

Technische Hochschule Deggendorf

Fakultät Bauingenieurwesen und Umwelttechnik

Studiengang Bauingenieurwesen

Thema: Entwicklung eines Python-Clients zur Analyse von Holz–Beton-Verbundsystemen auf Grundlage des Stabwerksmodells nach Rautenstrauch

Thema: Development of a Python Client for Analyzing Timber–Concrete Composite Systems Using the Structural Bar Model According to Rautenstrauch

Bachelorarbeit zur Erlangung des akademischen Grades:

Bachelor of Engineering

an der Technischen Hochschule Deggendorf

vorgelegt von:

Piller, Fabian

Matrikelnummer: 22108168

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Florian Jonas

am: 17.04.2026

Datum

Kurzfassung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Python-Clients zur automatisierten Modellierung und Analyse von Holz–Beton-Verbundsystemen auf Grundlage des Stabwerksmodells nach Rautenstrauch. Ziel der Arbeit ist es, die aufwendige manuelle Erstellung solcher Modelle in RFEM über die Dlubal-API zu vereinfachen und dadurch eine effizientere Untersuchung auch komplexerer Systeme zu ermöglichen.

Nach der Darstellung der theoretischen Grundlagen von Holz–Beton-Verbundkonstruktionen und der Einordnung bestehender Berechnungsverfahren wird die Konzeption und Implementierung des entwickelten Clients beschrieben. Der Schwerpunkt liegt auf der parametrisierten Eingabe von Geometrie und Materialkennwerten sowie auf der realitätsnahen Betrachtung der Verbundwirkung auch bei variablen Schraubenabständen. Betrachtet wird dabei der Bemessungszeitpunkt $t = 0$, zeitabhängige Effekte wie Schwinden und Kriechen werden hierbei nicht berücksichtigt.

Zur Überprüfung der Funktionalität und Genauigkeit wurde der Client anhand eines Einfeld- und eines Mehrfeldsystems validiert sowie weiterführende Untersuchungen zu Einzellasten und einem nichtlinearen Betonmodell angestellt. Die mit dem automatisiert erzeugten Modell ermittelten Schnittgrößen und Verformungen wurden mit einem Vergleichsmodell aus der Literatur beziehungsweise Ergebnissen aus einem Berechnungsprogramm für Holz–Beton-Verbunddecken verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der entwickelte Python-Client eine praktikable und leistungsfähige Grundlage für die automatisierte Modellbildung von Holz–Beton-Verbundsystemen darstellt. Gleichzeitig werden bestehende Grenzen des Ansatzes sowie Möglichkeiten zur weiteren Entwicklung aufgezeigt.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the development of a Python client for the automated modeling and analysis of timber–concrete composite systems based on the structural bar model according to Rautenstrauch. The aim of the thesis is to simplify the time-consuming manual creation of such models in RFEM via the Dlubal API and thereby enable a more efficient investigation of even more complex systems.

After presenting the theoretical fundamentals of timber–concrete composite structures and classifying existing calculation methods, the design and implementation of the developed client are described. The focus lies on the parameterized input of geometry and material properties as well as on a realistic representation of the composite action even in the case of variable screw spacing. The analysis is limited to the design stage $t = 0$, time-dependent effects such as shrinkage and creep are not taken into account.

To verify the functionality and accuracy of the client, it was validated using both a single-span and a multi-span system, and additional investigations on single loads and a nonlinear concrete-model were investigated. The internal forces and deformations obtained from the automatically generated model were compared with a reference model from the literature and with results from a calculation program for analysing timber–concrete composite. The results show that the developed Python client provides a practical and effective basis for the automated modeling of timber–concrete composite systems. At the same time, existing limitations of the approach and possibilities for further development are identified.

Gliederungsverzeichnis

Gliederungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Symbolverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
1. Einleitung	1
1.1 Hintergründe und Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2. Theoretische Grundlagen	4
2.1 Ausführungsmöglichkeiten	4
2.2 Prinzip des Holz–Beton Verbundes	7
2.2.1 Funktionsweise und Tragverhalten	7
2.2.1.1 Anforderungen an die Holzelemente	8
2.2.1.2 Anforderungen an die Betonschicht	9
2.2.1.3 Anforderungen an die Verbindungsmittel	10
2.2.2 Schubverbund	11
2.2.3 Einflussfaktoren auf das Tragverhalten	15
2.2.3.1 Nachgiebiger Verbund und Schubsteifigkeit	15
2.2.3.2 Variable Verbundsteifigkeit	17
2.2.3.3 Langzeitverhalten und Alterung	20
2.3 Berechnungsverfahren für HBV-Systeme	23
2.3.1 γ -Verfahren nach Möhler	23
2.3.2 Schubanalogieverfahren	26
2.3.3 Stabwerksmodell nach Rautenstrauch	29
2.3.4 Finite-Elemente-Modelle	32
2.3.5 Vergleich der Verfahren	33
2.4 Vergleich bestehender Berechnungstools	34
2.5 Dlubal Software, API und Python	36
2.6 gRPC und Remote Procedure Calls	36
3. Implementierung	37
3.1 Einrichtung der Entwicklungsumgebung	37
3.2 Verbindung zur Dlubal API	38
3.3 Aufbau des Python-Clients	39

3.3.1	Benutzereingaben und Parametrisierung	40
3.3.2	Automatisierte Modellerstellung	41
3.3.3	Abbildung der Verbundsteifigkeit	45
3.3.4	Lastdefinition und Strukturmodifikation	46
4.	Validierung und Untersuchungen	49
4.1	Zielsetzung des Kapitels	49
4.2	Validierung anhand eines Einfeldsystems	50
4.2.1	Ausgangssystem	50
4.2.2	Modellbildung im entwickelten Client.....	51
4.2.3	Ergebnisse des API-Stabwerksmodells	53
4.2.4	Bemessung des Validierungsbeispiels	55
4.2.4.1	Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT).....	55
4.2.4.2	Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)	58
4.2.4.3	Zusammenfassung der Bemessung	59
4.2.5	Vergleich mit dem Referenzbeispiel.....	60
4.3	Validierung anhand eines Mehrfeldsystems	62
4.3.1	Ausgangssystem	62
4.3.2	Modellbildung im entwickelten Client.....	63
4.3.3	Ergebnisse des API-Stabwerksmodells	65
4.3.4	Vergleich mit dem Referenzbeispiel.....	68
4.4	Zusatzuntersuchung des Lastabtrags bei Einzellasten.....	72
4.4.1	Ziel der Untersuchung.....	72
4.4.2	Vorgehen und Modellwahl	72
4.4.3	Ergebnisse und Bewertung	73
4.5	Einfluss eines nichtlinearen Betonverhaltens am Mehrfeldsystem.....	76
4.5.1	Zielsetzung und Motivation.....	76
4.5.2	Modellannahmen und Berechnungsansatz	77
4.5.3	Vergleich der Ergebnisse	78
4.5.4	Bewertung	80
4.6	Zusammenfassung der Untersuchungen.....	81
5.	Diskussion der Ergebnisse und Bewertung des Clients	82
5.1	Leistungsfähigkeit des Python-Clients	82
5.2	Grenzen und Einschränkungen	83
5.3	Nutzen der Automatisierung	85
5.4	Verbesserungsmöglichkeiten.....	86
6.	Fazit und Ausblick.....	88

6.1	Zusammenfassung der Arbeit	88
6.2	Fazit.....	89
6.3	Ausblick.....	90
7.	Literaturverzeichnis	91
8.	Verwendung von KI-Werkzeugen	94
9.	Digitale Anlagen.....	95
9.1	RFEM-Modelle der Validierungsbeispiele	95
9.2	Nachweisunterlagen der Vergleichsberechnungen in HBV 6	95
9.3	Quellcode des entwickelten Python-Clients	95
9.4	Programmdateien und Hinweise zur Ausführung.....	95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Verbindungsmittel nach [9, 12, 13].....	5
Tabelle 2: Bemessungsrelevante Zeitpunkte nach [3].....	21
Tabelle 3: Elastizitäts-, Schub- und Verschiebungsmodul nach Bemessungszeitpunkt und Grenzzustand nach [33].....	22
Tabelle 4: Vergleich bestehender Bemessungstools [eigene Darstellung].....	34
Tabelle 5: Funktionen des Python-Clients [eigene Darstellung]	35
Tabelle 6: Übersicht über die erzeugten Knoten [eigene Darstellung]	43
Tabelle 7: Übersicht über die erzeugten Linien [eigene Darstellung]	43
Tabelle 8: Übersicht über die erzeugten Stäbe [eigene Darstellung]	44
Tabelle 9: Eingangsdaten Validierungsbeispiel 1 [eigene Darstellung]	50
Tabelle 10: Materialeigenschaften des Validierungsbeispiels Einfeldsystem [eigene Darstellung]	52
Tabelle 11: maßgebende Schnittkräfte des Validierungsbeispiels Einfeldsystem GZT [eigene Darstellung]	54
Tabelle 12: maßgebende Verformungen des Validierungsbeispiels Einfeldsystem GZG [eigene Darstellung]	54
Tabelle 13: Vergleich der Schnittgrößen mit dem Validierungsbeispiel Einfeldsystem [eigene Darstellung]	60
Tabelle 14: Abweichungen der Schnittgrößen bezogen auf das Vergleichsmodell Einfeldsystem [eigene Darstellung]	60
Tabelle 15: Vergleich der Verformungen mit dem Validierungsbeispiel Einfeldsystem [eigene Darstellung]	60
Tabelle 16: Abweichungen der Verformungen bezogen auf das Vergleichsmodell Einfeldsystem [eigene Darstellung]	60
Tabelle 17: Eingangsdaten Validierungsbeispiel 2 [eigene Darstellung]	62
Tabelle 18: Materialeigenschaften des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem [eigene Darstellung].....	64
Tabelle 19: maßgebende Schnittkräfte des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem GZT [eigene Darstellung]	67
Tabelle 20: maßgebende Verformungen des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem GZG [eigene Darstellung]	67
Tabelle 21: Vergleich der Schnittgrößen mit dem Validierungsbeispiel Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]	68
Tabelle 22: Abweichungen der Schnittgrößen bezogen auf das Vergleichsmodell Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]	69
Tabelle 23: Vergleich der Verformungen mit dem Validierungsbeispiel Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]	69
Tabelle 24: Abweichungen der Verformungen bezogen auf das Vergleichsmodell Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt einer HBV-Konstruktion aus [5].....	1
Abbildung 2: Arten von HBV-Systemen: Holzrippendecke und flächige Verbundkonstruktion aus [7]	4
Abbildung 3: Arbeitslinie eines idealen Verbindungsmittels aus [9]	10
Abbildung 4: Flächenträgheitsmomente an zusammengesetzten Querschnitten aus [24]	11
Abbildung 5: verschiedene Verbundsituationen aus [23]	12
Abbildung 6: Spannungsverteilung ohne Verbund aus [7].....	12
Abbildung 7: Spannungsverteilung bei starrem Verbund aus [7]	13
Abbildung 8: Spannungsverteilung bei nachgiebigem Verbund aus [7]	13
Abbildung 9: Schubverbindungen an Biegebalken aus [26]	14
Abbildung 10: Modellierung der Verbindungsmittel aus [27]	16
Abbildung 11: Prinzip der Linien- und Flächenfreigabe aus [28].....	16
Abbildung 12: Nicht konstant verteilte Verbindungsmittelabstände nach [29]	17
Abbildung 13: Ermittlung des rechnerischen Verbindungsmittelabstandes aus [7]	19
Abbildung 14: Spannungs- und Dehnungsverlauf des Schwindens aus [30]	20
Abbildung 15: Spannungs- und Dehnungsverlauf des Kriechens aus [30]	20
Abbildung 16: Spannungs- und Dehnungsverlauf der Relaxation aus [30]	20
Abbildung 17: Auswirkung der spannungslosen Dehnungen aus [31]	21
Abbildung 18: maximaler Verbindungsmittelabstand in Längsrichtung aus [7]	23
Abbildung 19: Querschnittstypen für nachgiebig verbundene Biegestäbe nach DIN EN 1995-1-1 [10]	24
Abbildung 20: Ideelles Ersatzsystem Schubanalogieverfahren nach [13].....	26
Abbildung 21: Stabwerksmodell nach Rautenstrauch aus [13].....	29
Abbildung 22: Möglichkeiten zur Modellierung der Verbindungsmittel aus [13].....	30
Abbildung 23: Ersatzsystem des VM bei Vernachlässigung der Obergurtverformung aus [13].....	31
Abbildung 24: Beispielbild FE-Modellierung aus [17]	32
Abbildung 25: Kommunikation zwischen Python-Client und RFEM [eigene Darstellung]	36
Abbildung 26: Ablauf der Funktionsaufrufe [eigene Darstellung]	39
Abbildung 27: Ablauf der Erstellung der Modellkomponenten [eigene Darstellung]	40
Abbildung 28: Steifigkeitswerte der Definable Stiffness - Stäbe[eigene Darstellung]	45
Abbildung 29: modellierte Schraube [eigene Darstellung].....	45
Abbildung 30: Eigenschaften der Stabendgelenke [eigene Darstellung]	45
Abbildung 31: manuell angepasste Normen für Lastfallklassifizierung [eigene Darstellung]	47
Abbildung 32: Zuweisen der Strukturmodifikation an Lastkombinationen [eigene Darstellung]	48
Abbildung 33: Zuweisungen an die Strukturmodifikation [eigene Darstellung]	48
Abbildung 34: Modifikationsfaktoren für Schrauben im GZG [eigene Darstellung].....	48
Abbildung 35: Quer- und Längsschnitt des Einfeldträgers [eigene Darstellung].....	50
Abbildung 36: erzeugtes Stabwerksmodell Einfeldsystem in RFEM [eigene Darstellung].....	52
Abbildung 37: Schnittkräfte des Validierungsbeispiels Einfeldsystem im GZT [eigene Darstellung]	53
Abbildung 38: Verformungen des Validierungsbeispiels Einfeldsystem im GZG [eigene Darstellung].....	54
Abbildung 39: Quer- und Längsschnitt des Mehrfeldträgers [eigene Darstellung]	62
Abbildung 40: erzeugtes Stabwerksmodell Mehrfeldsystem in RFEM [eigene Darstellung].....	64
Abbildung 41: Schnittkräfte des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem im GZT [eigene Darstellung]	66
Abbildung 42: Verformungen des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem im GZG [eigene Darstellung].....	67
Abbildung 43: lokale Unstetigkeit im Querkraftverlauf der Verbindungsmittel [eigene Darstellung]	71
Abbildung 44: betrachtete Lastfälle der Einzellasten [eigene Darstellung]	72
Abbildung 45: Normalkräfte in den untersuchten Lastfällen [eigene Darstellung]	73
Abbildung 46: Biegemomente in den untersuchten Lastfällen [eigene Darstellung]	74

Abbildung 47: Querkräfte in den untersuchten Lastfällen [eigene Darstellung].....	74
Abbildung 48: Spannungs- Dehnungsdiagramm für das nichtlineare Betonmodell aus [RFEM 6]	77
Abbildung 49: Vergleich der Schnittkräfte nichtlineares Materialmodell [eigene Darstellung]	79
Abbildung 50: Vergleich der Verformungen nichtlineares Materialmodell [eigene Darstellung]	79

Symbolverzeichnis

a	Schwerpunktsabstand eines Teilquerschnitts
b_{eff}	mitwirkende Breite des Betonquerschnitts
c_{nom}	Betondeckung
d	statische Nutzhöhe
E	Elastizitätsmodul
E_{cm}	Mittelwert des Elastizitätsmoduls von Beton
E_{mean}	Mittelwert des Elastizitätsmoduls
EA	Dehnsteifigkeit
EI	Biegesteifigkeit
EI^*	Ersatzbiegesteifigkeit
F_{Rk}	charakteristischer Wert der Schubtragfähigkeit
$F_{ax,\alpha,Rk}$	charakteristischer Wert des Ausziehwiderstands
f_i	Festigkeit der Größe i
G	Schubmodul
GA	Schubsteifigkeit
G_{mean}	Mittelwert des Schubmoduls
I	Flächenträgheitsmoment 2. Grades
I_{ef}	effektives Flächenträgheitsmoment 2. Grades
k_{cr}	Rissbeiwert
k_{def}	Verformungsbeiwert für Holz und Holzwerkstoffe
k_{mod}	Modifikationsbeiwert zur Berücksichtigung der Lasteinwirkungsdauer
K_{ser}	Verschiebungsmodul
l_{ef}	Einschraubtiefe
s	Verbindungsmittelabstand
s_{ef}	effektiver Verbindungsmittelabstand
t	Bemessungszeitpunkt
t_0	Anfangszeitpunkt
t_∞	Endzeitpunkt
u	Verformung

w	Durchbiegung
W_i	Widerstandsmoment
α	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes
α_{cc}	Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeiteffekten auf die Betondruckfestigkeit
α_{ct}	Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeiteffekten auf die Betonzugfestigkeit
γ	Abminderungsfaktor im γ -Verfahren
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert für Holz und Holzwerkstoffe
η	Ausnutzungsgrad
ρ_k	charakteristische Rohdichte des Holzbauteils
σ	Normalspannung
τ	Schubspannung
ϕ	Verformungsbeiwert für Beton
ϕ_s	Durchmesser Bewehrung
ψ_2	Kombinationsbeiwert für den quasi-ständigen Anteil einer Einwirkung

Abkürzungsverzeichnis

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
API	Programmierschnittstelle, Application Programming Interface
CEN/TS	Technische Spezifikation des Europäischen Komitees für Normung
EC	Eurocode
EN	Europäische Norm
ETA	Europäische Technische Bewertung
FE	Finite Elemente
gRPC	gRPC Remote Procedure Calls
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
HBV	Holz–Beton-Verbund
HTTP/2	Hypertext Transfer Protocol Version 2
NA	Nationaler Anhang
RFEM	Statik- und FE-Programm der Dlubal Software
TS	Technische Spezifikation
VM	Verbindungsmittel
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

1. Einleitung

1.1 Hintergründe und Motivation

Obwohl Konstruktionen aus Holz–Beton-Verbund (HBV) zu den ältesten Verbundbauweisen zählen, bieten Sie auch heute noch viel Potenzial für Weiterentwicklung und Forschung. Seit den ersten Patenten in den Jahren des zweiten Weltkriegs [1] [2], bis zur DIN CEN/TS 19103:2022 [3] wurden mehrere mögliche Methoden zur Nachweisführung an diesen Systemen entwickelt. Während diese 2022 erschienene Technische Spezifikation momentan noch als Ergänzung zur EN 1995 gilt, ist für die Zukunft ein eigener Teil der europäischen Bemessungsnormen auf Basis dieser TS geplant, welcher die HBV-Bauweise regeln soll [4]. Um die Herausforderungen der Bemessung anschaulicher erklären zu können soll zunächst anhand Abbildung 1 das grundsätzliche Tragverhalten der Konstruktionsart erläutert werden.

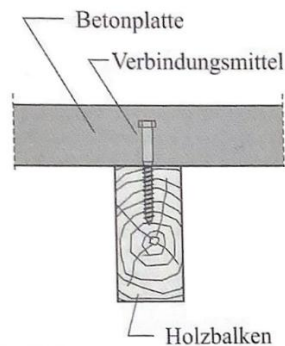


Abbildung 1: Querschnitt einer HBV-Konstruktion aus [5]

Hauptsächlich als Deckensysteme eingesetzt, und somit entsprechend einem Biegebalken belastet, kann man an der Geometrie erkennen, dass die Anordnung der Bauteile genau für diesen Anwendungsfall optimiert wurde. Die Betonplatte liegt in der Druckzone der Beanspruchung durch Biegemomente, während der Holzbalken zum Abtragen der Zugkräfte verwendet wird. Durch die resultierende Form ähnlich einem Plattenbalken und der Geometrie des Holzes kann zusätzlich der innere Hebelarm vergrößert werden, was sich wiederum positiv auf die Größe der entstehenden Kräfte in den Baustoffen auswirkt. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein ausreichender Schubverbund zwischen diesen. Dies erfordert die Betrachtungsweise nach der Theorie des nachgiebigen Verbundes, welche als Berechnungsgrundlage für diese traglaststeigernden Effekte dient. Die Verbindungsmittel können zudem über die Länge des Balkens in variablem Abstand, entsprechend der Belastung, verteilt werden. Auf die Hintergründe dieser Effekte wird in Kapitel 2.2.2 Schubverbund noch genauer eingegangen.

Durch das grundlegende Tragverhalten ergeben sich einige Parameter, welche in der Bemessung besonders berücksichtigt werden müssen. So kann in etwa die oben beschriebene Einwirkung nur unter Belastung mit positiven Biegemomenten optimal abgetragen werden, was zu Problemen hinsichtlich Stützbereichen und der Bemessung von mehrfeldrigen Systemen führt. Zusätzlich müssen die drei unterschiedlichen Materialeigenschaften in den Berechnungen berücksichtigt werden. Falls, wie oben angedeutet, die Verbindungsmittel über die Länge des Trägers nicht in konstant gleichem Abstand, sondern variabel angeordnet werden ändern sich auch die Verbundeigenschaften des Systems über die Spannweite. Auch dies beeinflusst die Berechnung und die dafür angesetzten Querschnittswerte.

Es haben sich mehrere Methoden zur Bemessung etabliert, in welchen die oben genannten Parameter auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden. Laut Schänzlin [6] sind hier die Folgenden zu nennen:

- **Differentialgleichung**
- **γ -Verfahren**
- **Schubanalogieverfahren**
- **Modellierung als Stabwerksmodell**
- **FE-Modellierung**

Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Genauigkeit, der Anwendbarkeit auf verschiedenen Systeme und Lastfälle, vor allem aber durch den Aufwand zur Berechnung oder Modellierung stark voneinander.

Diese Arbeit befasst sich mit der Bemessung von HBV-Systemen mithilfe von Stabwerksmodellen und der Eingabe dieser in Bemessungssoftware. Die aufwendige Modellierung soll vereinfacht werden durch die Entwicklung eines Python-Clients, der das Modell anhand einiger Benutzereingaben erstellt. Dies sollte gegebenenfalls als Grundlage für den anwendenden Ingenieur dienen, auch komplexere Systeme und Lastfälle, ohne zu großen Modellierungsaufwand berechnen zu können.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Erklärtes Ziel der Arbeit ist neben der Erläuterung der theoretischen Grundlagen der Holz–Beton-Verbundbauweise die Entwicklung eines Python-basierten Clients zur automatisierten Erzeugung von Stabwerksmodellen nach Rautenstrauch im Programmsystem RFEM über die Dlubal-API. Der entwickelte Client soll die Eingabe der individuellen Systemgeometrie, der maßgebenden Querschnitts- und Materialkennwerte sowie der Lagerbedingungen ermöglichen. Ein besonderer Fokus liegt auf der Modellierung von über die Länge variablen Schraubenabständen zur realitätsnahen Abbildung der Verbundsteifigkeit zwischen Holz- und Betonelementen.

Als Bemessungszustand wird ausschließlich der Zeitpunkt $t = 0$ betrachtet. Zeitabhängige Effekte wie Schwinden und Kriechen werden nicht automatisiert berücksichtigt, können jedoch optional durch manuelle Anpassungen im erzeugten Stabwerksmodell ergänzt werden.

Die Funktionalität und Richtigkeit des Clients werden anhand zweier Beispielprojekte überprüft, deren Modellierung und Berechnungsergebnisse mit einem manuell in RFEM erstellten Referenzmodell verglichen und validiert werden. Ergänzend soll die Arbeit den entwickelten Ansatz in den Kontext bestehender Berechnungsverfahren und verfügbarer Softwarelösungen zur Bemessung von Holz–Beton-Verbundsystemen einordnen. Darüber hinaus soll untersucht werden, inwieweit das automatisiert erzeugte Stabwerksmodell auch für weiterführende Analysen, insbesondere unter Einwirkung von Einzellasten und bei nichtlinearem Betonverhalten, geeignet ist. Auf dieser Grundlage sollen die Leistungsfähigkeit, die Grenzen und der praktische Nutzen des entwickelten Clients bewertet sowie mögliche Weiterentwicklungspotenziale aufgezeigt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nachdem das erste Kapitel die Notwendigkeit aufgezeigt und die Aufgabenstellung klar definiert hat, folgen die theoretischen Grundlagen auf den nächsten Seiten. Beginnend mit den werkstofftechnischen Faktoren der Einzelkomponenten hin zu den mechanischen Vorgängen wird das notwendige Wissen für die unterschiedlichen Berechnungsverfahren vermittelt. Die einzelnen Methoden zur Bemessung werden dann in ihren Grundsätzen vorgestellt und vor allem im Hinblick auf Ihre Grenzen und Möglichkeiten verglichen. Im Hinblick auf bereits existierende Bemessungstools, welche von einzelnen Verbindungsmittelherstellern zur Verfügung gestellt werden, werden im Anschluss verschiedene Programme und die dahinterliegenden Berechnungsabläufe verglichen. Dann soll als Hinführung auf den erstellten Python-Client erst das verwendete Berechnungsprogramm – RFEM 6 von Dlubal – und die integrierte Programmierschnittstelle (Application Programming Interface - API), sowie Python als gewählte Programmiersprache erläutert werden. Nach einem kurzen Überblick zur Technologie der Remote Procedure Calls und der verwendeten gRPC-Technologie geht es über zum eigentlichen Hauptteil, der Implementierung.

Nach der Beschreibung zur Entwicklungsumgebung und der Verbindung zur Dlubal API soll der Code und die Funktionsweise hinter dem Client genauer beschrieben werden. Die benötigten Eingaben durch den Nutzer und die im Hintergrund ablaufenden Prozesse werden genauer erläutert und die Funktionsweise der Systemerstellung ersichtlich gemacht.

Zur Validierung erfolgt im Kapitel 4. die Berechnung zweier Beispielprojekte. Dabei werden die Ergebnisse des automatisiert erzeugten Stabwerksmodells anhand von Referenzbeispielen aus der Literatur sowie einer Vergleichsberechnung mit HBV 6 eingeordnet und validiert. Ergänzend werden Zusatzuntersuchungen zum Lastabtrag bei Einzellasten sowie zum Einfluss eines nichtlinearen Betonverhaltens durchgeführt, um den Anwendungsbereich und die Aussagekraft des entwickelten Modells weiter zu bewerten.

Auf Basis der Berechnung werden dann die Ergebnisse der Implementierung analysiert, vor allem im Hinblick auf die Funktionalität und weiterhin existierende Einschränkungen. Darüber hinaus werden die Leistungsfähigkeit des Clients, der Nutzen der Automatisierung sowie konkrete Verbesserungsmöglichkeiten diskutiert.

Final wird ein Fazit gezogen und weitere Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungspotenziale getroffen. Dabei werden die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst, die Zielerreichung bewertet und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen sowie potenzielle Anwendungsfelder in Praxis und Forschung gegeben.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Ausführungsmöglichkeiten

Durch variable Ausgangsbedingungen und Einsatzgebiete – wie dem Anwendungsfall zur Bestandssanierung im Vergleich zum Neubau – ergeben sich einige projektspezifische Unterschiede in der Ausführung von HBV-Systemen. Der klassische Anwendungsfall im Altbau ist die Ertüchtigung von Holzbalkendecken durch Aufbringen einer Betonschicht. Dadurch entstehen Plattenbalkensysteme, während im Neubau hauptsächlich flächige Verbundsysteme aus Brettstapel- oder Brettsperrholzelementen in Kombination mit einer Deckschicht aus Beton eingesetzt werden. So können die Systeme unterschieden werden in die Ausführung mit Holzrippenelementen und jene mit Brettstapelelementen als Holzquerschnitt. Auch im Brückenbau finden sich einige Anwendungsfälle, in denen die Holz–Beton-Verbundbauweise eingesetzt wird, im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch nur der Hochbau betrachtet werden. [7]

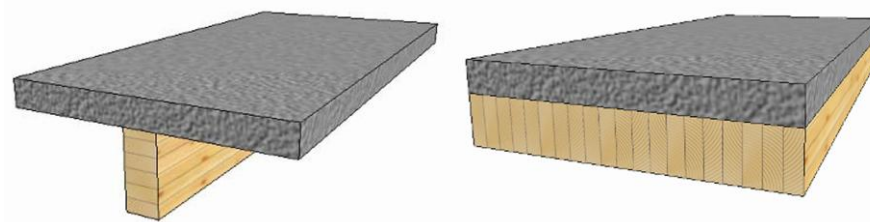


Abbildung 2: Arten von HBV-Systemen: Holzrippendecke und flächige Verbundkonstruktion aus [7]

Die flächige Verbundkonstruktion bietet den Vorteil, hohen bauphysikalischen Anforderungen im Hochbau wie Brand- oder Schallschutz gerecht werden zu können. [7] Allerdings wird sie von Wieland in [8] in der Ausführung mit untenliegender Brettstapeldecke aufgrund ebendieser als „unwirtschaftlich und zudem technisch nicht ganz unproblematisch“ bewertet. Auch die Untersuchungsergebnisse von Hölzl [9] belegen diese Aussagen und zeigen den Preisvorteil sowie den geringeren Herstellungsaufwand von Holzrippendecken auf.

Zum Zusammenfügen der Teilquerschnitte aus Holz und Beton stehen laut Winter [5] folgende Ausführungsmöglichkeiten zur Verfügung:

- **Klebeverbindung**
- **Verbindung durch Formschluss**
- **mechanischer Verbund**

Für die rechnerische Nachweisführung unterscheidet sich vor allem die Klebeverbindung von den beiden anderen Methoden. Nur bei verklebten Bauteilen kann ein starrer Verbund der Teilquerschnitte erreicht werden. Sowohl bei der formschlüssigen als auch der mechanischen Verbindung erhält man unweigerlich einen nachgiebigen Verbund, dessen Theorie und Auswirkungen auf die Berechnungen in Kapitel 2.2.2 Schubverbund ausführlicher erläutert werden. [5]

Zum aktuellen Zeitpunkt stellen Holz-Beton-Verbundbausysteme keine allgemein anerkannte Regelbauweise dar. Dies soll sich mit dem zukünftigen Teil 3 von EN 1995-1 ändern, als dessen Grundlage die technische Spezifikation CEN/TS 19103 [3] dienen soll. Bereits in dem Entwurf prEN 1995-1-1:2023 [10] wird dieser Teil 3 „Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen“ als Teil des zukünftigen EC 5 aufgeführt. Bisher sind jedoch nur die Baustoffe Holz im Eurocode 5 und Beton im Eurocode 2 geregelt, für die Verbindungsmittel existieren nur verbindungsmitteilspezifische Zulassungen. [5, 11]

Aus diesem Grund kann bei den verschiedenen Methoden zur Herstellung des Verbundes unterschieden werden zwischen denen, die eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder ein European Technical Assessment (ETA) besitzen, und denen ohne diese Regelungen. Systemen mit abZ oder ETA werden Rechenwerte und mechanische Eigenschaften zugeschrieben, welche durch Behörden oder Prüfinstitute festgestellt wurden, was Planungssicherheit gewährt. Auch bedeutet es geringeren Planungsaufwand im Vergleich zu den nicht bauaufsichtlich geregelten Verbindungsmitteln, für welche Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) der genehmigenden Stellen eingeholt werden müssen. [9]

Folgende Tabelle stellt eine Übersicht über die allgemein bauaufsichtlich zugelassenen Verbindungsmittel für HBV-Deckensysteme und in der Praxis gebräuchliche Systeme ohne eine solche Zulassung dar.

Tabelle 1: Übersicht der Verbindungsmittel nach [9, 12, 13]

Allgemein bauaufsichtlich zugelassene VM	Zustimmung im Einzelfall
<p>Schrauben</p> <ul style="list-style-type: none"> - Heco-VB und SFS VB Schrauben nach Z-9.1-342 - RAPID® T-Con nach Z-9.1-845 - BiFRi Verbund-Anker nach Z-9.1-851 - Hobet Schrauben nach Z-9.1-861 - Elascon SFix Schrauben nach Z-9.1-886 - Ancon Composite Connector nach Z-9.1-903 	<ul style="list-style-type: none"> - Eingeklebte Stahlstäbe - Verbindungen mittels Nägel oder Sechskantschrauben - Nagelplattenverbindungen - System <i>Peter Cox</i>
<p>Streckmetallverbinder</p> <ul style="list-style-type: none"> - TiComTec HBV-Schubverbinder nach Z-9.1-557 	<ul style="list-style-type: none"> -Kopfbolzendübel - Dübelleisten - <i>BVD-Verbundanker</i>
<p>Formschluss</p> <ul style="list-style-type: none"> - DUOBLOCK-Bauweise nach Z-9.1-904 - DUOBLOCK-2-Elemente nach Z-9.1-925 - Fertigteildecken Fa. ZECH nach Z-9.1-911 	<ul style="list-style-type: none"> - Balkenschuhe - Betonnocken - Kerven - Klebeverbindungen - Haftverbindungen

Für die Wahl des Berechnungsverfahrens ist ebenfalls die Angabe der verwendeten Verbindungsmittel ausschlaggebend. Neben der Nachgiebigkeit, welche der Klebeverbindung wie vorher erläutert eine Sonderstellung einräumt, sind auch mögliche Änderungen der Verbundeigenschaften über die Länge des Systems relevant. Beim γ -Verfahren und dem Verfahren der Schubanalogie werden die Verbindungssteifigkeiten zur Berechnung über die Trägerlänge verschmiert betrachtet, was nur mit einem kontinuierlichen Verbund der Teilquerschnitte erreichbar ist. Die Verbindung mittels einer geringen Zahl an lokal sehr steifen Verbindungsmitteln wie Kerven kann nicht auf diese Weise betrachtet werden, was genauere Modellierungen, wie das in dieser Arbeit verwendete Stabwerksmodell nötig werden lässt. [7]

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird sich nur auf die Ausführung als Holzrippendecke beschränkt. Außerdem wird ausschließlich die Kopplung der Einzelquerschnitte mittels Schrauben als Verbindungsmittel betrachtet.

2.2 Prinzip des Holz–Beton Verbundes

Auf das grundlegende Tragverhalten der Konstruktionsweise wurde bereits im Kapitel 1.1 Hintergründe und Motivation eingegangen. In den folgenden Erläuterungen werden die Eigenschaften der einzelnen Komponenten sowie die mechanischen Hintergründe ausführlicher erläutert. Anschließend werden besonders zu berücksichtigende Effekte, die sich bei HBV-Systemen ergeben erklärt und Methoden zur Berücksichtigung in Berechnungen aufgezeigt.

2.2.1 Funktionsweise und Tragverhalten

Das Ziel der Kombination von herkömmlichen Holzbalkendecken und Stahlbetondecken zu einer gemeinsamen Bauweise ist die materialspezifische Ausnutzung der jeweiligen Teilquerschnitte. Bei einem Einfeld-System werden sowohl im Holz als auch im Beton Normalkräfte und Biegemomente entstehen, wobei das Holz hauptsächlich Zug- und der Beton primär Druckkräfte erfährt. Bei der Ausführung als Durchlaufträger gilt dies jedoch nur für die Feldbereiche und der Betongurt wirkt im Zwischenauflegerbereich auch als Zuggurt, während das Holz hier hauptsächlich auf Druck belastet wird. Als weiterer Effekt stellt sich durch die vollflächige Ausbildung der Betonschicht und die flächige Belastung dieser im Betonquerschnitt ein zweiachsiges Tragverhalten ein. Quer zur Längsachse der Holzträger entspricht das Tragverhalten des Betongurtes dem einer Platte. In der Verbundfuge vorhandene Schubkräfte müssen durch die Verbindungsmittel aufgenommen werden, um so ein Zusammenspiel aus den Teilquerschnitten zu erzeugen. [4, 13]

Durch diese Interaktion werden mehrere positive Effekte erzielt [13, 14, 15, 16]:

- **Gute statische Eigenschaften**, welche große Spannweiten ermöglichen. Im Vergleich zu Holzbalkendecken wird auch bei geringeren Konstruktionshöhen eine erhöhte Steifigkeit erzielt. Verglichen mit Stahlbetondecken profitiert man von dem geringeren Gewicht durch den Ersatz von Stahlbeton ($\gamma_{\text{Stahlbeton}} = 25 \text{ kN/m}^3$) mit Holz ($\gamma_{\text{Holz}} \approx 5 \text{ kN/m}^3$)
- **Wirtschaftlichkeit**, durch die materialspezifische Nutzung der Elemente in ihren optimal geeigneten Anwendungsbereichen.
- **Vorteilhafte bauphysikalischen Effekte**, können besonders im Bereich der Akustik durch Hybridquerschnitte erzielt werden.
- **Aussteifungswirkung der Deckenplatte**
- **Geringe Schwingungsanfälligkeit**, durch die hohe Steifigkeit.
- **Hohe Feuerwiderstandsdauer**, indem die Betonplatte die Brandausbreitung verhindert und der Holzbalken als Schutz des Verbindungsmittels dient.
- **Gleichmäßige Lastverteilung** der Beanspruchungen aus Nutz- und Eigengewicht durch die flächige Betonplatte.

2.2.1.1 Anforderungen an die Holzelemente

Als grundlegendster Parameter ist selbstverständlich die **Länge** des Holzes zu verstehen. Aus den geometrischen Anforderungen der Einbausituation können Längen gefordert werden, welche mit einem Vollholzquerschnitt nicht realisiert werden können. Dabei können Holzwerkstoffe wie Brettschichthölzer Abhilfe schaffen.

Als weitere geometrische Anforderung sind die einzelnen **Balkenabstände** zu nennen. Diese beeinflussen sowohl die effektive Breite, die für die Tragfähigkeit der Betonschicht in Längsrichtung anzusetzen ist, als auch die Beanspruchungen des Betons quer zur Spannrichtung der Konstruktion.

Auch die **Festigkeit und Steifigkeit** der verwendeten Holzbauteile sind maßgebend für die Konzeption des Tragsystems. In der Regel werden Nadelhölzer verwendet, bei höheren Anforderungen kann auch auf andere Holzarten wie Buche zurückgegriffen werden.

Die geforderte **Sortierklasse** von Vollholzbauteilen aus Nadelholz soll mindestens S10 entsprechen. Durch den NA der DIN CEN/TS 19103 wird für HBV-Konstruktionen mit Kerven als Verbindungsmittel eine Mindestfestigkeitsklasse von GL24 h oder C24 festgesetzt, für stiftförmige Verbindungsmittel wie die hier betrachtete Schraubenverbindung gibt es keine entsprechende Anforderung.

Unter konstanter Lastbeanspruchung müssen beim Werkstoff Holz die Effekte des **Kriechens und der Relaxation** berücksichtigt werden. Die Ursachen und Auswirkungen auf die Berechnung durch diese Effekte werden im Kapitel 2.2.3.3 ausgeführt. [5, 13, 17, 18]

2.2.1.2 Anforderungen an die Betonschicht

Als gewählte **Betonfestigkeitsklasse** für HBV-Deckenkonstruktionen ist in der Regel bereits eine geringe Druckfestigkeit ab C12/15 ausreichend. Dies liegt daran, dass die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundquerschnittes hauptsächlich von den Verbindungseigenschaften beeinflusst wird und der Beton eher gering beansprucht wird. Als Obergrenze ist eine Festigkeitsklasse von C60/80 zu sehen.

