsmittel getroffen werden.

Abschließend wird ein aktueller Versuch des Institutes mit der Finite Elemente Methode nachgebildet, um mögliche Aussagen über das Verformungsverhalten zu tätigen und die geringen Abweichungen zur Finite Elemente Methode aufzuzeigen. Die Ergebnisse werden am Ende dieser Arbeit schließlich noch mit dem Stabwerksmodell verglichen.

Abstract

The following paper discusses the realistic numerical description of the short-term load-bearing behavior of wood and concrete joint systems using the finite element method (FEM).

The finite element method is based on the verification and calculation methods used by screw manufacturers that are currently established within normative regulations and guidelines. For this reason, the first section of this paper will provide an overview of the basic principles and applications of the finite element method. This section will cover flexible fasteners, lateral load-bearing performance and short- and long-term behavior, which are necessary for model design and other practical applications.

The basis of the FEM are the load transfer diagrams of the fasteners, which indicate the working line of the screw connection. These values are necessary to ensure that the model, which re-creates the cross sections using bars, is as realistic as possible. As a result, the model will retain a good approximation of plasticity behavior and a good distribution of stiffnesses in the composite section. This close approximation of realistic conditions is achieved by taking the elastic and plastic areas of the fastener into account.

In order to verify the FEM, a parametric study is conducted to determine the effects of significant parameters and prerequisites for short-term load-bearing behavior. This includes an examination of the width coefficient, the overall dimensions of the cross-section, the system's degree of utilization, and the actual spacing of the fasteners. The comparison focuses on addressing differences between the gamma method, experimental research results and the FEM.

Based on the results of the verification process, the paper will provide recommendations for modeling and verification procedures for wood-concrete joints using screw fasteners by numerically describing the joint system. Furthermore, the paper will also draw conclusions about the utilization and structure of the various fasteners that were used.

The final section of the paper will reproduce a current study at the institute using the FEM in order to draw possible conclusions about the plasticity behavior and to show the minor ways in which the results deviate from the FEM. As a final step, the results will then be compared to the truss model.

Symbole und Variablen

Lateinische Großbuchstaben

HBV	Holz-Beton-Verbund
FEM	Finite Elemente Methode
RFEM	Finite Elemente Software
G	Schubmodul
F	Kraft
K	Verschiebungsmodul
M	Moment
V	Querkraft
A, B, C	Auflagerbezeichnung
NW	Nachweis
Abw	Abweichung
ULS	Ultimate Limit State
SLS	Serviceability Limit State
S	Schwerpunkt
MW	Mittelwert

Lateinische Kleinbuchstaben

b	Breite Querschnitt
h	Höhe Querschnitt
l	Länge, Spannweite
s	Abstand Verbindungsmittel
t	Dicke Zwischenschicht
u	Durchbiegung, Verschiebung
w	Durchbiegung
m	Feldmitte, Grundschnittgröße Moment
v	Grundschnittgröße Querkraft
g	Gleichlast aus Eigengewicht
q	Gleichlast aus Nutzlast

Griechische Buchstaben

σ	Normalspannung
τ	Schubspannung

Indizes

Beton	Material Beton
Holz	Material Holz
HBL	Holz-Leichtbeton
verb	Verbindungsmittel
x	in x-Richtung
z	in z-Richtung
ef	effektiv
eff	effektiv
min	Minimum
max	Maximum
ser	Bereich Gebrauchstauglichkeit
u	Bereich Tragfähigkeit
rk	charakteristischer Widerstand
ax	axial
v	Abscheren
inst	Ausnutzungsgrad

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Forschungsfrage	9
1.2	Zielsetzung	9
2	Berechnungsmethoden	10
2.1	Gamma - Verfahren	10
2.1.1	Schmid Schrauben - Berechnungsprogramm	10
2.2	Schubanalogie - Verfahren	10
2.3	Stabwerksmodell	11
2.4	Vierendeelträger - Kraftgrößenverfahren	11
2.4.1	SFS - Berechnungsprogramm	11
2.5	Numerische Beschreibung - Finite Elemente Methode	11
3	Grundlagen der Finite Elemente Methode	12
3.1	Konzept der Finite Elemente Methode [1]	12
3.2	Nachgiebige Verbindungen - Arbeitslinie	14
3.3	Quertragwirkung - mitwirkende Breite	17
3.4	Kurz- und Langzeitverhalten	18
4	Anwendung der Finite Elemente Methode	19
4.1	Starr-Stab	20
4.2	Gewichtsloser Stahlquerschnitt	20
4.3	Stabendgelenk	21
4.4	Berechnungsparameter	22
4.5	Baustatische Modellierung	23
5	Verifikation der Finite Elemente Methode	24
5.1	Parameterstudie eines Plattenbalkens mit Schraubverbindung	24
5.1.1	Auswertungsreihen	25
5.1.2	Arbeitslinie	27
5.1.3	Baustatische Modellierung	28
5.1.4	Auswertung Schnittgrößen	30
5.1.5	Auswertung der Berechnungsmethoden	34
5.2	Vergleich mit experimentellen Forschungsergebnissen	40
5.2.1	Auswertungsreihen	41
5.2.2	Arbeitslinie	42
5.2.3	Baustatische Modellierung	44
5.2.4	Auswertung Schnittgrößen	46
5.2.5	Auswertung der Berechnungsmethoden	47
6	Anwendungsbeispiel der Finite Elemente Methode	52
6.1	Nachbildung von Versuchen	52
6.1.1	Auswertungsreihen	53

6.1.2	Arbeitslinie	56
6.1.3	Baustatische Modellierung	58
6.1.4	Auswertung Schnittgrößen	60
6.1.5	Auswertung Ergebnisse	65
7	Zusammenfassung und Ausblick	69
8	Anhang 1 - Parameterstudie eines Plattenbalkens mit Schraubverbindung	76
9	Anhang 2 - Vergleich mit experimentellen Forschungsergebnissen	99
10	Anhang 3 - Nachbildung von Versuchen	112

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Masterarbeit stellt einen Beitrag zum aktuellen Forschungsbereich des Instituts für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der Technischen Universität Wien im Bereich Holz-Holzleichtbeton-Verbundsysteme dar.

1.1 Forschungsfrage

Im Laufe der Zeit haben Holz-Beton-Verbundsysteme bei Sanierungen, wie auch bei Neubauten immer mehr an Bedeutung gewonnen. Aus diesem Grund wäre es wünschenswert, nicht nur mit den aktuellen Brechungsmethoden, die in den Normen verankert sind zu berechnen, sondern diese auch mittels der Finite Elemente Methode in passenden Modellen abbilden zu können. Dabei ist ein sehr großes Augenmerk auf die realitätsnahe Modellierung mit allen auftretenden Materialeigenschaften zu legen.

Derzeit wird bei den aktuell verwendeten Berechnungsmethoden das plastische Verhalten der Verbindungsmittel nicht berücksichtigt, was zu einer Verfälschung der Ergebnisse (unsichere Seite) führt. Diese Probleme und die optimalen Ausgangsparameter gilt es im Zuge dieser Arbeit zu erforschen und zu lösen.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit setzt sich mit einer Gegenüberstellung von der aktuellen Berechnungsmethoden für Holz-Beton-Verbundsysteme und einem FEM Modell mit punktueller Schraubenverbindung zwischen dem Betonobergurt und der Holzrippe auseinander. Dabei soll die Anordnung einer Zwischenschicht möglich sein. Aus den Erkenntnissen der Vergleiche und Schlussfolgerungen der Parameterstudien soll eine Empfehlung für die Bemessung von HBV Decken mit Schraubenverbindung bei Kurzzeittragverhalten mittels numerischer Beschreibung gegeben werden.

Weiters soll eine Methode gefunden werden, um Versuche realitätsnahe nachzubilden zu können und Vorhersagen über Verschiebungen, Schnittgrößen und benötigte Verbindungsmittel und deren Anordnungen treffen zu können.

Kapitel 2

Berechnungsmethoden

Das folgenden Kapitel befasst sich mit einigen Berechnungsmöglichkeiten von Holz-Beton Verbunddecken. Diese werden in einem kurzen Kommentar beschrieben, dabei werden die Berechnungsgrundlagen, Vor- und Nachteile, sowie mögliche Anwendungsgrenzen zum Thema gemacht. Bei allen beschriebenen Methoden handelt sich um die Berechnung von nachgiebig miteinander verbundenen Querschnitten.

2.1 Gamma - Verfahren

Beim Gamma-Verfahren handelt es sich um einen vereinfachten Nachweis für nachgiebig miteinander verbundene Biegestäbe. Dieser ist nach **ÖNORM B 1995-1-1 Anhang B** [10] zu berechnen. Dabei setzt das Verfahren einen konstanten und kontinuierlichen Verbund der Teilquerschnitte voraus. Diese Annahme entspricht aber nicht immer der Realität. Wenn es sich um eine vollflächig verklebte Fuge handelt, werden die geforderten Eigenschaften bestens erfüllt. Im Gegensatz dazu kann bei punktuellen Verbindungen, wie Schrauben oder Kerven von keinem kontinuierlichen Verbund ausgegangen werden. Daher wurde für diese Verbindungen der effektive Verbindungsmittelabstand eingeführt, welcher die Kervensysteme und die punktuellen Verschraubungen nachbilden soll. Wenn dieser Grenzwert der Verbindungsmittelabstände eingehalten ist, ist es möglich, auch Schraubverbindungen zu berechnen. [15]

2.1.1 Schmid Schrauben - Berechnungsprogramm

Das Berechnungsprogramm ist ident mit der Berechnung nach dem Gamma-Verfahren ÖNORM B 1995-1-1 Anhang B [10]. Die Kommentierung kann dem Punkt 2.1 Gamma - Verfahren entnommen werden.

2.2 Schubanalogie - Verfahren

Das Schubanalogie-Verfahren wird nach der **DIN EN 1995-1/NA NCI NA.5.6.3** [4] berechnet. Hierbei werden zwei fiktiven Trägern (Träger A und Träger B) Ersatzsteifigkeiten zugewiesen. Dabei ist es möglich, die Ersatzschubsteifigkeit nur in bestimmten Bereichen dem Träger B zuzuordnen, um mögliche lokale Verbindungen wie Kervensysteme nachbilden zu können. In den Bereichen zwischen den Verbindungsmitteln wird dann die Schubsteifigkeit auf Null gesetzt. Für die Berechnung wird bereits ein Finite Elemente Programm mit der Möglichkeit der Definition von Steifigkeiten für Querschnitte benötigt. Die daraus erhaltenen Schnittgrößen können nicht direkt verwendet werden, sondern müssen zuvor mit den Ersatzsteifigkeiten umgerechnet werden. [6] [15]

2.3 Stabwerksmodell

Das Stabwerksmodell wurde im Zuge des Forschungsprojektes „Baupraktische Dimensionierung von Holz-Beton Verbunddecken“ [14] entwickelt. Bei Stabwerksmodellen ist es bereits möglich, die Verbindungsmittel in ihrer realen Lage abzubilden. Daher ist es besonders dafür geeignet, um die Verbindung von diskreten Punkten darzustellen oder einen sehr großen Abstand zwischen den Verbindungsmitteln nachzubilden. Die daraus resultierenden Schnittgrößen können direkt den Ergebnissen der Finite Elemente Berechnung entnommen werden. [14]

2.4 Vierendeelträger - Kraftgrößenverfahren

Das "Vierendeelträger-Kraftgrößenverfahren" ist ein in der Forschungsarbeit *Näherungsverfahren zur Berechnung allgemeiner zusammengesetzter hölzerner Biegeträger mit elastischem Verbund* [9] beschriebenes Verfahren, welches die kontinuierlich nachgiebig miteinander verbundenen Teilquerschnitte in einzelne Schubfelder unterteilt. Danach wird das System des Vierendeelträgers nach dem Kraftgrößenverfahren berechnet, wobei die Schubkräfte als statisch unbestimmt angesehen werden. Diese Methode hat die gleichen Annahmen und die daraus resultierenden Einschränkungen wie das Gamma-Verfahren, nämlich die einer konstanten kontinuierlichen Annahme der Verbindung. [9]

2.4.1 SFS - Berechnungsprogramm

Das SFS - Berechnungsprogramm ist ein von der Firma SFS intec AG entwickeltes Programm, welches das oben beschriebenen Vierendeelträger - Kraftgrößenverfahren anwendet.

2.5 Numerische Beschreibung - Finite Elemente Methode

Bei dieser Methode handelt sich um eine Finite Elemente Berechnung, welche sich der Funktion von Arbeitslinien [7] zur Abbildung des Verbindungsmittelverhaltens bedient. Die Verbindungen werden in ihrer realen Lage berücksichtigt. Daher ist diese Methode für jegliche Art der Verbindungen zu verwenden. Es gibt keine Einschränkungen bezüglich des Verbindungsmittelabstandes, der Anzahl der Verbindungen, der konzentrierten Anordnung oder der punktuellen Anordnung. Diese Methode ist besonders für Kerven- und Schraubensysteme geeignet, da hier der reale Schnittgrößenverlauf direkt dem Finite Elemente Berechnungsprogramm entnommen werden kann.

Für die Berechnung werden die **Last-Verschiebungsdiagramme (Arbeitslinie)** der Verbindungsmittel in Verbindung mit den in den Teilquerschnitten verwendeten Materialien benötigt. Wenn diese Diagramme für die Beanspruchung in Längs- und Querrichtung des Verbindungsmittels bekannt sind, können jegliche statische Systeme (Einfeld-, Mehrfeld- oder Kragträger) berechnet werden.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich bei verklebten Verbindungen, die in der Diplomarbeit „Holz-Leichtbeton-Verbunddecken analytische und numerische Beschreibung des Tragverhaltens“ [2] durch die Verwendung des Moduls RF-Laminat aus RFEM5 [8] beschrieben werden, besser eignet. Da hier ein kontinuierlicher Verbund mit angepassten Schubmodul G einer Schicht verschmiert über die gesamte Länge angenommen wurde. Eine genauere Beschreibung des Modells kann in Kapitel 4 Anwendung der Finite Elemente Methode nachgelesen werden.

Kapitel 3

Grundlagen der Finite Elemente Methode

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Finite Elemente Methode beschrieben, um diese auch Anwenden zu können. Dabei werden die wichtigsten Punkte am aktuellen Stand der Forschung beschrieben und erläutert.

3.1 Konzept der Finite Elemente Methode [1]

Im Folgenden wird kurz auf die Grundlagen der numerischen Beschreibung des Tragverhaltens mittels der Finite Elemente Methode eingegangen. Dabei wird näher das verwendete Stabsystem beschrieben.

Das Konzept der Finite Elemente Methode beruht auf der Grundlage des Weggrößenverfahrens (Deformationsverfahren, Verschiebungsgrößenverfahren). Dabei wird von unbekanntem Verschiebungen und Verdrehungen ausgegangen. [1]

Im Rahmen der FEM Berechnung werden unendlich viele kleine Materialelemente gebildet, welche das reale Tragwerk mit endlich vielen Teilelementen, denen ein Material- und Knotenpunktverhalten hinterlegt ist, nachgebildet. Durch diese Zerlegung und mechanische Beschreibung der Elemente entsteht ein endliches lösbares Gleichungssystem, welches vom Computer berechnet werden kann. [1]

Bei der Finite Elemente Berechnung werden folgende Leitgedanken durchlaufen (siehe Abbildung 3.1): [1]

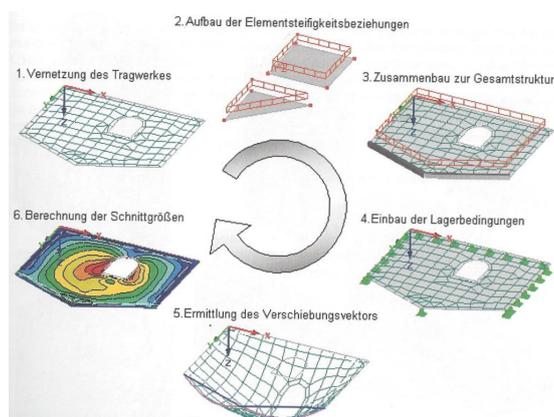


Abb. 3.1: Schematischer Ablauf einer FEM-Berechnung [1]

1. Einteilung des Tragwerkes in endliche Finite Elemente durch Generierung eines Elementnetzes

2. Beschreibung der mechanischen Eigenschaften des Einzelementes an den Knotenpunkten, einschließlich der Diskretisierung der Elementbelastungen \Rightarrow Das Ergebnis ist die Steifigkeitsbeziehung des Einzelementes
3. Zusammensetzung der einzelnen Elemente zur Gesamtstruktur unter Wahrung der kinematischen Verträglichkeitsbedingungen und der statischen Gleichgewichtsbedingungen sowie Generierung des Gesamtbelastungsvektors \Rightarrow Das Ergebnis ist die Steifigkeitsbeziehung des Gesamtbelastungsvektors
4. Einbau der Lagerungsbedingungen
5. Lösen des Gleichungssystems \Rightarrow Ermittlung des Verschiebungsvektors
6. Rückrechnung auf das Einzelement und Ermittlung der Schnittgrößen

Für die Beschreibung des Tragverhaltens wird das numerische Modell des eindimensionalen Stabelements gewählt. Diese Stabwerke liefern im Sinne der analytischen Lösung der Kontinuumsmechanik eine genaue Lösung im Vergleich zu den Berechnungen bei Flächen- und Volumenelementen. [1]

Ein Stabelement als 2D-System hat folgenden Freiheitsgrade: [1]

- Verschiebung: v_z
- Verdrehung: Φ_x und Φ_y

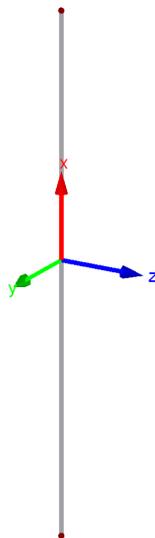


Abb. 3.2: Koordinatensystem des Stabelementes

3.2 Nachgiebige Verbindungen - Arbeitslinie

Um die Finite Elemente Methode anwenden zu können, widmet sich dieser Abschnitt der Nachbildung des Last-Verformungsverhaltens einer Verbindung mittels Arbeitslinien. Diese bilden die Nachgiebigkeit der Verbindungen nach und sind je nach Verbindungsmittel und verwendetem Material unterschiedlich. In Abbildung 3.3 ist ein Beispiel einer Last-Verschiebungskurve, welche aus Versuchen ermittelt wurde, zu sehen. Hierbei ist zu erkennen, dass, je steifer eine Verbindung sich verhält, umso steiler ist die Gerade im elastischen Bereich bis die Kurve abzufachen beginnt. [7]

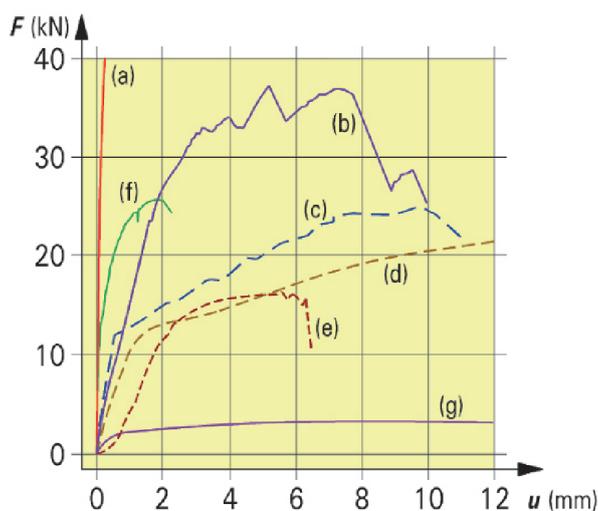


Abb. 3.3: Beispiel Last-Verschiebungskurve [7]

Zuordnung der Kurven aus Abbildung 3.3:

- a) geklebte Verbindung ($12,5 \cdot 103 \text{ mm}^2$)
- b) Einlassdübel ($\varnothing 100 \text{ mm}$)
- c) zweiseitiger Einpressdübel ($\varnothing 62 \text{ mm}$)
- d) Stabdübel ($\varnothing 14 \text{ mm}$)
- e) Bolzen ($\varnothing 14 \text{ mm}$)
- f) Nagelplatte (104 mm^2)
- g) Nägel ($\varnothing 4,4 \text{ mm}$)

Die aus diesen Versuchen gewonnene Ergebnisse werden ausgewertet und das sogenannte **Anfangsverschiebungsmodul** K_{ser} bestimmt. Mit diesem Modul wird die Anfangssteigung der Last-Verschiebungsfunktion für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit beschrieben. Nach der Überschreitung der elastischen Grenze kommt es zu einer beginnenden plastischen Deformation, welche sich bis zur Erreichung der Festigkeitsgrenze des Verbindungsmittels ausbildet. Nach dem Erreichen der Festigkeitsgrenze bildet sich bei duktilem Verhalten der Verbindung ein plastisches Plateau aus, welches bei gleichbleibender Krafteinwirkung zu einer Verschiebung führt. Andererseits kommt es bei sprödem Bruchverhalten nach Erreichen

der Festigkeitsgrenze, zu einem Abreißen der Verbindung und zu schlagartigem Versagen. Diese beschriebenen Bereiche einer Arbeitslinie können der Abbildung 3.4 entnommen werden. [7]

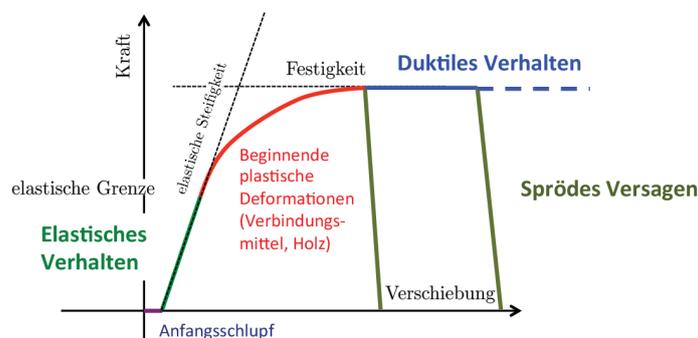


Abb. 3.4: Bereiche einer Arbeitslinie [7]

Für die baustatische Modellierung ist es sinnvoll, für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit nur eine Arbeitslinie zu hinterlegen. Dies führt zur Vermeidung von Rechen- und Arbeitsaufwand. Daher werden die Steigungen von K_{ser} und K_u in einem Diagramm (siehe Abbildung 3.6) berücksichtigt. Die dafür benötigten Parameter können entweder aus einer entsprechenden Norm, Zulassung oder aus Versuchen ermittelt werden. Dabei werden für die Arbeitslinien folgende Parameter benötigt. [7]

- Anfangsschlupf $u_{Schlupf}$
- Anfangsverschiebungsmodul für Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit K_{ser}
- Anfangsverschiebungsmodul für Grenzzustand der Tragfähigkeit K_u
- Widerstand Verbindungsmittel (Abscher- oder Auszieh Widerstand) F_{rk}

Der benötigte K_u – Wert wird wie in Formel 3.2 dargestellt nach ÖNORM B 1995-1-1 Formel (2.1) berechnet.

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (3.1)$$

Je nach Beanspruchung verhält sich eine Verbindung wie eine Weg- oder Drehfeder. Wenn es zu einer Normal- oder Querkraftbeanspruchung kommt wird angenommen, dass sich das Verbindungsmittel wie eine Weg- oder Dehnfeder verhält. Kommt es jedoch zu einer Momentenbeanspruchung im Verbindungsmittel bildet sich eine Drehfeder aus. Diese zwei unterschiedlichen Systeme sind in der Abbildungen 3.5 zu sehen. [7]

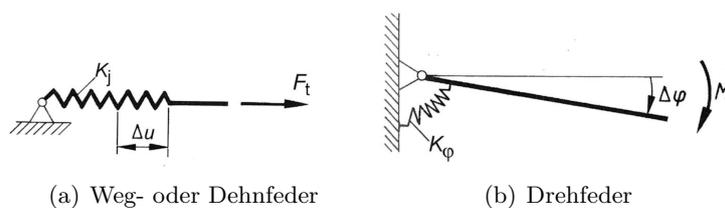


Abb. 3.5: Modellbildung Verbindung [7]

Die Arbeitslinie für eine Normal- oder Querkraftbeanspruchung wird wie in Abbildung 3.6 beschrieben gebildet.

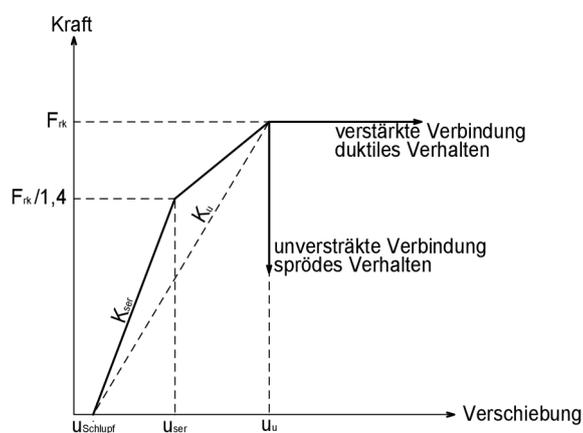


Abb. 3.6: Bildung einer Arbeitslinie für Finite Elemente Programm

In Abbildung 3.7 ist die mechanische Wirkung auf ein ± 45 deg geneigtes Schraubenpaar zu sehen. Dabei ist sehr gut zu erkennen, dass sich die in der Fugen wirkenden Scherkräfte in diesem Fall auf Zug- und Druckkräfte in den Schrauben aufteilen.

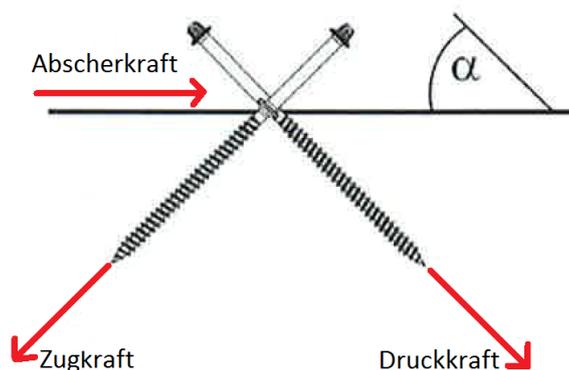


Abb. 3.7: Mechanisches Modell zur Beschreibung der Schubkraftübertragung

3.3 Quertragungswirkung - mitwirkende Breite

Im Nachfolgenden wird auf die Berechnung der mitwirkenden Breite eingegangen, da im Zuge dieser Arbeit eine Parameterstudie über die Berücksichtigung der Gurtbreite (Betonquerschnitt) durchgeführt wird. Die mitwirkende Plattenbreite eines Plattenbalkens wird laut ÖNORM EN 1992-1-1 5.3.2.1 folgendermaßen ermittelt. Bei den Berechnungen des Gamma-Verfahrens wurde jeweils mit der effektiven Breite $b_{eff} = b_{Beton}$ gerechnet.

Bei Plattenbalken hängt die mitwirkende Plattenbreite, für die eine konstante Spannung angenommen werden darf, von den Gurt- und Stegabmessungen, von der Art der Belastung, der Stützweite, den Auflagerbedingungen und der Querbewehrung ab. [11]

Der Abstand l_0 zwischen den Momentennullpunkten kann der Abbildung 3.8 entnommen werden.

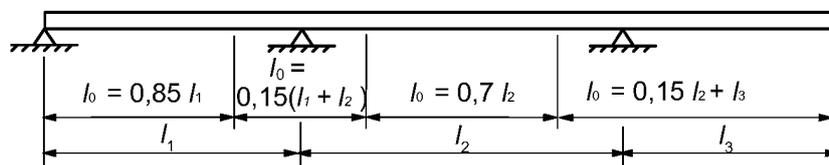


Abb. 3.8: Definition von l_0 zur Berechnung der mitwirkenden Breite [11]

Die effektive mitwirkende Plattenbreite b_{eff} wird wie folgt berechnet: [11]

$$b_{eff,i} = 0,2 \cdot b_i + 0,1 \cdot l_0 \leq 0,2 \cdot l_0 \text{ und } b_{eff,i} \leq b_i \quad (3.2)$$

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b = b_{Beton} \quad (3.3)$$

Im Zug der Auswertungsreihen wurde die mitwirkende Plattenbreite mit der Breite des Betonquerschnittes b_{Beton} verglichen und eine Parameterstudie (siehe Punkt 5.1) über die Auswirkung einer Überschreitung von b_{eff} durchgeführt.

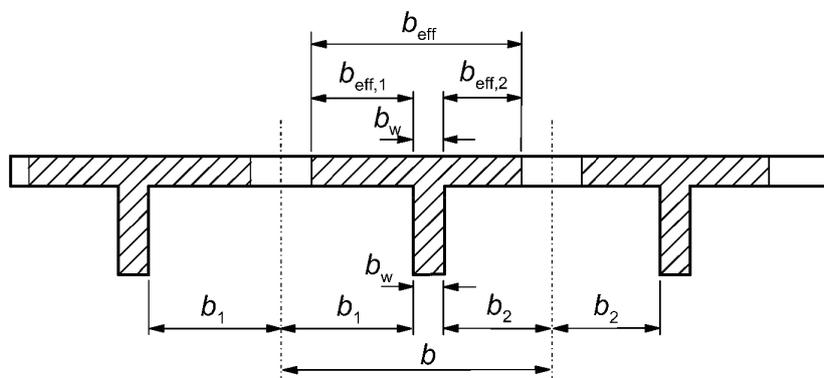


Abb. 3.9: Parameter der mitwirkenden Plattenbreite

3.4 Kurz- und Langzeitverhalten

Diese Abschnitt beschreibt den aktuellen Forschungsstand des Kurz- und Langzeitverhaltens von Holz-Beton-Verbundsystemen. Die Bemessung basiert derzeit auf Grundlage von aktuellen Zulassungen in Verbindung mit den Normen (ÖNORM, DIN). Diese fordern aufgrund des unterschiedlichen Kriech- und Schwindverhaltens von Beton und Holz eine genaue Untersuchung zum Zeitpunkt $t = 0$ (Kurzzeitverhalten) und $t = \infty$ (Langzeitverhalten), da es zu einer Änderung der Steifigkeitsverhältnisse kommt.

Das Kriechen wird durch Abminderung des Elastizitätsmoduls der Querschnitte Holz und Beton erfasst. Wobei beim Holzquerschnitt das Elastizitätsmodul durch $(1 + k_{def})$ dividiert wird. Hingegen beim Betonquerschnitt erfolgt eine Division durch den Wert 3.5. Bei Schraubverbindungen ist das Anfangsverschiebungsmodul um ein Drittel abzumindern. [15]

Tab. 3.1: Zusammenfassung der Materialkennwerte [15]

Bauteil	Grenzzustand	Zeitpunkt t=0	Zeitpunkt $t = \infty$
Holz	ULS, SLS	$E_{0,mean}$	$E_{0,mean}/(1 + k_{def})$
Beton	ULS, SLS	$E_{c,0}$	$E_{c,0}/3.5$
Verbindungsmittel	ULS	K_{ser}	$2/3 \cdot K_{ser}$
Verbindungsmittel	SLS	$2/3 \cdot K_u$	$4/9 \cdot K_u$

Die in Tabelle 3.1 angegebenen Werte der Verbindungsmittel beziehen sich auf Schraubverbindungen.

In der vorliegenden Arbeit wird nur das **Kurzzeitverhalten** mit $t=0$ betrachtet, da es bei der Berücksichtigung lediglich zu einer Abminderung der Steifigkeiten kommt und zur Verifikation ausschließlich Kurzzeitversuche zur Verfügung stehen. Die Steifigkeiten $E_{0,mean}$, $E_{c,0}$ und K_{ser} werden laut Tabelle 3.1 abgemindert. Diese Abminderung erfolgt beim Gamma-Verfahren wie auch bei der Finite Elemente Methode gleich. Dadurch sind alle im Folgenden durchgeführten Berechnungen auch auf das **Langzeitverhalten** anzuwenden.

Kapitel 4

Anwendung der Finite Elemente Methode

Für die Anwendung der Finite Elemente Methode und der Modellierung des nachgiebigen Verbundes der Teilquerschnitte wird ein Finite Elemente Programm wie zum Beispiel RFEM 5 [8] verwendet. Für die **baustatische Modellbildung** werden als Elemente **Stäbe** gewählt, um die resultierenden Schnittgrößen optimal ablesen und mit den anderen Methoden besser vergleichen zu können. Dabei erfolgt die Berücksichtigung der nachgiebigen Verbindung zwischen den Querschnitten mittels **Arbeitslinien**, welche das Last-Verformungsverhalten von Verbindungsmittel nachbilden. Weiters werden die Teilquerschnitte mit ihren realen Abmessungen und unter Einhaltung von Abständen durch Zwischenschichten modelliert. Als Ergebnis der Berechnung erhält man die Schnittgrößen der Stäbe ($N, V_z, M_y, \sigma_x, \tau_z$), welche entsprechend den Anforderungen ausgewertet werden können.

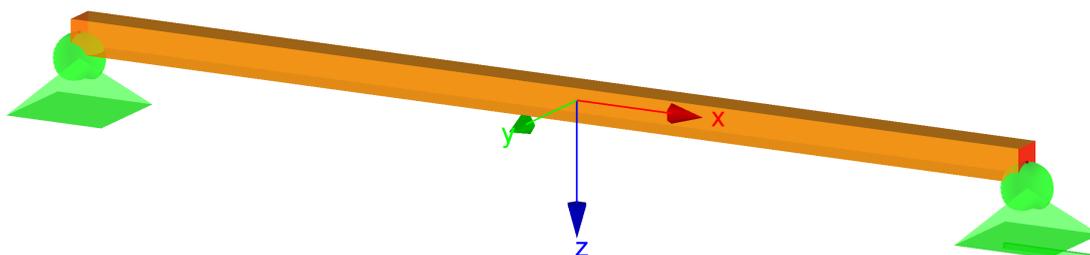


Abb. 4.1: Koordinatensystem - Stab

Welche **Merkmale, Vor- und Nachteile** bringt die baustatische Modellierung mittels Finite Elemente Software des vorhandenen HBV - Querschnittes als Stabsystem mit nachgiebigem Verbund. Das Modell bedient sich der Methode eines Stabsystem-Modells, bei welchem es möglich ist die Gurtstäbe aus unterschiedlichen Materialien (z.B.: Holz und Beton) zu definieren. Dabei können die variable Gurtbreite beziehungsweise Einschnürungen berücksichtigt werden. Als Folge der Zusammensetzung des Querschnittes aus unterschiedlichen Materialien, kommt es schließlich zu differierenden Materialverhalten, wie unterschiedliches Kriechverhalten und der Ausfall unter Zug des Betonquerschnittes. [7]

Die **Kopplung der einzelnen Querschnittsteile** wird durch starre Stäbe realisiert. Wenn von starren Stäben gesprochen wird, werden Stäbe zur Modellierung von Exzentrizitäten infolge Lasteinleitung, Sprünge in der Stabachse oder die Nachbildung von nachgiebigen Verbindungsmittel gemeint. Hierbei kann die Wahl in FEM Programmen zwischen dem Typ "starrer Stab" und dem "gewichtlosen Stahlquerschnitt" getroffen werden. In den folgenden Punkten 4.1 und 4.2 werden die zwei unterschiedlichen Stabtypen genauer beschrieben. Beide Varianten bieten die Möglichkeit einer definierten Schrägstellung des Verbindungsmittels, um mögliche resultierende Abtriebskräfte zu erhalten. Die ist besonders bei Kernen mit eingesetzten Stahlteilen von Vorteil. [7]

4.1 Starr-Stab

Bei diesem Stabtyp wird von einem Koppelstab gesprochen, welcher zwei Knoten starr miteinander verbindet. Dabei wird ein Stab mit hoher Steifigkeit verwendet und die Möglichkeit der Einstellung von Gelenken mit Federkonstanten und Nichtlinearitäten bietet. Diese Stäbe habe systemintern folgenden Definitionen: [8]

- Längs- und Torsionssteifigkeit (l =Stablänge): $E \cdot A = G \cdot I_T = 10^{13} \cdot l$
- Biegesteifigkeit: $E \cdot I = 10^{13} \cdot l^3$
- Schubsteifigkeit (falls aktiviert): $G_{Ay} = G_{Az} = 10^{16} \cdot l^3$

Die oben genannten Einstellungen führen zu numerischen Instabilitäten aufgrund der großen Differenzen der Steifigkeiten. Im Handbuch von RFEM 5 [8] wird auf das Problem hingewiesen. [8]

Es treten kaum numerische Probleme auf, da die Steifigkeiten dem System angepasst sind. [8]

4.2 Gewichtsloser Stahlquerschnitt

Bei gewichtslosen Stahlquerschnitten handelt es sich um Stäbe mit der Materialdefinition von Stahl ohne Wichte. Dabei werden im Vergleich zu den Holzquerschnitten sehr große Abmessungen gewählt. Ein Stahlquerschnitt ist, wie in Tabelle 4.1 zu sehen, definiert. Diese weisen folgende Vorteile auf: [7]

- beliebige Stabendgelenke möglich (Federkonstanten und Nichtlinearitäten)
- Schnittgrößen direkt ablesbar
- optische Gruppierung möglich
- keine numerischen Probleme

Tab. 4.1: Materialdefinition eines gewichtslosen Stahlquerschnitt

Elastizitätsmodul	21000 kN/cm ²
Schubmodul	8100 kN/cm ²
Querdehnzahl	0,296
Spezifisches Gewicht	0,0 kN/cm ³
Wärmedehnzahl	0,0 1/°C
Teilsicherheitsbeiwert	1,0

Aufgrund der oben genannten Vorteile, aber besonders wegen der ablesbaren Schnittgrößen und der nicht auftretenden numerischen Probleme bezüglich der Steifigkeiten, habe ich mich für den "gewichtslosen Stahlquerschnitt" entschieden.

