

D I P L O M A R B E I T

M A S T E R T H E S I S

Baustatische Modellbildung im Fertighausbau

Optimierung bestehender Strukturen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Georg Hochreiner

E 202

Institut für Mechanik
der Werkstoffe und Strukturen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Wilhelm Franz Gunzer

Matr.Nr.: 0825096

Leopoldauer Straße 151a/Stiege 2/15
A - 1210 Wien

Wien, September 2017

(Wilhelm Franz Gunzer)

Vorwort

...bis hier her ist es ein extrem langer, ruppiger aber auch sehr aufregender, spannender und interessanter Weg gewesen.

Auf diesem Weg gab bzw. gibt es zahlreiche Personen, die einen prägen, unterstützen und hilfreich unter die Arme greifen. Sei es die Familie, Freunde, Schul- und Studienkollegen oder auch die zahlreichen Lehrer, Studienassistenten und Professoren die einen ein Stück auf diesem Weg begleiten. Es gibt unter diesen vielen Personen einige Menschen, die etwas mehr hervorstechen als all die anderen und die ich im Rahmen meiner Diplomarbeit ein bisschen hervorheben möchte. Besonders danken möchte ich...

... meinem Bruder Franz und Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Hochreiner, die mich auf dieses Thema aufmerksam gemacht haben, auf deren Expertisen ich mich verlassen und zu jeder Zeit ein offenes Ohr zu jedweder Frage erwarten konnte.

... der Firma Griffnerhaus GmbH, unter der Leitung von Hr. Mag. Georg C. Niedersüss, die mich bei diesem spannenden Thema bereitwillig unterstützten und die dafür nötigen Unterlagen zur Verfügung gestellt haben.

... Sabine und Andi, die mir das Zeitfenster zum Beenden meines Studiums so lange wie möglich offen gehalten haben.

... meiner Familie und vor allem meinen Eltern, die ihr eigenes Leben all zu oft hinten angestellt haben, um mir und meinen Geschwistern die bestmögliche Zukunft zu ermöglichen.

... zum Schluss gilt aber mein größter Dank meiner ehrgeizigen und äußerst geduldsamen Freundin Anna. Ihr ist es unter größtem Einsatz gelungen, mich am Weg zu halten und ans Ende meines Studiums zu führen. Ich kann mich sehr glücklich schätzen so einer einzigartigen Person über den Weg gelaufen zu sein.

Mit dieser Diplomarbeit beschließe ich somit mein Studium. Ich werde aber mit offenen Augen und vor allem mit sehr viel Neugier und Wissensdurst neue Wege beschreiten. Auf diesen Wegen kann ich nur hoffen, dass ich dem einen oder anderen genau so viel Hilfsbereitschaft und Unterstützung entgegen bringen kann, wie es mir bis jetzt widerfahren ist.

Kurzfassung

In Österreich wurden im Jahr 2015 rund 4.370 Einfamilienhäuser in Fertigbauweise errichtet. Davon entfallen 2.443 Fertighäuser auf die Mitglieder des österreichischen Fertighausverbandes, was einen Anteil von 57,8 Prozent darstellt.^a Die Firma GRIFFNER Fertighaus GmbH ist Mitglied des österreichischen Fertighausverbandes und produzierte im Jahr 2015 rund 80 Häuser.^b Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde im Zusammenarbeit mit GRIFFNER ein Teil der Statik eines Fertighauses näher betrachtet.

Anhand unterschiedlicher Strategien baustatischer Modellbildung wird vorab eine möglichst einfache, zeitsparende und realitätsnahe Vorgehensweise zur späteren Modellierung von Decken- und Wandscheiben untersucht. Mit Umsetzung der Erkenntnisse auf die reale 3D-Teilstruktur des GRIFFNER Fertighauses wird die Anwendbarkeit der Vorgehensweise demonstriert und die Auswirkungen bei Vernachlässigung bestimmter Parameter gezeigt.

Durch die dreidimensionale baustatische Modellbildung soll eine wirklichkeitsnahe Lastabtragung ins Fundament, ausgelöst durch die einwirkende Belastung, aufgezeigt werden. Darüber hinaus können viele Vorgänge, welche bei einer zweidimensionalen Eingabe händisch vorgenommen werden müssten, automatisch in der 3D-Struktur berücksichtigt werden. Beispielsweise können Auswirkungen, welche sich durch Änderungen in der Belastung (oder in der Gebäudestruktur) ergeben, sofort für alle Bauteile des Gebäudes automatisch ermittelt und visualisiert werden.

^asiehe auch [Österreichischer Fertighausverband (2016)]

^bsiehe auch [Griffner (Homepage, 2016)]

Abstract

In 2015 approximately 4.370 pre-fabricated single family houses were built in Austria. Thereof 2.443 houses can be allocated to the Austrian Association of Prefabricated Housing, which represents a share of 57,8%.^a The company GRIFFNER Fertighaus GmbH is a member of the Austrian Association and produced approximately 80 buildings in 2015.^b In the course of this master thesis parts of the structure of a pre-fabricated house have been analyzed in collaboration with GRIFFNER.

As a first step, investigations are carried out on the basis of different structural modelling schemes to find a simple, time-saving and lifelike approach for the later modelling of ceiling and wall panels. Secondly, the applicability of the developed approach should be demonstrated by implementing the obtained knowledge on parts of the real 3D-structure of GRIFFNER. Moreover, certain effects are shown when neglecting several parameters.

With the help of a three-dimensional input of modelling data a lifelike transfer of loads to the foundation, caused by forces acting on the building, could be enabled. Further, many transactions, which have to be carried out by hand when using a two-dimensional input format, are automatically included in the 3D-structure. As an example, effects caused by changes in the load (or in the building structure) could be immediately determined for all building components in a mechanical way.

^asee also [Österreichischer Fertighausverband (2016)]

^bsee also [Griffner (Homepage, 2016)]

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	XI
1 Motivation	1
1.1 Aktuelles Baugeschehen	1
1.1.1 Überblick	1
1.1.2 Rahmenbauweise	2
1.2 Aktuelle Normenlage und Praxis statischer Nachweisführung bei Wand- und Deckenscheiben	6
1.3 Potential durch Nutzung moderner Werkzeuge wie Statiksoftware	8
1.4 Kurze Gliederung & Übersicht der Diplomarbeit	8
2 Strategien baustatischer Modellbildung	11
2.1 Zielsetzung unterschiedlicher Strategien baustatischer Vereinfachungen	11
2.2 Unterschiedliche Modellbildungsstrategien	11
2.3 Charakterisierung der Holzwerkstoffe	13
2.3.1 Motivation	13
2.3.2 Definition des orthotropen Werkstoffgesetzes im lokalen Faserkoordinatensystem	14
2.3.3 Transformation des lokalen Werkstoffgesetzes in das globale Flächenkoordinatensystem	16
2.3.4 Vorzeichendefinition der Scheiben- und Plattenschnittgrößen	18
2.3.5 Kopplung von Flächenschnittgrößen und Verzerrungen	19
2.3.6 Definition von Flächentragwerken	19
2.3.7 Orthotrope Einschichtplatte	21
2.3.8 Orthotrope Mehrschichtplatten	21
2.3.8.1 Berechnung nach der Laminattheorie	21
2.3.8.2 Berechnung nach der Bruttoquerschnittsmethode	24
2.3.8.3 Scheiben- und Plattensteifigkeit von Plattenwerkstoffen	24
2.3.9 Werkstoffeigenschaften von Balkenstäben aus scheibenartig beanspruchter Holzwerkstoffplatten	27
2.3.10 Werkstoffeigenschaften von Balkenstäben der Unterkonstruktion	29
2.3.11 Werkstoffeigenschaften von Starrstäben	30
2.4 Charakterisierung der Verbindungsmittel	30

2.4.1	Motivation	30
2.4.2	Aspekte der baustatischen Modellbildung	31
2.4.3	Aspekte der Steifigkeit	32
2.4.3.1	Verschiebungsmodul K_{ser}	34
2.4.3.2	Verschiebungsmodul K_u	35
2.4.4	Spezifikation der eingesetzten Verbindungsmitteltypen	35
2.4.5	Aspekte der Modellbildung und Bemessung	36
2.5	Kriterien für die Eignung der Modellierungsstrategien	37
2.6	Stufe 1: Einzelplatte	37
2.6.1	Grundsätzliches	37
2.6.2	Strategie 1	38
2.6.2.1	System 0: Schubkreuzmodell	38
2.6.2.2	System 1: Rahmenmodell	39
2.6.3	Strategie 2	48
2.6.4	Strategie 3 (Referenzmodell)	48
2.6.5	Lastfälle	49
2.6.6	Gegenüberstellung, Diskussion & Resümee der Ergebnisse	50
2.6.6.1	Ergebnismatrix	50
2.6.6.2	Diskussion der Ergebnisse	51
2.6.6.3	Resümee	53
2.7	Stufe 2: Plattenverbund aus mehreren Einzelplatten	54
2.7.1	Grundsätzliches	54
2.7.2	Konstruktionskomponenten	54
2.7.3	Konstruktionsvarianten	55
2.7.4	Lagerungsbedingungen und Lastfälle	57
2.7.5	Strategie 1	58
2.7.5.1	System 0: Schubkreuzmodell	58
2.7.5.2	System 1: Rahmenmodell	60
2.7.6	Strategie 2	61
2.7.7	Strategie 3 (Referenzmodell)	62
2.7.8	Gegenüberstellung, Diskussion & Resümee der Ergebnisse	63
2.7.8.1	Ergebnismatrix	63
2.7.8.2	Eignung von Strategie 1 & Analyse der Varianten	64
2.7.8.3	Bemessungsrelevante Schnittgrößen und Spannungen	68
2.7.8.4	Eignung von Strategie 2 für die baustat. Modellbildung	71
2.7.8.5	Resümee	73
3	Umsetzung der Erkenntnisse auf eine reale 3D-Struktur	75
3.1	Grundsätzliches	75
3.2	Baubeschreibung	75
3.2.1	GRIFFNER Fertigteilhaus	75
3.2.2	Konstruktionskomponenten	76

3.3	Baustatische Modellbildung	82
3.3.1	Ausführungsvarianten der Beplankung im Vergleich	82
3.3.2	Details zur baustatischen Modellbildung der Unterkonstruktion	84
3.4	Lastfälle	84
3.5	Gegenüberstellung, Diskussion & Resümee ausgewählter Ergebnisse	86
3.5.1	Ergebnismatrix	87
3.5.2	Diskussion der Ergebnisse	87
3.5.3	Resümee	94
4	Zusammenfassung	95
A	Strategien baustatischer Modellbildung - Stufe 1: Einzelplatte	101
B	Strategien baustatischer Modellbildung - Stufe 2: Plattenverbund	117
C	Umsetzung der Erkenntnisse auf eine reale 3D-Struktur	149
	Literatur	155
	Normen	157

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

baustat.	<u>baustatische</u>
Bez.	<u>Bezeichnung</u>
bzw.	<u>beziehungsweise</u>
ca.	<u>cirka</u>
char.	<u>charakteristisch</u>
CLT	<u>Brettsperrholzplatten</u>
d.h.	<u>das heißt</u>
E-Modul	<u>Elastizitätsmodul</u>
etc.	<u>et cetera</u>
exkl.	<u>exklusive</u>
FE	<u>Finite Elemente</u>
G-Modul	<u>Schubmodul</u>
i.d.R.	<u>in der Regel</u>
i.e.	<u>id est</u>
inkl.	<u>inklusive</u>
Konst.	<u>Konstruktion</u>
LF	<u>Lastfall</u>
LVL	<u>Furnierschichtholz</u>
Nr.	<u>Nummer</u>
o.g.	<u>oben genannt</u>
ortho.	<u>orthotrop</u>
Pos.	<u>Position</u>
PSL	<u>Furnierstreifenholz</u>
RFEM	<u>Räumliche Tragwerke nach der Finiten Elemente Methode, Statikprogramm der Dlubal Software GmbH, Programmversion 5.07.XX bis 5.10.XX</u>
sgn(x)	<u>Signumfunktion (Vorzeichenfunktion)</u>
Tab.	<u>Tabelle</u>
u.a.	<u>unter anderem</u>
u.U.	<u>unter Umständen</u>
Var.	<u>Variante</u>
vgl.	<u>vergleiche</u>
zB	<u>zum Beispiel</u>

zw. zwischen

Symbole - große lateinische Buchstaben

[C]	Steifigkeitsmatrix
[S]	Nachgiebigkeitsmatrix
<i>A</i>	Querschnittsfläche
<i>E</i>	<u>E</u> lastizitätsmodul
$E_{0,05}$	charakteristischer Wert (5%-Quantil) des <u>E</u> lastizitätsmoduls in Faserrichtung
$E_{0,mean}$	Mittelwert des <u>E</u> lastizitätsmodul in Faserrichtung
$E_{c,mean,i}$	Mittelwert (mean) des <u>E</u> lastizitätsmoduls für Druck (c) in <i>i</i> -Richtung (Einzelschichtkoordinatensystem $i = 1, 2$)
E_i	<u>E</u> lastizitätsmodul in <i>i</i> -Richtung (Stabkoordinatensystem $i = x, y$)
E_i	<u>E</u> lastizitätsmodul in <i>i</i> -Richtung (Einzelschichtkoordinatensystem $i = 1, 2$)
$E_{m,mean,i}$	Mittelwert (mean) des <u>E</u> lastizitätsmoduls für Biegung (m) in <i>i</i> -Richtung (Einzelschichtkoordinatensystem $i = 1, 2$)
$E_{mean,i}$	Mittelwert (mean) des <u>E</u> lastizitätsmoduls in <i>i</i> -Richtung (Einzelschichtkoordinatensystem $i = 1, 2$)
$E_{mean,i}$	Mittelwert (mean) des <u>E</u> lastizitätsmoduls in <i>i</i> -Richtung (Stabkoordinatensystem $i = x, y$)
$E_{t,mean,i}$	Mittelwert (mean) des <u>E</u> lastizitätsmoduls für Zug (t) in <i>i</i> -Richtung (Einzelschichtkoordinatensystem $i = 1, 2$)
<i>G</i>	Schubmodul
G_{05}	charakteristischer Wert (5%-Quantil) des Schubmoduls
G_{ij}	Schubmodul in der <i>ij</i> -Ebene ($i = 1, 2 j = 1, 2 i \neq j$)
$G_{mean,ij}$	Mittelwert (mean) des Schubmoduls in der <i>ij</i> -Ebene ($i = 1, 2 j = 1, 2 i \neq j$)
G_{mean}	Mittelwert (mean) des Schubmoduls
$G_{r,05}$	charakteristischer Wert (5%-Quantil) des Rollschubmoduls
$G_{r,mean}$	Mittelwert (mean) des Rollschubmoduls
<i>I</i>	Flächenträgheitsmoment bzw. Flächenmoment 2. Grades
K_v	Dehnsteifigkeit
K_ϕ	Drehfedersteifigkeit
K_{ser}	linear elastischer Verschiebungsmodul
K_u	Anfangsverschiebungsmodul im Grenzzustand der Tragfähigkeit
<i>M</i>	Biegem <u>o</u> ment
<i>N</i>	<u>N</u> ormalkraft
<i>V</i>	Querkraft

Symbole - kleine lateinische Buchstaben

<i>d</i>	<u>D</u> urchmesser
m_{ij}	Drill <u>m</u> oment bezogen auf das Flächenkoordinatensystem