Trotz der im Zugbereich angeordneten Holzbalken ist eine **Bewehrung** im Betonquerschnitt anzuordnen. Nötig wird diese durch Effekte wie etwa Querzug im Bereich der einbetonierten Verbindungsmittel oder die Beanspruchung der Betonplatte auf Biegung quer zur Längsachse der Holzbalken. Laut Holschemacher [19] bietet sich neben der herkömmlichen Ausführung mittels Stabstahl oder Bewehrungsmatten auch die Verwendung von Stahlfaserbeton an. Dies ermöglicht eine Begrenzung der Plattendicke auf das statisch und konstruktiv notwendige Mindestmaß, da bei Stahlfaserbeton die Anforderungen an eine Betondeckung gegenüber konventionell bewehrtem Beton reduziert sind.

Zur **Verarbeitbarkeit** des gewählten Betons gibt es je nach Ausführung verschieden hohe Ansprüche. Besonders im Einsatz der Verbundsysteme als Ertüchtigung von bestehenden Holzbalkendecken kann die Zugänglichkeit des Einbauortes stark eingeschränkt sein, weshalb der Beton in diesem Fall pumpbar sein sollte. Die Verdichtung der aufgetragenen Betonschicht wird durch die meist geringen Ausführungsdicken sowie die nicht statischen Untergrundverhältnisse erschwert. Die Verformung der Holzbalkendecke, welche selbst als Schalung oder für deren Lagesicherung dient, unter der Last des Betons kann vor allem bei schwer verarbeitbarem Beton Ausführungsmängel nach sich ziehen. Deswegen wird ein leicht verarbeitbarer oder selbstverdichtender Beton empfohlen.

Ebenfalls im Hinblick auf die Verstärkung von Holzbalkendecken durch eine Betonschicht wird die Betrachtung des **Eigengewichts** des Betons relevant. Nicht nur die Bestandsdecke erfährt durch die aufgetragene Verstärkung eine höhere Belastung, sondern auch die untenliegenden lastabtragenden Bauteile wie Wände und Fundamente. Aus diesem Grund ist die Verwendung von Leichtbeton in einigen Fällen empfehlenswert.

Beim Beton müssen ebenfalls **zeitabhängige Effekte**, wie das Schwinden und Kriechen betrachtet werden. Diese werden in Kapitel 2.2.3.3 genauer beschrieben und auf ihre Berücksichtigung in der Berechnung eingegangen. Vorteilhaft ist ein geringes Kriech- und Schwindverhalten des in der Verbundkonstruktion verwendeten Betons. Auch die **Feuchtigkeitsabgabe** sollte möglichst gering sein. [5, 17, 20]

2.2.1.3 Anforderungen an die Verbindungsmittel

Als wichtigster Materialkennwert der Verbindungen geht in die spätere Berechnung die **Steifigkeit** dieser ein. Diese ist entweder in den jeweiligen Zulassungen oder für stiftförmige Verbindungsmittel rechtwinklig zur Fuge auch in der DIN CEN/TS 19103 [3] geregelt. Der elastische Verschiebungsmodul K_{ser} der einzelnen Schrauben ist maßgebend für diese Eigenschaft und kann aus der Arbeitslinie, also der Verformung unter Last, als Verbindungsmittelleigenschaft bestimmt werden. Eine idealisierte Bestimmung des Verschiebungsmoduls wird in Abbildung 2 dargestellt. Die Werte für K_{ser} werden, wie nachfolgend in Kapitel 2.3 dargestellt wird, in den einzelnen Berechnungsverfahren unterschiedlich berücksichtigt.

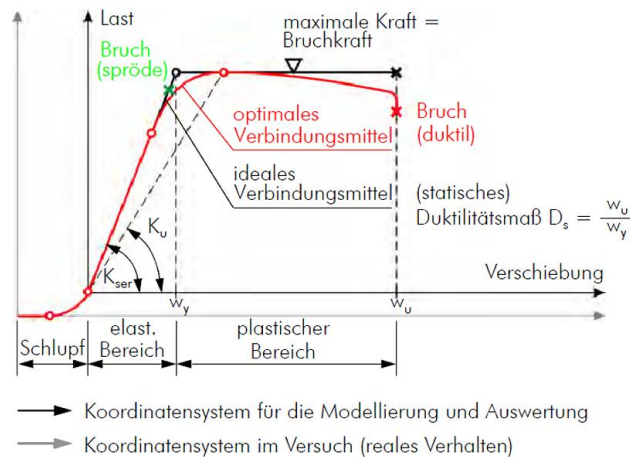


Abbildung 3: Arbeitslinie eines idealen Verbindungsmittels aus [9]

Im folgenden Kapitel 2.2.2 Schubverbund wird auf die Entstehung von Verformungen durch Relativverschiebungen eingegangen. Um diese aufnehmen zu können ist eine ausreichende **Duktilität** des Verbindungsmittels nötig. So wird ein plötzliches, unangekündigtes Bauteilversagen verhindert. Außerdem werden Umlagerungen von Schnittgrößen ermöglicht und Schubkraftspitzen vermindert.

Die **Verbindungsmittelabstände über die Länge** des Holzbalkens besitzen einen großen Einfluss auf das Tragverhalten des Systems. Zur Minimierung des Arbeitsaufwandes und des Materialeinsatzes sind möglichst große Abstände bevorzugt einzusetzen. Dies beeinflusst jedoch die Verbundeigenschaft des Deckensystems und muss somit aus statischer Sicht begrenzt werden. In der Praxis werden deshalb häufig die Verbindungsmittelabstände in Längsrichtung variiert, um einen geeigneten Mittelweg zu finden. Wie in Kapitel 2.2.3.2 noch gezeigt wird, stellen die verschiedenen Berechnungsverfahren unterschiedliche Anforderungen an die Anordnung der Schubverbinder. So soll sichergestellt werden, dass die angenommenen Verbundeigenschaften in der Realität wirklich vorliegen.

Auch eine höhere **Anzahl der Verbindungsmittelreihen** nebeneinander beeinflusst die Steifigkeit der Verbundfuge und kann sich positiv auf das Tragverhalten auswirken.

Eine ausreichende Verbundwirkung wird nur erreicht, wenn die **Versenkungstiefe** der Schrauben in den Holzbalken groß genug ist, diese jedoch auch in der Betonschicht fest verankert werden. Dafür muss die Gesamtlänge der Schrauben sowie die **Profilierung** geeignet sein. [7, 13, 21, 22]

2.2.2 Schubverbund

Aufgrund der Haupttragwirkung als Balkensystem nimmt die Beanspruchung aus Biegemomenten eine maßgebende Rolle in der Bemessung ein. Um höhere Lasten abtragen zu können oder größere Weiten überspannen zu können, muss der Querschnitt ein dafür ausreichendes wirksames Flächenträgheitsmoment I_{ef} um die y-Achse besitzen. [23]

$$I_{\bar{y}\bar{y}} = \sum_{i=1}^n (I_{yy,i} + \bar{z}_{S_i}^2 A_i)$$

$$I_{\bar{z}\bar{z}} = \sum_{i=1}^n (I_{zz,i} + \bar{y}_{S_i}^2 A_i)$$

$$I_{\bar{y}\bar{z}} = \sum_{i=1}^n (I_{yz,i} - \bar{y}_{S_i} \bar{z}_{S_i} A_i)$$

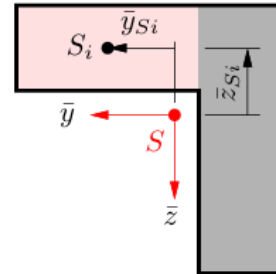


Abbildung 4: Flächenträgheitsmomente an zusammengesetzten Querschnitten aus [24]

Anhand der Formeln wird erkenntlich, dass vor allem die Steiner-Anteile einen starken Einfluss auf die Größe von I_{ef} haben. Der Abstand der Schwerpunkte der Teilquerschnitte vom Gesamtschwerpunkt \bar{z}_{S_i} , welcher hierbei quadratisch in die Berechnung eingeht, sollte dementsprechend möglichst groß sein.

Bei Verbundquerschnitten gilt jedoch zu beachten, dass das Flächenmoment 2. Grades nur bei ausreichendem Schubverbund zwischen den Einzelquerschnitten nach den genannten Formeln berechnet wird. Bei verschiedenen Verbundsituationen können die Steiner-Anteile zur Bestimmung von I_{ef} nur zu Teilen angesetzt werden, wie im Kapitel 2.2.3.1 Nachgiebiger Verbund erläutert wird. Bezüglich des Schubverbundes kann man die drei folgenden drei Fälle unterscheiden:

- a) kein Verbund
- b) nachgiebiger Verbund
- c) starrer Verbund

Diese haben unterschiedliche Auswirkungen auf das sich ergebende wirksame Flächenträgheitsmoment, welche anhand folgender Grafik erläutert werden. [23, 25]

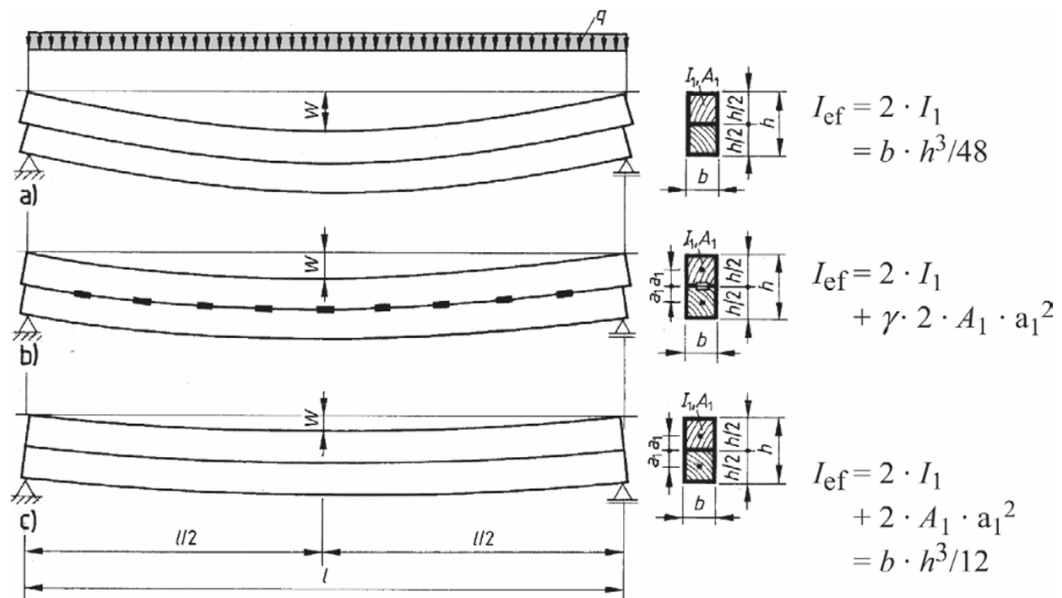


Abbildung 5: verschiedene Verbundsituationen aus [23]
 a) kein Verbund b) nachgiebiger Verbund c) starrer Verbund

Es wird ein Einfeldträger der Stützweite l unter Gleichstreckenlast q in den drei möglichen Verbundmöglichkeiten betrachtet. Die zugehörigen Berechnungen des wirksamen Flächenträgheitsmoment 2. Grades sind für die einzelnen Fälle dargestellt genauso wie die sich ergebenden Durchbiegungen w in Feldmitte. Das belastete System besteht aus je zwei gleich großen Rechteckquerschnitten mit der Breite b und der Höhe $0,5 h$.

Kein Verbund

Unter Vernachlässigung der Reibungskräfte können sich in diesem Fall beide Querschnitte frei gegeneinander verschieben. Dadurch ergibt sich unter der Last q in der Mitte eine Relativverschiebung von null, welche zu beiden Auflagern jedoch symmetrisch ansteigt. In der Fuge werden hierbei keine Schubkräfte übertragen und die beiden Querschnitte tragen jeweils einzeln, ohne untereinander zu interagieren. Das wirksame Flächenträgheitsmoment I_{ef} ergibt sich dabei nur aus der Summe der beiden Flächenträgheitsmomente 2. Grades I_1 der Teilquerschnitte zu $I_{ef} = \frac{b h^3}{48}$.

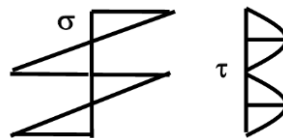


Abbildung 6: Spannungsverteilung ohne Verbund aus [7]

Aus der sich ergebenden Spannungsverteilung in Feldmitte lassen sich die identischen Spannungen in den Einzelquerschnitten erkennen, welche ohne vorteilhafte Effekte aus der Verbundwirkung tragen. Die in der Fuge nicht vorhandene Schubspannung wird ebenfalls ersichtlich.

Starrer Verbund

Hierbei werden die Verschiebungsmöglichkeiten der Querschnitte durch die starre Verbindung in der Anschlussfuge vollständig unterbunden. Dadurch ergeben sich in der Verbundfuge Schubkräfte, welche voll übertragen werden und die beiden Teilquerschnitte wirken wie ein monolithischer Vollquerschnitt. Das wirksame Flächenträgheitsmoment I_{ef} wird sowohl aus den beiden Flächenmoment 2. Grades I als auch aus den Steiner-Anteilen zusammen und wäre ebenso als Flächenträgheitsmoment des Gesamtquerschnittes bezogen auf die Gesamthöhe h berechenbar $I_{ef} = \frac{b h^3}{12}$.

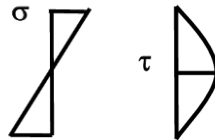


Abbildung 7: Spannungsverteilung bei starrem Verbund aus [7]

Die Spannungsverteilung ist identisch zu der eines Biegebalken aus einem Einzelquerschnitt, wobei die Größe der Normalspannung an den Querschnittsrändern nur halb so groß ist wie bei demselben System ohne Verbund. Das Moment verteilt sich hierbei zwar nur auf einen Gesamtquerschnitt, dessen Flächenträgheitsmoment ist jedoch viermal so groß wie das eines der beiden Einzelquerschnitte. Die maximale Schubspannung tritt auf halber Querschnittshöhe auf.

Nachgiebiger Verbund

Durch mechanische Verbindungsmittel werden die beiden Querschnitte in der Anschlussfuge nachgiebig miteinander verbunden. Durch die Elastizität der Verbindungsmittel und aufgrund der Eigenschaften der Querschnittsmaterialien kann sich hier jedoch eine Verschiebung einstellen, die umso größer ist, je höher die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel ist. Dieser Fall bewegt sich also zwischen den beiden Extremfällen starrer Verbund und kein Verbund. In der Verbundfuge können Schubkräfte übertragen werden, jedoch nicht in der vollen Größe wie es beim starren Verbund möglich wäre. Es ergibt sich ein Zusammenspiel aus beiden Querschnitten und das wirksame Flächenträgheitsmoment I_{ef} liegt zwischen den beiden vorher aufgezeigten Werten. Dies kann durch die Abminderung der Steiner-Anteile um einen Faktor γ berechnet werden als $I_{ef} = 2 \frac{b h^3}{48} + \gamma A_1 a_1^2$.

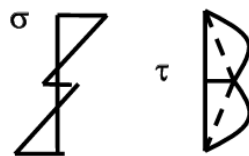


Abbildung 8: Spannungsverteilung bei nachgiebigem Verbund aus [7]

Die Auslastung des Querschnitts durch Normal- sowie Schubspannungen liegt hierbei zwischen den beiden vorher gezeigten Fällen und auch die sich einstellende Durchbiegung $w_{nachgiebig}$ liegt im Bereich zwischen w_{starr} und $w_{ohne Verbund}$.

Aus Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte für den Fall des nachgiebigen Verbundes nicht als erfüllt betrachtet werden kann. Dies zeigt erneut die Notwendigkeit von alternativen Methoden für die Schnittgrößenermittlung an HBV-Systemen. [7]

Wie beim Extremfall des starren Verbundes bereits erwähnt, tritt hierbei die höchste Schubkraft im Schwerpunkt des Querschnitts auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das statische Moment dort seinen Maximalwert erreicht. Daraus lässt sich ableiten, dass bei der Konstruktion eines Verbundquerschnitts darauf geachtet werden sollte, die Querschnittsschwächung durch die Fugenausbildung möglichst weit entfernt vom Schwerpunkt des Gesamtquerschnittes anzuordnen. Dadurch kann die Belastung auf die Verbindungsmittel, welche zur Übertragung der Schubkräfte dienen, verringert und somit auch Relativverschiebungen dezimiert werden. Dies wird in Abbildung 9 verdeutlicht, bei der auf der linken Seite eine ungünstige Verbindungsanordnung im Bezug auf die Längsschubspannungen mit einer verbesserten Variante auf der rechten Seite gegenübergestellt wird. Hierbei wird ebenfalls versucht, die Querschnittsschwächung durch Verbindung möglichst weit von der neutralen Faser im Schwerpunkt des Querschnittes zu entfernen, in Bereiche mit einem geringeren statischen Moment. [26]

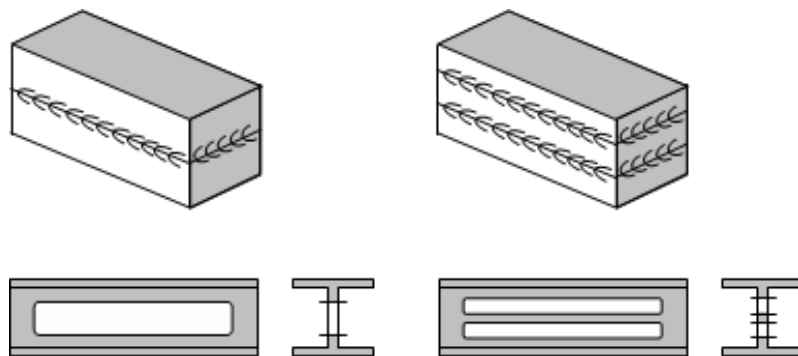


Abbildung 9: Schubverbindungen an Biegebalken aus [26]

2.2.3 Einflussfaktoren auf das Tragverhalten

Im folgenden Kapitel werden Effekte erläutert, welche durch ihre Einflüsse auf das Tragverhalten der Verbunddeckensysteme besondere Berücksichtigung in der Berechnung erfordern. Während die Grundlagen des **nachgiebigen Verbundes** bereits im vorgehenden Kapitel erklärt wurden, sollen im Folgenden vor allem die dafür möglichen Berechnungsmethoden aufgezeigt werden. Außerdem werden die **variable Verbundsteifigkeit** sowie das **Langzeitverhalten und Alterung** erläutert und auf deren Berücksichtigung in den Berechnungen eingegangen.

2.2.3.1 Nachgiebiger Verbund und Schubsteifigkeit

Die Grundlagen der Auswirkungen und die Entstehung des nachgiebigen Verbundes wurden in Kapitel 2.2.2 Schubverbund erläutert. Zur Anschaulichkeit der Erläuterungen wurde hierbei bereits eine Methode, die Effekte des nachgiebigen Verbundes in Berechnungen zu berücksichtigen angeschnitten. In diesem Kapitel sollen die beiden grundsätzlichen Möglichkeiten nochmal dargestellt werden.

Abminderung der Bauteilsteifigkeiten

Die im Beispiel aus Abbildung 5 beschriebene Abminderung der Biegesteifigkeit des Verbundquerschnittes findet auch in Berechnungen Anwendung. Dabei werden ebenfalls die Eigenträgheitsmomente der Einzelquerschnitte voll angesetzt und die Steineranteile nur in Verbindung mit einem Abminderungsfaktor angerechnet. Eingangsgrößen für diesen Abminderungsfaktor sind hierbei die Verbindungsmittelsteifigkeit sowie der VM-Abstand, die Querschnittswerte und die Länge der Träger. Im Regelfall haben die Steineranteile den maßgebenden Einfluss auf das Gesamtträgheitsmoment eines Bauteils und somit können sich durch deren Abminderung stark veränderte Resultate ergeben.

Auch in Stabwerksmodellen kann die Nachgiebigkeit der Verbindung durch modifizierte Steifigkeiten berücksichtigt werden. Konkret wird eine von der Größe der Nachgiebigkeit abhängige Schubsteifigkeit zugewiesen, welche die erwarteten Relativverschiebungen widerspiegelt und deren Einflüsse auf die Ergebnisse berücksichtigt.

Auf die konkrete Berechnung mittels Abminderungsfaktor oder alternative Anwendung in Stabwerksprogrammen wird im nachfolgenden Kapitel Berechnungsverfahren unter 2.3.1 γ -Verfahren nach Möhler und 2.3.2 Schubanalogieverfahren noch eingegangen. [13, 16, 25]

Numerische Modellierung der Kopplung

Durch numerische Modelle können die Effekte der Verbundwirkung mittels unterschiedlicher Ersatzmodelle berechnet werden. Durch die Modellierung der Einzelquerschnitte werden deren Flächenträgheitsmomente hierbei voll angesetzt.

Eine Möglichkeit ist die Verbindung des Holz- und Betongurtes mittels konkreter Verbindungsmittel. Diesen wird eine Ersatzbiegesteifigkeit zugewiesen, welche sich aus der Verbindungsmittelsteifigkeit und den geometrischen Abmessungen errechnet. Alternativ können diese VM auch mittels Starrstäben modelliert und die Verschieblichkeit mithilfe von Querkraftfedern berücksichtigt werden. Auch durch zusätzliche Diagonalen und sich daraus ergebende Fachwerkstrukturen kann der Schubverbund dargestellt werden.

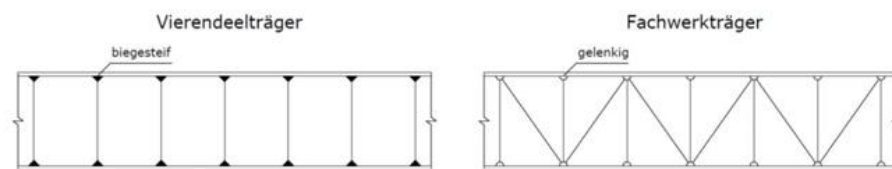


Abbildung 10: Modellierung der Verbindungsmittel aus [27]

Alternativ können auch Linien- oder Flächenfreigaben verwendet werden, bei denen die einzelnen Verbindungsmittel nicht modelliert werden, jedoch der Kontaktfuge im Ganzen eine Federkonstante als Widerstand gegen Verschiebungen und Verdrehungen zugewiesen werden kann. Dem gleichen Prinzip folgend können auch Kontaktvolumen oder Flächenkontakte, welchen dieselben Eigenschaften wie den Flächenfreigaben zugewiesen werden können, Verwendung finden. Die Einschränkung im Vergleich zur Freigabe ist hierbei jedoch, dass eine getrennte Betrachtung der Längs- und Querrichtung des Systems nicht möglich ist. Bei der Freigabe können in x- und y-Richtung der Betonplatte unterschiedliche Steifigkeiten definiert werden und somit die Verbundwirkung nur auf die Längsrichtung der Holzbalken beschränkt werden.

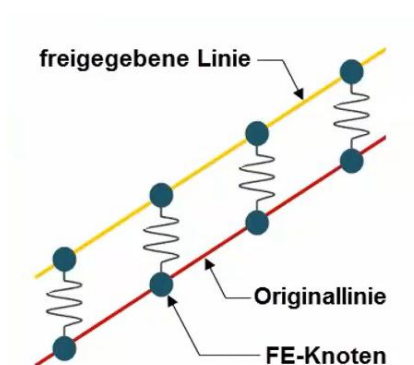


Abbildung 11: Prinzip der Linien- und Flächenfreigabe aus [28]

2.2.3.2 Variable Verbundsteifigkeit

Wie bereits in den Ausführungen zum grundlegenden Tragverhalten der HBV-Bauweise erklärt wurde, werden die Verbindungsmittel dahingehend beansprucht, dass sie die Schubkräfte über die Verbundfuge übertragen müssen. Dabei ist die Größe der Schubkraft direkt abhängig von der Querkraft, welche über die Trägerlänge variiert. In den Auflagerbereichen befinden sich im Regelfall die Extremwerte der Querkraft, während sie in Feldmitte bei einem Einfeldträger den Wert null annimmt und dementsprechend auch die VM dort nicht stark ausgelastet sind. Aus diesem Grund ist es eine etablierte Praxis, die Verbindungsmittelabstände über die Trägerlänge und entsprechend dem Querkraftverlauf zu variieren. Laut Cuerrier-Auclair [29] gibt es hierbei zwei übliche Varianten, nach denen die variablen Abstände gewählt werden können, welche in Abbildung 12 dargestellt werden.

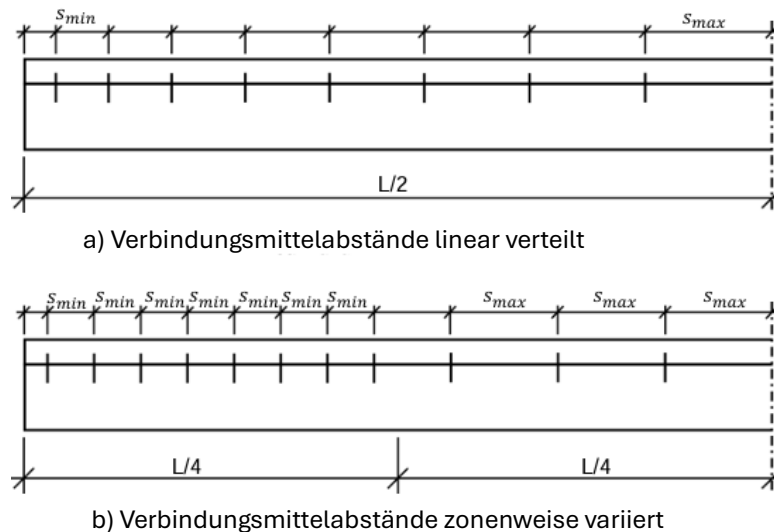


Abbildung 12: Nicht konstant verteilte Verbindungsmittelabstände nach [29]

In der Darstellung wird aus Symmetriegründen nur die linke Hälfte der Spannweite eines Trägers dargestellt. In Variante a) variieren die Verbindungsmittelabstände linear zwischen dem Auflager und dem Mittelpunkt des Trägers. Am Auflager werden hierbei Abstände der Größe s_{min} verwendet, welche in Richtung der Feldmitte bis zum Maß s_{max} vergrößert werden. Bei der dargestellten Option b) wird die Spannweite des Systems in ihren Viertelpunkten unterteilt. In den dabei entstehenden beiden Zonen an den Auflagern wird ein Verbindungsmittelabstand s_{min} und in der mittleren Hälfte ein Abstand s_{max} angeordnet. Dabei gilt $s_{min} < s_{max}$. Diese Aufteilung ermöglicht den Einbau einer geringeren Anzahl an Schubverbindern, was sowohl Arbeits- als auch Materialaufwand reduziert. [29]

Dadurch ergibt sich jedoch eine über die Trägerlänge variable Verbundsteifigkeit, welche wiederum in den Berechnungen berücksichtigt werden muss. Konkret gibt es zwei Möglichkeiten, wie eventuell über die Trägerlänge variierenden Qualitäten des Verbundes in Berechnungen eingehen können. Entweder mittels einer über die Länge verschmierten Fugensteifigkeit oder über diskrete Fugensteifigkeiten an ausgewiesenen Positionen.

Verschmierte Fugensteifigkeit

Eine über die Länge des Trägers veränderliche Verbundsteifigkeit kann mithilfe eines effektiv wirksamen Verbindungsmittelabstandes s_{ef} erfasst werden. Dabei wird die Fugensteifigkeit als über die Querschnittslänge verschmiert interpretiert und somit an jedem Punkt identisch angenommen. Dadurch wird ermöglicht, auch Verfahren, welche nur für eine kontinuierliche VM-Anordnung geeignet sind, für eine variable Anordnung zu verwenden. [16]

Der DIN CEN/TS 19103 [3] folgend kann für dieses Vorgehen ein effektiver Verbindungsmittelabstand berechnet werden zu:

$$s_{ef} = 0,75 s_{min} \frac{K_{ref}}{K_{max}} + 0,25 s_{max} \frac{K_{ref}}{K_{min}}$$

Dabei stellen die beiden Brüche mit den Verhältnissen der Verschiebungsmodule der Verbindungen eine Möglichkeit dar, eine variable Verbundsteifigkeit aufgrund unterschiedlicher verwendeter Verbindungsmittel innerhalb eines Systems zu berücksichtigen.

Mithilfe dieses effektiven Verbindungsmittelabstandes lassen sich die Berechnungen trotz variabler Abstände mit angemessener Genauigkeit führen. Allerdings werden hierbei dann verfahrensspezifische Grenzen für die Verbindungsmittelabstände festgelegt, bis zu welchen diese Annahmen verwendet werden dürfen. Diese werden jedoch im Kapitel 2.3 bei den Erläuterungen zu den einzelnen Berechnungsverfahren genannt.

Diskret modellierte Verbindungsmittel

Alternativ wird in manchen Verfahren auch die Möglichkeit gegeben, die Verbindungsmittel in ihrer realen Lage abzubilden, und somit die Verschiebungssteifigkeit entsprechend der realen Gegebenheiten darzustellen. Vorteilhaft ist hierbei das Wegfallen der Grenzen für Verbindungsmittelabstände, die für die Annahme einer verschmierten Fugensteifigkeit gelten. Auch kann durch die Verfahren, in welchen die einzelnen Verbindungsmittel dargestellt werden, im Regelfall auch die Auslastung der VM gleich aus den Berechnungen in den notwendigen Statikprogrammen entnommen werden. Nachteilhaft ist jedoch der Modellierungsaufwand, welcher durch die einzelnen Verbindungsmittel in ihren jeweiligen Abständen entsteht.

Werden mehrere Verbindungsmittelreihen nebeneinander ausgeführt, muss ebenfalls der rechnerische Verbindungsmittelabstand entsprechend folgender Abbildung ermittelt werden.

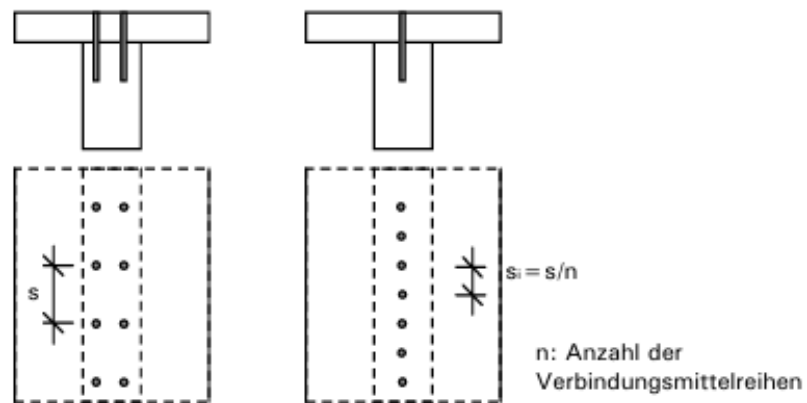


Abbildung 13: Ermittlung des rechnerischen Verbindungsmittelabstandes aus [7]

Sind n Verbindungsmittelreihen mit jeweils konstantem Verbindungsmittelabstand s in Längsrichtung nebeneinander angeordnet, so kann der rechnerische Verbindungsmittelabstand zu $s_i = s/n$ berechnet werden. Dies ist relevant für die Berechnung der Fugensteifigkeit K_{ser}/s_i , welche sich aus dem Verschiebungsmodul des Verbindungsmittels K_{ser} und dem Abstand zwischen den Verbindungsmitteln s_i berechnet. [7]

2.2.3.3 Langzeitverhalten und Alterung

Durch die auf ein Bauteil einwirkenden Kräfte sowie die Umgebungsbedingungen weist jeder Baustoff ein spezifisches Langzeitverhalten auf. Genauer betrachtet werden sollen die Effekte des **Schwindens** und **Quellens** sowie das **Kriechen** und die **Relaxation**. [30]

Das **Schwinden** und **Quellen** kann als ein Effekt gesehen werden, mit gegenläufiger Wirkung. Beim Schwinden stellt sich mit der Zeit eine Volumenkontraktion ohne vorhandene Lasteinwirkung ein, sofern keine Zwängungen auftreten. Im Fall von Quellen handelt es sich um eine Volumenzunahme.

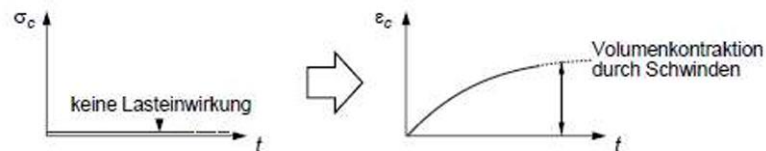


Abbildung 14: Spannungs- und Dehnungsverlauf des Schwindens aus [30]

Beim **Kriechen** resultieren aus einer konstanten Belastung des Bauteils Verformungen.

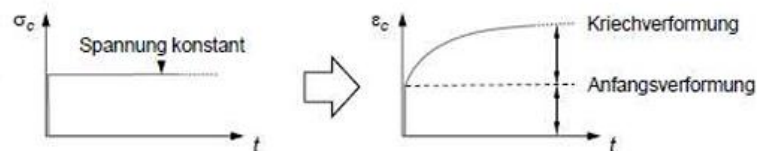


Abbildung 15: Spannungs- und Dehnungsverlauf des Kriechens aus [30]

Die **Relaxation** erzeugt eine Verminderung der Spannungen bei konstant bleibenden Dehnungen.

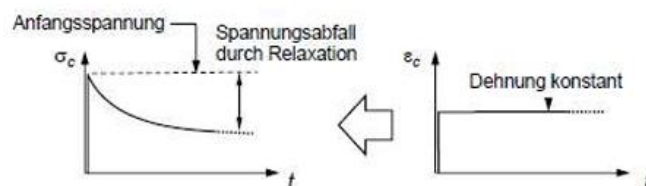


Abbildung 16: Spannungs- und Dehnungsverlauf der Relaxation aus [30]

Da das Kriechen und die Relaxation miteinander gekoppelt sind können diese beiden Effekte mittels desselben Baustoffverhaltens beschrieben werden.

Bei der Kombination von mehreren verschiedenen Werkstoffen innerhalb eines Verbundquerschnittes können durch diese zeitabhängigen Effekte Spannungs- und Schnittgrößenumlagerungen oder auch Eigenspannungen resultieren, während bei einem homogenen Baustoff meist nur die Gebrauchstauglichkeit beeinflusst wird. Daraus folgt die Notwendigkeit, im Zuge der Dimensionierung von Verbundquerschnitten das Langzeitverhalten realistisch abzuschätzen und in die Nachweise einzubinden. Die Auswirkungen von Temperatur, Feuchtegehalt des Holzes oder des Schwindens von Beton im Verbund werden in Abbildung 17 dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass die jeweilige Verformung vom Verbundpartner verhindert wird und die normalerweise spannungslosen Dehnungen, welche etwa aus Schwinden oder Temperatur resultieren, durch die Behinderungen Schnittgrößen und Verformungen hervorrufen.

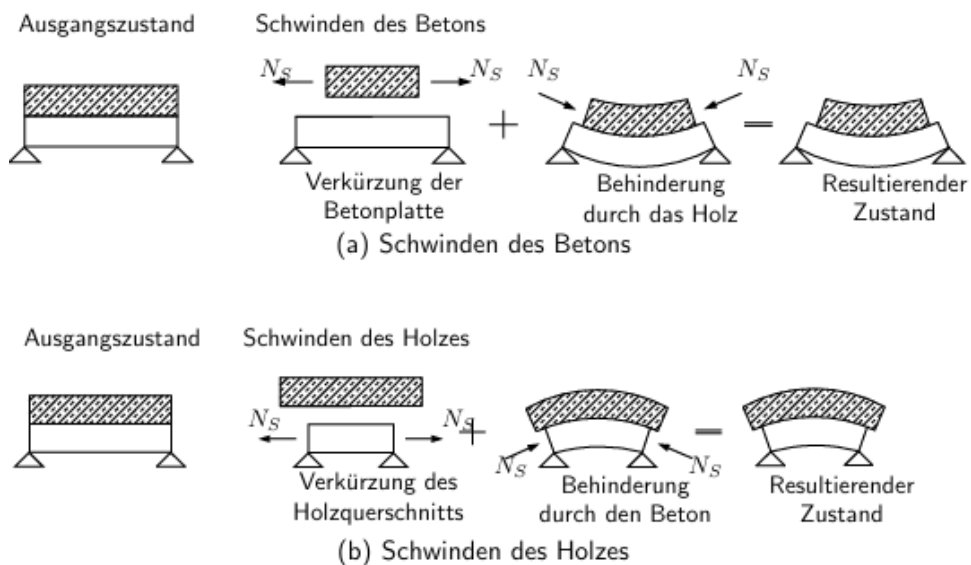


Abbildung 17: Auswirkung der spannungslosen Dehnungen aus [31]

Durch die über die Zeit unterschiedlichen Entwicklungen der oben genannten Effekte wird in der Technical Specification [3] vorgeschrieben, verschiedene Bemessungszeitpunkte zu betrachten, welche in Tabelle 2 dargestellt werden.

Tabelle 2: Bemessungsrelevante Zeitpunkte nach [3]

	Zeitpunkt	Einwirkung
$t = 0$	Bemessungswert der Betonfestigkeit erreicht oder Bemessungslast aufgebracht	noch kein Kriechen oder unelastische Dehnungen aufgetreten
$t = 3 - 7a$	Bemessungsrelevanter Zustand zwischen t_0 und t_∞	beginnende Entwicklung von Kriechen und unelastischen Dehnungen
$t = \infty$	Endpunkt der Nutzung	Kriechen und unelastische Dehnungen voll entwickelt

Die Überprüfung der bemessungsrelevanten Zustände zwischen drei und sieben Jahren kann auch vernachlässigt werden, wenn als Ersatz die Spannungen im Holz bei t_0 oder t_∞ infolge der quasi-ständigen Einwirkungskombinationen um 25% erhöht wird und die Bemessung im GZT im Holzquerschnitt unter diesen Spannungen geführt wird.

Die Auswirkungen des **Schwindens** und **Quellens** von Holz darf, sofern die Anforderungen an quasi-konstante Umgebungsbedingungen erfüllt sind, vernachlässigt werden. Quasi-konstante Umgebungsbedingungen werden definiert als: [3]

- Die erwartete Gleichgewichtsfeuchte $m_{c,use}$ entspricht dem Einbaufeuchtegehalt
- Bei Nadelholz schwankt die über den Querschnitt gemittelte Gleichgewichtsfeuchte Δm_c um nicht mehr als 6%
- Die Lufttemperaturschwankungen überschreiten 20°C nicht

Die Schwindverformung des Holzträgers wirkt sich, wie anhand Abbildung 17 erkennbar, positiv auf die Durchbiegung und Schnittkräfte aus und kann gleichzeitig nicht exakt ermittelt werden. Aus diesen Gründen wird von Schänzlin in [32] auf der sicheren Seite liegend empfohlen, die Auswirkungen des Schwindens auf den Holzquerschnitt zu vernachlässigen.