4.3 Stabendgelenk

Um die Nachgiebigkeit einer Verbindung nachbilden zu können, werden die unter Punkt 3.2 beschriebenen Arbeitslinien verwendet. Die Berücksichtigung erfolgt daher mit der richtigen Definition des Stabendgelenkes. [8]

Stabendgelenke können nur an den Stabenden zugewiesen werden. Dadurch kommt es zu einer Beschränkung der Schnittgrößen, welche von einem Stabende auf das andere übertragen werden. Ein Gelenk kann folgende Definitionen berücksichtigen: [8]

- Axial- und Quergelenk
- Momentengelenk
- Federsteifigkeiten in jede Richtung
- Nichtlinearitäten (teilweise Wirkung, plastische Gelenke, Diagramme, usw.)

Für die Modellierung der nachgiebigen Verbindung werden physikalische Nichtlinearitäten in Form von Diagrammen (Arbeitslinien) benötigt. Eine beispielhafte Definition eines Diagramms kann der Abbildung 4.2 entnommen werden. In dieser ist zu sehen, dass der Verlauf nach dem letzten Schritt gewählt werden kann. Bei dieser Auswahl ist Folgendes zu beachten: [7]

- Reißen - sprödes Verhalten der Verbindung
- Fließen - duktils Verhalten der Verbindung
- Fortlaufend - Steigung der letzten Gerade wird beibehalten
- Anschlag - keine Verschiebung trotz steigender Kraft mehr

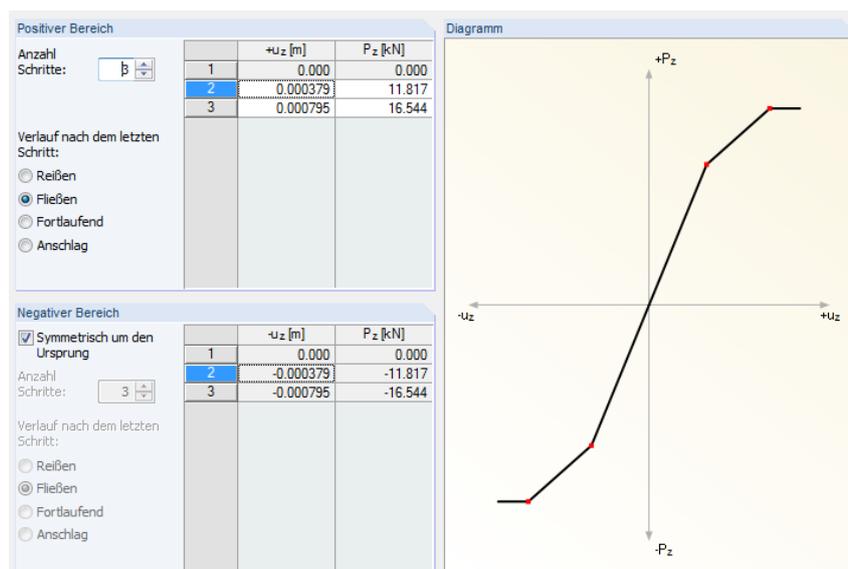


Abb. 4.2: Nichtlinearitäten - Diagramm [8]

4.4 Berechnungsparameter

Als **Berechnungsart** aller Modelle wurde die Theorie erster Ordnung gewählt, welche das Gleichgewicht am unverformten System bildet. Die Wahl beruht auf der Erkenntnis, dass es bei dem vorhandenen statischen System zu keinem Stabilitätsproblem (Durchschlag-, Verzweigungsprobleme) kommt und eine eindeutige Gleichgewichtslage in stabiler Form vorliegt. Weiters kommt es zu keiner Druckkrafteinleitung in Richtung der Stabachse. [8]

Für die **Lösung nichtlinearer Gleichungen** wurde das Newton-Raphson Verfahren gewählt.

Dabei wird das nichtlineare Gleichungssystem numerisch über iterative Näherungen mit Tangenten gelöst. Die tangentielle Steifigkeitsmatrix ermittelt sich als Funktion des aktuellen Verformungszustands; sie wird in jedem Iterationszyklus invertiert. Mit dieser Methode wird in den meisten Fällen eine schnelle (quadratische) Konvergenz erreicht. [8]

Bezüglich der Option zur Berücksichtigung von **Steifigkeitsbeiwerten** ist zu beachten, dass diese für die Materialien (Teilsicherheitsbeiwert γ_M) zu deaktivieren ist. Diese würde bei Aktivierung die Materialkennwerte abmindern und zu verfälschten Vergleichsergebnissen führen. Diese Option wird grundsätzlich für die Berechnung mit Theorie zweiter Ordnung zur Zuordnung von Unsicherheiten wie das nicht berücksichtigte Kriechverhalten bei Theorie zweiter Ordnung verwendet.

Die Einstellungen der Berechnungsparameter kann Tabelle unten entnommen werden.

Tab. 4.2: Berechnungsparameter für FEM Programm

Berechnungsart	Theorie 1. Ordnung
Lösungsmethode für das System	Newton-Raphson
Steifigkeitsbeiwerte	keine Aktivierung der Teilsicherheitsbeiwerte für Materialien

4.5 Baustatische Modellierung

Die Modellierung des Systems erfolgt in zweidimensionaler Form in der XZ-Ebene. In Abbildung 4.3 ist ein Beispiel eines modellierten HBV-Systems zu sehen.

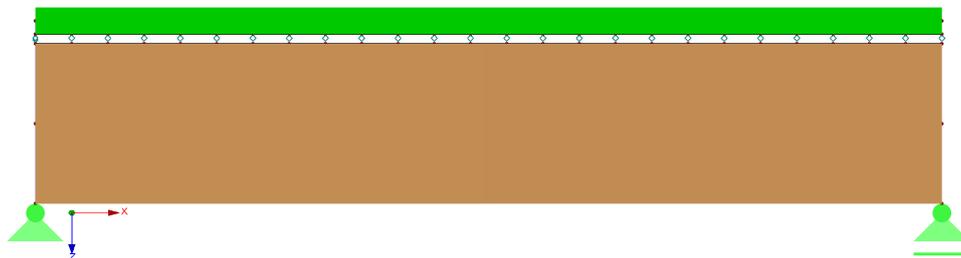


Abb. 4.3: Beispielmodell mit Zwischenschicht

Dabei werden für die Modellierung des Holz-Betonverbundquerschnittes folgende Daten benötigt:

- statisches System
- geometrische Eigenschaften (Abmessungen, Querschnitte)
- Materialkennwerte (Holz, Beton, Zwischenschicht, Verbindungsmittel)
- Belastungen (Eigengewicht, Nutzlast)
- Arbeitslinien Diagramm (Last-Verformungsverhalten der Verbindung)

Nachdem alle benötigten Daten gesammelt wurden, kann das statische System, wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist, modelliert werden. Eine genaue Definition der Bauteile und Material der durchgeführten Berechnungsvergleiche ist den entsprechenden Abschnitten zu entnehmen.

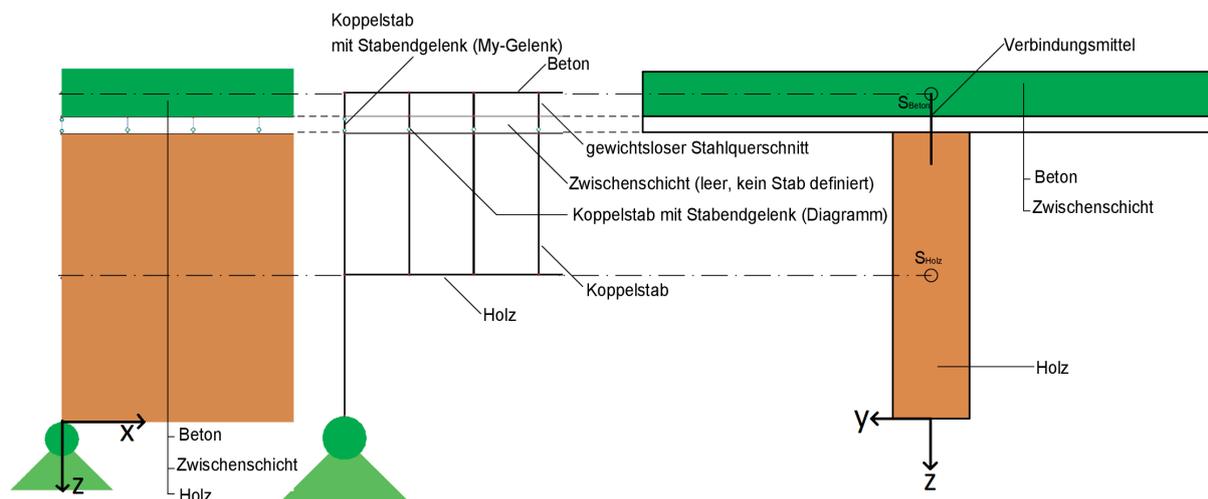


Abb. 4.4: Zusammensetzung Modellierung

Die Anordnung des Stabengelenkes an der Unter- oder Oberseite der Zwischenschicht führt zu einer vernachlässigbaren Abweichung der Verformung (u_z) in z-Richtung um $\pm 0.05\%$. In den hier behandelten Modellen wurde die Anordnung an der Unterseite der Zwischenschicht gewählt. Falls keine Zwischenschicht vorhanden ist, wird der Abstand zwischen Beton und Holz auf Null gesetzt und das Stabengelenk am Koppelstab zwischen Holz und Verbundfuge definiert.

Kapitel 5

Verifikation der Finite Elemente Methode

Im Folgenden Kapitel wird eine Verifikation der Finite Elemente Methode mittels einer Parameterstudie und einem Vergleich von experimentellen Forschungsergebnissen durchgeführt. Hierbei wird die Abweichung der vorhandenen Berechnungsmethoden (siehe Kapitel 2) von den Ergebnissen mittels der Finite Elemente Methode untersucht, um Empfehlungen für die Bemessung in der Praxis abgeben zu können. Die aus der Parameterstudie gewonnenen Erkenntnisse werden im Anschluss für den Vergleich mit experimentellen Ergebnissen herangezogen. Dabei werden die zuvor gewonnenen optimalen Parameter eingesetzt, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen.

5.1 Parameterstudie eines Plattenbalkens mit Schraubverbindung

In diesem Abschnitt erfolgt eine Parameterstudie mittels der Berechnung mit verschiedenen Methoden (Gamma Verfahren, Schubanalogieverfahren, HBV-Programm, Stabwerksmodell), welche unter Kapitel 2 Berechnungsmethoden kurz beschrieben wurden. Dabei wird das Holz-Beton-Verbundsystem der Firma Ancon Building Products GesmbH verwendet. Besonders hervorzuheben sind in diesem Kapitel die Abweichungen der Berechnungsmethoden untereinander und im Speziellen zum FEM Modell unter Verwendung von Arbeitslinien.

Das Ziel dieser Parameterstudie ist es, die Finite Elemente Methode unter den aktuell verwendeten Berechnungsmethoden (siehe Punkt 2) einordnen zu können und eine Vorstellung der Einflussparameter sowie der daraus resultierenden Abweichungen zu bekommen.

Auch ist anzumerken, dass sich alle Berechnungen und Vergleiche im Grenzzustand der Tragfähigkeit wie auch der Gebrauchstauglichkeit auf das Kurzzeittragverhalten (Zeitpunkt $t=0$) beziehen.

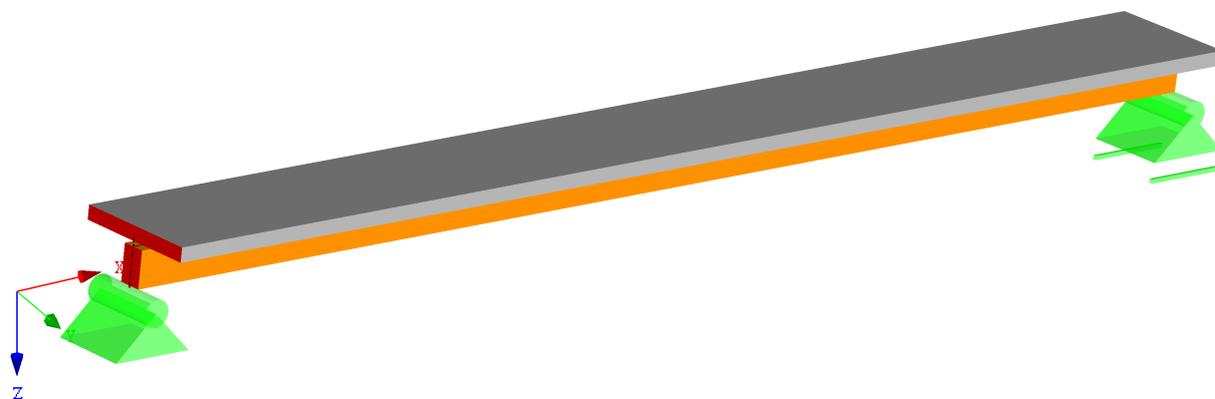


Abb. 5.1: Plattenbalken-Modell

5.1.1 Auswertungsreihen

Im Zuge der Auswertungsreihen wurden insgesamt 20 verschiedene Berechnungen zur Ermittlung der Abweichung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden im Vergleich zu einem RFEM Modell unter Verwendung von Arbeitslinien durchgeführt. Der folgenden Abschnitt beschreibt die einzelnen Auswertungsaufbauten näher.

Tab. 5.1: Definition der Materialkennwerte

QS 1 (Beton)	Beton C20/25 nach EN 1992-1-1:2004/A1:2014
QS 2 (Holz)	Pappel und Nadelholz C24 nach ÖNORM EN 338:2009-12
$E_1 = E_{c,0}$	3000 kN/cm^2
$E_2 = E_{0,mean}$	1100 kN/cm^2

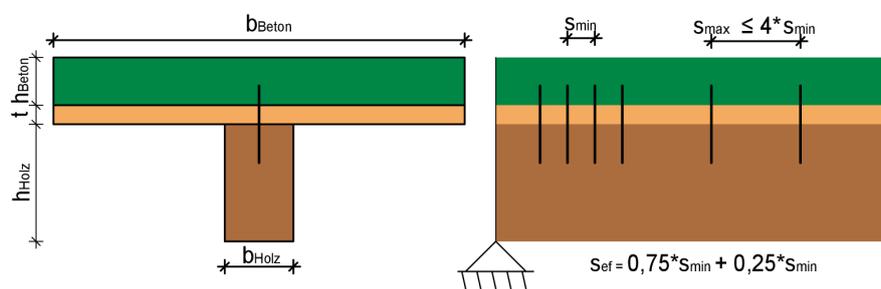


Abb. 5.2: Zuordnung der Variablen

Tab. 5.2: Definition der Variablen

h_{Holz}	Höhe Holzquerschnitt
b_{Holz}	Breite Holzquerschnitt
h_{Beton}	Höhe Betonquerschnitt
b_{Beton}	Breite Betonquerschnitt
t	Dicke der Zwischenschicht
s_{ef}	effektiver Verbindungsmittelabstand
s_{min}	minimaler Verbindungsmittelabstand
s_{max}	maximaler Verbindungsmittelabstand

SFS-01 bis SFS-02: In dieser Auswertungsreihe wurden die unter Punkt 2 kommentierten Berechnungsmethoden miteinander verglichen. Dabei wurde die mitwirkende Breite der Betonschicht variiert. Ergebnis dieser Auswertungen sind ein grober Überblick der auftretenden Abweichungen und dem Einfluss der Steifigkeit durch die mitwirkende Breite der Betonschicht.

Tab. 5.3: Auswertungsparameter SFS-01 bis SFS-02

Auswertung	$b_{Beton} \times h_{Beton}$ [cm]	$b_{Holz} \times h_{Holz}$ [cm]	t [cm]	s_{ef} [cm]
SFS-01	130 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-02	65 x 7	24 x 42	2.5	9.5

SFS-03 bis SFS-16: In dieser Auswertungsreihe wird die beste Annäherung zwischen dem Gamma Verfahren und dem RFEM Modell ermittelt. Dabei werden die Querschnittswerte der Materialien Beton und Holz, sowie der effektive Verbindungsmittelabstand variiert. Das Ziel dabei ist, den optimale Querschnitt für Vergleichsberechnungen und mögliche Auswirkungen und die daraus entstehenden unterschiedlichen Ergebnisse beurteilen zu können. Bei den Auswertungen SFS-03 bis SFS-07 wird die Breite des Betonquerschnittes variiert, um mögliche Steifigkeitseinflüsse der mitwirkenden Breite zu untersuchen. Ab SFS-08 bis SFS-12 wird der Holzquerschnitt verändert, um Veränderungen je nach Ausnutzungsgrad (Annäherung an Grenzwert der elastischen Anfangsdurchbiegung $w_{inst} = l/300$ laut ÖNORM B 1995-1-1 Tabelle NA 7.2) zu beobachten. Schlussendlich wurde noch in Versuch SFS-13 bis SFS-16 die Einwirkung des effektiven Verbindungsmittelabstandes untersucht.

Tab. 5.4: Auswertungsparameter SFS-03 bis SFS-16

Auswertung	$b_{Beton} \times h_{Beton}$ [cm]	$b_{Holz} \times h_{Holz}$ [cm]	t [cm]	s_{ef} [cm]
SFS-03	24 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-04	44 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-05	65 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-06	98 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-07	130 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-08	65 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-09	65 x 7	20 x 30	2.5	9.5
SFS-10	65 x 7	14 x 24	2.5	9.5
SFS-11	65 x 7	12 x 18	2.5	9.5
SFS-12	65 x 7	12 x 16	2.5	9.5
SFS-13	65 x 7	14 x 24	2.5	9.5
SFS-14	65 x 7	14 x 24	2.5	19.0
SFS-15	65 x 7	12 x 18	2.5	9.5
SFS-16	65 x 7	12 x 18	2.5	19.0

SFS-17: Dieser Versuch verwendete einen Querschnittsaufbau, der die bestmögliche Annäherung der Ergebniswerte an das RFEM Modell gewährleistet. Dabei werden die aus den Versuchen SFS-03 bis SFS-16 ausgewerteten Ergebnisse verwendet, um den optimalen Querschnitt zu ermitteln.

Tab. 5.5: Auswertungsparameter SFS-17

Auswertung	$b_{Beton} \times h_{Beton}$ [cm]	$b_{Holz} \times h_{Holz}$ [cm]	t [cm]	s_{ef} [cm]
SFS-17	65 x 7	12 x 18	2.5	9.5

SFS-18 bis SFS-20 Bei dieser Auswertungsreihe handelt es sich um den Vergleich des Gamma Verfahrens mit dem RFEM Modell bei starrem Verbund ($\gamma = 1$).

Tab. 5.6: Auswertungsparameter SFS-18 bis SFS-20

Auswertung	$b_{\text{Beton}} \times h_{\text{Beton}}$ [cm]	$b_{\text{Holz}} \times h_{\text{Holz}}$ [cm]	t [cm]	s_{ef} [cm]
SFS-18	130 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-19	65 x 7	24 x 42	2.5	9.5
SFS-20	65 x 7	12 x 18	2.5	9.5

5.1.2 Arbeitslinie

Die Grundlage der vorliegenden Auswertung des RFEM Modells bildet die aus der Zulassung ETA-13/0699 [13] erstellte Arbeitslinie. Da es sich bei diesem statischen System um einen Einfeldträger handelt, werden die Verbindungsmittel nur auf Abscheren beansprucht. Daher wird nur eine Arbeitslinie für diese Richtung der Kraftbeanspruchung erstellt. Es werden die Schrauben SFS VB-48-7,5x165 verwendet, welche folgenden Kennwerte aufweisen (Werte aus Zulassung ETA-13/0699 [13]):

Tab. 5.7: Schraubenkennwerte aus Zulassung [13]

SFS Schraube	α	l_{ef}	K_{ser}	ρ_k	k_α	$F_{ax.\alpha.rk}$	F_{rk}
VB-48-7,5x165	+45°	130 mm	31.200 kN/mm	350 kg/m ³	1.414	11.7 kN	16.5 kN

Tab. 5.8: Definition der Variablen

α	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes
l_{ef}	Einschraubtiefe im Holzbauteil
k_α	Faktor zur Berücksichtigung der Schraubenanordnung
$F_{ax.\alpha.rk}$	charakteristischer Auszieh widerstand
F_{rk}	charakteristischer Abscherwiderstand je Schraubenpaar

Die genaue Berechnung der Arbeitslinie wie unter Punkt 3.2 Nachgiebige Verbindungen - Arbeitslinie beschrieben, kann dem Anhang entnommen werden. Die daraus resultierende Arbeitslinie ist unter Abbildung 5.3 zu sehen.

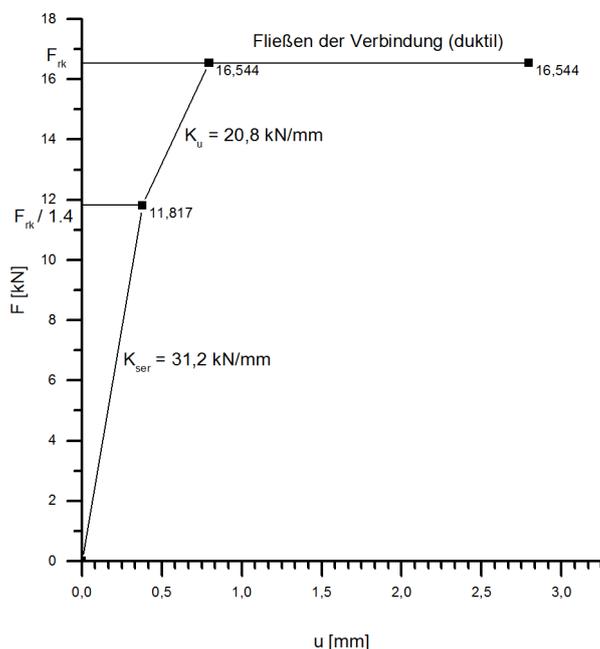


Abb. 5.3: Arbeitslinie SFS VB-48-7,5x165

5.1.3 Baustatische Modellierung

Bei dem baustatischen System (siehe Abbildung 5.7) handelt es sich um einen Einfeldträger mit einer Spannweite von 5.89 m. Dieser wird auf den Auflagern gelenkig gelagert. Es wurde für den Versuch eine HBV-Rippendecke mit einer 7 cm hohen Betonschicht, welche auf einer Zwischenschicht aus 2.5 cm Spanplatte aufgebracht ist, gewählt. Als Unterzug (Rippe) wurde ein Vollholz Rechteckquerschnitt laut Tabellen Auswertung gewählt. Der modellierte Querschnitt für den Versuch SFS-01 kann der Abbildung 5.5 entnommen werden.

Alle auftretenden Lasten wurden über die gesamte Trägerlänge als Gleichlast angesetzt (siehe Abbildung 5.4).

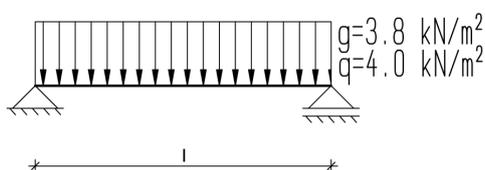


Abb. 5.4: statisches System und Lastansatz

Die benötigten Komponenten für das RFEM Modell können dem Punkt 4 Anwendung der Finite Elemente Methode entnommen werden.

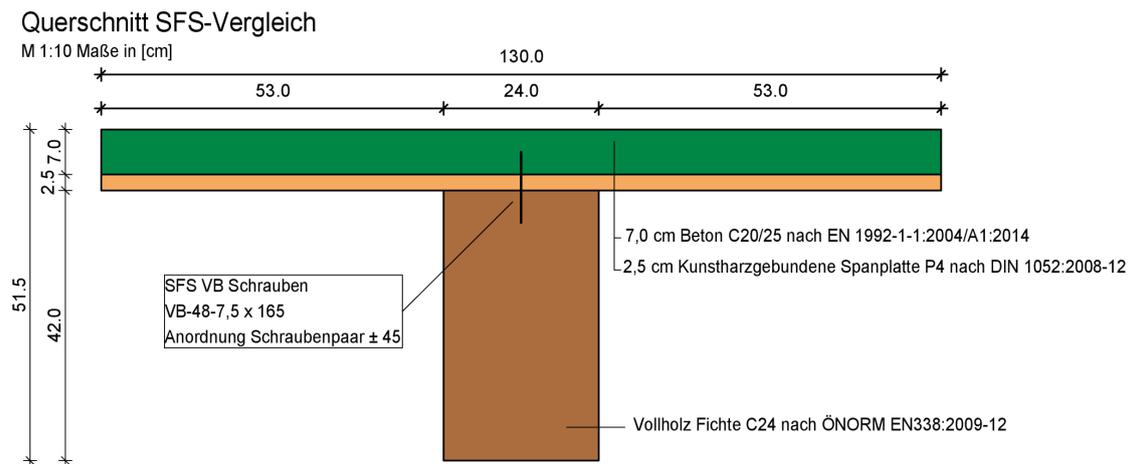


Abb. 5.5: Querschnitt SFS-01

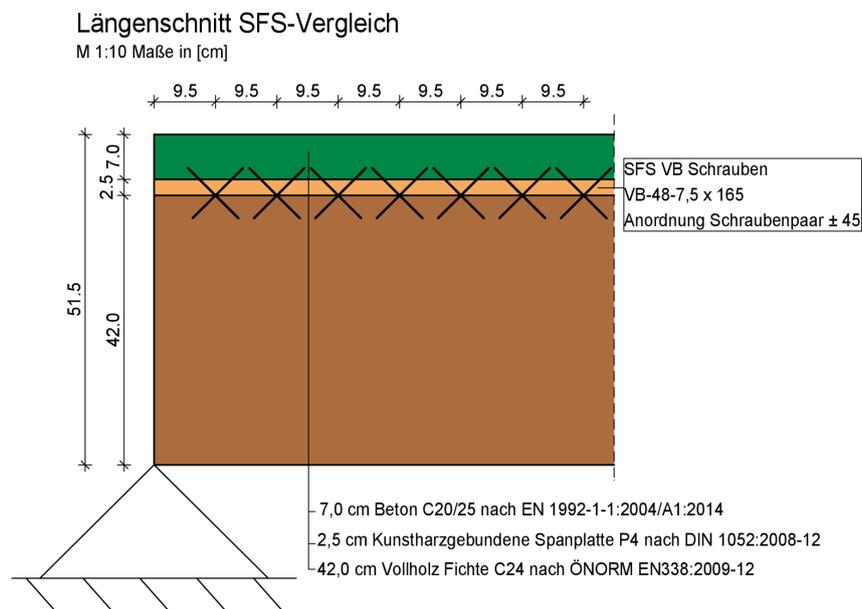


Abb. 5.6: Ausschnitt Schraubenanordnung SFS-01

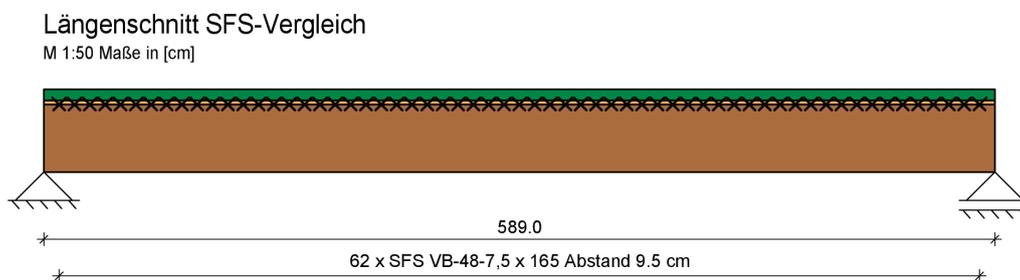


Abb. 5.7: Längenschnitt SFS-01

5.1.4 Auswertung Schnittgrößen

In diesem Abschnitt wird erklärt, wie und wo die Spannungen und Verschiebungen der Berechnungsmethoden am Beispiel des Aufbaus von SFS-17 gemessen und berechnet werden. In Abbildung 5.8 ist die Position der Spannungspunkte mit einem beispielhaften Verlauf im Querschnitt zu sehen.

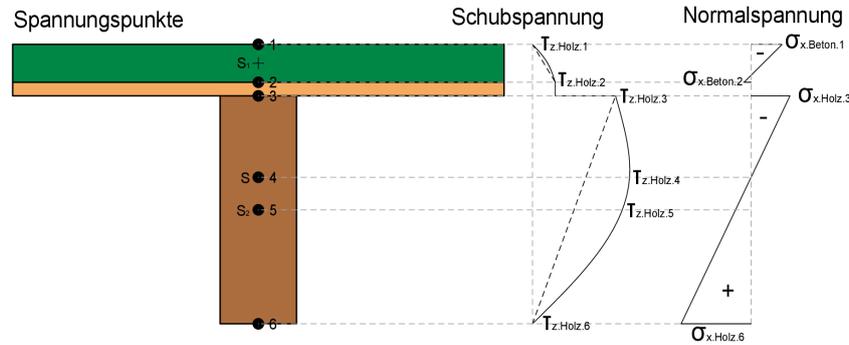


Abb. 5.8: Spannungspunkte im Querschnitt

Die Schubspannungen werden entweder in Punkt 4 oder 5 angegeben, dies geschieht aufgrund der unterschiedlichen Annahmen und Berechnung der Schubspannung je nach Methode. Dadurch erhält man den maximalen Wert und kann die Ergebnisse besser vergleichen. Zum Beispiel im RFEM Modell tritt die maximale Schubspannung in Punkt 5 auf, im Vergleich dazu beim Gamma Verfahren in Punkt 4.

Die auftretenden maximalen Normalspannungen befinden sich für den Betonquerschnitt in Punkt 1 und für den Holzquerschnitt in Punkt 6. Dabei kommt es im Betonquerschnitt zu einer maximalen Druckspannung in der obersten Faser des Querschnittes. Dagegen bildet sich im Holzquerschnitt die maximale Zugspannung in der untersten Faser.

Tab. 5.9: Definition der Spannungspunkte

Punkt	Schnittgröße
1	$\sigma_{x.Beton}$...max. Druckspannung
4	$\tau_{z.Holz}$...max. Schubspannung bei Gamma Verfahren
5	$\tau_{z.Holz}$...max. Schubspannung
6	$\sigma_{x.Holz}$...max. Zugspannung

Für die Auswertung werden die in der Tabelle oben angegebenen Schnittgrößen benötigt. Diese können direkt aus dem RFEM Modell abgelesen werden. In den Abbildungen 5.9 bis 5.10 sind beispielhaft die Schnittgrößenverläufe für den optimalen Querschnitt SFS-17 zu sehen.

In dieser Abbildung 5.9 ist der Normalspannungsverlauf $\sigma_{x.Beton}$ und $\sigma_{x.Holz}$ dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass es auch in der Betonschicht im unteren Viertel der Höhe zu Zugspannungen kommt. Was dazu führt, dass einen Teil des Querschnittes nicht zur Abtragung von Schubspannungen zur Verfügung steht.

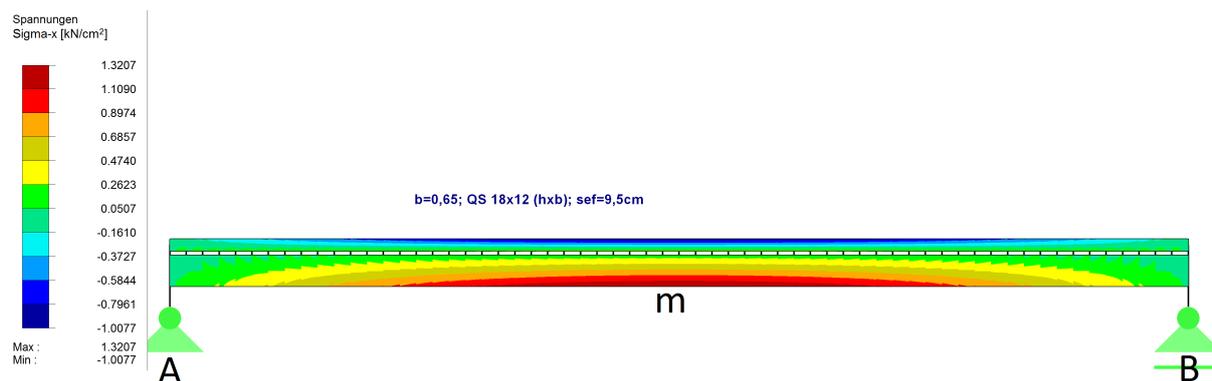


Abb. 5.9: Normalspannungsverlauf in x-Richtung - SFS-17

Der Schubspannungsverlauf $\tau_{z.Holz}$ in Abbildung 5.10 zeigt deutlich, dass der Maximalwert der Spannung im Schwerpunkt des Holzquerschnittes liegt, dies entsteht durch die Verwendung von Stäbe in die durch Koppelstäbe Querkräfte eingeleitet werden.

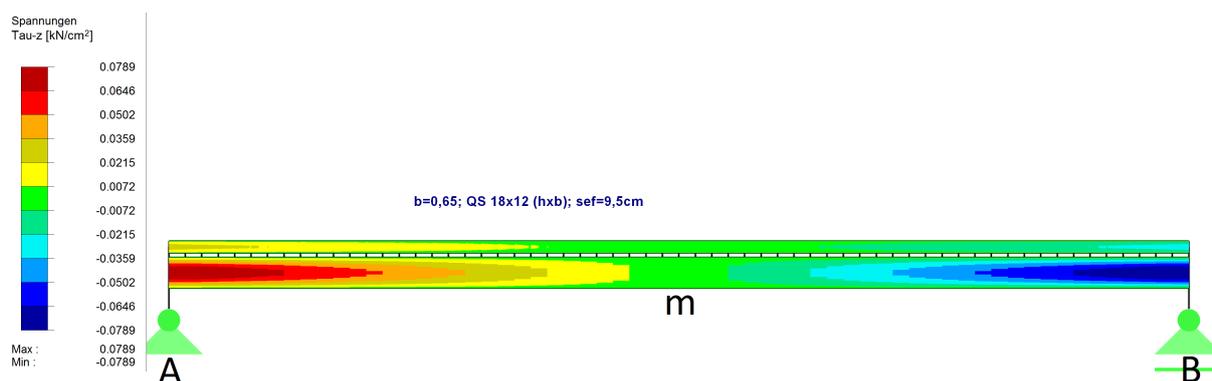


Abb. 5.10: Schubspannungsverlauf in z-Richtung - SFS-17

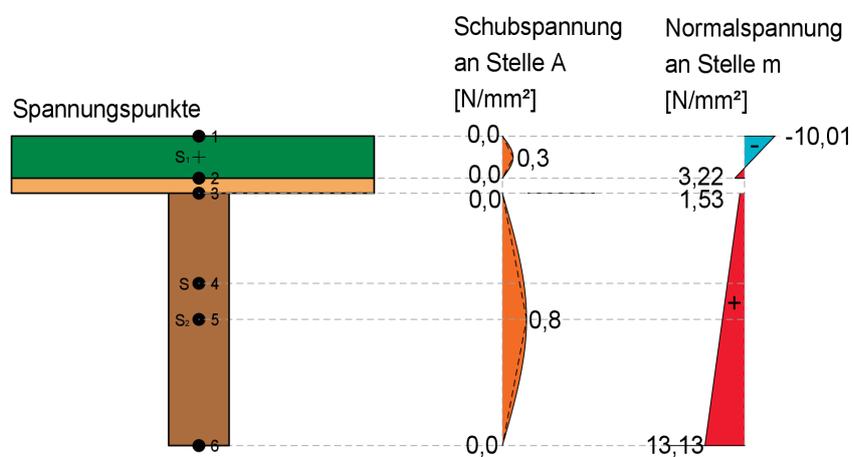


Abb. 5.11: Spannungsverlauf - Schnitt durch Querschnitt - SFS-17

Alle Schnittgrößen wurden direkt aus dem FEM Modell unter entsprechender Lastkombination abgelesen.