	$(i = x, y \mid j = x, y \mid i \neq j)$
m_i	Biegemoment bezogen auf das Flächenkoordinatensystem $(i = x, y)$
n_{ij}	Schubfluss bezogen auf das Flächenkoordinatensystem $(i = x, y \mid j = x, y \mid i \neq j)$
n_i	Normalkraft bezogen auf das Flächenkoordinatensystem $(i = x, y)$
t	Gesamtdicke der Holzwerkstoffplatte $(t = \sum_{i=1}^n t_i)$
t_k	Schichtdicke der Einzelschichten k ($k = 1$ bis n) einer Holzwerkstoffplatte
v_i	Querkraft bezogen auf das Flächenkoordinatensystem $(i = x, y)$

Symbole - kleine griechische Buchstaben

$\alpha_{T,0}$	Wärmeausdehnungskoeffizient in Faserrichtung
β_k	Orthotropierichtung der Einzelschichten k ($k = 1$ bis n) einer Holzwerkstoffplatte
ε_i	Dehnung bezogen auf das Einzelschichtkoordinatensystem $(i = 1, 2)$
ε_i	Dehnung bezogen auf das Flächenkoordinatensystem $(i = x, y)$
γ_{ij}	Schubwinkel bzw. Gleitung bezogen auf das Einzelschichtkoordinatensystem $(i = 1, 2 \mid j = 1, 2 \mid i \neq j)$
γ_{ij}	Schubwinkel bzw. Gleitung bezogen auf das Flächenkoordinatensystem $(i = x, y \mid j = x, y \mid i \neq j)$
γ_w	spezifisches Gewicht, <u>W</u> ichte
κ_{ij}	Drillung bezogen auf das Flächenkoordinatensystem $(i = x, y \mid j = x, y \mid i \neq j)$
κ_i	Krümmung bezogen auf das Flächenkoordinatensystem $(i = x, y)$
ν_{ij}	Querdehnzahl bezogen auf das Einzelschichtkoordinatensystem, $\varepsilon_j = -\nu_{ij} \cdot \varepsilon_i^1$ ($i = 1, 2 \mid j = 1, 2 \mid i \neq j$)
ρ_k	charakteristischer Wert der Rohdichte
ρ_{mean}	Mittelwert der Rohdichte
ρ_m	Mittelwert der Rohdichte

¹gemäß [Mang (2013)], Kapitel 3.3.5

Motivation

1.1 Aktuelles Baugeschehen (Einfamilienhäuser und mehrgeschossiger Wohnbau)

1.1.1 Überblick

Die derzeit vorherrschenden Bauweisen im Wohnbau lassen sich in **stab-** (=Skelett) und **flächenförmige** (=Platten) Bauweise unterteilen. Beide haben gemeinsam, dass sie auch im mehrgeschossigen Wohnbau zur Anwendung kommen können. Während die Aussteifung in der **stabförmigen** Bauweise mittels Fachwerk (Kopfbänder, Diagonalen) gewährleistet wird, übernimmt die Fläche in der **flächenförmigen** Bauweise (Beklankung, Brettspertholz) sowohl **die Funktion** der Aussteifung als auch des Raumabschlusses.

Die **Wahl der Bauweise** ist von mehreren Faktoren abhängig:

- ⊗ **Know-how** der mitwirkenden Prozessbeteiligten (Architekt, Tragwerksplaner, Baufirma)
- ⊗ Möglichkeit bzw. Notwendigkeit zur **Vorfertigung** einzelner Fertigelemente (wie beispielsweise Wände oder Decken)
- ⊗ **Transportbeschränkung** (Sondertransporte, Zufahrt)
- ⊗ **Montagebedingungen** vor Ort (Wetter, Lagerplatz)

Aufgrund der vielfältigen und leistungsfähigen **Möglichkeiten der Vorfertigung** von Fertigelementen und Randbedingungen für die Montage vor Ort, wird in der Praxis zumeist die **flächenförmige** Bauweise bevorzugt eingesetzt. Diese kommt je nach Schubtragfähigkeit der Elemente in den **folgenden Varianten zum Einsatz**:

- ⊗ **Massivbau-ALT** (Blockbau, Doppelbaumdecke, Brettstapel)
- ⊗ **Massivbau-NEU** (Brettspertholz, Furnierschichtholz (LVL), Furnierstreifenholz (PSL), OSB-Platten)

☛ **Rahmenbau** (Sandwich aus Holzrahmen, Beplankung, Dämmung und weiteren notwendigen bauphysikalischen Schichten)

Im Zuge dieser Diplomarbeit wird der Fokus ausschließlich auf den Rahmenbau gelegt, da das zu betrachtende Fertighaus der Firma GRIFFNER gemäß dieser Bauweise errichtet wurde.

1.1.2 Rahmenbauweise

Rahmen, Beplankung und Verbindungsmittel sind die Hauptbestandteile des Rahmenbaus (siehe beispielsweise Abbildung 1).

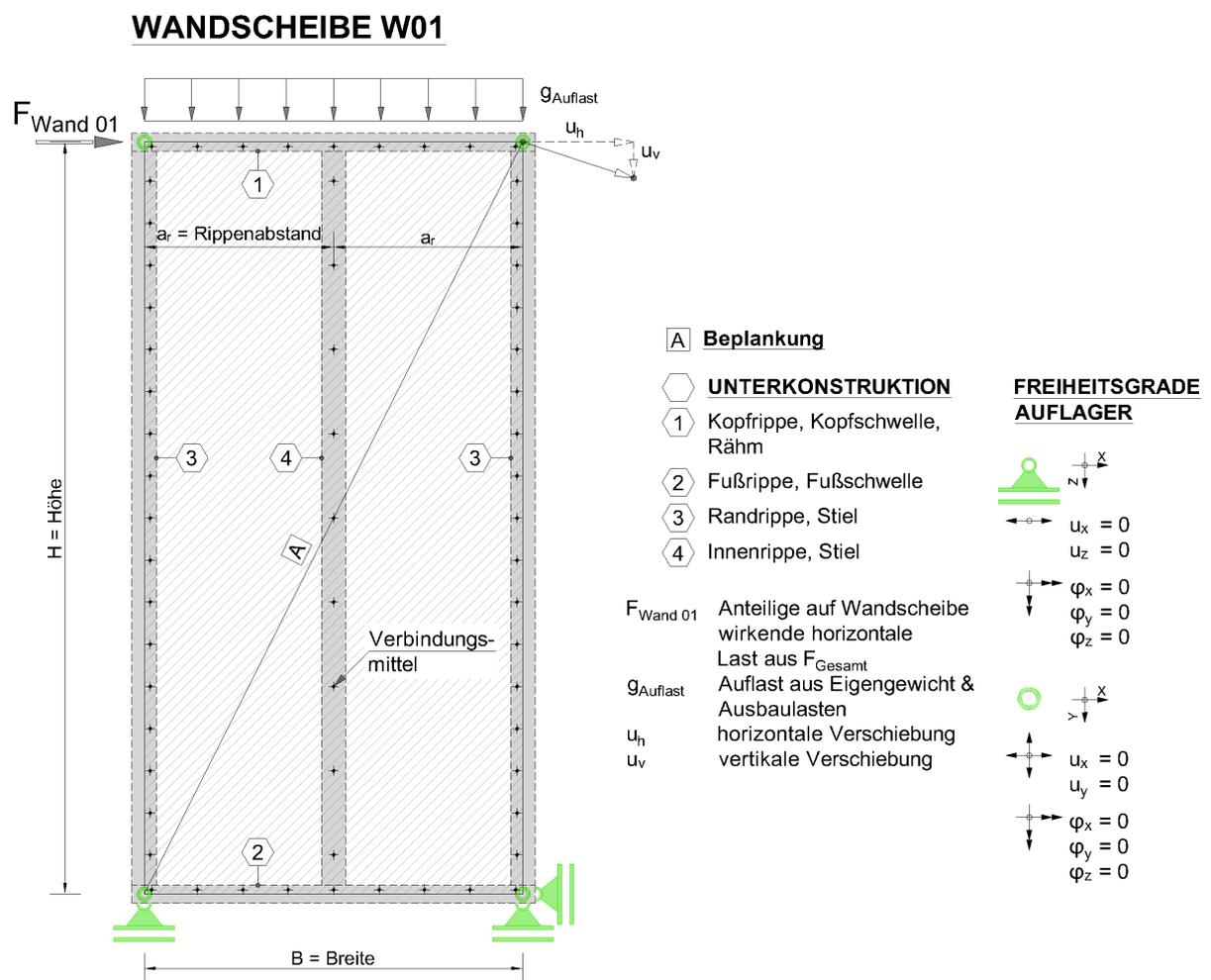


Abbildung 1: Beispielhafte Berechnung der Einzelwandscheibe

Der **Rahmen** einer Wandscheibe setzt sich konstruktiv aus Fuß- bzw. Kopfschwelle (Schwelle & Rähm) und zahlreichen Stielen zusammen, die meist aus Voll-, in seltenen Fällen auch aus Brettschicht- oder Furnierschichtholz bestehen. Der Stiel wird hauptsächlich durch Drucknormalkräfte parallel zur Faser und durch Momente (zB Wind auf die Wandscheibe) beansprucht. Die Momentenbeanspruchung in der Rahmenebene von

Schwelle und Rähm erfolgt vorwiegend durch nicht im Rastermaß verlegte Stiele und Deckenträme. Diese erzeugen zusätzlich eine Beanspruchung quer zur Faser. Außerdem werden Schwelle und Rähm einer Normalkraft aus Ringankerfunktion ausgesetzt.

Aufgabe der **Beplankung** ist es, den losen Rahmen zu verbinden, Räume abzuschließen und für die Aussteifung des Gebäudes zu sorgen. Die Beplankung besteht zumeist aus kleinformatischen Gipskarton-, Sperrholz-, OSB-, 3-Schicht- oder in Sonderfällen auch aus LVL-Platten. In Abhängigkeit von der maschinellen Ausstattung der Fertigungsstraße (zB Hebeanlage) können auch großformatige OSB-, 3-Schicht- oder LVL-Platten zur Anwendung gelangen. Die Verwendung großformatiger Platten hat eine positive Auswirkung auf die Gesamtsteifigkeit des Gebäudes und sorgt für eine Einsparung von Verbindungsmitteln. Meist wird im Rahmenbau die Beplankung aus statischer Sicht einseitig ausgeführt. Je nach statischen Erfordernissen (zB Auslastung) können jedoch auch **mehrere Beplankungsebenen** zur Anwendung gelangen. Bei Vorliegen eines hohen Auslastungsgrades stellt der Einsatz von Brettsperrholzdecken und -wänden eine geeignete Alternative zum Rahmenbau dar.

Nägeln und Klammern stellen die häufigsten Varianten der **Verbindungsmittel** zwischen Beplankung und Rahmen dar. Diese werden hauptsächlich durch Schubkräfte beansprucht, wobei Verbindungsmittel am Plattenrand (vgl. Abbildung 1 Kopf-, Fuß- und Randrippe) üblicherweise einen größeren Anteil der Kräfte übertragen müssen als jene im Platteninneren (vgl. Abbildung 1 Innenrippe). Letztere übernehmen daher eher die Aufgabe, das Ausknicken des Stiels um die schwache Achse zu verhindern. Dementsprechend kann von einem geringeren Einsatz an Verbindungsmitteln im Platteninneren ausgegangen werden. Die Verbindung zwischen Wand- und Deckenelementen untereinander wird hauptsächlich durch Schrauben gewährleistet.

Die Auflager in Abbildung 1 stellen Schub-, Zug- und Druckanker dar, welche für die Einleitung der Lasten in den Massivbau Sorge tragen. Anders als in der Abbildung dargestellt, können Schub- und Zuganker alternativ auch kontinuierlich entlang der Schwelle ausgeführt werden.

Der Einsatz **unterschiedlicher Beplankungsstöße** ermöglicht im Rahmenbau eine gewisse **Konstruktionsvielfalt** hinsichtlich Anordnung und Größenwahl einzelner Platten der Beplankung. Grundsätzlich können **folgende Herstellungsvarianten** unterschieden werden (siehe Abbildung 2):

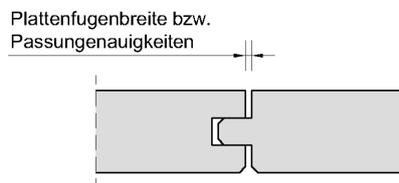
[a] **direkter Stoß**

⊗ **Nut-Feder-Stoß**

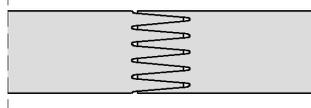
Der Nut-Feder-Stoß ermöglicht in Plattenebene durch seine **präzise Fertigung** die Übertragung von Druckkräften von Platte zu Platte. Die Berücksichtigung von Zugkräften ist nicht möglich. Ebenso können Schubkräfte aufgrund von Schwinden normal zur Plattenebene nicht weitergeleitet werden. Die Übertragung von Querkraften senkrecht zur Plattenebene ist jedoch möglich.

DIREKTER Stoß

[a] Nut-Feder-Stoß



[b] Keilzinkung



INDIREKTER Stoß

[1] Stoßlaschen

Aufgabe: Schubkraftübertragung

[2] Unterkonstruktion (zB Schwelle)

Aufgabe: Schubkraftübertragung, Pfetten- & Gurtfunktion

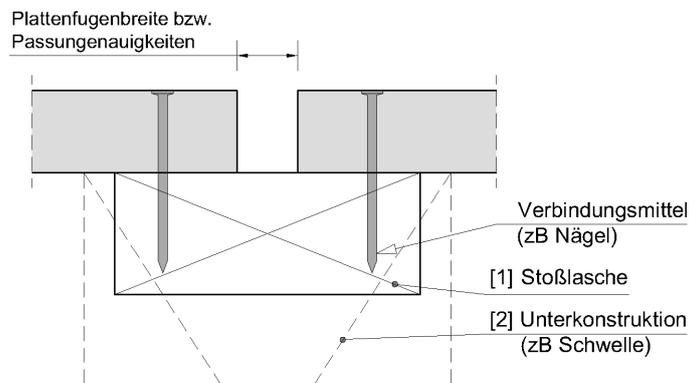


Abbildung 2: Direkter bzw. indirekter Plattenstoß

☉ Keilzinkung

Bei Fertigung dieser Variante werden die einzelnen Platten kraftschlüssig (d.h. ohne Einräumung eines Spielraumes) aneinander gestoßen. Die zusätzliche Verleimung ermöglicht einen schubstarrten Anschluss der zu verbindenden Platten. Darüber hinaus können auch Druck- und Zugkräfte übertragen werden. Zur Verleimung von tragenden Holzbauteilen sind jedoch spezielle Voraussetzungen nötig (zB qualifiziertes Personal und behördliche Genehmigung). Durch die Herstellung einer Keilzinkung erfährt der Querschnitt weiters eine Schwächung, was bei der Bemessung des Plattenstoßes berücksichtigt werden muss (siehe [Neuhaus (2011)] Kapitel 6).