Dahingegen sollte das Schwinden des Betons genauso wie Temperaturschwankungen und Schwankungen der Holzfeuchte mittels einer fiktiven vertikalen Last in die Berechnungen Eingang finden. Diese repräsentiert die einwirkenden unelastischen Dehnungen und deren Berechnung wird im Anhang B der DIN CEN/TS 19103 [3] ausführlich erklärt.

Als Möglichkeit zur Berücksichtigung der **Kriechverformung** gibt die DIN CEN/TS 19103 eine Abminderung der Elastizitätsmoduln von Beton und Holz sowie die Verwendung eines wirksamen Verschiebungsmoduls der Verbindung an. Dies erfolgt mithilfe von materialspezifischen Kriechzahlen k_{def} (Holz) und ϕ (Beton). Vereinfachend kann nach DIN EN 1995-1-1/NA: 2013-08, NCl zu 9.1.3 das Kriechen des Betons über Division des Elastizitätsmoduls durch den Faktor 3,5 berücksichtigt werden. Hierbei sollte der Einfluss der Verbundwirkungen auf den wirksamen Kriechkoeffizienten berücksichtigt werden, was über die Verwendung von Modifikationswerten für diesen erfolgen sollte. Auch die Auswirkungen der **Relaxation** lassen sich über einen effektiven E-Modul beschreiben, welcher ebenfalls mithilfe der Materialkriechzahl berechnet wird.

Tabelle 3 stellt einen Überblick über die zu verwendenden Werte der Baustoffeigenschaften, abhängig vom Bemessungszeitpunkt und dem jeweils nachzuweisenden Grenzzustand dar.

Tabelle 3: Elastizitäts-, Schub- und Verschiebungsmodul nach Bemessungszeitpunkt und Grenzzustand nach [33]

	Zeitpunkt t = 0		Zeitpunkt t = ∞	
	GZG	GZT	GZG	GZT
Holz, Holzwerkstoff	E_{mean}	$\frac{E_{mean}}{\gamma_m}$	$\frac{E_{mean}}{(1 + k_{def})}$	$\frac{E_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def}) \gamma_m}$
	G_{mean}	$\frac{G_{mean}}{\gamma_m}$	$\frac{G_{mean}}{(1 + k_{def})}$	$\frac{G_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def}) \gamma_m}$
Verbindungsmittel	K_{ser}	$\frac{2 K_{ser}}{3 \gamma_m}$	$\frac{K_{ser}}{(1 + 2 k_{def})}$	$\frac{2 K_{ser}}{3 (1 + \psi_2 2 k_{def}) \gamma_m}$
Beton	E_{cm}	$\frac{E_{cm}}{\gamma_c}$	$\frac{E_{cm}}{3,5}$	$\frac{E_{cm}}{3,5}$

2.3 Berechnungsverfahren für HBV-Systeme

2.3.1 γ -Verfahren nach Möhler

Das Verfahren, welches auf Hr. Möhler [34] zurückgeht, wird auch in der DIN EN 1995-1-1 aufgegriffen. Es zeichnet sich dadurch aus, dass mit dessen Hilfe Schnittgrößenverläufe von nachgiebig verbundenen Querschnitten mittels vereinfachter analytischer Berechnungen ermittelt werden können. Das Verfahren eignet sich als einziges der vorgestellten auch für eine Handrechnung und wurde aus den Differentialgleichungen des Biegeträgers abgeleitet.

Dadurch ergeben sich jedoch folgende Randbedingungen und damit Einschränkungen in der Anwendung des γ -Verfahrens, ohne deren Einhaltung keine exakten Ergebnisse erzielt werden: [7, 25]

- statisch bestimmter Einfeldträger
- sinusförmige Belastung
- konstante Querschnitte (max. drei Teilquerschnitte)
- Gültigkeit der Bernoulli-Hypothese in den Teilquerschnitten
- linear elastisches Werkstoffverhalten
- kontinuierlicher, konstanter Verbund
- Vernachlässigung der Schubverformung der Teilquerschnitte
- gleiche Verbindungsmittel am System (gleiche Verbindungsmittelsteifigkeiten)

Verwendete Prinzipien sind die **Abminderung der Biegesteifigkeit** sowie die **verschmierte Fugensteifigkeit**. Zur Berechnung des **Langzeitverhaltens** werden einige Modifikationen benötigt, welche in [35] genauer erläutert werden.

Bei der baupraktisch relevanten Belastung unter einer Gleichstreckenlast stellt das γ -Verfahren eine gute Näherung dar. Außerdem kann es auch für die Ermittlung der Schnitt- und Verformungsgrößen an Durchlaufträgern und Kragarmen näherungsweise verwendet werden, indem die Lage der Momentennullpunkte bei der Bestimmung von l berücksichtigt wird. Eine geringe Anzahl relativ steifer Verbindungsmittel, über die Querschnittslänge ungleichmäßig verteilte VM und Einzellasten in Feldmitte lassen die Eignung dieser Näherung jedoch geringer werden. Als konkrete Grenze hinsichtlich der Schraubenabstände lässt sich die Bedingung $s_{max} \leq 4 \cdot s_{min}$ nennen. Auch bei auftretenden Einzellasten liefert das Verfahren über deren Umrechnung in Streckenlasten nur konservative Ergebnisse. [7, 25, 35]

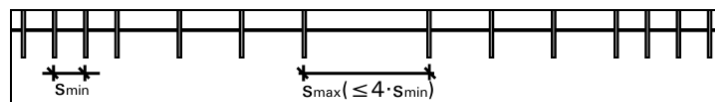


Abbildung 18: maximaler Verbindungsmittelabstand in Längsrichtung aus [7]

Mittels eines Auszugs aus dem Eurocode 5 [10] soll der grundsätzliche Ablauf der Bemessung mittels γ -Verfahren kurz erläutert werden. Dabei sind in der Norm drei Querschnittstypen geregelt, von denen der dritte für Holz–Beton–Verbundträger verwendet werden kann. Zur Berechnung wird die Biegesteifigkeit mittels Multiplikation der Steineranteile mit dem Faktor γ abgemindert und somit die Nachgiebigkeit der Verbundfuge berücksichtigt. Dadurch berechnet sich die effektive Biegesteifigkeit zu:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

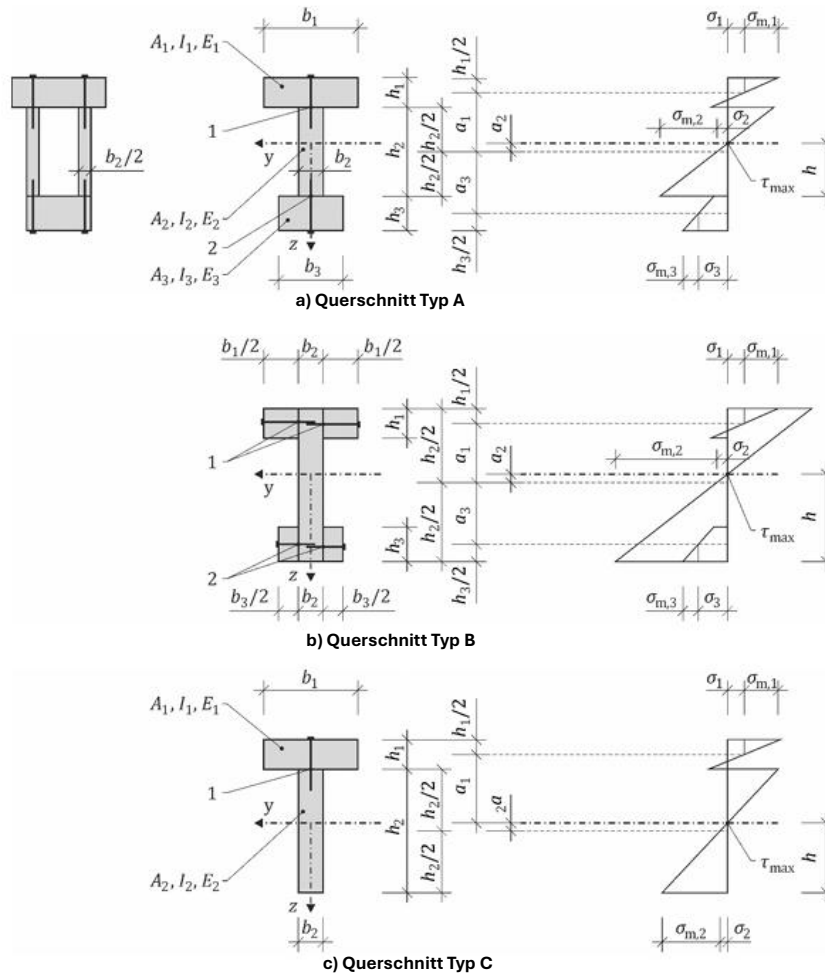


Abbildung 19: Querschnittstypen für nachgiebig verbundene Biegestäbe nach DIN EN 1995-1-1 [10]

Der Steiner-Anteil des zweiten Teilquerschnitts soll nicht abgemindert werden, der Faktor für die Teilquerschnitte eins und drei berechnet sich zu:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i l^2}} \quad i = 1, 3$$

$$\gamma_2 = 1$$

Die Abstände zwischen der Lage der Spannungsnullebene und den Schwerpunkten der i-nummerierten Teile des Querschnitts ergeben sich zu:

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2$$

$$a_2 = \frac{1}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i} [\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)]$$

$$a_3 = \frac{h_2 + h_3}{2} - a_2$$

Mithilfe der ermittelten Eingangswerte und Schnittgrößen können die Spannungen sowie die Beanspruchungen der Verbindungsmittel ermittelt werden.

Normalspannungsanteil σ_i

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}}$$

Biegespannungsanteil $\sigma_{m,i}$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M}{(EI)_{ef}}$$

Schubspannung τ_{max}

$$\tau_{2,max} = \left[\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 \left(\frac{a_2 + h_2}{2} \right)^2 \right] \frac{V_d}{b_2 (EI)_{ef}}$$

Last an Verbindungsmittel F_i

$$F_i = \gamma_i E_i A_i a_i s_i \frac{V_d}{(EI)_{ef}}$$

Die Nachweisführung mit den berechneten Spannungen und Beanspruchungen wird in [25] genauer erläutert.

2.3.2 Schubanalogieverfahren

Von Prof. Kreuzinger wurde das Verfahren der Schubanalogie zur Berechnung von Schnitt- und Verformungsgrößen an Verbundquerschnitten entwickelt und auch im NA zu Eurocode 5 ist es enthalten. Es basiert auf der Transformation beliebiger Verbundquerschnitte in ideale Rechenquerschnitte, anhand welcher mithilfe von Stabwerksprogrammen ideale Schnittgrößen berechnet werden können. Im Nachlauf können die reellen Schnittgrößen durch eine Rücktransformation aus den berechneten idealen Werten ermittelt werden. In der Arbeit von Ibrahimaj [13] wird noch eine zweite Option des Schubanalogieverfahrens dargestellt, welche ohne die Anwendung von Statiksoftware verwendet werden kann, diese wird hier jedoch nicht weiter erläutert.

Durch die Verwendung dieser Berechnungsmethode ergeben sich folgende Vor- und Nachteile: [25]

- jegliche Art der Laststellung berechenbar
- auch Mehrfeldsysteme modellierbar
- erweiterte technische Biegetheorie erforderlich
- linear elastisches Verhalten der Bauteile angenommen
- elektronische Statikprogramme, die Schubverformung berücksichtigen können, notwendig

Die Berechnungen beruhen ebenfalls auf der **Abminderung der Biegesteifigkeit** und der **verschmierten Fugensteifigkeit**. Die nötigen Anpassungen zur Berücksichtigung des **Langzeitverhaltens** werden in [13] ausführlich dargestellt.

Während es bei Biegestäben aus mehr als zwei Teilquerschnitten nur Näherungslösungen liefert, liegen bei Holz–Beton-Verbundsystemen und den hier in der Regel vorliegenden zweiteiligen Querschnitten keine verfahrensbezogenen Ungenauigkeiten zugrunde. Außerdem ist das Verfahren für Verbundquerschnitte unter beliebiger Belastung verwendbar. Ungenauigkeiten ergeben sich jedoch gegebenenfalls durch die als verschmiert betrachtete Fugensteifigkeit, vor allem wenn große Verbindungsmittelabständen vorhanden sind. Als Grenze des maximalen Abstandes gilt hier laut Kreuzinger [36] die doppelte Querschnittshöhe. Außerdem bringen die aufwendige Modellierung und die notwendige Rücktransformation der Ergebnisse eine hohe Fehleranfälligkeit und großen Zeitaufwand mit sich. Laut Dias [37] ist ein Vorteil beim Schubanalogieverfahren jedoch die einfache Anpassung des Modells an vergleichbare Systeme. [16]

Im Folgenden soll der Verfahrensablauf des Schubanalogieverfahrens genauer erläutert werden. Dabei werden drei Schritte nötig, um die Schnittgrößen zu ermitteln. Abbildung 20 stellt das dabei erzeugte ideale Modell des Systems dar, anhand dessen die Berechnung beschrieben wird. [7, 13, 25, 38]

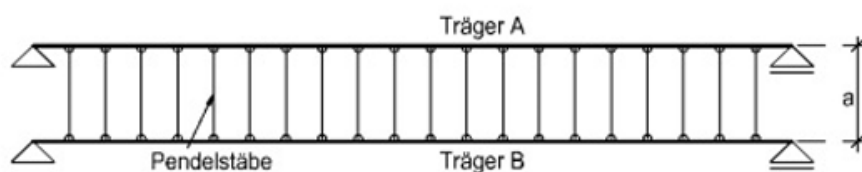


Abbildung 20: Ideelles Ersatzsystem Schubanalogieverfahren nach [13]

1. Transformation in ideellen Rechenquerschnitt

Der vorhandene Querschnitt wird hierbei in zwei imaginäre Ersatzträger (Ebenen) A und B transformiert. Die Ebene A stellt die Eigenanteile der Biegesteifigkeiten der realen Querschnitte dar und wird als schubstarr modelliert. Ebene B wird zur Berücksichtigung des Zusammenwirkens der Einzelquerschnitte verwendet. Ihr werden die Steiner-Anteile der Biegesteifigkeiten und eine Ersatzschubsteifigkeit, welche die Schubsteifigkeiten der Teilquerschnitte sowie die Nachgiebigkeit der Verbindung berücksichtigt, zugewiesen.

Berechnet werden die Steifigkeiten der imaginären Ersatzträger wie folgt: [25, 35]

Biegesteifigkeit Ebene A

$$EI_A = \sum_{i=1}^n EI_i = EI_{\text{Beton}} + EI_{\text{Holz}}$$

Schubsteifigkeit Ebene A

$$GA_A = \infty$$

Biegesteifigkeit Ebene B

$$EI_B = a^2 \frac{EA_{\text{Beton}} EA_{\text{Holz}}}{EA_{\text{Beton}} + EA_{\text{Holz}}}$$

Schubsteifigkeit Ebene B

$$\frac{1}{GA_B} = \frac{1}{z^2} \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{k_i} + \frac{h_1}{2 G_1 b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} + \frac{h_n}{2 G_n b_n} \right]$$

In der Schubsteifigkeit der Ebene B spiegelt der erste Bruch des Klammerausdrucks die Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels wider. Durch die restlichen Teile der Summe werden die Schubverformungen der einzelnen Querschnitte berücksichtigt, wobei der dritte Summand bei zweiteiligen HBV-Systemen mit $n = 2$ entfällt. Die Schubverformung wird nur zwischen den Schwerpunkten der beiden äußeren Schichten berücksichtigt, woraus der Faktor $\frac{1}{2}$ des zweiten und vierten Summanden resultieren. Nach Kuhlmann [35] wird für die Schubsteifigkeit der Ebene B jedoch eine andere Formel angegeben, in welcher die Schubsteifigkeiten der Einzelquerschnitte nicht mit eingehen und nur die Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels berücksichtigt wird.

2. Berechnung am ideellen System

Als statisches System wird das real vorhandene im Stabwerksprogramm nachgebildet. Nach Abbildung 20 wird der ideelle Ersatzquerschnitt mit den aus der Transformation berechneten Steifigkeiten modelliert und die Lasten aufgebracht. Gekoppelt werden die beiden Ersatzträger dabei mittels dehnstarrer Pendelstäbe, deren Länge beliebig gewählt werden kann und keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dabei ist nicht von Relevanz, ob die Lasten am Ersatzträger A oder B aufgebracht werden. Die Berechnung kann anstatt von Stab- auch mit Flächenelementen erfolgen. Wichtig hierbei ist, dass das gewählte Rechenprogramm die auftretenden Schubverformungen berücksichtigen kann.

3. Rücktransformation der Ergebnisse

Während die Verschiebungen am Ersatzträger bereits denen des Verbundquerschnittes entsprechen müssen die Schnittgrößen rücktransformiert werden. Dies erfolgt im Verhältnis der Steifigkeiten der ideellen und realen Querschnittsteile. [35]

Momente im Betonquerschnitt

$$M_{Beton} = M_A \frac{EI_{Beton}}{EI_A}$$

Momente im Holzquerschnitt

$$M_{Holz} = M_A \frac{EI_{Holz}}{EI_A}$$

Querkräfte im Betonquerschnitt

$$V_{Beton} = V_A \frac{EI_{Beton}}{EI_A} + V_B \frac{e_1}{a}$$

mit e_1 als Abstand vom Schwerpunkt des Betonquerschnitts zum Schwerpunkt der Verbundfuge

Querkräfte im Holzquerschnitt

$$V_{Holz} = V_A \frac{EI_{Holz}}{EI_A} + V_B \frac{e_2}{a}$$

mit e_2 als Abstand vom Schwerpunkt des Holzquerschnitts zum Schwerpunkt der Verbundfuge

Normalkräfte in den Teilquerschnitten

$$N_{Holz} = -N_{Beton} = \frac{M_B}{a}$$

Schubfluss in den Verbindungsmitteln

$$t_0 = \frac{V_B}{a}$$

Die mit diesen Schnittgrößen zu führende Nachweise können wiederum in [25] nachgeschlagen werden.

2.3.3 Stabwerksmodell nach Rautenstrauch

Abweichend von den vorherigen beiden Verfahren, welche für Verbundquerschnitte im Gesamten entwickelt wurden, und somit auch bei Holz-Holz-Verbindungen Verwendung finden, wurde von Prof. Rautenstrauch ein speziell auf die Holz-Beton-Verbundbauweise zugeschnittenes Modell zur Schnittgrößenermittlung erarbeitet. Dies bietet den komfortablen Vorzug, dass die Schnittgrößen genauso wie die Verformungen direkt an dem verwendeten Stabwerksmodell abgelesen werden können. Durch eine diskrete Modellierung der einzelnen Verbindungsmittel lassen sich hiermit die real vorliegenden Verhältnisse exakt modellieren.

Die Vorteile, welche das Stabwerksmodell mit sich bringt, sind: [16, 39]

- jegliche Art der Laststellung berechenbar
- beliebig gelagerte Verbundträger berechenbar
- Ergebnisauswertung am Modell
- exakte Verbindungsmittelanordnung modellierbar
- Normalkraft-/Momentensprünge in Teilquerschnitten werden abgebildet

Bei dem Verfahren wird eine **numerische Modellierung der Kopplung** verwendet und die einzelnen Verbindungsmittel **diskret modelliert**. Wie in Abbildung 10 in Kapitel 2.2.3.1 bereits dargestellt wurde, gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten die Verbindungsmittel zu modellieren, entweder als Kragarme oder mittels eines Fachwerkmodells als Diagonalen. Bei der Modellierung als Fachwerk würden die Querkräfte über die Diagonalen übertragen werden, wodurch die reale Querkraftbeanspruchung des Holz- und Betonquerschnitts von den Ergebnissen aus dem Stabwerksmodell abweichen. Deswegen wird in den weiteren Erklärungen und auch im Rahmen der Implementierung nur die Modellierung als Kragarme betrachtet. Zur Analyse des **Langzeitverhaltens** können die Bauteileigenschaften modifiziert und ein Temperaturänderung berücksichtigt werden, wofür Grosse [40] eine konkrete Vorgehensweise vorschlägt.

Bei dieser Art der Modellierung gibt es keine Einschränkungen hinsichtlich Belastungen, Systeme und Verbindungsmittelanordnung, jedoch kann die aufwendige Modellerstellung in der Praxis Probleme aufwerfen. Nicht nur die benötigte Zeit für die korrekte Erzeugung des Stabwerkmodells, sondern auch die Fehleranfälligkeit kann als Nachteil betrachtet werden. Zum Vermeiden von Ungenauigkeiten in der Berechnung werden hierbei Koppelstäbe mit ausreichend geringem Abstand nötig, da sonst die Beanspruchungen überschätzt werden könnten, wie Kuhlmann [35] auf S. 68 zeigt. Durch die Ablesbarkeit der Ergebnisse direkt am Modell, eventuell in die Software implementierte Holz- und Betonbemessung sowie Lastkombinationstools wird jedoch die Praxistauglichkeit des Verfahrens immens erhöht. [13, 16, 37]

Anhand von Abbildung 21 soll nun die Modellierung mithilfe des Stabwerksmodells genauer erläutert werden. [13, 35]

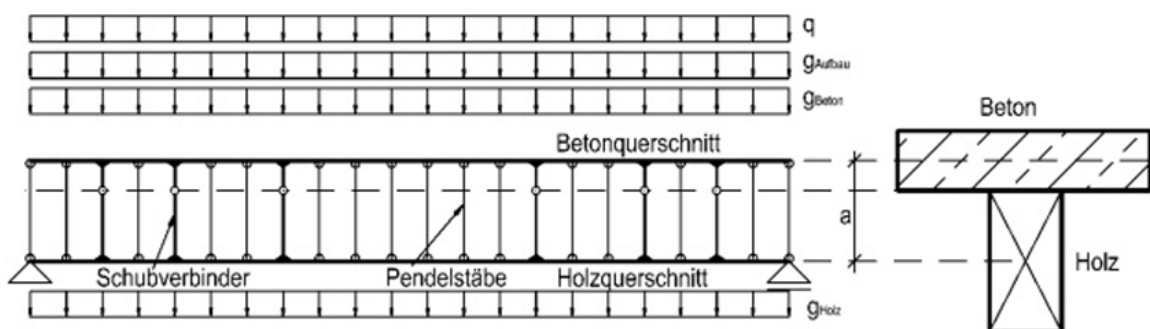


Abbildung 21: Stabwerksmodell nach Rautenstrauch aus [13]

Das Modell besteht ähnlich dem Schubanalogieverfahren aus einem Ober- und Untergurt, welche miteinander gekoppelt werden. Hierbei stellen die beiden Gurte der Realität folgend die vorhandenen Beton- und Holzquerschnitte dar, der Untergurt den Holzquerschnitt und der Obergurt den Betonquerschnitt. Ebenfalls den realen Gegebenheiten folgend werden die beiden Gurte genau auf der Höhe der Schwerpunktsachsen der Einzelquerschnitte modelliert und ihnen die Steifigkeiten und Querschnittswerte des Holz- beziehungsweise Betonquerschnitts zugewiesen. Dabei berechnet sich die mitwirkende Breite des Betonquerschnitts gemäß der Berechnung von b_{eff} eines Plattenbalkenquerschnitts aus EC 2. Zur Kopplung der beiden Längsstäbe kommen zwei verschiedene Stabtypen zum Einsatz. Zum einen Druckstäbe, welche an beiden Enden gelenkig gelagert werden und dazu dienen, eine identische Biegelinie der beiden Gurte zu erhalten. Diese Pendelstützen werden dehnstarr modelliert. Der zweite Typ an Kopplungsstäben stellt die Schraubenverbindungen des HBV-Systems dar. Bei diesen gibt es mehrere Möglichkeiten der Modellierung, welche in Abbildung 22 dargestellt werden.

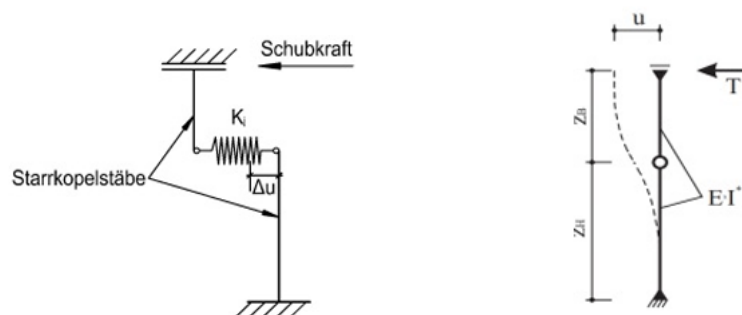


Abbildung 22: Möglichkeiten zur Modellierung der Verbindungsmittel aus [13]

Auf der linken Seite wird die in 2.2.3.1 bereits erwähnte Kopplung mittels Querkraftfedern dargestellt. Die hierbei verwendeten Stäbe werden starr ausgebildet und auf Höhe der Verbundfuge wird ihnen eine Feder zugewiesen. Über die Definition der Feder im Stabwerksprogramm kann das Verbindungsmittel hinsichtlich Nichtlinearität, Plastizität und Bruch wirklichkeitsnah beschrieben werden.

Das nach Rautenstrauch vorgeschlagene und im Verlauf dieser Arbeit weiterverwendete Ersatzsystem für die Verbindungsmittel wird auf der rechten Seite dargestellt. Dabei wird die Nachgiebigkeit der Verbundfuge mithilfe einer Ersatzbiegesteifigkeit EI^* der Kragarme, die aus dem Ober- und Untergurt entspringen, abgebildet. Gekoppelt werden diese beiden Kragarme mithilfe eines Momentengelenks auf Höhe der Verbundfuge, das freie Verdrehungen zulässt.

Sofern nur linear elastisch berechnet wird, werden laut Ibrahimaj [13] bei beiden Möglichkeiten zur Modellierung der Verbindungsmittel dieselben Ergebnisse erzielt, in den weiteren Erläuterungen wird lediglich die Methode auf der rechten Seite berücksichtigt.

Berechnung der Ersatzbiegesteifigkeit EI^*

Da die modellierten Schrauben die Nachgiebigkeit des Verbundquerschnittes widerspiegeln sollen, muss in der Berechnung von EI^* das Verschiebungsmodul K_{ser} berücksichtigt werden. Dies erfolgt wie bereits erwähnt über das Zuweisen einer Ersatzbiegesteifigkeit an die beiden Kragarme. Hierbei könnte bei der Bestimmung dieser Biegesteifigkeit nochmal in zwei Fälle unterschieden werden, je nachdem ob sich durch das Exzentrizitätsmoment infolge der Verbindungsmittel eine klaffende Fuge zwischen Holz und Beton einstellen kann oder nicht. Die Berechnung beim Auftreten einer solchen Fuge wird von Kuhlmann in [35] genauer erläutert, laut Grosse kann der entstehende Fehler bei Vernachlässigung der Fugenöffnung jedoch als „unter baupraktischen Gegebenheiten [...] vernachlässigbar eingeschätzt werden“, [41, p. 536] weswegen in dieser Arbeit die Obergurtverformung keine Berücksichtigung findet.

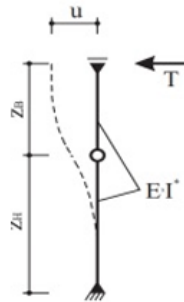


Abbildung 23: Ersatzsystem des VM bei Vernachlässigung der Obergurtverformung aus [13]

Unter den erklärten Umständen berechnet sich die Biegesteifigkeit des Kragarms zu:

$$EI^* = \frac{K_{ser}}{3} (z_B^3 + z_H^3)$$

Durch die Berechnung im Stabwerksprogramm lassen sich anhand dieses Modells die Schnittgrößen und Verformungen bestimmen. Die Querkräfte in den Kragarmen, welche die Verbindungsmittel darstellen, können als Beanspruchung der Verbindungsmittel verstanden werden.

Diese Werte können dann verwendet werden, um die Gebrauchtauglichkeits- und Tragfähigkeitsnachweise nach den jeweiligen Normen zu führen. Zum Nachweis der Verbindungsmittel müssen die errechneten Beanspruchungen mit denen aus der jeweiligen Verbindungsmittelzulassung verglichen werden.

2.3.4 Finite-Elemente-Modelle

Durch die Modellierung eines Bauteils als FE-Modell können bei entsprechend detaillierter Modellierung sehr präzise Ergebnisse bestimmt werden. Allerdings ist es notwendig, die Arbeitslinie des Verbindungsmittels und die Materialkennwerte der Teilquerschnitte exakt zu kennen. Durch den zusätzlich sehr hohen Modellierungsaufwand beschränkt sich die Anwendung dieser Methode hauptsächlich auf die Forschung und Entwicklung. [9, 42]

Konkrete Vorteile, die eine solche Modellierung bietet, sind: [37, 43]

- nichtlineares Werkstoffverhalten berücksichtigbar
- auch auf ganze Deckensysteme anwendbar
- nur wenige Vereinfachungen nötig (z.B. Schubverformung berücksichtigbar)

Hier wird ebenfalls eine **numerische Modellierung der Kopplung** angewendet. Dabei gibt es die Möglichkeit **diskrete Verbindungsmittel** zu modellieren, jedoch kann auch eine **verschmierte Fugensteifigkeit** verwendet werden. In [21] wird von Schänzlin ebenfalls ein FE-Modell vorgeschlagen, wobei unter Kapitel 8.4 auch auf Spannungsumlagerungen durch das **Langzeitverhalten** eingegangen wird.

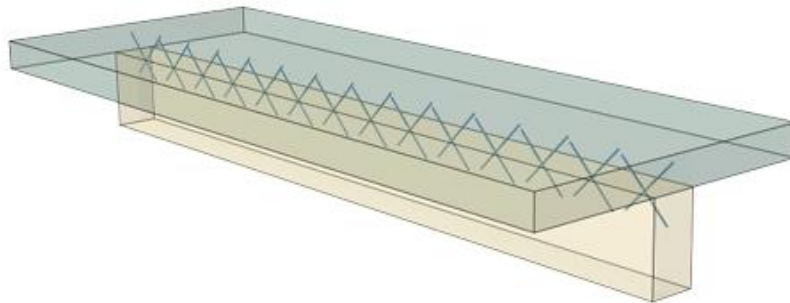


Abbildung 24: Beispielbild FE-Modellierung aus [17]

Die verschiedenen Möglichkeiten der FE-Modellierung werden von Eller in [17] erläutert. Da sich diese Arbeit auf den praktischen Alltag eines Tragwerksplaners beziehen sollte, für welchen diese Art der Modellierung im Regelfall zu aufwendig ist, wird die Option der FEM-Bemessung hier nicht weiter erläutert.

2.3.5 Vergleich der Verfahren

In der Arbeit von Ibrahimaj [13] werden die Verfahren mithilfe eines Beispiels miteinander verglichen, genauso wie in. Als Empfehlungen für die Bemessungspraxis werden die folgenden Kernaussagen getroffen:

- Im Hinblick auf die **Plausibilität** der Ergebnisse werden maximale Abweichungen von ca. 5% zwischen den Verfahren erzielt, ausgenommen der Querkraftwerte und VM-Beanspruchung. Hierbei lieferten das Stabwerksmodell nach Rautenstrauch und das Schubanalogieverfahren plausible Querkraftwerte, während das γ -Verfahren keine genaue Aussage über die Querkraftaufteilung zuließ und die verwendeten FEM-Modelle weniger plausible Ergebnisse ergaben. Im Bezug auf die Verbindungsmittelbeanspruchung können vom Schubanalogieverfahren, dem Stabwerkmodell und von den FEM-Modellen das Schwindverhalten auf die Verbindungsmittel berücksichtigt und nahe beieinander liegende Ergebnisse erzielt werden.
- Die **Vollständigkeit** der Berechnungsergebnisse wird bis auf beim γ -Verfahren, bei dem die Querkraft unvollständig ermittelt wird, als quasi vollständig bewertet. Als ein Vorzug der verwendeten FEM-Modelle wird die gleichzeitige Spannungsermittlung zusätzlich zur reinen Schnittgrößenermittlung genannt.
- Bei der Bewertung unter dem Kriterium des **Berechnungsaufwands** überwiegen die Vorteile eines der verwendeten FE-Modelle, da die Nachweise direkt im Berechnungsprogramm geführt werden können und im Programm hinterlegten Eigenschaften übernommen werden können. Für das γ - und Schubanalogieverfahren wird die Möglichkeit einer Arbeitserleichterung mittels Tabellenkalkulations-Programme in Betracht gezogen, was den Aufwand für das γ -Verfahren dezimiert. Das Schubanalogieverfahren wird trotz dieser Möglichkeit als die aufwendigste Option bewertet, da neben den Rechnungen zur Transformation und Rücktransformation immer noch zusätzlich eine Statik-Software erforderlich wird.











Zur Bemessung von Deckensystemen mit kontinuierlich über die Länge angeordneten Verbindungsmitteln werden das γ -Verfahren und Schubanalogieverfahren als geeignet bewertet. Sobald jedoch Einzellasten berücksichtigt werden müssen, liefern die beiden Verfahren konservative Ergebnisse. In diesem Fall, und wenn diskret über die Spannrichtung verteilte Verbindungsmittel eingesetzt werden sollen, wird eine Bemessung über das Stabwerksmodell nach Rautenstrauch empfohlen.

Auch auf die verschiedenen vorgestellten FE-Modelle und deren Anwendungsfälle wird verwiesen. Das hierbei vorgestellte Stabmodell wird als die schnellste Lösung zur Bemessung dargestellt. Die anderen Varianten an finite Elemente-Modellen bieten jeweils ihre spezifischen Vorteile und Anwendungsfälle. So ist das Scheibenmodell bei der Verwendung von formschlüssigen Verbindungsmitteln zu verwenden, das Flächenmodell sollte Anwendung finden, falls die biaxiale Tragwirkung der HBV-Decken berücksichtigt werden soll und das Flächen-Scheibenmodell ermöglicht eine genauere Betrachtung der Schubspannungen und -kräfte.

2.4 Vergleich bestehender Berechnungstools

Mithilfe der folgenden Tabelle wird ein Überblick über ausgewählte Bemessungstools für Holz-Beton-Verbunddecken gegeben. Dabei werden sowohl die zugrunde liegenden Berechnungsverfahren als auch mögliche Einschränkungen der einzelnen Programme dargestellt. Diese Gegenüberstellung dient der Einordnung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Python-Clients in den bestehenden Stand der Technik.

Tabelle 4: Vergleich bestehender Bemessungstools [eigene Darstellung]

Software	Verfahren	Mehrfelder	Einzellasten	VM-Abstände	Besonderheit
Hersteller-Tools					
 WURTH Würth Technical Software II	γ -Verfahren, Stabwerk	✗	✓	gestaffelt (maximal 8 Bereiche)	nur für Würth-Produkte
 elascon TW Solution 2	γ -Verfahren	✗	✗	gestaffelt (maximal 12 Bereiche)	nur für Elascacon-Produkte
 elascon Easycon FEM 3D	Stabwerk	✗	✓	gestaffelt	nur für Elascacon-Produkte
 SFS HBV 6	Differentialgleichung	✓ (maximal 3 Felder)	✓	gestaffelt (maximal 10 Bereiche)	nur für SFS-Produkte
 FRIEDRICH Verbundsysteme HB-Verbundanker	Differentialgleichung	✗	✗	gestaffelt (maximal 4 Bereiche)	nur für Friedrich-Produkte
 schmid schrauben hainfeld Excel-Tool	γ -Verfahren	✗	✓	konstant	nur für Schmid-Produkte
 Ancon Excel-Tool	γ -Verfahren	✗	✗	konstant	nur für Ancon-Produkte
 Eurotec ECS 3.0	γ -Verfahren	✗	✗	gestaffelt (maximal 6 Bereiche)	nur für Eurotec-Produkte
Statikprogramme					
 PBS.de HBV-Decken (64V)	γ -Verfahren	✓	✓	gestaffelt	nicht produktspezifisch, nichtlineare Modelle
 mbAEC S201.de	γ -Verfahren	✗	✓	gestaffelt	nicht produktspezifisch, keine nicht-linearen Modelle

Es wird hierbei zwischen herstellerspezifischen Anwendungen, die auf die Bemessung bestimmter Verbindungsmittel ausgerichtet sind, und allgemeinen Softwarelösungen unterschieden, die unabhängig vom verwendeten Schraubentyp eingesetzt werden können.

Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, bieten die betrachteten Bemessungstools der Verbindungsmittelhersteller verbindungsmittelgebundene und hinsichtlich der abbildbaren Systeme sowie der Laststellungen teils eingeschränkte Möglichkeiten. Dafür bieten diese Programme konkrete Schraubenempfehlungen für die Anordnung über die Trägerlänge an und auch die Bemessung der Schrauben erfolgt bereits in den Programmen.


Im Bereich der allgemeinen Statiksoftware stehen hingegen nur wenige Programme zur Verfügung, die eine explizite Bemessung von Holz-Beton-Verbundsystemen ermöglichen. Im deutschsprachigen Raum sind hier insbesondere die Programme S201.de von mb Baustatik und das Modul Holz-Beton-Verbunddecken (64V) der Ingenieur-Koch GmbH zu nennen. Diese erlauben zwar eine herstellerunabhängige Bemessung, basieren jedoch überwiegend auf vereinfachten analytischen Verfahren, wie dem γ -Verfahren, und ermöglichen keine detaillierte Abbildung des tatsächlichen Verbundverhaltens. Während die Lösung der Ingenieur-Koch GmbH nichtlineare Materialgesetze im Nachweis des Betonquerschnitts durch unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Modelle berücksichtigen kann, bleibt die Systemberechnung linear. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Modellierung in RFEM eine durchgängige nichtlineare Analyse des Gesamtsystems, wodurch zusätzliche Effekte wie Umlagerungen in mehrfeldrigen Systemen erfasst werden können. Die Auswirkungen bei diesen Untersuchungen werden im Kapitel 4.5 genauer betrachtet.

Weitere Statikprogramme verfügen in der Regel über keine speziellen HBV-Module. Eine Modellierung ist hier lediglich über allgemeine numerische Ansätze, beispielsweise in Form von Stabwerks- oder FE-Modellen, möglich. Diese ermöglichen zwar eine realitätsnahe Abbildung des Tragverhaltens, sind jedoch mit einem erheblichen manuellen Modellierungsaufwand verbunden und bieten keine automatisierten Funktionen zur Generierung entsprechender Systeme.

Insgesamt zeigt die Gegenüberstellung, dass sowohl herstellerspezifische als auch allgemeine Softwarelösungen jeweils nur Teilaspekte der Bemessung von Holz-Beton-Verbundsystemen abdecken und mit spezifischen Einschränkungen verbunden sind. Daraus ergibt sich ein deutlicher Bedarf an Lösungen, die eine flexible, produktunabhängige und gleichzeitig realitätsnahe Modellierung ohne Einschränkungen hinsichtlich Geometrie und Laststellung ermöglichen.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Python-Client setzt genau an dieser Schnittstelle an, indem er die automatisierte Erstellung von Stabwerksmodellen mit den Möglichkeiten einer numerischen Berechnung kombiniert und somit die Vorteile beider Ansätze vereint.