In Abbildung 5.12 ist die Last-Verformungskurve des Gesamtsystems zu sehen. Die in den weiteren Abbildungen dargestellte auftretende Querkraft V_z ist jene, welche auf die einzelnen Verbindungsmittel wirkt. Der dargestellte Verlauf befindet sich größtenteils im elastischen Bereich (siehe Abbildung 5.14) der Arbeitslinie. Wäre jedoch der plastische Bereich erreicht, würden die Querkraft vom Auflager beginnend die selben Werte (F_{rk}) aufweisen (siehe Abbildung 5.15).

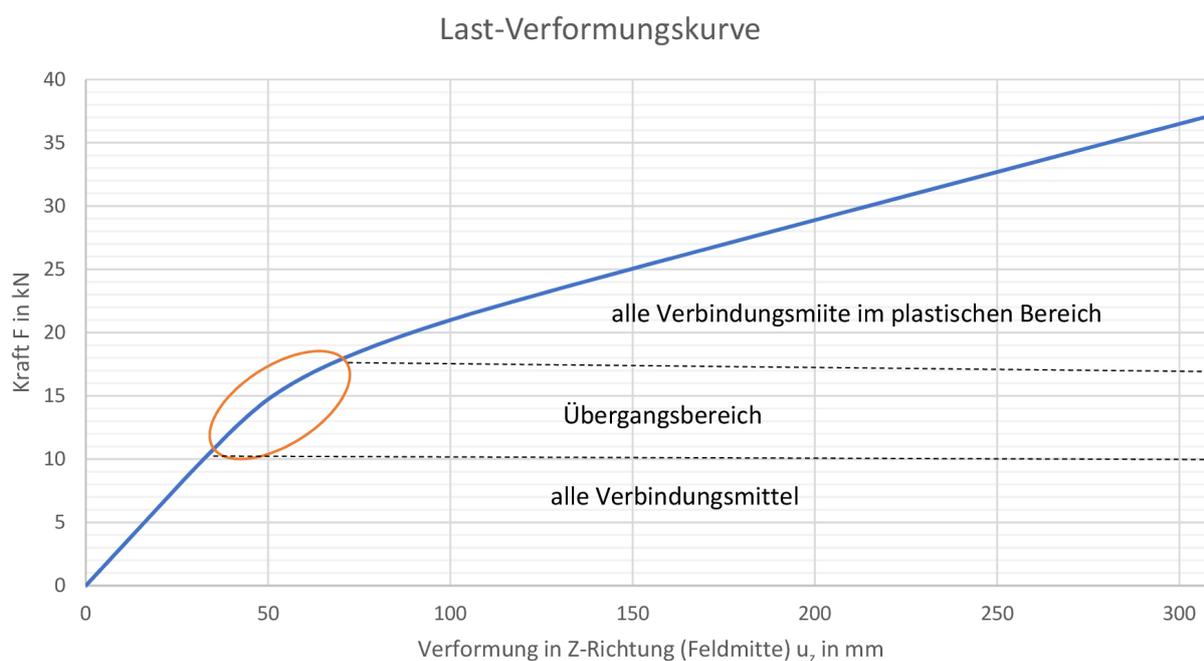


Abb. 5.12: Last-Verformungskurve SFS-17



Abb. 5.13: Bereich der betrachteten Koppelstäbe im Gesamtmodell

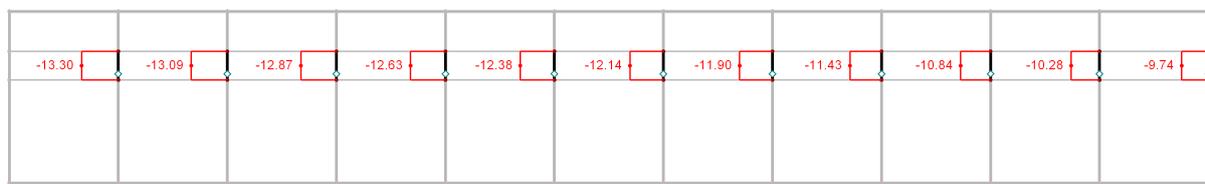


Abb. 5.14: Verbindungsmittel im elastischen Bereich - Schnittgröße V_z

In Abbildung 5.14 ist jener aus Abbildung 5.13 rot markierte Bereich der Verbindungsmittel mit auftretender Querkraft V_z zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass alle Querkraftwerte V_z unter dem charakteristischen Abscherwiderstand je Schraubenpaar $F_{rk} = 16.5 \text{ kN}$ sind. Im Falle von $V_z \leq F_{rk} = 16.5 \text{ kN}$ befinden sich alle Verbindungsmittel im elastischen Bereich der Arbeitslinie.

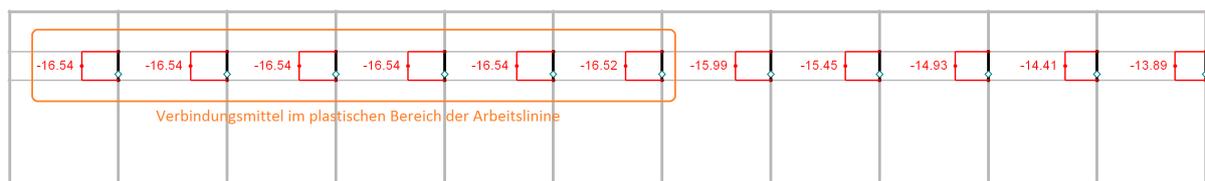


Abb. 5.15: Verbindungsmittel im plastischen Bereich - Schnittgröße V_z

Im Gegensatz zu Abbildung 5.14 ist in Abbildung 5.15 bereits eine am Beginn des Auflagers auftretenden Querkraft V_z mit den Werten von $F_{rk} = 16.5 \text{ kN}$ zu sehen. Wenn der Fall $V_z = F_{rk} = 16.5 \text{ kN}$ eintritt, befinden sich diese Verbindungsmittel bereits im plastischen Bereich der Arbeitslinie.

Aufgrund dieser Gegebenheit der genauen Ablesebarkeit der Schnittgröße V_z der Verbindungsmittel, lässt sich sehr gut erkennen, welchen Ausnutzungsgrad z.B. die Schraubverbindungen aufweisen. Dadurch lassen sich nicht nur **Verbindungsmittel einsparen** und eine **optimale Anordnung** finden, sondern auch sehr realistisch das **Tragverhalten nachbilden**.

5.1.5 Auswertung der Berechnungsmethoden

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Versuche beziehungsweise Versuchsgruppen ausgewertet und kommentiert.

Eine beispielhafte Berechnung der einzelnen Berechnungsmethoden kann dem **Anhang 1 - Parameterstudie eines Plattenbalkens mit Schraubverbindung** entnommen werden.

Begonnen wird mit der ersten **Gegenüberstellung** der unter Punkt 2 beschriebenen **Berechnungsmethoden**. Diese ist in den Abbildungen 5.16 bis 5.26 zu sehen und stellt die Versuche SFS-01, SFS-02 und SFS-17 gegenüber. Gerade die Ergebnisse aus dem Versuch SFS-17 spiegeln die gute Annäherung der Finite Elemente Methode mit den in den Normen verankerten Verfahren wider. Anmerkend ist hier zu erkennen, dass sich die Norm-Verfahren bezüglich der Durchbiegung u_z immer auf der sicheren Seite befinden.

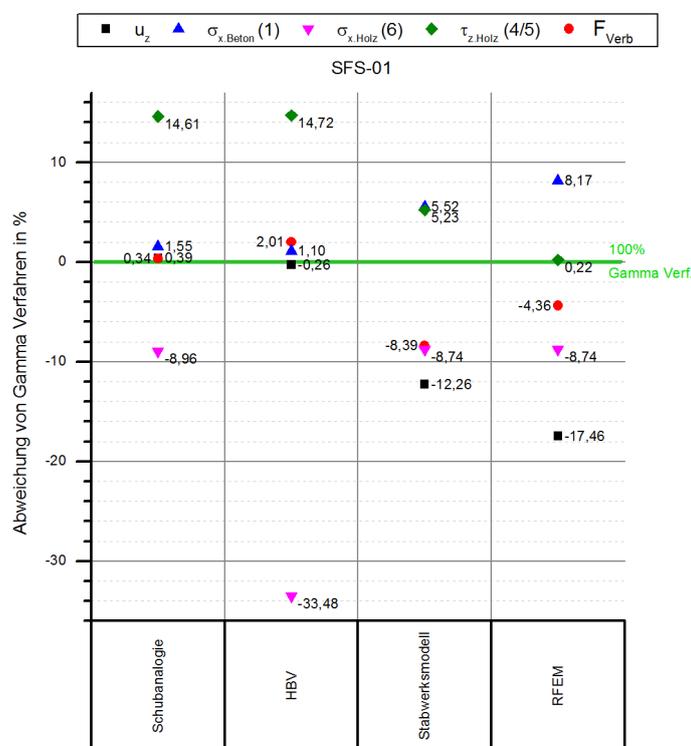


Abb. 5.16: Versuchsaufbau SFS-01 - Vergleich Berechnungsmethoden

	u_z	$\sigma_{x,Beton} (1)$	$\sigma_{x,Holz} (6)$	$\tau_{z,Holz.5} (4/5)$	F_{verb}	Abw. u_z	Abw. $\sigma_{x,Beton} (1)$	Abw. $\sigma_{x,Holz} (6)$	Abw. $\tau_{z,Holz.5} (5)$	Abw. F_{verb}
	[mm]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Gamma Verfahren	3,042	0,298	0,453	0,469	9,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Schubanalogie	3,030	0,297	0,446	0,511	7,83	0,39	0,34	1,55	-8,96	14,61
HBV	3,050	0,292	0,448	0,626	7,82	-0,26	2,01	1,10	-33,48	14,72
Stabwerksmodell	3,415	0,323	0,428	0,510	8,69	-12,26	-8,39	5,52	-8,74	5,23
RFEM	3,573	0,311	0,416	0,510	9,15	-17,5	-4,4	8,2	-8,7	0,2
Standardabweichung	0,228	0,011	0,014	0,053	0,602					
Mittelwert	3,222	0,304	0,438	0,525	8,532					

Abb. 5.17: Versuchsaufbau SFS-01 - Parameter und Ergebnisse

Zwischen den Versuchen SFS-01 und SFS-02 ist die **Breite des Betonquerschnittes unterschiedlich**. Dies wurde zur Überprüfung der mitwirkenden Breite und der daraus aktivierten Steifigkeit durchgeführt. Eine genauere Auswertung zur Variation der Querschnittbreite kann den Versuchen SFS-03 bis SFS-07 entnommen werden.

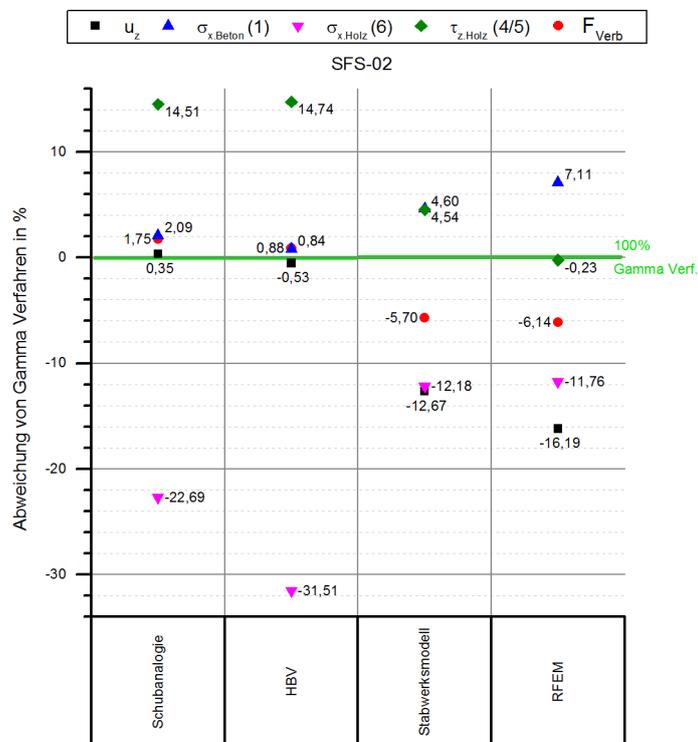


Abb. 5.18: Versuchsaufbau SFS-02 - Vergleich Berechnungsmethoden

	u_z	$\sigma_{x,Beton} (1)$	$\sigma_{x,Holz} (6)$	$\tau_{z,Holz.5} (4/5)$	F_{verb}	Abw. u_z	Abw. $\sigma_{x,Beton} (1)$	Abw. $\sigma_{x,Holz} (6)$	Abw. $\tau_{z,Holz.5} (5)$	Abw. F_{verb}
	[mm]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Gamma Verfahren	1,705	0,228	0,239	0,238	4,41	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Schubanalogie	1,699	0,224	0,234	0,292	3,77	0,4	1,8	2,1	-22,7	14,5
HBV	1,714	0,226	0,237	0,313	3,76	-0,5	0,9	0,8	-31,5	14,7
Stabwerksmodell	1,921	0,241	0,228	0,267	4,21	-12,7	-5,7	4,6	-12,2	4,5
RFEM	1,981	0,242	0,222	0,266	4,42	-16,2	-6,1	7,1	-11,8	-0,2
Standardabweichung	0,122	0,008	0,006	0,025	0,295					
Mittelwert	1,804	0,232	0,232	0,275	4,114					

Abb. 5.19: Versuchsaufbau SFS-02 - Parameter und Ergebnisse

Aus den in Abbildung 5.20 dargestellten Datenpunkten ist abzuleiten, dass die Breite des Betonquerschnittes in dem Bereich der berechneten mitwirkenden Breite (siehe Punkt 3.3) nach ÖNORM EN 1992-1-1 [11] und der Breite des Holzquerschnittes nur zu sehr geringen Abweichungen der Ergebnisse im Bereich $\pm 4\%$ von führt.

Aufgrund der geringen Abweichungen ist die Umlagerung der Steifigkeiten durch die mitwirkende Breite beinahe zu vernachlässigen. Da das Finite Elemente Modell mittels Stäbe realisiert wurde, ist die mitwirkende Breite trotzdem zu berechnen und auf Einhaltung nach ÖNORM EN 1992-1-1 [11] zu überprüfen.

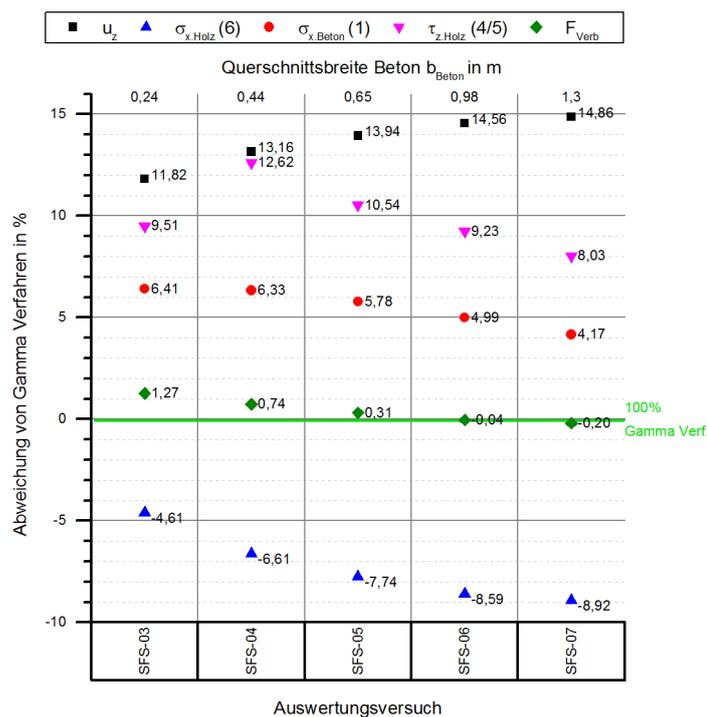


Abb. 5.20: Versuchsaufbau SFS-03 bis SFS-07 - Einfluss Querschnittbreite Beton

Ausw.	RFEM					Gamma Verfahren					Abw. RFEM - Gamma Verfahren (100%)					NW
	u_{RFEM} [mm]	$\sigma_{x,Beton}$ (1) [kN/cm ²]	$\sigma_{x,Holz}$ (6) [kN/cm ²]	$\tau_{z,Holz}$ (5) [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	u_{Gamma} [mm]	$\sigma_{x,Beton}$ (1) [kN/cm ²]	$\sigma_{x,Holz}$ (6) [kN/cm ²]	$\tau_{z,Holz}$ (5) [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	u_z [%]	$\sigma_{x,Beton}$ (1) [%]	$\sigma_{x,Holz}$ (6) [%]	$\tau_{z,Holz}$ (4) [%]	F_{verb} [%]	
SFS-03	0,914	0,176	0,095	0,100	1,42	0,806	0,165	0,099	0,090	1,40	11,82	6,41	-4,61	9,51	1,27	0,04
SFS-04	1,447	0,214	0,158	0,186	2,88	1,257	0,200	0,168	0,163	2,86	13,16	6,33	-6,61	12,62	0,74	0,06
SFS-05	1,981	0,242	0,222	0,266	4,42	1,705	0,228	0,239	0,238	4,41	13,94	5,78	-7,74	10,54	0,31	0,09
SFS-06	2,797	0,279	0,321	0,392	6,83	2,390	0,265	0,349	0,356	6,83	14,56	4,99	-8,59	9,23	-0,04	0,12
SFS-07	3,573	0,311	0,416	0,510	9,15	3,042	0,298	0,453	0,469	9,17	14,86	4,17	-8,92	8,03	-0,20	0,15

Abb. 5.21: Versuchsaufbau SFS-03 bis SFS-07 - Parameter und Ergebnisse

Aus Abbildung 5.22 mit den Vergleichen SFS-08 bis SFS-12 folgt, dass sich eine gute Annäherung der Ergebnisse an die Werte der Nachweisverfahren nach ÖNORM B 1995-1-1 Anhang B [10] ergibt. Das bedeutet, dass ab einem **optimalen Ausnutzungsgrad** im Hinblick der elastischen Anfangsdurchbiegung w_{inst} mit etwa 80% die Abweichungen der Schnittgrößen und Verformungen im Bereich von $\pm 3\%$ liegen.

Eine Ausnahme bildet die in SFS-12 dargestellte maximale Schubspannung im Holzquerschnitt, welcher aufgrund der Verschiebung des Gesamtschwerpunktes in den Bereich der Zwischenschicht ergibt. Dies geschieht durch die hohe Ausnutzung des Holzquerschnittes, welcher mit seinen Abmessungen und Querschnittswerten sehr grenzwertig dimensioniert ist.

Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass bei einem im Holzbau üblichen Ausnutzungsgrad von w_{inst} mit 80% eine Modellierung mittels Finite Elemente Methode ohne Probleme möglich ist.

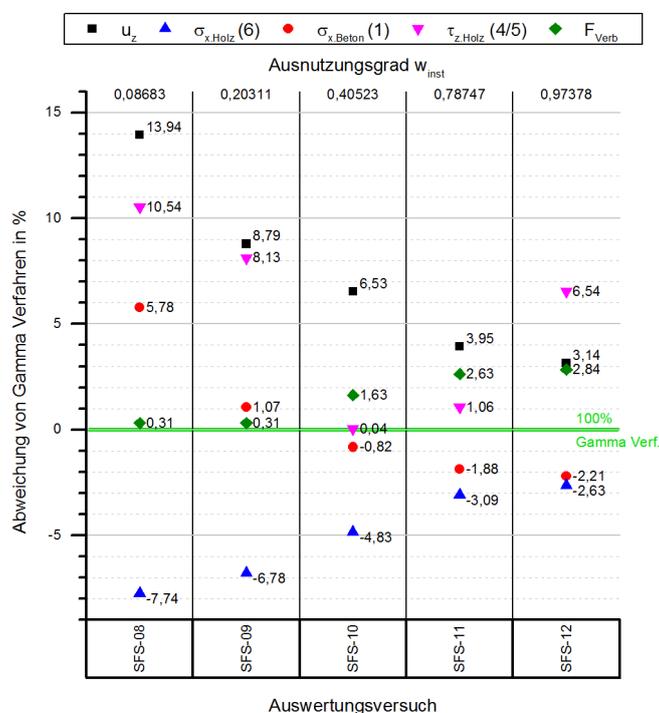


Abb. 5.22: Versuchsaufbau SFS-08 bis SFS-12 - Einfluss Ausnutzungsgrad durch Variation Holzquerschnitt

Ausw.	RFEM					Gamma Verfahren					Abw. RFEM - Gamma Verfahren (100%)					NW
	u_{RFEM} [mm]	$\sigma_{x, Beton} (1)$ [kN/cm ²]	$\sigma_{x, Holz} (6)$ [kN/cm ²]	$\tau_{z, Holz.5} (5)$ [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	u_{Gamma} [mm]	$\sigma_{x, Beton} (1)$ [kN/cm ²]	$\sigma_{x, Holz} (6)$ [kN/cm ²]	$\tau_{z, Holz.5} (5)$ [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	u_z [%]	$\sigma_{x, Beton} (1)$ [%]	$\sigma_{x, Holz} (6)$ [%]	$\tau_{z, Holz.5} (4)$ [%]	F_{verb} [%]	
SFS-08	1,981	0,242	0,222	0,266	4,42	1,705	0,228	0,239	0,238	4,41	13,94	5,78	-7,74	10,54	0,31	0,09
SFS-09	4,372	0,410	0,426	0,403	6,61	3,988	0,406	0,455	0,370	6,59	8,79	1,07	-6,78	8,13	0,31	0,20
SFS-10	8,512	0,631	0,789	0,626	8,41	7,956	0,636	0,827	0,626	8,27	6,53	-0,82	-4,83	0,04	1,63	0,41
SFS-11	16,096	0,998	1,314	0,788	10,26	15,461	1,017	1,355	0,780	9,99	3,95	-1,88	-3,09	1,06	2,63	0,79
SFS-12	19,739	1,167	1,512	0,811	10,89	19,119	1,193	1,552	0,758	10,58	3,14	-2,21	-2,63	6,54	2,84	0,97

Abb. 5.23: Versuchsaufbau SFS-08 bis SFS-12 - Parameter und Ergebnisse

Aufgrund der Änderung des **effektiven Verbindungsmittelabstandes** s_{ef} kommt es besonders bei den Versuchen SFS-14 und SFS-16 zu größeren Abweichungen, besonders bei den Kräften, welche auf die Verbindungsmittel wirken. Dies hängt mit dem Bereich der verwendeten Arbeitslinie zusammen. Das bedeutet, dass aufgrund des größeren Abstandes der Verbindungsmittel größere Kräfte auf die Schrauben besonders im Auflagerbereich wirken.

Daher kommt es bei Versuch SFS-14 zu einer Verschiebung vom K_{ser} – Bereich in den K_u – Bereich der Arbeitslinie. Bei Versuch SFS-16 wird der charakteristische Abscherwiderstand je Schraubenpaar F_{Rk} überschritten und die Verbindungsmittel in Auflagernähe fallen in den Fließbereich des Verbindungsmittels. Gerade diese Bereiche werden mit dem Gamma Verfahren nicht berücksichtigt und führen daher zu problematischen Ergebnissen, welche für Bemessungen in diesen Bereichen noch genauer betrachtet werden müssen. Das Problem liegt darin, dass sich gerade diese Bereiche nur durch eine Betrachtung eines FEM Modells mit einer Arbeitslinie erkennen lassen.

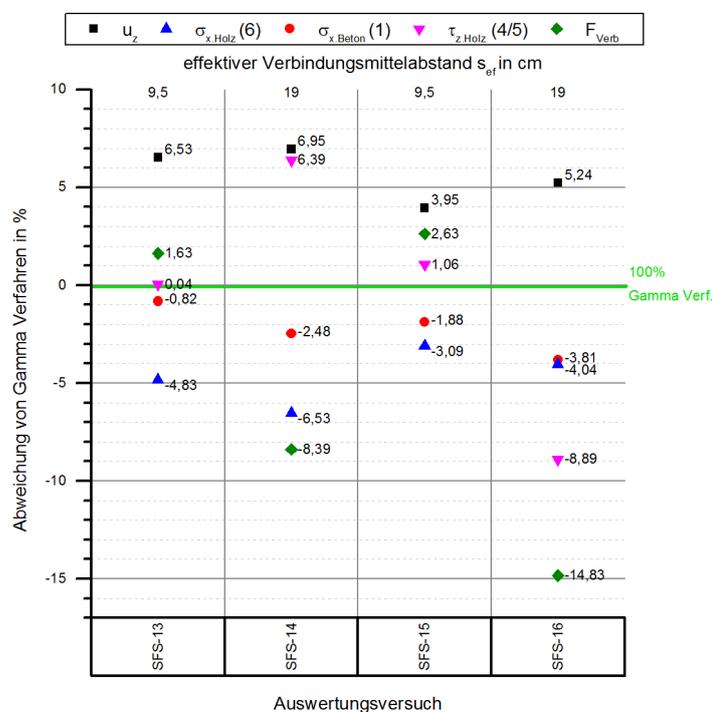


Abb. 5.24: Versuchsaufbau SFS-13 bis SFS-16 - Einfluss effektiver Verbindungsmittelabstand

Ausw.	RFEM					Gamma Verfahren					Abw. RFEM - Gamma Verfahren (100%)					NW
	u_{RFEM}	$\sigma_{x, Beton (1)}$	$\sigma_{x, Holz (6)}$	$\tau_{z, Holz (5)}$	F_{verb}	u_{Gamma}	$\sigma_{x, Beton (1)}$	$\sigma_{x, Holz (6)}$	$\tau_{z, Holz (5)}$	F_{verb}	u_z	$\sigma_{x, Beton (1)}$	$\sigma_{x, Holz (6)}$	$\tau_{z, Holz (4)}$	F_{verb}	w_{inst}
	[mm]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[mm]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]
SFS-13	8,512	0,631	0,789	0,626	8,41	7,956	0,636	0,827	0,626	8,27	6,53	-0,82	-4,83	0,04	1,63	0,41
SFS-14	9,804	0,669	0,833	0,646	14,27	9,123	0,686	0,887	0,605	15,47	6,95	-2,48	-6,53	6,39	-8,39	0,46
SFS-15	16,096	0,998	1,314	0,788	10,26	15,461	1,017	1,355	0,780	9,99	3,95	-1,88	-3,09	1,06	2,63	0,79
SFS-16	18,110	1,060	1,359	0,766	16,54	17,162	1,100	1,414	0,834	18,99	5,24	-3,81	-4,04	-8,89	-14,83	0,87

Abb. 5.25: Versuchsaufbau SFS-13 bis SFS-16 - Parameter und Ergebnisse

Der in Abbildung 5.26 dargestellte Vergleich untersucht die **bestmögliche Annäherung bei optimalem Querschnitt** mit einem Ausnutzungsgrad der Durchbiegung w_{inst} von 0.79. Dieser Aufbau weist alle zuvor ermittelten optimalen Parametern der Finite Elemente Methode auf.

Hierbei ist sehr gut zu sehen, in welchem geringen Bereich die Abweichungen auftreten. Daher kann bei einer Konstruktion mit annähernd optimalen Parameter die auftretende Abweichung vernachlässigt werden.

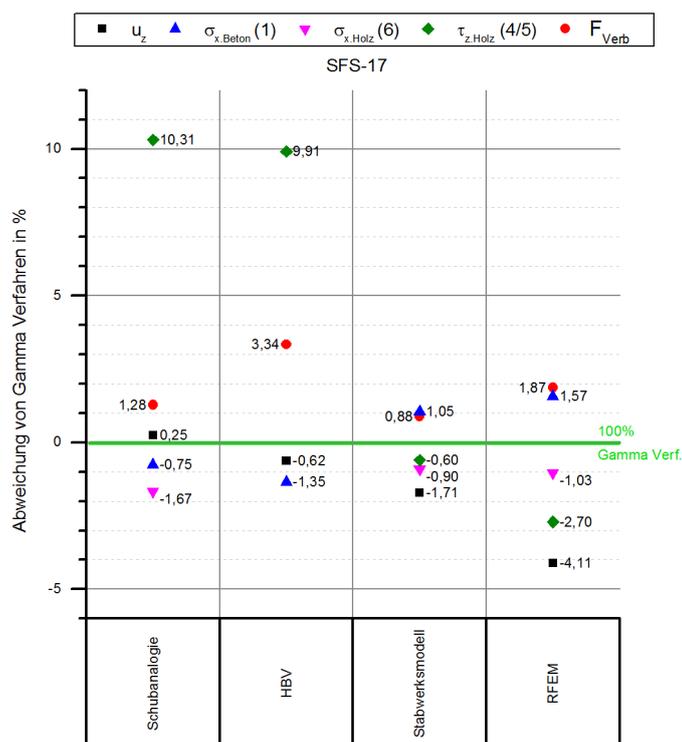


Abb. 5.26: Versuchsaufbau SFS-17 - Vergleich Berechnungsmethoden

	u_z	$\sigma_{x,Beton} (1)$	$\sigma_{x,Holz} (6)$	$\tau_{z,Holz.5} (4/5)$	F_{verb}	Abw. u_z	Abw. $\sigma_{x,Beton} (1)$	Abw. $\sigma_{x,Holz} (6)$	Abw. $\tau_{z,Holz.5} (5)$	Abw. F_{verb}
	[mm]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Gamma Verfahren	15,461	1,017	1,335	0,780	9,99	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Schubanalogie	15,423	1,004	1,345	0,793	8,96	0,2	1,3	-0,7	-1,7	10,3
HBV	15,557	0,983	1,353	1,460	9,00	-0,6	3,3	-1,3	-87,2	9,9
Stabwerksmodell	15,726	1,008	1,321	0,787	10,05	-1,7	0,9	1,0	-0,9	-0,6
RFEM	16,096	0,998	1,314	0,788	10,26	-4,1	1,9	1,6	-1,0	-2,7
Standardabweichung	0,245	0,011	0,014	0,269	0,556					
Mittelwert	15,653	1,002	1,334	0,922	9,652					

Abb. 5.27: Versuchsaufbau SFS-17 - Parameter und Ergebnisse

5.2 Vergleich mit experimentellen Forschungsergebnissen

In diesem Abschnitt erfolgt der Vergleich von Daten aus dem Forschungsbericht *Trag- und Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen* [3], welcher sich mit experimentellen Schubversuchen mit unterschiedlichen Verbindungsmittel (SFS-Schrauben, Betonnocken und Schlitzbleche) beschäftigt. Besonderes Augenmerk wird auf die Ergebnisse mit den SFS-Schrauben gelegt. Mit diesen werden die Abweichungen zwischen den Forschungsergebnissen, der Finite Elemente Methode und dem Gamma Verfahren ermittelt.

Das Ziel dieses Vergleiches ist die Verifikation der Finite Elemente Methode mittels experimentellen Ergebnisse, da diese Methode für die praxisnahe Bemessung und die Nachbildung von Versuchen verwendet werden soll.

Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass sich alle Berechnungen und Vergleiche im Grenzzustand der Tragfähigkeit wie auch der Gebrauchstauglichkeit auf das Kurzzeittragverhalten (Zeitpunkt $t=0$) beziehen.

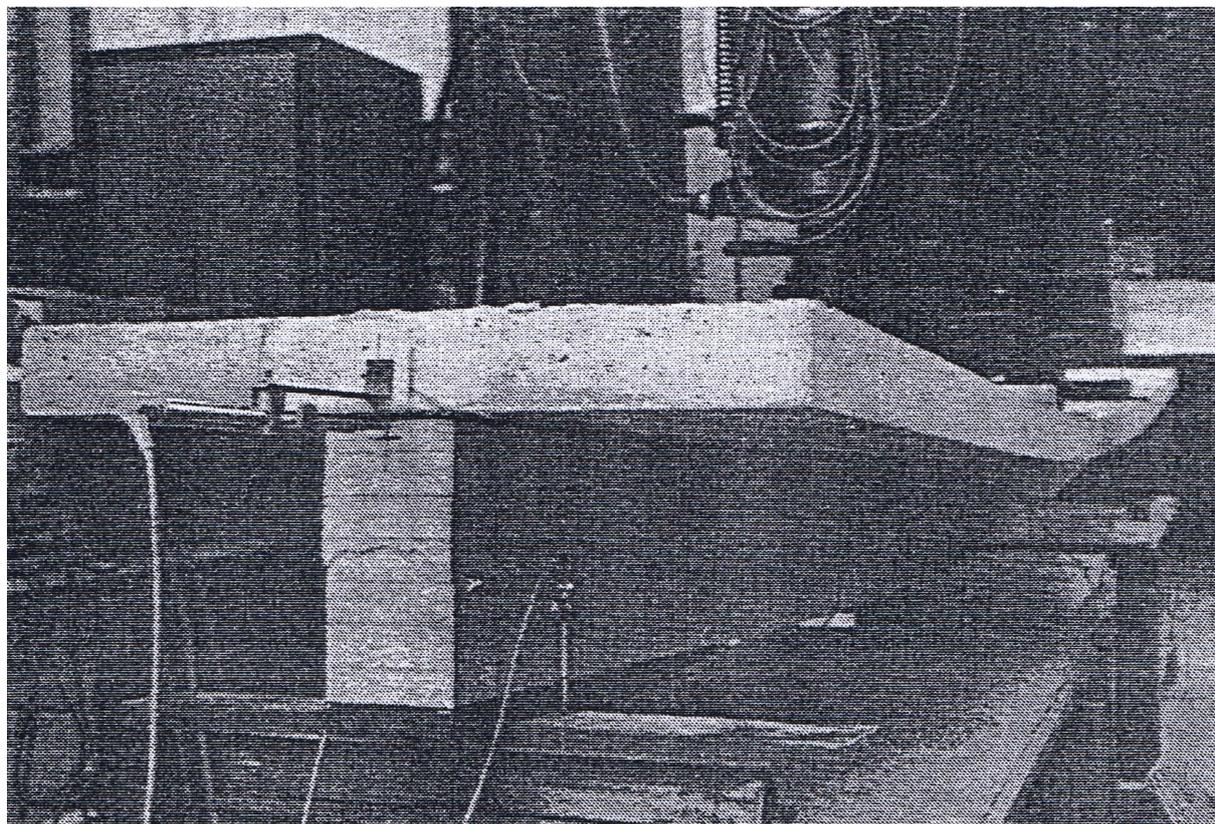


Abb. 5.28: Versuchsaufbau Forschungsbericht [3]

5.2.1 Auswertungsreihen

Im Zuge der Auswertungsreihen wurden insgesamt 30 verschiedene Berechnungen zur Ermittlung der Abweichung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden im Vergleich zu einem RFEM Modell unter Verwendung von Arbeitslinien durchgeführt. Der folgenden Abschnitt beschreibt die einzelnen Auswertungsaufbauten näher.