[b] indirekter Stoß

- ☉ Die Kraft wird mittels Stoßlaschen bzw. Unterkonstruktion (zB Schwelle, Stiel, Deckentram) übertragen. Beide Ausführungsvarianten sind in der Regel über duktile Verbindungsmittel (zB Nägel, Klammern) mit den Platten verbunden. Bei lediglich geringen Fugenbreiten könnte die Stoßlasche auch durch Nagelbleche ersetzt werden. Im Falle einer Scheibenbeanspruchung erfolgt eine Relativverschiebung parallel und senkrecht zu den Plattenrändern. Bei großen Fugenbreiten (Passungsgenauigkeiten bzw. planmäßigen Vorgaben) ändert sich am charakteristischen Tragverhalten einer duktilen Verbindung nichts. Die Übertragung der Kräfte (Schub-, Druck- und Zugkräfte in Plattenebene) wird in diesem Zusammenhang ausschließlich über die Verbindungsmittel gewährleistet. Werden die Fugen jedoch klein ausgeführt, ändert sich die Tragstruktur der zu verbindenden Platten. Die Kraftübertragung erfolgt in diesem Fall sowohl durch die Verbindungsmittel als auch den Kontaktkräften

(Druck und Reibung) zwischen den Platten. Mit Änderung des Tragverhaltens vergrößert sich die Steifigkeit der gesamten Wand- bzw. Deckenscheibe. Aufgrund der zuvor erwähnten Lastübertragungsmechanismen (Kontaktkräfte), können die Verbindungsmittelkräfte verringert bzw. die Gesamttragfähigkeit erhöht werden. Größere Fugen zwischen zwei Platten der Beplankung können oft auch bewusst ausgeführt werden, um Zwänge aus zB Quellen und Schwinden in Scheibenebene zu vermeiden. Aufgrund von Querlagen weisen Holzwerkstoffplatten jedoch anders als Vollholz, ein geringeres Quell- und Schwindverhalten in Scheibenebene auf.

Wie zuvor bereits erwähnt, üben **Beplankungsstöße** Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit von Wand- und Deckenscheiben aus. Je weniger Stöße eine Beplankung aufweist, um so mehr wird die Platteneigensteifigkeit (großformatige Platten) aktiviert und führt somit zu einer größeren Steifigkeit der Scheibe. Zusätzlich werden hierdurch Verformungen von Wänden und Decken reduziert. Bei Platten mit größeren Abmessungen treten allerdings unter Umständen größere Spannungsspitzen in einspringenden Ecken von Durchbrüchen (zB Fenster und Türen) auf, welche bei der Plattenbemessung zu berücksichtigen sind. Diese Spannungen können durch die bewusste Anordnung von duktilen Stößen an den zuvor erwähnten Ecken der Durchbrüche abgebaut werden. Die Planung und Herstellung der aus unterschiedlichen **Plattengrößen** resultierenden Stöße sind dementsprechend nicht zu vernachlässigende Aspekte der Modellierung. Welche Kräfte von den **Stößen** selbst aufgenommen werden können, hängt vom statischen Design und der finalen Ausführungsqualität ab.

Zu den **Grundproblemen** des Rahmenbaus zählen

- ⊗ die **Feuchteempfindlichkeit** des Holzes quer zur dessen Faser (Quellen und Schwinden),
- ⊗ die besondere **Setzungsempfindlichkeit**, welche durch die Querpressung von Schwelle, Rähm und Deckenbalkenenden ausgelöst wird (könnte durch die Verwendung von geschossübergreifenden Wandelementen reduziert werden),
- ⊗ der **Schallschutz**, da durch den großen Hohlraumanteil in den Wänden und Decken nur eine geringe Masse zur Dämpfung des Schalls vorhanden ist,
- ⊗ das geringe **Eigengewicht des Bauwerkes**, da die Deckenelemente anfälliger für Schwingungen sowie die Wandscheiben für Aufkippen und Abheben (wegen fehlender Auflast) werden. Allerdings ist anzumerken, dass sich im Erdbebenfall das geringe Eigengewicht positiv auf das Tragwerk auswirkt,
- ⊗ die Gefahr rascher **Brandausbreitung** bei Baustellenfertigung (würde sich durch einen hohen Vorfertigungsgrad und der daraus resultierenden Kapselung verhindern lassen).

Bei **Anwendung des Rahmenbaus** sind ferner einige **Prinzipien** zu beachten:

- ⊗ die Orientierung am **Rastermaß** der Beplankung (zur Gewährleistung eines minimalen Plattenverschnitts)

- ☉ die **direkte vertikale Lastübertragung** (um eine unnötige Biegung in der Schwelle zu vermeiden, sollte beispielsweise der Deckentram direkt über dem Stiel der Wandscheibe liegen)
- ☉ der **Wechsel der Spannrichtung von Deckenbalken** bei mehrgeschossigen Bauwerken (zur Erreichung einer gleichmäßigen vertikalen Belastung der Wände)
- ☉ die Beachtung von **Schubverankerung** bzw. Schubkoppelungen zwischen den Geschossen (um eine Weiterleitung von horizontalen Lastenwirkungen zu ermöglichen)
- ☉ die Berücksichtigung von **Schubkoppelungen zwischen den Querwänden** (zur Sicherstellung einer größeren Auflast gegen Kippen bzw. einer überdrückten Sohlfuge und einer damit verbundenen Einsparung von vertikalen Zugverankerungen).

1.2 Aktuelle Normenlage und Praxis statischer Nachweisführung bei Wand- und Deckenscheiben

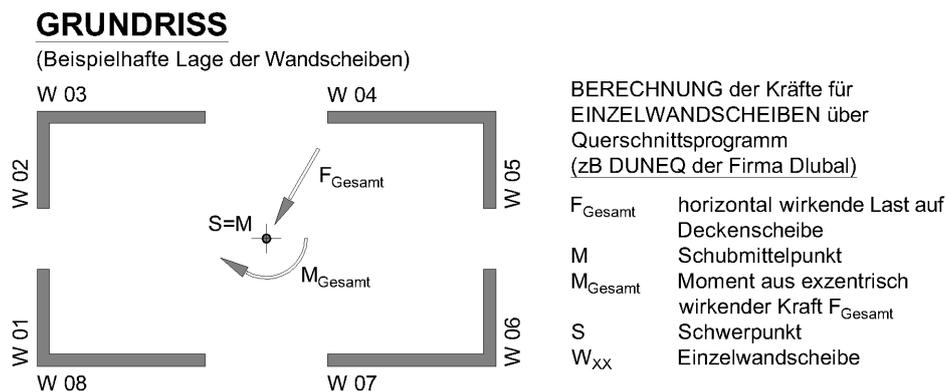


Abbildung 3: Berechnung der Einzelwandscheibenkräfte

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, sorgt die Bepankung und somit die Summe aller **Wand- und Deckenscheiben** für die **Aussteifung** des gesamten Gebäudes. Die horizontal wirkenden Lasten (wie Wind und Erdbeben) lassen sich dadurch ins Fundament abtragen. In der derzeitigen Praxis (siehe auch [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)]) wird hinsichtlich der Verteilung dieser Lasten auf die einzelnen Gebäudewände und deren Abhängigkeit von lokalen Steifigkeitsverhältnissen jedoch nur eine allgemeine und stark vereinfachte Annahme getroffen.

Oftmals wird vereinfacht unterstellt, dass

- [i] die Lasten über eine **starre Deckenscheibe auf mehrere nachgiebige Wandscheiben** verteilt werden (siehe Abbildung 3)
- [ii] sich die Aufteilung der Horizontallasten je Geschoss nur an der Lage und den Steifigkeiten der Wandscheiben orientiert

- [iii] **Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel** zwischen der Decke und den Wänden sowie zwischen den einzelnen Wandscheiben außer Acht gelassen werden können
- [iv] hinsichtlich der **Beplankung deren Anordnung und Größe** sowie die Befestigung mit der Unterkonstruktion selbst nicht zu berücksichtigen sind
- [v] der Einfluss von vertikalen Lasten (Eigengewicht und Ausbaulasten) mit der Notwendigkeit von Fallunterscheidungen auf die Wandscheiben anhand einer vereinfachten Ermittlung in Betracht gezogen werden kann.

Grundsätzlich entspricht die unter Punkt [ii] genannte Vorgehensweise der Realität. **In der Praxis** werden die Steifigkeiten der Wandscheiben jedoch meist divergent berechnet. Die **Aufteilung der Lasten** erfolgt in den meisten Fällen vereinfacht entweder mit der **Schubsteifigkeit der Beplankung** (siehe Abbildung 3) oder mit der **Biegesteifigkeit der Wandscheiben** (siehe Abbildung 1 aus Kapitel 1.1.2). Letzteres unterstellt, dass jeder Wandabschnitt eine ihrer Abmessung und Materialeigenschaften entsprechende Biegesteifigkeit besitzt und jede Wandscheibe meist als gedrungener Kragarmträger abgebildet werden kann. Unter Zuhilfenahme dieser Vereinfachungen kann jeder Wand eines Stockwerks eine Nachgiebigkeit (Federsteifigkeit) zugeteilt werden. Anhand der jeweiligen Federsteifigkeit und der Lage der Wand lässt sich der zu übernehmende Anteil an der horizontal wirkenden Gesamtlast bestimmen. Die getroffenen Annahmen setzen jedoch voraus, dass die Wand höher als breit und nicht mit Querwänden verbunden (siehe Abbildung 1 aus Kapitel 1.1.2) ist, was häufig nicht der Realität entspricht. Zur Ermittlung der Lastaufteilung mittels Schubsteifigkeit kann ein Querschnittprogramm herangezogen werden (zB das Programm DUENQ der Firma Dlubal), welches jedoch Schwächen hinsichtlich der meist nachgiebigen Verbindungen von Wandscheiben aufweist. Diesen werden entweder volle oder keine Schubtragfähigkeit zugewiesen.

Bei Betrachtung der Wandscheibe W01 in Abbildung 1 aus Kapitel 1.1.2 lässt sich jedoch erkennen, dass die **Steifigkeit der Wandscheibe** von **mehreren Parametern** gleichzeitig beeinflusst wird.

Diese sind:

- ⊗ die Biege- und Längssteifigkeit der Unterkonstruktion (zB Stiele, Kopf- und Fußschwelle) der Wandscheibe
- ⊗ die Schubsteifigkeit und Biegesteifigkeit der Beplankung in der Wandebene
- ⊗ die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Unterkonstruktion
- ⊗ die Lage und Nachgiebigkeit der Auflager (zB Zug- & Schubanker)
- ⊗ die Querholzpressung von Schwelle/Rähm durch den Stiel.

Unter Berücksichtigung aller genannten Einflussfaktoren ergeben sich Steifigkeiten, welche von den oben erwähnten vereinfachten Ermittlungen abweichen und demzufolge auch eine unterschiedliche Lastaufteilung auf die einzelnen Wände bewirken.

1.3 Potential durch Nutzung moderner Werkzeuge wie Statiksoftware

Aufgrund einer korrekten statischen Eingabe der Modelldaten (wie Holzwerkstoffplatten, Stäbe, Anschlussdetails, Lasten, etc.) in ein 3-dimensionales RFEM-Modell, wird versucht alle zuvor im Kapitel 1.2 genannten Ungenauigkeiten der herrschenden Praxis auszuschalten und einen realitätsnahen Kraftfluss zu erzeugen. Dieser Effekt ist am Beispiel einer Deckenscheibe im Kapitel 3 ersichtlich.

Im Allgemeinen können durch die Nutzung moderner Statiksoftware (3D-Modell) - im Vergleich zur Komponentenstatik (2D-Modell bzw. Bauteilstatik) - Potentiale sowohl bei der Modellierung als auch bei der Ergebnisauswertung besser ausgeschöpft werden. So kann etwa durch die **Verknüpfung aller Bauteile** des Gebäudes eine Prozess- bzw. Übertragungssicherheit von einwirkenden Lasten gewährleistet werden. Zusätzlich wird das Zusammenwirken der Bauteile berücksichtigt. **Vorzunehmende Adaptierungen am Gebäude** (zB Gebäudestruktur oder Lasten) können daher leichter eingearbeitet und **Optimierungen** rascher durchgeführt werden. **Plastisches Materialverhalten** und **Nichtlinearitäten** (wie klaffende Fugen) werden vom Programm ebenso berücksichtigt wie **nicht lineare Aspekte** der Gebäudestruktur (Theorie II. Ordnung bzw. Stabilitätsversagen Knicken und/oder Kippen). Im Ergebnis kann die Lastableitung im Gebäude durch **Visualisierung des Kraftflusses** besser nachvollzogen werden.

1.4 Kurze Gliederung & Übersicht der Diplomarbeit

Die folgende Diplomarbeit gliedert sich in vier Kapitel. Nach einem Überblick über das aktuelle Baugeschehen im Holzbau, wobei das Hauptaugenmerk auf den Rahmenbau gelegt wurde, sind weiters die aktuelle Normenlage sowie die derzeitige Praxis der statischen Nachweisführung kurz beschrieben und Potentiale durch die Nutzung moderner Softwarepakete aufgezeigt worden. Das **erste Kapitel** schließt mit einer kurzen Übersicht über den Aufbau dieser Arbeit ab.

Das **zweite Kapitel** behandelt die Grundlagen und Basiselemente der baustatischen Modellbildung von Holzwerkstoffplatten. Grundsätzlich werden die Platten im 3D-Modell als Flächen unter Berücksichtigung eines orthotropen Materialverhaltens modelliert. Eine **vollständige Modellbildung** mittels Flächen, Stäben und realitätsnahen Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel in RFEM erweist sich jedoch aus folgenden Punkten als **äußerst aufwändig**:

- ☉ Jede Fläche und jedes Liniengelenk einer einzelnen Platte muss extra eingegeben werden, da eine **Vervielfältigung durch Kopieren sehr oft nicht möglich ist**. Beispielsweise wird beim Kopieren von Linienfreigaben die Verknüpfung zu einer bereits bestehenden Fläche nicht automatisch erkannt bzw. lassen sich Liniengelenke überhaupt nicht vervielfältigen.

und verglichen werden. In der zweiten Stufe werden die Einzelplatten mittels Unterkonstruktion zusammengeführt, um die Wirkung der vereinfachten Strategien im Plattenverbund zu überprüfen.

Im **dritten Kapitel** werden die aus dem vorangegangenen Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse auf eine reale 3D-Teilstruktur (Erdgeschoss) am Beispiel eines GRIFFNER Fertighauses umgelegt. Zusätzlich soll die Anwendbarkeit der vereinfachten Modellierungsstrategien demonstriert und die Auswirkungen bei Vernachlässigung bestimmter Parameter aufgezeigt werden.

Die Arbeit schließt mit einer **Zusammenfassung** ab.

Strategien baustatischer Modellbildung

2.1 Zielsetzung unterschiedlicher Strategien baustatischer Vereinfachungen

Dieser Abschnitt der Diplomarbeit beschäftigt sich mit der korrekten baustatischen **Modellbildung von Holzwerkstoffplatten** und deren Randbedingungen im Zusammenhang mit der Prognose des Tragverhaltens von Holzriegelwänden und Deckenscheiben bestehend aus Trämen eines Einfamilienhauses in RFEM. Die Holzwerkstoffplatten dienen als Beplankung der Wände und Decken.

Folgende Ziele sollen durch die korrekte baustatische Modellbildung erreicht werden:

1. Einfache und zeitsparende Eingabe der Modelldaten
2. Minimierung der Rechenzeit im Statikprogramm
3. Unterstützung für die Auswertung der Ergebnisse durch
 - 3.1 Direkte Ablesbarkeit bemessungsrelevanter Schnittgrößen und Verbindungsmittelkräfte
 - 3.2 Direkte/Indirekte Bemessung der Holzwerkstoffplatten
 - 3.3 Schlüssige und nachvollziehbare Interpretation (wie die Visualisierung des Tragverhaltens)
4. Ansätze zur Optimierung der Beplankungsanordnung
5. Ansätze zur Optimierung der Beplankungsbefestigung

2.2 Unterschiedliche Modellbildungsstrategien

In den nachfolgenden Beispielen der Kapitel 2.6.2, 2.6.3 und 2.6.4 sollen drei unterschiedliche Strategien zur baustatischen Modellierung von Holzwerkstoffplatten (siehe auch Übersicht aus Abbildung 5) verfolgt und deren Auswirkung auf die weitere Vorgehensweise untersucht werden.