Tabelle 5: Funktionen des Python-Clients [eigene Darstellung]

Software	Verfahren	Mehrfeld	Einzellasten	Verbund	Besonderheit
 Python/RFEM6-API	Stabwerksmodell	✓	✓	gestaffelt (maximal 4 Bereiche)	nicht produktspezifisch, nichtlineare Modelle

2.5 Dlubal Software, API und Python

Für die Erstellung und Berechnung der Holz-Beton-Verbundsysteme wird in dieser Arbeit das Statikprogramm RFEM 6 der Dlubal Software verwendet. RFEM ist eine Finite-Elemente-Software, die die Modellierung und Analyse von Tragwerken auf Grundlage numerischer Berechnungsverfahren ermöglicht. Neben der grafischen Benutzeroberfläche stellt die Software eine Programmierschnittstelle zur Verfügung, über die Modelle automatisiert erstellt, verändert und berechnet werden können.

Die Dlubal API erlaubt den Zugriff auf zentrale Funktionen der Software, wie beispielsweise die Definition von Materialien, Querschnitten, Stäben, Lagern und Lasten. Dadurch wird es möglich, wiederkehrende Modellierungsaufgaben zu automatisieren und komplexe Strukturen effizient zu generieren. In dieser Arbeit wird die API genutzt, um ein Stabwerksmodell nach Rautenstrauch automatisiert auf Basis von Benutzereingaben zu erzeugen. Dabei wird die zweite Generation der Dlubal API verwendet, welche auf der im nächsten Kapitel erläuterten gRPC-Technologie basiert.

Als Programmiersprache wird Python eingesetzt. Diese eignet sich aufgrund ihrer einfachen Syntax, der guten Lesbarkeit sowie dem großen Angebot an zugehörigen Bibliotheken besonders für ingenieurtechnische Anwendungen und Automatisierungsaufgaben. Durch die Kombination aus RFEM, der Dlubal API und Python wird ein Client entwickelt, der die Generierung komplexer Tragwerksmodelle ermöglicht ohne manuelle Bedienung von RFEM zu erfordern. Dies reduziert den Modellierungsaufwand erheblich und minimiert gleichzeitig potenzielle Eingabefehler.

2.6 gRPC und Remote Procedure Calls

Die Kommunikation zwischen dem entwickelten Python-Client und der Dlubal Software erfolgt über sogenannte Remote Procedure Calls (*RPC*). Dabei handelt es sich um ein Konzept, bei dem Funktionen oder Methoden eines Programms von einem anderen Programm aus aufgerufen werden können, auch wenn diese auf einem anderen Prozess oder System ausgeführt werden. Für den Anwender entsteht dabei der Eindruck, als würde es sich um einen lokalen Funktionsaufruf handeln.

In der vorliegenden Arbeit wird hierfür das Framework gRPC verwendet. gRPC ist ein von Google entwickeltes Open-Source-Framework zur Kommunikation zwischen Softwarekomponenten und basiert auf dem Netzwerkprotokoll HTTP/2.

Im Rahmen der Dlubal API übernimmt gRPC die Rolle der Schnittstelle zwischen dem Python-Client und der RFEM-Anwendung. Der Client sendet strukturierte Anfragen, beispielsweise zur Erstellung von Stäben oder Lasten, an die Software, welche diese verarbeitet und entsprechende Ergebnisse zurückliefert. Die Kommunikation erfolgt dabei standardisiert und typisiert, wodurch Fehler reduziert, und die Stabilität der Anwendung erhöht werden.

Die übertragenen Daten werden dabei in klar definierten Strukturen organisiert. In der Dlubal API werden häufig Listen verwendet, um mehrere Objekte, beispielsweise Knoten oder Stäbe, gleichzeitig zu übergeben. Abbildung 25 veranschaulicht schematisch die Kommunikation zwischen dem Python-Client und der RFEM-Anwendung.



Abbildung 25: Kommunikation zwischen Python-Client und RFEM [eigene Darstellung]

3. Implementierung

3.1 Einrichtung der Entwicklungsumgebung

Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Python-Client wurde in einer lokalen Entwicklungsumgebung mittels Python 3.10.10 erstellt. Außerdem wurde eine virtuelle Arbeitsumgebung eingerichtet, welche spezifisch auf das Projekt zugeschnitten wurde.

Zum Zugriff auf die Berechnungssoftware RFEM wurde die Dlubal API verwendet. Damit kann auf die Modellierungs- und Berechnungsfunktionen von RFEM programmgesteuert zugegriffen werden. Hierbei wird von Dlubal empfohlen, die API-Version zu verwenden, welche mit der eingesetzten Version von RFEM kompatibel ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde RFEM 6.12.0007 in Verbindung mit der entsprechenden API-Version 2.12.7 verwendet. Bei den im Anhang enthaltenen Dateien zum Setup und Starten des Clients werden sowohl die virtuelle Arbeitsumgebung erzeugt als auch die vorhandene RFEM-Lizenz abgefragt und die dazu kompatible API-Version installiert. Zusätzlich werden folgende externe Python-Bibliotheken verwendet, die durch die Setup-Datei automatisiert installiert werden:

- **math** für mathematische Funktionen und Konstanten, insbesondere zur Verwendung von unendlich (*inf*)
- **numpy** zur numerischen Verarbeitung und zur Arbeit mit Arrays
- **streamlit** zum Erstellen einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI)
- **pandas** zur Verarbeitung und Darstellung von Daten in Tabellenform, insbesondere für die Visualisierung in Streamlit

Achtung: neuere Versionen der Dlubal-API ab Version 2.12.11 und zugehöriger RFEM-Version 6.12.0011 weisen strukturelle Änderungen auf, wodurch die Kompatibilität mit dem Client nichtmehr gegeben ist.

Die Entwicklung des Codes erfolgte in der integrierten Entwicklungsumgebung (IDE) Visual Studio Code. In dieser wurde ein Entwicklungsmodus (*DEV_MODE*) implementiert, welcher für den Zeitraum der Programmentwicklung verwendet wurde. Damit konnten die einzelnen geforderten Benutzereingaben aus einer Konfigurationsdatei geladen werden, was das Testen und Weiterentwickeln des Codes ohne manuelle Eingaben ermöglichte.

Um die Verbindung zu RFEM herzustellen, muss die Software lokal installiert und geöffnet sein, nur so kann sie über die API-Schnittstelle angesprochen werden. Zum Vermeiden von Konflikten, werden bei Ausführung des Stabwerksgenerators alle geöffneten Modelle geschlossen, um anschließend ein neues Modell zu erstellen und vollständig über den Python-Client auf Basis der Benutzereingaben zu definieren.

3.2 Verbindung zur Dlubal API

Die Verbindung zur Programmierschnittstelle wird innerhalb des Python-Codes über eine Anwendungssitzung hergestellt. Dabei erfolgt die Kommunikation mit der lokal installierten und gestarteten RFEM-Instanz über eine gRPC-basierte Schnittstelle, wodurch sämtliche Modellierungsoperationen programmgesteuert durchgeführt werden. Dies erfolgt durch das Drücken des Buttons „*Modell in RFEM generieren*“ auf der Seite des Stabwerksgenerators, was die entsprechende Funktion im Python-Client auslöst und die Verbindung herstellt.

Für die Verbindung zur Dlubal API und den Zugriff auf die Funktionen von RFEM wird eine Authentifizierung erforderlich. Dafür werden von Dlubal API Keys vergeben, welche im Extranet von Dlubal generiert werden können. Diese dienen der eindeutigen Identifikation und Autorisierung des Clients gegenüber RFEM. Der API Key wurde aus Sicherheitsgründen über externe Konfigurationsmechanismen eingebunden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt dies über eine Konfigurationsdatei (*config.ini*), in welcher der API Key gespeichert und beim Programmstart ausgelesen wird. Beim Ausführen der Datei *app_setup* wird der API Key des Benutzers abgefragt und automatisiert eine Konfigurationsdatei erstellt, über welche die Authentifizierung des Benutzers erfolgt.

Einen Überblick über die notwendigen Schritte zum erstmaligen Verwenden der Dlubal API findet man in der [Quick Start-Anleitung](#) [44] auf der Dlubal-Internetseite. Durch die Automatisierung über die Setup-Datei muss der Benutzer lediglich die Schritte zur Installation von RFEM (Versionen 6.12.0007-0010!) und Python (Versionen 3.10-13) befolgen sowie den API Key generieren und bei der Abfrage im Terminal eingeben.

3.3 Aufbau des Python-Clients

Der entwickelte Python-Client wurde modular aufgebaut und dadurch die Benutzerinteraktion von der eigentlichen Modellgenerierung getrennt. Dies wurde durch die Aufteilung in zwei einzelne Skriptdateien erreicht:

- **RautenstrauchClient.py**
Enthält die grafische Benutzeroberfläche sowie die Verarbeitung der Benutzereingaben
- **Rautenstrauch.py**
Beinhaltet die Modellgenerierung sowie die Kommunikation mit der Dlubal API

Diese Trennung erzeugt eine klare Struktur und somit Übersichtlichkeit im Hinblick auf Änderung und Erweiterbarkeit des Programms.

Im folgenden Organigramm werden die einzelnen Funktionen des Clients in der Reihenfolge ihrer Aufrufe sowie die erzeugten Listen dargestellt und auf Basis dieser Grafiken im Kapitel 3.3.2 und 3.3.4 erläutert. Durch Ausführen der dargestellten Funktionen werden alle benötigten Koordinaten zur Modellerstellung festgelegt und die Materialien, Querschnitte, Lasten sowie die Gelenke der Verbindungsmittel definiert.

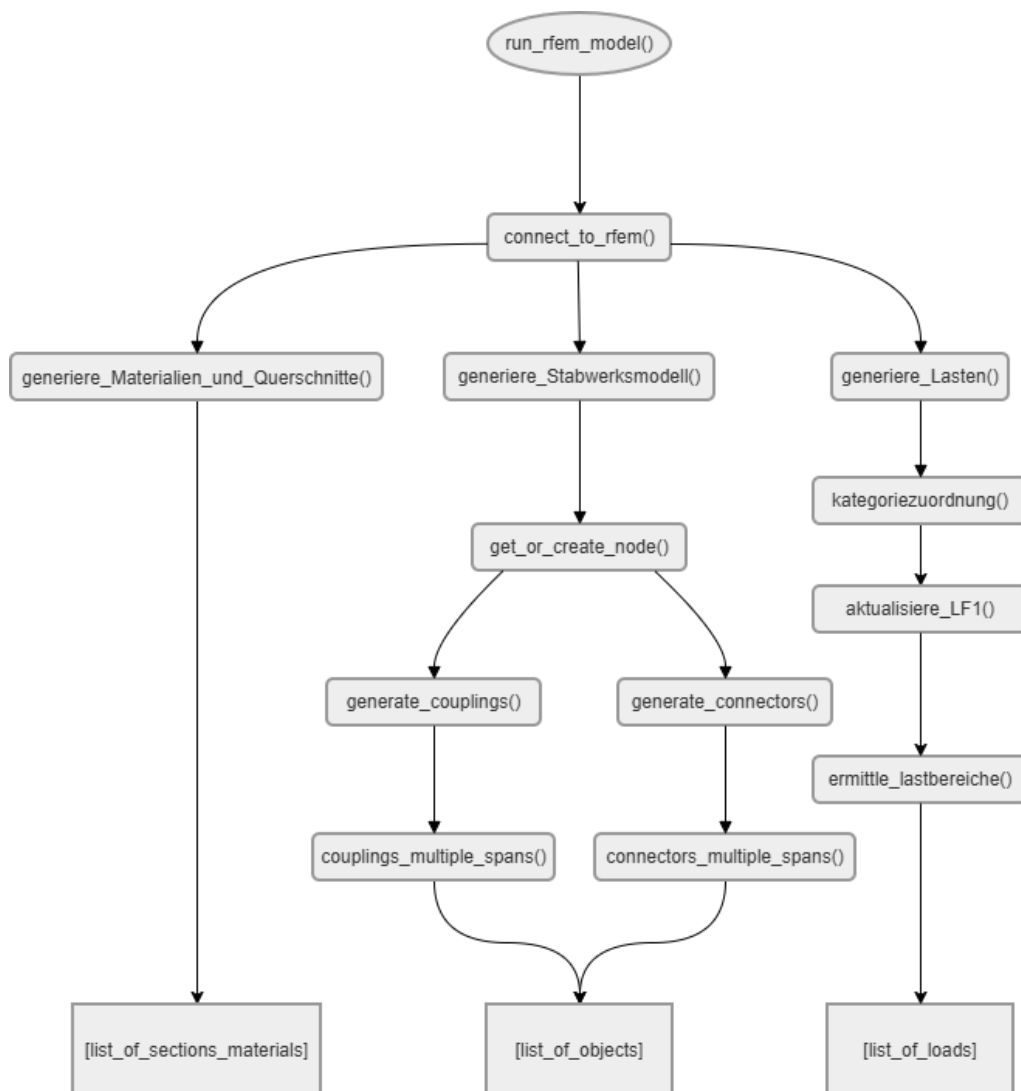


Abbildung 26: Ablauf der Funktionsaufrufe [eigene Darstellung]

Sobald neben der Funktion zur Definition der Materialien und Querschnitte auch die Funktionen zur Bestimmung der Koordinaten der Koppelstäbe (*couplings*), der Verbindungsmittel (*connectors*) und der Systemabmessungen ausgeführt wurden, werden im weiteren Verlauf der Funktion *generiere_Stabwerksmodell()* über die in der folgenden Abbildung dargestellten Zuweisungen die einzelnen Bestandteile des Modells an *[list_of_objects]* angefügt, bevor die Funktion *generiere_Lasten()* ausgeführt wird.

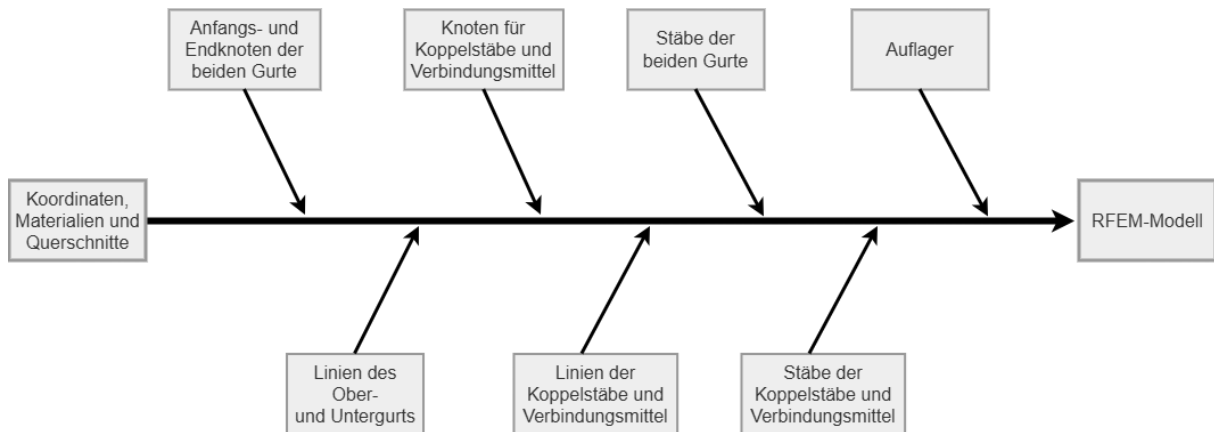


Abbildung 27: Ablauf der Erstellung der Modellkomponenten [eigene Darstellung]

3.3.1 Benutzereingaben und Parametrisierung

Die Eingabe der Systemparameter erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche, welche mit der Python-Bibliothek *Streamlit* erzeugt wurde. Darüber kann der Benutzer alle für die Modellierung relevanten Parameter definieren, darunter:

- Anzahl und Länge der Felder
- Materialkennwerte von Holz, Beton und Schrauben
- Querschnittsabmessungen Beton und Holz
- Schraubenabstände
- Lasten

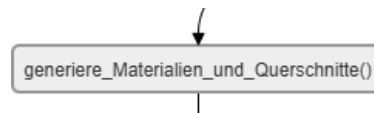
Dabei wird die Eingabe der Schraubenabstände in drei verschiedenen Bereiche unterteilt ermöglicht, so können unterschiedliche Abstände für das erste Viertel, die mittlere Hälfte und das letzte Viertel der einzelnen Spannweiten festgelegt werden. Diese Abstufung wurde nach Rücksprache mit einem HBV-Schraubenhersteller als am relevantesten für die Praxis empfohlen und wird auch in Statikprogrammen wie *mb Baustatik* als Regelfall angewendet. Außerdem können je nach den projektspezifischen Gegebenheiten Randabstände der Schrauben an den Feldrändern zu „kein Abstand“, „halber Schraubenabstand“ und „ganzer Schraubenabstand“ gesetzt werden. Dadurch wird dem Benutzer ermöglicht die Position der äußersten Schrauben in Abhängigkeit der gewählten VM-Abstände im jeweiligen Bereich flexibel zu wählen.

Die Benutzereingabe wird im Anschluss an die zentrale Funktion zur Modellgenerierung übergeben, wobei die Einzelwerte aus **RautenstrauchClient.py** mit dem Funktionsaufruf von *run_rfem_model()* an die in **Rautenstrauch.py** definierte Funktion übergeben werden.

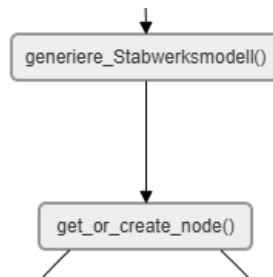
Hinweis zur Entwicklung: Für die Eingabe der Parameter wurde für die Dauer der Programmierung wie bereits erwähnt ein Entwicklungsmodus eingerichtet, in dem die Systemparameter aus einer externen JSON-Datei geladen wurden. Bei diesem Prozess wurden alle geforderten Nutzereingaben aus der Datei übernommen und eine manuelle Eingabe damit nicht benötigt, was vor allem für die Zeit vor der Implementierung des User Interface eine Zeitersparnis beim Testen des Programms ermöglichte. Außerdem konnte die Modellerstellung so einfach reproduzierbar gemacht werden und auch für den Zeitraum der Entwicklungsarbeiten Fehler durch manuelle Eingaben vermieden werden. Sobald die GUI eingerichtet wurde, waren die Benutzereingaben dank der in *Streamlit* vorgeschlagenen Werte für die Einzelparameter kein erhöhter Aufwand mehr und der *DEV_MODE* nichtmehr benötigt, weshalb er aus dem finalen Quelltext entfernt wurde.

3.3.2 Automatisierte Modellerstellung

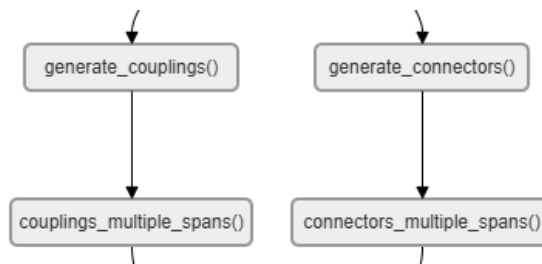
Nach dem Aufrufen der in *Rautenstrauch.py* definierten Funktion *run_rfem_model()* wird das Stabwerksmodell vollständig automatisiert generiert. Dabei wird das Tragwerk auf Basis der eingegebenen Parameter schrittweise erstellt. Anhand der einzelnen Bestandteile des Clients soll nun die Konzeption der Modellerstellung chronologisch erläutert werden, um die Arbeitsweise transparent darzustellen. Begonnen wird mit den zuerst ausgeführten Funktionen *generiere_Materialien_und_Querschnitte()* sowie *generiere_Stabwerksmodell()*, welche in Abbildung 26 dargestellt werden, um danach die auf Basis der Werte aus den Funktionen erzeugten Modellkomponenten aus Abbildung 27 genauer zu beschreiben. Die Lasterstellung und dritte Hauptfunktion *generiere_Lasten()* wird in Kapitel 3.3.4 beschrieben.



Diese Funktion dient dazu die Materialien und darauf aufbauend die Querschnitte der Einzelkomponenten des Modells zu definieren. Außerdem wird hierbei das Gelenk, welches in den modellierten Verbindungsmitteln auf Höhe der Verbundfuge Anwendung findet, definiert. Für die Definition der verwendeten Holz- sowie Betongüte wird auf die in RFEM hinterlegte Materialbibliothek zugegriffen, welche auf Basis des Eingabeformats in *Streamlit* aus diesen Bezeichnungen die entsprechenden Materialien zuordnet. Außerdem werden die Materialeigenschaften der Verbindungsmittel berechnet und zugewiesen wie im Kapitel 3.3.3 erläutert wird. Unter Angabe der jeweilig zugewiesenen Materialien werden im Anschluss die Querschnitte des Holz- und Betonquerschnitts erzeugt, welche über eine strukturierte Namenskonvention von RFEM automatisch als Rechteckquerschnitte mit den passenden Maßen interpretiert werden. Die so erstellten Objekte werden in der Liste *[list_of_sections_materials]* abgespeichert und an RFEM übergeben.



Innerhalb der folgenden Funktion *generiere_Stabwerksmodell ()* laufen sowohl die restlichen Funktionen zur Definition der notwendigen Koordinaten als auch die Zuweisungen der einzelnen Modellbestandteile ab. Darin wird zunächst die Funktion *get_or_create_node ()* beschrieben, welche bei dem Erzeugen der Knoten aufgerufen wird, um eine redundante Knotenerzeugung an einer beliebigen Stelle zu vermeiden. Mithilfe dieser Funktion wird geprüft ob bei diesen Koordinaten bereits ein Knoten existiert und gegebenenfalls wird dieser dann verwendet, ohne dass ein neuer Knoten erzeugt wird.



In diesen vier Funktionen werden die geometrischen Grundlagen bestimmt. Dafür werden sowohl die Positionen der Koppelstäbe (*couplings*) als auch die Koordinaten der einzelnen Verbindungsmittel (*connectors*) über separate Funktionen *generate_couplings ()* und *generate_connectors ()* berechnet. Die Koppelstäbe werden Sieder [4] folgend im Abstand von 10 cm erzeugt, wobei sich bei der Eingabe von ungeraden Systemlängen kleine Abweichungen der ausgeführten Abstände ergeben können, welche durch die große Zahl an *couplings* jedoch im Regelfall nicht zu groß wird. Hierbei werden die Benutzereingaben so verarbeitet, dass die vorgegebenen Verbindungsmittelabstände in den drei definierten Bereichen unter Berücksichtigung der Randabstände und der Feldlängen möglichst exakt eingehalten werden. Abhängig von den eingegebenen Werten muss hierbei jedoch gegebenenfalls von diesen abgewichen werden, um die Systemgeometrie zu ermöglichen. Dafür wurde in die Benutzeroberfläche in *Streamlit* zusätzlich die Ausgabe der Schraubenabstände eingebaut, um den Benutzer darauf hinzuweisen welche exakten Werte zur Modellerstellung verwendet wurden. Mittels Wrappern, also Codelayern, die die Funktionen für die einfeldrige Koordinatenbestimmung je nach der Anzahl an Feldern aus der Benutzereingabe wiederholt aufrufen, werden die Positionen der späteren vertikalen Elemente auch für Mehrfeldsysteme ermittelt. *couplings_multiple_spans ()* und *connectors_multiple_spans ()* dienen hier als Wrapper und enthalten gleichzeitig einen Mechanismus, um Doppelungen an den Übergängen von einem Feld zum nächsten zu vermeiden.

Anfangs- und
Endknoten der
beiden Gurte

Linien des
Ober-
und Untergurts

Nach Ablauf der Funktionen innerhalb *generiere_Stabwerksmodell()* werden die Einzelobjekte zugewiesen. Begonnen wird hierbei mit den Knoten (*nodes*) sowie den Linien (*lines*), welche den Ober- und Untergurt, also den Holz- und Betonquerschnitt definieren. Das Erzeugen der Knoten und Linien der Gurte wurde bewusst vorgezogen, damit bei der Definition der Knoten für die couplings und connectors bereits darauf verwiesen werden kann, dass diese Elemente in den Holz- und Betonquerschnitt einbinden. Ohne diesen Verweis würden die Knoten der vertikalen Elemente zwar genau auf den Gurten modelliert, im RFEM jedoch nicht verknüpft und das Modell würde keine sinnvollen Ergebnisse liefern.

Knoten für
Koppelstäbe und
Verbindungsmittel

Linien der
Koppelstäbe und
Verbindungsmittel

Im Anschluss werden die Knoten für Koppelstäbe und Verbindungsmittel definiert und mithilfe dieser die Linien der einzelnen vertikalen Elemente erzeugt. Folgende Tabellen geben eine Übersicht über die Reihenfolge der Nummerierung der Einzelelemente, welche in der tabellarischen Darstellung der Struktur in RFEM wiedergefunden werden kann, und innerhalb des Modells Übersichtlichkeit garantieren soll.

Verwendete Abkürzungen: F Anzahl der Felder, *len(feldlängen)*
 K Anzahl der Kopplungspositionen, *len(x_couplings)*
 V Anzahl der Verbindungsmittelpositionen, *len(x_connectors)*

Tabelle 6: Übersicht über die erzeugten Knoten [eigene Darstellung]

Knoten	Nummerierung	Funktion/Lage	Hinweis
Holzknotten an Feldgrenzen	1 bis $F+1$	Holzgurt, $z = 0$	-
Betonknotten an Feldgrenzen	$F+2$ bis $2F+2$	Betongurt, $z = (h_{ug}+h_{og})/2$	-
Knoten der Koppelstäbe	ab 1000	$z = 0$ und $z = (h_{ug}+h_{og})/2$	<i>get_or_create_node()</i>
Knoten der Verbindungsmittel	ab 10000	$z = 0$, $z = h_{ug}/2$ und $z = (h_{ug}+h_{og})/2$	<i>get_or_create_node()</i>

Da die Knoten der Koppelstäbe und Verbindungsmittel durch die im Client definierte Funktion *get_or_create_node()* erzeugt werden, werden gegebenenfalls bereits vorher erzeugte Knoten verwendet, was zu Unregelmäßigkeiten in der Knotennummerierung führen kann, jedoch numerische Instabilitäten verhindern soll.

Tabelle 7: Übersicht über die erzeugten Linien [eigene Darstellung]

Linien	Nummerierung	Funktion	Anzahl
Holzlinien	1 bis F	Holzgurt je Feld	F
Betonlinien	$F+1$ bis $2F$	Betongurt je Feld	F
Linien der Koppelstäbe	1000 bis $1000+K-1$	vertikale Linien zwischen den Gurten	K
Linien der Verbindungsmittel	10000 bis $10000+2V-1$	pro VM eine untere und eine obere Linie	$2V$

Die hierbei verwendete Separation in der Nummerierung soll sicherstellen, dass auch für mehrfeldrige Systeme mit größerer Zahl an Einzelementen die Nummerierung nicht an ihre Grenzen stößt. In RFEM lässt sich in der Übersicht der Struktur des Modells einstellen, nur gefüllte Zeilen anzeigen zu lassen, wodurch sich trotz der Sprünge leicht Überblick über die einzelnen Komponenten geschaffen werden kann. Dies kann vor Allem im Hinblick auf die Ergebnisauswertung oder manuelle Ergänzungen im Modell hilfreich sein.

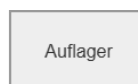
Beim Erzeugen dieser Elemente werden neben den Angaben zur Feldlänge und -anzahl auch die Benutzereingaben zur Höhe des Beton- und Holzquerschnittes verwendet. Damit können, wie in 3.3.3 erläutert wird, die beiden Gurte in den Schwerachsen der realen Bauteile erzeugt und die Gelenke der VM in der Verbundfuge modelliert werden.



Zur Definition der Stäbe (*Members*) kommen zusätzlich zu den geometrischen Daten noch die Benutzereingaben zur Beschaffenheit der Einzelkomponenten zum Einsatz, welche durch die vorab definierten Materialien und Querschnitte bereits in der Liste aus *generiere_Materialien_und_Querschnitte ()* abgespeichert werden auf welche an dieser Stelle im Code verwiesen wird. Einen Überblick über die einzelnen erzeugten Stäbe gibt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 8: Übersicht über die erzeugten Stäbe [eigene Darstellung]

Stäbe	Nummerierung	Stabtyp/Querschnitt	Anzahl
Holzstäbe	1 bis F	Querschnitt 1, Holzquerschnitt	F
Betonstäbe	$F+1$ bis $2F$	Querschnitt 2, Betonquerschnitt	F
Stäbe der Koppelstäbe	1000 bis $1000+K-1$	Stabtyp <i>COUPLING_HINGE_HINGE</i>	K
Stäbe der Verbindungsmittel	10000 bis $10000+2V-1$	Stabtyp <i>DEFINABLE_STIFFNESS</i>	$2V$



Durch die feldweise Erstellung der Gurtelemente können die Auflager einfach den vorab definierten Holzknoten zugewiesen werden. Da die Anzahl der Felder vom Benutzer flexibel eingegeben werden kann wird das Auflager am linken Rand, da es in jedem Fall vorhanden ist, als Festlager ausgeführt. Dadurch ist das erzeugte System in jedem Fall horizontal unverschieblich und den restlichen Holzknoten können über eine Codeschleife Loslager zugewiesen werden.



Die erzeugten Einzelobjekte werden den beiden Listen *[list_of_sections_materials]* und *[list_of_objects]* hinzugefügt und anschließend gesammelt an RFEM übergeben. So wird die Modellerzeugung für verschiedenste Systemgeometrien je nach den Benutzereingaben angepasst und algorithmisch ausgeführt.

3.3.3 Abbildung der Verbundsteifigkeit

Die Verbundwirkung zwischen Holz- und Betongurt wird im Modell über definierte Stabsteifigkeiten abgebildet. Hierzu werden die Verbindungsmittel als Stäbe mit spezifischer Nachgiebigkeit modelliert. Dafür wird der von Dlubal bereitgestellte Stabtyp „Definable Stiffness“ verwendet, welchem ohne Angabe von Querschnittsmaßen oder Baustoffeigenschaften Werte für EA , EI_y , EI_z , GA_y und GA_z zugewiesen werden können.

Torsional and Bending Stiffness		Axial and Shear Stiffness	
Torsional stiffness		Axial stiffness	
GIt	0.00 [kNm ²]	EA	0.100 [kN]
Bending stiffness		Shear stiffness	
Ely	[kNm ²]	GAy	1.000e+13 [kN]
Elz	[kNm ²]	GAz	1.000e+13 [kN]

Abbildung 28: Steifigkeitswerte der Definable Stiffness - Stäbe[eigene Darstellung]

Die Biegesteifigkeiten EI_y und EI_z werden entsprechend der Eingabe des Wertes K_{ser} wie im Kapitel 2.3.3 beschrieben berechnet. Die Dehnsteifigkeit EA der VM kann beliebig gewählt werden, da die vertikale Lastübertragung zwischen den beiden Gurten über die dehnstarr modellierten Koppelstäbe erfolgt und wird vom Client auf 0,1kN gesetzt. Wichtig ist jedoch die Schrauben als schubstarr zu modellieren, was durch die Festlegung der Schubsteifigkeiten GA_y und GA_z zu 10^{13} kN erfolgt. Für die Eingabe von K_{ser} ist zu beachten, dass bei paarweise angeordneten Schrauben der zum Schraubenpaar gehörige Verschiebungsmodul anzusetzen ist, sofern die Verbundwirkung im Modell ebenfalls auf das Paar bezogen abgebildet wird.

Die Verbindungselemente werden dabei in zwei Abschnitte unterteilt:

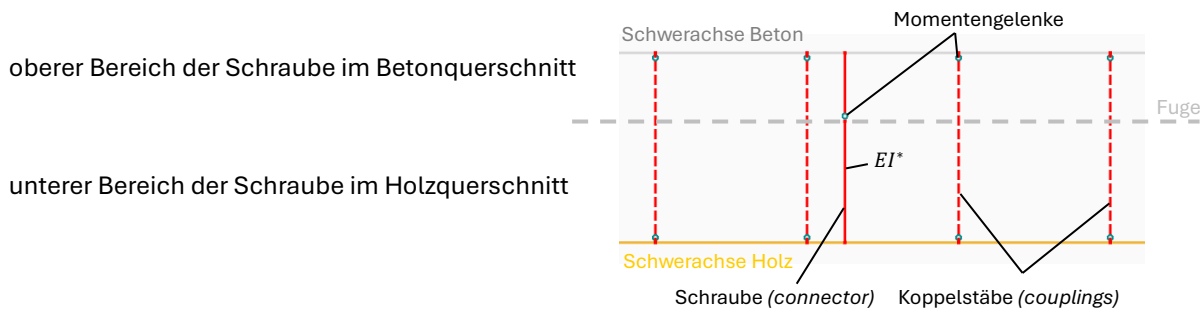


Abbildung 29: modellierte Schraube [eigene Darstellung]

Dem oberen Bereich wird, wie in Abbildung 29 dargestellt, ein Stabendgelenk auf Höhe der Verbundfuge zugewiesen, welches über fixe Parameter im Code folgende Eigenschaften erhält:

Hinge Conditions

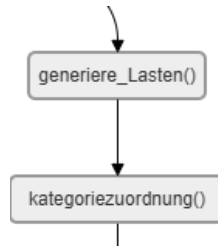
Translational	Spring constant	Rotational	Spring constant
<input type="checkbox"/> u_x	$C_{u,x}$ [kN/m]	<input type="checkbox"/> φ_x	$C_{\varphi,x}$ [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> u_y	$C_{u,y}$ [kN/m]	<input checked="" type="checkbox"/> φ_y	$C_{\varphi,y}$ 0.000 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> u_z	$C_{u,z}$ [kN/m]	<input type="checkbox"/> φ_z	$C_{\varphi,z}$ [kNm/rad]

Abbildung 30: Eigenschaften der Stabendgelenke [eigene Darstellung]

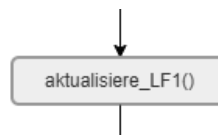
Durch diese Modellierung kann das reale Verformungsverhalten der Verbindung dem Stabwerksmodell nach Rautenstrauch folgend im Modell näherungsweise abgebildet werden.

3.3.4 Lastdefinition und Strukturmodifikation

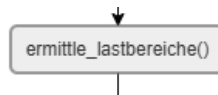
Die Definition der Lasten erfolgt ebenfalls programmatisch, wobei der Benutzer beim Erzeugen der einzelnen Lasten die Möglichkeit hat, Gleichstrecken-, Einzel- und Trapezlasten zu erzeugen und deren genaue Angriffspunkte zu definieren.



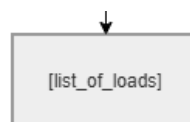
Zuerst wird in der Funktion die Zuordnung der einzelnen Lasten aus der Benutzereingabe zu den in der GUI eingegebenen Lastkategorien geregelt. Dabei wird für jede Kategorie ein einzelner Lastfall erzeugt, welchem alle Lasten dieser Kategorie zugeordnet werden. Danach wird über eine Fallunterscheidung festgelegt welche Lastart der drei möglichen Eingabeoptionen erzeugt wird. Dabei werden Stablasten erzeugt, welche für Trapez- und Gleichstreckenlasten die trapezförmige Lastverteilung und für Einzellasten die Möglichkeit der konzentrierten Lastverteilung zugewiesen bekommen. Grund für die Wahl der trapezförmigen Lastverteilung auch bei Gleichstreckenlasten ist die mangelnde Möglichkeit der stetigen Verteilung die Abstände der Last festzulegen. Obwohl die Option der stetig verteilten Lasten für Gleichstreckenlasten vorgesehen wird, wird diese hier deswegen nicht verwendet, um dem Benutzer die Flexibilität zu lassen auch Gleichstreckenlasten über Teillängen hinweg generieren zu lassen. Bei den ersatzweise erzeugten trapezförmigen Lastverteilungen werden hierbei einfach die Anfangs- und Endwerte gleichgesetzt, was wieder in erzeugten Gleichstreckenlasten resultiert.



Der in RFEM automatisierte Lastfall (LF) 1, welcher nur das Eigengewicht der Konstruktion enthält, wird im Rahmen der Lastgenerierung überarbeitet. Damit soll dem Nutzer die Flexibilität gegeben werden, die Werte des Eigengewichts selber festzulegen und im Modell erzeugen zu lassen. Dabei wird bei diesem LF das von RFEM automatisch aktivierte Eigengewicht deaktiviert und dieser Lastfall ebenfalls zur Unterteilung nach den verschiedenen Lastkategorien verwendet, indem diesem die Lasten der ersten vom Benutzer eingegebenen Kategorien zugewiesen werden.



Die Funktion ermittle_lastbereiche() wird verwendet, um gegebenenfalls vom Benutzer eingegebene Gleichstrecken- und Trapezlasten, welche nicht feldweise oder auf das Gesamtsystem wirken den richtigen Positionen und Stäben zuzuordnen. Dies ist erforderlich, da pro Feld ein Beton- und ein Holzstab erzeugt wird und somit über Feldgrenzen hinweggehende Lasten in zwei Stablasten aufgeteilt werden müssen.



Die erzeugten Lasten werden in der Liste *[list_of_loads]* gespeichert und gesammelt an RFEM übergeben.

Im Rahmen der automatisierten Modellerstellung wurde auch versucht die explizite Vorgabe des Combination-Wizard-Standards für EN 1990 | Base + Timber über die Dlubal API zu implementieren. In der verwendeten Konstellation aus RFEM 6 und der API 2. Generation, Version 2.12.7, führte diese Standardzuweisung jedoch zu einer fehlerhaften Erzeugung der Entwurfssituationen. Anstelle der erwarteten Kombination aus GZG und GZT-Situationen wurden ausschließlich GZT-Kombinationen erzeugt. Da die automatische Generierung der Entwurfssituationen ohne diese Standardzuweisung korrekt funktionierte und in den offiziellen Release Notes der Dlubal API kein entsprechender Bugfix dokumentiert ist, wurde für die vorliegende Arbeit auf die Implementierung dieser automatischen Normenänderung verzichtet und die stabile Standardkonfiguration verwendet. Dementsprechend wurde für die nachfolgenden Beispielberechnungen manuell auf folgende Konfiguration umgestellt, um das AddOn Holzbemessung verwenden zu können.



Abbildung 31: manuell angepasste Normen für Lastfallklassifizierung [eigene Darstellung]

Durch das manuelle Umstellen der verwendeten Normen zur Lastfallklassifizierung wurden die vorher bereits korrekt den Lastkategorien zugeordneten Einstellungen der einzelnen Lastkombinationen ebenfalls wieder überschrieben. So wurden alle aus der Benutzereingabe stammenden Lastkategorien wieder auf **G Permanent** geändert und mussten manuell wieder den richtigen Kategorien zugeordnet werden.

In RFEM erfolgt eine automatische Strukturmodifikation der GZT-Lasfälle durch das Holzbemessungs-AddOn, welches nachweisbezogene Anpassungen der Modellsteifigkeit, unter Anderem unter Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten und weiteren AddOn-spezifischen Modellannahmen, bewirkt. Da das Ziel der Validierung in der Überprüfung der mechanischen Modellbildung und der daraus resultierenden Schnittgrößen und Verformungen lag, hätte die Berücksichtigung dieser zusätzlichen Modifikationen die Vergleichbarkeit mit dem Literaturbeispiel verfälscht. Für die vorliegende Validierung wurde daher die unveränderte Systemantwort des Stabwerksmodells herangezogen, indem die von RFEM automatisch erzeugte Strukturmodifikation für die Berechnungen deaktiviert wurde.