Tab. 5.10: Definition der Materialkennwerte

QS 1 (Beton)	Beton C20/25 nach EN 1992-1-1:2004/A1:2014
QS 2 (Holz)	Brettschichtholz GL24c nach ÖNORM EN 14080:2013-08
$E_1 = E_{c,0}$	3000 kN/cm ²
$E_2 = E_{0,mean}$	1100 kN/cm ²

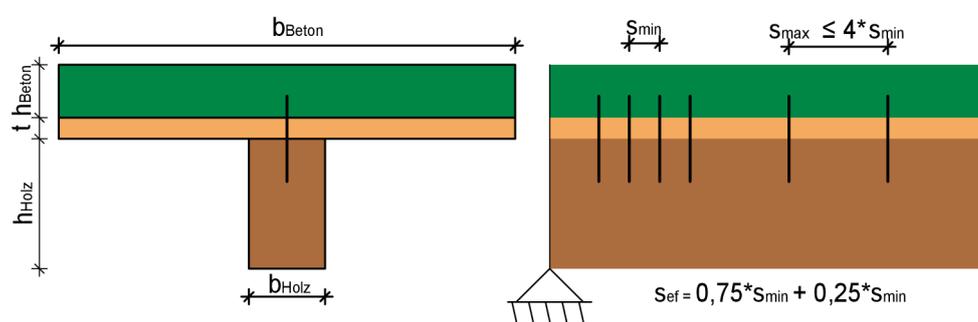


Abb. 5.29: Zuordnung der Variablen

Tab. 5.11: Definition der Variablen

h_{Holz}	Höhe Holzquerschnitt
b_{Holz}	Breite Holzquerschnitt
h_{Beton}	Höhe Betonquerschnitt
b_{Beton}	Breite Betonquerschnitt
t	Dicke der Zwischenschicht
s_{ef}	effektiver Verbindungsmittelabstand
s_{min}	minimaler Verbindungsmittelabstand
s_{max}	maximaler Verbindungsmittelabstand

SFS-100 bis SFS-109: In dieser Auswertungsreihe wurden die Ergebnisse des Gamma Verfahrens nachgerechnet und mit den Ergebnisse des Forschungsberichtes zur Überprüfung verglichen. Dabei bleiben die Querschnittswerte ident, lediglich die Kraft je Kolben F_{max} variiert. Bei dieser handelt es um jene Kraft, bei der ein Versagen des Versuchsaufbaues erfolgt.

Tab. 5.12: Auswertungsparameter SFS-100 bis SFS-109

Auswertung	$b_{Beton} \times h_{Beton}$ [cm]	$b_{Holz} \times h_{Holz}$ [cm]	t [cm]	s_{ef} [cm]
SFS-100 bis SFS-109	60 x 7	10 x 17.2	2.8	20

SFS-110 bis SFS-119: Für diese Auswertungsreihe wird zuerst die Verschiebung u aus den Kraft-Verformungsdiagrammen (siehe Anhang) bei einer Kraft $F_{max} = 10 \text{ kN}$ aus den Diagrammen ermittelt. Diese Werte werden mit den Ergebnissen des RFEM Modells und dem Gamma Verfahren verglichen.

Tab. 5.13: Auswertungsparameter SFS-110 bis SFS-119

Auswertung	$b_{Beton} \times h_{Beton}$ [cm]	$b_{Holz} \times h_{Holz}$ [cm]	t [cm]	s_{ef} [cm]
SFS-110 bis SFS-119	60 x 7	10 x 17.2	2.8	20

SFS-120 bis SFS-129: Für diese Auswertungsreihe wird zuerst die Kraft F_{max} aus den Kraft-Verformungsdiagrammen (siehe Anhang) bei einer Durchbiegung $u = 20 \text{ mm}$ aus den Diagrammen ermittelt. Diese Werte werden mit den Ergebnissen des RFEM Modells und dem Gamma Verfahren verglichen.

Tab. 5.14: Auswertungsparameter SFS-120 bis SFS-129

Auswertung	$b_{Beton} \times h_{Beton}$ [cm]	$b_{Holz} \times h_{Holz}$ [cm]	t [cm]	s_{ef} [cm]
SFS-120 bis SFS-129	60 x 7	10 x 17.2	2.8	20

5.2.2 Arbeitslinie

Die Grundlage der vorliegenden Auswertung des RFEM Modells bildet die aus der Zulassung ETA-13/0699 [13] erstellte Arbeitslinie, welche mit der Näherungsfunktion des Forschungsberichtes aus Anlage 102 [3] entwickelt wurde.

Es handelt sich bei diesem statischen System um einen Einfeldträger, daher werden die Verbindungsmittel nur auf Abscheren beansprucht. Dadurch wird nur eine Arbeitslinien für diese Richtung der Kraftbeanspruchung erstellt.

Es werden die Schrauben SFS VB-48-7,5x100 (Anordnung zwei Schraubenpaare nebeneinander) verwendet, welche folgende Kennwerte aufweisen (Werte aus Zulassung ETA-13/0699 [13]):

Tab. 5.15: Schraubenkennwerte aus Zulassung [13]

SFS Schraube	α	l_{ef}	K_{ser}	ρ_k	k_α	$F_{ax.\alpha.rk}$	F_{rk}
VB-48-7,5x100	+/-45°	60.4 mm	15600 kN/mm	350 kg/m ³	1.414	5.43 kN	7.7 kN

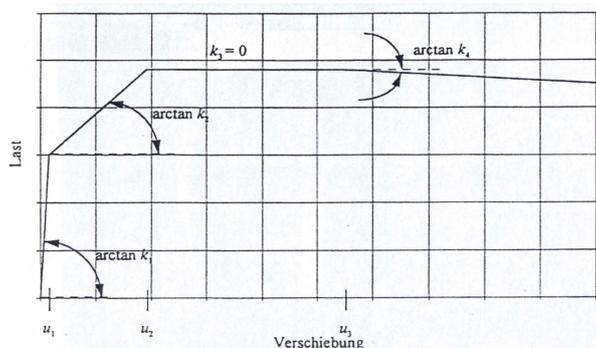
Tab. 5.16: Definition der Variablen

α	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes
l_{ef}	Einschraubtiefe im Holzbauteil
k_α	Faktor zur Berücksichtigung der Schraubenanordnung
$F_{ax.\alpha.rk}$	charakteristischer Auszieh Widerstand
F_{rk}	charakteristischer Abscherwiderstand je Schraubenpaar

Zur Kontrolle der angenommenen Arbeitslinie werden die aus dem Forschungsbericht [3] angegebenen Mittelwerte für die Bildung einer Last-Verschiebungskurve (siehe Tabelle 5.17) herangezogen. Es werden die in Tabelle 5.17 angegebenen Eingangsparameter für den in Abbildung 5.30 dargestellten Verlauf benötigt.

Tab. 5.17: Mittelwerte Last-Verschiebungs-Polygonzüge [3]

k_1	15901 N/mm
u_1	0.63 mm
k_2	9352 N/mm
u_2	1.17 mm
k_3	0 N/mm
u_3	1.45 mm
k_4	0 N/mm

**Abb. 5.30:** Verlauf der Näherungsfunktion (allgemein) [3]

Dabei ist zu sehen, dass die Arbeitslinie welche mit der aktuellen Zulassung ETA-13/0699 [13] gebildet wurde, fast ident mit den Mittelwerten aus den Scherversuchen D-SCH-1 bis 16 (siehe Forschungsbericht Anlage 102 [3]) ist. Daher können die Ergebnisse aus den Versuchen sehr gut verglichen werden.

Die genaue Berechnung der Arbeitslinie wie unter Punkt 3.2 Nachgiebige Verbindungen - Arbeitslinie beschrieben, kann dem Anhang entnommen werden. Die daraus resultierende Arbeitslinie und die Ergebnisse der Näherungsfunktion sind unter Abbildung 5.31 zu sehen.

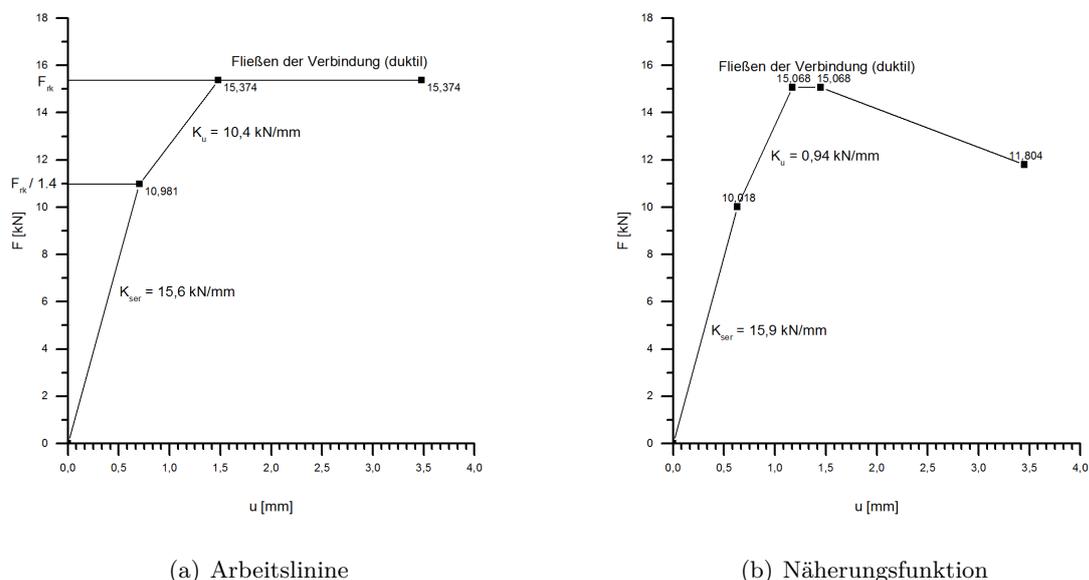


Abb. 5.31: Vergleich Arbeitslinie und Näherungsfunktion

5.2.3 Baustatische Modellierung

Bei dem baustatischen System (siehe Abbildung 5.32) handelt es sich um einen Einfeldträger mit einer Spannweite von 5.40 m. Dieser wird auf den Auflagern gelenkig gelagert. Es wurde für den Versuch eine HBV-Rippendecke mit einer 7 cm hohen Betonschicht, welche auf einer Zwischenschicht aus 2.8 cm Spanplatte aufgebracht ist verwendet. Als Unterzug (Rippe) wurde ein Brettschichtholz Rechteckquerschnitt laut Tabellenauswertung gewählt.

Alle auftretenden Lasten werden punktuell als Einzellasten angesetzt (siehe Abbildung 5.32).

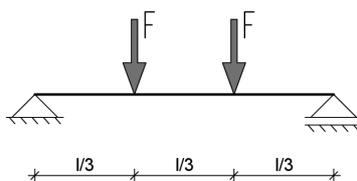


Abb. 5.32: statisches System und Lastansatz

Die benötigten Komponenten für das FEM Modell können dem Punkt 4 Anwendung der Finite Elemente Methode entnommen werden.

Der modellierte Querschnitt für die Versuch SFS-100 bis SFS-129 kann der Abbildung 5.33 entnommen werden.

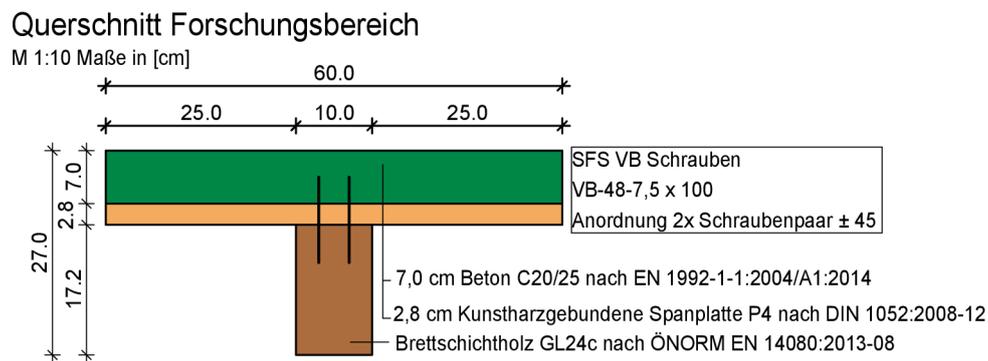


Abb. 5.33: Querschnitt SFS-100 bis SFS-129

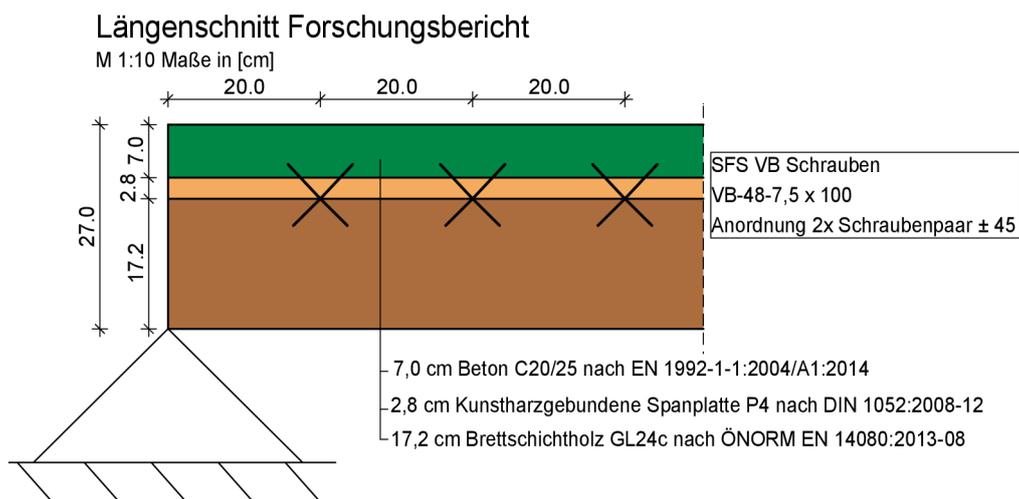


Abb. 5.34: Ausschnitt Schraubenanordnung SFS-100 bis SFS-129

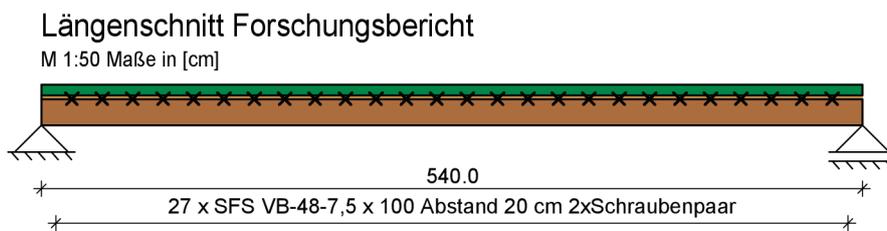


Abb. 5.35: Längenschnitt SFS-100 bis SFS-129

5.2.4 Auswertung Schnittgrößen

Die Auswertung der Schnittgrößen kann dem Punkt 5.1.4 entnommen werden.

Um für die Versuche SFS-110 bis SFS-119 auswerten zu können, muss zuerst aus den Kraft-Verformungsdiagrammen bei entsprechender Kraft mit $F = 10 \text{ kN}$ die Verformung u ermittelt werden. Dazu wurden die Diagramme in ein CAD Programm importiert und die Werte ermittelt. Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist der Abbildung 5.36 zu entnehmen.

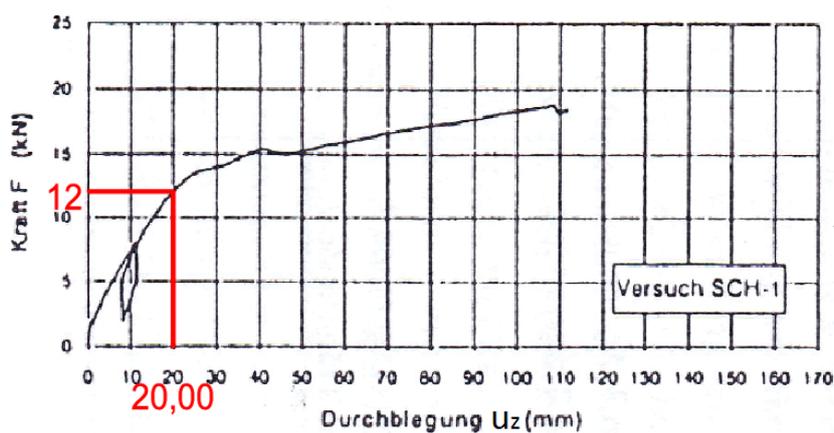


Abb. 5.36: Kraf-Verformungsdiagramm SCH-1 aus Forschungsbericht [3]

Im Gegensatz dazu muss für die Versuche SFS-120 bis SFS-129 bei entsprechender Verformung $u = 20 \text{ mm}$ die Kraft F ermittelt werden. Dazu werden wieder die Diagramme (siehe Abbildung 5.37) des Forschungsberichtes verwendet.

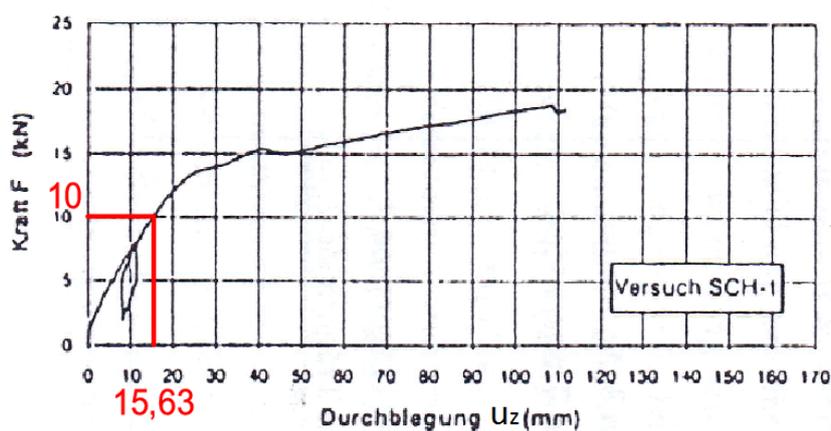


Abb. 5.37: Kraf-Verformungsdiagramm SCH-1 aus Forschungsbericht [3]

5.2.5 Auswertung der Berechnungsmethoden

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Versuche beziehungsweise Versuchsgruppen ausgewertet und kommentiert.

Begonnen wird mit dem **Vergleich der Ergebnisse des Gamma Verfahrens** mit den Werten des Forschungsberichtes. Dieser Schritt dient ausschließlich der Kontrolle des Gamma Verfahrens.

Das Ergebnis der Versuche SFS-100 bis SFS-109 war, dass die Abweichung der Werte im Bereich von $\pm 0.5\%$ liegen, was auf Rundungsfehler zurückzuführen ist. Daher sind die Berechnungen des Gamma Verfahrens korrekt. Dabei ist anzumerken, dass die Ergebnisse der Durchbiegung u_z außer Acht gelassen werden, da es sich hier um die Durchbiegung zu einem Zeitpunkt bei Versagen des Systems handelt.

In Abbildung 5.38 sind die Brechungsergebnisse des Forschungsberichtes und des durchgeführten Gamma Verfahrens zu sehen.

SFS-100 bis SFS-109																		
Ausw.	Vers.	Forschungsbericht						Gamma Verfahren						Abw. Forschungsb. - Gamma (100%)				
		F [kN]	u_{Versuch} [mm]	$\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [N/mm ²]	$\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [N/mm ²]	$\tau_{z,\text{Holz,max}}$ [N/mm ²]	T_d [kN]	u_z [mm]	$\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [N/mm ²]	$\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [N/mm ²]	$\tau_{z,\text{Holz,max}}$ [N/mm ²]	T_d [kN]	u_z [%]	$\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [%]	$\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [%]	$\tau_{z,\text{Holz,max}}$ [%]	T_d [%]	
SFS-100	SCH1	18,8	112	16,4	20,2	0,83	16,2	33,765	16,4	20,1	0,83	16,22	-231,70	0,13	-0,25	0,18	0,10	
SFS-101	SCH2	21,6	142	18,9	23,2	0,96	18,6	38,794	18,9	23,1	0,96	18,63	-266,04	-0,18	-0,22	-0,49	0,17	
SFS-102	SCH3	18,2	80	15,9	19,5	0,80	15,7	32,687	15,9	19,5	0,80	15,70	-144,74	-0,02	0,03	0,61	-0,01	
SFS-103	SCH4	19,8	117	17,3	21,2	0,88	17,1	35,561	17,3	21,2	0,88	17,08	-229,01	-0,03	0,10	-0,49	-0,13	
SFS-104	SCH5	22,8	162	19,9	24,4	1,01	19,7	40,949	19,9	24,4	1,01	19,67	-295,61	0,07	0,15	-0,16	-0,17	
SFS-105	SCH6	16,9	94	14,8	18,1	0,75	14,6	30,353	14,8	18,1	0,75	14,58	-209,69	-0,26	0,07	-0,34	-0,16	
SFS-106	SCH7	16,1	68	14,1	17,3	0,71	13,9	28,916	14,1	17,3	0,71	13,89	-135,17	-0,27	-0,26	0,29	-0,09	
SFS-107	SCH8	16,3	90	14,2	17,5	0,72	14,1	29,275	14,2	17,5	0,72	14,06	-207,43	0,26	-0,17	0,13	-0,29	
SFS-108	SCH9	20,0	118	17,5	21,4	0,88	17,3	35,920	17,5	21,4	0,88	17,25	-228,51	-0,18	0,16	0,52	-0,29	
SFS-109	SCH10	17,9	98	15,6	19,2	0,79	15,4	32,149	15,6	19,2	0,79	15,44	-204,83	0,22	-0,08	0,21	0,26	

$K_{ser}=15,6 \text{ kN/mm}$ (Mittelwert aus Versuchen), $\rho_s=350 \text{ kg/m}^3$ ohne Anpassung der Rohdichte und E - Modul BSH je Versuch nach Anlage 73 Forschungsbericht

	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Mittelwert:	-215,27	-0,02	-0,05	0,05	-0,06
Maximalwert:	-135,17	0,26	0,16	0,61	0,26
Minimalwert:	-295,61	-0,27	-0,26	-0,49	-0,29
Standardabw:	46,11	0,18	0,16	0,38	0,18

Abb. 5.38: Versuchsaufbau SFS-100 bis SFS-109 - Abweichung Gamma Verfahren

In Abbildung 5.39 dargestellte Auswertung SFS-110 bis SFS-119 untersucht die **Abweichungen der Finite Elemente Methode** mit den des Gamma Verfahrens. Das Ganze erfolgt mit einem Ausnutzungsgrad w_{inst} von 1 und bei einer gleichbleibenden Last je Kolben F mit 10 kN. Dabei handelt sich um einen optimalen Ausnutzungsgrad, daher ist die Abweichung der Durchbiegung in Feldmitte u_z mit 1.6% beinahe zu vernachlässigen. Es kommt aufgrund der gleich bleibenden Last immer zu den selben Ergebnissen der Finite Elemente Methode und dadurch nur zu einer Gegenüberstellung.

Hierbei ist zu erkennen, dass alle Werte bis auf die Normalspannung im Holz $\sigma_{x.Holz}$ bei der Berechnung mit dem Gamma Verfahren auf der sicheren Seite liegen. Aus den Abweichungen lässt sich ableiten, dass die Finite Elemente Methode **besonders für die Betrachtung der Kraft in den Verbindungsmittel F_{Verb} und der Durchbiegung u_z** geeignet ist.

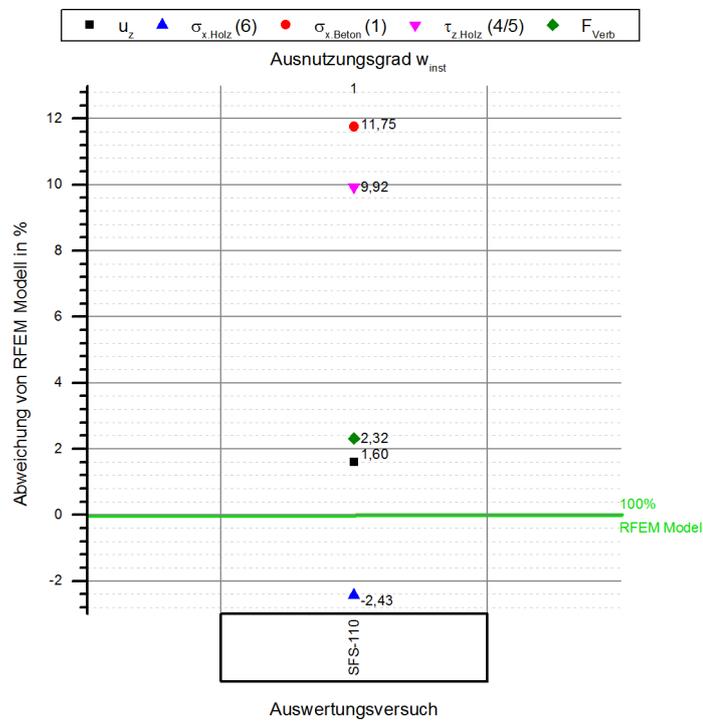


Abb. 5.39: Versuchsaufbau SFS-110 - Abweichung Gamma Verfahren

Ausw.	Vers.	F [kN]	RFEM					Gamma Verfahren					Abw. RFEM (100%) - Gamma Verfahren					NW [-]
			u_{RFEM} [mm]	$\sigma_{x.Beton} (1)$ [N/mm ²]	$\sigma_{x.Holz} (6)$ [N/mm ²]	$\tau_{z.Holz.max}$ [N/mm ²]	T_d [kN]	u_z [mm]	$\sigma_{x.Beton} (1)$ [N/mm ²]	$\sigma_{x.Holz} (6)$ [N/mm ²]	$\tau_{z.Holz.max}$ [N/mm ²]	T_d [kN]	u_z [%]	$\sigma_{x.Beton} (1)$ [%]	$\sigma_{x.Holz} (6)$ [%]	$\tau_{z.Holz.max}$ [%]	T_d [%]	
SFS-110	SCH1	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-111	SCH2	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-112	SCH3	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-113	SCH4	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-114	SCH5	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-115	SCH6	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-116	SCH7	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-117	SCH8	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-118	SCH9	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00
SFS-119	SCH10	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	2,32	1,00

Abb. 5.40: Versuchsaufbau SFS-110 bis SFS-119 - Abweichung Gamma Verfahren

Aus Abbildung 5.41 ist die **Abweichung des Durchbiegung u_z** mit denen der Finite Elemente Methode dargestellt. Dabei werden die Vergleichswerte (Durchbiegung u_z) wie unter Punkt 5.2.4 beschrieben, für einen gleichbleibende Last je Kolben F mit 10 kN ermittelt.

Die hier dargestellten relativ großen Abweichungen im Bereich von +35.13% bis -22.73% haben mehrere Ursachen. Einerseits werden die Werte aus alten Diagrammen in Papierform abgelesen und dabei handelt sich reale Versuchsergebnisse, welche aufgrund von verschiedenen Materialverhalten grundsätzlich schon eine gewisse Streuung aufweisen. Aber im Mittelwert redet man hier von einer Abweichung im Bereich von 4.74% und einer Standardabweichung mit 15.26%.

Schließlich ist hier anzumerken, dass aufgrund der Streuung der Ableseungenauigkeit **keine eindeutige Aussage über die auftretenden Abweichungen** gegeben werden kann.

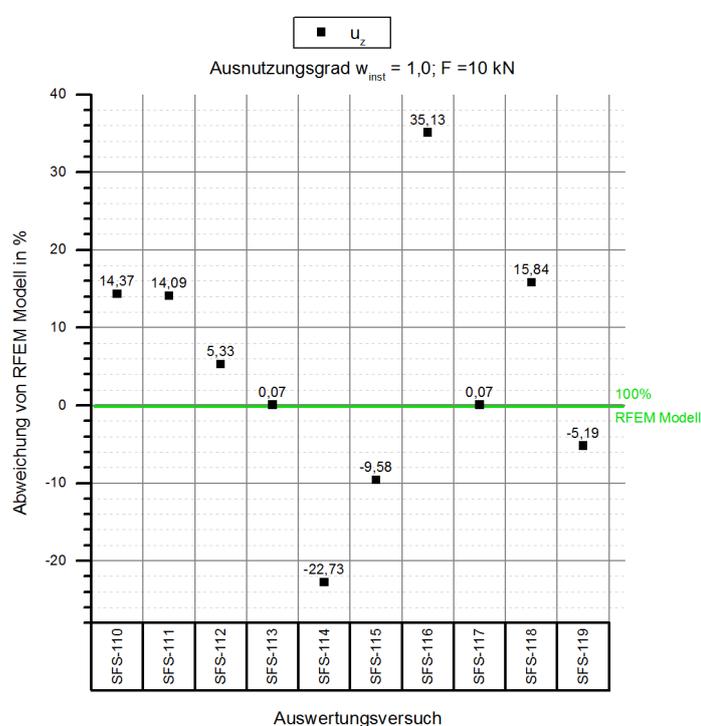


Abb. 5.41: Versuchsaufbau SFS-110 bis SFS-119 - Abweichung Forschungsbericht

Ausw.	Vers.	F [kN]	RFEM					Forschungsbericht					Abw. RFEM 5 (100%) - Forschungsbericht					NW [-]
			u_{RFEM} [mm]	$\sigma_{x,Beton}$ (1) [N/mm ²]	$\sigma_{x,Holz}$ (6) [N/mm ²]	$\tau_{z,Holz,max}$ [N/mm ²]	T_d [kN]	$u_{Versuch}$ [mm]	$\sigma_{x,Beton}$ (1) [N/mm ²]	$\sigma_{x,Holz}$ (6) [N/mm ²]	$\tau_{z,Holz,max}$ [N/mm ²]	T_d [kN]	u_z [%]	$\sigma_{x,Beton}$ (1) [%]	$\sigma_{x,Holz}$ (6) [%]	$\tau_{z,Holz,max}$ [%]	T_d [%]	
SFS-110	SCH1	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	15,63	-	-	-	-	14,37	-	-	-	-	1,00
SFS-111	SCH2	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	15,68	-	-	-	-	14,09	-	-	-	-	1,00
SFS-112	SCH3	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	17,28	-	-	-	-	5,33	-	-	-	-	1,00
SFS-113	SCH4	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	18,24	-	-	-	-	0,07	-	-	-	-	1,00
SFS-114	SCH5	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	22,40	-	-	-	-	-22,73	-	-	-	-	1,00
SFS-115	SCH6	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	20,00	-	-	-	-	-9,58	-	-	-	-	1,00
SFS-116	SCH7	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	11,84	-	-	-	-	35,13	-	-	-	-	1,00
SFS-117	SCH8	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	18,24	-	-	-	-	0,07	-	-	-	-	1,00
SFS-118	SCH9	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	15,36	-	-	-	-	15,84	-	-	-	-	1,00
SFS-119	SCH10	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,83	19,20	-	-	-	-	-5,19	-	-	-	-	1,00

Abb. 5.42: Versuchsaufbau SFS-110 bis SFS-119 - Abweichung Forschungsbericht

Diese Auswertung der Versuche SFS-120 bis SFS-129 ist in Abbildung 5.43 zu sehen, welche die **Abweichung der Finite Elemente Methode zu den Ergebnissen des Gamma Verfahrens** aufzeigt. Dabei wird im Vergleich zu den Versuchen SFS-110 bis SFS-119 die Kraft je Kolben F bei einer fixen Durchbiegung u_z mit 20 mm ermittelt. Dadurch kommt es unterschiedlichen Ergebnissen im RFEM Modell und zu verschiedenen Ausnutzungsgraden w_{inst} .

Die Abweichung der Durchbiegung u_z liegt bei 1.6%. Eine Ausnahme bildet der Versuch SFS-126 bei dem die Verbindungsmittel bereits den Übergangs- oder plastischen Bereich der Last-Verformungskurve erreicht haben. Dadurch kommt zu einer größeren Durchbiegung u_z .

Mann kann also zum Schluss kommen, dass bei den Vergleichen besonders auf die **Arbeitslinienbereiche (elastisch, plastisch) in denen sich die Verbindungsmittel befinden**, geachtet werden muss.

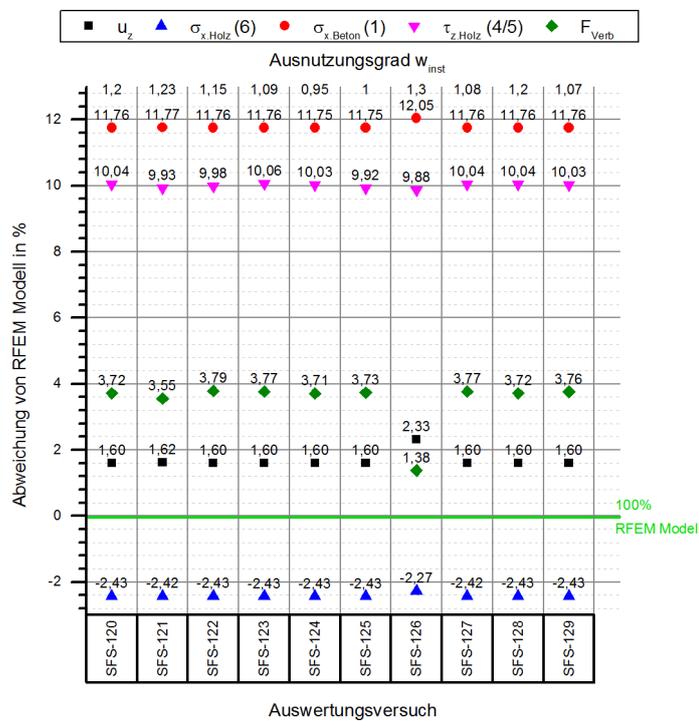


Abb. 5.43: Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Gamma Verfahren

Ausw.	Vers.	F [kN]	RFEM					Gamma Verfahren					Abw. RFEM (100%) - Gamma Verfahren					NW [-]
			u_{RFEM} [mm]	$\sigma_{x,Beton(1)}$ [N/mm ²]	$\sigma_{x,Holz(6)}$ [N/mm ²]	$\tau_{z,Holz,max}$ [N/mm ²]	T_d [kN]	u_z [mm]	$\sigma_{x,Beton(1)}$ [N/mm ²]	$\sigma_{x,Holz(6)}$ [N/mm ²]	$\tau_{z,Holz,max}$ [N/mm ²]	T_d [kN]	u_z [%]	$\sigma_{x,Beton(1)}$ [%]	$\sigma_{x,Holz(6)}$ [%]	$\tau_{z,Holz,max}$ [%]	T_d [%]	
SFS-120	SCH1	12,0	21,903	11,878	12,556	0,590	10,75	21,552	10,481	12,861	0,531	10,35	1,60	11,76	-2,43	10,04	3,72	1,20
SFS-121	SCH2	12,3	22,454	12,176	12,871	0,604	11,00	22,091	10,743	13,182	0,544	10,61	1,62	11,77	-2,42	9,93	3,55	1,23
SFS-122	SCH3	11,5	20,990	11,383	12,033	0,565	10,31	20,654	10,045	12,325	0,509	9,92	1,60	11,76	-2,43	9,98	3,79	1,15
SFS-123	SCH4	10,9	19,895	10,789	11,405	0,536	9,77	19,577	9,521	11,682	0,482	9,40	1,60	11,76	-2,43	10,06	3,77	1,09
SFS-124	SCH5	9,5	17,339	9,403	9,940	0,467	8,51	17,062	8,298	10,182	0,420	8,19	1,60	11,75	-2,43	10,03	3,71	0,95
SFS-125	SCH6	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,96	17,960	8,735	10,717	0,442	8,63	1,60	11,75	-2,43	9,92	3,73	1,00
SFS-126	SCH7	13,0	23,904	12,910	13,624	0,638	11,37	23,348	11,355	13,933	0,575	11,21	2,33	12,05	-2,27	9,88	1,38	1,30
SFS-127	SCH8	10,8	19,712	10,690	11,301	0,531	9,68	19,397	9,433	11,575	0,478	9,32	1,60	11,76	-2,42	10,04	3,77	1,08
SFS-128	SCH9	12,0	21,903	11,878	12,556	0,590	10,75	21,552	10,481	12,861	0,531	10,35	1,60	11,76	-2,43	10,04	3,72	1,20
SFS-129	SCH10	10,7	19,530	10,591	11,196	0,526	9,59	19,217	9,346	11,468	0,473	9,23	1,60	11,76	-2,43	10,03	3,76	1,07

Abb. 5.44: Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Gamma Verfahren

Im Vergleich zu den vorigen Versuchen sind unter Abbildung 5.45 die Auswertung der Reihe SFS-120 bis SFS-129 mit Ergebnissen von **Versuchsergebnissen des Forschungsberichtes Trag- und Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen** [3]. Im Mittel kommt es zu einer Abweichung von 2.0% und einer Standardabweichung mit 9.25%.