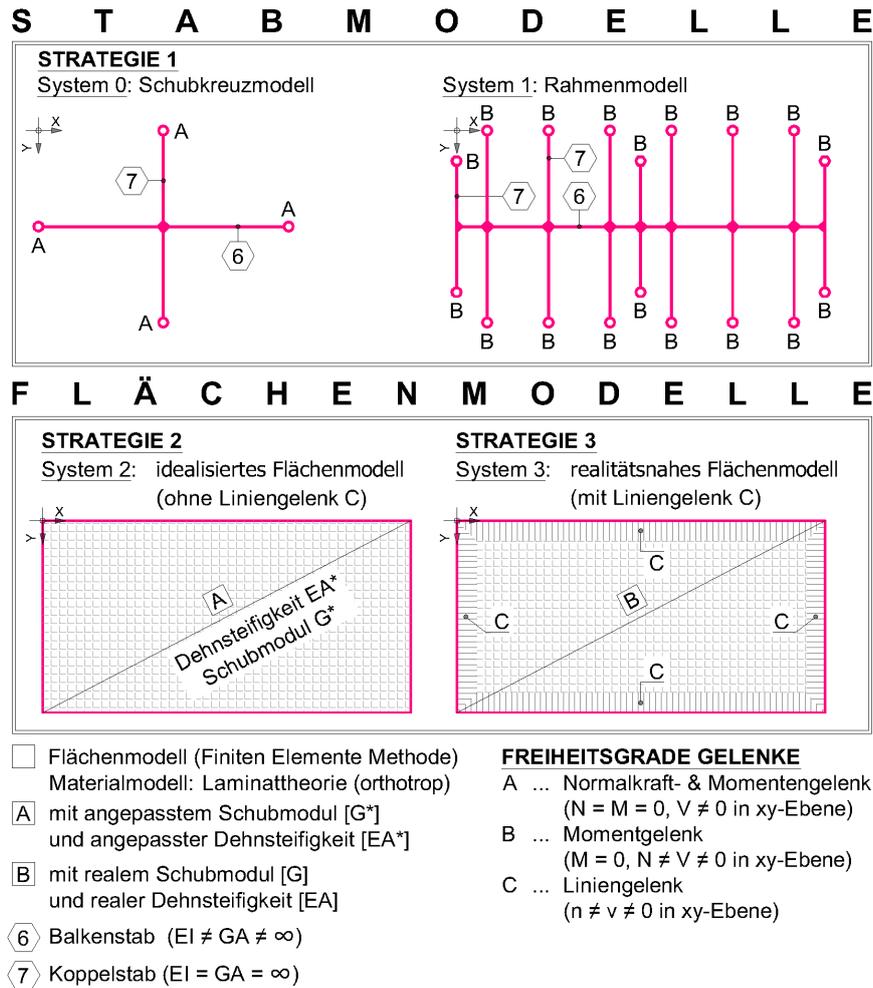


Abbildung 5: Übersicht der Strategien zur Modellierung von Holzwerkstoffplatten

Alle drei Strategien haben gemeinsam, dass die Platten mit einer Unterkonstruktion verbunden werden, deren Modellparameter zum Großteil unverändert bleiben. Strategie 3 stellt grundsätzlich die exakteste Modellierung dar und wird somit in den nachfolgenden Kapiteln als Referenz für die beiden anderen Strategien herangezogen. Strategie 1 und 2 sind von Strategie 3 abgeleitete Modellierungsvarianten.

In der **ersten Strategie** wird das Ziel verfolgt die durch die Planung vorgegebenen kleinformatigen Platten als (**isotrope**) **Stäbe zu modellieren**. Ebenso ist die Nachgiebigkeit der Befestigung mit der Unterkonstruktion als auch zwischen den Platten (entlang der Plattenstöße) in diesem Fall zu berücksichtigen. Wie unter Strategie 1 im Kapitel 2.6.2 auf Seite 38 beschrieben, lassen sich aus der ersten Strategie die folgenden zwei Systeme ableiten:

- **System 0:** Schubkreuzmodell
- **System 1:** Rahmenmodell.

Wichtigstes Unterscheidungsmerkmal der beiden Systeme ist, dass im System 1 **Plattenneigenbiegesteifigkeiten** und **Scheibennormalkrafttragfähigkeiten** der Beplankung

zu berücksichtigen sind, während die Beplankung im System 0 nur Querkräfte übertragen kann.

In der **zweiten Strategie** werden die vielen kleinformatischen Platten als eine **großformatige orthotrope Fläche** angesehen. Die Nachgiebigkeit der Befestigung mit der Unterkonstruktion wird bei dieser Strategie vernachlässigt. Die nachgiebige Schubverbindung zwischen den Platten wird in die globale Scheibensteifigkeit eingerechnet. Das aus der zweiten Strategie abgeleitete **System 2** wird im Kapitel 2.6.3 auf Seite 48 näher beschrieben. Die zuvor erwähnten Vereinfachungen der baustatischen Modellbildung könnten durch die **Reduktion des Schub- und E-Moduls** der Beplankung zu G^* bzw. E^* berücksichtigt werden. Für Zwecke des Vergleichs der einzelnen Strategien miteinander ist die Anpassung des Schub- und E-Moduls vorerst jedoch nicht nötig.

Die **dritte Strategie** unterscheidet sich von der ersten dadurch, dass die kleinformatischen Platten **aus mehreren orthotropen Flächen** modelliert werden. Die Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten bleibt bestehen. Für Details der aus der dritten Strategie resultierenden **Referenzmodelle (System 3)** siehe Kapitel 2.6.4 auf Seite 48.

2.3 Charakterisierung der Holzwerkstoffe

2.3.1 Motivation

Dieser Abschnitt der Diplomarbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der **Ermittlung von Steifigkeiten einer Holzwerkstoffplatte**. Außerdem werden die Materialeigenschaften der Unterkonstruktion sowie der Umgang mit Starrstäben beschrieben.

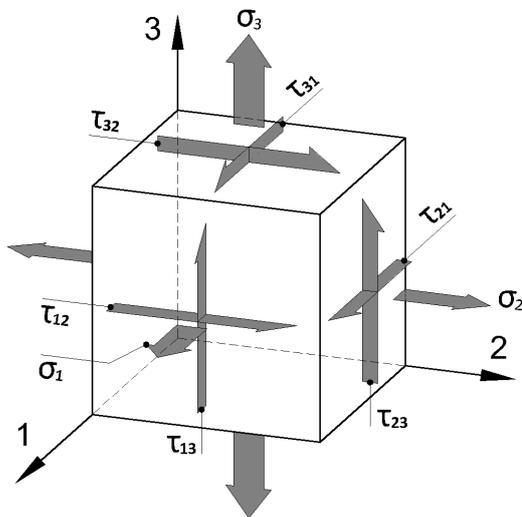
In **Strategie zwei und drei** wird die Holzwerkstoffplatte als Fläche mit orthotropen Werkstoffeigenschaften der Einzelschichten modelliert. In Abhängigkeit vom Plattentyp und von normativen Verankerungen kommt für die Ermittlung der Flächensteifigkeiten entweder die **Laminattheorie** (Modellierung als Schichtwerkstoff) oder die **Bruttoquerschnittsmethode** in Frage.

Die folgenden Kapitel sollen einen groben Überblick über die Grundlagen beider Varianten geben und umfassen daher eine kurze Beschreibung des zugrundeliegenden Werkstoffgesetzes, der Transformation des Werkstoffgesetzes vom lokalen Faserkoordinatensystem in ein globales Flächenkoordinatensystem sowie der Ermittlung der einzelnen Elemente der Flächensteifigkeitsmatrix. Aus dieser können die entsprechenden Materialparameter für **Strategie eins**, in welcher die Holzwerkstoffplatte als Balkenstab modelliert wird, abgeleitet werden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird der Fokus bei Betrachtung von Holzwerkstoffplatten auf die Scheibentragwirkung gelegt.

2.3.2 Definition des orthotropen Werkstoffgesetzes im lokalen Faserkoordinatensystem

Es wird von einem **linear** und **ideal elastischen** Werkstoff ausgegangen (lineares Elastizitätsgesetz bzw. HOOKE'sches Gesetz). Linear bedeutet, dass der Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen durch eine Konstante (Proportionalitätsfaktor) dargestellt werden kann. Ideal elastisch beschreibt, dass die gesamte gespeicherte elastische Energie, die durch Verformungsarbeit geleistet wird, bei vollständiger Entlastung zurück gewonnen werden kann (kein Verlust durch innere Dämpfung bzw. ohne bleibende Verformungen).¹

[A] RÄUMLICHER SPANNUNGSZUSTAND



[B] EBENER SPANNUNGSZUSTAND

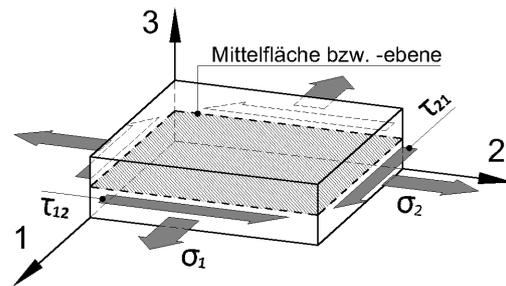


Abbildung 6: [A] räumlicher Spannungszustand am infinitesimalen Volumenelement
[B] ebener Spannungszustand am infinitesimalen Scheibenelement

Auf Materialebene stellt die **Steifigkeitsmatrix** $[C]_{1,2}$ den Zusammenhang zwischen den **Vektoren** des **räumlichen Spannungszustandes** $\{\sigma\}_{1,2}$ und **Verzerrungszustandes** $\{\varepsilon\}_{1,2}$ am infinitesimalen Volumenelement her.² Dieser Zusammenhang kann, unter der Annahme eines elastischen orthotropen Werkstoffgesetzes, wie folgt dargestellt werden:

$$\left\{ \begin{array}{c} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{array} \right\} = \underbrace{\left[\begin{array}{cccccc} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & \bar{C}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \bar{C}_{44} & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & \bar{C}_{55} & 0 \\ & & & & & \bar{C}_{66} \end{array} \right]}_{[C]_{1,2}} \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

¹gemäß [Schürmann (2007)], Kapitel 7.1.4

²gemäß [Altenbach (1996)], Kapitel 2.3

Durch die Verwendung der Terme \bar{C}_{ij} in Gleichung 2.1 soll verdeutlicht werden, dass sich die gesamte Steifigkeitsmatrix $[\mathbf{C}]_{1,2}$ auf das lokale Faserkoordinatensystem einer Einzelschicht bezieht (siehe Abbildung 6). Grundsätzlich ist die Steifigkeitsmatrix vollständig besetzt, jedoch entfallen bei transversal orthotropen Materialverhalten einige Elemente bzw. werden zu 0.

Durch das transversal orthotrope Materialverhalten lassen sich die Steifigkeitsterme aus Matrix $[\mathbf{C}]_{1,2}$ in zwei Teilmatrizen gruppieren:

⊗ **Erste Teilmatrix $[\mathbf{C}_e]_{1,2}$:** ebener Spannungszustand (Belastung in Scheibenebene)

Bei einem Flächentragwerk können - unter der Annahme eines ebenen Spannungszustandes³ - Komponenten des Spannungs- und Verzerrungsvektors vernachlässigt werden.

$$\{\sigma_e\}_{1,2} = [\mathbf{C}_e]_{1,2} \cdot \{\varepsilon_e\}_{1,2} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & 0 \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{C}_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

Wie aus Abbildung 6-[B] ersichtlich, werden im ebenen Spannungszustand die Normalspannungen σ_3 in Dickenrichtung sowie die transversalen Schubspannungen τ_{13} und τ_{23} außer Acht gelassen.

Die transversalen Plattenschubspannungen müssen durch die Annahme eines ebenen Querschnitts (in der verformten und unverformten Lage) sowohl bei der **KIRCHHOFF'schen** (Biegeverformung) als auch bei der **MINDLIN-REISSNER'schen Plattentheorie** (Biege- und Schubverformung) aus Gleichgewichtsbedingungen ermittelt werden (und damit nicht mit den transversalen Plattenschubsteifigkeiten aus Gleichung 2.3).

⊗ **Zweite Teilmatrix $[\mathbf{C}_s]_{1,2}$:** transversale Schubsteifigkeit (Belastung senkrecht zur Scheibenebene)

$$[\bar{\mathbf{C}}_s]_{1,2} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{55} & 0 \\ 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Gültigkeit nur für die Systemberechnung, nicht jedoch für die Rückrechnung von Spannungskomponenten.

³gemäß [Altenbach (1996)], Kapitel 2.2.5

Ingenieurekonstanten

Meist wird die Steifigkeitsmatrix $[C]$ mit den sogenannten Ingenieurekonstanten⁴, den Elastizitätsmodulen E , den Schubmodulen G und den Querdehnungszahlen ν , angegeben. Unter Berücksichtigung der Ingenieurekonstanten lautet das linear und ideal elastische Werkstoffgesetz einer schubelastischen orthotropen Einzelschicht wie folgt:

$$[C_e]_{1,2} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & 0 \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{C}_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\cdot\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}\cdot E_1}{1-\nu_{12}\cdot\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}\cdot E_2}{1-\nu_{12}\cdot\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\cdot\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$[C_s]_{1,2} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{55} & 0 \\ 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{13} & 0 \\ 0 & G_{23} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Die Querdehnungszahlen ν_{12} und ν_{21} aus Gleichung (2.4) stellen die Beziehung zwischen Längs- und Querdehnung in der 1-2-Ebene dar. Dieser Zusammenhang wird in [Altenbach (1996)], Kapitel 2.2.4.1 durch die Gleichung $\varepsilon_j = -\nu_{ij} \cdot \varepsilon_i$ ($i, j = 1, 2 \mid i \neq j$) definiert. Der Index i beschreibt die Ursache (i.e. die Richtung der primären Dehnung, die der einwirkenden Kraft folgt). Index j kennzeichnet die Wirkung (i.e. die Richtung der Querdehnung). Die beiden Querdehnungszahlen sind aufgrund der symmetrischen Steifigkeitsmatrix $[C]_{1,2}$ durch das Verhältnis $\frac{E_1}{\nu_{12}} = \frac{E_2}{\nu_{21}}$ miteinander verknüpft.

2.3.3 Transformation des lokalen Werkstoffgesetzes in das globale Flächenkoordinatensystem

Wie bereits erwähnt, gilt die Steifigkeitsmatrix $[C]_{1,2}$ ausschließlich für Spannungen und Dehnungen einer Einzelschicht k im lokalen Faserkoordinatensystem (1_k - bzw. 2_k -Achse). Um jedoch Steifigkeitseigenschaften einer Holzwerkstoffplatte berechnen zu können, müssen die **lokal wirkenden Spannungen und Dehnungen der Einzelschichten** auf jene eines globalen Flächen-Achssystems (x - bzw. y -Achse, siehe Abbildung 7) transformiert werden. Die unterschiedlich ausgerichteten Steifigkeitseigenschaften der Einzelschichten in den jeweiligen lokalen Faserkoordinatensystemen müssen durch eine Transformation in ein einheitlich ausgerichtetes globales Koordinatensystem umgerechnet werden. Die nunmehr im globalen Koordinatensystem eingebetteten Spannungen bzw. Dehnungen können dadurch zu resultierenden Schnittgrößen bzw. Verformungen aufintegriert werden.