Um die unterschiedliche effektive Biegesteifigkeit zwischen Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) in den Modellen zu berücksichtigen wurden Struktur- und Stabmodifikationen, welche den einzelnen Lastfällen zugeordnet werden können, erstellt. Durch einen im Entwicklungszeitraum des Clients bereits dokumentierten jedoch noch nicht behobenen Bug der Dlubal API bei der Zuweisung dieser Modifikationen mussten für die Berechnung der Beispiele manuelle Zuweisungen erfolgen, während die Modifikationen selbst automatisch generiert werden konnten.

In den Lastkombinationen, welche dem GZG zugehören wurde deshalb die Möglichkeit der Strukturmodifikation aktiviert und die automatisch vom Client generierte *GZG_Schraubenmodifikation* im Dropdown ausgewählt.



Abbildung 32: Zuweisen der Strukturmodifikation an Lastkombinationen [eigene Darstellung]

Außerdem musste im Menü zum Bearbeiten der Strukturmodifikation die zugehörige Stabmodifikation *GZG_Schraubensteifigkeit* separat zugewiesen und die betroffenen Stäbe ergänzt werden.

	Member Modification	Members
1	GZG_Schraubensteifigkeit	10000-10099
2	--	

Abbildung 33: Zuweisungen an die Strukturmodifikation [eigene Darstellung]

Dadurch werden die folgenden Modifikationen aktiv, welche die Ersatzbiegesteifigkeiten der Schraubenverbindungen für die GZG-Nachweise mit dem Faktor 1,5 multiplizieren. Durch die Berechnung von E_y und E_z für den GZT, welche im Client mit dem Faktor 2/3 stattfindet und allen Schrauben zugewiesen wird, kann so entsprechend Tabelle 3 für den GZG diese Abminderung annulliert und K_{ser} in voller Größe verwendet werden.

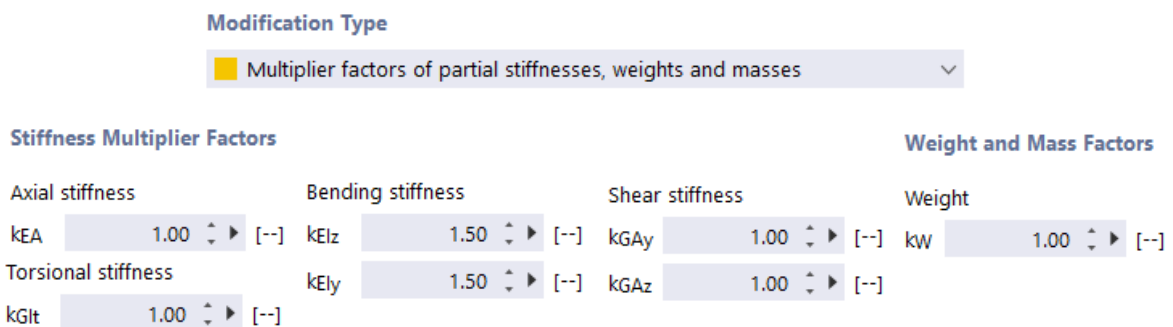


Abbildung 34: Modifikationsfaktoren für Schrauben im GZG [eigene Darstellung]

4. Validierung und Untersuchungen

4.1 Zielsetzung des Kapitels

In den folgenden Unterkapiteln soll anhand ausgewählter Untersuchungsbeispiele die praktische Anwendung des entwickelten Python-Clients dargestellt werden. Ziel ist die Überprüfung, ob sich mit dem Client automatisiert RFEM-Modelle erzeugen lassen, die bekannte HBV-Systeme plausibel abbilden.

Dafür wird zuerst mit der Validierung der erstellten Modelle an einem Einfeldsystem aus der Literatur begonnen. Anschließend wird ein Mehrfeldsystem untersucht, um die Funktionalität für komplexere Tragstrukturen bewerten zu können. Zum Vergleich wird die Bemessungssoftware HBV 6.1 herangezogen, um die erzielten Ergebnisse einzuordnen. Bei beiden Beispielen werden die Übereinstimmung hinsichtlich wesentlicher Ergebnisgrößen, insbesondere Schnittgrößen, Verformungen und globalem Tragverhalten beurteilt. Eine vollständige Nachbildung sämtlicher Nachweise der zugrunde liegenden Vergleichsunterlagen ist dabei nicht Ziel dieser Arbeit, sondern werden zur Beurteilung des Tragverhaltens lediglich die relevantesten Nachweise geführt. Im Fokus stehen vielmehr die Modellbildung sowie die wesentlichen Vergleichsergebnisse. Deshalb wird anhand der Validierungsbeispiele untersucht, inwieweit die mit dem Client ermittelten Schnittgrößen als Grundlage für weiterführende Nachweise von Holz, Beton und Verbindungsmitteln geeignet sind und inwiefern die in RFEM enthaltenen AddOns zur Bemessung hierfür genutzt können. Bemessen wird aufgrund der im Client nicht implementierten Modifikationen für den Zeitpunkt $t = \infty$ nur im Anfangszustand. Außerdem werden keine Schwingungsbetrachtungen und Heißbemessungen durchgeführt.

Ergänzend sollen Untersuchungen zum Einfluss von Einzellasten auf das Modellverhalten sowie die Einflüsse eines nichtlinearen Betonverhaltens im Vergleich zum linear-elastischen Materialansatz angestellt werden.

Durch die betrachteten Anwendungsfälle soll eine zusammenfassende Bewertung der Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit des Clients ermöglicht werden. Außerdem soll so ein Ausblick auf Weiterentwicklungsmöglichkeiten gegeben sowie gegebenenfalls noch notwendige Anpassungen ermittelt werden.

4.2 Validierung anhand eines Einfeldsystems

4.2.1 Ausgangssystem

Als Vergleichsbeispiel wird das in der Arbeit von Ibrahimaj [13] verwendete Beispiel gewählt. Dieses wurde im Rahmen seiner Arbeit mit den verschiedenen Berechnungsmethoden für HBV-Systeme, unter anderem auch mit dem Stabwerksmodell nach Rautenstrauch bemessen. Verglichen wird hierbei nur mit den Ergebnissen nach dem Stabwerksmodell, um systematische Unterschiede durch verschiedene Bemessungsmethoden auszuschließen. Das mit dem Client erzeugte Berechnungsmodell aus RFEM 6 kann im Anhang wiedergefunden werden.

Bei dem betrachteten System handelt es sich um eine einfeldrige Rippendecke in einem Wohnhaus, welche der Nutzungsklasse I zugeordnet wird. Folgende Eingangsdaten wurden hierbei übernommen:

Tabelle 9: Eingangsdaten Validierungsbeispiel 1 [eigene Darstellung]

Geometrie	
Spannweite	5,0 m
Dicke Betonplatte	7 cm
Betondeckung	2 cm
Holzquerschnitt b/h	12/22 cm
Rippenabstände	75 cm
VM-Abstände	10 cm
Schraubenneigung	$\alpha = 45^\circ/90^\circ$

Materialien	
Betongüte	C 25/30
Baustahl	B 550
Holzklasse	C 24
Verbindungsmittel	SFS VB-48-7,5x165
Verschiebungsmodul je Schraubenpaar	$K_{ser} = 27.000 \text{ N/mm}^2$

Lasten	
Eigengewicht	1,42 kN/m
Aufbaulast	1,50 kN/m
Nutzlast Kategorie A	2,25 kN/m

Die im Referenzbeispiel angegebenen Flächenlasten wurden für die Modellierung eines Einzelträgers auf die maßgebende Breite umgerechnet und als Linienlasten in den Stabwerksgenerator eingegeben.

Diese Angaben dienen als Grundlage für die Nachbildung des Systems im Client und den späteren Vergleich der Ergebnisse. Verglichen werden sollen hierbei die Schnittgrößen in den Teilquerschnitten zum Zeitpunkt $t = 0$ sowie die Anfangsverformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Außerdem wird über Vergleichsrechnung der Nachweise beurteilt, ob diese mit dem Vergleichsprojekt übereinstimmen.

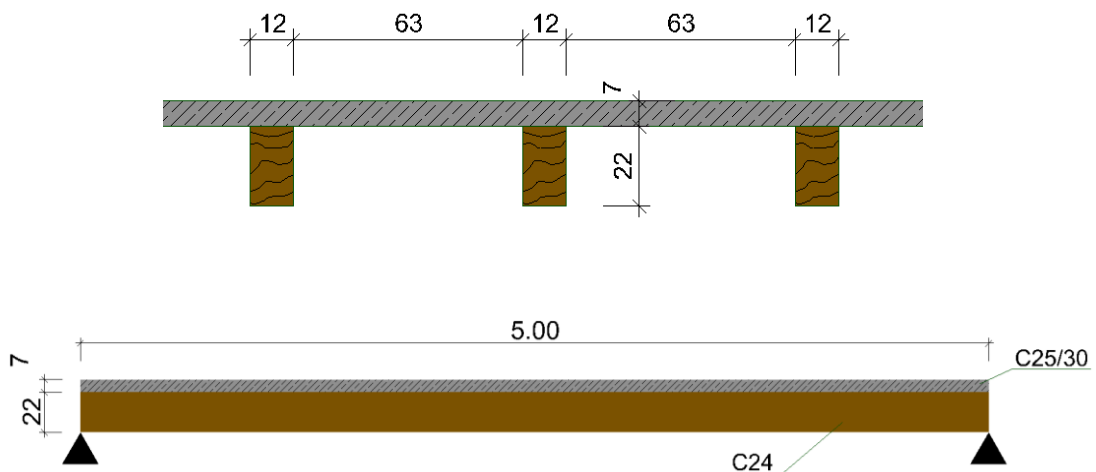


Abbildung 35: Quer- und Längsschnitt des Einfeldträgers [eigene Darstellung]

4.2.2 Modellbildung im entwickelten Client

Für die Eingabe im Python Client wurden die Angaben aus dem Vergleichsmodell übernommen. Aus den folgend dargestellten Eingaben erzeugt der Client automatisiert das in RFEM berechnete Stabwerksmodell.

Systemgeometrie

Anzahl Felder	<input type="text" value="1"/> - +	Höhe Obergurt [cm]	<input type="text" value="7,00"/> - +
Länge Feld 1 [m]	<input type="text" value="5,00"/> - +	K_ser [N/mm]	<input type="text" value="27000,00"/> - +
Gesamtlänge: 5.0 m		Schraubenabstand Bereich 1 [cm]	<input type="text" value="10,00"/> - +
Holzklasse	<input type="text" value="C24"/>	Abstand Schraube zum linken Auflager	<input type="text" value="halber Schraubenabstand"/> ▾
Breite Holzquerschnitt [cm]	<input type="text" value="12,00"/> - +	Schraubenabstand Bereich 2 [cm]	<input type="text" value="10,00"/> - +
Höhe Holzquerschnitt [cm]	<input type="text" value="22,00"/> - +	Schraubenabstand Bereich 3 [cm]	<input type="text" value="10,00"/> - +
Betonklasse	<input type="text" value="C25/30"/>	Abstand Schraube zum rechten Auflager	<input type="text" value="halber Schraubenabstand"/> ▾
Breite Obergurt [cm]	<input type="text" value="75,00"/> - +		

Lasteingabe

	Lastart	⇒ Bereich	⇒ Größe Kraft [kN/m bzw. kN]
0	Gleichstreckenlast	Gesamtsystem	1.42
1	Gleichstreckenlast	Gesamtsystem	1.5
2	Gleichstreckenlast	Gesamtsystem	2.25

⇒ Endwert Trapezlast [kN/m]	⇒ Position / Start [m]	⇒ Länge der Last [m]	⇒ Kategorie
None	None	None	ständig
None	None	None	ständig
None	None	None	Kat. A: Wohngebäude

Durch die in 10 cm Abständen angeordneten Verbindungsmittel und die geradzahlige Spannweite des Systems konnten die Verbindungsmittelabstände ohne nötige Rundung des Clients erzeugt werden.

erzeugte Schraubenabstände

	Feld	Rand links [m]	Bereich 1 [m]	Bereich 2 [m]	Bereich 3 [m]	Rand rechts [m]
0	1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.05

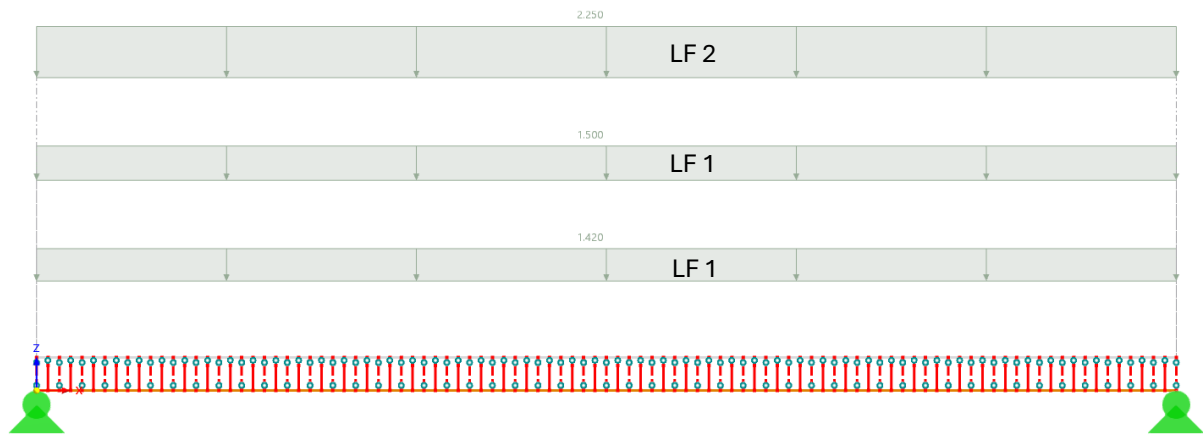


Abbildung 36: erzeugtes Stabwerksmodell Einfeldsystem in RFEM [eigene Darstellung]

Die Lasteingabe erfolgte über die charakteristischen Lasten, da der RFEM Combination Wizard verwendet wurde, um die einzelnen Lasten mit den passenden Teilsicherheitsbeiwerten zu multiplizieren. Die Zuordnung zu Lastfällen erfolgte wie im Auszug der Lasteingabe ersichtlich mithilfe zweier verschiedener Fälle, einmal unter der Kategorie ständig (LF 1) und einmal als Nutzlast der Kategorie A (LF 2).

HINWEIS: Hierbei ist zu beachten, dass im Referenzbeispiel zweireihig angeordnete Schrauben vorliegen, weshalb bei der Berechnung in der betrachteten Arbeit bei der Ermittlung der Ersatzbiegesteifigkeit

$$2 * K_{ser} = 27.000 \text{ N/mm}^2$$

verwendet wurde. Laut aktueller ETA-13/0699 vom 01.06.2022 [45] ist der zu $K_{ser} = 100 l_{ef} = 100 * 135\text{mm} = 13.500 \text{ N/mm}^2$ berechnete Verschiebungsmodul jedoch pro Schraubenpaar gültig und die Verdopplung wäre hier nicht nötig. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird im weiteren Vorgehen trotzdem mit dem Wert $K_{ser} = 27.000 \text{ N/mm}^2$ gerechnet.

Durch die manuellen Anpassungen der Schraubensteifigkeiten für die Berechnung des Modells im GZG, welche in Kapitel 3.3.4 beschrieben wurden, ergeben sich folgende Materialeigenschaften.

Tabelle 10: Materialeigenschaften des Validierungsbeispiels Einfeldsystem [eigene Darstellung]

Materialeigenschaften	Holz	Beton
Dehnsteifigkeit EA [kN]	290.400,00	1.627.500,00
Biegesteifigkeit EI [kNm ²]	1.171,28	661,77
Schubsteifigkeit GA [kN]	18.216,00	678.126,75
	Verbindungsmittel	
Verschiebungsmodul GZT $K_{ser,GZT}$ [kN/m/VM]	9.000,00	
Verschiebungsmodul GZG $K_{ser,GZG}$ [kN/m/VM]	13.500,00	
Ersatzbiegesteifigkeit GZT EI_{GZT}^* [kNm ²]	8,24	
Ersatzbiegesteifigkeit GZG EI_{GZG}^* [kNm ²]	12,36	

4.2.3 Ergebnisse des API-Stabwerksmodells

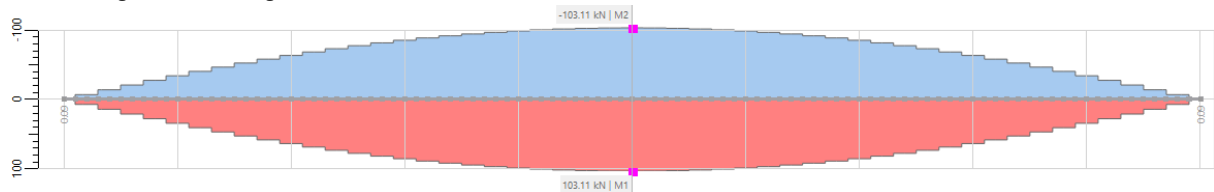
Zur Vorbereitung der Validierung werden zunächst die mit dem API-Stabwerksmodell ermittelten Schnittgrößen und Verformungen dargestellt. Dabei wurden im Stabwerksmodell folgende Ergebnisse aus den zugehörigen Lastfällen für die Schnittgrößen und Verformungen erzielt.

Grenzzustand der Tragfähigkeit

CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2

Schnittgrößen N [kN]

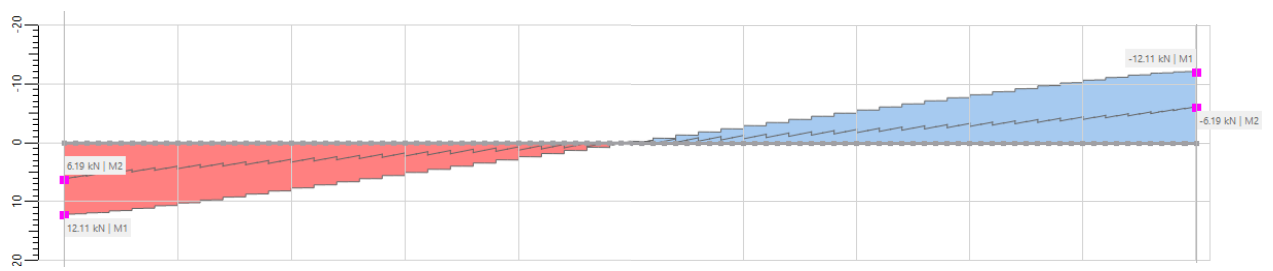
M1 – Holzgurt, M2 – Betongurt



CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2

Schnittgrößen V_z [kN]

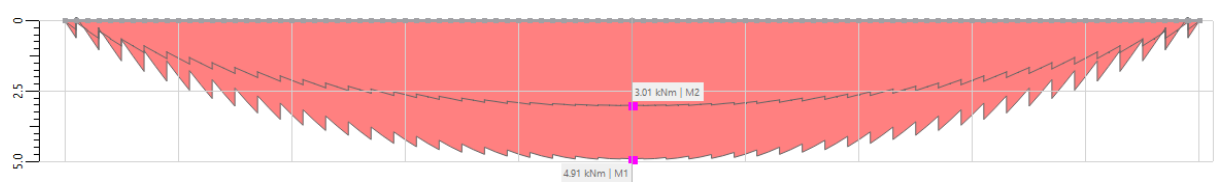
M1 – Holzgurt, M2 – Betongurt



CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2

Schnittgrößen M_y [kNm]

M1 – Holzgurt, M2 – Betongurt



CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2

Schnittgrößen V_z [kN]

Verbindungsmittel

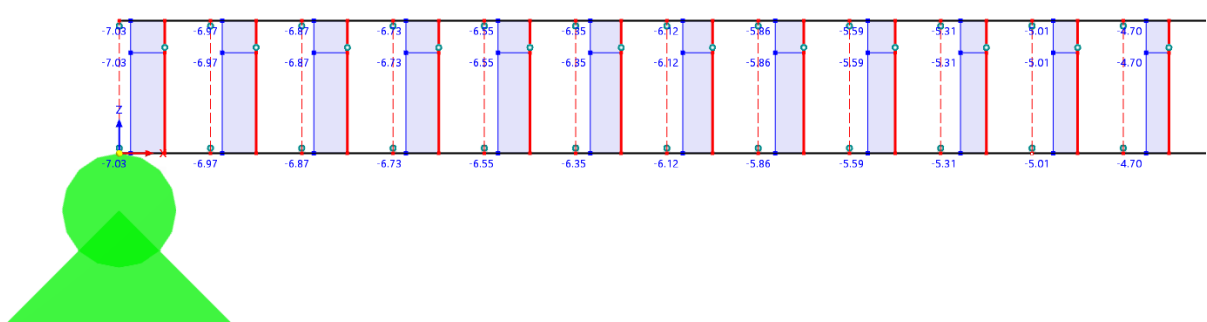


Abbildung 37: Schnittkräfte des Validierungsbeispiels Einfeldsystem im GZT [eigene Darstellung]

Tabelle 11: maßgebende Schnittkräfte des Validierungsbeispiels Einfeldsystem GZT [eigene Darstellung]

	Holzgurt – M1	Betongurt – M2
Normalkräfte N_{Ed} [kN]	103,11	-103,11
Querkkräfte $V_{z,Ed}$ [kN]	$\pm 12,11$	$\pm 6,19$
Biegemomente $M_{y,Ed}$ [kNm]	4,91	3,01
	Verbindungsmittel	
Querkraft VM $V_{Ed,max}$ [kN]	7,03	
Kraft pro Schraube $F_{Ed,max}$ [kN/VM]	3,52	

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

CO4 – LC1 + LC2

Verformungen $|u|$ [mm]

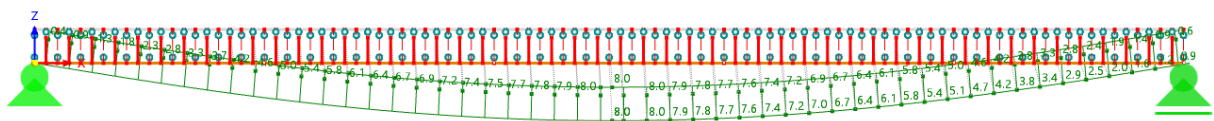


Abbildung 38: Verformungen des Validierungsbeispiels Einfeldsystem im GZG [eigene Darstellung]

Tabelle 12: maßgebende Verformungen des Validierungsbeispiels Einfeldsystem GZG [eigene Darstellung]

	Feld 1
Verformungen u [mm]	8,00

4.2.4 Bemessung des Validierungsbeispiels

Zum Vergleich der Bemessungsergebnisse wurden zum einen die Schnittgrößen aus dem Stabwerksmodell verwendet und andererseits die Holz- und Betonbemessung direkt in RFEM durchgeführt. Die integrierte Betonbemessung in RFEM 6 ist grundsätzlich möglich, richtet sich jedoch an klassische Stahlbetonbauteile und die zugehörigen konstruktiven Regeln. Im vorliegenden HBV-Stabwerks-Ersatzmodell mit einer nur 7 cm dicken Betonplatte und den angesetzten Randbedingungen erwies sich diese Bemessung daher nur eingeschränkt als praxistauglich. Zur transparenten und nachvollziehbaren Bewertung der Tragfähigkeit des Betonanteils wurde die Betonbemessung aus RFEM noch ergänzt zur Abbildung der notwendigen Nachweise.

4.2.4.1 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Holzbemessung in RFEM

1. Biegung und Zug (Feldmitte)

Festigkeiten

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = 0,80 \frac{14,50 \text{ N/mm}^2}{1,30} = 8,923 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,80 \frac{24,00 \text{ N/mm}^2}{1,30} = 14,769 \text{ N/mm}^2$$

Spannungen

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{t,Ed}}{A} = \frac{103,11 \text{ kN}}{26.400 \text{ mm}^2} = 3,906 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,Ed}}{W_y} = \frac{4,91 \text{ kNm}}{968.000 \text{ mm}^3} = 5,072 \text{ N/mm}^2$$

Nachweis

$$\eta = \left| \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \right| = \left| \frac{3,906 \text{ N/mm}^2}{8,923 \text{ N/mm}^2} + \frac{5,072 \text{ N/mm}^2}{14,769 \text{ N/mm}^2} \right| = 0,781$$

$$\eta = 0,781 \leq 1 \quad \checkmark$$

2. Querkraft (Auflager)

Festigkeit

$$f_{v,z,d} = k_{mod} \frac{f_{v,z,k}}{\gamma_M} = 0,80 \frac{4,00 \text{ N/mm}^2}{1,30} = 2,462 \text{ N/mm}^2$$

Spannung

$$\tau_{xz,d} = \frac{3}{2} \frac{V_{z,Ed}}{A k_{cr}} = \frac{3}{2} \frac{12,11 \text{ kN}}{264 \text{ cm}^2 * 0,5} = 1,376 \text{ N/mm}^2$$

Nachweis

$$\eta = \left| \frac{\tau_{xz,d}}{f_{v,z,d}} \right| = \left| \frac{1,376 \text{ N/mm}^2}{2,462 \text{ N/mm}^2} \right| = 0,559$$

$$\eta = 0,559 \leq 1 \quad \checkmark$$

Betonbemessung in RFEM (ergänzt)

1. Biegung und Normalkraft (Feldmitte, maximale Randspannung)

Festigkeit

$$f_{c,d} = \alpha_{cc} \frac{f_{c,k}}{\gamma_M} = 0,85 \frac{25 \text{ N/mm}^2}{1,50} = 14,167 \text{ N/mm}^2$$

Spannung

$$\sigma_{1,Ro,d} = \frac{N_{Ed}}{A_c} - \frac{M_{Ed}}{W_c} = \frac{-0,103 \text{ MN}}{0,0525 \text{ m}^2} - \frac{3,01 * 10^{-3} \text{ MNm}}{6,125 * 10^{-4} \text{ m}^3} = -6,876 \text{ MN/m}^2$$

Nachweis

$$\eta = \left| \frac{\sigma_{1,Ro,d}}{f_{c,d}} \right| = \left| \frac{6,876 \text{ MN/m}^2}{14,167 \text{ MN/m}^2} \right| = 0,485$$

$$\eta = 0,485 \leq 1 \quad \checkmark$$

2. Biegung und Normalkraft (Feldmitte, Randspannung in der Fuge)

Festigkeit

$$f_{c,d} = 14,167 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,t,d} = \alpha_{ct} \frac{f_{c,t,k;0,05}}{\gamma_c} = 1,0 * \frac{1,80 \text{ N/mm}^2}{1,55} = 1,161 \text{ N/mm}^2$$

Spannung

$$\sigma_{1,Ru,d} = \frac{N_{Ed}}{A_c} + \frac{M_{Ed}}{W_c} = \frac{-0,103 \text{ MN}}{0,0525 \text{ m}^2} + \frac{3,01 * 10^{-3} \text{ MNm}}{6,125 * 10^{-4} \text{ m}^3} = -1,962 + 4,914 = 2,952 \text{ MN/m}^2$$

Nachweis

$$\eta = \frac{\sigma_{1,Ru,d}}{f_{c,t,d}} = \frac{2,952 \text{ MN/m}^2}{1,161 \text{ MN/m}^2} = 2,543$$

$$\eta = 2,543 > 1 \quad \times \rightarrow \text{Biegebewehrung nötig}$$

Erforderliche Biegezugbewehrung

$$d = h_B - c_{nom} - \frac{\phi_s}{2} = 70 - 20 - \frac{6}{2} = 47 \text{ mm}$$

; mit $\phi_s = 6 \text{ mm}$ (Matte CQS60) und $c_{nom} = 20 \text{ mm}$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} d^2 f_{cd}} = \frac{3,01 * 10^6 \text{ Nmm}}{750 \text{ mm} (47 \text{ mm})^2 14,167 \text{ N/mm}^2} = 0,128$$

$\rightarrow \omega_1 = 0,13778, \sigma_{sd} = 448,96 \text{ MN/m}^2$; aus Bemessungstabeln

$$a_{s,erf} = \frac{1}{\sigma_{sd}} (\omega b_{eff} d f_{cd}) = \frac{1}{448,96 \text{ N/mm}^2} 0,13778 * 750 \text{ mm} * 47 \text{ mm} * 14,167 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 153,255 \text{ mm}^2$$

Umgerechnet von $b_{eff} = 750\text{mm}$ auf einen Meter Breite ergibt sich:

$$a_{s,erf} = \frac{153,255\text{mm}^2}{0,75\text{m}} = 204,34 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$erf a_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_{eff} d = 0,26 \frac{2,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{550 \text{ N/mm}^2} * 750 \text{ mm} * 47\text{mm} = 43,33 \text{ mm}^2/\text{m} < a_{s,erf}$$

3. Querkraft (Auflager)

Widerstand

$$f_{c,d} = 14,167 \text{ N/mm}^2$$

$$C_{Rd,c} = \frac{k_0}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,50} = 0,12$$

$$\sigma_{cp} = \min\left(-\frac{N_{Ed}}{A_c}; 0,2 f_{cd}\right) = \min\left(-\frac{0,049\text{kN}}{525,00\text{cm}^2}; 0,2 * 14,167 \text{ N/mm}^2\right) \cong 0,00 \text{ N/mm}^2$$

$$k = \min\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}; 2\right) = \min\left(1 + \sqrt{\frac{200}{47,00\text{mm}}}; 2\right) = 2,00$$

$$v_{min} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 * (2,00)^{\frac{3}{2}} * (25,00\text{N/mm}^2)^{\frac{1}{2}} = 0,49$$

$$V_{Rd,c,min} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_{eff} d = (0,49 + 0,12 * 0,00 \text{ N/mm}^2) * 750,00\text{mm} * 47,00\text{mm} = 17,272 \text{ kN}$$

Beanspruchung

$$V_{z,Ed} = 6,19 \text{ kN}$$

Nachweis

$$\eta = \left| \frac{V_{z,Ed}}{V_{Rd,c,min}} \right| = \left| \frac{6,19 \text{ kN}}{17,272 \text{ kN}} \right| = 0,358$$

$$\eta = 0,358 \leq 1 \quad \checkmark \rightarrow V_{Rd,c,min} \text{ ist bereits ausreichend}$$

Bemessung der Verbindungsmittel nach ETA

1. Schubkraft (Auflager)

Widerstand pro Schraubenpaar

$$F_{ax,\alpha,Rk} = 90 l_{ef} \left(\frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} = 90,00 \times 135,00 \left(\frac{350}{350} \right)^{0,8} = 12.150 \text{ N}$$

$$F_{Rk} = k_\alpha \min(F_{ax,\alpha,Rk}; 13.000) = 1,00 \min(12.150; 13.000) = 12.150,00 \text{ N}$$

; mit $k_\alpha = 1,00$ für $\alpha = 45^\circ/90^\circ$ (siehe ETA-13/0699)

$$F_{Rd} = k_{mod,VM} \frac{F_{Rk}}{\gamma_m} = 0,89 \frac{12.150,00}{1,3} = 8,318 \text{ kN}$$

Beanspruchung pro Schraubenpaar

$$V_{Ed,max} = 7,03 \text{ kN}$$

Nachweis

$$\eta = \frac{V_{Ed,max}}{F_{Rd}} = \frac{7,03 \text{ kN}}{8,318 \text{ kN}} = 0,845$$

$$\eta = 0,845 \leq 1 \quad \checkmark$$

4.2.4.2 Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Verformungsnachweis

Verformung

$$u_{vorh} = 8,00 \text{ mm}$$

Grenzwert

$$u_{zul} = \frac{l}{300} = \frac{5000 \text{ mm}}{300} = 16,667 \text{ mm}$$

Nachweis

$$\eta = \frac{u_{vorh}}{u_{zul}} = \frac{8,00 \text{ mm}}{16,667 \text{ mm}} = 0,480$$

$$\eta = 0,480 \leq 1 \quad \checkmark$$

4.2.4.3 Zusammenfassung der Bemessung

Die Bemessung des Validierungsbeispiels bestätigt insgesamt die Tragfähigkeit des im Client erzeugten HBV-Stabwerksmodells unter den angesetzten Einwirkungen.

Beim Holzgurt zeigt sich, dass sowohl der Nachweis für die kombinierte Beanspruchung aus Biegung und Zug in Feldmitte als auch der Schubnachweis am Auflager mit deutlichen Sicherheitsreserven erfüllt werden. Die maßgebenden Schnittgrößen können damit sicher aufgenommen werden und der Holzanteil des Systems ist ausreichend tragfähig dimensioniert.

Für den Betonanteil ist der Drucknachweis in Feldmitte unkritisch. Maßgebend ist vielmehr die infolge der Biegebeanspruchung entstehende Zugzone an der Fugenunterseite. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Biegezugbewehrung. Für das vorliegende Beispiel liegt die erforderliche Längsbewehrung bei rund $204,34 \text{ mm}^2/m$ und damit geringfügig oberhalb der im Beispiel angesetzten Matte CQS60. Im Zuge einer endgültigen Bemessung ist die Bewehrung daher entsprechend anzupassen. Der globale Querkraftnachweis des Betongurts wird eingehalten, sodass aus diesem Nachweis keine zusätzliche Querkraftbewehrung erforderlich wird. Lokale Nachweise der Schubeinleitung aus den Verbindungsmitteln in die Betonplatte wurden im Rahmen der vorliegenden Modellvalidierung nicht vertieft, da der Schwerpunkt dieses Abschnitts auf dem Vergleich der globalen Schnittgrößen und Verformungen liegt. Für eine vollständige baupraktische Bemessung wäre dieser Nachweis jedoch ergänzend zu führen.

Für die Verbindungsmittel ist der Nachweis nach ETA-13/0699 zu führen. Dabei ist zu beachten, dass die Widerstände und Steifigkeiten der Anordnung $45^\circ/90^\circ$ auf das Schraubenpaar bezogen sind. Unter dieser Voraussetzung ist auch der Nachweis der SFS-VB-Verbundschrauben erfüllt.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wurde der Nachweis bewusst auf die Verformung beschränkt. Hintergrund ist, dass das Ziel dieses Abschnitts in erster Linie in der Validierung der modellierten Schnittgrößen und Anfangsverformungen liegt. Das Schwingungsverhalten kann für eine vollständige baupraktische Bemessung von HBV-Decken zusätzlich von Bedeutung sein, wird im vorliegenden Validierungsbeispiel jedoch nicht weiter untersucht.

4.2.5 Vergleich mit dem Referenzbeispiel

Schnittgrößen GZT

Tabelle 13: Vergleich der Schnittgrößen mit dem Validierungsbeispiel Einfeldsystem [eigene Darstellung]

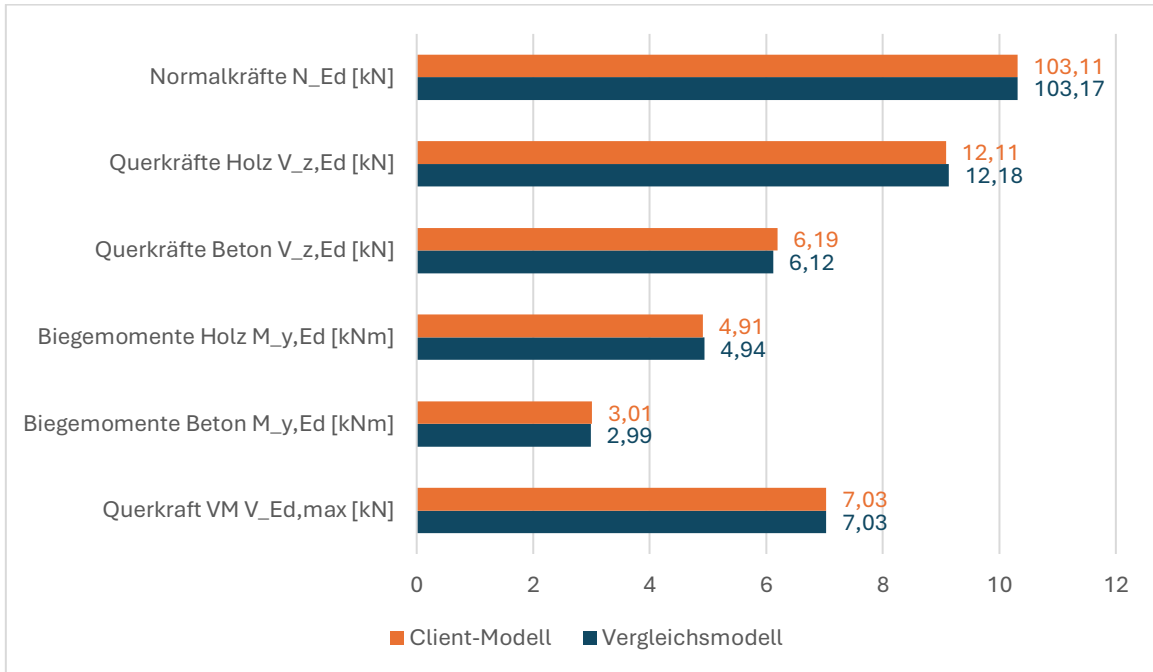


Tabelle 14: Abweichungen der Schnittgrößen bezogen auf das Vergleichsmodell Einfeldsystem [eigene Darstellung]

Prozentuale Abweichungen [%]					
N_{Ed}	$V_{z,Ed}$ Holz	$V_{z,Ed}$ Beton	$M_{y,Ed}$ Holz	$M_{y,Ed}$ Beton	$V_{Ed,max}$ VM
-0,058	-0,575	+1,144	-0,607	+0,669	$\pm 0,000$

Verformungen

Tabelle 15: Vergleich der Verformungen mit dem Validierungsbeispiel Einfeldsystem [eigene Darstellung]

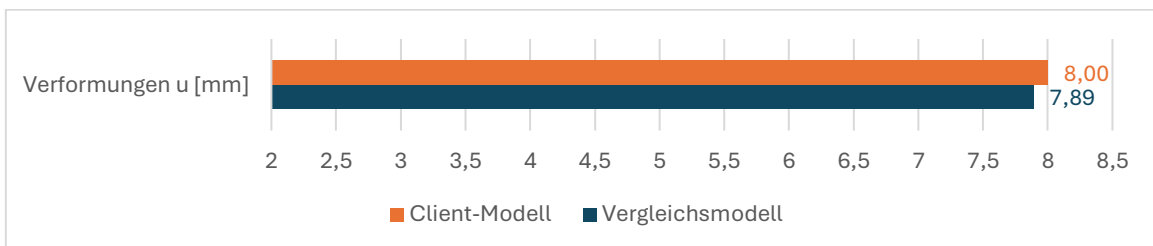


Tabelle 16: Abweichungen der Verformungen bezogen auf das Vergleichsmodell Einfeldsystem [eigene Darstellung]

Prozentuale Abweichungen [%]
Verformungen u
+1,394

Der Vergleich mit dem Referenzbeispiel zeigt, dass die mit dem entwickelten Client erzeugte Modellbildung die maßgebenden Tragwerksreaktionen des Einfeldsystems sehr gut abbildet.