Diese **relativ großen Abweichungen** im Vergleich zu vorigen Auswertungsreihen entstehen durch die Streuung der Materialien der realen Versuche und durch Ableseungenauigkeiten aus den Diagrammen.

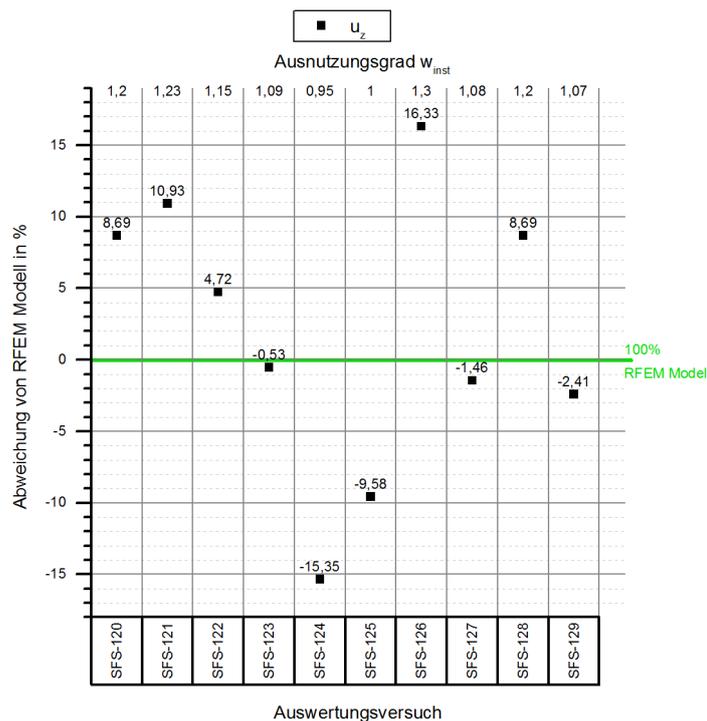


Abb. 5.45: Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Forschungsbericht

Ausw.	Vers.	F	RFEM					Forschungsbericht					Abw. RFEM 5 (100%) - Forschungsbericht					NW
			u_{RFEM}	$\sigma_{x,Beton} (1)$	$\sigma_{x,Holz} (6)$	$\tau_{z,Holz,max}$	T_d	$u_{Versuch}$	$\sigma_{x,Beton} (1)$	$\sigma_{x,Holz} (6)$	$\tau_{z,Holz,max}$	T_d	u_z	$\sigma_{x,Beton} (1)$	$\sigma_{x,Holz} (6)$	$\tau_{z,Holz,max}$	T_d	
		[kN]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]
SFS-120	SCH1	12,0	21,903	11,878	12,556	0,590	10,75	20,000	-	-	-	-	8,69	-	-	-	-	1,20
SFS-121	SCH2	12,3	22,454	12,176	12,871	0,604	11,00	20,000	-	-	-	-	10,93	-	-	-	-	1,23
SFS-122	SCH3	11,5	20,990	11,383	12,033	0,565	10,31	20,000	-	-	-	-	4,72	-	-	-	-	1,15
SFS-123	SCH4	10,9	19,895	10,789	11,405	0,536	9,77	20,000	-	-	-	-	-0,53	-	-	-	-	1,09
SFS-124	SCH5	9,5	17,339	9,403	9,940	0,467	8,51	20,000	-	-	-	-	-15,35	-	-	-	-	0,95
SFS-125	SCH6	10,0	18,252	9,898	10,463	0,491	8,96	20,000	-	-	-	-	-9,58	-	-	-	-	1,00
SFS-126	SCH7	13,0	23,904	12,910	13,624	0,638	11,37	20,000	-	-	-	-	16,33	-	-	-	-	1,30
SFS-127	SCH8	10,8	19,712	10,690	11,301	0,531	9,68	20,000	-	-	-	-	-1,46	-	-	-	-	1,08
SFS-128	SCH9	12,0	21,903	11,878	12,556	0,590	10,75	20,000	-	-	-	-	8,69	-	-	-	-	1,20
SFS-129	SCH10	10,7	19,530	10,591	11,196	0,526	9,59	20,000	-	-	-	-	-2,41	-	-	-	-	1,07

Abb. 5.46: Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Forschungsbericht

Kapitel 6

Anwendungsbeispiel der Finite Elemente Methode

Der letzte Teil der Arbeit beschäftigt sich mit Anwendungsbeispielen der Finite Elemente Methode. Hier wird aufgezeigt mit welcher Genauigkeit Versuche im Vorfeld nachgebildet werden können und auf welche Einflussparameter geachtet werden muss. Dabei beschränken sich die Untersuchungen auf Holz-Beton-Verbundsysteme mit Schraubverbindungen.

6.1 Nachbildung von Versuchen

In diesem Abschnitt erfolgt die Nachbildung von Versuchsdaten des Institutes für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau an der Technischen Universität, welches Biegeversuche an einem Kragträger als HBV Rippelement geführt hat. Besonderes Augenmerk wird auf die richtige Wahl des Anfangsverschiebungsmoduls in axialer wie auch in Querrichtung der Schmid-Schrauben gelegt. Damit werden die Abweichungen zwischen den Versuchsergebnissen und dem FEM Modell ermittelt.

Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass sich alle Berechnungen und Vergleiche im Grenzzustand der Tragfähigkeit wie auch der Gebrauchstauglichkeit auf das Kurzzeittragverhalten (Zeitpunkt $t=0$) beziehen.



Abb. 6.1: Laborversuch CLT-1 bis CLT-3

6.1.1 Auswertungsreihen

Im Zuge der Auswertungsreihen wurden insgesamt drei verschiedene Versuche des Institutes zur Ermittlung der Abweichung der Unterschiede im Vergleich zu einem FEM Modell unter Verwendung von Arbeitslinien herangezogen. Der folgenden Abschnitt beschreibt den Auswertungsaufbau näher.

Tab. 6.1: Definition der Materialkennwerte

QS 1 (Beton)	Beton C30/37 nach EN 1992-1-1:2004/A1:2014
QS 2 (Holz)	Brettsperrholz GL24c nach ÖNORM EN 14080:2013-08
$E_1 = E_{c.0}$	3200 kN/cm ²
E_2	siehe Definition Steifigkeitsmatrix

Die Definition der Steifigkeitsmatrix der Brettsperrholzplatte (Stora Enso - C24 L3s) kann der Abbildungen 6.2 und der Formel 6.1 entnommen werden.

$$\begin{Bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & D_{16} & D_{17} & D_{18} \\ & D_{22} & D_{23} & 0 & 0 & \text{sym.} & D_{27} & D_{28} \\ & & D_{33} & 0 & 0 & \text{sym.} & \text{sym.} & D_{38} \\ & & & D_{44} & D_{45} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & & D_{66} & D_{67} & D_{68} \\ & & & & & & D_{77} & D_{78} \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Biegen und Torsion

Schub

Membran

Exzentrizität

Abb. 6.2: Allgemeine Definition der Steifigkeitsmatrix [8]

$$\begin{Bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 732 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 28 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 27 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6633 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17250 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 751051 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 375526 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 43470 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.1)$$

Die in Formel 6.1 angegebenen Werte der Biege- und Torsionssteifigkeit haben die Einheit [kNm], hingegen die Schub- und Membransteifigkeit haben die Einheit [kN/m].

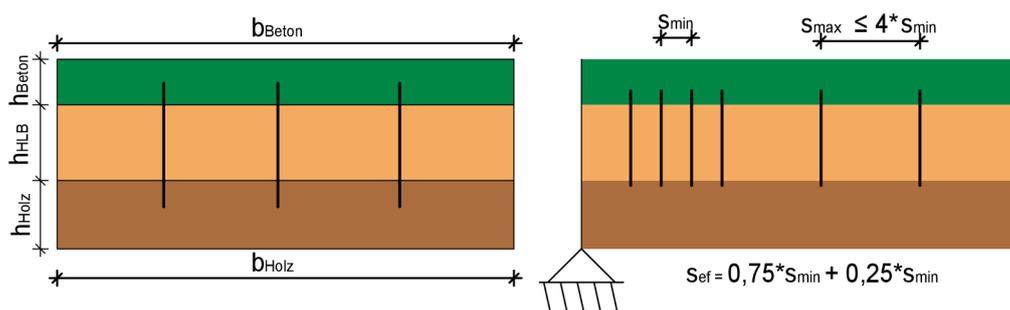


Abb. 6.3: Zuordnung der Variablen

Tab. 6.2: Definition der Variablen

h_{Holz}	Höhe Holzquerschnitt
b_{Holz}	Breite Holzquerschnitt
h_{Beton}	Höhe Betonquerschnitt
b_{Beton}	Breite Betonquerschnitt
t	Dicke der Zwischenschicht
s_{ef}	effektiver Verbindungsmittelabstand
s_{min}	minimaler Verbindungsmittelabstand
s_{max}	maximaler Verbindungsmittelabstand

Die Anordnung der Schrauben kann dem Punkt 6.1.3 entnommen werden.

ITI-1 bis ITI-5: In dieser Parameterstudie wurden die Ergebnisse der im Vorfeld am Institut durchgeführten Versuche verglichen. Dabei wurde der K_{ser} – Wert in Axialrichtung $K_{ser.ax}$ variiert, da dieser Wert laut Schraubenhersteller höher als in der Zulassung angegebene Wert ist. Um eine Last-Verformungskurve zu erhalten, muss weiters die Kraft am Kolben F variiert werden. Dies geschieht in einem Bereich von 0 kN bis 70 kN. Der Aufbau der Querschnitte ist in allen fünf Auswertungen ident mit den Realversuchen.

Die Anordnung der Schrauben ist ident mit den Versuchen CLT-1 bis CLT3, welche in Abbildungen 6.5 und 6.6 zu sehen ist, da es sich hier um eine Nachbildung der durchgeführten Versuche handelt.

Tab. 6.3: Auswertungsparameter ITI-1 bis ITI-5

Auswertung	$b_{Beton} \times h_{Beton}$ [cm]	$b_{Holz} \times h_{Holz}$ [cm]	t_{HLB} [cm]	$K_{ser.v}$ [N/mm]	$K_{ser.ax}$ [N/mm]
ITI-1	60 x 6	60 x 9	10	9000	9000
ITI-2	60 x 6	60 x 9	10	9000	10000
ITI-3	60 x 6	60 x 9	10	9000	11000
ITI-4	60 x 6	60 x 9	10	9000	12000
ITI-5	60 x 6	60 x 9	10	9000	13000

CLT-1 bis CLT-3: Diese Versuche CLT-1 bis CLT-3 wurden vom Institut für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau an der Technischen Universität durchgeführt und ausgewertet. Diese haben den selben Aufbau wie in Tabelle 6.3 dargestellt. Die daraus gewonnenen Last-Verformungskurven werden als Vergleich für das FEM Modell heran gezogen. In Abbildung 6.4 sind die Schichten des Probekörpers zu sehen.



Abb. 6.4: Druckversuch - CLT-1 bis CLT-3

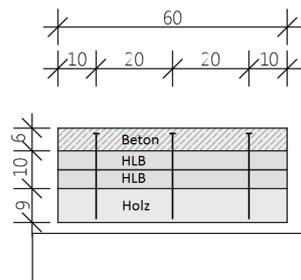


Abb. 6.5: Querschnitt CLT-1 bis CLT-3

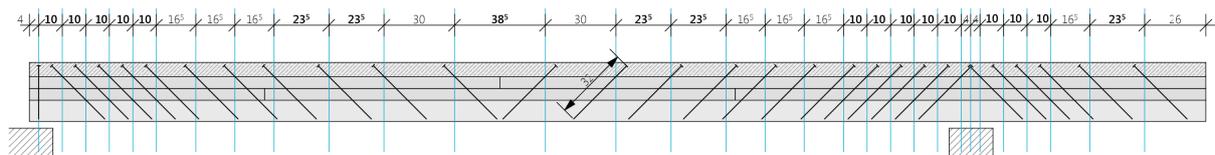


Abb. 6.6: Längenschnitt CLT-1 bis CLT-3

6.1.2 Arbeitslinie

Die Grundlage der vorliegenden Auswertung des FEM Modells bilden die aus den Zulassungen ETA-12/0373 [12] und der DIBt Z-9.1-845 [5] erstellten Arbeitslinien.

Es handelt sich bei diesem statischen System um einen Einfeldträger mit Kragarm daher werden die Verbindungsmittel auf Abscheren und Zug in Achsrichtung beansprucht. Dadurch wird eine Arbeitslinie für jede Richtung (quer, axial) der Kraftbeanspruchung erstellt.

Es werden die Schrauben Schmid VG-8x300 verwendet, welche folgende Kennwerte aufweisen (Werte aus Zulassung ETA-12/0373 [12] und DIBt Z-9.1-845 [5]):

Tab. 6.4: Schraubenkennwerte aus Zulassungen

Schraube	α	l_{ef}	$K_{ser.v}$	$K_{ser.ax}$	ρ_k	$F_{rk.v}$	$F_{rk.ax}$
VG-8x130	+45°	100 mm	9.000 kN/mm	7.221 kN/mm	350 kg/m ³	6.11 kN	11.0 kN

Alle Angaben gelten für eine einzelne Schrauben, welche auch im Verband angeordnet werden können.

Tab. 6.5: Definition der Variablen

α	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes
l_{ef}	Einschraubtiefe im Holzbauteil
$F_{rk.ax}$	charakteristischer Auszieh widerstand
$F_{rk.v}$	charakteristischer Abscherwiderstand

Die genaue Berechnung der Arbeitslinie wie unter Punkt 3.2 Nachgiebige Verbindungen - Arbeitslinie beschrieben, kann dem Anhang entnommen werden. Die daraus resultierenden Arbeitslinien für die Auswertung ITI-1 sind unter den Abbildungen 6.7 und 6.8 zu sehen.

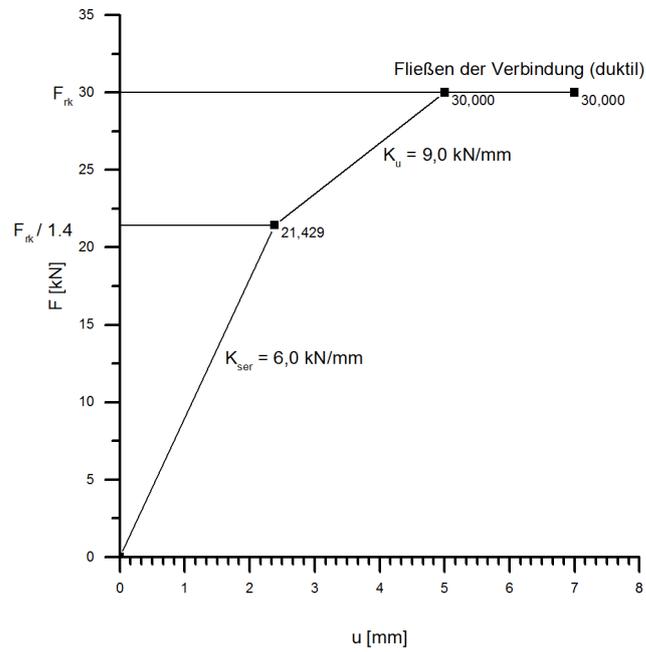


Abb. 6.7: Arbeitslinie Abscherbeanspruchung ITI-1 VG-8x300

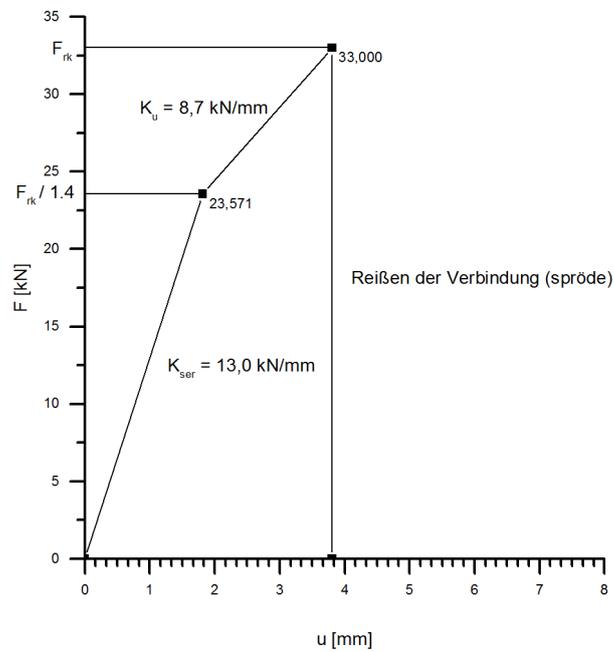


Abb. 6.8: Arbeitslinie Axialbeanspruchung ITI-1 VG-8x300

6.1.3 Baustatische Modellierung

Bei dem baustatischen System (siehe Abbildung 6.9) handelt es sich um einen Einfeldträger mit Kragarm, der eine Auskrangung von einem Meter aufweist. Dieser wird auf den Auflagern gelenkig gelagert. Es wurde für den Versuch eine Sandwichdecke mit einer 6 cm hohen Betonschicht, welche auf einer Zwischenschicht aus 10 cm Holzleichtbetonplatten aufgebracht ist, verwendet. Als Unterzug (Rippe) wurde ein Brettspertholz Rechteckquerschnitt mit einer Stärke von 9 cm gewählt.

Alle auftretenden Lasten werden punktuell als Einzellasten angesetzt (siehe Abbildung 6.9).

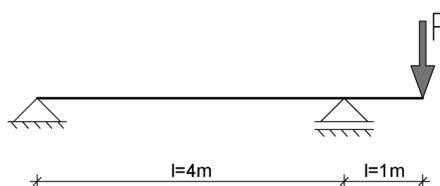


Abb. 6.9: statisches System und Lastansatz

In Abbildung 6.4 ist der Druckversuch (Kragträger) der Versuche CLT-1 bis CLT-3 zu sehen.



Abb. 6.10: Druckversuch - CLT-1 bis CLT-3

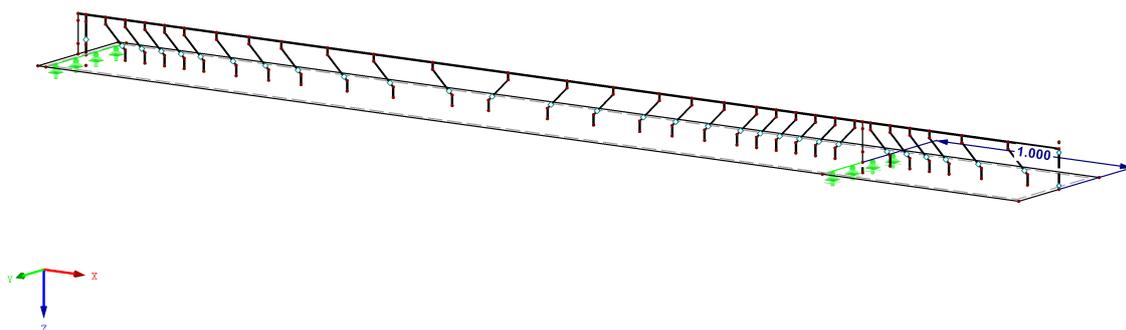
Die benötigten Komponenten für das FEM Modell können dem Punkt 4 Anwendung der Finite Elemente Methode entnommen werden.

Der modellierte Querschnitt für die Versuch ITI-1 bis ITI-5 kann der Abbildung 6.5 entnommen werden.

In der Abbildung 6.11 ist die Modellierung der Verbindungsmittel in einem FEM Programm zu sehen. Dabei wurden die Verbindungsmittel in realer Lage angeordnet, um die entsprechenden Schnittgrößen in den Koppelstäben zu erhalten.

LK 1: Gesamt

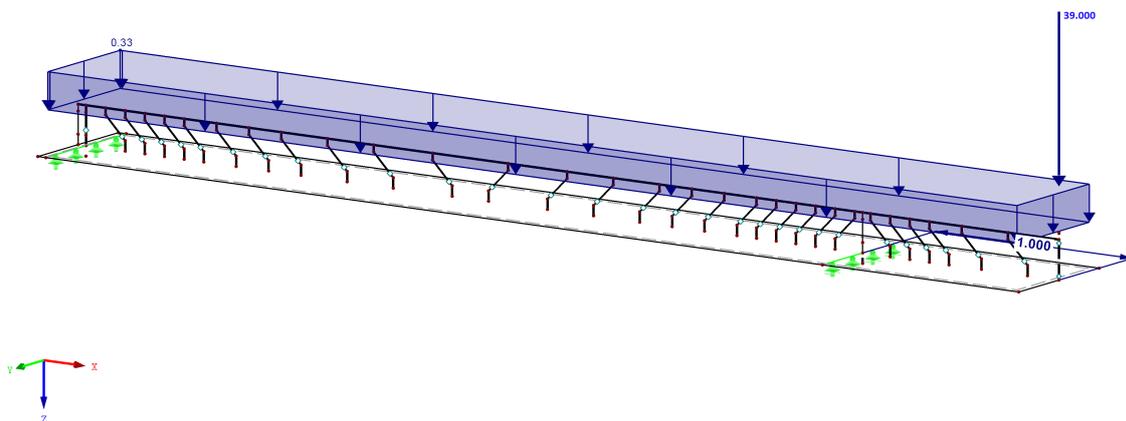
Isometrie

**Abb. 6.11:** Drahtmodell

Als Belastung wurde das Gewicht der Holzleichtbetonplatten als Flächenlast angesetzt. Die Kraft des Kolbens wird als variierende Einzelkraft am Kragarmende angesetzt. Die Lastenansätze können der Abbildung 6.12 entnommen werden.

LK 1: Gesamt
Belastung [kN/m²], [kN]

Isometrie

**Abb. 6.12:** Angesetzte Belastungen

6.1.4 Auswertung Schnittgrößen

Die Auswertung der Schnittgrößen kann dem Punkt 5.1.4 entnommen werden.

Im folgenden werden für die Auswertung ITI-1 bei $F=39\text{ kN}$ (Grenzwert Brettsper Holz) die Stab- und Flächenschnittgrößen exemplarisch dargestellt, um sich ein Bild über die auftretende Schnittgrößenverteilung machen zu können. Dabei sind sehr gut die Zug- und Druckbereiche zu erkennen.

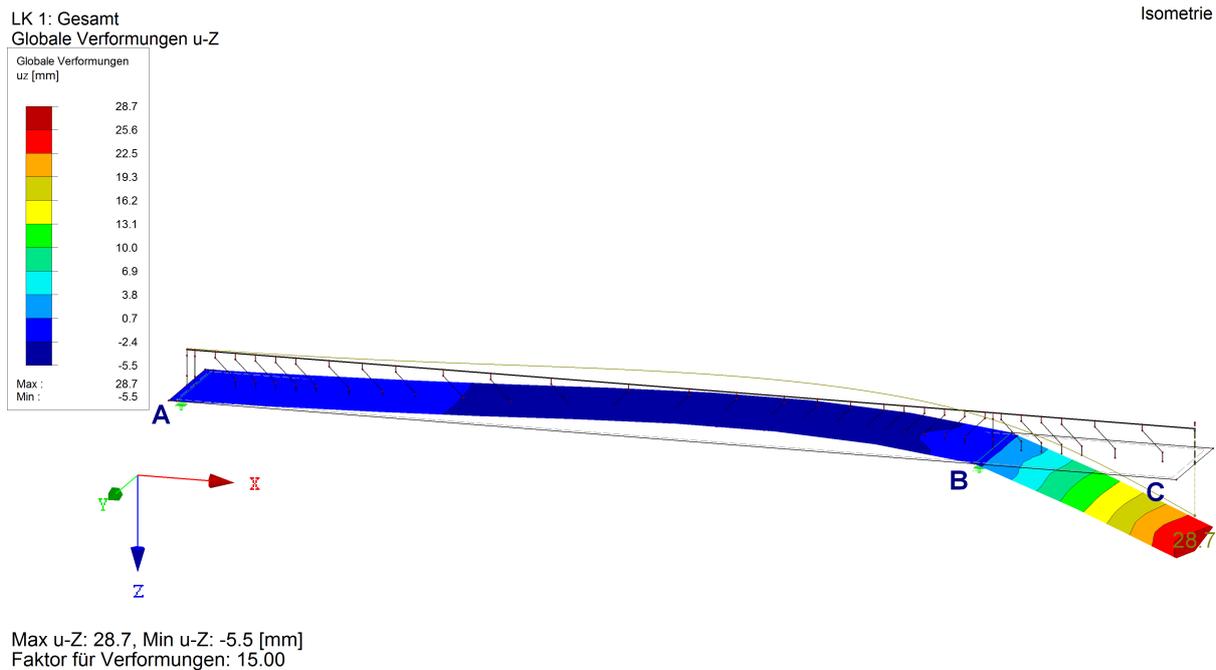


Abb. 6.13: Schnittgrößen Gesamt - Verschiebung u in z -Richtung

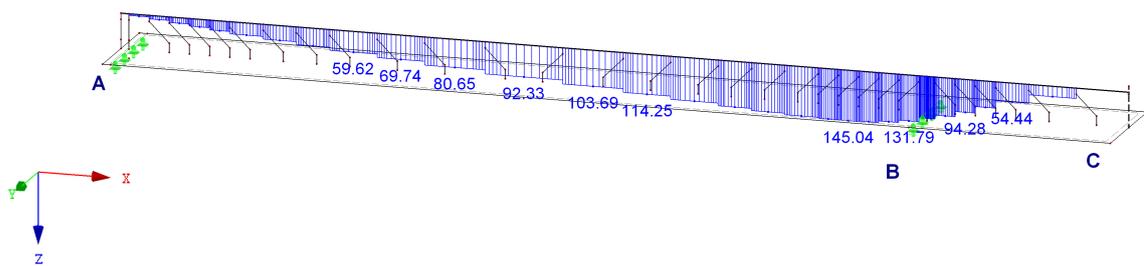
In Abbildung 6.13 ist die Verschiebung des Kragarmendes u_z zu sehen. Diese weist natürlich an Stelle C ihren Maximalwert mit 28.7 mm auf.

Aus der dargestellten Verformung und dem Belastungsbild (siehe Abbildung 6.12) sollte es zu keiner Normalkraft N und einer maximalen Querkraft V_z am Ende des Querschnitts (Stelle C) kommen. Dies ist aber nicht der Fall, da es sich um einen nachgiebig verbundenen Querschnitt mittels 45° geneigten Schrauben handelt. Durch die schrägen Verbindungsmittel kommt es zu einer Normalkrafteinleitung N (siehe Abbildung 6.14) in den Querschnitt und zu einer Verschiebung der maximalen Querkraft V_z (siehe Abbildung 6.15).

Da der Querkraft- und Momentenverlauf miteinander verknüpft sind, kommt es auch beim Momentenverlauf M_y (siehe Abbildung 6.16) zu einer Umverteilung.

LK 1: Gesamt
Stäbe Schnittgrößen N

Isometrie

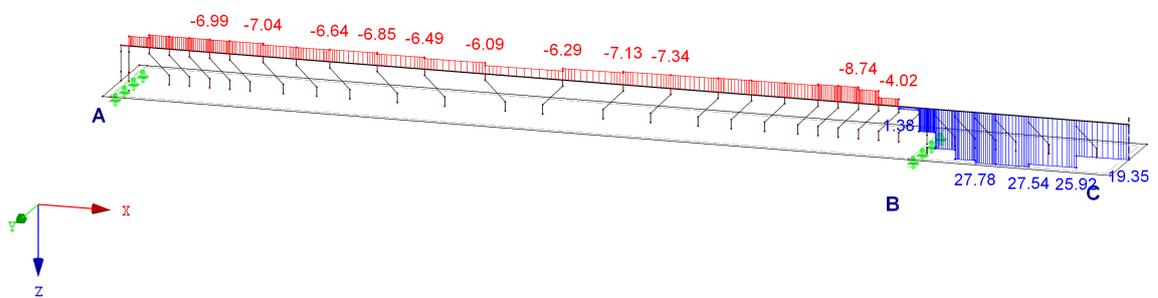


Stäbe Max N: 145.04, Min N: 0.00 [kN]

Abb. 6.14: Schnittgrößen Betonquerschnitt - N

LK 1: Gesamt
Stäbe Schnittgrößen V-z

Isometrie

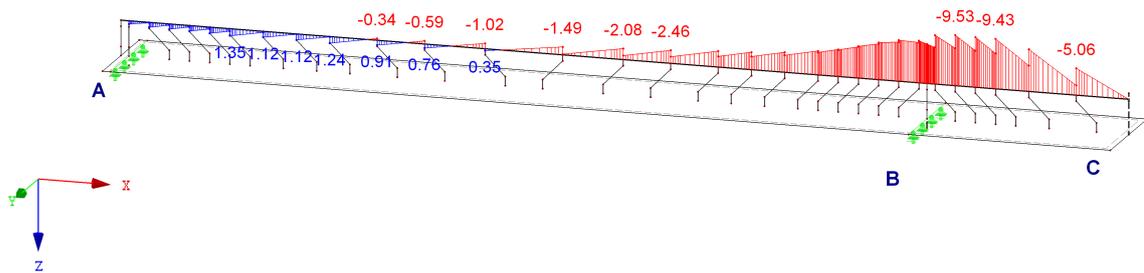


Stäbe Max V-z: 27.78, Min V-z: -8.74 [kN]

Abb. 6.15: Schnittgrößen Betonquerschnitt - Vz

LK 1: Gesamt
Stäbe Schnittgrößen M-y

Isometrie

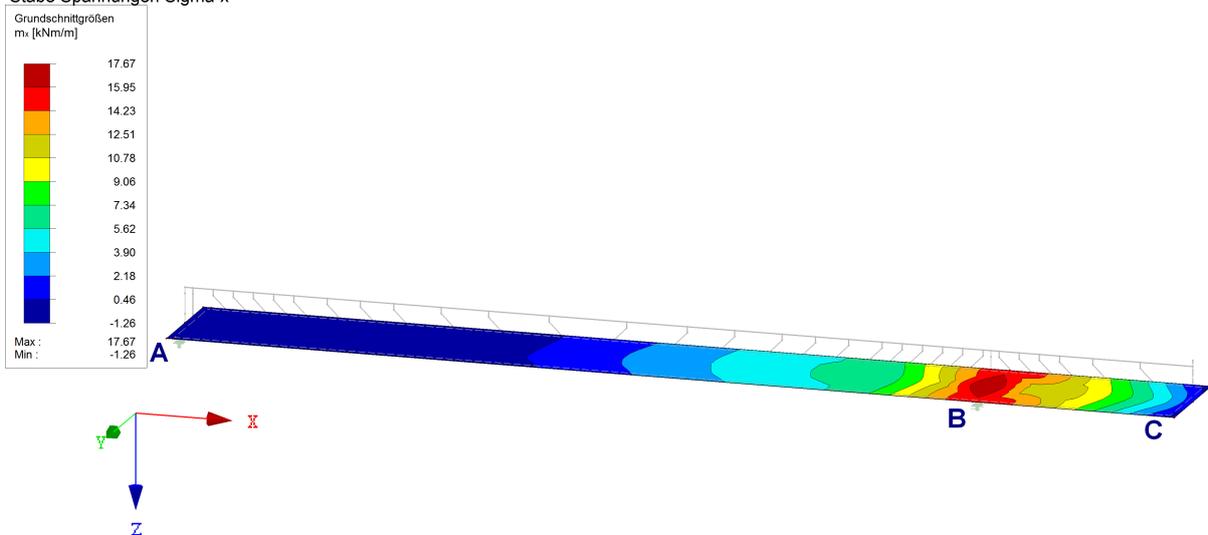


Stäbe Max M-y: 1.35, Min M-y: -9.53 [kNm]

Abb. 6.16: Schnittgrößen Betonquerschnitt - My

LK 1: Gesamt
Flächen Grundschnittgrößen m-x
Stäbe Spannungen Sigma-x

Isometrie



Stäbe Max Sigma-x: $-3.403e+031$, Min Sigma-x: $3.403e+031$ [kN/cm²]
Flächen Max m-x: 17.67, Min m-x: -1.26 [kNm/m]

Abb. 6.17: Schnittgrößen Holzquerschnitt - Moment in x-Richtung

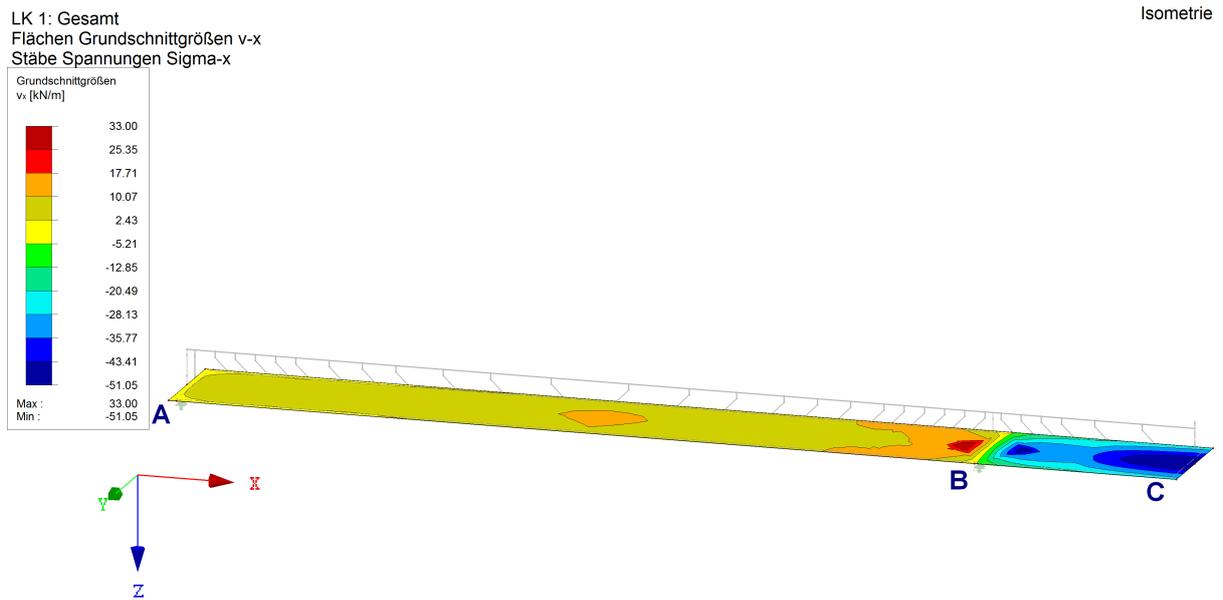


Abb. 6.18: Schnittgrößen Holzquerschnitt - Querkraft in x-Richtung

In Abbildung 6.17 und 6.18 sind die maßgebenden Schnittgrößen für die Brettsperrholzplatte zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass das maximale Moment an Stelle B (Auflager) auftritt, welches aber durch nachgiebige Verbundwirkung der Schrauben etwas verschmiert Richtung Stelle C ist.