Die mathematische Transformation erfolgt gemäß [Altenbach (1996)], Kapitel 2.2.1 und ist allgemein gültig. Ausgangspunkt ist das Werkstoffgesetz aus Gleichung 2.1, welche an dieser Stelle nochmals vereinfacht dargestellt wird:

$$\{\sigma\}_{1,2} = [C]_{1,2} \cdot \{\varepsilon\}_{1,2} \quad (2.6)$$

⁴gemäß [Altenbach (1996)], Kapitel 2.2.4

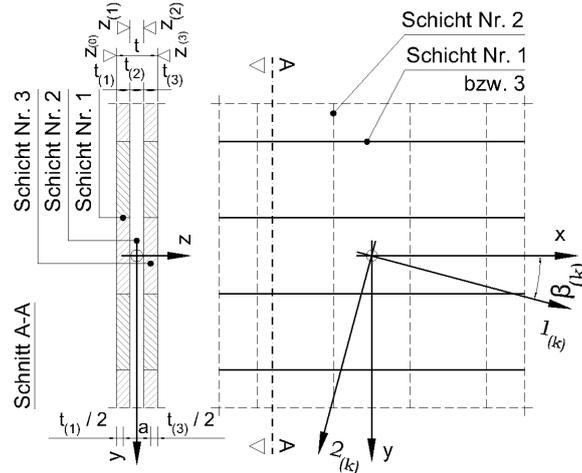


Abbildung 7: Transformation des lokalen Faserkoordinatensystems

Durch Einsetzen von $\{\sigma\}_{1,2} = [\mathbf{T}] \cdot \{\sigma\}_{x,y}$ und $\{\varepsilon\}_{1,2} = [\mathbf{T}] \cdot \{\varepsilon\}_{x,y}$ erhält man Gleichung 2.7:

$$[\mathbf{T}] \cdot \{\sigma\}_{x,y} = [\mathbf{C}]_{1,2} \cdot [\mathbf{T}] \cdot \{\varepsilon\}_{x,y} \quad (2.7)$$

$[\mathbf{T}]$ beschreibt die Transformation vom globalen $\{\sigma\}_{x,y}$ zum lokalen Spannungsvektor $\{\sigma\}_{1,2}$ bzw. vom globalen $\{\varepsilon\}_{x,y}$ zum lokalen Verzerrungsvektor $\{\varepsilon\}_{1,2}$. Durch Umformung der Gleichung (2.7) lässt sich der Zusammenhang zwischen dem globalen Spannungs- und Verzerrungsvektor wie folgt darstellen:

$$\{\sigma\}_{x,y} = [\mathbf{T}]^{-1} \cdot [\mathbf{C}]_{1,2} \cdot [\mathbf{T}] \cdot \{\varepsilon\}_{x,y} \quad (2.8)$$

Durch Einsetzen der in [Altenbach (1996)] angeführten Verknüpfungen $[\mathbf{T}]^{-1} = [\mathbf{T}]^T$ ergibt sich folgende Gleichung:

$$\{\sigma\}_{x,y} = [\mathbf{C}]_{x,y} \cdot \{\varepsilon\}_{x,y} \quad \text{mit} \quad [\mathbf{C}]_{x,y} = [\mathbf{T}]^T \cdot [\mathbf{C}]_{1,2} \cdot [\mathbf{T}] \quad (2.9)$$

Die lokal ausgerichtete Steifigkeitsmatrix $[\mathbf{C}]_{1,2}$ der jeweiligen Einzelschicht kann somit auf ein globales Koordinatensystem transformiert werden, welches mit $[\mathbf{C}]_{x,y}$ beschrieben wird. Die allgemein gültige Gleichung (2.9) kann unter Berücksichtigung der Annahme eines ebenen Spannungszustandes (siehe Gleichung (2.2)) folgendermaßen beschränkt werden:

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}}_{\{\sigma_e\}_{x,y}} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{14} \\ & C_{22} & C_{24} \\ \text{sym.} & & C_{44} \end{bmatrix}}_{[\mathbf{C}_e]_{x,y}} \underbrace{\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}}_{\{\varepsilon_e\}_{x,y}} \quad (2.10)$$

Die transformierte Steifigkeitsmatrix $[\mathbf{C}_e]_{x,y}$ (mit $c = \cos(\beta_k)$ und $s = \sin(\beta_k)$) lautet somit:

$$[\mathbf{C}_e]_{x,y} = \underbrace{\begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}}_{[\mathbf{T}_e]^T} \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & 0 \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{C}_{44} \end{bmatrix}}_{[\mathbf{C}_e]_{1,2}} \underbrace{\begin{bmatrix} c^2 & s^2 & cs \\ s^2 & c^2 & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}}_{[\mathbf{T}_e]} \quad (2.11)$$

Für die Ermittlung der transversalen Plattenschubverformungen unter Anwendung der **MINDLIN-REISSNER'schen Plattentheorie** kann die Materialgrundinformation aus Gleichung (2.3) in analoger Vorgehensweise auf das globale Koordinatensystem transformiert werden:

$$[\mathbf{C}_s]_{x,y} = \begin{bmatrix} C_{55} & C_{56} \\ \text{sym.} & C_{66} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} c & -s \\ s & c \end{bmatrix}}_{[\mathbf{T}_s]^T} \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{C}_{55} & 0 \\ 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix}}_{[\mathbf{C}_s]_{1,2}} \underbrace{\begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix}}_{[\mathbf{T}_s]} \quad (2.12)$$

2.3.4 Vorzeichendefinition der Scheiben- und Plattenschnittgrößen

Durch Aufintegrieren der globalen Spannungen (siehe Kapitel 2.3.3) lassen sich die resultierenden Scheiben- und Plattenschnittgrößen aus Abbildung 8 ableiten. Die Bezugsebene der Schnittgrößen wird zumeist in der Mittelebene (bzw. Symmetrieebene) des Plattenquerschnitts angenommen. Für Zwecke der Diplomarbeit werden die Einzelschichten symmetrisch zur Bezugsebene angeordnet (d.h. mit gleicher Dicke, gleicher Faserorientierung, gleichen Werkstoffeigenschaften und gleichem Abstand zur Bezugsebene).

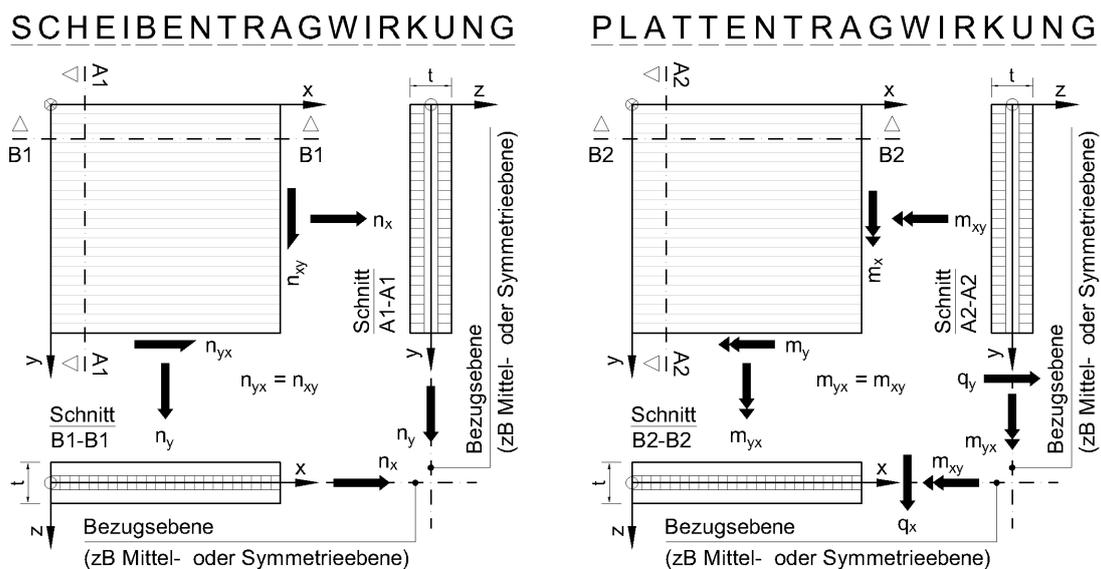


Abbildung 8: Mögliche Vorzeichendefinition der Schnittgrößen bei Scheiben- und Plattentragwirkung mit positiver Wirkungsrichtung der zugehörigen Spannungsresultanten am positiven Schnitтуfer

2.3.5 Kopplung von Flächenschnittgrößen und Verzerrungen

Die aus [RF-Laminat Handbuch (2016)], Kapitel 2.4.1, entnommene Gleichung (2.13) zeigt den Zusammenhang zwischen Schnittgrößen und Verzerrungen an der Mittelebene. Der Zusammenhang wird mithilfe der Flächensteifigkeitsmatrix $[C]_{\text{Fläche}}$ dargestellt. Die einzelnen Elemente der Matrix stellen bereits Funktionen der Querschnittsgeometrie und der Werkstoffkennwerte einer Holzwerkstoffplatte dar.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{14} & 0 & 0 & B_{11} & B_{12} & B_{14} \\ & D_{22} & D_{24} & 0 & 0 & & B_{22} & B_{24} \\ & & D_{44} & 0 & 0 & \text{sym.} & & B_{44} \\ & & & \bar{A}_{55} & \bar{A}_{56} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \bar{A}_{66} & 0 & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & & A_{11} & A_{12} & A_{14} \\ & & & & & & A_{22} & A_{24} \\ & & & & & & & A_{44} \end{bmatrix}}_{[C]_{\text{Fläche}}} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

A_{ij} ... Element der Scheibensteifigkeit (Membran)

\bar{A}_{ij} ... Element der Plattenschubsteifigkeit (transversale Schubsteifigkeit)

B_{ij} ... Koppelglieder bei unsymmetrischem Plattenaufbau

D_{ij} ... Element der Plattensteifigkeit (Biegung und Torsion)

Da sich die Betrachtung von Holzwerkstoffplatten für Zwecke der Diplomarbeit auf die **Scheibentragwirkung der Beplankung** beschränkt, sind für die weitere Vorgehensweise ausschließlich die Membranenanteile A_{11} , A_{22} und A_{44} der Steifigkeitsmatrix von Bedeutung.

2.3.6 Definition von Flächentragwerken

Gemäß [Mang (2013)], Kapitel 8.1 liegt ein Flächentragwerk vor, wenn eine Abmessung - Dicke t - gegenüber den beiden anderen Abmessungen - Breite b bzw. Länge l - kleiner ist. Es kann bei Flächentragwerken zwischen Scheiben, Platten aber auch Schalen unterschieden werden. Scheiben und Platten weisen in der unverformten Ausgangslage eine ebene Mittelfläche auf (ebene Flächentragwerke). Die Mittelfläche von Schalen sind hingegen bereits in der unverformten Ausgangslage gekrümmt. Der Fokus dieser Arbeit wird in weiterer Folge jedoch ausschließlich auf ebene Flächentragwerke gelegt.

Ein Flächentragwerk kann unter folgenden Bedingungen als **Scheibe** betrachtet werden⁵:

⁵gemäß [Mang (2013)], Kapitel 8.1

- ⊗ Alle äußeren und inneren Kräfte wirken parallel zur Mittelfläche. Dadurch bleibt diese bei - durch Belastungen erzeugten - Verformungen eben. Voraussetzungen sind, dass der Plattenaufbau symmetrisch ist und das Stabilitätsversagen durch Plattenbeulen vernachlässigt werden kann.
- ⊗ Dehn- und Spannungsverläufe über die Dicke der Scheibe sind konstant.
- ⊗ Ein ebener Spannungszustand liegt vor ($\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y \neq 0$, $\tau_{xy} \neq 0$, siehe Kapitel 2.3.3). Dieser setzt voraus, dass die Normal- und Schubspannung in Dickenrichtung den Wert Null annehmen ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$).

Unter folgenden Bedingungen kann ein Flächentragwerk als **Platte** betrachtet werden⁶:

- ⊗ Alle äußeren Kräfte wirken senkrecht (durch äußere Einwirkungen) bzw. inneren Kräfte senkrecht (durch Querkräfte) und parallel (durch Momente) zur Mittelfläche. Die daraus resultierende Verformung erzeugt ausschließlich eine Verkrümmung (κ_x und κ_y) bzw. Verdrillung (κ_{xy}) der Mittelfläche (siehe Kapitel 2.3.5). Hierzu wird ein symmetrischer Plattenaufbau vorausgesetzt.
- ⊗ Die Durchbiegung w der Platte ist kleiner als die Dicke t ($w \ll t$). Diese Bedingung ist Voraussetzung für die Berechnung der Platte am unverformten System (Theorie I. Ordnung).
- ⊗ Die Normalspannung in Dickenrichtung wird vernachlässigt. ($\sigma_z = 0$, siehe Kapitel 2.3.3).

In Kapitel 8.1 aus [Mang (2013)] unterscheidet man bei **Platten** zudem zwischen **schubstarr** und **schubnachgiebig**:

- ⊗ Von **schubstarren Platten** kann gesprochen werden, wenn bei schlanken Platten die aus - normal zur Mittelfläche gerichteten - Schubspannungen ($\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$, transversale Schubspannungen) erzeugten Verformungen vernachlässigt werden können. Schlanke Platten setzen voraus, dass die Dicke t im Gegensatz zu Breite b bzw. Länge l klein ist. Liegen schlanke Platten vor, kann davon ausgegangen werden, dass die Querschnittsfläche eben und senkrecht zur Mittelfläche bleibt. Die Annahme ist unabhängig davon, ob sich die Mittelfläche in der verformten oder unverformten Lage befindet und entspricht der **KIRCHHOFF'schen Plattentheorie**.
- ⊗ Bei schubelastischen Einzelschichten im Mehrschichtverbund (zB Sandwichplatten) und bei dicken Platten kann die aus transversalen Schubspannungen (τ_{xz} bzw. τ_{yz}) erzeugte Verformung nicht mehr vernachlässigt werden. In diesem Fall wird von **schubnachgiebigen Platten** gesprochen. Um die transversalen Schubverformungen (γ_{xz} bzw. γ_{yz} , siehe Kapitel 2.3.5) vereinfacht berücksichtigen zu können, wird weiterhin von einer ebenen Querschnittsfläche ausgegangen. Die Annahme einer senkrechten Ausrichtung des Querschnitts zur Mittelfläche kann hingegen in der verformten Lage nicht mehr getroffen werden. Dies entspricht der **MINDLIN-REISSNER'schen Plattentheorie**.

⁶gemäß [Mang (2013)], Kapitel 8.1

2.3.7 Orthotrope Einschichtplatte

Der Vollständigkeit halber werden in diesem Abschnitt alle **Elemente der Flächensteifigkeitsmatrix** $[\mathbf{C}]_{\text{Fläche}}$ aus Gleichung (2.13) beschrieben⁷.

Die in den nachfolgenden Gleichungen angeführten Steifigkeitskennwerte C_{ij} beziehen sich auf die transformierte Steifigkeitsmatrix $[\mathbf{C}_e]_{x,y}$ oder $[\mathbf{C}_s]_{x,y}$ aus Kapitel 2.3.3.

.....
 A Elemente A_{ij} der Scheibensteifigkeit (Membran)

$$A_{ij} = C_{ij} \cdot t_k \quad (2.14)$$

.....
 B Elemente \bar{A}_{ij} der transversalen Schubsteifigkeit (Plattenwirkung)

$$\bar{A}_{ij} = k^s \cdot C_{ij} \cdot t_k \quad (2.15)$$

Für homogene orthotrope Einschichtplatten ($C_{55} = C_{66} = G$ und $C_{45} = 0$) gilt analog zur Balkentheorie ein Schubkorrekturfaktor von $k^s = \frac{5}{6}$ |⁸.