Sowohl bei den Normalkräften, Querkäften und Biegemomenten der Teilquerschnitte als auch bei der Schubkraft in den Verbindungsmitteln ergeben sich nur geringe Abweichungen gegenüber dem Referenzmodell. Gleiches gilt für die Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Die Übereinstimmung dieser Ergebnisse bestätigt, dass die geometrische Modellbildung, die Abbildung des Verbunds über die Verbindungsmittel sowie die Lastansätze im Client konsistent umgesetzt wurden.

Die verbleibenden Abweichungen liegen in einem sehr geringen Bereich und sind im Rahmen numerischer Modellierungen plausibel. Sie können unter anderem auf Rundungseffekte, unterschiedliche interne Modellannahmen oder geringfügige Unterschiede bei der Behandlung von Steifigkeiten zurückgeführt werden. Insgesamt ist die Übereinstimmung der Ergebnisse als sehr gut zu bewerten, sodass die Validierung des Modells als erfolgreich angesehen werden kann.

Ein direkter Vergleich der Bemessungsnachweise mit dem Referenzbeispiel wird im Rahmen der Validierung nicht geführt. In der Arbeit von Ibrahimaj [13] werden die Nachweise für das verwendete Vergleichsmodell nur anhand der Schnittgrößen die mittels des γ -Verfahrens berechnet wurden geführt. Dadurch ergeben sich bereits bei den Ausgangswerten der Berechnungen Abweichungen – wenn auch gering – von den in dieser Arbeit ermittelten Schnittgrößen. Außerdem kommen in der Nachweisführung teilweise unterschiedliche normative Grundlagen, Sicherheitsbeiwerte oder konservativere Annahmen zur Anwendung. Unterschiede in den Ausnutzungsgraden sind daher nicht zwangsläufig auf Abweichungen im Tragwerksmodell zurückzuführen. Unabhängig davon ergeben sich im vorliegenden Beispiel keine Widersprüche zum Referenzmodell und den geführten Nachweisen. Die aus den ermittelten Schnittgrößen abgeleiteten Nachweise führen insgesamt zu einer konsistenten und plausiblen Bemessungsaussage. Damit bestätigen sowohl die Übereinstimmung der Schnittgrößen und Verformungen als auch die resultierenden Nachweise die Eignung des entwickelten Clients zur automatisierten Modellgenerierung von HBV-Stabwerksmodellen.

4.3 Validierung anhand eines Mehrfeldsystems

4.3.1 Ausgangssystem

Das zweite Validierungsbeispiel wurde größtenteils auf Basis der Standardeingaben in der Software HBV 6 von SFS intec erstellt und nur die Systemgeometrie angepasst. Dabei wurde ein unsymmetrisches Zweifeldsystem gewählt, da es gegenüber einem symmetrischen System geringere Vereinfachungen aufweist und sich daher besser zur Validierung der automatisierten Modellgenerierung eignet. Den zugehörigen Bemessungsausdruck aus HBV 6 findet man genauso wie das verwendete Berechnungsmodell aus RFEM im Anhang der Arbeit wieder.

Das betrachtete System ist eine zweifeldrige Rippendecke in einem Wohnhaus, welche der Nutzungsklasse I zugeordnet wird. Wichtig bei der Eingabe im Programm von SFS ist, dass der erste Lastfall nicht als Montagelastfall betrachtet wird, sondern die Option der Systemunterstützung während der Betonage auf „unterstützt“ gesetzt wird. Folgende Eingangsdaten wurden hierbei angesetzt:

Tabelle 17: Eingangsdaten Validierungsbeispiel 2 [eigene Darstellung]

Geometrie	
Spannweite Feld 1	3,0 m
Spannweite Feld 2	7,0 m
Dicke Betonplatte	7 cm
Betondeckung	$c_{nom} = 2$ cm
Holzquerschnitt b/h	16/22 cm
Rippenabstände	100 cm
VM-Abstände	8 cm
Schraubenneigung	$\alpha = \pm 45^\circ$

Materialien	
Betongüte	C 20/25
Holzklasse	C 24
Verbindungsmittel	SFS VB-48-7,5x100
Verschiebungsmodul je Schraubenpaar	$K_{ser} = 22.800 \text{ N/mm}^2$

Lasten	
Eigengewicht	1,926 kN/m
Nutzlast Kategorie A	2,00 kN/m

Auf Basis dieser Angaben wurde das System mit den im Kapitel 4.3.2 dargestellten Benutzereingaben durch den Client nachgebildet. Aufgrund der im Mehrfeldsystem auftretenden negativen Biegemomente ergeben sich im Feld 1 und am Zwischenlager Zugspannungen im Betongurt. Eine vollständige Bemessung dieses Bereichs würde eine detaillierte Stahlbetonbemessung unter Berücksichtigung des gerissenen Querschnitts sowie der erforderlichen Bewehrungsführung voraussetzen. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Validierung der automatisierten Modellgenerierung und der Abbildung des Verbundverhaltens liegt, wird im Rahmen dieses Validierungsbeispiels auf eine weitergehende Bemessung verzichtet. Stattdessen werden die Vergleichsgrößen auf die Schnittgrößen und Verformungen beschränkt, welche eine direkte Bewertung der Modellgüte ermöglichen. Die grundsätzlich plausible Nachweisführung wurde bereits am Einfeldsystem nachgewiesen.

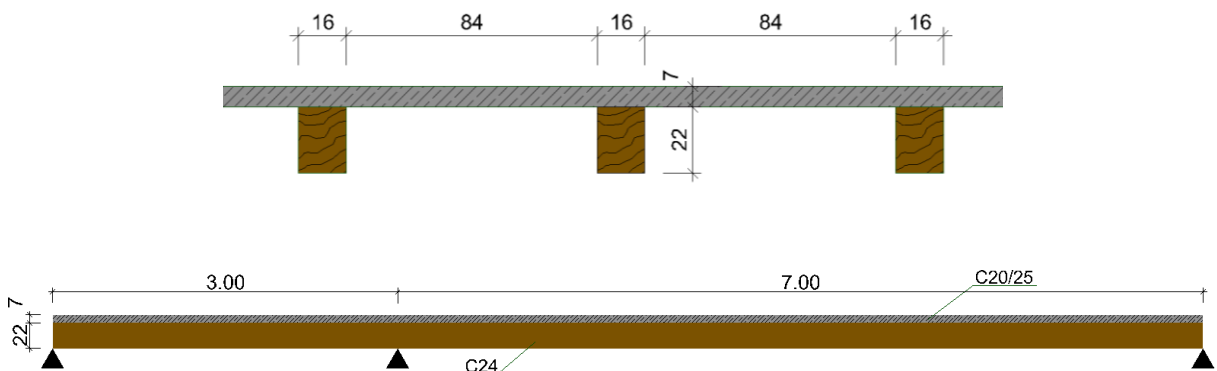


Abbildung 39: Quer- und Längsschnitt des Mehrfeldträgers [eigene Darstellung]

4.3.2 Modellbildung im entwickelten Client

Für die Eingabe im Python Client kamen die vorher aufgezeigten Eingabewerte zur Anwendung. Um die Grundlagen des automatisch erzeugten RFEM-Modells darzustellen werden hier nochmal alle an den Client übergebenen Werte aufgeführt.

Systemgeometrie

Anzahl Felder	<input type="text" value="2"/> - +	Breite Obergurt [cm]	<input type="text" value="100,00"/> - +
Länge Feld 1 [m]	<input type="text" value="3,00"/> - +	Höhe Obergurt [cm]	<input type="text" value="7,00"/> - +
Länge Feld 2 [m]	<input type="text" value="7,00"/> - +	K_ser [N/mm]	<input type="text" value="22800,00"/> - +
Gesamtlänge: 10.0 m		Schraubenabstand Bereich 1 [cm]	<input type="text" value="8,00"/> - +
Holzklasse	<input type="text" value="C24"/>	Abstand Schraube zum linken Auflager	<input type="text" value="ganzer Schraubenabstand"/> ▾
Breite Holzquerschnitt [cm]	<input type="text" value="16,00"/> - +	Schraubenabstand Bereich 2 [cm]	<input type="text" value="8,00"/> - +
Höhe Holzquerschnitt [cm]	<input type="text" value="22,00"/> - +	Schraubenabstand Bereich 3 [cm]	<input type="text" value="8,00"/> - +
Betonklasse	<input type="text" value="C20/25"/>	Abstand Schraube zum rechten Auflager	<input type="text" value="ganzer Schraubenabstand"/> ▾

Lasteingabe

	Lastart	≡ Bereich	≡ Größe Kraft [kN/m bzw. kN]
0	Gleichstreckenlast	Gesamtsystem	1.926
1	Gleichstreckenlast	Gesamtsystem	2

≡ Endwert Trapezlast [kN/m]	≡ Position / Start [m]	≡ Länge der Last [m]	≡ Kategorie
None	None	None	ständig
None	None	None	Kat. A: Wohngebäude

Durch die Unterteilung der Felder in drei Bereiche, in welchen die Verbindungsmittelabstände variabel eingegeben werden können, wurden die Verbindungsmittelabstände in diesen Bereichen im Client wie folgt festgelegt. Dabei ergeben sich geringe Abweichungen von den Eingabewerten, um die fest vorgegebenen Längen der Einzelbereiche durch ein Vielfaches der Abstände abbilden zu können.

erzeugte Schraubenabstände

	Feld	Rand links [m]	Bereich 1 [m]	Bereich 2 [m]	Bereich 3 [m]	Rand rechts [m]
0	1	0.08	0.0838	0.079	0.0838	0.08
1	2	0.08	0.0795	0.0796	0.0795	0.08

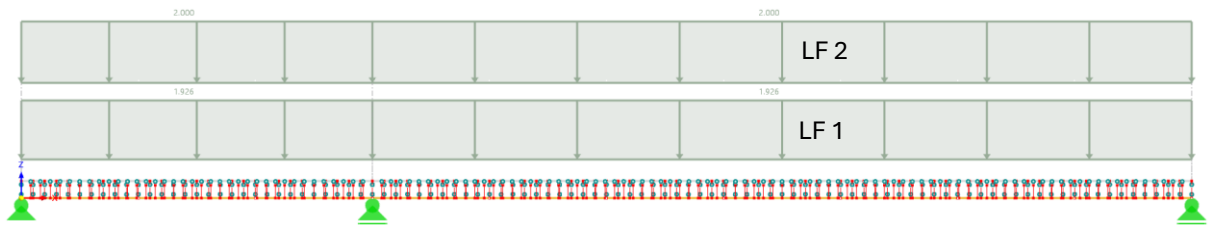


Abbildung 40: erzeugtes Stabwerksmodell Mehrfeldsystem in RFEM [eigene Darstellung]

Auch in diesem Beispiel wurden durch die Eingabe der Lastkategorien wieder automatisch zwei verschiedene Lastfälle im Programm generiert, LF 1 für die Kategorie ständig und LF 2 für Nutzlasten der Kategorie A. Außerdem wurden die nötigen Anpassungen der Schraubensteifigkeiten sowie Zuweisung der passenden Normen zur Lastfallklassifizierung entsprechend Kapitel 3.3.4 angewendet, womit sich folgende Materialeigenschaften ergeben. Da im Programm HBV 6 die Schrauben standardmäßig paarweise angeordnet werden muss darauf geachtet werden, dass die hier pro Schraube angegebenen Werte für K_{ser} bei der Eingabe im Client sowie zur Berechnung der Ersatzbiegesteifigkeiten verdoppelt wurden.

Tabelle 18: Materialeigenschaften des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]

Materialeigenschaften	Holz	Beton
Dehnsteifigkeit EA [kN]	387.200,00	2.170.000,00
Biegesteifigkeit EI [kNm ²]	1.561,70	886,07
Schubsteifigkeit GA [kN]	24.288,00	904.169,00
	Verbindungsmittel	
Verschiebungsmodul GZT $K_{ser,GZT}$ [kN/m/VM]	7.600,00	
Verschiebungsmodul GZG $K_{ser,GZG}$ [kN/m/VM]	11.400,00	
Ersatzbiegesteifigkeit GZT EI_{GZT}^* [kNm ²]	6,96	
Ersatzbiegesteifigkeit GZG EI_{GZG}^* [kNm ²]	10,44	

4.3.3 Ergebnisse des API-Stabwerksmodells

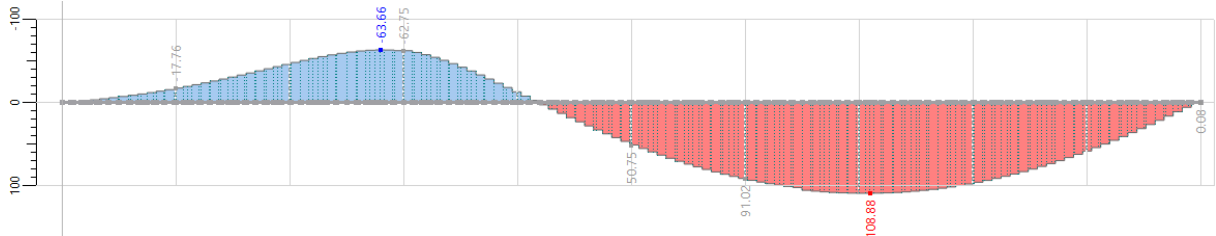
Folgende Ergebnisse wurden im Stabwerksmodell aus den betrachteten Lastfällen für die berechneten Schnittgrößen und Verformungen erzielt. Die Felder des untergelegten Rasters besitzen dabei die Breite von einem Meter, wodurch die Position des Zwischenauflegers bei drei Metern eingeordnet werden kann.

Grenzzustand der Tragfähigkeit

$$CO2 - 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2$$

Schnittgrößen N [kN]

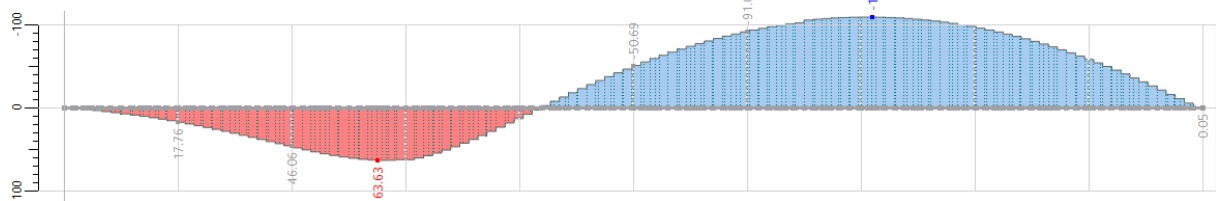
Holzgurt



$$CO2 - 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2$$

Schnittgrößen N [kN]

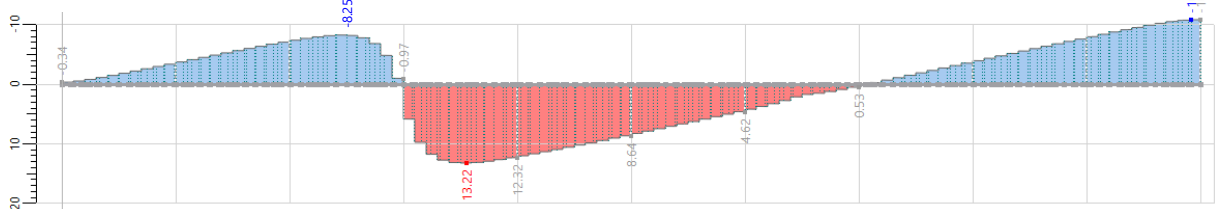
Betongurt



$$CO2 - 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2$$

Schnittgrößen V_z [kN]

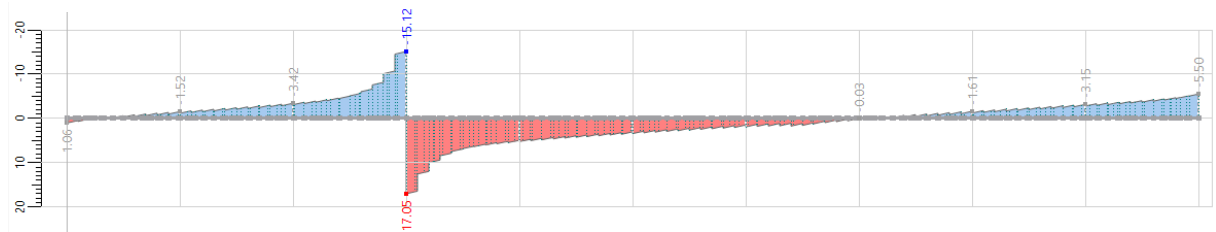
Holzgurt



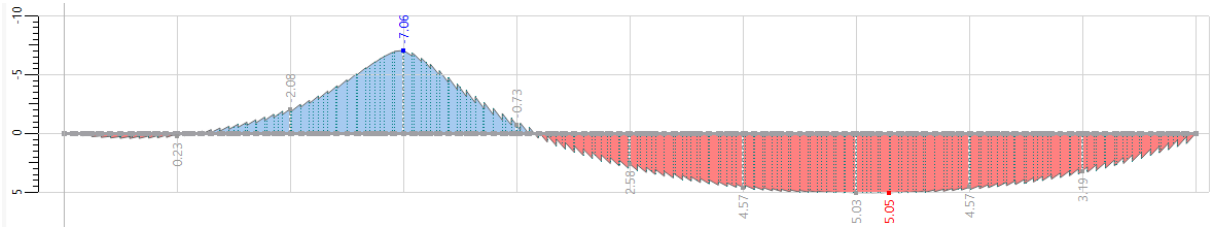
$$CO2 - 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2$$

Schnittgrößen V_z [kN]

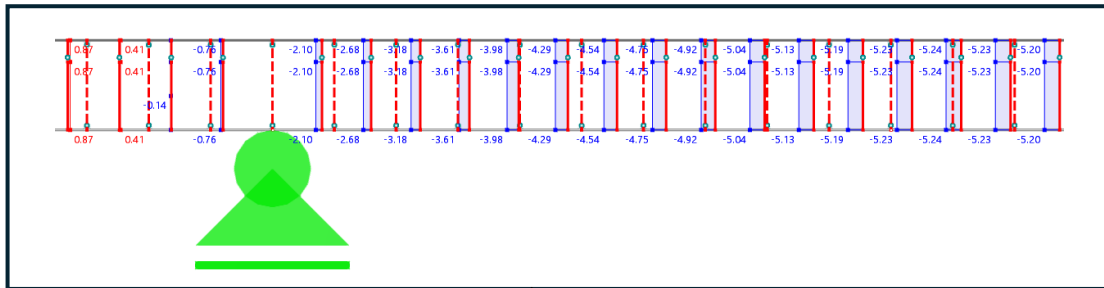
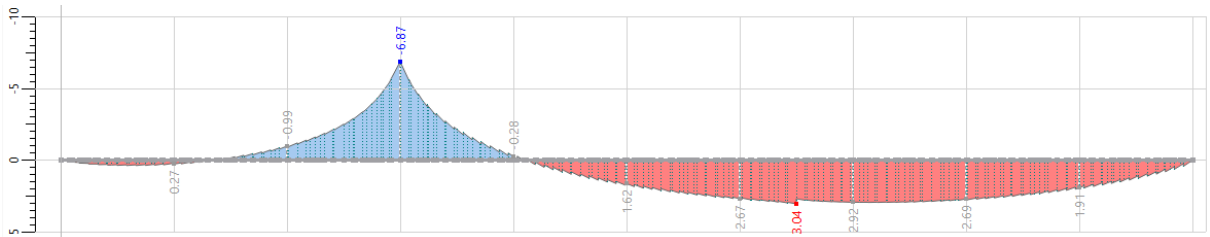
Betongurt



CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2
 Schnittgrößen M_y [kNm]
 Holzgurt



CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2
 Schnittgrößen M_y [kNm]
 Betongurt



CO4 – LC1 + LC2
 Schnittgrößen V_z [kN]
 Verbindungsmittel

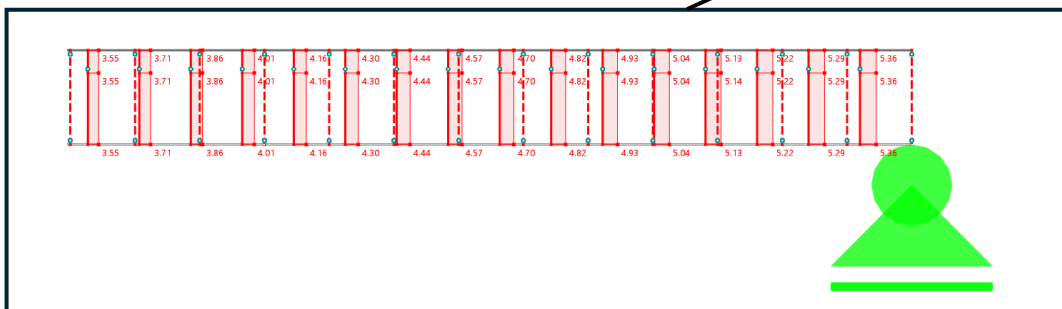


Abbildung 41: Schnittkräfte des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem im GZT [eigene Darstellung]

Tabelle 19: maßgebende Schnittkräfte des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem GZT [eigene Darstellung]

	Holzgurt	Betongurt
Feld 1 (0,00m ≤ x ≤ 3,00m)		
Normalkräfte N_{Ed} [kN], x = 2,79m	-63,66	63,63
Querkkräfte $V_{z,Ed}$ [kN], x = 2,41m	-8,25	
Querkkräfte $V_{z,Ed}$ [kN], x = 3,00m		-15,12
Innenaufleger (x = 3,00m)		
Biegemomente $M_{y,Ed}$ [kNm]	-7,06	-6,87
Feld 2 (3,00m ≤ x ≤ 10,00m)		
Normalkräfte N_{Ed} [kN], x = 7,10m	108,88	-108,88
Querkkräfte $V_{z,Ed}$ [kN], x = 3,00m		17,05
Querkkräfte $V_{z,Ed}$ [kN], x = 3,55m	13,22	
Biegemomente $M_{y,Ed}$ [kNm], x=7,30m	5,05	2,94
Verbindungsmittel		
Minimalwert (x = 4,11m)		
Querkraft VM $V_{Ed,min}$ [kN]		-5,24
Kraft pro Schraube $F_{Ed,min}$ [kN/VM]		-2,62
Maximalwert (x = 9,92m)		
Querkraft VM $V_{Ed,max}$ [kN]		5,36
Kraft pro Schraube $F_{Ed,max}$ [kN/VM]		2,68

Die Abweichung des in der Tabelle dokumentierten Werts für das maßgebende Biegemoment im Betongurt zum in Abbildung 41 hervorgehobenen Wert von 3,04 kNm wird in Kapitel 4.3.4 genauer betrachtet. Genauso wird der abweichende Minimalwert der Querkraft in dem Verbindungsmittel an derselben Stelle (x = 6,50m) erst zum späteren Zeitpunkt untersucht. Da diese beiden Werte eine lokale Abweichung darstellen werden zum Vergleich die Werte $M_{y,Ed} = 2,94$ kNm und $V_{Ed,min} = -5,24$ kN herangezogen.

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

CO4 – LC1 + LC2

Verformungen |u| [mm]

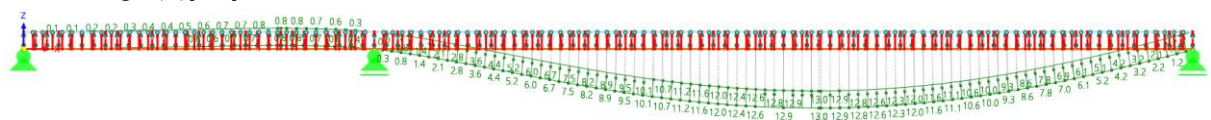


Abbildung 42: Verformungen des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem im GZG [eigene Darstellung]

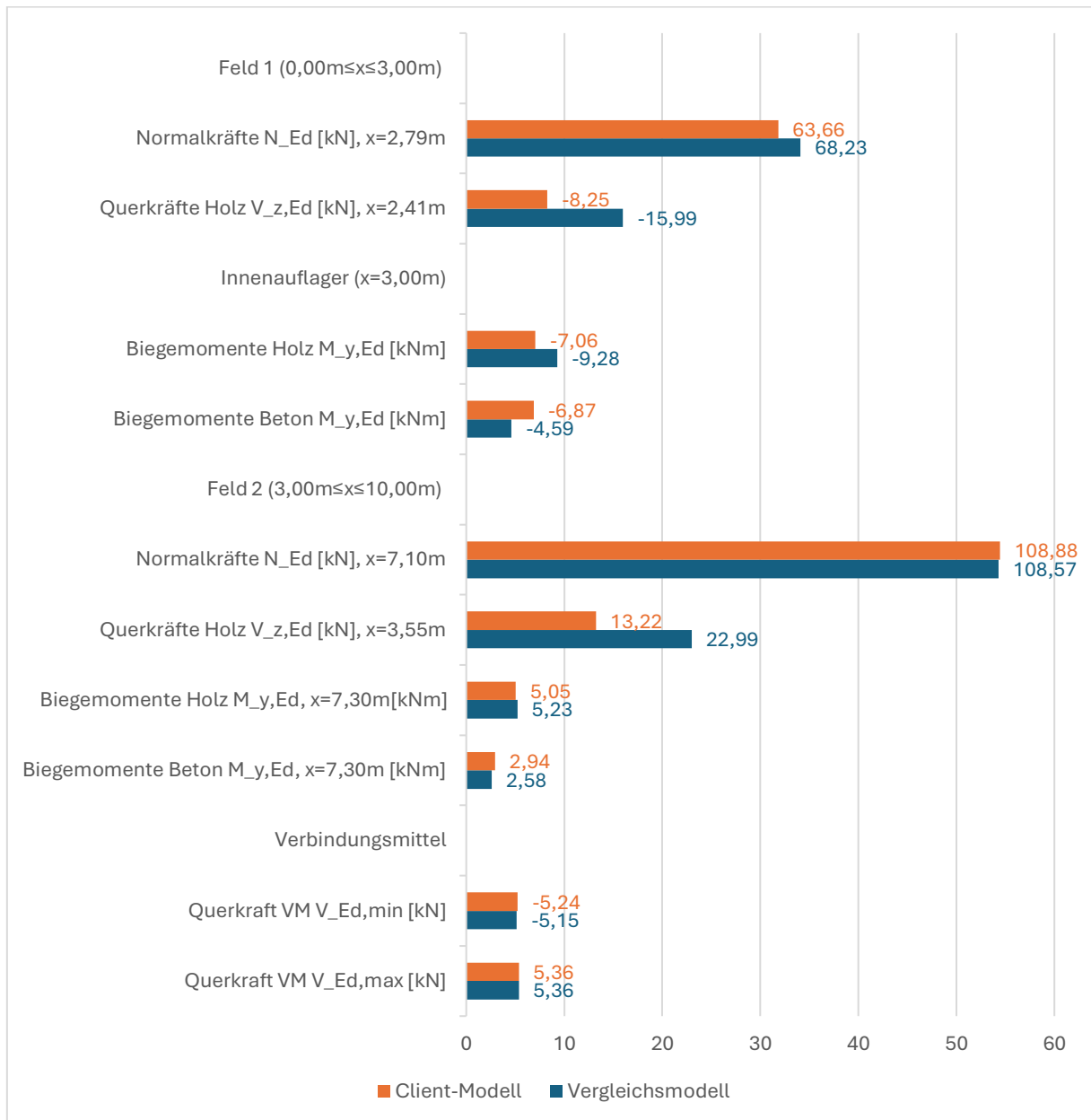
Tabelle 20: maßgebende Verformungen des Validierungsbeispiels Mehrfeldsystem GZG [eigene Darstellung]

	Feld 1	Feld 2
Verformungen u [mm]	0,8	13,0

4.3.4 Vergleich mit dem Referenzbeispiel

Schnittgrößen GZT

Tabelle 21: Vergleich der Schnittgrößen mit dem Validierungsbeispiel Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]



Da in dem Ausdrucksprotokoll von HBV 6 die Querkräfte im Betonquerschnitt nicht mit aufgeführt werden im Verlauf der Vergleiche nur die Querkräfte im Holz- sowie in den Verbindungsmittel verglichen. Die Werte bei den Verbindungsmitteln werden dabei aus dem protokollierten Schubfluss zurückgerechnet unter Verwendung der folgenden Beziehung:

$$t_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{a}$$

, wobei a den Abstand der Verbindungsmittel in Längsrichtung darstellt

Tabelle 22: Abweichungen der Schnittgrößen bezogen auf das Vergleichsmodell Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]

Prozentuale Abweichungen [%]			
Feld 1 (0,00m ≤ x ≤ 3,00m)			
$N_{Ed}, x = 2,79m$		$V_{z,Ed}$ Holz, x = 2,41m	
-6,698		+48,405	
Innenaufleger (x = 3,00m)			
$M_{y,Ed}$ Holz		$M_{y,Ed}$ Beton	
+23,922		-49,673	
Feld 2 (3,00m ≤ x ≤ 10,00m)			
$N_{Ed},$ x = 7,10m	$V_{z,Ed}$ Holz, x = 3,55m	$M_{y,Ed}$ Holz, x = 7,30m	$M_{y,Ed}$ Beton, x = 7,30m
+0,286	-42,497	-3,44	+13,953
Verbindungsmitel			
$V_{Ed,min}$ [kN] VM		$V_{Ed,max}$ [kN] VM	
-1,748		±0,000	

Verformungen

Tabelle 23: Vergleich der Verformungen mit dem Validierungsbeispiel Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]

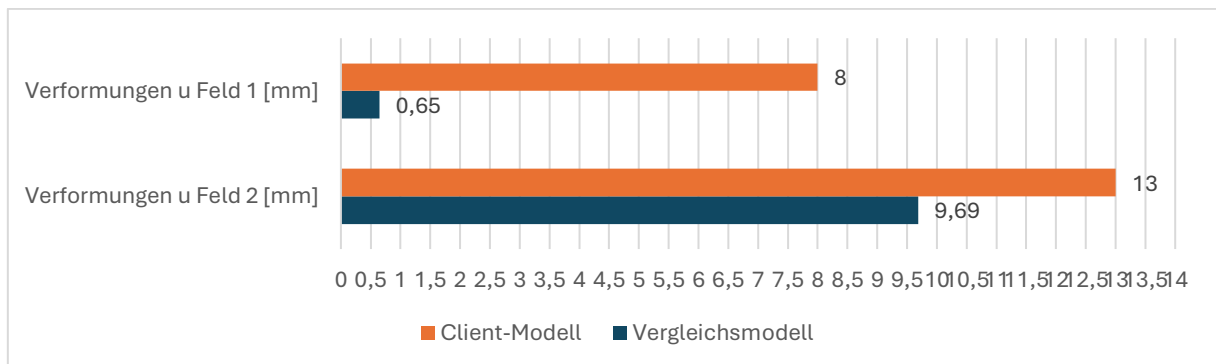


Tabelle 24: Abweichungen der Verformungen bezogen auf das Vergleichsmodell Mehrfeldsystem [eigene Darstellung]

Prozentuale Abweichungen [%]	
Verformungen u Feld 1	Verformungen u Feld 2
+1.130,769	+34,159

Der Vergleich der Schnittgrößen und Verformungen mit dem Referenzmodell zeigt, dass das mit dem entwickelten Client erzeugte Stabwerksmodell das globale Tragverhalten des Mehrfeldsystems insgesamt gut abbildet. Insbesondere die Normalkräfte sowie die Biegemomente in den Feldbereichen stimmen weitgehend mit den Ergebnissen aus HBV 6 überein. Auch die Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit weisen im zweiten Feld eine annehmbare Übereinstimmung auf.

Die verbleibenden Abweichungen sind im Wesentlichen auf Unterschiede in den zugrunde liegenden Berechnungsansätzen sowie in der Modellierung zurückzuführen. Während in HBV 6 die Schnittgrößen auf Basis einer analytischen Lösung der zugrunde liegenden Differentialgleichungen bestimmt werden, erfolgt die Berechnung im vorliegenden RFEM mittels des automatisiert erzeugten Stabwerksmodells. Die damit verbundene diskrete Abbildung von Geometrie, Steifigkeiten und Lasten führt zwangsläufig zu geringfügigen Abweichungen gegenüber der kontinuierlichen Lösung.

Zusätzlich ergeben sich Unterschiede aus der Umsetzung der Verbindungsmittelanordnung. In HBV 6 werden die Verbindungsmittel mit konstantem Abstand angesetzt, während im Client aufgrund der Unterteilung der Felder in definierte Bereiche die Abstände geringfügig angepasst werden, sodass die jeweiligen Feldlängen durch ein ganzzahliges Vielfaches der Abstände beschrieben werden können. Diese systematische Abweichung von den idealisierten Eingabewerten führt zu leicht veränderten Steifigkeitsverteilungen und damit zu entsprechenden Abweichungen in den Schnittgrößen.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied ergibt sich im Bereich des Zwischenauflegers aus der Anordnung der Verbindungsmittel. In HBV 6 werden Verbindungsmittel auch über dem Zwischenaufleger berücksichtigt, da dies innerhalb der Software nicht gesondert gesteuert werden kann. Im entwickelten Client hingegen wurde im Bereich des Zwischenauflegers bewusst eine Aussparung der Verbindungsmittel modelliert. Dadurch verändert sich lokal die Verbundwirkung zwischen Holz- und Betongurt, was sich insbesondere im Verlauf der Querkräfte bemerkbar macht. So ist im Holzgurt zu beobachten, dass das Querkraftmaximum nicht direkt am Auflager auftritt, sondern in einem gewissen Abstand davon liegt und sich in Richtung Auflager wieder reduziert. Dieses Verhalten ist auf die fehlende direkte Schubübertragung im Auflagerbereich zurückzuführen und stellt eine modellbedingte Abweichung dar.

Darüber hinaus konnte im Rahmen der Auswertung ein spezifischer Modellierungsfehler im Client identifiziert werden. Wie in der Detaildarstellung der Verbindungsmittelkräfte ersichtlich ist, tritt im Bereich des zweiten Feldes eine lokale Unstetigkeit im Querkraftverlauf der Verbindungsmittel auf. Dieselbe Unstetigkeit verursacht die aus Abbildung 41 ersichtliche Unstetigkeitsstelle im Momentenverlauf des Holzgurtes.

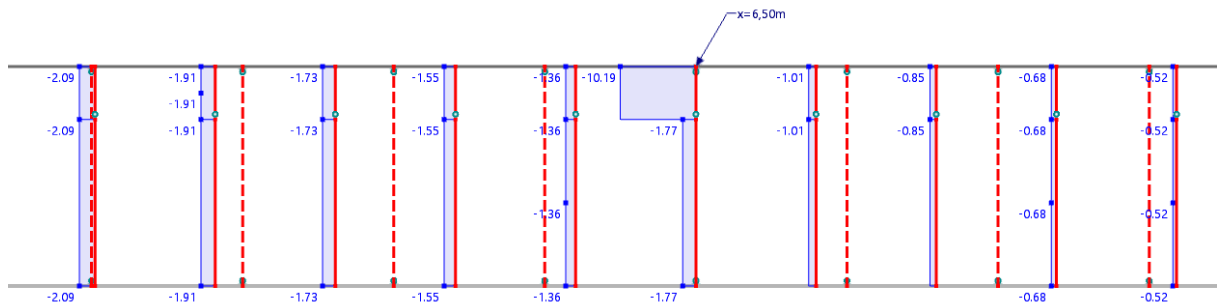


Abbildung 43: lokale Unstetigkeit im Querkraftverlauf der Verbindungsmittel [eigene Darstellung]

Die Ursache hierfür liegt in der automatisierten Knotengenerierung. In diesem Fall wurden bereits vorhandene Knoten, die zur Definition der starren Koppelstäbe erzeugt wurden, zusätzlich für die Modellierung von Verbindungsmitteln verwendet, sofern diese geometrisch an derselben Position lagen. Dadurch entsteht lokal eine ungewollte Überlagerung unterschiedlicher Verbindungselemente an einem gemeinsamen Knoten. Dies führt zu einer veränderten Kraftumlagerung innerhalb des Systems und äußert sich in einem sprunghaften Verlauf der Biegemomente sowie in einer lokal erhöhten Querkraft im betroffenen Verbindungsmittel.

Diese lokal begrenzte Abweichung wurde bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt, indem für den Vergleich mit dem Referenzmodell repräsentative Schnittgrößen außerhalb des gestörten Bereichs herangezogen wurden.

Die verbleibenden Unterschiede zwischen den Modellen können somit plausibel auf die genannten Einflüsse zurückgeführt werden. Insgesamt zeigt der Vergleich, dass das entwickelte Stabwerksmodell die maßgebenden globalen Tragwerksreaktionen zuverlässig erfasst. Gleichzeitig macht die Analyse deutlich, dass sowohl die gewählte Modellierungsstrategie als auch die implementierte Knotengenerierung einen entscheidenden Einfluss auf die lokalen Schnittgrößenverläufe haben. Die Identifikation dieses Effekts liefert eine wichtige Grundlage für die gezielte Weiterentwicklung des Clients.

Im Hinblick auf das Materialverhalten ist anzumerken, dass sowohl im verwendeten Stabwerksmodell als auch in HBV 6 von einem linear-elastischen Verhalten ausgegangen wird. Insbesondere im Bereich negativer Biegemomente über Zwischenauflagern können jedoch in realen Tragwerken nichtlineare Effekte infolge Rissbildung im Beton auftreten, die in beiden Modellen nicht berücksichtigt werden. Dieser Aspekt wird in einem späteren Kapitel im Rahmen eines Vergleichs mit nichtlinearem Materialverhalten gesondert untersucht.

Anhang: Zur Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit und praktischen Anwendbarkeit werden die im Rahmen der Arbeit erstellten Modell- und Programmunterlagen im Anhang bereitgestellt. Dazu gehören die RFEM-Modelle der Validierungsbeispiele, die herangezogenen Nachweisunterlagen des Vergleichsprogramms HBV 6 sowie die für den entwickelten Python-Client relevanten Quell- und Startdateien. Dadurch wird sowohl die Reproduzierbarkeit der Untersuchungen als auch die Nachnutzung des entwickelten Werkzeugs unterstützt.

4.4 Zusatzuntersuchung des Lastabtrags bei Einzellasten

4.4.1 Ziel der Untersuchung

Neben gleichmäßig verteilten Streckenlasten treten in realen Tragwerken häufig auch konzentrierte Einwirkungen in Form von Einzellasten auf, beispielsweise durch punktuell wirkende Verkehrslasten, Stützensauflager oder konzentrierte Nutzlasten. Diese führen im Vergleich zu Streckenlasten zu lokal stärker ausgeprägten Beanspruchungen und stellen besondere Anforderungen an die Modellierung des Lastabtrags.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, das Verhalten des mit dem entwickelten Client erzeugten Stabwerksmodells unter Einwirkung von Einzellasten zu analysieren. Dabei soll insbesondere untersucht werden, wie sich konzentrierte Lasten auf die Schnittgrößenverläufe und die Beanspruchung der Verbindungsmittel auswirken.