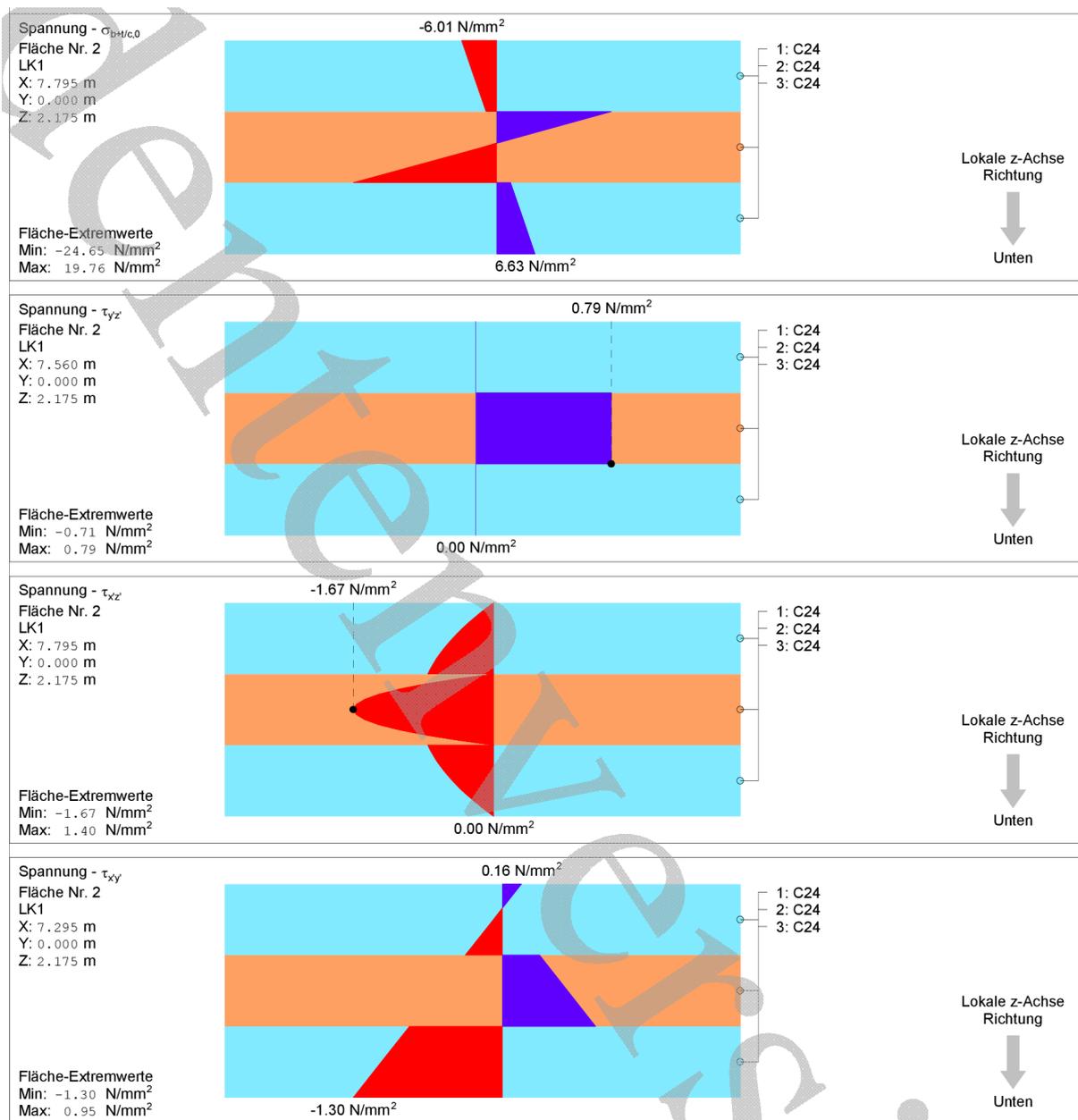


Abb. 6.19: Schnittgrößen Holzquerschnitt - Spannungsverläufe Brettsperrholz - Stelle Mitte B

In dieser Abbildung 6.19 sind die Spannungsverläufe an Stelle B zu sehen. Ein Versagen der Brettsperrholzplatte tritt bei diesem Aufbau mit einer Kraft $F=39$ kN auf. Aufgrund der Lasteinleitung der schrägen Schrauben, kommt es zu einem Schubversagen τ_{xz} in der Mittelebene.

6.1.5 Auswertung Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Versuche beziehungsweise Versuchsgruppen ausgewertet und kommentiert. Dabei wird im Zuge der Parameterstudie versucht, den **Last-Verformungsverlauf der Versuche CLT-1 bis CLT-3** des Institutes so gut wie möglich anzunähern. Dies wird durch Variation des Anfangsverschiebungsmoduls $K_{ser.ax}$ in einem Bereich von $9000 \frac{N}{mm}$ bis $13000 \frac{N}{mm}$ realisiert. Hingegen das Anfangsverschiebungsmodul $K_{ser.v}$ wird mit einem fixen Wert mit $9000 \frac{N}{mm}$ angenommen, dass dieser Wert laut Hersteller sehr realitätsnahe ist.

Die Ergebnisse der Versuche ITI-1 bis ITI-5 sind in Abbildung 6.21 zu sehen, welche die Abweichung zu den Versuchen CLT-1 bis CLT-3 darstellt. Weiters ist der **Grenzwerte der Betonplatte** eingezeichnet.

Grundsätzlich nähern sich die **Ergebnisse der Finite Elemente Methode** sehr gut an den realen Versuchsverlauf (CLT-1 bis CLT3) an. Besonders bei Erreichen der Grenzwerte der Brettsperrholzplatte sind die Verschiebungen mit einem $K_{ser.ax}$ im Bereich von $10000 \frac{N}{mm}$ bis $13000 \frac{N}{mm}$ fast ident.

Im Bereich **unter dem Grenzwert CLT Platte** sind die Verschiebungswerte u_z unter denen des FEM Modells, da es sich um eine linearisierte Arbeitslinie (Bereich bis $\frac{1}{4} R_{ax.rk}$) handelt und der plastische Bereich der Verbindungsmittel noch nicht erreicht ist.

Im Bereich **über dem Grenzwert CLT Platte** sinken die Verschiebungswerte u_z der Versuche ITI-1 bis ITI-5 unter die des FEM Modells, da für das Brettsperrholz- und die Betonplatte eine linear elastisches Materialmodell hinterlegt ist.

Gerade die verwendeten **Arbeitslinien** ermöglichen eine sehr realitätsnahe Nachbildung der Verbindungen auch bis in den **plastischen Bereich** hinein, was zu einer sehr guten Annäherung der Durchbiegung u_z an die experimentell ermittelte Verformungskurve führt. Ohne diese würde es zu sehr viel größeren Abweichungen kommen.

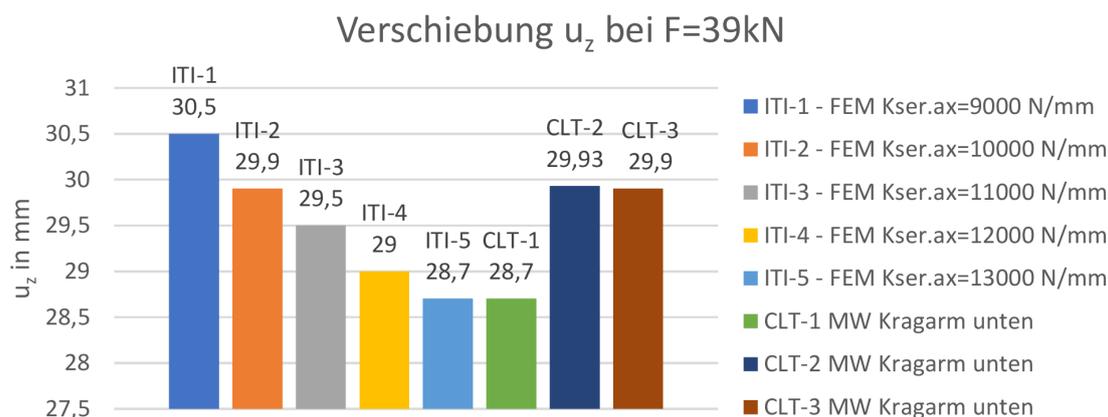


Abb. 6.20: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen CLT 1, 2 und 3 mit FEM Modell

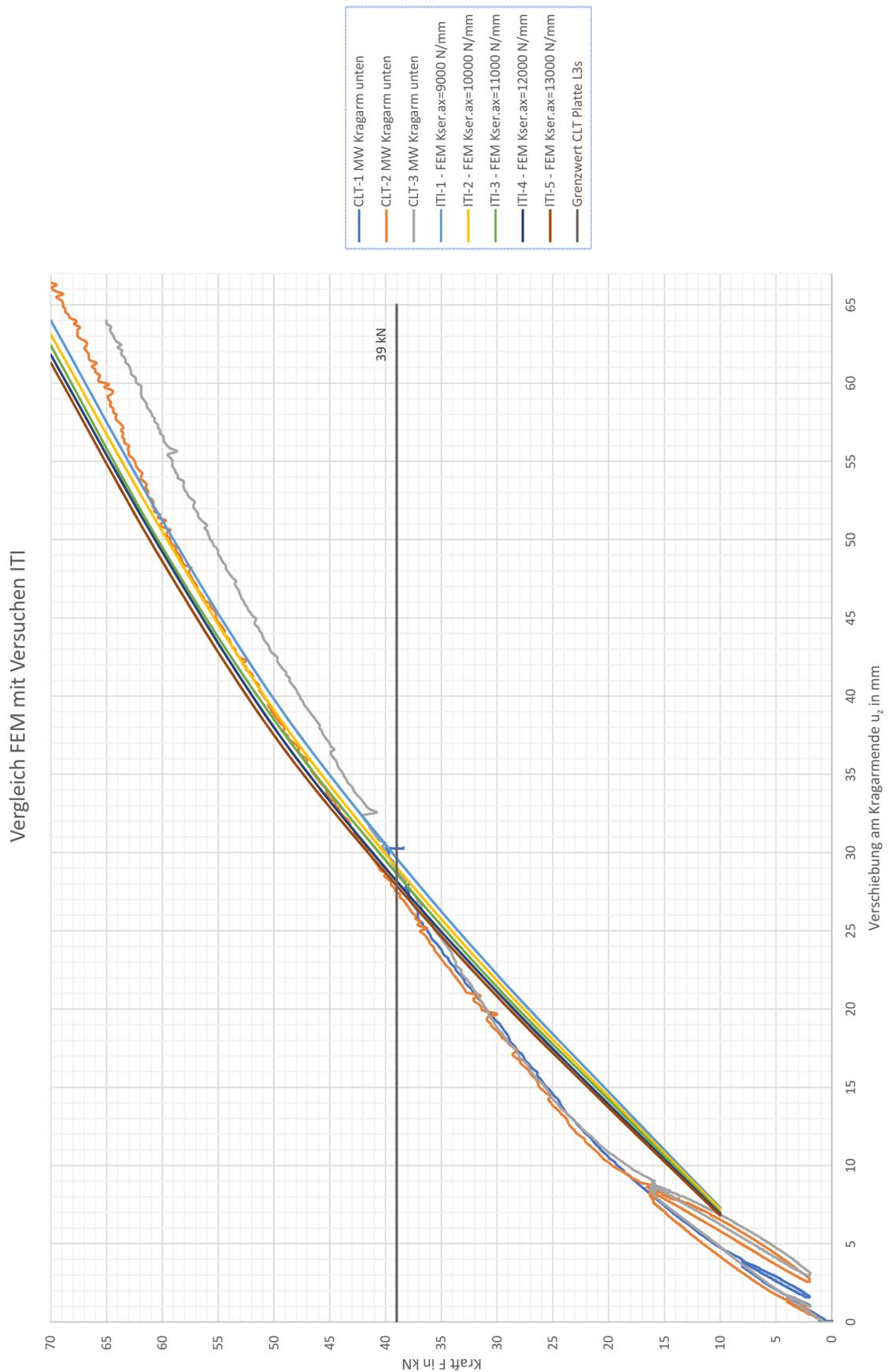


Abb. 6.21: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen CLT 1, 2 und 3 mit FEM Modell

In Abbildung 6.22 und 6.23 ist der Vergleich der Ergebnisse der **Finite Elemente Methode und dem Stabwerksmodell** bei Aufbau laut ITI-1. Eine beispielhafte Berechnung der Steifigkeiten für das Stabwerksmodell können dem **Anhang 1 - Parameterstudie eines Plattenbalkens mit Schraubverbindung** entnommen werden.

Gerade im Balkendiagramm in Abbildung 6.22 ist zu erkennen, dass sich beide Methoden (FEM, Stabwerksmodell) sehr gut an die experimentell ermittelte Verschiebung u_z der Versuche CLT-1 bis CLT-3 annähern. Die Verbindungsmittel befinden sich bei einer Kraft $F = 40 \text{ kN}$ noch im **elastischen Bereich**, daher macht es fast keinen Unterschied mit welcher Methode hier die Verschiebung u_z berechnet wird.

Befinden sich die Verbindungsmittel bereits im **plastischen Bereich der Arbeitslinie** kommt es zu einer deutlichen Abweichung der Verschiebung u_z . Dieses Auftreten ist in Abbildung 6.23 sehr gut zu erkennen, da es bei einem Stabwerksmodell durch die Vernachlässigung des plastischen Verformungsverhaltens der Verbindungsmittel zu deutlich geringen Verschiebungen u_z kommt.

Weiters ist anzumerken, dass das **Stabwerksmodell** nur ein Anfangsverschiebungsmodul auf Abscherbeanspruchung in der Ersatzsteifigkeitsberechnung berücksichtigt, was auch zu den oben genannten deutlichen Abweichungen führt. Das bedeutet, dass das Stabwerksmodell im Vergleich zur Finite Elemente Methode nur bedingt einsetzbar ist.

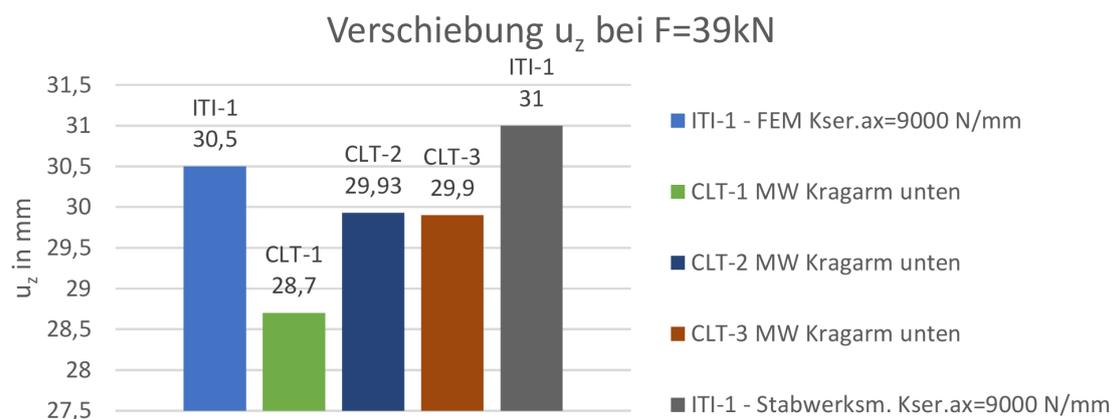


Abb. 6.22: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen CLT 1, 2 und 3 mit FEM und Stabwerksmodell

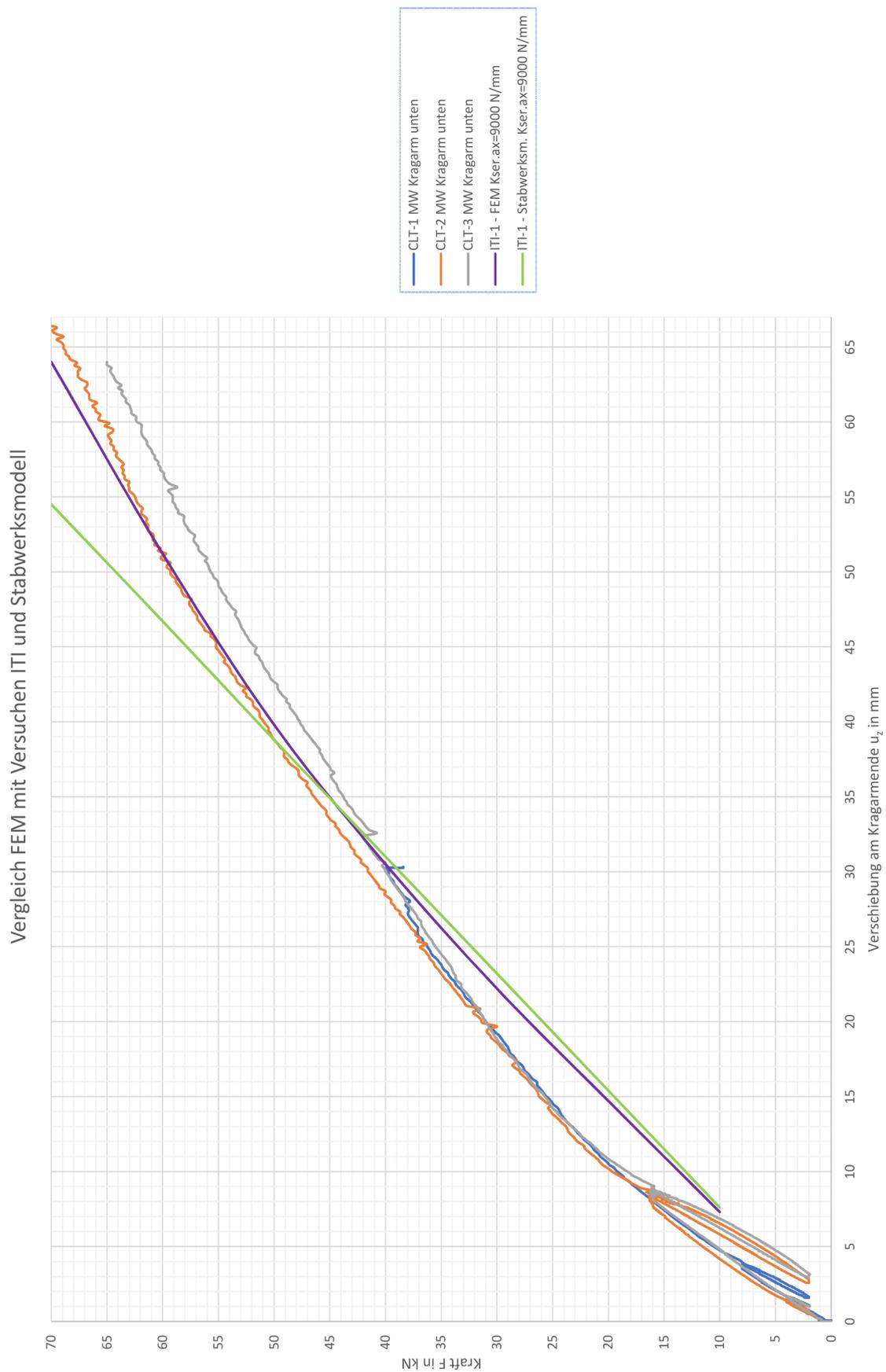


Abb. 6.23: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen CLT 1, 2 und 3 mit FEM und Stabwerksmodell

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Wie ist mit einem Finite Elemente Modell im **Vergleich zu den in den Normen verankerten Berechnungsmethoden** (Gamma- und Schubanalogieverfahren) umzugehen?

Die durchgeführten **Vergleiche und Parameterstudien** zeigen auf, dass die Abweichungen sehr stark vom Ausnutzungsgrad der Durchbiegung w_{inst} abhängig sind. Daher ist eine Modellierung erst ab einem Ausnutzungsgrad von 80% sinnvoll. Ab diesem Grenzwert liegen die Spannungen im Beton- und Holzquerschnitt ca. 3% unter denen des Gamma Verfahrens, sprich auf der unsicheren Seite. Dagegen liegen die Durchbiegung, Kraft im Verbindungsmittel und die Schubspannung auf der sicheren Seite. Dies geschieht in einem Bereich bis +3% gegenüber dem Gamma-Verfahren.

Der **größte Vorteil einer Finite Elemente Methode** liegt in der realitätsnahen Nachbildung der Verbindungsmittel und deren Nachgiebigkeit mittels Arbeitslinien. Dadurch kann eine Kraftweiterleitung durch bereits plastifizierte Verbindungsmittel berücksichtigt werden. Dieser Effekt wird durch keine in den Normen verankerte Berechnungsmethode beachtet. Als Nebeneffekt der Modellierung besteht die Möglichkeit der Betrachtung von Schnittgrößen der einzelnen Verbindungsmittel.

Im **Vergleich zu den anderen erwähnten Berechnungsmethoden** ist die Finite Elemente Methode nicht durch die auftretende Belastung, dem statischen System oder Anordnung (eventuelle Schräglage) der Verbindungsmittel eingeschränkt. Gerade bei den Verbindungsmittel ist die Berücksichtigung der Anfangsverschiebungsmodul K_{ser} nicht nur in Querrichtung auf Abscheren, sondern auch bei Belastung in axialer Richtung des Verbindungsmittels gegeben.

Werden Finite Elemente Modelle dazu verwendet, um **Versuche im Vorfeld zu simulieren** müssen sehr realitätsnahe Annahmen bezüglich der $K_{ser} - Werte$ getroffen werden. Alle Materialkennwerte sind ohne Teilsicherheitsbeiwerte zu betrachten, um mögliche Sicherheitsreserven aufgrund des semiprobabilistischen Teilsicherheitskonzepts zu vermeiden. Die Materialkennwerte und $K_{ser} - Werte$ sollten in einem gewissen Streubereich variiert werden, um mögliche Grenzen der Ergebnisse des Versuchsaufbaus zu erhalten. Dadurch kann eine sehr gute Prognose der Versuchsergebnisse erstellt werden.

Ein weiterer Vorteil ist die **Einschätzung der benötigten Verbindungsmittel**, da diese beliebig angeordnet und nachgebildet werden können. Dies führt nicht nur zu einer Einsparung von Verbindungsmittel in der Praxis, sondern auch bei der Vermeidung von Fehleinschätzungen von Versuchsaufbauten.

Gerade im Hinblick auf eine **wirtschaftliche und zeitsparende Versuchsdurchführung** könnten Modelle, die mit der Finite Elemente Methode entwickelt wurden, die eine Durchführung einer Vielzahl von zeitaufwendigen Versuchen ersparen. Es müssen lediglich die einzelnen benö-

tigten Parameter wie Materialeigenschaften und das Anfangsverschiebungsmodul experimentell ermittelt werden.

Wünschenswert wäre ein **eigenes Modul** in den Finite Elemente Programmen, um gerade die Modellierung mittels der Finite Elemente Methode zu erleichtern und für den Praxisbetrieb wirtschaftlich und zeitsparend zu gestalten.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Barth und W. Rustler. *Finite Elemente in der Baustatik-Praxis: Mit vielen Anwendungsbeispielen*. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk, 2010. ISBN: 978-3-41021-565-3.
- [2] Benjamin Florian Markus Werner. „Holz-Leichtbeton-Verbunddecken analytische und numerische Beschreibung des Tragverhaltens“. Diplomarbeit. Wien: Technische Universität Wien, 2013.
- [3] H. J. Blass. *Trag- und Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen*. Bd. 2710. Forschungsbericht / Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau T. Stuttgart: IRB-Verl., 1995.
- [4] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 1995-1-1/NA Nationaler Anhang - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 2013.
- [5] DIBt. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-845*. 2014.
- [6] *DIN 1052 - Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. Deutschland, Dezember 2008.
- [7] Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Hochreiner. *Holzbau 1 VO Skript*. Sommersemester 2016.
- [8] Dlubal. *Dlubal RFEM 5.07.13 Studentenversion*.
- [9] Dr.-Ing. Jürgen Bergfelder, Hrsg. *Näherungsverfahren zur Berechnung allgemeiner zusammengesetzter hölzerner Biegeträger mit elastischem Verbund*. Bd. 1974. 49. Köln: Der Bauingenieur, 1974.
- [10] ON. *ÖNORM B 1995-1- Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen*. 2015.
- [11] ON. *ÖNORM EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2011.
- [12] Österreichische Institut für Bautechnik. *Europäische Technische Zulassung ETA-12/0373*. 2012.
- [13] Österreichische Institut für Bautechnik. *Europäische Technische Zulassung ETA-13/0699*. 2013.
- [14] K. Rautenstrauch, M. Grosse, S. Lehmann und R. Hartnack. „Baupraktische Dimensionierung von Holz-Beton Verbunddecken“. In: (2003).
- [15] St. Winter, H. Kreuzinger, P. Mestek. „Teilprojekt 15: TP 15 Flächen aus Brettstapeln, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen“. Diss. München: TU München.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Schematischer Ablauf einer FEM-Berechnung [1]	12
3.2	Koordinatensystem des Stabelementes	13
3.3	Beispiel Last-Verschiebungskurve [7]	14
3.4	Bereiche einer Arbeitslinie [7]	15
3.5	Modellbildung Verbindung [7]	16
3.6	Bildung einer Arbeitslinie für Finite Elemente Programm	16
3.7	Mechanisches Modell zur Beschreibung der Schubkraftübertragung	16
3.8	Definition von l_0 zur Berechnung der mitwirkenden Breite [11]	17
3.9	Parameter der mitwirkenden Plattenbreite	17
4.1	Koordinatensystem - Stab	19
4.2	Nichtlinearitäten - Diagramm [8]	21
4.3	Beispielmodell mit Zwischenschicht	23
4.4	Zusammensetzung Modellierung	23
5.1	Plattenbalken-Modell	24
5.2	Zuordnung der Variablen	25
5.3	Arbeitslinie SFS VB-48-7,5x165	28
5.4	statisches System und Lastansatz	28
5.5	Querschnitt SFS-01	29
5.6	Ausschnitt Schraubenanordnung SFS-01	29
5.7	Längenschnitt SFS-01	29
5.8	Spannungspunkte im Querschnitt	30
5.9	Normalspannungsverlauf in x-Richtung - SFS-17	31
5.10	Schubspannungsverlauf in z-Richtung - SFS-17	31
5.11	Spannungsverlauf - Schnitt durch Querschnitt - SFS-17	31
5.12	Last-Verformungskurve SFS-17	32
5.13	Bereich der betrachteten Koppelstäbe im Gesamtmodell	32
5.14	Verbindungsmittel im elastischen Bereich - Schnittgröße V_z	33
5.15	Verbindungsmittel im plastischen Bereich - Schnittgröße V_z	33
5.16	Versuchsaufbau SFS-01 - Vergleich Berechnungsmethoden	34
5.17	Versuchsaufbau SFS-01 - Parameter und Ergebnisse	34
5.18	Versuchsaufbau SFS-02 - Vergleich Berechnungsmethoden	35
5.19	Versuchsaufbau SFS-02 - Parameter und Ergebnisse	35
5.20	Versuchsaufbau SFS-03 bis SFS-07 - Einfluss Querschnittbreite Beton	36
5.21	Versuchsaufbau SFS-03 bis SFS-07 - Parameter und Ergebnisse	36
5.22	Versuchsaufbau SFS-08 bis SFS-12 - Einfluss Ausnutzungsgrad durch Variation Holzquerschnitt	37
5.23	Versuchsaufbau SFS-08 bis SFS-12 - Parameter und Ergebnisse	37
5.24	Versuchsaufbau SFS-13 bis SFS-16 - Einfluss effektiver Verbindungsmittelabstand	38
5.25	Versuchsaufbau SFS-13 bis SFS-16 - Parameter und Ergebnisse	38
5.26	Versuchsaufbau SFS-17 - Vergleich Berechnungsmethoden	39

5.27	Versuchsaufbau SFS-17 - Parameter und Ergebnisse	39
5.28	Versuchsaufbau Forschungsbericht [3]	40
5.29	Zuordnung der Variablen	41
5.30	Verlauf der Näherungsfunktion (allgemein) [3]	43
5.31	Vergleich Arbeitslinie und Näherungsfunktion	44
5.32	statisches System und Lastansatz	44
5.33	Querschnitt SFS-100 bis SFS-129	45
5.34	Ausschnitt Schraubenanordnung SFS-100 bis SFS-129	45
5.35	Längenschnitt SFS-100 bis SFS-129	45
5.36	Kraf-Verformungsdiagramm SCH-1 aus Forschungsbericht [3]	46
5.37	Kraf-Verformungsdiagramm SCH-1 aus Forschungsbericht [3]	46
5.38	Versuchsaufbau SFS-100 bis SFS-109 - Abweichung Gamma Verfahren	47
5.39	Versuchsaufbau SFS-110 - Abweichung Gamma Verfahren	48
5.40	Versuchsaufbau SFS-110 bis SFS-119 - Abweichung Gamma Verfahren	48
5.41	Versuchsaufbau SFS-110 bis SFS-119 - Abweichung Forschungsbericht	49
5.42	Versuchsaufbau SFS-110 bis SFS-119 - Abweichung Forschungsbericht	49
5.43	Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Gamma Verfahren	50
5.44	Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Gamma Verfahren	50
5.45	Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Forschungsbericht	51
5.46	Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Forschungsbericht	51
6.1	Laborversuch CLT-1 bis CLT-3	52
6.2	Allgemeine Definition der Steifigkeitsmatrix [8]	53
6.3	Zuordnung der Variablen	54
6.4	Druckversuch - CLT-1 bis CLT-3	55
6.5	Querschnitt CLT-1 bis CLT-3	55
6.6	Längenschnitt CLT-1 bis CLT-3	55
6.7	Arbeitslinie Abscherbeanspruchung ITI-1 VG-8x300	57
6.8	Arbeitslinie Axialbeanspruchung ITI-1 VG-8x300	57
6.9	statisches System und Lastansatz	58
6.10	Druckversuch - CLT-1 bis CLT-3	58
6.11	Drahtmodell	59
6.12	Angesetzte Belastungen	59
6.13	Schnittgrößen Gesamt - Verschiebung u in z-Richtung	60
6.14	Schnittgrößen Betonquerschnitt - N	61
6.15	Schnittgrößen Betonquerschnitt - Vz	61
6.16	Schnittgrößen Betonquerschnitt - My	62
6.17	Schnittgrößen Holzquerschnitt - Moment in x-Richtung	62
6.18	Schnittgrößen Holzquerschnitt - Querkraft in x-Richtung	63
6.19	Schnittgrößen Holzquerschnitt - Spannungsverläufe Brettsperrholz - Stelle Mitte B	64
6.20	Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen CLT 1, 2 und 3 mit FEM Modell	65
6.21	Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen CLT 1, 2 und 3 mit FEM Modell	66
6.22	Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen CLT 1, 2 und 3 mit FEM und Stabwerksmodell	67
6.23	Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen CLT 1, 2 und 3 mit FEM und Stabwerksmodell	68
8.1	Versuchsaufbau SFS-01 - Vergleich Berechnungsmethoden	84
8.2	Versuchsaufbau SFS-02 - Vergleich Berechnungsmethoden	84

8.3	Versuchsaufbau SFS-17 - Vergleich Berechnungsmethoden	85
8.4	Versuchsaufbau SFS-03 bis SFS-07 - Einfluss Querschnittbreite Beton	85
8.5	Versuchsaufbau SFS-08 bis SFS-12 - Einfluss Ausnutzungsgrad durch Variation Holzquerschnitt	86
8.6	Versuchsaufbau SFS-13 bis SFS-16 - Einfluss effektiver Verbindungsmittelabstand	86
9.1	Versuchsaufbau SFS-110 - Abweichung Gamma Verfahren	110
9.2	Versuchsaufbau SFS-110 bis SFS-119 - Abweichung Forschungsbericht	110
9.3	Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Gamma Verfahren	111
9.4	Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Forschungsbericht	111

Tabellenverzeichnis

3.1	Zusammenfassung der Materialkennwerte [15]	18
4.1	Materialdefinition eines gewichtslosen Stahlquerschnitt	20
4.2	Berechnungsparameter für FEM Programm	22
5.1	Definition der Materialkennwerte	25
5.2	Definition der Variablen	25
5.3	Auswertungsparameter SFS-01 bis SFS-02	25
5.4	Auswertungsparameter SFS-03 bis SFS-16	26
5.5	Auswertungsparameter SFS-17	26
5.6	Auswertungsparameter SFS-18 bis SFS-20	27
5.7	Schraubenkennwerte aus Zulassung [13]	27
5.8	Definition der Variablen	27
5.9	Definition der Spannungspunkte	30
5.10	Definition der Materialkennwerte	41
5.11	Definition der Variablen	41
5.12	Auswertungsparameter SFS-100 bis SFS-109	41
5.13	Auswertungsparameter SFS-110 bis SFS-119	42
5.14	Auswertungsparameter SFS-120 bis SFS-129	42
5.15	Schraubenkennwerte aus Zulassung [13]	42
5.16	Definition der Variablen	43
5.17	Mittelwerte Last-Verschiebungs-Polygonzüge [3]	43
6.1	Definition der Materialkennwerte	53
6.2	Definition der Variablen	54
6.3	Auswertungsparameter ITI-1 bis ITI-5	54
6.4	Schraubenkennwerte aus Zulassungen	56
6.5	Definition der Variablen	56

Kapitel 8

Anhang 1 - Parameterstudie eines Plattenbalkens mit Schraubverbindung

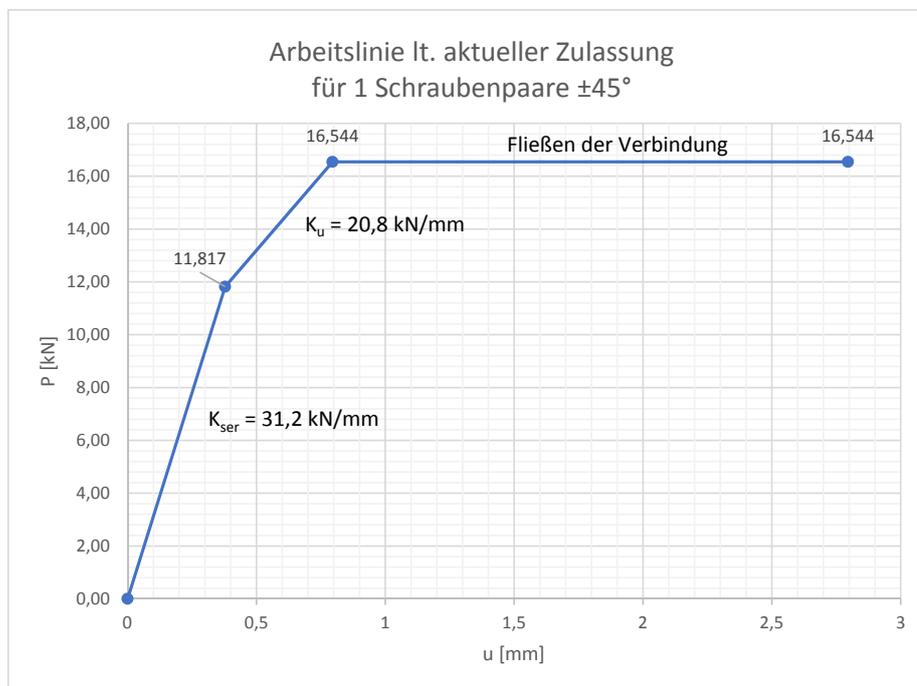
Arbeitslinie SFS VB-48-7,5x165

Arbeitslinien Abscherbeanspruchung	
$R_{v,k}$	16,5438 kN
$R_{v,k} / 1,4$	11,817 kN
K_{ser}	31200 kN/m
K_u	20800 kN/m

SFS Berechnungen - Zulassung	
l_{ef}	130 mm
k_a	1,414
ρ_k	350 kg/m ³
$R_{v,k}$	16,5 kN

Werte für RFEM	
x	y
0	0
0,000379	11,817
0,000795	16,544

Werte für Diagramm	
x	y
0	0
0,378750	11,817
0,795375	16,544
2,795375	16,544



Auswertung SFS-01 bis SFS-20

SFS-1

 $b_{\text{Beton}}=1,3\text{m}; b_{\text{Holz}}=24\text{cm}; h_{\text{Holz}}=42\text{cm}; s_{\text{sf}}=9,5\text{cm}$

	u_z [mm]	$\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [kN/cm ²]	$\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [kN/cm ²]	$\tau_{z,\text{Holz},5}(4/5)$ [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	Abweichung u_z [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [%]	Abweichung $\tau_{z,\text{Holz},5}(5)$ [%]	Abweichung F_{verb} [%]
Gamma Verfahren	3,042	0,298	0,453	0,469	9,17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Schubanalogie	3,030	0,297	0,446	0,511	7,83	0,4	0,3	1,5	-9,0	14,6
HBV	3,050	0,292	0,448	0,626	7,82	-0,3	2,0	1,1	-33,5	14,7
Stabwerksmodell	3,415	0,323	0,428	0,510	8,69	-12,3	-8,4	5,5	-8,7	5,2
RFEM	3,573	0,311	0,416	0,510	9,15	-17,5	-4,4	8,2	-8,7	0,2
Standardabweichung	0,228	0,011	0,014	0,053	0,602					
Mittelwert	3,222	0,304	0,438	0,525	8,532					