.....
 C Koppelglieder B_{ij} bei unsymmetrischem Plattenaufbau

$$B_{ij} = 0 \quad (2.16)$$

Gleicht bei Einschichtplatten die Bezugsebene jener der Symmentrieebene, nehmen die Koppelglieder den Wert 0 an. Für nähere Details wird auf das Kapitel 2.3.6 verwiesen.

.....
 D Elemente D_{ij} der Plattensteifigkeit (Biegung und Torsion)

$$D_{ij} = C_{ij} \cdot \frac{t_k^3}{12} \quad (2.17)$$

Stimmt das lokale 1-2-Faserkoordinatensystem mit dem globalen x-y-Koordinatensystem überein, entfallen die Elemente A_{14} , A_{24} , \bar{A}_{56} , D_{14} und D_{24} aus der Flächensteifigkeitsmatrix $[\mathbf{C}]_{\text{Fläche}}$ (siehe Gleichung (2.13)).

2.3.8 Orthotrope Mehrschichtplatten

2.3.8.1 Berechnung nach der Laminattheorie

Die Laminattheorie (Modellierung als Schichtwerkstoff) kommt aktuell hauptsächlich bei Brettsperrholzplatten (CLT bzw. 3- bis 5-Schichtplatten) zur Anwendung. Im Gegensatz zur Bruttoquerschnittsmethode sind bei dieser Variante die Werkstoffparameter der

⁷gemäß [Altenbach (1996)], Kapitel 3.1.4

⁸gemäß [Altenbach (1996)], Kapitel 3.3.1.2

einzelnen Schichten bereits bekannt. Diese können ebenso wie die Dicke und Ausrichtung je Schicht variieren.

Mit Hilfe der Laminattheorie ist es möglich die einzelnen Schichteigenschaften zu resultierenden Flächensteifigkeitskennwerten aufzuintegrieren (siehe Flächensteifigkeitsmatrix $[C]_{\text{Fläche}}$ aus Gleichung (2.13)). Die Statiksoftware RFEM der Firma Dlubal unterstützt diese Umrechnung durch das Zusatzmodul RF-Laminat.

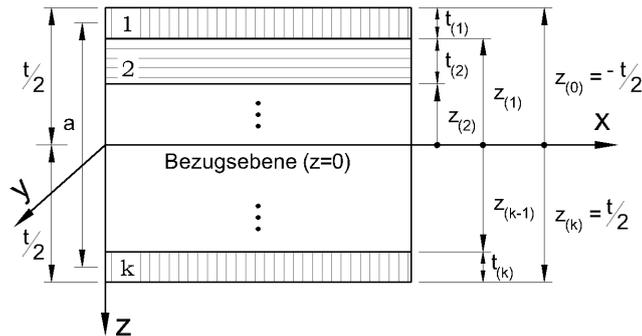


Abbildung 9: Laminatquerschnitt aus k-Einzelschichten

Abbildung 9 zeigt einen Laminatquerschnitt aus k-Einzelschichten ($k = 1, 2, \dots, n$). Die jeweiligen Steifigkeitskennwerte C_{ij} der Einzelschichten können aus den transformierten Steifigkeitsmatrizen $[C_e]_{xy}$ und $[C_s]_{xy}$ aus Kapitel 2.3.3 entnommen werden. Für die Elemente A_{ij} , B_{ij} und D_{ij} aus der Flächensteifigkeitsmatrix $[C]_{\text{Fläche}}$ gilt für die Indizes $i, j = 1, 2, 4$ und für \bar{A}_{ij} ist $i, j = 5, 6$.

Die Berechnung der einzelnen **Elemente der Flächensteifigkeitsmatrix** $[C]_{\text{Fläche}}$ erfolgt nach [Altenbach (1996)], Kapitel 3.2.1. (unter Berücksichtigung eines starren Schubverbundes der Einzelschichten)⁹:

.....
A Elemente D_{ij} der Plattensteifigkeit (Biegung und Torsion)
.....

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n C_{ij,(k)} \cdot (z_{(k)}^3 - z_{(k-1)}^3) = \sum_{k=1}^n C_{ij,(k)} \cdot \left(\bar{z}_{(k)}^2 + \frac{t_{(k)}^2}{12} \right) \cdot t_{(k)} \quad (2.18)$$

Für die Gleichungen (2.22) und (2.18) gilt folgende Vereinfachung:

$$\bar{z}_{(k)} = \frac{1}{2} (z_{(k)} - z_{(k-1)}) \quad (2.19)$$

⁹Weitere Details können auch aus [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)], Kapitel NCI NA.5.5 und [RF-Laminat Handbuch (2016)], Kapitel 2.4 entnommen werden.

 B Elemente \bar{A}_{ij} der transversalen Schubsteifigkeit (Plattenwirkung)

Zur Berechnung der transversalen Schubsteifigkeit können grundsätzlich unterschiedliche Verfahren herangezogen werden.¹⁰ Da sich die weiteren Berechnungen für Zwecke der Diplomarbeit ausschließlich auf die Scheibentragwirkung beziehen und sich dementsprechend auf die **KIRCHHOFF'sche Plattentheorie** stützen, können die Elemente \bar{A}_{ij} der Flächensteifigkeitsmatrix aus Gleichung 2.13 jedoch vernachlässigt werden.

Bei der finalen Bauteilbemessung einer Holzwerkstoffplatte (Scheiben- und Plattenbeanspruchung) wären diese Steifigkeitskennwerte einzubeziehen. Der Vollständigkeit halber wird deshalb im Folgenden eine einfache Möglichkeit zur Ermittlung aufgezeigt.¹¹ Voraussetzung ist, dass die Einzelschichten orthogonal zueinander angeordnet sind (daher ist $\bar{A}_{45} = 0$)

$$\frac{1}{\bar{A}_{ij}} = \frac{1}{a^2} \left(\frac{t_{(1)}}{2 \cdot C_{jj,(1)}} + \sum_{k=2}^{n-1} \frac{t_{(k)}}{C_{jj,(k)}} + \frac{t_{(n)}}{2 \cdot C_{jj,(n)}} \right) \quad (2.20)$$

Das dieser Diplomarbeit zugrundeliegende Statikprogramm der Firma Dlubal berechnet diese Steifigkeiten nach dem Verfahren der GRASHOFF-Integrale¹². In der nachstehenden Tabelle 2 sind dementsprechend die gemäß RF-Laminat ermittelten Steifigkeiten angegeben.

 C Elemente A_{ij} der Scheibensteifigkeit (Membran)

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n C_{ij,(k)} \cdot (z_{(k)} - z_{(k-1)}) = \sum_{k=1}^n C_{ij,(k)} \cdot t_{(k)} \quad (2.21)$$

 D Koppelglieder B_{ij} bei unsymmetrischem Plattenaufbau

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n C_{ij,(k)} \cdot (z_{(k)}^2 - z_{(k-1)}^2) = \sum_{k=1}^n C_{ij,(k)} \cdot \bar{z}_{(k)} \cdot t_{(k)} \quad (2.22)$$

Bei einem unsymmetrischen Plattenaufbau sind Scheiben- und Plattentragwirkung durch Koppelterme B_{ij} (siehe Flächensteifigkeitsmatrix aus Gleichung (2.13); $B_{ij} \neq 0$) miteinander verbunden. Somit entstehen aus den unterschiedlichen Belastungen sowohl Dehnungen als auch Verkrümmungen. Des Weiteren bewirkt ein unsymmetrischer Plattenaufbau, dass die Nullspannungsebene von der Mittelfläche divergiert. Für Zwecke der Diplomarbeit wird von einem symmetrischen Plattenaufbau ausgegangen, weshalb

¹⁰Für Detailinformationen wird auf folgende Literaturstellen verwiesen: [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)], Kapitel NCI NA.5.5; [RF-Laminat Handbuch (2016)], Kapitel 2.4 oder [Altenbach (1996)], Kapitel 3.3.1.2).

¹¹gemäß [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)], Kapitel NCI NA.5.6.2.2

¹²gemäß [RF-Laminat Handbuch (2016)], Kapitel 2.4

die Koppelterme B_{ij} der Flächensteifigkeitsmatrix $[\mathbf{C}]_{\text{Fläche}}$ der Gleichung 2.13 den Wert 0 annehmen.

2.3.8.2 Berechnung nach der Bruttoquerschnittsmethode

Wie eingangs bereits erwähnt, kann bei der Modellierung von Mehrschichtplatten, in Abhängigkeit vom Plattentyp und normativen Verankerungen, die Bruttoquerschnittsmethode zur Anwendung gelangen. Zurzeit kommt diese Methode beispielsweise bei Furnierschichtholz (LVL), Furniersperrholz, Furnierstreifenholz (PSL) und OSB-Platten zum Einsatz.

Unabhängig vom Aufbau und der Ausrichtung der einzelnen Schichten einer Holzwerkstoffplatte, wird das Steifigkeitsverhalten einer homogenen orthotropen Einschichtplatte unterstellt (siehe Kapitel 2.3.7). Aus experimentell ermittelten Schnittgrößen können demnach mithilfe des Formelsatzes einer orthotropen Einschichtplatte die fiktiven quasi homogenen Material- und Festigkeitskennwerte je Beanspruchungsart (zB Druck-, Zug- oder Schubbeanspruchung) ermittelt werden. Diese Kennwerte werden anschließend in Produktnormen bereitgestellt und bei der Modellierung als Fläche in Form von Platten- und Scheibensteifigkeitskennwerte für quasi fiktive Einschichtplatten direkt in der Statiksoftware übernommen. Bei Auswertung der Ergebnisse ist darauf zu achten, dass ebenfalls der Formelsatz einer Einschichtplatte herangezogen werden muss.

Die in der Steifigkeitsmatrix $[\mathbf{C}_e]_{1,2}$ (siehe Matrix (2.4)) angeführten E-Module in Richtung der lokalen 1- bzw. 2-Achse (E_1 bzw. E_2) können - je nach Art der Beanspruchung (Biegung, Druck und Zug) - bei Scheiben- ($E_1 = E_{t,1}$ bzw. $E_{c,1}$; $E_2 = E_{t,2}$ bzw. $E_{c,2}$) bzw. Plattentragwirkung ($E_1 = E_{m,1}$; $E_2 = E_{m,2}$) unterschiedliche Werte annehmen.

2.3.8.3 Scheiben- und Plattensteifigkeit von ausgewählten Plattenwerkstoffen

Abgeleitet aus dem später noch zu analysierenden Projekt (siehe Kapitel 3) werden folgende Plattenwerkstoffe vorgestellt:

Tabelle 1: Materialeigenschaften der Einzelschichten im lokalen Faserkoordinatensystem

Bezeichnung		Einheit	3-Schichtmassivholzplatte ^a			OSB-Platte ^b
Schicht	Nr.	[-]	1	2	3	1+2+3
Dicke	t_k	[mm]	9	9	9	15
Schubverbund		[-]	ja	ja	ja	ja
Schmalseitenverklebung ^{d,e,f}		[-]	nein	nein	nein	-

Fortsetzung folgt auf nächster Seite

Tabelle 1: Materialeigenschaften der Einzelschichten im lokalen Faserkoordinatensystem (Fortsetzung)

Bezeichnung		Einheit	3-Schichtmassivholzplatte ^a			OSB-Platte ^b
Schicht	Nr.	[-]	1	2	3	1+2+3
Orthotropie- richtung	$\beta_{(k)}$	[°]	0	90	0	-
E-Modul (Biegung)	$E_{m,mean,1}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	11.600	11.600	11.600	4.930 ^c
	$E_{m,mean,2}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	0 ^d	0 ^d	0 ^d	1.980 ^c
E-Modul (Zug)	$E_{t,mean,1}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	-	-	-	3.800 ^c
	$E_{t,mean,2}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	-	-	-	3.000 ^c
E-Modul (Druck)	$E_{c,mean,1}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	-	-	-	3.800 ^c
	$E_{c,mean,2}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	-	-	-	3.000 ^c
G-Modul	$G_{mean,13}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	720	720	720	50
	$G_{mean,23}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	50	50	50	50
	$G_{mean,12}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	720	720	720	1.080
Querdehnzahl	ν_{12}	[-]	0,200	0,200	0,200	0 ^g
	ν_{21}	[-]	0,000	0,000	0,000	0 ^g
spezifisches Gewicht	γ_w	$\left[\frac{N}{m^3}\right]$	5.000	5.000	5.000	7.000
char. Rohdichte	ρ_k	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	350	350	350	550
Mittelwert der Rohdichte	ρ_{mean}	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	420	420	420	-
Wärmeaus- dehnungs- koeffizient ^h	$\alpha_{T,0}$	$\left[\frac{1}{^\circ C}\right]$	5×10^{-6}	5×10^{-6}	5×10^{-6}	5×10^{-6}

Fortsetzung folgt auf nächster Seite

Tabelle 1: Materialeigenschaften der Einzelschichten im lokalen Faserkoordinatensystem (Fortsetzung)

Bezeichnung		Einheit	3-Schichtmassivholzplatte ^a			OSB-Platte ^b
Schicht	Nr.	[-]	1	2	3	1+2+3

- ^a gemäß Firma Schillinger Holz AG, Europäische Technische Zulassung ETA-08/0238, PMC-3 27mm
^b gemäß [ÖNORM EN 12369-1 (2001)], Tabelle 2, OSB/2 und OSB/3, Dicke >10 bis 18mm
^c Die Statiksoftware RFEM der Firma Dlubal berücksichtigt zur Zeit je nach voreingestellter Beanspruchungsart (Platte bzw. Scheibe) entweder E_m , E_c oder E_t .
^d gemäß [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)], NCI NA.5.6.1 Allgemeines, (NA.4): »Bestehen die Schichten aus nebeneinander liegenden Brettern, die an den Schmalseiten nicht miteinander verklebt sind, so ist der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung gleich null zu setzen.«
^e gemäß [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)], NCI NA.5.6.2.3 Scheibenbeanspruchung, (NA.5): »Gleitung der xy -Ebene (Schubkraft n_{xy}), Schubsteifigkeit \bar{A}_{44} und Schubspannung $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ für an den Schmalseiten nicht verklebte Brettlagen: $A_{44} = \frac{1}{4} \cdot \sum G_{12,k} \cdot t_k$ «
^f Gemäß [BSPhandbuch (2009)], Kapitel 7.1.4 können weitaus höhere Werte für die Scheibenschubsteifigkeit A_{44} ermittelt werden als sie in der [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)] im Kapitel NCI NA.5.6.2.3 angegeben sind.
^g Aktuell sind gemäß [ÖNORM EN 12369-1 (2001)] der OSB-Platte keine Querdehnzahlen ν_{12} und ν_{21} zugewiesen. Der Einfluss dieser beiden Kennwerte auf die Flächensteifigkeitsmatrix $[C]_{\text{Fläche}}$ (siehe Gleichung (2.13)) wird vernachlässigt.
^h gemäß [Neuhaus (2011)], Kapitel 1.5

Tabelle 2: Elemente der Flächensteifigkeitsmatrix $[C]_{\text{Fläche}}$ im globalen Flächenkoordinatensystem

Bezeichnung	Einheit	3-Schichtmassivholzplatte	OSB-Platte	
Dicke	t	[mm]	27	15
Biegung und Torsion	D_{11}	[Nmm]	18.322.197,6	1.068.750,0
	D_{12}	[Nmm]	0	0
	D_{14}	[Nmm]	0	0
	D_{22}	[Nmm]	704.699,9	843.750,0
	D_{24}	[Nmm]	0	0
	D_{44}	[Nmm]	1.180.979,8	303.750,0
Schub	\bar{A}_{55}	[N/mm]	1.994,8	625,0
	\bar{A}_{56}	[N/mm]	0	0
	\bar{A}_{66}	[N/mm]	5.400,0	625,0
Membrane	A_{11}	[N/mm]	208.800,0	57.000,0
	A_{12}	[N/mm]	0	0
	A_{14}	[N/mm]	0	0
	A_{22}	[N/mm]	104.400,0	45.000,0
	A_{24}	[N/mm]	0	0
	A_{44}	[N/mm]	(19.440,0) ^a	4.860,0 ^{b,c}

Fortsetzung folgt auf nächster Seite

Tabelle 2: Elemente der Flächensteifigkeitsmatrix $[C]_{\text{Fläche}}$ im globalen Flächenkoordinatensystem (Fortsetzung)

Bezeichnung	Einheit	3-Schichtmassivholzplatte	OSB-Platte	
Dicke	t	[mm]	27	15

^a Die Mögliche Schubsteifigkeit für an den Schmalseiten verklebte Brettlagen.