4.4.2 Vorgehen und Modellwahl

Die Untersuchung wird auf Basis des bereits in Abschnitt 4.2 betrachteten Einfeldträgers durchgeführt. Dieses System eignet sich aufgrund seines vergleichsweise einfachen Tragverhaltens gut zur Analyse des Einflusses von Einzellasten, da Überlagerungseffekte aus Mehrfeldsystemen vermieden werden und die resultierenden Schnittgrößenverläufe eindeutig interpretierbar sind.

Zur Untersuchung werden Einzellasten definierter Größe an unterschiedlichen Positionen innerhalb des Feldes angesetzt. Dabei werden insbesondere Laststellungen in Feldmitte sowie in einem Abstand zum Auflager betrachtet, um den Einfluss der Lastposition auf den Lastabtrag zu analysieren.

Für die Auswertung werden die resultierenden Schnittgrößen in Holz- und Betongurt, die Querkräfte sowie die Beanspruchung der Verbindungsmittel herangezogen. Ergänzend werden die Verformungen des Systems betrachtet. Die Ergebnisse werden sowohl qualitativ anhand der Verläufe als auch quantitativ über ausgewählte Extremwerte bewertet.

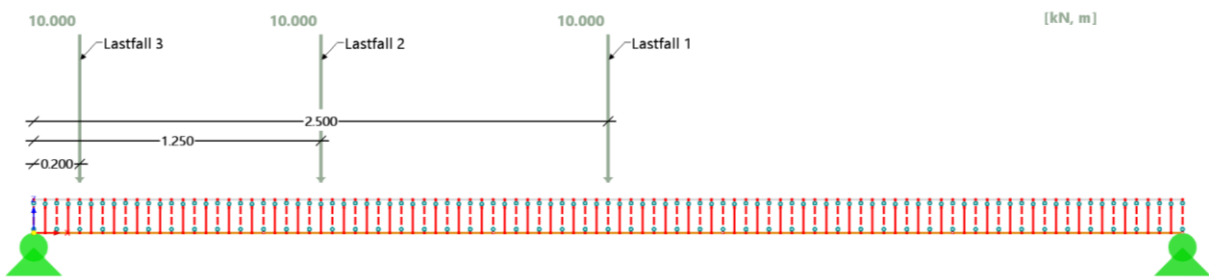


Abbildung 44: betrachtete Lastfälle der Einzellasten [eigene Darstellung]

Die Einzellasten werden mit konstanter Größe angesetzt, um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Lastfällen zu gewährleisten. Die gewählten Laststellungen umfassen eine Belastung in Feldmitte, eine exzentrische Belastung im Feld sowie eine auflagernah angeordnete Einzellast.

4.4.3 Ergebnisse und Bewertung

Die Auswertung der Einzellastfälle zeigt, dass sich im Vergleich zu gleichmäßig verteilten Lasten deutlich lokal konzentrierte Beanspruchungen ergeben. Insbesondere die Querkräfte sowie die Kräfte in den Verbindungsmitteln weisen ausgeprägte Spitzenwerte auf. Mithilfe der nachfolgenden Schnittkraftverläufe werden die Unterschiede der einzelnen Lastfälle (LF) verdeutlicht sowie die Effekte von Einzellasten dargestellt.

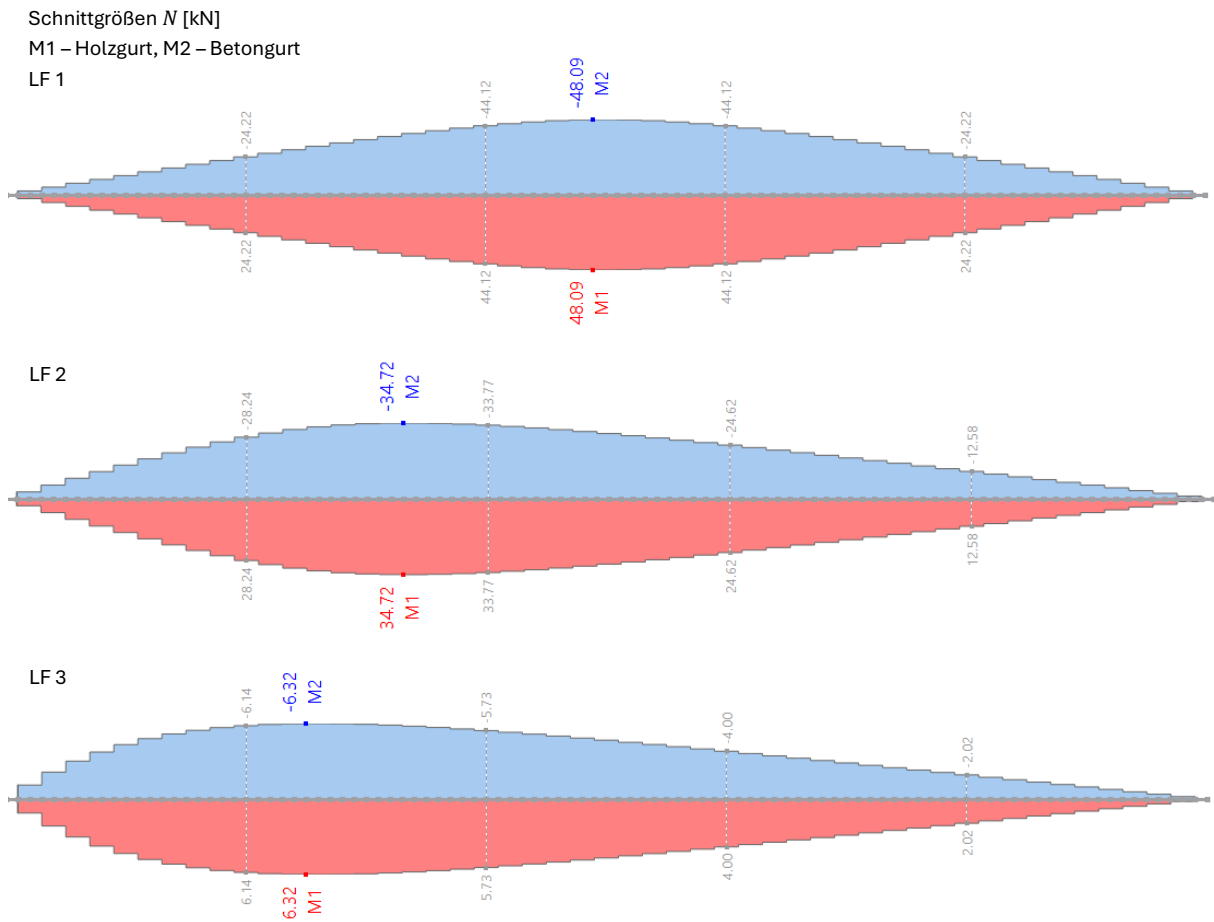


Abbildung 45: Normalkräfte in den untersuchten Lastfällen [eigene Darstellung]

Die Normalkräfte in Holz- und Betongurt folgen dem bekannten Verbundmechanismus, wobei der Betongurt überwiegend Druck- und der Holzgurt Zugkräfte aufnimmt. Die Verteilung wird durch die Lage der Einzellast beeinflusst, bleibt jedoch im Grundverhalten unverändert.

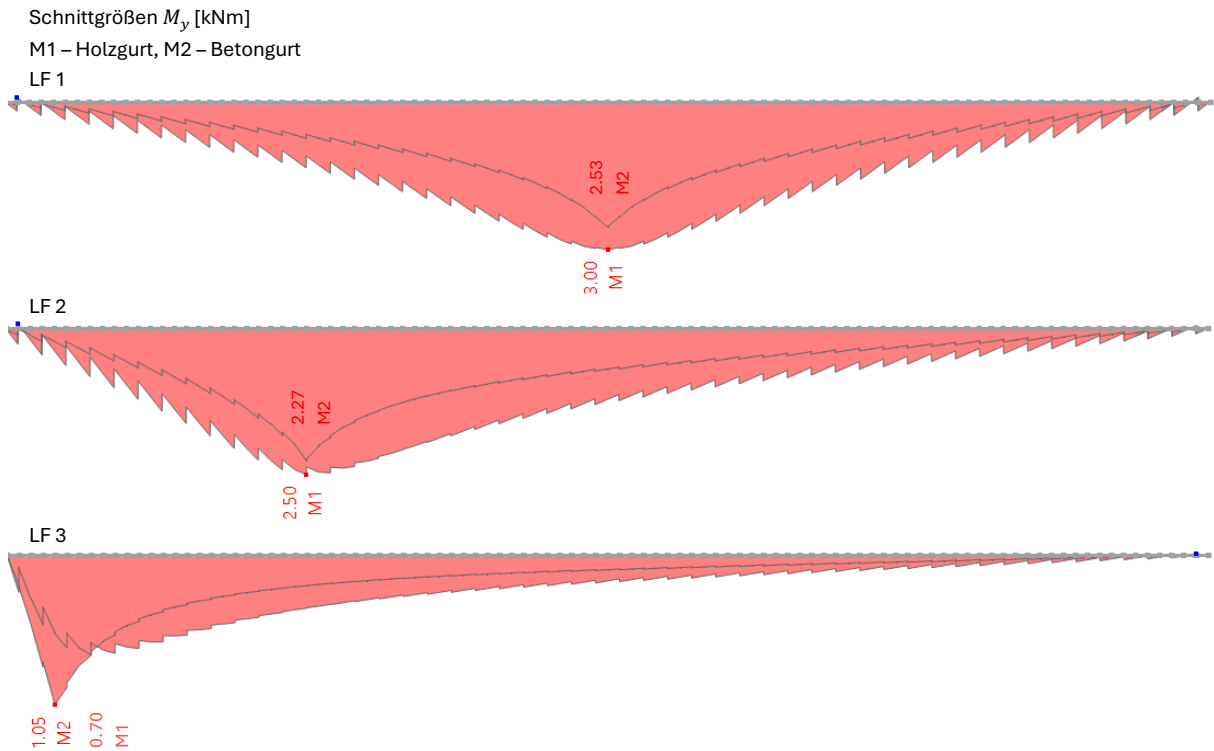


Abbildung 46: Biegemomente in den untersuchten Lastfällen [eigene Darstellung]

Der Verlauf der Biegemomente wird maßgeblich durch die Position der Einzellast bestimmt. Während bei einer Belastung in Feldmitte das maximale Moment ebenfalls in Feldmitte auftritt, verschiebt sich dieses bei exzentrischer Belastung entsprechend in Richtung der Lastposition. Dabei können bei Biegemomenten jedoch wesentlich stärker ausgeprägte Spitzen an den Lastangriffsstellen der Einzellasten festgestellt werden, vor allem am Betongurt, an dem die Last direkt angreift.

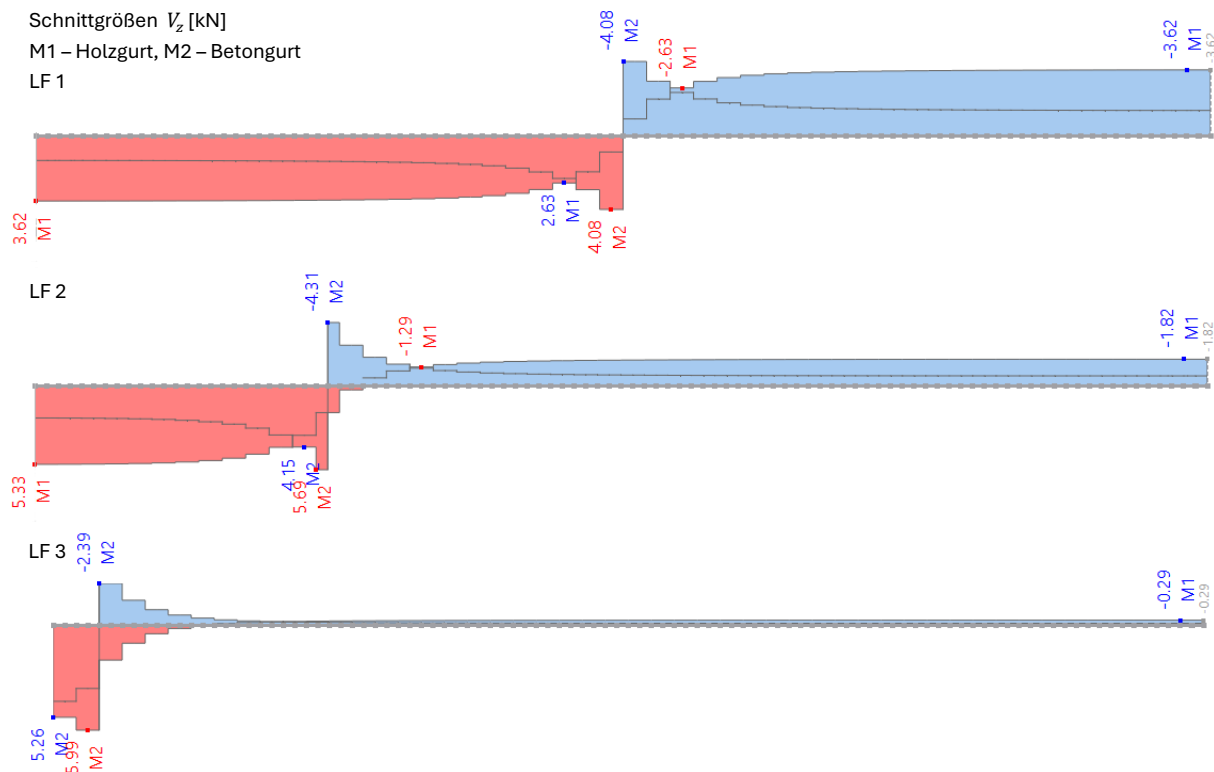
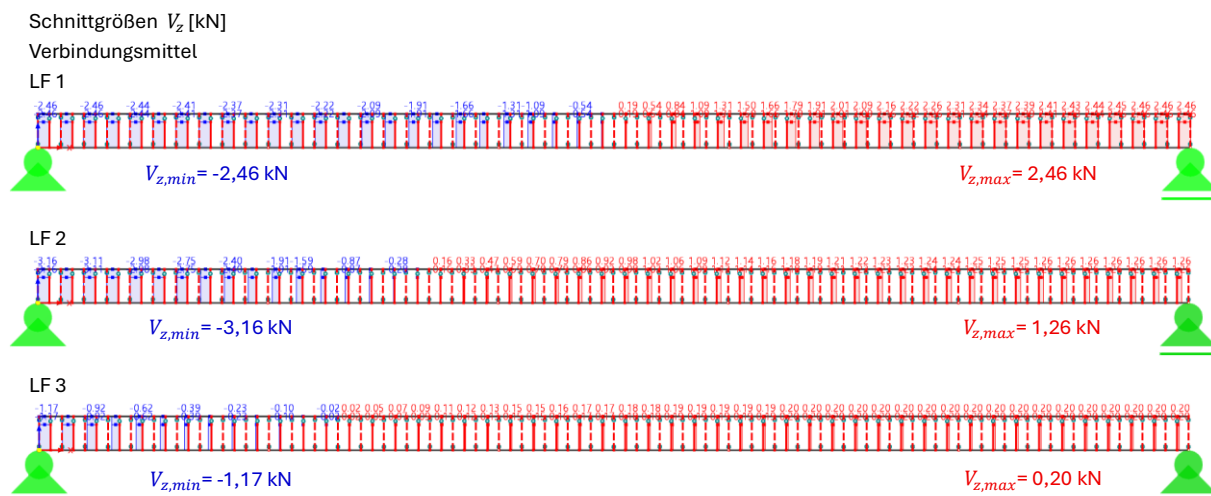


Abbildung 47: Querkräfte in den untersuchten Lastfällen [eigene Darstellung]

Die Querkräfte reagieren besonders sensibel auf die Einzellast. Im Gegensatz zur Gleichlast, bei der sich ein vergleichsweise gleichmäßiger Verlauf ergibt, treten bei Einzellasten deutlich ausgeprägte lokale Maxima auf. Insbesondere bei auflagennaher Belastung steigen die Querkräfte stark an.



Die Beanspruchung der Verbindungsmittel zeigt bei Einzellasten eine deutliche Abhängigkeit vom Angriffspunkt der punktuellen Last. Besonders LF 2 mit der angreifenden Last im Viertelpunkt der Spannweite hat im Bereich des nächstgelegenen Auflagers deutliche Querkräfte in den modellierten Schrauben zur Folge. Im Gegensatz zu gleichmäßig verteilten Lasten führt die Einzellast zu einer veränderten Verteilung der Verbindungsmittelbeanspruchungen, da die Last konzentriert in Richtung der Auflager abgetragen wird.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das entwickelte Stabwerksmodell auch für lokal wirkende Einwirkungen ein plausibles Tragverhalten abbildet. Gleichzeitig zeigen sich die für Einzellasten typischen lokal konzentrierten Beanspruchungen deutlich ausgeprägter als bei gleichmäßig verteilter Belastung.

4.5 Einfluss eines nichtlinearen Betonverhaltens am Mehrfeldsystem

4.5.1 Zielsetzung und Motivation

Bei Holz–Beton-Verbundsystemen mit mehreren Feldern treten, wie bereits im Validierungsbeispiel des Mehrfeldsystems gezeigt wurde, im Bereich um die Zwischenaufleger negative Biegemomente auf. Diese führen im Betongurt zu Zugspannungen, die im realen Tragverhalten Rissbildung sowie damit verbundene Steifigkeitsänderungen und Umlagerungen der Schnittgrößen zur Folge haben.

In vereinfachten Stabwerksmodellen wird der Beton in der Regel linear-elastisch angenommen, wodurch diese Effekte nicht berücksichtigt werden. Insbesondere bei Mehrfeldträgern kann dies zu Abweichungen in der Schnittgrößenverteilung und im Verformungsverhalten führen, da Umlagerungseffekte infolge nichtlinearer Materialeigenschaften unberücksichtigt bleiben.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es daher, den Einfluss eines nichtlinearen Materialverhaltens des Betongurts auf das Tragverhalten eines Mehrfeldsystems zu analysieren. Aufgrund der Steifigkeitsumlagerungen bei statisch unbestimmten Systemen, durch welche sich die Ergebnisse deutlich von den linear ermittelten unterscheiden, sollen so näher an der Realität liegende Resultate erzielt werden. Hierzu werden die bereits betrachteten, mit linear-elastischem Betonmodell berechneten Ergebnisse des Validierungsbeispiels erneut herangezogen. Dasselbe System wird zusätzlich mit einem nichtlinearen Materialmodell für den Betongurt berechnet und die Ergebnisse gegenübergestellt.

Der Vergleich soll insbesondere aufzeigen, inwieweit sich Unterschiede in den Schnittgrößenverteilungen und Verformungen ergeben und welche Bedeutung diese für die Bewertung und Anwendbarkeit vereinfachter, linearer Modelle haben. Die Nichtlinearität wird im vorliegenden Modell ausschließlich für den Betongurt berücksichtigt. Dies ist dadurch begründet, dass die maßgebenden nichtlinearen Effekte im Holz–Beton-Verbundsystem aus der Rissbildung des Betons im Zugbereich resultieren, welche mit einer deutlichen Reduktion der Steifigkeit verbunden ist. Das Holz wird hingegen im betrachteten Lastbereich näherungsweise als linear-elastisch angenommen, weshalb eine zusätzliche Berücksichtigung nichtlinearer Materialeffekte für den Holzgurt im Rahmen dieser Untersuchung nicht erfolgt.

4.5.2 Modellannahmen und Berechnungsansatz

Zur Untersuchung des Einflusses eines nichtlinearen Betonverhaltens wird das bereits in Abschnitt 4.3 betrachtete Mehrfeldsystem in zwei Varianten analysiert. Dabei wird das ursprüngliche, mit linear-elastischem Materialmodell berechnete System als Referenz herangezogen und einem identischen System mit nichtlinear modelliertem Betongurt gegenübergestellt.

Im linearen Berechnungsmodell wird für den Beton ein konstant linear-elastisches Materialverhalten angenommen. Die Spannungen stehen hierbei in direkter Proportionalität zu den Dehnungen, und es wird keine Unterscheidung zwischen Druck- und Zugverhalten getroffen. Insbesondere werden Effekte wie Rissbildung im Zugbereich sowie damit verbundene Steifigkeitsänderungen nicht berücksichtigt. Als nichtlineares Materialmodell wird das Modell Anisotrop | Beschädigung verwendet, welches in RFEM 6 durch das AddOn nichtlineares Materialverhalten dem Betonquerschnitt zugewiesen werden kann. Eine Berücksichtigung von Tension-Stiffening-Effekten wurde nicht vorgenommen, da im vorliegenden Modell keine explizite Bewehrung modelliert wird. Somit wird das Zugtragverhalten des Betons nach Rissbildung nicht weiter angesetzt.

Das Holz wird weiterhin als linear-elastisches Material modelliert, was dadurch begründet wird, dass im betrachteten System keine maßgebenden nichtlinearen Effekte im Holzgurt zu erwarten sind.

Materialmodell Anisotrop | Beschädigung

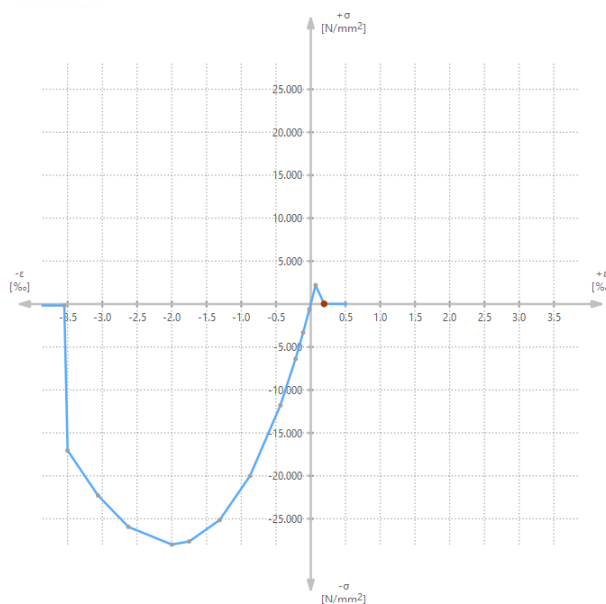


Abbildung 48: Spannungs-Dehnungsdiagramm für das nichtlineare Betonmodell aus [RFEM 6]

Aus der Abbildung wird erkenntlich, dass das hierbei verwendete Materialmodell nicht antisymmetrisch zum Ursprung ist. Dadurch kann das unterschiedliche Verhalten von Beton bei Druck und Zug abgebildet werden. Während der Beton im Druckbereich weiterhin eine hohe Steifigkeit aufweist, wird im Zugbereich nur eine begrenzte Tragfähigkeit berücksichtigt. Nach Überschreiten der Zugfestigkeit kommt es zu einer Reduktion der Steifigkeit, wodurch die Rissbildung im Beton näherungsweise erfasst wird. Durch die anisotropen Materialeigenschaften werden die Materialsteifigkeiten richtungsabhängig reduziert, wodurch unterschiedliche Steifigkeiten in Zug-, Druck- und Schubrichtungen dargestellt werden.

Für den Vergleich der beiden Berechnungsansätze werden die resultierenden Schnittgrößenverteilungen sowie die Verformungen des Systems herangezogen. Ziel ist es, die Auswirkungen der nichtlinearen Materialeigenschaften des Betons auf das globale Tragverhalten des Mehrfeldsystems sowie auf die Umlagerung der Schnittgrößen zu bewerten.

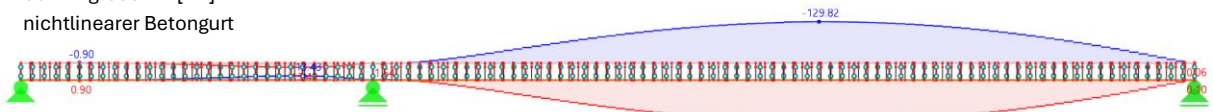
4.5.3 Vergleich der Ergebnisse

In der folgenden Grafik werden die maßgebenden Unterschiede in den Berechnungsergebnissen beider Materialmodelle dargestellt.

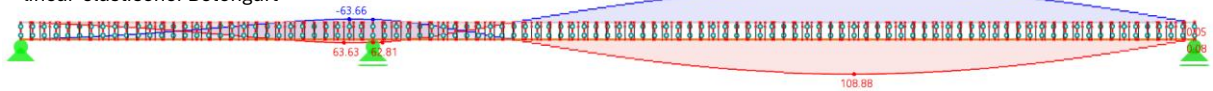
CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2

Schnittgrößen N [kN]

nichtlinearer Betongurt



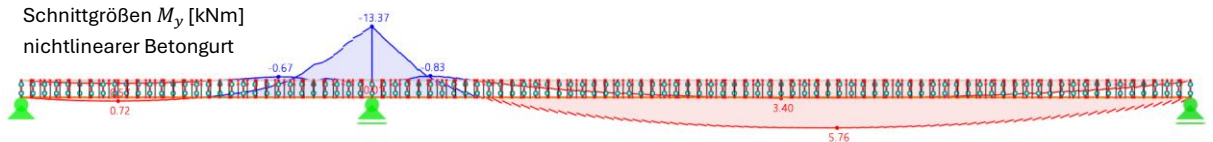
linear-elastischer Betongurt



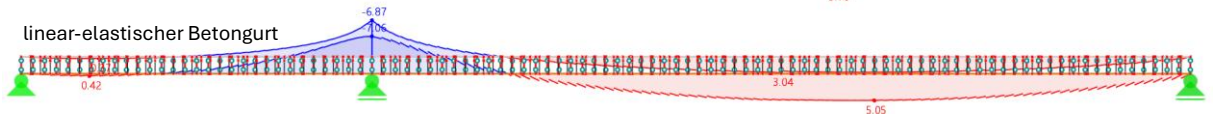
CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2

Schnittgrößen M_y [kNm]

nichtlinearer Betongurt



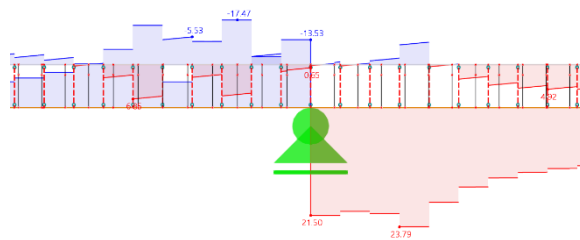
linear-elastischer Betongurt



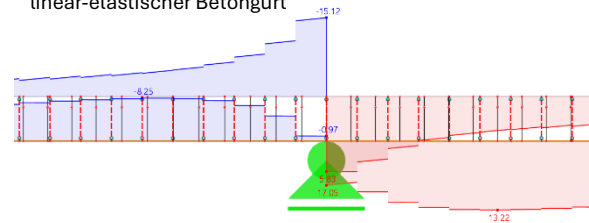
CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2

Schnittgrößen V_z [kN] am Innenaufleger

nichtlinearer Betongurt



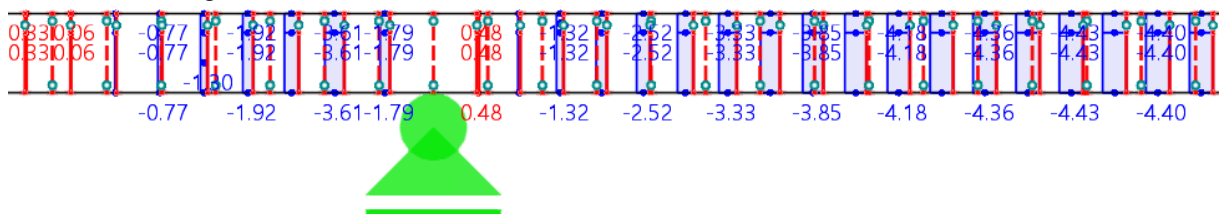
linear-elastischer Betongurt



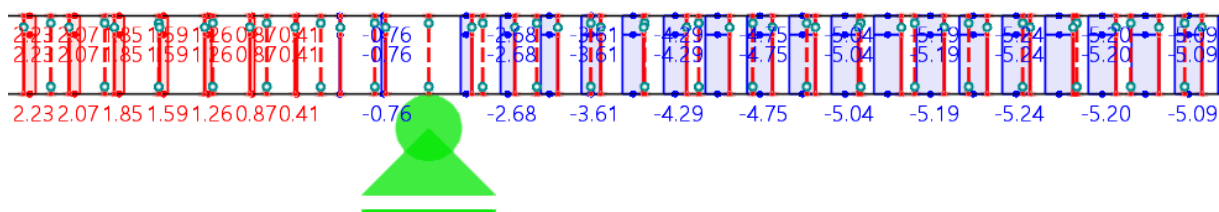
CO2 – 1,35 * LC1 + 1,50 * LC2

Schnittgrößen V_z [kN] Verbindungsmittel, mittleres Auflager

nichtlinearer Betongurt



linear-elastischer Betongurt



4.5.4 Bewertung

Der Vergleich der linearen und nichtlinearen Berechnung zeigt, dass vereinfachte linear-elastische Modelle das Tragverhalten von Mehrfeldsystemen aus Holz–Beton-Verbund nur eingeschränkt abbilden können. Insbesondere die Umlagerung der Schnittgrößen infolge der Rissbildung im Beton wird im linearen Modell nicht erfasst.

Dennoch liefert das linear-elastische Modell für viele Fragestellungen eine ausreichend genaue Näherung, insbesondere im Hinblick auf globale Schnittgrößen und Vorbemessungen.

Der linear-elastischen Untersuchungen mittels des Python-Clients sind somit für die automatisierte Modellgenerierung und erste Abschätzungen geeignet. Für eine detaillierte Bewertung des Tragverhaltens, insbesondere bei statisch unbestimmten Systemen, ist jedoch die Berücksichtigung nichtlinearer Materialeigenschaften erforderlich. Dabei sind auch diese Untersuchungen mit dem Client möglich, da der Benutzer ein auf sein Projekt zugeschnittenes Stabwerksmodell erzeugen kann, mit welchem er weitere Untersuchungen anstellen kann.

4.6 Zusammenfassung der Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen insgesamt, dass der entwickelte Python-Client für die automatisierte Modellgenerierung von HBV-Stabwerksmodellen geeignet ist, die Aussagekraft der Ergebnisse jedoch in Abhängigkeit vom betrachteten System unterschiedlich zu bewerten ist.

Für das untersuchte **Einfeldsystem** konnte eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzbeispiel erzielt werden. Sowohl die maßgebenden Schnittgrößen als auch die Verformungen wurden mit nur geringen Abweichungen abgebildet. Damit konnte gezeigt werden, dass die geometrische Modellbildung, die Lastansätze sowie die Abbildung des Verbunds über die Verbindungsmittel im Client konsistent umgesetzt wurden. Die auf Grundlage der ermittelten Schnittgrößen exemplarisch geführten Nachweise verdeutlichen zudem, dass das erzeugte Modell eine nachvollziehbare Grundlage für weiterführende Bemessungen der maßgebenden Bauteile liefern kann. Für den Betonquerschnitt wurden die im Modell ermittelten Schnittgrößen dabei ergänzend für eine separate Nachweisführung herangezogen, da sich die Darstellung der Nachweise in RFEM für die vorliegende Arbeit nicht in der erforderlichen Transparenz und Nachvollziehbarkeit abbilden ließ.

Beim **Mehrfeldsystem** zeigte sich ebenfalls eine insgesamt gute Übereinstimmung hinsichtlich des globalen Tragverhaltens. Insbesondere die Normalkräfte sowie die Biegemomente in den Feldbereichen konnten plausibel abgebildet werden. Gleichzeitig wurden hier jedoch auch die Grenzen des entwickelten Modells sichtbar. Die Abweichungen fielen im Vergleich zum Einfeldsystem größer aus und machten deutlich, dass Mehrfeldsysteme sensibler auf Unterschiede im Berechnungsansatz, in der Steifigkeitsverteilung und in der konkreten Modellierung der Verbindungsmittel reagieren. Zusätzlich konnte ein lokaler Modellierungsfehler in der automatisierten Knotengenerierung identifiziert werden, der die Bedeutung einer konsistenten Modellbildung insbesondere bei komplexeren Systemen unterstreicht.

Die ergänzenden **Zusatzuntersuchungen** lieferten darüber hinaus wichtige Erkenntnisse zum Anwendungsbereich des entwickelten Ansatzes. Die Untersuchung von Einzellasten zeigte, dass mit dem Stabwerksmodell auch lokal konzentrierte Einwirkungen explizit erfasst werden können und sich dabei die für solche Laststellungen typischen lokalen Beanspruchungsspitzen in Schnittgrößen und Verbindungsmittelkräften deutlich abbilden. Die Untersuchung des nichtlinearen Betonverhaltens am Mehrfeldsystem verdeutlichte zudem, dass sich infolge reduzierter Steifigkeiten und Rissbildung relevante Umlagerungen der Schnittgrößen sowie veränderte Verformungsfiguren ergeben können. Damit wird zugleich ein wesentlicher Vorteil des Stabwerksmodells gegenüber vereinfachten klassischen Berechnungsverfahren sichtbar, da neben standardisierten Lastfällen auch beliebige Laststellungen und weiterführende Materialuntersuchungen berücksichtigt werden können.

Zusammenfassend ergibt sich damit eine differenzierte Bewertung des entwickelten Clients. Für einfachere Systeme, wie das untersuchte Einfeldsystem, liefert der Client sehr verlässliche Ergebnisse und ermöglicht eine realitätsnahe automatisierte Modellbildung. Bei komplexeren Tragstrukturen, insbesondere Mehrfeldsystemen, zeigt sich ebenfalls eine gute grundsätzliche Anwendbarkeit, zugleich treten hier jedoch die Grenzen und die höhere Sensitivität des Modells deutlicher hervor. Die Untersuchungen bestätigen damit sowohl die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des entwickelten Clients als auch den Bedarf einer kritischen Einordnung seiner Ergebnisse bei komplexeren Anwendungsfällen.

5. Diskussion der Ergebnisse und Bewertung des Clients

5.1 Leistungsfähigkeit des Python-Clients

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der entwickelte Python-Client grundsätzlich in der Lage ist, Holz–Beton-Verbundsysteme automatisiert in konsistente RFEM-Stabwerksmodelle zu überführen. Die Eingabe der wesentlichen Systemparameter, insbesondere der Feldanzahl, Feldlängen, Querschnittsabmessungen, Materialkennwerte, Verbindungsmittelsteifigkeiten und Lasten, wird dabei so verarbeitet, dass daraus ohne manuelle Modellierung ein berechnungsfähiges Strukturmodell erzeugt werden kann. Damit erfüllt der Client seine zentrale Funktion, nämlich die automatisierte Generierung eines parametrisierten Stabwerksmodells auf Grundlage benutzerdefinierter Eingaben.

Als wesentliche Stärke des entwickelten Clients ist die hohe Flexibilität der Modellbildung hervorzuheben. Im Unterschied zu stark standardisierten Berechnungstools ist der Nutzer nicht auf wenige fest vorgegebene Systemtypen beschränkt, sondern kann unterschiedliche Geometrien, verschiedene Feldanzahlen sowie variable Eingaben für Materialien, Querschnitte, Lasten und Verbindungsmittel abbilden. Dadurch eignet sich der Client nicht nur zur Nachbildung einzelner Referenzsysteme, sondern auch zur systematischen Variation von Modellparametern. Insbesondere für parametrische Untersuchungen und vergleichende Studien stellt dies einen wesentlichen Vorteil dar.

Ein besonderer Mehrwert des entwickelten Ansatzes liegt darin, dass das Ergebnis der automatisierten Eingabe nicht lediglich eine isolierte Berechnungsausgabe ist, sondern ein vollständiges RFEM-Modell. Der Nutzer erhält damit ein weiterbearbeitbares Stabwerksmodell, auf dessen Grundlage zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden können. So können nach der automatisierten Modellerstellung beispielsweise weitere Laststellungen angesetzt, alternative Materialannahmen untersucht oder zusätzliche Auswertungen vorgenommen werden. Gerade diese Offenheit des erzeugten Modells erweitert die Anwendbarkeit des Clients deutlich über eine reine Erstmodellierung hinaus.

Damit verbunden ist zugleich ein weiterer wesentlicher Vorteil: Durch die Erzeugung eines RFEM-Modells können die in RFEM verfügbaren Funktionen und AddOns für weiterführende Berechnungen und Auswertungen genutzt werden. Der Client bildet somit nicht nur ein eigenständiges Eingabewerkzeug, sondern schafft eine Schnittstelle zwischen einer benutzerfreundlichen Parametrisierung und der weitergehenden Analyse in einer etablierten FE-Umgebung. Dies erlaubt es, automatisierte Modellgenerierung und vertiefte ingenieurmäßige Untersuchung miteinander zu verbinden.

Die Validierung zeigt, dass der Client insbesondere bei einfachen Systemen sehr konsistente Ergebnisse liefert. Auch bei komplexeren Tragstrukturen ist eine grundsätzlich plausible Abbildung des globalen Tragverhaltens möglich, wobei die Sensitivität gegenüber Modellierungsdetails zunimmt.

Insgesamt ist der Python-Client damit als leistungsfähiges Werkzeug zur automatisierten Erzeugung von HBV-Stabwerksmodellen zu bewerten. Seine Stärke liegt weniger in einer vollständig abgeschlossenen Bemessungslösung als vielmehr in der schnellen, konsistenten und flexiblen Erstellung eines berechnungsfähigen Ausgangsmodells, das anschließend gezielt weiterverwendet und untersucht werden kann. Gerade im Kontext von Variantenuntersuchungen, Voruntersuchungen und der Vorbereitung weiterführender Berechnungen liegt damit ein wesentlicher praktischer Nutzen des entwickelten Clients.

Die Leistungsfähigkeit des Clients ist im Zusammenhang mit der aktuell implementierten Eingabelogik zu betrachten. Insbesondere bei der Verbindungsmittelanordnung bestehen derzeit noch Einschränkungen in der Flexibilität, die bei komplexeren Systemen zu modellbedingten Abweichungen führen können und im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

5.2 Grenzen und Einschränkungen

Trotz der grundsätzlich erfolgreichen Validierung und der gezeigten Leistungsfähigkeit weist der entwickelte Python-Client in seiner aktuellen Form mehrere Grenzen und Einschränkungen auf, die bei der Anwendung und Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen sind.

Eine erste wesentliche Einschränkung betrifft die Genauigkeit der Ergebnisse bei komplexeren Systemen. Während für das Einfeldsystem eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzbeispiel erreicht wurde, zeigten sich beim Mehrfeldsystem deutlich größere Abweichungen in einzelnen Ergebnisgrößen. Dies ist zum einen auf Unterschiede zwischen dem verwendeten Stabwerksmodell in RFEM und den Berechnungsansätzen der Vergleichssoftware zurückzuführen, zum anderen aber auch auf modellbedingte Einflüsse innerhalb des Clients selbst. Insbesondere bei statisch unbestimmten Systemen reagiert das Tragverhalten empfindlicher auf lokale Unterschiede in der Steifigkeitsverteilung, der Knotenbildung und der Verbindungsmittelanordnung. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist daher bei komplexeren Systemen differenzierter zu bewerten als bei einfachen Einfeldträgern.