SFS-18

starrer Verbund ($\nu=1$)

	u_z [mm]	$\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [kN/cm ²]	$\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [kN/cm ²]	$\tau_{z,\text{Holz},5}(4/5)$ [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	Abweichung u_z [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [%]	Abweichung $\tau_{z,\text{Holz},5}(5)$ [%]	Abweichung F_{verb} [%]
Gamma Verfahren	2,552	0,471	0,398	0,485	10,73	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RFEM	2,593	0,299	0,359	0,485	17,35	-1,6	36,5	9,8	0,0	-61,7
Standardabweichung	0,021	0,086	0,020	0,000	3,310					
Mittelwert	2,573	0,385	0,379	0,485	14,040					

SFS-2

 $b_{\text{Beton}}=0,65\text{m}; b_{\text{Holz}}=24\text{cm}; h_{\text{Holz}}=42\text{cm}; s_{\text{el}}=9,5\text{cm}$

	u_z [mm]	$\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [kN/cm ²]	$\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [kN/cm ²]	$\tau_{z,\text{Holz},5}(4/5)$ [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	Abweichung u_z [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [%]	Abweichung $\tau_{z,\text{Holz},5}(5)$ [%]	Abweichung F_{verb} [%]
Gamma Verfahren	1,705	0,228	0,239	0,238	4,41	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Schubanalogie	1,699	0,224	0,234	0,292	3,77	0,4	1,8	2,1	-22,7	14,5
HBV	1,714	0,226	0,237	0,313	3,76	-0,5	0,9	0,8	-31,5	14,7
Stabwerksmodell	1,921	0,241	0,228	0,267	4,21	-12,7	-5,7	4,6	-12,2	4,5
RFEM	1,981	0,242	0,222	0,266	4,42	-16,2	-6,1	7,1	-11,8	-0,2
Standardabweichung	0,122	0,008	0,006	0,025	0,295					
Mittelwert	1,804	0,232	0,232	0,275	4,114					

SFS_19

starrer Verbund ($\nu=1$)

	u_z [mm]	$\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [kN/cm ²]	$\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [kN/cm ²]	$\tau_{z,\text{Holz},5}(5)$ [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	Abweichung u_z [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Beton}}(1)$ [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Holz}}(6)$ [%]	Abweichung $\tau_{z,\text{Holz},5}(5)$ [%]	Abweichung F_{verb} [%]
Gamma Verfahren	1,276	0,236	0,199	0,242	5,37	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RFEM	1,536	0,247	0,196	0,250	8,18	-20,4	-4,7	1,5	-3,3	-52,3
Standardabweichung	0,130	0,006	0,002	0,004	1,405					
Mittelwert	1,406	0,242	0,198	0,246	6,775					

SFS-17
 $b_{\text{Beton}}=0,65\text{m}$; $b_{\text{Holz}}=12\text{cm}$; $h_{\text{Holz}}=18\text{cm}$; $s_{\text{el}}=9,5\text{cm}$

	u_z [mm]	$\sigma_{x,\text{Beton}}$ (1) [kN/cm ²]	$\sigma_{x,\text{Holz}}$ (6) [kN/cm ²]	$\tau_{z,\text{Holz.5}}$ (4/5) [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	Abweichung u_z [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Beton}}$ (1) [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Holz}}$ (6) [%]	Abweichung $\tau_{z,\text{Holz.5}}$ (5) [%]	Abweichung F_{verb} [%]
Gamma Verfahren	15,461	1,017	1,335	0,780	9,99	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Schubanalogie	15,423	1,004	1,345	0,793	8,96	0,2	1,3	-0,7	-1,7	10,3
HBV	15,557	0,983	1,353	1,460	9,00	-0,6	3,3	-1,3	-87,2	9,9
Stabwerksmodell	15,726	1,008	1,321	0,787	10,05	-1,7	0,9	1,0	-0,9	-0,6
RFEM	16,096	0,998	1,314	0,788	10,26	-4,1	1,9	1,6	-1,0	-2,7
Standardabweichung	0,245	0,011	0,014	0,269	0,556					
Mittelwert	15,653	1,002	1,334	0,922	9,652					

SFS-20
 starrer Verbund ($\nu=1$)

	u_z [mm]	$\sigma_{x,\text{Beton}}$ (1) [kN/cm ²]	$\sigma_{x,\text{Holz}}$ (6) [kN/cm ²]	$\tau_{z,\text{Holz.5}}$ (4/5) [N/mm ²]	F_{verb} [kN]	Abweichung u_z [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Beton}}$ (1) [%]	Abweichung $\sigma_{x,\text{Holz}}$ (6) [%]	Abweichung $\tau_{z,\text{Holz.5}}$ (5) [%]	Abweichung F_{verb} [%]
Gamma Verfahren	15,461	0,924	1,289	0,953	10,54	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RFEM	14,254	1,008	1,321	0,801	15,32	7,8	-9,1	-2,5	15,9	-45,4
Standardabweichung	0,604	0,042	0,016	0,076	2,390					
Mittelwert	14,858	0,966	1,305	0,877	12,930					

Ausw.	Parameter						RFEM						Gamma Verfahren						Abw. RFEM - Gamma Verfahren (100%)						NW
	g _k [kN/m]	q _k [kN/m]	s _{ef} [cm]	b _{Beton} [m]	b _{Hoiz} [cm]	h _{Hoiz} [cm]	U _{RFEM} [mm]	σ _{x,Beton} (1) [kN/cm ²]	σ _{x,Hoiz} (6) [kN/cm ²]	T _{z,Hoiz,S} (5) [N/mm ²]	F _{verb} [kN]	U _{Gamma} [mm]	σ _{x,Beton} (1) [kN/cm ²]	σ _{x,Hoiz} (6) [kN/cm ²]	T _{z,Hoiz,S} (5) [N/mm ²]	F _{verb} [kN]	U _z [%]	σ _{x,Beton} (1) [%]	σ _{x,Hoiz} (6) [%]	T _{z,Hoiz,S} (4) [%]	F _{verb} [%]	W _{inst} [-]			
SFS-03	0,912	0,936	9,50	0,24	24,0	42,0	0,914	0,176	0,095	0,100	1,42	0,806	0,165	0,099	0,090	1,40	11,82	6,41	-4,61	9,51	1,27	0,04			
SFS-04	1,672	1,716	9,50	0,44	24,0	42,0	1,447	0,214	0,158	0,186	2,88	1,257	0,200	0,168	0,163	2,86	13,16	6,33	-6,61	12,62	0,74	0,06			
SFS-05	2,470	2,535	9,50	0,65	24,0	42,0	1,981	0,242	0,222	0,266	4,42	1,705	0,228	0,239	0,238	4,41	13,94	5,78	-7,74	10,54	0,31	0,09			
SFS-06	3,724	3,822	9,50	0,98	24,0	42,0	2,797	0,279	0,321	0,392	6,83	2,390	0,265	0,349	0,356	6,83	14,56	4,99	-8,59	9,23	-0,04	0,12			
SFS-07	4,940	5,070	9,50	1,30	24,0	42,0	3,573	0,311	0,416	0,510	9,15	3,042	0,298	0,453	0,469	9,17	14,86	4,17	-8,92	8,03	-0,20	0,15			
SFS-08	2,470	2,535	9,50	0,65	24,0	42,0	1,981	0,242	0,222	0,266	4,42	1,705	0,228	0,239	0,238	4,41	13,94	5,78	-7,74	10,54	0,31	0,09			
SFS-09	2,470	2,535	9,50	0,65	20,0	30,0	4,372	0,410	0,426	0,403	6,61	3,988	0,406	0,455	0,370	6,59	8,79	1,07	-6,78	8,13	0,31	0,20			
SFS-10	2,470	2,535	9,50	0,65	14,0	24,0	8,512	0,631	0,789	0,626	8,41	7,956	0,636	0,827	0,626	8,27	6,53	-0,82	-4,83	0,04	1,63	0,41			
SFS-11	2,470	2,535	9,50	0,65	12,0	18,0	16,096	0,998	1,314	0,788	10,26	15,461	1,017	1,355	0,780	9,99	3,95	-1,88	-3,09	1,06	2,63	0,79			
SFS-12	2,470	2,535	9,50	0,65	12,0	16,0	19,739	1,167	1,512	0,811	10,89	19,119	1,193	1,552	0,758	10,58	3,14	-2,21	-2,63	6,54	2,84	0,97			
SFS-13	2,470	2,535	9,50	0,65	14,0	24,0	8,512	0,631	0,789	0,626	8,41	7,956	0,636	0,827	0,626	8,27	6,53	-0,82	-4,83	0,04	1,63	0,41			
SFS-14	2,470	2,535	19,00	0,65	14,0	24,0	9,804	0,669	0,833	0,646	14,27	9,123	0,686	0,887	0,605	15,47	6,95	-2,48	-6,53	6,39	-8,39	0,46			
SFS-15	2,470	2,535	9,50	0,65	12,0	18,0	16,096	0,998	1,314	0,788	10,26	15,461	1,017	1,355	0,780	9,99	3,95	-1,88	-3,09	1,06	2,63	0,79			
SFS-16	2,470	2,535	19,00	0,65	12,0	18,0	18,110	1,060	1,359	0,766	16,54	17,162	1,100	1,414	0,834	18,99	5,24	-3,81	-4,04	-8,89	-14,83	0,87			

Diagramme SFS-01 bis SFS-20

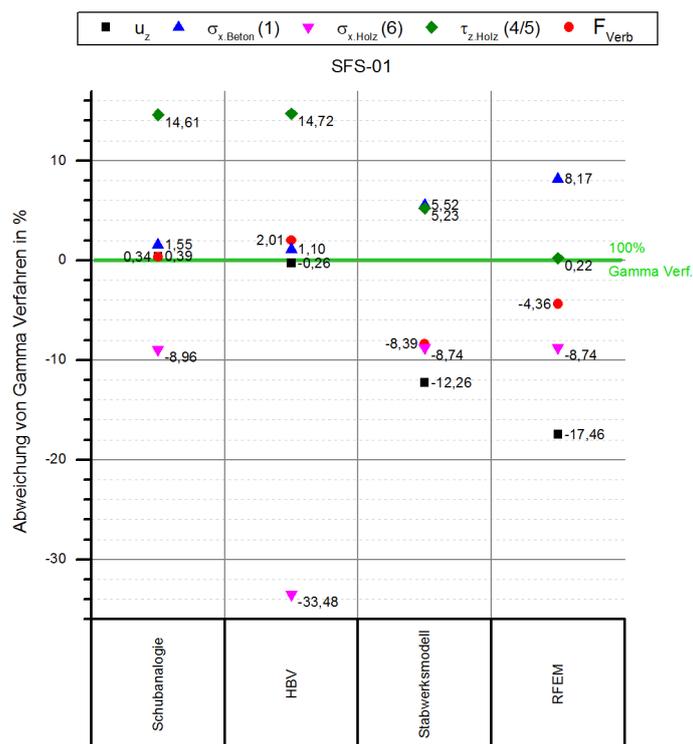


Abb. 8.1: Versuchsaufbau SFS-01 - Vergleich Berechnungsmethoden

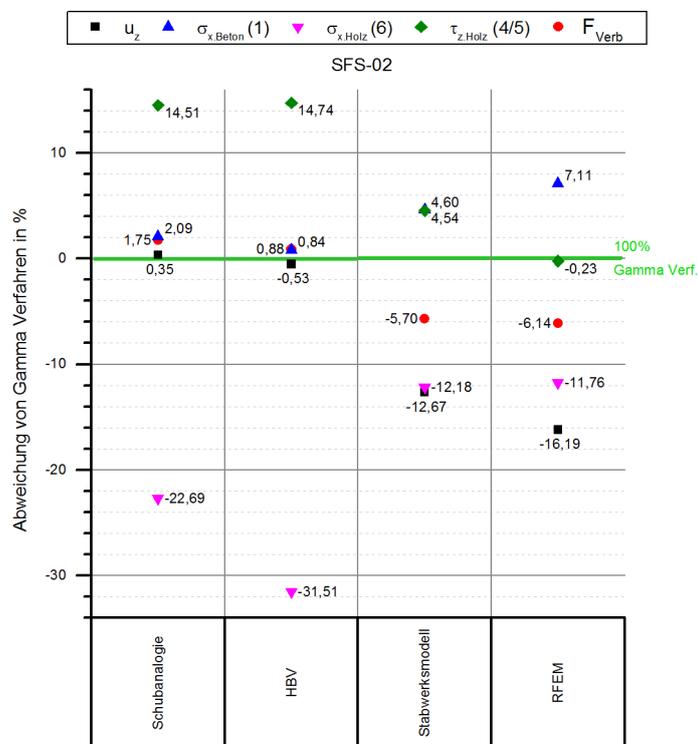


Abb. 8.2: Versuchsaufbau SFS-02 - Vergleich Berechnungsmethoden

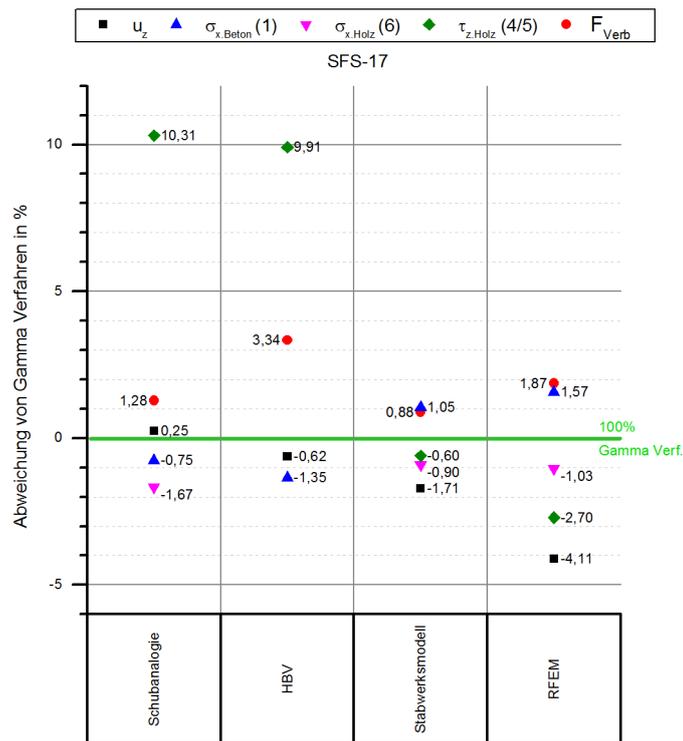


Abb. 8.3: Versuchsaufbau SFS-17 - Vergleich Berechnungsmethoden

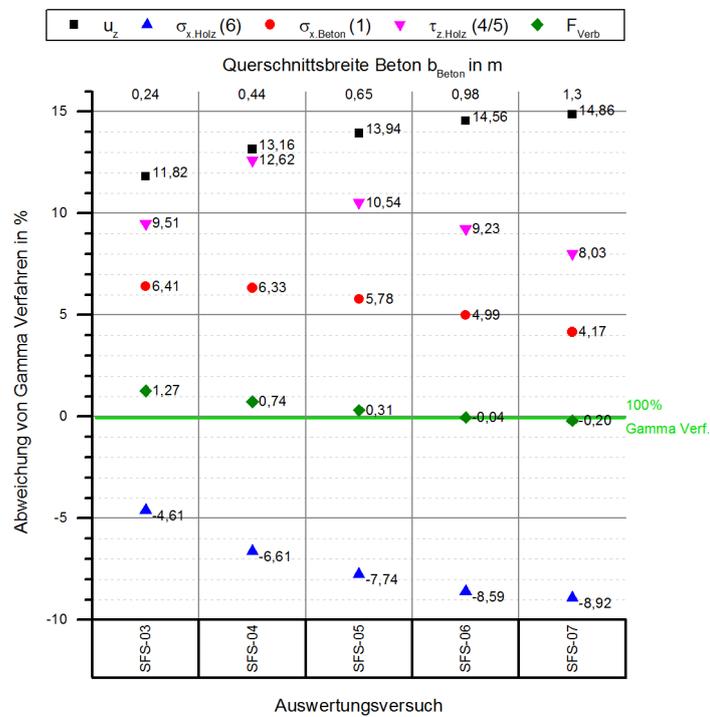


Abb. 8.4: Versuchsaufbau SFS-03 bis SFS-07 - Einfluss Querschnittsbreite Beton

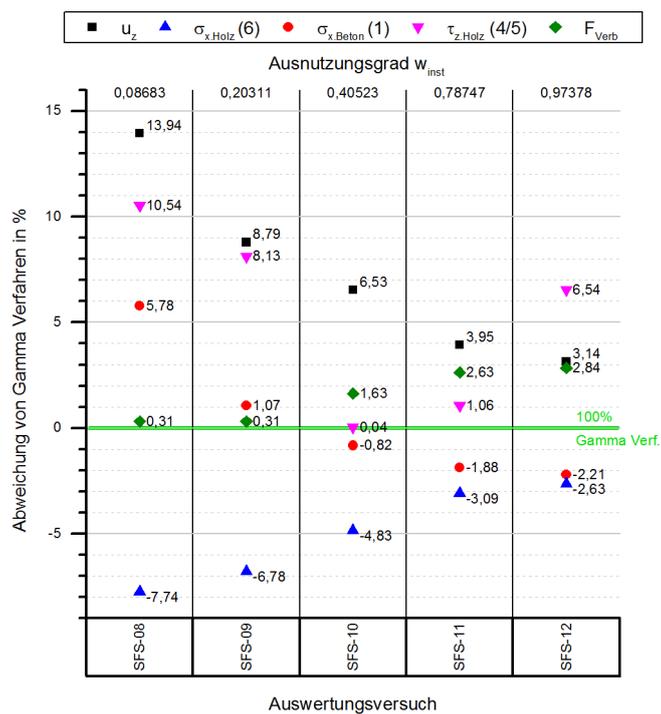


Abb. 8.5: Versuchsaufbau SFS-08 bis SFS-12 - Einfluss Ausnutzungsgrad durch Variation Holzquerschnitt

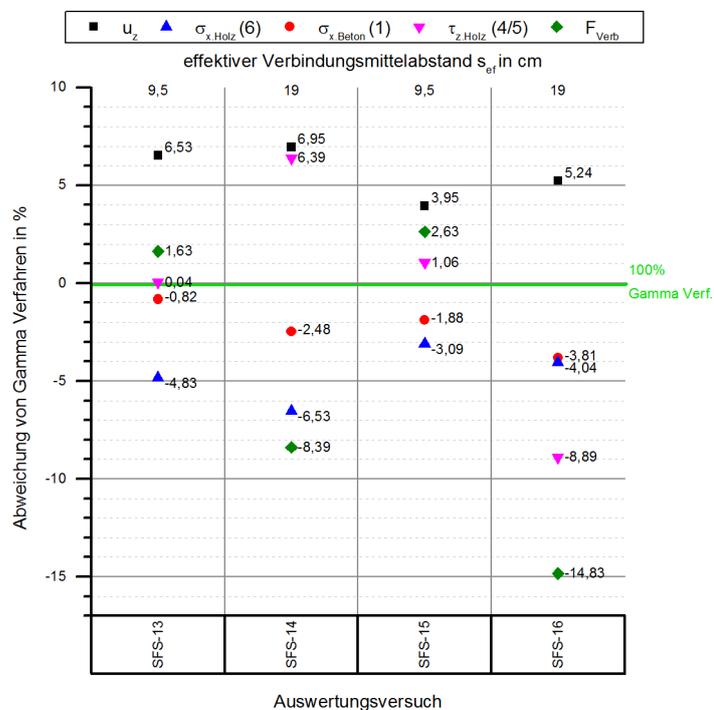


Abb. 8.6: Versuchsaufbau SFS-13 bis SFS-16 - Einfluss effektiver Verbindungsmittelabstand

Berechnung SFS-01 bis SFS-20



Gamma - Verfahren nach ÖNORM B 1995-1-1:2015 Anhang B

Angabe:

Stützweite: $l := 5.89 \text{ m}$

Balkenachsabstand: $b := 1.3 \text{ m}$

Balkenabmessungen: $b_h := 0.24 \text{ m}$ $h_h := 0.42 \text{ m}$

Beton: C20/25

Nutzlast: $q := 3.90 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Anzahl der Verbinderreihen: 1

Nutzungsstufe: 1

Materialkennwerte und Teilsicherheitsbeiwerte: C24 Vollholz

Nutzungsstufe: 1 KLED: mittel $k_{mod} := 0.8$ $\gamma_M := 1.3$ $k_{def} := 0.6$

Werte laut ÖNORM B 1995-1-1:2015

Vollholz (Grundmaterial Nadelholz C24): *lt. EN338*

$$E_{0,mean} := 1100 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad G_{0,mean} := 69 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{m,k} := 2.4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad f_{m,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 1.477 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{v,k} := 0.23 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad f_{v,d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0.142 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \textit{lt. ÖNORM B 1995-1-1:2015 6.1.7 Seite 55}$$

$$\rho_k := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**Schnittgrößen SLS + ULS:**

$$g_k := 3.8 \frac{kN}{m^2} \cdot b = 4.94 \frac{kN}{m} \quad (\text{siehe Lastaufstellung}) \quad q_k := b \cdot q = 5.07 \frac{kN}{m}$$

$$\gamma_Q := 1.5 \quad \gamma_G := 1.35 \quad \psi_2 := 0.3 \quad \text{Kategorie A: Wohngebäude}$$

$$\underline{\text{ULS}} \quad g_{d,ULS} := g_k \cdot \gamma_G + q_k \cdot \gamma_Q = 14.274 \frac{kN}{m}$$

$$M_{ULS} := \frac{g_{d,ULS} \cdot l^2}{8} = 61.899 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad V_{ULS} := \frac{l \cdot g_{d,ULS}}{2} = 42.037 \text{ kN}$$

$$\underline{\text{SLS - charakteristisch}} \quad g_{d,SLS,c} := g_k + q_k = 10.01 \frac{kN}{m}$$

$$M_{SLS,c} := \frac{g_{d,SLS,c} \cdot l^2}{8} = 43.408 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad V_{SLS,c} := \frac{l \cdot g_{d,SLS,c}}{2} = 29.479 \text{ kN}$$

$$\underline{\text{SLS - quasi ständig}} \quad g_{d,SLS,qs} := g_k + q_k \cdot \psi_2 = 6.461 \frac{kN}{m}$$

$$M_{SLS,qs} := \frac{g_{d,SLS,qs} \cdot l^2}{8} = 28.018 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad V_{SLS,qs} := \frac{l \cdot g_{d,SLS,qs}}{2} = 19.028 \text{ kN}$$

Mitwirkende Plattenbreite:

lt. ÖNORM B 1992-1-1:2011 5.3.2.1 ab Seite 61

$$l_0 := l = 5.89 \text{ m} \quad b_1 := \frac{b - b_h}{2} = 0.53 \text{ m} \quad b_w := b_h = 0.24 \text{ m}$$

$$b_{eff,1} := 0.2 \cdot b_1 + 0.1 \cdot l_0 = 0.695 \text{ m} \quad <= \quad 0.2 \cdot l_0 = 1.178 \text{ m}$$

$$<= \quad b_1 = 0.53 \text{ m} \quad --> \quad b_{eff,1} := b_1$$

$$b_{eff} := 2 \cdot b_{eff,1} + b_w = 1.3 \text{ m}$$

**Materialkennwerte:**Holz C24: Querschnitt Nr. 2

Nutzungsklasse: 1 KLED: kurz $k_{mod} := 0.8$ $\gamma_M := 1.3$ $k_{def} := 0.6$

Werte laut ÖNORM B 1995-1-1:2015

$$\rho_{Holz} := 350 \frac{kg}{m^3} \quad E_{0.mean} := 1100 \frac{kN}{cm^2} \quad E_{2.0} := E_{0.mean} \quad \text{lt. EN338}$$

$$f_{m.k.2} := 2.4 \frac{kN}{cm^2} \quad f_{m.d.2} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m.k.2}}{\gamma_M} = 1.477 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{v.k.2} := 0.23 \frac{kN}{cm^2} \quad f_{v.d.2} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v.k.2}}{\gamma_M} = 0.142 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{lt. ÖNORM B 1995-1-1:2015 6.1.7 Seite 55}$$

Beton C20/25: Querschnitt Nr. 1

$\gamma_{M.Beton} := 1.5$ $\alpha := 1.0$

$$\rho_{Beton} := 2500 \frac{kg}{m^3} \quad E_{c.0} := 3000 \frac{kN}{cm^2} \quad E_{1.0} := E_{c.0} \quad \text{lt. EC2}$$

$$f_{c.k.1} := 20 \frac{N}{mm^2} \quad f_{c.d.1} := \alpha \cdot \frac{f_{c.k.1}}{\gamma_{M.Beton}} = 1.333 \frac{kN}{cm^2}$$

Anfangsverschiebungsmodul: VB-48-7,5 x 165: +-45°: ts=25mm

$$l_{ef} := 130 \text{ mm} \quad K_{ser} := 240 \cdot l_{ef} \cdot \frac{N}{mm^2} = 31200 \frac{N}{mm} \quad \text{Wert je Schraubenpaar!!!} \quad t_s := 2.5 \text{ cm}$$

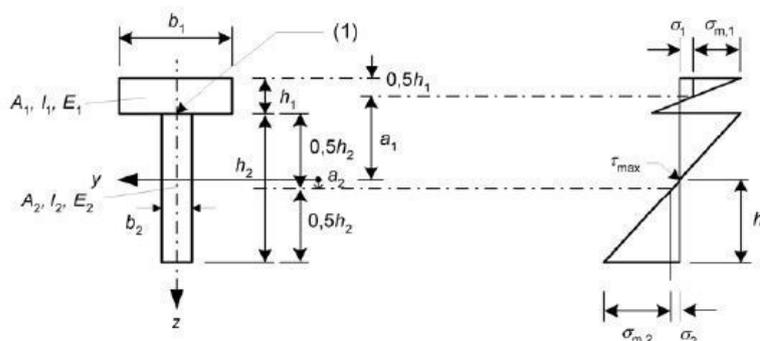
$$k_{def.sfs} := 0.6 \quad \text{lt. Zulassung} \quad \text{lt. ÖNORM B 1995-1-1:2015 2.3.2.2 Seite 34}$$

$$\text{SLS:} \quad K_{ser.0} := K_{ser} = 312 \frac{kN}{cm} \quad K_{ser.\infty} := \frac{K_{ser.0}}{1 + k_{def.sfs}} = 195 \frac{kN}{cm}$$

$$t_s := 2.5 \quad \text{ULS:} \quad K_{u.0} := \frac{2}{3} \cdot K_{ser} = 208 \frac{kN}{cm} \quad K_{u.\infty} := \frac{2}{3} \cdot K_{ser.\infty} = 130 \frac{kN}{cm}$$

$$F_{ax.rk} := 90 \cdot 130 \cdot \left(\frac{450}{350}\right)^{0.8} \text{ N} = 14.305 \text{ kN} \quad F_{rk} := 1.414 \cdot \min(F_{ax.rk}, 13000 \text{ N}) = 18.382 \text{ kN}$$

$$F_{rd} := \frac{k_{mod} \cdot F_{rk}}{\gamma_M} = 11.312 \text{ kN} \quad \text{Schubtragfähigkeit je Schraubenpaar lt. Zulassung bei 45°}$$

Gamma Verfahren ULS $t=0$:

$$t := 2.5 \text{ cm}$$

$$h_1 := 7 \text{ cm}$$

$$h_2 := h_h = 42 \text{ cm}$$

$$b_1 := b_{eff} = 130 \text{ cm}$$

$$b_2 := b_h = 24 \text{ cm}$$

$$A_1 := h_1 \cdot b_1 = 910 \text{ cm}^2 \quad A_2 := h_2 \cdot b_2 = 1008 \text{ cm}^2 \quad I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = 3715.833 \text{ cm}^4 \quad I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = 148176 \text{ cm}^4$$

$$\text{Anzahl Verbindungsmittelr. } 1 \quad n_{SFS} := 1$$

$$\text{Verbindungsmittelabstand übernommen aus Bemessungsprogramm: } s_{min} := 95 \text{ mm} \quad s_{max} := 95 \text{ mm}$$

$$s_{ef} := 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max} = 9.5 \text{ cm}$$

$$s_{max} = 9.5 \text{ cm} \quad <= \quad 4 \cdot s_{min} = 38 \text{ cm} \quad \text{Nachweis erfüllt!} \quad l = 5.89 \text{ m}$$

Nachweis nach Eurocode 5: *lt. ÖNORM B 1995-1-1:2015 B.2 Seite 167-168*

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{n_{SFS} \cdot K_{u.0} \cdot l^2}} = 0.22 \quad \gamma_2 := 1$$

$$a_2 := \frac{\gamma_1 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2 + 2 \cdot t)}{2 (\gamma_1 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_{2.0} \cdot A_2)} = 9.484 \text{ cm} \quad a_1 := \left(\frac{h_2}{2} - a_2 \right) + \frac{h_1}{2} + t = 17.516 \text{ cm}$$

$$EI_{ef} := E_{1.0} \cdot I_1 + E_{2.0} \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_{2.0} \cdot A_2 \cdot a_2^2 = 458070899.145 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$$



Diplomarbeit - Gamma Verfahren HBV Bemessung

Normalspannungen: $M_{ULS} = 61.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$

$$\sigma_1 := \frac{\gamma_1 \cdot E_{1.0} \cdot a_1 \cdot M_{ULS}}{EI_{ef}} = 0.156 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_2 := \frac{\gamma_2 \cdot E_{2.0} \cdot a_2 \cdot M_{ULS}}{EI_{ef}} = 0.141 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{m.1} := \frac{0.5 \cdot E_{1.0} \cdot h_1 \cdot M_{ULS}}{EI_{ef}} = 0.142 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{m.2} := \frac{0.5 \cdot E_{2.0} \cdot h_2 \cdot M_{ULS}}{EI_{ef}} = 0.312 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_1 := \sigma_1 + \sigma_{m.1} = 0.298 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < f_{c.d.1} = 1.333 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \frac{\sigma_1}{f_{c.d.1}} = 22.353\% \quad \text{Betonquerschnitt}$$

$$\sigma_2 := \sigma_2 + \sigma_{m.2} = 0.4531 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < f_{m.d.2} = 1.477 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \frac{\sigma_2}{f_{m.d.2}} = 30.68\% \quad \text{Holzquerschnitt}$$

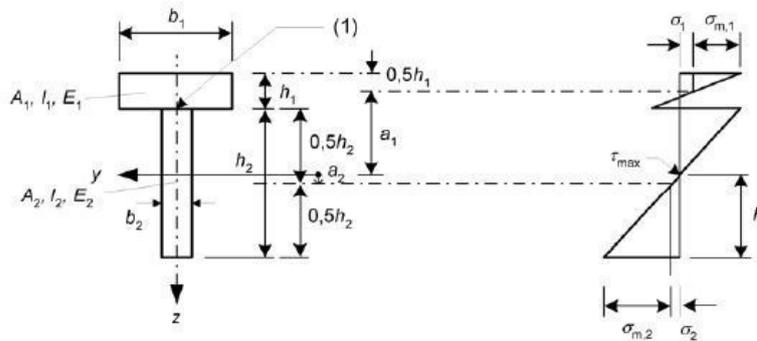
Schubspannungen: $h := \frac{\sigma_2 \cdot 0.5 \cdot h_2}{\sigma_{m.2}} = 30.484 \text{ cm}$

$$\tau_{z.Holz.4} := \frac{0.5 \cdot E_{2.0} \cdot b_2 \cdot h^2 \cdot V_{ULS}}{b_2 \cdot EI_{ef}} = 0.469 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_{v.d.2} = 1.415 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \frac{\tau_{z.Holz.4}}{f_{v.d.2}} = 33.138\%$$

Beanspruchung der Verbindungsmittel:

$$F_1 := \frac{\gamma_1 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 \cdot a_1 \cdot s_{min} \cdot V_{ULS}}{EI_{ef}} = 9.168 \text{ kN} < F_{rd} = 11.312 \text{ kN} \quad \frac{F_1}{F_{rd}} = 81.046\%$$

$$t_d := \frac{F_1}{s_{min}} = 0.965 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

Gamma - Verfahren SLS $t=0$:

$$t := 2.5 \text{ cm}$$

$$h_1 := 7 \text{ cm}$$

$$h_2 := h_h = 42 \text{ cm}$$

$$b_1 := b_{eff} = 130 \text{ cm}$$

$$b_2 := b_h = 24 \text{ cm}$$

$$A_1 := h_1 \cdot b_1 = 910 \text{ cm}^2 \quad A_2 := h_2 \cdot b_2 = 1008 \text{ cm}^2 \quad I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = 3715.833 \text{ cm}^4 \quad I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = 148176 \text{ cm}^4$$

$$\text{Anzahl Verbindungsmittel. } 1 \quad n_{SFS} := 1$$

$$\text{Verbindungsmittelabstand \u00fcbernommen aus Bemessungsprogramm: } s_{min} := 95 \text{ mm} \quad s_{max} := 95 \text{ mm}$$

$$s_{ef} := 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max} = 9.5 \text{ cm}$$

$$s_{max} = 9.5 \text{ cm} \quad <= \quad 4 \cdot s_{min} = 38 \text{ cm} \quad \text{Nachweis erf\u00fcllt!} \quad l = 5.89 \text{ m}$$

Nachweis nach Eurocode 5: *lt. \u00d6NORM B 1995-1-1:2015 B.2 Seite 167-168*

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{n_{SFS} \cdot K_{ser,0} \cdot l^2}} = 0.297 \quad \gamma_2 := 1$$

$$a_2 := \frac{\gamma_1 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2 + 2 \cdot t)}{2 (\gamma_1 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_{2.0} \cdot A_2)} = 11.409 \text{ cm} \quad a_1 := \left(\frac{h_2}{2} - a_2 \right) + \frac{h_1}{2} + t = 15.591 \text{ cm}$$

$$EI_{ef,0} := E_{1.0} \cdot I_1 + E_{2.0} \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_{1.0} \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_{2.0} \cdot A_2 \cdot a_2^2 = 515686494.175 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$$

**EC 5 - Nachweis Gebrauchstauglichkeit:**

lt. ÖNORM B 1995-1-1:2015 7.2 Seite 73

$\psi_0 := 0.7$ $\psi_2 := 0.3$ Kategorie A: Wohngebäude *lt. ÖNORM EN 1990 A.1.2.2. Seite 46*