^b gemäß [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)], NCI NA.5.6.2.3 Scheibenbeanspruchung, (NA.5): »*Gleitung der xy-Ebene (Schubkraft n_{xy}), Schubsteifigkeit A_{44} und Schubspannung $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ für an den Schmalseiten nicht verklebte Brettlagen: $\bar{A}_{44} = \frac{1}{4} \cdot \sum G_{12,k} \cdot t_k$* «

^c Gemäß [BSPhandbuch (2009)], Kapitel 7.1.4 können weitaus höhere Werte für die Scheibenschubsteifigkeit \bar{A}_{44} ermittelt werden als sie in der [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)] im Kapitel NCI NA.5.6.2.3 angegeben sind.

2.3.9 Werkstoffeigenschaften von Balkenstäben aus scheibenartig beanspruchter Holzwerkstoffplatten

Die **Modellbildung der Holzwerkstoffplatte** erfolgt in Strategie eins unter anderem mithilfe von **Balkenstäben** (siehe Kapitel 2.6.2). Die Stabsteifigkeiten setzen sich aus Querschnittswerten (Fläche A, Trägheitsmoment I) und Materialparameter (Elastizitätsmodul E, Schubmodul G) zusammen. Die Entscheidung welcher E- bzw. G-Modul dem Stab zugewiesen wird, hängt grundsätzlich von der Tragwirkung (Scheiben- bzw. Plattentragwirkung) der Holzwerkstoffplatte ab.

Wie bereits erwähnt, **beschränkt** sich die Betrachtung dieser Diplomarbeit auf die **Tragwirkung als Scheibe**. Für die weitere Vorgehensweise sind somit nur die Membranen-Elemente A_{11} , A_{22} und A_{44} der Flächensteifigkeitsmatrix (2.13) aus dem vorhergehenden Kapitel 2.3.8.3 von Bedeutung. Die gemittelten Materialparameter (E-Modul, G-Modul) für den Stab können demnach vereinfacht mittels Division der aufintegrierten Werte der Scheibensteifigkeit (gemäß Tabelle 2) durch die Fläche A^* ($A^* = 1 \cdot t \mid t \hat{=} \text{Gesamtdicke der Holzwerkstoffplatte}$) rückgerechnet werden.

E-Modul des Balkenstabs einer Holzwerkstoffplatte:

$$E_{Stab} = \begin{cases} E_x = \frac{A_{11}}{1 \cdot t} \Rightarrow \text{für } L \geq B \\ E_y = \frac{A_{22}}{1 \cdot t} \Rightarrow \text{für } L < B \end{cases} \quad (2.23)$$

G-Modul des Balkenstabs einer Holzwerkstoffplatte:

$$G_{Stab} = \frac{A_{44}}{1 \cdot t} \quad (2.24)$$

Tabelle 3: Stabwerkstoffeigenschaften scheibenartiger Holzwerkstoffplatten

Bezeichnung		Einheit	3-Schichtmassivholzplatte	OSB-Platte
Dicke	t	[mm]	27	15
E-Modul	$E_{x,mean}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	7.733	3.800
	$E_{y,mean}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	3.867	3.000
G-Modul	G_{mean}	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	(720) ^a	180 ^{b,c}

- ^a Die mögliche Scheibenschubsteifigkeit für an den Schmalseiten verklebte Brettlagen.
- ^b gemäß [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)], NCI NA.5.6.2.3 Scheibenbeanspruchung, (NA.5): »Gleitung der xy-Ebene (Schubkraft n_{xy}), Schubsteifigkeit \bar{A}_{44} und Schubspannung $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ für an den Schmalseiten nicht verklebte Brettlagen: $A_{44} = \frac{1}{4} \cdot \sum G_{12,k} \cdot t_k$ «
- ^c Gemäß [BSPhandbuch (2009)], Kapitel 7.1.4 können weitaus höhere Werte für die Scheibenschubsteifigkeit \bar{A}_{44} ermittelt werden als sie in der [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)] im Kapitel NCI NA.5.6.2.3 angegeben sind.

Wenn die Abmessung der Holzwerkstoffplatte eine größere Länge L als Breite B aufweist, kommt E_x und im umgekehrten Fall E_y - bei selber Orientierung der Deckfurnierlage - als E-Modul E_{Stab} des Balkenstabes zur Anwendung (siehe am Beispiel System 1 (Strategie 1) aus Abbildung 10).

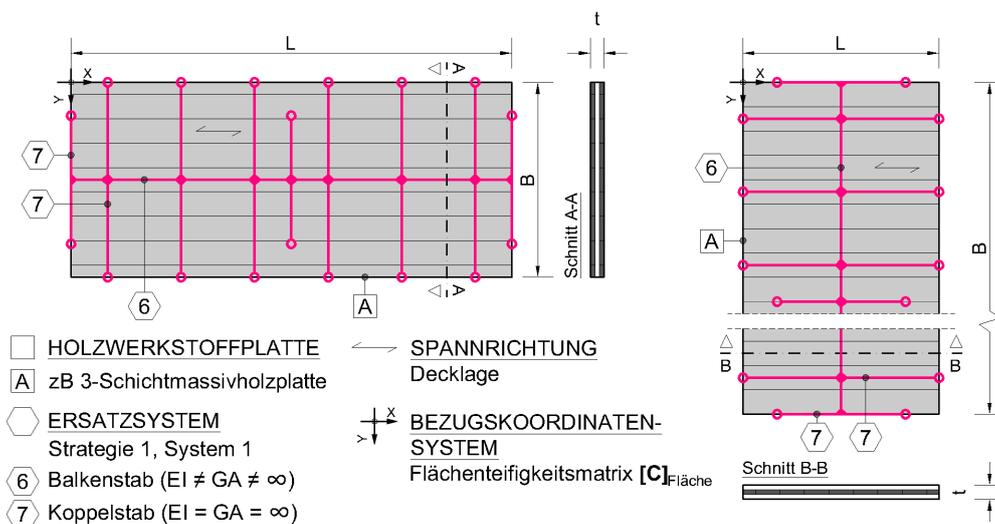


Abbildung 10: Scheibenartige Holzwerkstoffplatte als Balkenstab - Wahl des E-Moduls

Die **Querschnittswerte** (Fläche A, Trägheitsmoment I) des Balkenstabes können anhand der vorgegebenen Abmessungen (Breite B bzw. Länge L und der Gesamtdicke t) der Holzwerkstoffplatte direkt bestimmt werden.

Für die Materialparameter und Querschnittswerte der Koppelstäbe aus Abbildung 10 gelten die gleichen Voraussetzungen wie für die im Kapitel 2.3.11 angegebenen Starrstäbe.

2.3.10 Werkstoffeigenschaften von Balkenstäben der Unterkonstruktion

Die Unterkonstruktion wird unabhängig von der angewandten Strategie im Statikprogramm RFEM zumeist mit dem Stabtyp „**Balkenstab**“ modelliert. Der Balkenstab ist biege- und dehnelastisch. Je nach Berechnungsoption wird dieser zusätzlich entweder als schubstarr (BERNOULLI'sche Hypothese) oder -nachgiebig (TIMOSHENKO'sche Hypothese) angenommen. Im Rahmen der Diplomarbeit wird für die weitere Vorgehensweise schubstarres Verhalten vorausgesetzt.

Abgeleitet aus dem späterem Projekt werden folgende Werkstoffparameter für die Unterkonstruktion der Wand-, Decken- und Dachelemente vorgestellt (siehe Kapitel 3):

Tabelle 4: Werkstoffeigenschaften von Balkenstäben der Unterkonstruktion

Bezeichnung	Einheit	C24	C24 (quer)	Gl24h	S355	Koppel- stab
NORM		Tab. 1 ^a	Tab. 1 ^a	Tab. 5 ^b	Kapitel 3 ^f	-
E-Modul E_x	E	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	-	-	210.000	210.000
	$E_{0,mean}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	11.000	-	11.500	-
	$E_{90,mean}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	-	370	-	-
E-Modul E_y	E	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	-	-	210.000	210.000
	$E_{0,mean}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	-	11.000	-	-
	$E_{90,mean}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	370	-	300	-
G-Modul	G	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	-	-	81.000	81.000
	G_{mean}	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	690	(690)	650	-
G-Modul (Rollschub- modul)	$G_{r,mean}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	(69) ^c	69 ^c	(65)	-
spezifisches Gewicht ^d	γ_w	$\left[\frac{N}{m^3} \right]$	5.500	5.500	5.500	78.500
char. Rohdichte	ρ_k	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	350	350	385	-
mittlere Rohdichte	ρ_{mean}	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	420	420	420	-

Fortsetzung folgt auf nächster Seite

Tabelle 4: Werkstoffeigenschaften von Balkenstäben der Unterkonstruktion (*Fortsetzung*)

Bezeichnung	Einheit	C24	C24 (quer)	Gl24h	S355	Koppel- stab	
Wärmeaus- dehnungs- koeffizient	$\alpha_{T,0}$	$[\frac{1}{^{\circ}\text{C}}]$	5×10^{-6} ^e	-	5×10^{-6} ^e	12×10^{-6}	-

^a gemäß [ÖNORM EN 338 (2009)]

^b gemäß [ÖNORM EN 14080 (2013)]

^c gemäß [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)], NCI NA.5.6 Allgemeines, (NA.4): »Der Schubmodul für die Rollschub-Bearbeitung darf für Nadelholz und für Brettschichtholz mit $G_{r,mean} = 0,10 \cdot G_{mean}$ angenommen werden.«

^d gemäß [ÖNORM B 1991-1-1 (2011)]

^e gemäß [Neuhaus (2011)], Kapitel 1.5

^f gemäß [ÖNORM EN 1993-1-1 (2014)]

2.3.11 Werkstoffeigenschaften von Starrstäben

Die am Plattenrand einer Holzwerkstoffplatte angeordneten Verbindungsmittel werden in Strategie 1 (siehe zB Abbildung 10) - ebenso wie exzentrisch angeschlossene Bauteile der Unterkonstruktion - durch die Eingabe von „**Starrstäben**“ (in weiterer Folge auch als „Koppelstab“ bezeichnet) im baustatischen Modell berücksichtigt. Im Gegensatz zum Balken- ist der Starrstab biege-, dehn- und schubstarr.

Bei Berechnung des baustatischen Systems im Statikprogramm RFEM kommt es jedoch unter Verwendung dieses Stabtyps oftmals zu einer numerisch bedingten **kinematischen Instabilität** und einem vorzeitigen Abbruch der Berechnung. In der aktuell gültigen Implementierung werden dem **Starrstab** vom Statikprogramm **unverhältnismäßig hohe Stabsteifigkeiten** (EA, EI und GA) zugewiesen. Diese erzeugen bei Berechnung des baustatischen Systems - durch numerische Auslöschung - eine singuläre Steifigkeitsmatrix (d.h. die Determinante der Steifigkeitsmatrix wird zu null).

Um dies zu vermeiden, werden ersatzweise Balkenstäbe mit numerisch verträglich hohen Stabsteifigkeiten (Werkstoff- und Querschnittsparameter) modelliert.

Die gewählten Werkstoffeigenschaften für Koppelstäbe können der Tabelle 4 entnommen werden.

2.4 Charakterisierung der Verbindungsmittel

2.4.1 Motivation

Dieser Abschnitt der Diplomarbeit soll einen Überblick über die allgemein gültigen **Grundsätze zur baustatisch korrekten Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel** in der Systemstatik geben. Aus [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)], Kapitel 5.1 Allgemeines, können folgende Aussagen bzw. Prinzipien (P) entnommen werden:

- (2) »Das gesamte Verhalten der Konstruktion sollte durch eine Berechnung der Effekte der Einwirkungen mit Hilfe eines linearen Modells (lineares Baustoffverhalten) beurteilt werden.«
- (3) »Bei Konstruktionen, die in der Lage sind, die inneren Kräfte über Verbindungen entsprechender Duktilität umzuverteilen, dürfen elastisch-plastische Methoden zur Berechnung der inneren Kräfte in den Bauteilen verwendet werden.«
- (4)P »Das Rechenmodell zur Bestimmung der inneren Kräfte in der Konstruktion oder in Teilen derselben muss Einflüsse aus der Nachgiebigkeit von Verbindungen berücksichtigen.«
- (5) »Im Allgemeinen sollte der Einfluss der Nachgiebigkeit von Verbindungen durch ihre Steifigkeit (beispielsweise der Verdreh- oder Verschiebungssteifigkeit) oder durch festgelegte Verschiebungsgrößen in Abhängigkeit von der Lasthöhe in der Verbindung berücksichtigt werden.«

Hinsichtlich der unter Punkt (3) erwähnten Nutzbarkeit der Duktilität von Verbindungen ist anzumerken, dass die [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] keine weiteren Hinweise zur Ermittlung von plastischem Tragverhalten der Verbindungsmittel enthält. In dieser Arbeit werden Verbindungen analog zur [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] daher hauptsächlich **linear berechnet**. Grundsätzlich sind Nachgiebigkeiten für eine Vergrößerung der Systemverformungen sowie eine Reduktion der Verzweigungslast von Druckstäben verantwortlich.

Wie in Kapitel 1.1.2 am Beispiel eines Plattenstoßes bereits erwähnt, kann grundsätzlich zwischen direkten und indirekten Verbindungen unterschieden werden. Bei **direkten Verbindungen** erfolgt die Kraftübertragung - in Abhängigkeit von der Fugenbreite - über Druckkontakt und Reibung. Diese Art der Kraftübertragung wird im Rahmen der Diplomarbeit bei Plattenstoßen jedoch vernachlässigt. Im Gegensatz zu direkten übertragen **indirekte Verbindungen** die Kräfte zB über stiftförmige Verbindungsmittel (zB Nägel). In Abbildung 11 sind experimentell ermittelte Nachgiebigkeiten von stiftförmigen Verbindungsmittel dargestellt. Abweichend zu den in [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] vereinfacht angegebenen linear-elastischen Nachgiebigkeiten, enthalten die einzelnen Arbeitslinien ($\hat{=}$ Last-Verformungs-Kurve) auch ausgeprägte nichtlineare Bereiche.

2.4.2 Aspekte der baustatischen Modellbildung

Die Nachgiebigkeit von Verbindungen kann experimentell oder mithilfe von numerischen Submodellen bestimmt werden. Es besteht außerdem die Möglichkeit die Nachgiebigkeit unter Zuhilfenahme der Bemessungsschnittgrößen abzuschätzen.