Eine zentrale Grenze des aktuellen Entwicklungsstands liegt in der Abbildung der Verbindungsmittelanordnung. Zwar können die Verbindungsmittelabstände feldweise über vordefinierte Bereiche variiert werden, die Eingabelogik ist jedoch noch nicht ausreichend flexibel, um beliebige praxisgerechte Anordnungen exakt abzubilden. Insbesondere ist derzeit keine vollständig frei definierbare feldweise Anordnung möglich, ebenso fehlt eine einfache Option für eine konstant gleichmäßige Verbindungsmittelverteilung über ein gesamtes Feld. Auch die Abstände der ersten und letzten Verbindungsmittel zu den Auflagern lassen sich nicht in der gewünschten Flexibilität steuern. Diese Einschränkungen wirkten sich im zweiten Validierungsbeispiel unmittelbar aus: Der angestrebte Verbindungsmittelabstand von 8 cm konnte aufgrund der feldweisen Bereichsunterteilung nicht exakt eingehalten werden, sodass in den Randbereichen geringfügig kleinere und im mittleren Bereich leicht größere Abstände erzeugt wurden. Dadurch ergeben sich lokal veränderte Steifigkeitsverteilungen, die wiederum Einfluss auf Schnittgrößen und Verbindungsmittelkräfte haben können.

Auch hinsichtlich des Materialverhaltens basiert der Client auf einer vereinfachten Modellierung. Im Regelfall wird ein linear-elastisches Verhalten der beteiligten Materialien angesetzt. Nichtlineare Effekte, insbesondere infolge Rissbildung im Beton, werden nicht automatisch berücksichtigt. Die Zusatzuntersuchung zum nichtlinearen Betonverhalten hat jedoch gezeigt, dass solche Effekte bei Mehrfeldsystemen einen spürbaren Einfluss auf Schnittgrößenverteilung, Verformungen und Verbindungsmittelbeanspruchung haben können. Eine Berücksichtigung der Nichtlinearität ist zwar grundsätzlich durch nachträgliche Anpassungen im erzeugten RFEM-Modell möglich, erfolgt jedoch nicht automatisiert durch den Client selbst. Gleiches gilt für weiterführende Versagensmodelle oder eine materialeitig differenziertere Abbildung des Tragverhaltens.

Eine weitere wesentliche Einschränkung besteht darin, dass der Client derzeit nur für den Anfangszustand zum Zeitpunkt $t = 0$ unmittelbar anwendbar ist. Zeitabhängige Einflüsse wie Schwinden und Kriechen werden nicht automatisiert in die Modellbildung und Auswertung einbezogen. Soll ein anderer Bemessungszeitpunkt betrachtet werden, müssen die Baustoff- und Verbindungsmittelsteifigkeiten derzeit manuell angepasst werden. Damit ist zwar eine angenäherte Berücksichtigung solcher Effekte möglich, sie erfolgt jedoch nicht integrativ und benutzergeführt innerhalb des Clients. Gerade für Holz-Beton-Verbundsysteme, bei denen das Langzeitverhalten eine besondere Rolle spielt, stellt dies eine relevante Einschränkung der aktuellen Anwendbarkeit dar.

Auch die Nachweisführung ist in der aktuellen Form nur eingeschränkt automatisiert. Zwar liefert der Client eine belastbare Grundlage in Form der ermittelten Schnittgrößen und Verformungen, die eigentliche Bemessung der Bauteile erfolgt jedoch nicht vollständig innerhalb eines durchgängigen automatisierten Workflows. Für das Einfeldsystem konnte exemplarisch gezeigt werden, dass die mit RFEM ermittelten

Ergebnisse für weiterführende Nachweise von Holz, Beton und Verbindungsmitteln verwendet werden können. Dennoch ergaben sich insbesondere im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit Einschränkungen, da erforderliche Modifikationen für die Verbindungsmittelsteifigkeiten nicht vollständig automatisch zugewiesen werden konnten. Die betreffenden Struktur- und Stabmodifikationen mussten aufgrund eines dokumentierten, im Entwicklungszeitraum jedoch nicht behobenen Bugs der Dlubal API manuell ergänzt werden. Dadurch ist die Reproduzierbarkeit zwar weiterhin gegeben, die angestrebte vollständige Automatisierung wird an dieser Stelle jedoch nicht erreicht.

Zusätzliche praktische Einschränkungen ergaben sich aus der Anbindung an die Dlubal API. Der entwickelte Client wurde gezielt für die Dlubal API Version 2.12.7 in Verbindung mit RFEM 6.12.0007 entwickelt und getestet. Innerhalb dieser Versionsreihe ist von einer stabilen Funktionalität auszugehen. Frühere Versionen wurden nicht systematisch untersucht, während neuere API-Versionen strukturelle Änderungen aufweisen können, durch die die Kompatibilität des Clients nicht mehr gewährleistet ist. Besonders relevant war im Rahmen der Implementierung zudem, dass die automatisierte Umstellung des Combination-Wizard-Standards auf EN 1990 | Base + Timber in der verwendeten Konstellation zu einer fehlerhaften Erzeugung der Entwurfsituationen führte. Statt der erwarteten Kombination aus GZT- und GZG-Situationen wurden ausschließlich GZT-Kombinationen generiert. Deshalb wurde auf diese automatische Normenänderung verzichtet und für die Beispielberechnungen eine manuelle Umstellung vorgenommen, wobei anschließend auch Lastkategorien teilweise erneut manuell korrigiert werden mussten. Diese Punkte zeigen, dass die Nutzbarkeit des Clients derzeit noch vergleichsweise stark an die konkret verwendete Softwareumgebung gebunden ist.

Schließlich ist auch der Umfang der derzeit implementierten Lastdefinitionen als begrenzt anzusehen. Zwar lassen sich mit dem Client bereits Gleichstreckenlasten, Einzellasten und bestimmte Trapezlasten abbilden, darüber hinausgehende Lastfälle oder komplexere Belastungssituationen sind jedoch bislang nicht in gleicher Weise integriert. Dies beschränkt die unmittelbare Anwendbarkeit des Clients für Sonderfälle und komplexere praktische Aufgabenstellungen.

Insgesamt zeigen diese Punkte, dass der entwickelte Python-Client bereits eine funktionsfähige und in weiten Teilen belastbare Grundlage für die automatisierte Modellgenerierung von HBV-Stabwerksmodellen darstellt, seine aktuelle Anwendung jedoch bewusst innerhalb der gegebenen Modell- und Softwaregrenzen erfolgen muss. Die identifizierten Einschränkungen relativieren die Leistungsfähigkeit des Werkzeugs nicht grundsätzlich, machen jedoch deutlich, dass die Ergebnisse insbesondere bei komplexeren Systemen, erweiterten Materialannahmen und zeitabhängigen Effekten kritisch einzuordnen sind. Zugleich liefern diese Grenzen konkrete Ansatzpunkte für die weitere Entwicklung des Clients.

5.3 Nutzen der Automatisierung

Ein wesentlicher Mehrwert des entwickelten Python-Clients liegt in der Automatisierung der Modellbildung für Holz-Beton-Verbundsysteme in RFEM. Während bei einer rein manuellen Erstellung eines Stabwerksmodells sämtliche Knoten, Stäbe, Exzentrizitäten, Gelenke, Verbindungsmittel und Lasten einzeln angelegt und kontrolliert werden müssten, erlaubt der entwickelte Client eine systematische Überführung der Benutzereingaben in ein konsistentes Berechnungsmodell. Dadurch ergibt sich insbesondere bei umfangreicheren oder mehrfach zu untersuchenden Systemen ein deutlicher praktischer Nutzen.

Der erste wesentliche Vorteil besteht in der **Zeitersparnis**. Die manuelle Modellierung eines HBV-Stabwerksmodells ist aufgrund der Vielzahl wiederkehrender Elemente mit einem hohen Aufwand verbunden. Dies gilt besonders bei Mehrfeldsystemen oder bei Systemen mit eng angeordneten Verbindungsmitteln, da hier eine große Anzahl von Modellobjekten erzeugt und korrekt miteinander verknüpft werden muss. Durch die automatisierte Erzeugung des RFEM-Modells entfällt ein Großteil dieser repetitiven Arbeitsschritte. Insbesondere bei Variantenuntersuchungen, parametrischen Studien oder der wiederholten Anpassung einzelner Eingangsparameter kann der Modellierungsaufwand dadurch erheblich reduziert werden.

Ein weiterer wichtiger Nutzen liegt in der **Reduktion möglicher Eingabefehler**. Bei einer manuellen Modellbildung besteht stets die Gefahr, dass einzelne Knoten falsch gesetzt, Verbindungsmittel vergessen, Exzentrizitäten fehlerhaft definiert oder Lasten unvollständig zugeordnet werden. Solche Fehler sind in komplexeren Modellen häufig nur mit erheblichem Kontrollaufwand zu erkennen. Durch die standardisierte, regelbasierte Erzeugung des Modells werden diese Fehlerquellen deutlich reduziert. Die Eingaben werden nach einer einheitlichen Logik in das Berechnungsmodell übertragen, wodurch die Konsistenz der Modellbildung verbessert wird.

Damit eng verbunden ist die **Reproduzierbarkeit der Ergebnisse**. Gleiche Eingabedaten führen im entwickelten Client stets zum gleichen Modellaufbau. Dies ist insbesondere im wissenschaftlichen Kontext von Bedeutung, da Modellannahmen und Berechnungsergebnisse nachvollziehbar und wiederholbar bleiben. Die automatisierte Modellbildung schafft damit eine einheitliche Grundlage für Vergleiche zwischen verschiedenen Systemvarianten und unterstützt eine transparente Dokumentation des Vorgehens. Gerade für Validierungs- und Vergleichsuntersuchungen ist dies ein wesentlicher Vorteil gegenüber einer ausschließlich manuell aufgebauten Modellierung.

Darüber hinaus trägt die Automatisierung zur **Standardisierung der Modellbildung** bei. Durch die feste Logik der Modellerstellung wird sichergestellt, dass gleiche Modellierungsprinzipien auch bei unterschiedlichen Systemen konsistent angewendet werden. Dies erleichtert nicht nur die Auswertung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, sondern erhöht auch die Nachvollziehbarkeit des gesamten Berechnungsprozesses. Der Client übernimmt damit nicht nur eine technische Hilfsfunktion, sondern wirkt zugleich strukturierend auf den Modellierungsablauf.

Ein besonderer praktischer Nutzen des entwickelten Ansatzes besteht außerdem darin, dass die Automatisierung nicht in einer bloßen Ergebnisberechnung endet, sondern in der Erzeugung eines **weiter nutzbaren RFEM-Stabwerksmodells**. Der Anwender erhält also nicht nur eine einmalige Auswertung, sondern ein vollständiges Berechnungsmodell, das anschließend für zusätzliche Untersuchungen weiterverwendet werden kann. Auf dieser Grundlage können beispielsweise Laststellungen variiert, weitere Auswertungen durchgeführt oder ergänzende AddOns von RFEM genutzt werden. Gerade dieser Aspekt erweitert den Nutzen des Clients deutlich über eine reine Vorbemessung oder Einzelfallberechnung hinaus.

Im Vergleich zu vereinfachten klassischen Berechnungsverfahren ergibt sich daraus ein zusätzlicher Vorteil. Während Verfahren wie das γ -Verfahren nur für bestimmte Randbedingungen und stark idealisierte Lastansätze geeignet sind, ermöglicht das automatisch erzeugte Stabwerksmodell eine deutlich **flexiblere Untersuchung des Tragverhaltens**. So können beispielsweise Einzellasten explizit berücksichtigt und weiterführende Materialannahmen im erzeugten RFEM-Modell untersucht werden. Die Automatisierung verbindet damit die Effizienz einer standardisierten Modellerzeugung mit den erweiterten Untersuchungsmöglichkeiten eines numerischen Stabwerksmodells.

Insgesamt liegt der Nutzen der Automatisierung somit nicht allein in einer schnelleren Modellerstellung, sondern in der Kombination aus Zeitersparnis, Fehlerreduktion, Reproduzierbarkeit und weiterführender Nutzbarkeit des erzeugten Modells. Gerade für systematische Untersuchungen, Vorbemessungen und Variantenstudien stellt der entwickelte Python-Client damit ein praxisrelevantes Werkzeug dar, das die Modellbildung in RFEM deutlich effizienter und nachvollziehbarer machen kann.

5.4 Verbesserungsmöglichkeiten

Aus den Ergebnissen der Validierung sowie den im Entwicklungsprozess erkennbaren Einschränkungen ergeben sich mehrere Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung des Python-Clients. Dabei zeigt sich, dass das grundlegende Konzept der automatisierten Modellgenerierung belastbar ist, der aktuelle Entwicklungsstand jedoch in mehreren Bereichen noch ausgebaut werden kann, um die Anwendbarkeit, Robustheit und fachliche Aussagekraft des Werkzeugs weiter zu erhöhen.

Ein wesentlicher Ansatzpunkt liegt in der **flexibleren Definition der Verbindungsmittelanordnung**. Die aktuelle Eingabelogik erlaubt bereits eine feldweise Unterteilung in Bereiche, reicht jedoch für eine freie und praxisnahe Anordnung der Verbindungsmittel noch nicht vollständig aus. Künftig wäre eine Erweiterung sinnvoll, bei der innerhalb eines Feldes eine größere Zahl frei definierbarer Abschnitte zugelassen wird. Ebenso wäre eine Option für eine vollständig konstante Verbindungsmittelanordnung über das gesamte Feld zweckmäßig. Zusätzlich sollte die Anordnung feldweise differenziert steuerbar sein und auch die Randabstände zu den Auflagern gezielt vorgegeben werden können. Eine solche Erweiterung würde die Modellbildung näher an reale Bemessungs- und Konstruktionssituationen heranführen und zugleich die in den Validierungsbeispielen erkennbaren Abweichungen infolge angenäherter Verbindungsmittelabstände reduzieren.

Auch die **Nachweisführung** birgt erhebliches Erweiterungspotenzial. Im vorliegenden Entwicklungsstand liefert der Client in erster Linie ein berechnungsfähiges Ausgangsmodell, auf dessen Grundlage Nachweise geführt werden können. Für eine höhere praktische Anwendbarkeit wäre es künftig sinnvoll, die Ableitung und Aufbereitung maßgebender Bemessungsgrößen systematischer in den Workflow zu integrieren. Denkbar wäre insbesondere eine weitergehende Unterstützung bei der Auswertung von Schnittgrößen für Holz, Beton und Verbindungsmittel sowie eine verbesserte Übergabe an nachfolgende Nachweisprozesse. Auch eine bessere Unterstützung der Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, insbesondere unter Berücksichtigung unterschiedlicher Steifigkeitsannahmen, würde den Nutzen des Clients erhöhen.

Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt betrifft die **Materialmodellierung**. Die Zusatzuntersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere bei Mehrfeldsystemen nichtlineare Materialeffekte des Betons einen relevanten Einfluss auf das Tragverhalten haben können. Künftig wäre daher eine stärkere Einbindung nichtlinearer Materialmodelle sinnvoll, etwa durch vorbereitete Modelloptionen oder durch eine gezielte Vorkonfiguration entsprechender Materialansätze im erzeugten RFEM-Modell. Gleiches gilt für zeitabhängige Effekte wie Schwinden und Kriechen, die derzeit noch nicht automatisiert berücksichtigt werden. Eine integrierte Behandlung dieser Einflüsse würde die Aussagekraft des erzeugten Modells insbesondere für weiterführende Bemessungen und realitätsnähere Untersuchungen deutlich erhöhen.

Schließlich erscheint auch eine **Weiterentwicklung der Benutzeroberfläche** sinnvoll. Der derzeitige Ansatz über parametrische Eingaben ist für die Entwicklung und wissenschaftliche Anwendung zweckmäßig, könnte für eine breitere Nutzung jedoch durch Verbesserungen in der Usability ergänzt werden. Dadurch ließe sich die Bedienbarkeit des Clients weiter verbessern und die Einstiegshürde für andere Nutzer senken.

Insgesamt zeigen diese Punkte, dass die wesentlichen Verbesserungsmöglichkeiten weniger im grundlegenden Konzept als vielmehr in dessen fachlicher Vertiefung und technischer Verfeinerung liegen. Der entwickelte Python-Client stellt bereits jetzt eine funktionsfähige Grundlage für die automatisierte Modellgenerierung von HBV-Stabwerksmodellen dar. Durch die gezielte Weiterentwicklung der Modelllogik, der Verbindungsmittelanordnung, der Material- und Lastabbildung sowie der Benutzerführung kann daraus jedoch ein noch leistungsfähigeres und breiter einsetzbares Werkzeug entstehen.

6. Fazit und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines Python-basierten Clients zur automatisierten Erzeugung von Stabwerksmodellen für Holz–Beton-Verbundsysteme in RFEM 6 über die Dlubal-API. Ausgangspunkt war der hohe Aufwand, der mit der manuellen Modellierung numerischer HBV-Systeme verbunden ist. Der entwickelte Client sollte diesen Prozess vereinfachen und eine Grundlage schaffen, um auch komplexere Systeme und Laststellungen effizient untersuchen zu können.

Zu diesem Zweck wurden zunächst die theoretischen Grundlagen der Holz–Beton-Verbundbauweise sowie die relevanten Berechnungsverfahren erläutert und miteinander verglichen. Dabei zeigte sich, dass insbesondere das Stabwerksmodell nach Rautenstrauch gegenüber vereinfachten Verfahren Vorteile bietet, wenn variable Verbindungsmittelanordnungen, Einzellasten oder weiterführende numerische Untersuchungen betrachtet werden sollen. Ergänzend wurde der entwickelte Ansatz in den Stand bestehender Berechnungstools eingeordnet.

Im Rahmen der Implementierung wurde ein modular aufgebauter Python-Client entwickelt, der Benutzereingaben zu Geometrie, Materialien, Verbindungsmitteln und Lasten automatisiert in ein RFEM-Stabwerksmodell überführt. Dadurch konnte ein Workflow geschaffen werden, mit dem berechnungsfähige Modelle ohne vollständige manuelle Eingabe in RFEM erzeugt werden können.

Bei der Validierung anhand des Einfeldsystems wurde eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzbeispiel erreicht. Beim Mehrfeldsystem ergaben sich ebenfalls insgesamt plausible Ergebnisse, jedoch mit größeren lokalen Abweichungen und einer höheren Sensitivität gegenüber Modellierungsdetails. Ergänzende Untersuchungen zu Einzellasten und zum nichtlinearen Betonverhalten verdeutlichten darüber hinaus, dass das erzeugte Stabwerksmodell auch für weiterführende Untersuchungen geeignet ist und gegenüber vereinfachten Verfahren einen erweiterten Anwendungsbereich bietet.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Python-Client eine belastbare Grundlage für die automatisierte Modellgenerierung von HBV-Stabwerksmodellen darstellt. Seine besondere Stärke liegt in der Erzeugung eines weiterbearbeitbaren RFEM-Modells, das nicht nur zur Berechnung, sondern auch für zusätzliche Variantenstudien und weiterführende Analysen genutzt werden kann. Gleichzeitig wurden Grenzen des aktuellen Entwicklungsstands sichtbar, die insbesondere die Modellierung komplexerer Systeme und die vollständige Automatisierung betreffen.

6.2 Fazit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, einen Python-basierten Client zur automatisierten Erzeugung von Stabwerksmodellen für Holz-Beton-Verbundsysteme in RFEM 6 zu entwickeln und dessen grundsätzliche Funktionsfähigkeit zu überprüfen, wurde insgesamt erreicht. Es konnte gezeigt werden, dass sich auf Basis benutzerdefinierter Eingaben konsistente und berechnungsfähige RFEM-Modelle erzeugen lassen, welche das Tragverhalten von HBV-Systemen in wesentlichen Punkten plausibel abbilden. Damit wurde ein Ansatz geschaffen, der die manuelle Modellierung deutlich vereinfacht und zugleich die Vorteile numerischer Stabwerksmodelle für die Untersuchung solcher Systeme nutzbar macht.

Besonders überzeugend ist der entwickelte Client bei einfacheren Systemen, wie dem untersuchten Einfeldträger. Hier konnte eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzbeispiel erzielt werden, sowohl hinsichtlich der Schnittgrößen als auch der Verformungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die automatisierte Modellbildung in diesen Fällen zuverlässig funktioniert und eine belastbare Grundlage für weiterführende Nachweise liefern kann. Auch der grundsätzliche Nutzen des entwickelten Ansatzes wurde deutlich, da der Benutzer nicht nur eine Berechnungsausgabe erhält, sondern ein weiterarbeitbares RFEM-Modell, das für zusätzliche Untersuchungen, Variantenstudien und ergänzende Auswertungen genutzt werden kann.

Gleichzeitig hat die Arbeit gezeigt, dass die Aussagekraft des Clients bei komplexeren Tragstrukturen differenzierter zu bewerten ist. Beim Mehrfeldsystem konnten zwar die globalen Tragwerksreaktionen insgesamt plausibel abgebildet werden, jedoch traten größere lokale Abweichungen und eine erhöhte Sensitivität gegenüber Modellierungsdetails auf. Im Rahmen der Auswertung wurde zudem ein lokaler Modellierungsfehler in der automatisierten Knotengenerierung identifiziert, der den bestehenden Weiterentwicklungsbedarf des Clients zusätzlich verdeutlicht. Hinzu kommen Einschränkungen in der aktuellen Eingabelogik, insbesondere bei der Verbindungsmittelanordnung, sowie technische Begrenzungen infolge der verwendeten API-Version und einzelner nicht vollständig automatisierbarer Arbeitsschritte. Der entwickelte Client ist daher nicht als vollständig abgeschlossene Bemessungslösung zu verstehen, sondern als funktionsfähiges und belastbares Werkzeug zur automatisierten Modellgenerierung mit klarem praktischem Nutzen, dessen Ergebnisse bei komplexeren Anwendungsfällen jedoch kritisch eingeordnet werden müssen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass mit der vorliegenden Arbeit ein tragfähiger und sinnvoller Beitrag zur Automatisierung der Modellbildung von HBV-Stabwerksmodellen geleistet wurde. Der entwickelte Client zeigt bereits im aktuellen Stand, dass die automatisierte Generierung solcher Modelle technisch umsetzbar und fachlich nutzbar ist. Damit wurde das Ziel der Arbeit nicht nur formal erreicht, sondern auch in einer Form umgesetzt, die eine praktikable Grundlage für weitere Entwicklungen und Anwendungen bietet.

6.3 Ausblick

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ergeben sich mehrere sinnvolle Entwicklungsperspektiven für den entwickelten Python-Client. Ein naheliegender nächster Schritt besteht in der weiteren technischen und fachlichen Verfeinerung des aktuellen Entwicklungsstands. Dazu zählen insbesondere eine robustere Modellierung komplexerer Systeme, eine flexiblere Definition der Verbindungsmittelanordnung sowie die weitere Reduzierung noch erforderlicher manueller Eingriffe im Arbeitsablauf. Gerade im Hinblick auf Mehrfeldsysteme und lokale Modellierungsdetails bietet der Client noch Potenzial für eine gezielte Weiterentwicklung.

Ein weiterer Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten kann in der Erweiterung der Nachweisführung liegen. Während im Rahmen dieser Arbeit bereits gezeigt werden konnte, dass die erzeugten Modelle eine belastbare Grundlage für weiterführende Bemessungen bilden, wäre eine stärkere Integration zusätzlicher Nachweise in den automatisierten Workflow ein wesentlicher Schritt hin zu einer breiteren praktischen Nutzbarkeit. Dies betrifft sowohl eine systematischere Aufbereitung maßgebender Bemessungsgrößen als auch die bessere Unterstützung von Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und unter Berücksichtigung weiterer Bemessungszeitpunkte.

Darüber hinaus erscheint die stärkere Einbindung nichtlinearer Materialansätze als besonders vielversprechend. Die in der Arbeit durchgeführte Zusatzuntersuchung hat gezeigt, dass nichtlineare Effekte des Betons bei statisch unbestimmten HBV-Systemen einen relevanten Einfluss auf das Tragverhalten haben können. Eine zukünftige Erweiterung des Clients um vorbereitete oder automatisiert zuweisbare nichtlineare Materialmodelle könnte daher einen wichtigen Beitrag zu realitätsnäheren numerischen Untersuchungen leisten. Gleiches gilt für zeitabhängige Einflüsse wie Schwinden und Kriechen, deren automatisierte Berücksichtigung die Aussagekraft der erzeugten Modelle deutlich erhöhen würde.

Langfristig bietet der entwickelte Ansatz sowohl für die Praxis als auch für die Forschung interessante Anwendungsmöglichkeiten. In der Planungspraxis könnte ein weiterentwickelter Client insbesondere für Voruntersuchungen, Variantenstudien und die effiziente Erstellung numerischer Ausgangsmodelle genutzt werden. In der Forschung eröffnet die automatisierte Modellbildung die Möglichkeit, Parameterstudien an HBV-Systemen mit reduziertem Modellierungsaufwand systematisch durchzuführen und so den Einfluss unterschiedlicher Geometrien, Laststellungen, Verbindungsmittelanordnungen oder Materialannahmen gezielt zu untersuchen.

Insgesamt zeigt sich damit, dass der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Python-Client nicht nur als Einzelanwendung zu verstehen ist, sondern als Grundlage für eine weiterführende Entwicklung hin zu einem leistungsfähigen Werkzeug für die automatisierte Modellierung und Untersuchung von Holz-Beton-Verbundsystemen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] S. Piccolin, "Tragkonstruktion". Schweiz Patent 223498, 1942.
- [2] O. Schaub, "Verbunddecke aus Holzrippen und Betonplatte". Deutschland Patent 673556, 1939.
- [3] *DIN CEN/TS 19103:2022-02. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung CEN/TS 19103:2021.*
- [4] M. Sieder, J. Schänzlin, C. Kaluza and S. Krug, "Durchlaufwirkung von HBV-Decken," Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR), 2025.
- [5] S. Winter and M. Peter, *Holzbau-Taschenbuch Grundlagen*, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2021.
- [6] J. Schänzlin, "Eurocode 5:2022 - Zur Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken," *KIT Karlsruher Tage 2018 Holzbau - Forschung für die Praxis*, pp. 85-103, 2018.
- [7] S. Winter, H. Kreuzinger and P. Mestek, "Teilprojekt 15 - Flächen aus Brettstapeln, Brettsper Holz und Verbundkonstruktionen," *Holzbau der Zukunft*, vol. 7/15, 2008.
- [8] H. Wieland, "Holz-Beton-Verbundsysteme," in *Holz-Beton-Verbund - Innovationen im Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*, Berlin, Bauwerk Verlag GmbH, 2004.
- [9] S. Hölzl, *Masterarbeit - Wirtschaftliche Betrachtung von Holz-Beton-Verbunddecken*, TU Graz, 2014.
- [10] *DIN prEN 1995-1-1 Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, 2023.
- [11] J. Schänzlin, "Eurocode 5:2022 – Zur Bemessung von Holz–Beton-Verbunddecken," in *Tagungsband Karlsruher Tage 2018 – Holzbau - Forschung für die Praxis*, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 2018, pp. 85-104.
- [12] DIBt, "Holz-Beton-Verbundsysteme," [Online]. Available: <https://www.dibt.de/de/bauprodukte/informationsportal-bauprodukte-und-bauarten/produktgruppen/bauprodukte-detail/bauprodukt/holz-beton-verbundsysteme>. [Accessed 27 12 2025].
- [13] A. Ibrahimaj, *Diplomarbeit - Holz-Beton-Verbunddecken - Baustatische Modellbildung und Empfehlungen für die Bemessungspraxis*, TU Wien, 2021.
- [14] H. Braun, W. Schaal and F. Schneck, "Der Brettstapel als Verbundelement - Vorschlag für einen Berechnungsansatz," *Bautechnik* 75, pp. 539-547, 1998 (8).
- [15] K. Rautenstrauch, "Entwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise," in *Holz–Beton-Verbund - Innovationen im Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*, Berlin, Bauwerk Verlag GmbH, 2004, pp. 1-22.
- [16] F. Böttinger, *Bachelorarbeit - Nachgiebiger Verbund - Möglichkeiten der Modellierung*, Hochschule Coburg, 2021.

- [17] S. Eller, *Masterarbeit - Numerische Modellierung von Holz-Beton-Verbunddecken*, Universität Innsbruck, 2024.
- [18] *DIN CEN/TS 19103/NA - Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*.
- [19] K. Holschemacher, F. Dehn, T. Müller and F. Lobisch, "Grundlagen des Faserbetons," in *Betonkalender 2017*, Berlin, Ernst & Sohn, 2017, pp. 381-472.
- [20] J. Schänzlin and A. Dias, "Design of timber-concrete-composite structures," in *ICTB 2021 Plus - 4th International Conference on Timber Bridges*, Biel/Bienne, Schweiz, 2021.
- [21] M. S. J. Sieder, "Bemessung von HBV-Decken nach DIN CEN/TS 19103 und Erweiterung für durchlaufende Systeme," *Bautechnik 102, Sonderheft Holzbau*, pp. 31-40, 2025.
- [22] F. Eggert, *Einfluss der Verdübelung auf das Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit und ohne Profilblech*, Universität Stuttgart, 2019.
- [23] H. Neuhaus, *Ingenieurholzbau*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [24] T. Pyttel and B. Pyttel, *Technische Mechanik - Erweiterte Formelsammlung*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024.
- [25] J. Hausleitner, *Masterarbeit - Nachgiebig verbundene Querschnitte im Holzbau: Ein Vergleich des Schubanalogieverfahren mit dem γ -Verfahren*, TH Deggendorf, 2020.
- [26] S. Gössner, "Querkraftschub," 2006. [Online]. Available: <https://goessner.net/learn/tm/skripte/elastostatik/schub/index.html>. [Accessed 08 02 2026].
- [27] M. Absenger, *Systemberechnung von Verbundbrücken mit nachgiebiger Verbundfuge mit dem "Zweistab-Modell"*, Graz: TU Graz, 2014.
- [28] Dlubal Software DE, "Modellierung einer Holz-Beton-Verbunddecke," 16 09 2019. [Online]. Available: <https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/faq/003589>. [Accessed 13 02 2026].
- [29] S. Cuerrier-Auclair, A. Salenikovich and T. Tannert, "Design Guide for Timber-Concrete Composite Floors in Canada," FPIInnovations, Kanada, 2020.
- [30] M. Rey, *Masterarbeit - Zur Berechnung von HBV-Decken mit Stabwerkmodellen*, Hochschule Luzern, 2021.
- [31] J. Schänzlin, G. Bosch and P. Hamm, *Ausblick auf die zukünftige Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken - VPI-Arbeitstagung*, Baden-Baden: Hochschule Biberach - Fakultät Bauingenieurwesen - Institut für Holzbau, 2017.
- [32] J. Schänzlin, "Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken," Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003.
- [33] W. Seim, *Ingenieurholzbau - Vertiefung: Tragwerke und Berechnungsmethoden*, Berlin: Ernst & Sohn, 2022.

- [34] K. Möhler, *Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengesetzten Querschnitten und nachgiebig verbundenen Verbindungsmitteln*, Habilitation - TH Karlsruhe, 1956.
- [35] U. Kuhlmann and J. Schänzlin, "Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken nach DIN und Euronormen," in *Holz-Beton-Verbund - Innovationen im Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*, Berlin, Bauwerk Verlag GmbH, 2004, pp. 55-91.
- [36] H. Kreuzinger, "Die Holz-Beton-Verbundbauweise," *Fachtagungen Holzbau - Informationsdienst Holz*, pp. 70-83, 1999-2000.
- [37] A. Dias, J. Schänzlin and P. Dietsch, "Design of timber-concrete composite structures," Shaker Verlag GmbH, Germany, 2018.
- [38] H. J. Blaß and C. Sandhaas, *Ingenieurholzbau - Grundlagen der Bemessung*, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2016.
- [39] K. Rautenstrauch, M. Grosse, S. Lehmann and R. Hartnack, "Modellierung und baupraktische Bemessung von Holz-Verbund-Decken mit mineralischen Deckschichten unter Berücksichtigung neuartiger Verbindungsmittel," in *Holz-Beton-Verbund - Innovationen im Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*, Berlin, Bauwerk Verlag GmbH, 2004, pp. 31-54.
- [40] M. Grosse, R. Hartnack and K. Rautenstrauch, "Modellierung von diskontinuierlich verbundenen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen - Teil 2: Langzeittragverhalten," *Bautechnik 80 Heft 10*, pp. 693-701, 2003.
- [41] M. Grosse, R. Hartnack, S. Lehmann and K. Rautenstrauch, "Modellierung von diskontinuierlich verbundenen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen - Teil 1: Kurzzeittragverhalten," *Bautechnik 80, Heft 8*, pp. 534-540, 2003.
- [42] Ingenieurbüro Miebach, "Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e.V.," 2018. [Online]. Available: https://holzbrueckenbau.com/wp-content/uploads/2018/04/Erfahrungen_Perspektiven_HBV_Br%C3%BCcken.pdf. [Accessed 2026 03 07].
- [43] M. Kaliske, W. Schneider and J. Schmidt, "Modelle nichtlinearer Finite Elemente Berechnungen für HBV-Konstruktionen," in *Holz-Beton-Verbund - Innovationen im Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*, Berlin, Bauwerk Verlag GmbH, 2004, pp. 213-234.
- [44] Dlubal Software GmbH, "Quick Start," [Online]. Available: https://apidocs.dlubal.com/quick_start.html. [Accessed 21 03 2026].
- [45] DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik, "Europäische Technische Bewertung - ETA-13/0699," 2022.
- [46] M. Keuser and M. Meinhardt, "Nichtlineare Berechnung von Stahlbetontragwerken mithilfe der Finite-Elemente-Methode," in *BetonKalender 2018 - Bautenschutz, Brandschutz*, Berlin, Wilherlm Ernst & Sohn, 2018, pp. 304-354.

8. Verwendung von KI-Werkzeugen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde künstliche Intelligenz ausschließlich unterstützend bei der Entwicklung des Python-Programms eingesetzt. Verwendet wurden hierbei ChatGPT von OpenAI insbesondere die Modelle GPT 5.1 Instant und GPT 5.3 Instant. Der Einsatz erfolgte im Zeitraum von Januar bis einschließlich März 2026.

Die Nutzung beschränkte sich im Wesentlichen auf die Korrektur, Überprüfung und Diskussion einzelner Codeabschnitte im Zuge der Programmentwicklung sowie auf Hilfestellungen bei der Erstellung von Dateien für das Setup und den Programmstart. KI wurde insbesondere dann eingesetzt, wenn bereits eigenständig erstellter Code auf Fehler, Unklarheiten oder Verbesserungsmöglichkeiten überprüft werden sollte. Die fachliche Konzeption, die Implementierung der Programmlogik, die Auswahl der Modellierungsansätze, die Validierung des entwickelten Clients sowie die Ergebnisbewertung und die finale Auswahl und Ausarbeitung der Lösungen erfolgten eigenständig durch den Verfasser.

Für die schriftliche Ausarbeitung der Bachelorarbeit wurde keine künstliche Intelligenz verwendet. Dies betrifft insbesondere die inhaltliche Konzeption der Arbeit, die fachlichen Erläuterungen, die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse, deren Beurteilung sowie die Schlussfolgerungen. Auch die Auswahl der verwendeten Quellen erfolgte eigenständig.

KI-generierte oder KI-unterstützt vorgeschlagene Codebestandteile wurden nicht ungeprüft übernommen. Sämtliche übernommenen Ansätze wurden kritisch auf ihre Eignung überprüft. Die Kontrolle erfolgte vor Allem durch das Testen des entwickelten Clients auf Funktionalität und Plausibilität. Ergänzend wurden die vorgeschlagenen Inhalte mithilfe der Eingabeunterstützung in der benutzten Entwicklungsumgebung Visual Studio Code nachvollzogen und überprüft. Die Verantwortung für Auswahl, Anpassung, Integration und endgültige Verwendung aller Codebestandteile lag vollständig beim Verfasser.

Zur transparenten Einordnung wird festgehalten, dass künstliche Intelligenz in dieser Arbeit nicht zur Erstellung wissenschaftlicher Argumentationen, nicht zur eigenständigen Formulierung fachlicher Kapitelinhalte und nicht zur Bewertung der Untersuchungsergebnisse eingesetzt wurde. Der Einsatz diente ausschließlich als technisches Hilfsmittel im Sinne einer unterstützenden Qualitätssicherung bei der Programmierung.

In Anlehnung an die Grundsätze der Eigenständigkeit wird erklärt, dass die vorliegende Arbeit eigenständig erstellt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet wurden. Soweit im Rahmen der Programmentwicklung KI-gestützte Werkzeuge genutzt wurden, beschränkte sich dies auf die oben dargestellten unterstützenden Funktionen. Übernommene Inhalte wurden kritisch geprüft und in eigener Verantwortung weiterverarbeitet.

9. Digitale Anlagen

9.1 RFEM-Modelle der Validierungsbeispiele

Beigefügt sind die RFEM-Modelle der in Kapitel 4 untersuchten Validierungsbeispiele zum Einfeld- und Mehrfeldsystem. Sie dienen der Nachvollziehbarkeit der automatisch erzeugten Stabwerksmodelle.

9.2 Nachweisunterlagen der Vergleichsberechnungen in HBV 6

Diese Anlage umfasst die verwendeten Ausdrücke der Vergleichsberechnungen aus HBV 6 für das Mehrfeldsystem. Die Unterlagen dienen als Grundlage für die in Kapitel 4 durchgeführten Ergebnisvergleiche.

9.3 Quellcode des entwickelten Python-Clients

Beigefügt ist der Quellcode des im Rahmen der Arbeit entwickelten Python-Clients. Dieser umfasst die Dateien zur Benutzereingabe und zur automatisierten Modellgenerierung über die Dlubal-API.

9.4 Programmdateien und Hinweise zur Ausführung

Zusätzlich werden die zum Start und zur Einrichtung des Programms erforderlichen Dateien sowie eine kurze Ausführungsanleitung bereitgestellt. Diese Unterlagen dienen der praktischen Nachnutzung des entwickelten Clients.

Erklärung

Name Studierende/r:

Prüfer/in an der Hochschule:

Falls extern, Name Betreuer/in:

Thema der Bachelorarbeit (deutsch/englisch):

1. Ich erkläre hiermit, dass ich die Bachelorarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Deggendorf,

(Datum)

(Unterschrift Studierende/r)

2. Ich bin damit einverstanden, dass die von mir angefertigte Bachelorarbeit über die Bibliothek der THD einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Ja

Nein

Falls Ja:

Ich erkläre und stehe dafür ein, dass ich alleiniger Inhaber aller Rechte an der Bachelorarbeit, einschließlich des Verfügungsrechts über Vorlagen an beigefügten Abbildungen, Plänen o.ä. bin und durch deren öffentliche Zugänglichmachung weder Rechte und Ansprüche Dritter noch gesetzliche Bestimmungen verletzt werden.

Deggendorf,

(Datum)

(Unterschrift Studierende/r)

Nur bei Einverständnis des Verfassers mit einer Veröffentlichung der Bachelorarbeit vom Prüfer auszufüllen:

Eine Aufnahme eines Exemplars der Bachelorarbeit in den Bestand der Bibliothek und die Ausleihe des Exemplars wird

befürwortet

nicht befürwortet.

Deggendorf,

(Datum)

(Unterschrift Prüfer/in)