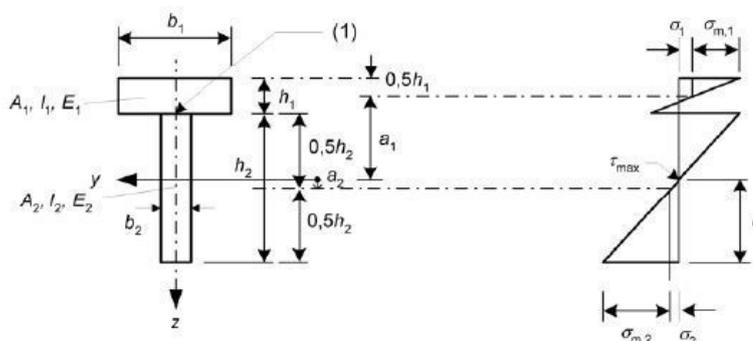
Elastische Anfangsdurchbiegung:

$$w_{inst.G} := \frac{5 \cdot \langle g_k \rangle \cdot l^4}{384 \cdot EI_{ef.0}} = 1.501 \text{ mm}$$

$$w_{inst.Q1} := \frac{5 \cdot \langle q_k \rangle \cdot l^4}{384 \cdot EI_{ef.0}} = 1.541 \text{ mm}$$

$$w_{inst} := w_{inst.G} + w_{inst.Q1} = 3.042 \text{ mm}$$

Schubanalogie - Verfahren SLS $t=0$:



$$t := 2.5 \text{ cm}$$

$$h_1 := 7 \text{ cm}$$

$$h_2 := h_h = 42 \text{ cm}$$

$$b_1 := b_{eff} = 130 \text{ cm}$$

$$b_2 := b_h = 24 \text{ cm}$$

$$a := \frac{h_1}{2} + t + \frac{h_2}{2} = 27 \text{ cm}$$

$$A_1 := h_1 \cdot b_1 = 910 \text{ cm}^2 \quad A_2 := h_2 \cdot b_2 = 1008 \text{ cm}^2 \quad I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = 3715.833 \text{ cm}^4 \quad I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = 148176 \text{ cm}^4$$

$$\text{Anzahl Verbindungsmittelr. } 1 \quad n_{SFS} := 1$$

$$\text{Verbindungsmittelabstand übernommen aus Bemessungsprogramm: } s_{min} := 95 \text{ mm} \quad s_{max} := 95 \text{ mm}$$

$$s_{ef} := 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max} = 9.5 \text{ cm}$$

$$s_{max} = 9.5 \text{ cm} \leq 4 \cdot s_{min} = 38 \text{ cm} \quad \text{Nachweis erfüllt!} \quad l = 5.89 \text{ m}$$

$$c := \frac{K_{ser,0}}{s_{ef}} = 32.842 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Träger A: } EI_A := E_{1,0} \cdot I_1 + E_{2,0} \cdot I_2 = 17414 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

$$E_A := \frac{EI_A}{I_1} = 46864.615 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$EA_A := E_A \cdot A_1 = 42646800 \text{ kN}$$

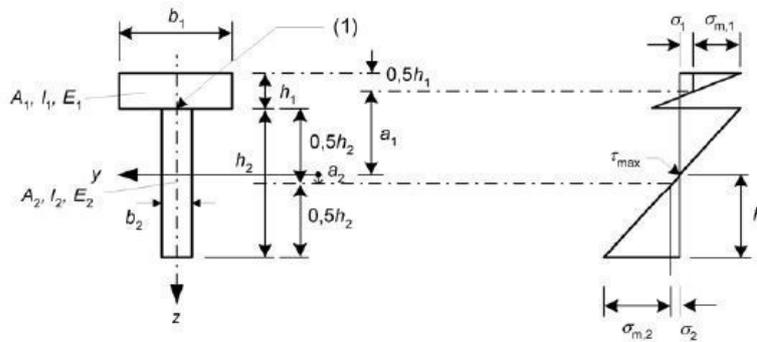
$$\text{Träger B: } EI_B := a^2 \cdot \frac{E_{1,0} \cdot A_1 \cdot E_{2,0} \cdot A_2}{E_{1,0} \cdot A_1 + E_{2,0} \cdot A_2} = 57484 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

$$GA_B := c \cdot a^2 = 23942 \text{ kN}$$

$$E_B := \frac{EI_B}{I_2} = 3879.449 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$G_B := \frac{GA_B}{A_2} = 23.752 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$EA_B := E_B \cdot A_2 = 3910485 \text{ kN}$$

Schubanalogie - Verfahren ULS $t=0$:

$$t := 2.5 \text{ cm}$$

$$h_1 := 7 \text{ cm}$$

$$h_2 := h_h = 42 \text{ cm}$$

$$b_1 := b_{eff} = 130 \text{ cm}$$

$$b_2 := b_h = 24 \text{ cm}$$

$$a := \frac{h_1}{2} + t + \frac{h_2}{2} = 27 \text{ cm}$$

$$A_1 := h_1 \cdot b_1 = 910 \text{ cm}^2 \quad A_2 := h_2 \cdot b_2 = 1008 \text{ cm}^2 \quad I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = 3715.833 \text{ cm}^4 \quad I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = 148176 \text{ cm}^4$$

$$\text{Anzahl Verbindungsmittelr. } 1 \quad n_{SFs} := 1$$

$$\text{Verbindungsmittelabstand übernommen aus Bemessungsprogramm: } s_{min} := 95 \text{ mm} \quad s_{max} := 95 \text{ mm}$$

$$s_{ef} := 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max} = 9.5 \text{ cm}$$

$$s_{max} = 9.5 \text{ cm} \quad <= \quad 4 \cdot s_{min} = 38 \text{ cm} \quad \text{Nachweis erfüllt!} \quad l = 5.89 \text{ m}$$

$$c := \frac{K_{u,0}}{s_{ef}} = 21.895 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Träger A: } EI_A := E_{1,0} \cdot I_1 + E_{2,0} \cdot I_2 = 17414 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{Träger B: } EI_B := a^2 \frac{E_{1,0} \cdot A_1 \cdot E_{2,0} \cdot A_2}{E_{1,0} \cdot A_1 + E_{2,0} \cdot A_2} = 57484 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

$$GA_B := c \cdot a^2 = 15961 \text{ kN}$$



Ergebnisse aus RFEM: *Werte aus RFEM 5*

$$\begin{aligned} \text{ULS} \quad V_{ULS.RSTAB.A} &:= 19.78 \text{ kN} & V_{ULS.RSTAB.B} &:= 22.26 \text{ kN} \\ M_{ULS.RSTAB.A} &:= 22.83 \text{ kN} \cdot \text{m} & M_{ULS.RSTAB.B} &:= 39.07 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

SLS - charakteristisch $w_c := 3.03 \text{ mm}$

$$w_{inst.S} := w_c = 3.03 \text{ mm} < \frac{l}{150} = 39.267 \text{ mm}$$

Normalspannungen:

$$M_1 := M_{ULS.RSTAB.A} \cdot \frac{E_{1.0} \cdot I_1}{E_{1.0} \cdot I_1 + E_{2.0} \cdot I_2} = 1.461 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_2 := M_{ULS.RSTAB.A} \cdot \frac{E_{2.0} \cdot I_2}{E_{1.0} \cdot I_1 + E_{2.0} \cdot I_2} = 21.369 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_1 := \frac{-M_{ULS.RSTAB.B}}{a} = -144.704 \text{ kN}$$

$$N_2 := \frac{M_{ULS.RSTAB.B}}{a} = 144.704 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x.1} := -\frac{M_1}{I_1} \cdot \frac{h_1}{2} + \frac{N_1}{A_1} = -0.297 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \sigma_{x.2} := \frac{M_2}{I_2} \cdot \frac{h_2}{2} + \frac{N_2}{A_2} = 0.446 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$e_1 := \frac{h_1 + t}{2} = 4.75 \text{ cm} \quad e_2 := \frac{h_2 + t}{2} = 22.25 \text{ cm}$$

$$V_1 := V_{ULS.RSTAB.A} \cdot \frac{E_{1.0} \cdot I_1}{E_{1.0} \cdot I_1 + E_{2.0} \cdot I_2} + V_{ULS.RSTAB.B} \cdot \frac{e_1}{a} = 5.182 \text{ kN}$$

$$S_{y.2} := b_2 \cdot \frac{h_2}{2} \cdot \frac{h_2}{4} = 5292 \text{ cm}^3$$

$$V_2 := V_{ULS.RSTAB.A} \cdot \frac{E_{2.0} \cdot I_2}{E_{1.0} \cdot I_1 + E_{2.0} \cdot I_2} + V_{ULS.RSTAB.B} \cdot \frac{e_2}{a} = 36.858 \text{ kN} \quad \tau_{z.Holz.5} := \frac{V_2 \cdot S_{y.2}}{I_2 \cdot b_2} = 0.548 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$z_2 := \frac{h_2}{2} = 21 \text{ cm} \quad h_2 = 42 \text{ cm}$$

$$\tau_{A.2} := -V_{ULS.RSTAB.A} \cdot \frac{E_{2.0}}{EI_A} \cdot \left(\frac{z_2^2}{2} - \frac{h_2^2}{8} \right) = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$t_d := \frac{V_{ULS.RSTAB.B}}{a} = 0.824 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} \quad T_d := t_d \cdot s_{ef} = 7.832 \text{ kN}$$

**HBV Programm - Berechnung Spannungen ULS t=0:**

$$V_2 := 42.04 \text{ kN}$$

$$\tau_{z.2} := \frac{V_2 \cdot S_{y.2}}{I_2 \cdot b_2} = 0.626 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$M_1 := 1.41 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_2 := 21.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_1 := -144.43 \text{ kN} \quad N_2 := 144.43 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x.1} := -\frac{M_1}{I_1} \cdot \frac{h_1}{2} + \frac{N_1}{A_1} = -0.292 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \sigma_{x.2} := \frac{M_2}{I_2} \cdot \frac{h_2}{2} + \frac{N_2}{A_2} = 0.448 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$t_d := 82.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad T_d := t_d \cdot s_{ef} = 7.819 \text{ kN}$$

Stabwerksmodell- Berechnung SLS t=0:

$$e_1 := \frac{h_1 + t}{2} = 4.75 \text{ cm} \quad e_2 := \frac{h_2 + t}{2} = 22.25 \text{ cm}$$

$$e_l := s_{ef} = 9.5 \text{ cm} \quad e_r := s_{ef} = 9.5 \text{ cm}$$

$$E_{1.0} = 3000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad E_{2.0} = 1100 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$I_1 = 3715.833 \text{ cm}^4 \quad I_2 = 148176 \text{ cm}^4$$

$$K_{ser.0} = 312 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} \quad K_{u.0} = 208 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

$$EI_{ef} := \frac{e_1^3 + e_2^3}{\frac{3}{K_{ser.0}} - \frac{e_l^3 + e_r^3}{2 \cdot (e_l + e_r)^2} \cdot \left(\frac{e_1^2}{E_{1.0} \cdot I_1} + \frac{e_2^2}{E_{2.0} \cdot I_2} \right)} = 115.817 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Stabwerksmodell- Berechnung ULS t=0:

$$EI_{ef} := \frac{e_1^3 + e_2^3}{\frac{3}{K_{u.0}} - \frac{e_l^3 + e_r^3}{2 \cdot (e_l + e_r)^2} \cdot \left(\frac{e_1^2}{E_{1.0} \cdot I_1} + \frac{e_2^2}{E_{2.0} \cdot I_2} \right)} = 77.179 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Kapitel 9

Anhang 2 - Vergleich mit experimentellen Forschungsergebnissen

Arbeitslinie SFS VB-48-7,5x100

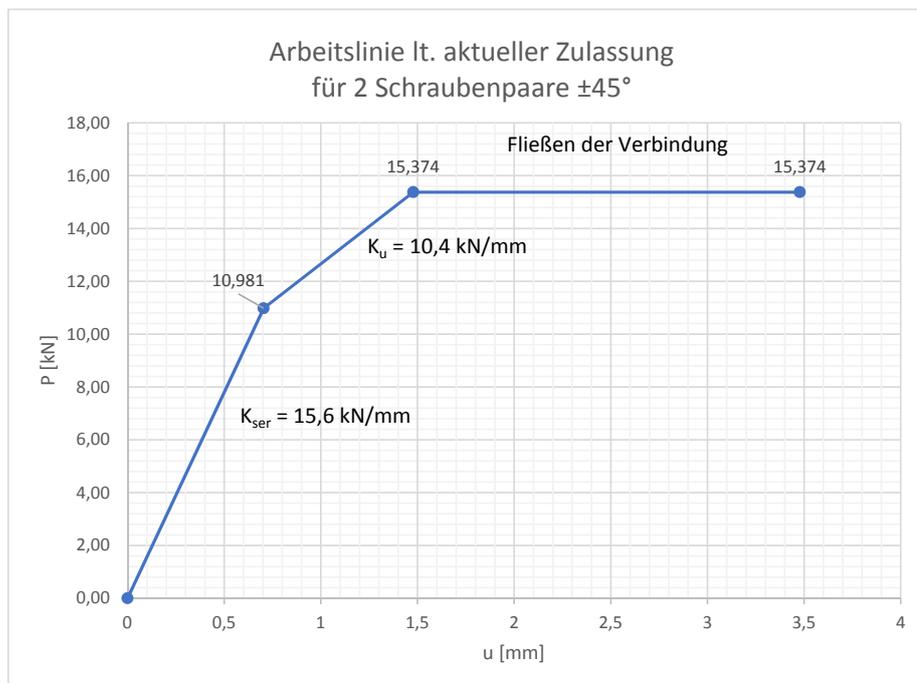
Berechnung nach aktueller Zulassung

Arbeitslinien Abscherbeanspruchung	
$R_{v,k}$	15,37 kN
$R_{v,k} / 1,4$	10,98 kN
K_{ser}	15600 kN/m
K_u	10400 kN/m

SFS Berechnungen - Zulassung	
l_{ef}	60,40 mm
k_a	1,414
ρ_k	350 kg/m ³
$R_{v,k}$	7,7 kN

Werte für RFEM	
x	y
0	0
0,000704	10,981
0,001478	15,374

Werte für Diagramm	
x	y
0	0
0,703916	10,981
1,478223	15,374
3,478223	15,374

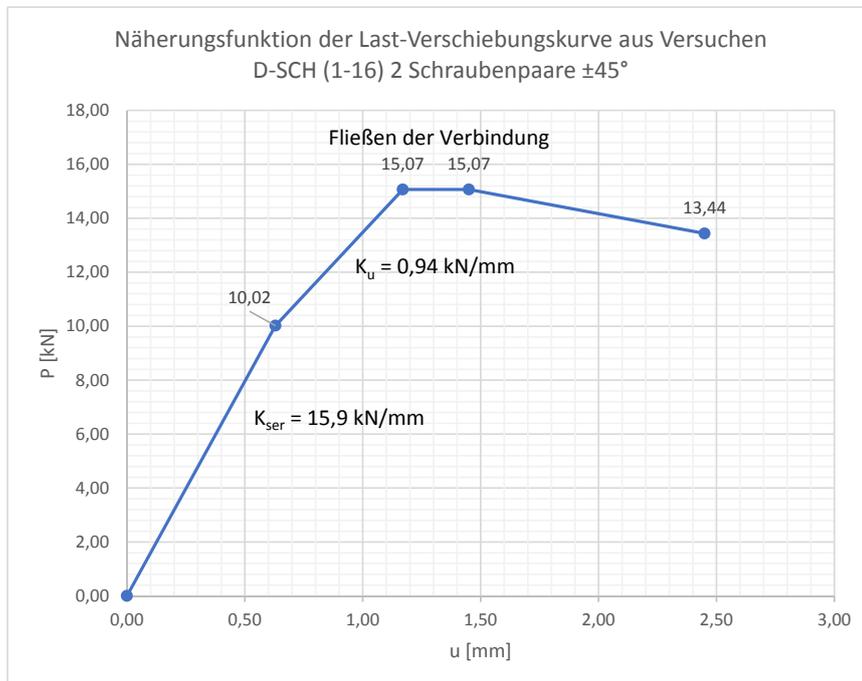
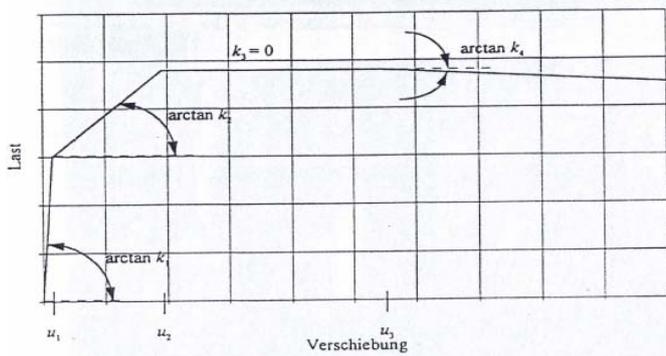


Berechnung nach Näherungsfunktion aus Forschungsbericht

Mittelwert der angenäherten Last-Verschiebungs-Polygonzüge

k_1	15901,00	N/mm
u_1	0,63	mm
k_2	9352,00	N/mm
u_2	1,17	mm
k_3	0,00	N/mm
u_3	1,45	mm
k_4	-1632,00	N/mm

Werte für Diagramm	
u [mm]	P [kN/mm]
0,00	0,00
0,63	10,02
1,17	15,07
1,45	15,07
2,45	13,44



Auswertung SFS-100 bis SFS-129

SFS-100 bis SFS-109

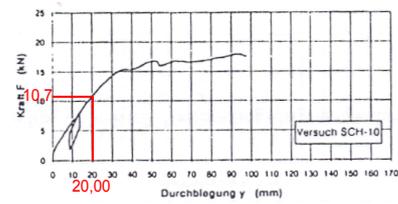
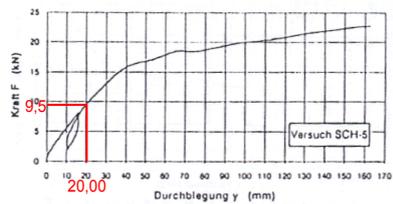
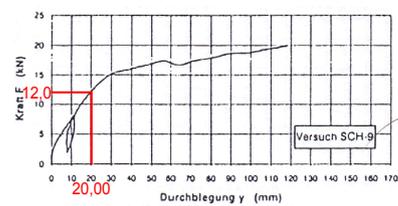
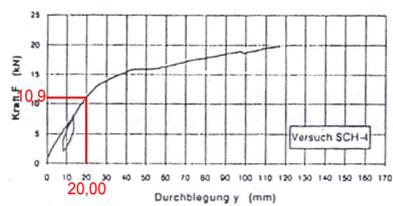
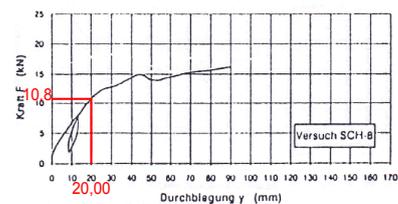
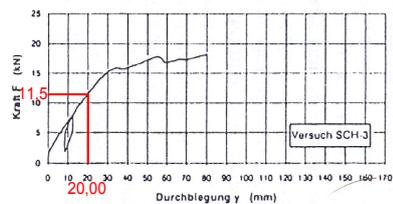
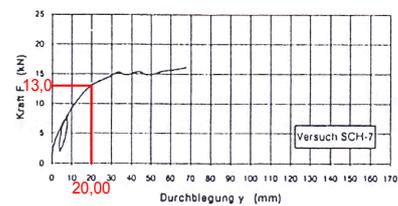
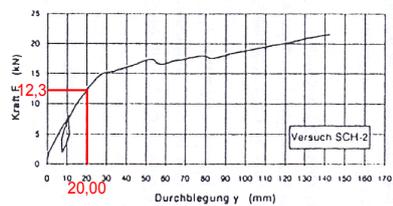
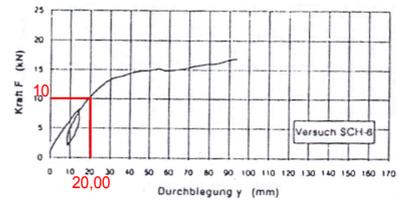
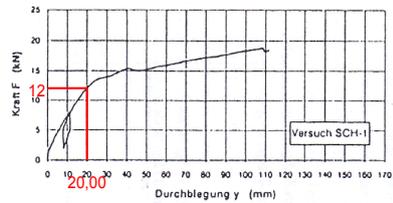
Ausw.	Versuchsbez. Forschungsab.	F [kN]	RFEM				Forschungsbericht				Gamma Verfahren				Abweichung Forschungsbericht - Gamma Verfahren (100%)				NW Wert [-]	
			U _{RFEM} [mm]	σ _{z,RFEM} (1) [N/mm ²]	σ _{z,RFEM} (6) [N/mm ²]	τ _{z,RFEM,max} [N/mm ²]	T _d [kN]	U _{versuch} [mm]	σ _{z,versuch} (1) [N/mm ²]	σ _{z,versuch} (6) [N/mm ²]	τ _{z,versuch,max} [N/mm ²]	T _d [kN]	U _γ [%]	σ _{z,RFEM} (1) [%]	σ _{z,RFEM} (6) [%]	τ _{z,RFEM,max} [%]	T _d [%]			
SFS-100	SCH1	18,8	-	-	-	-	112	16,4	20,2	0,83	16,4	20,1	0,83	16,22	-231,70	0,13	-0,25	0,18	0,10	1,88
SFS-101	SCH2	21,6	-	-	-	-	142	18,9	23,2	0,96	18,6	23,1	0,96	18,63	-266,04	-0,18	-0,22	-0,49	0,17	2,16
SFS-102	SCH3	18,2	-	-	-	-	80	15,9	19,5	0,80	15,7	19,5	0,80	15,70	-144,74	-0,02	0,03	0,61	-0,01	1,82
SFS-103	SCH4	19,8	-	-	-	-	117	17,3	21,2	0,88	17,1	21,2	0,88	17,08	-229,01	-0,03	0,10	-0,49	-0,13	1,98
SFS-104	SCH5	22,8	-	-	-	-	162	19,9	24,4	1,01	19,7	24,4	1,01	19,67	-295,61	0,07	0,15	-0,16	-0,17	2,27
SFS-105	SCH6	16,9	-	-	-	-	94	14,8	18,1	0,75	14,6	18,1	0,75	14,58	-209,69	-0,26	0,07	-0,34	-0,16	1,69
SFS-106	SCH7	16,1	-	-	-	-	68	14,1	17,3	0,71	13,9	17,3	0,71	13,89	-135,17	-0,27	-0,26	0,29	-0,09	1,61
SFS-107	SCH8	16,3	-	-	-	-	90	14,2	17,5	0,72	14,1	17,5	0,72	14,06	-207,43	0,26	-0,17	0,13	-0,29	1,63
SFS-108	SCH9	20,0	-	-	-	-	118	17,5	21,4	0,88	17,3	21,4	0,88	17,25	-228,51	-0,18	0,16	0,52	-0,29	2,00
SFS-109	SCH10	17,9	-	-	-	-	98	15,6	19,2	0,79	15,4	19,2	0,79	15,44	-204,83	0,22	-0,08	0,21	0,26	1,79

K_{ref}=15,6 kN/mm (Mittelwert aus Versuchen); ρ_c=350 kg/m³ ohne Anpassung der Randlichte und E - Modul BSH je Versuch nach Anlage 73 Forschungsbericht

	[%]	[%]	[%]	[%]
Mittelwert:	-215,27	-0,02	-0,05	0,05
Maximalwert:	-135,17	0,26	0,16	0,61
Minimalwert:	-295,61	-0,27	-0,26	-0,49
Standardabwe:	46,11	0,18	0,16	0,38

**Kraft-Verformungsdiagramme aus
Forschungsbericht Versuche SCH-1
bis SCH-10**

Forschungsbericht: Kraft-Verformungsdiagramme SCH-1 bis SCH-10



Forschungsbericht: Kraft-Verformungsdiagramme SCH-1 bis SCH-10

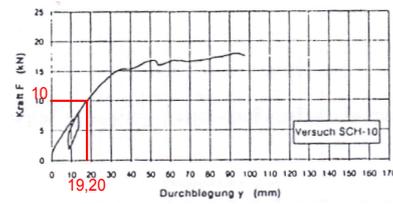
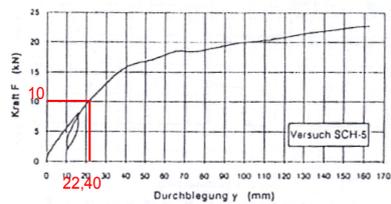
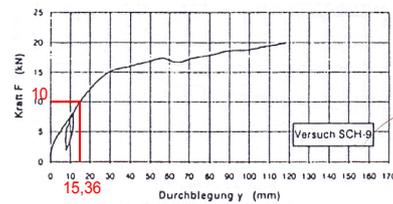
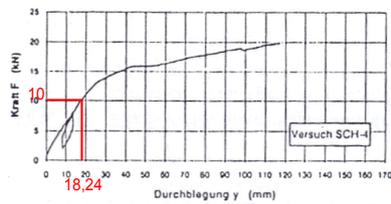
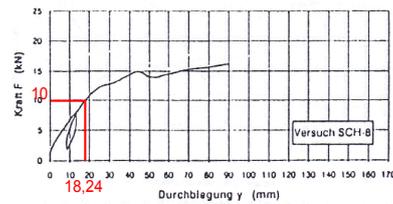
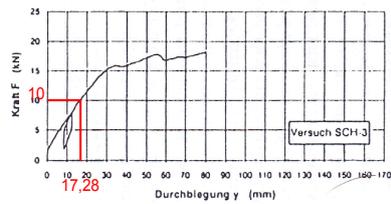
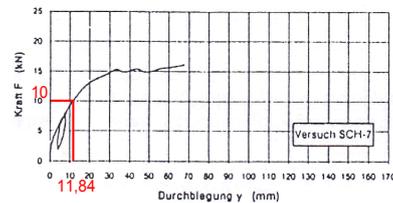
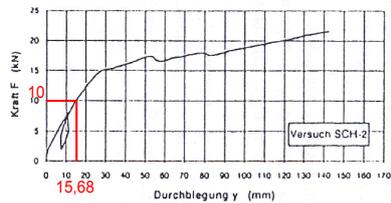
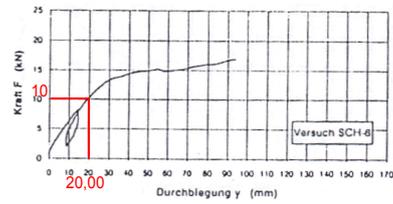
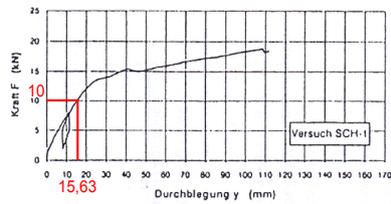


Diagramme SFS-100 bis SFS-129

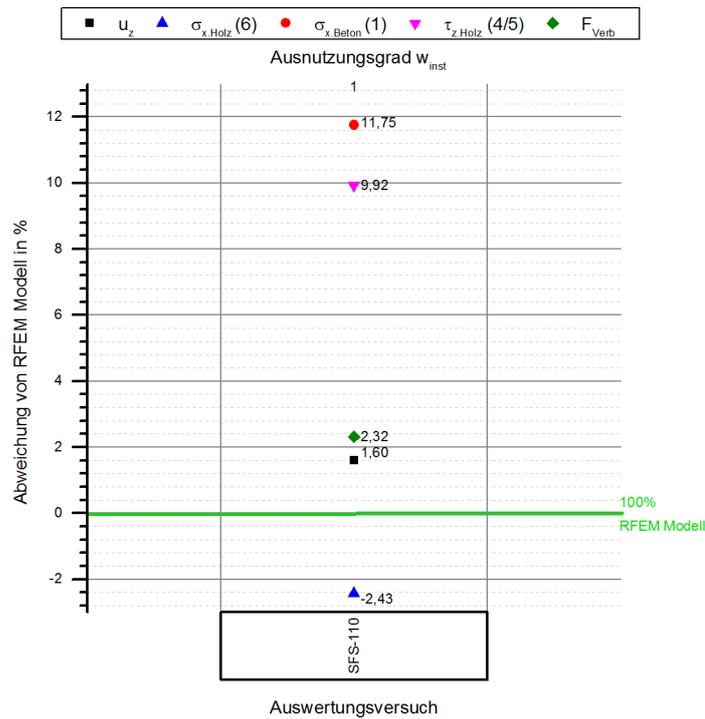


Abb. 9.1: Versuchsaufbau SFS-110 - Abweichung Gamma Verfahren

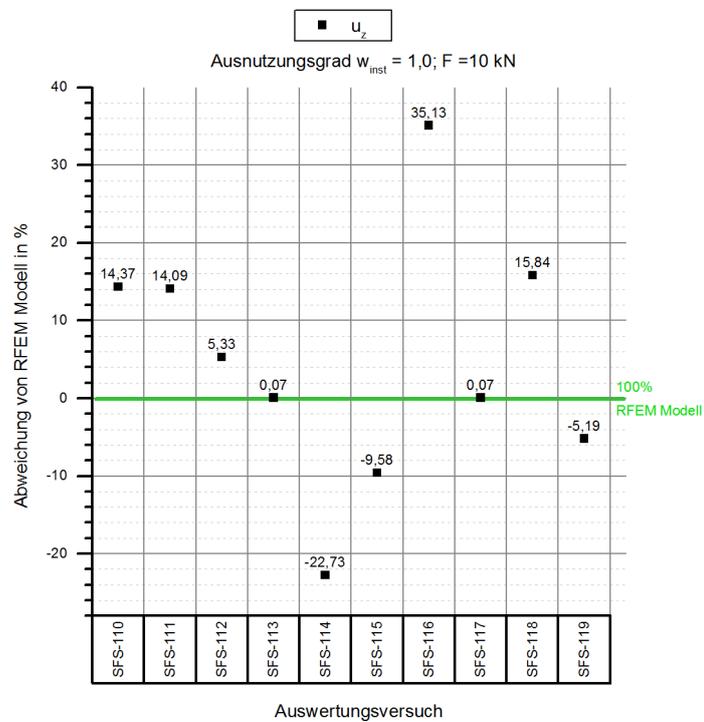


Abb. 9.2: Versuchsaufbau SFS-110 bis SFS-119 - Abweichung Forschungsbericht

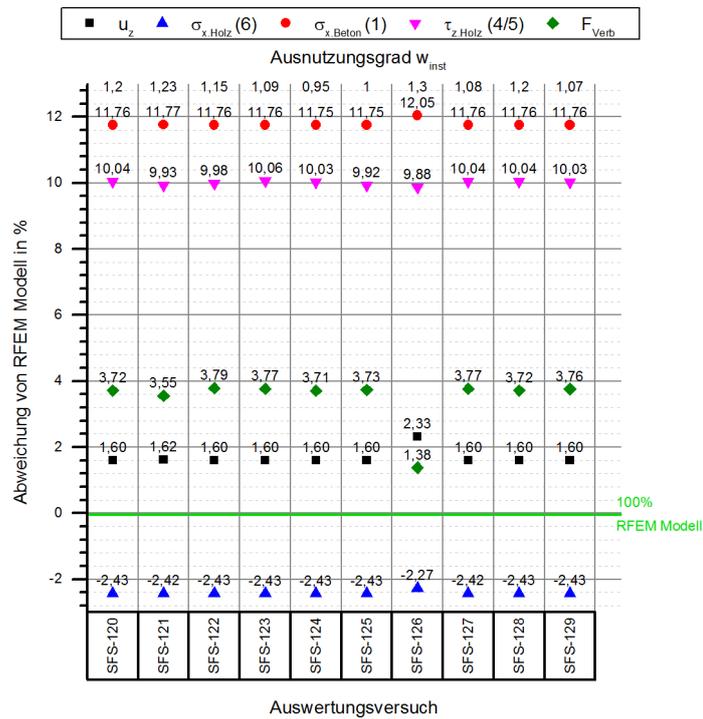


Abb. 9.3: Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Gamma Verfahren

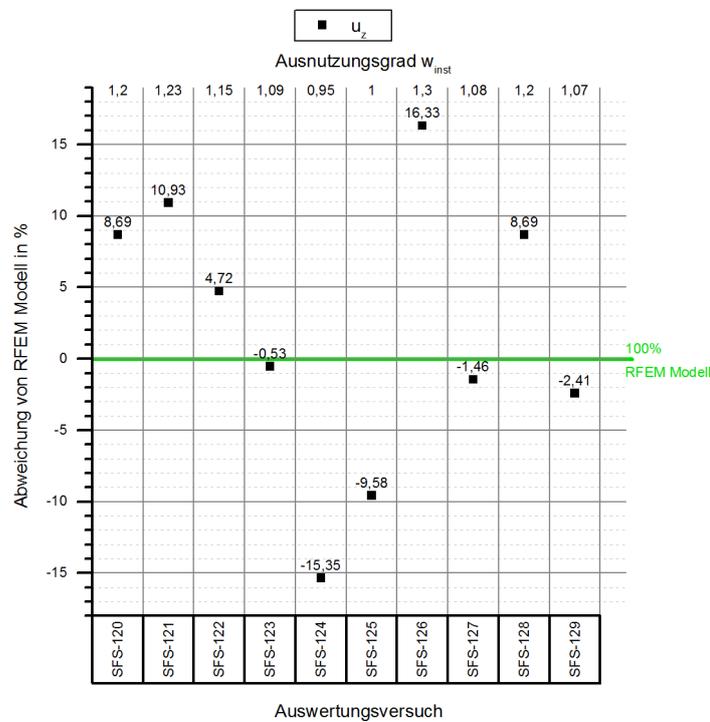


Abb. 9.4: Versuchsaufbau SFS-120 bis SFS-129 - Abweichung Forschungsbericht

Kapitel 10

Anhang 3 - Nachbildung von Versuchen

Arbeitslinie Schmid VG-8x300

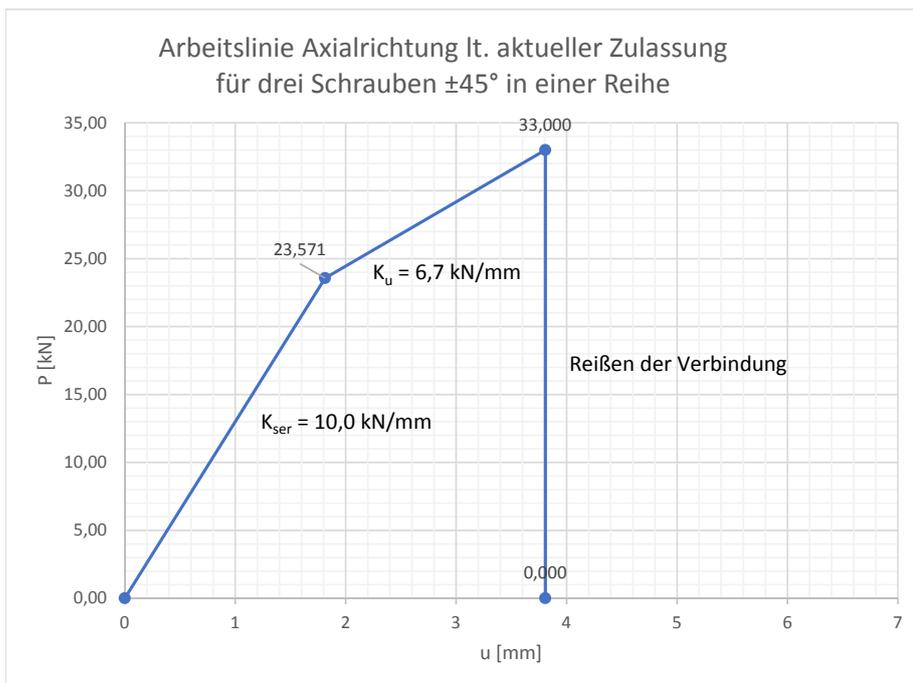
Berechnung nach aktueller Zulassung ETA-12/0373

Arbeitslinien Abscherbeanspruchung	
$R_{ax,k}$	33,00 kN
$R_{ax,k} / 1,4$	23,57 kN
K_{ser}	13000 kN/m
K_u	8667 kN/m

SFS Berechnungen - Zulassung	
n	3
$R_{ax,k}$	11,0 kN
$R_{ax,k,ges}$	33,0 kN

Werte für RFEM	
x	y
0	0
0,001813	23,571
0,003808	33,000

Werte für Diagramm	
x	y
0	0
1,813187	23,571
3,807692	33,000
3,807692	0,000



Berechnung nach aktueller Zulassung DIBt Z-9.1-845

Arbeitslinien Abscherbeanspruchung		
$R_{v,k}$	30,00	kN
$R_{v,k} / 1,4$	21,43	kN
K_{ser}	9000	kN/m
K_u	6000	kN/m

SFS Berechnungen - Zulassung		
n	3	
$R_{v,k}$	10,0	kN
$R_{v,k.ges}$	30,0	kN

Werte für RFEM	
x	y
0	0
0,002381	21,429
0,005000	30,000

Werte für Diagramm	
x	y
0	0
2,380952	21,429
5,000000	30,000
7,000000	30,000