Bei der Ermittlung sind folgende **Prinzipien (P)** gemäß [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)], Kapitel 5.3 Verbindungen, zu beachten:

- (2)P »Die Verformung der Verbindung muss mit der bei der Gesamtberechnung angenommenen Verformung im Einklang stehen.«

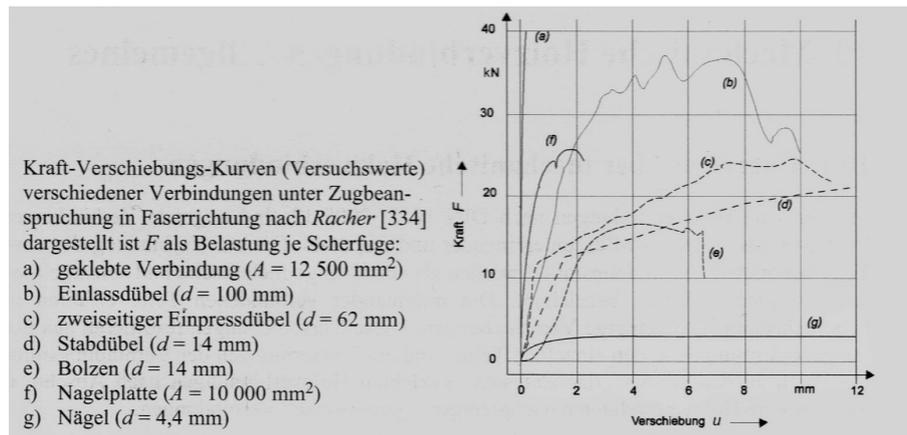


Abbildung 11: Kraft-Verschiebungs-Kurve (Versuchswerte) verschiedener Verbindungsmittel aus [Neuhaus (2011)]

(3)P »Die Berechnung einer Verbindung muss das Verhalten aller Elemente berücksichtigen, die die Verbindung bilden.«

Weitere Information zu metallischen Verbindungsmitteln können aus Kapitel 8 der schon zuvor erwähnten [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] entnommen werden.

Die Implementierung nachgiebiger Verbindungen im baustatischen Modell erfolgt in Form von **Dehn-** (K_v) **und Drehfedersteifigkeiten** (K_ϕ) an Stabend- bzw. Liniengelenken aber auch an Auflagern. Dem Stabendgelenk können Dehn- und Drehfedersteifigkeiten normal und parallel zur Stabachse zugewiesen werden. Dem Liniengelenk können Dehnfedersteifigkeiten parallel und normal zur Linie und Drehfedersteifigkeiten mit Richtung der Drehachse parallel zur Linie zugewiesen werden.

Die **Anordnung des Stab- bzw. Liniengelenks** ist von der geometrischen Ausführung der Verbindung (zB Anordnung der einzelnen Verbindungsmittel) und dem Verbindungstyp (zB Nägel) abhängig. Speziell bei Stabendgelenken orientiert sich die Lage zB bei stiftförmigen Verbindungsmitteln mit linear elastischen Materialverhalten am Schwerpunkt der Verbindungsmittelgruppe. Vorteil dieser Anordnung ist, dass die Arbeitslinien der Dehn- und Drehfedern voneinander entkoppelt sind. Bei Unterstellung eines plastischen Materialverhaltens verschiebt sich der Ruhepol des Verschiebungsfeldes bei Belastung permanent und befindet sich dementsprechend nicht mehr im Schwerpunkt. Der Vorteil von entkoppelten Arbeitslinien ist somit nicht mehr gegeben.

2.4.3 Aspekte der Steifigkeit

Durch die Gestaltung bzw. Konstruktion von Verbindungen kann bestimmt werden, welche Schnittgrößen (Normalkraft, Querkraft und Moment) vom Stabend- bzw. Liniengelenk oder Auflager übertragen werden. Die **Steifigkeit der Verbindung** wird mit **Kraft-Verschiebungs-** bzw. **Momenten-Rotations-Beziehungen** (siehe Abbildung 12) beschrieben. Jeder Schnittgröße kann dabei eine Arbeitslinie zugeordnet werden.

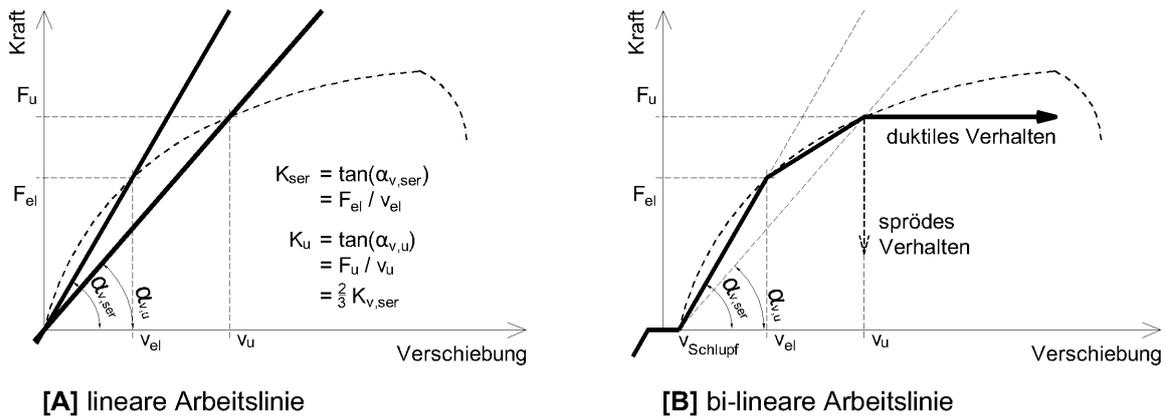


Abbildung 12: Kraft-Verschiebungs-Beziehung einer Verbindung

Die **lineare Arbeitslinie** entspricht dem Konzept der [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)]. Sowohl im Gebrauchslastzustand (SLS) als auch im Traglastzustand (ULS) wird jeweils eine eigene lineare Kraft-Verschiebungs-Beziehung (entspricht dem Sekantenmodul) ohne Nachbruchverhalten unterstellt. K_{ser} aus Abbildung 12 beschreibt das linear elastische Tragverhalten der Verbindung im SLS und K_u das Ende des Übergangsbereiches zum plastischen Tragverhalten im ULS. Die unterschiedlichen Steifigkeiten im SLS- und ULS-Fall können durch einen normativ vorgegebenen Faktor - zur Reduktion der Steifigkeit - in der Lastfallkombination (im Statikprogramm RFEM) berücksichtigt werden.

Vorteil einer linearen Arbeitslinie ist ihre einfache Formulierung. Dem ist jedoch entgegenzusetzen, dass das Verschiebungs- und duktile Tragverhalten der Verbindungen über- bzw. unterschätzt werden kann. Daraus resultiert weiters eine Fehleinschätzung des Verformungsverhaltens sowie der Umlagerung von Schnittgrößen in der Konstruktion.

Die **tri-lineare Arbeitslinie** ist nicht in der [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] verankert. Diese unterstellt ein linear elastisches und plastisches Tragverhalten der Verbindung unter einer situations- bzw. konstruktionsbedingten noch zu ergänzenden Berücksichtigung des Nachbruchverhaltens (zB Sprödbbruch, Plastizität oder Verfestigung). Im Gegensatz zur ersten Variante wird für den SLS- und ULS-Fall nur eine tri-lineare Arbeitslinie benötigt.

Das elastische Tragverhalten wird in Abbildung 12-[B] durch die elastische Kraft F_{el} begrenzt. In der [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] (gemäß 12-[A]) ist allerdings keine Limitierung der **elastischen Tragfähigkeit** vorgesehen.

Der Übergangsbereich zum plastischen Tragverhalten wird durch F_u dargestellt. Zur Bestimmung von F_u können die in der [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] enthaltenen Regelungen zur Berechnung der **charakteristischen Tragfähigkeit** F_{Rk} der Verbindung herangezogen werden. Im Sinne einer ausgewogenen Schnittgrößenverteilung (bzw. Umlagerung) sollte jedoch besser der **Mittelwert der Tragfähigkeit** $F_{R,mean}$ herangezogen

gen werden.

2.4.3.1 Verschiebungsmodul K_{ser}

Das linear elastische Tragverhalten eines stiftförmigen Verbindungsmittels einer einschnittigen Holz-Holz-Verbindung wird mit dem Verschiebungsmodul K_{ser} aus Tabelle 5 beschrieben. Es wird angenommen, dass die Ermittlung von K_{ser} unabhängig von der Faserrichtung erfolgt.

Tabelle 5: Auszug aus [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)], Tabelle 7.1 - Werte für K_{ser} für stiftförmige Verbindungsmittel und Dübel besonderer Bauart in N/mm für Holz-Holz und Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen

Verbindungsmittel	K_{ser}
Stabdübel Bolzen mit oder ohne Lochspiel ^a Schrauben Nägel (vorgebohrt)	$\rho_m^{1,5} d/23$
Nägel (nicht vorgebohrt)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
Klammern	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/80$
Ringdübel Typ A nach EN 912 Scheibendübel Typ B nach EN 912	$\rho_m d_c/2$
Scheibendübel mit Zähnen: – Dübeltyp C1 bis C9 nach EN 912 – Dübeltyp C10 und C11 nach EN 912	$1,5 \rho_m d_c/4$ $\rho_m d_c/2$
^a Das Lochspiel ist zusätzlich zu der Verschiebung hinzuzurechnen.	

Gemäß [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)], Kapitel 7.1 Nachgiebigkeit der Verbindungen, ist bei der Bestimmung des Verschiebungsmoduls folgendes zu beachten:

- (1) »Für Verbindungen mittels stiftförmiger Verbindungsmittel und Dübel besonderer Bauart sollte der Verschiebungsmodul K_{ser} pro Scherfuge und Verbindungsmittel unter Gebrauchslast der Tabelle 7.1 entnommen werden. ρ_m ist dabei in kg/m^3 und d oder d_c in mm einzusetzen. d_c ist in EN 13271 definiert.«¹³
- (2) »Bei unterschiedlichen mittleren Rohdichten $\rho_{m,1}$ und $\rho_{m,2}$ von zwei miteinander verbundenen Holzwerkstoffteilen ist i.d.R. ρ_m in den o.g. Ausdrücken mit $\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \cdot \rho_{m,2}}$ anzunehmen.«
- (3) »Bei Stahlblech-Holz- oder Beton-Holz-Verbindungen sollte K_{ser} mit dem Faktor 2,0 multipliziert werden.«

Gemäß [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)], Kapitel 8.1.2 Verbindungen mit mehreren Verbindungsmitteln, ist außerdem noch zu beachten:

¹³Vergleichbare Werte des Verschiebungsmoduls sind gemäß [Neuhaus (2011)], Tabelle 10.2 zu entnehmen.

- (3) »Besteht eine Verbindung aus einer Kombination verschiedener Arten von Verbindungsmitteln oder ist die Steifigkeit der Scherfugen einer Verbindung mit vielen verschiedenen Scherfugen unterschiedlich, dann sollte das gemeinsame Tragverhalten unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit nachgewiesen werden.«

Nachgiebigkeiten weiterer Verbindungsmittel, wie beispielsweise Nagelplatten oder Schrauben (Beanspruchung in Schraubenachse), können zumeist den Produktzulassungen entnommen werden.

2.4.3.2 Verschiebungsmodul K_u

Das Ende des Übergangsbereichs zum plastischen Tragverhalten wird mit dem Verschiebungsmodul K_u beschrieben. Die Ermittlung von K_u folgt dem Kapitel 2.2.2, Grenzzustände der Tragfähigkeit, aus der [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)]:

- (2) »Der Verschiebungsmodul einer Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS), K_u , ist in der Regel anzunehmen mit:«

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (2.25)$$

2.4.4 Spezifikation der eingesetzten Verbindungsmitteltypen

In Anlehnung an das spätere Projekt werden in der nachfolgenden Tabelle die dort eingesetzten Verbindungsmitteltypen näher spezifiziert.

Tabelle 6: Nachgiebigkeiten $K_{ser,i}$ und k_{ser} von Verbindungsmittel

Verbindungsmittelbez.	d	e	$\rho_{m,1}^a$	$\rho_{m,2}^a$	$K_{ser,i}$	k_{ser}		
	[mm]	[mm]	[-]	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	[-]	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\left[\frac{N}{mm}\right]$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Doppelgewinde-schraube	6,50	800	C24	420	-	-	1.870	-
	8,20	800	C24	420	-	-	2.350	-
Kammnagel	4,00	-	C24	420	S ^e	420	870	-
Klammer verzinkt	1,53	70	C24	420	OSB	630 ^b	210	3,00
		70	C24	420	GFP ^c	1.323 ^{b,f}	360	5,10
		150	C24	420	GFP ^c	1.323 ^{b,f}	360	2,40
Nagel	3,10	80	C24	420	3S ^d	420	710	8,90

Fortsetzung folgt auf nächster Seite

Tabelle 6: Nachgiebigkeiten $K_{ser,i}$ und k_{ser} von Verbindungsmittel (Fortsetzung)

Verbindungs- mittelbez.	d	e	$\rho_{m,1}$	$\rho_{m,2}$	$K_{ser,i}$	k_{ser}		
	[mm]	[mm]	[-]	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	[-]	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\left[\frac{N}{mm}\right]$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Teller- kopfschraube	8,00	-	C24	420	-	-	2.990	-
Teilgewinde- schraube	8,00	-	C24	420	-	-	2.990	-
	10,00	-	C24	420	-	-	2.870	-
	12,00	-	C24	420	-	-	3.400	-
Vollgewinde- schraube	8,00	-	C24	420	-	-	2.990	-

^a Der Mittelwert der Rohdichte ρ_m von Holz bzw. Holzwerkstoffen kann aus den Tabellen 1 und 4 entnommen werden.

^b gemäß [ÖNORM B 1995-1-1 (2015)], Kapitel 7.1

»Wird in den Europäischen Normen für Holzbauprodukte die Rohdichte als charakteristischer Wert ρ_k angegeben, darf der Mittelwert der Rohdichte ρ_m wie folgt berechnet werden: $\rho_m = 1,15 \cdot \rho_k$.«

^c gemäß Firma Xella Trockenbau-Systeme GmbH, Europäische Technische Zulassung ETA-03/0050, Gipsfaserplatte (GFP), Plattendicke 12,5mm

^d Die Abkürzung 3S steht für 3-Schichtplatte.

^e Die Abkürzung S steht für Stahlblech.

^f Zur Berechnung von ρ_m wird die Gipsfaserplatte (GFP) als Holzbauprodukt angenommen.

„d“ entspricht dem Nenndurchmesser und „e“ dem Regelabstand des Verbindungsmittels. „ $K_{ser,i}$ “ gibt die Nachgiebigkeit von einzelnen Verbindungsmittel und „ k_{ser} “ die Nachgiebigkeit pro Laufmeter von hintereinander angeordneten Verbindungsmittel an ($k_{ser} = \frac{K_{ser,i}}{e}$).

2.4.5 Aspekte der Modellbildung und Bemessung

Gemäß [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)], Kapitel 8 Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln, werden **Einzelverbindungsmittel** nach der JOHANSEN-Theorie bemessen.

Für die Bemessung von **Verbindungsmittelgruppen** sieht Kapitel 5.3 Verbindungen der [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] folgendes Prinzip vor:

(1)P »Die Tragfähigkeit der Verbindungen ist unter Berücksichtigung der Kräfte und Momente nachzuweisen, die aufgrund der Berechnung für die gesamte Konstruktion zwischen den zu verbindenden Teilen herrschen.«

Für die Bemessung sind außerdem noch folgende Kapitel allgemein relevant:

- ☉ [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)], Anhang A
Blockscherversagen von Verbindungen,
- ☉ [ÖNORM B 1995-1-1 (2015)], Anhang E
Zimmermannsmäßige Verbindungen,
- ☉ [ÖNORM B 1995-1-1 (2015)], Anhang G
Verstärkungen für Queranschlüsse und Ausklinkungen sowie querzuggefährdete Bereiche bei Satteldachträgern und gekrümmten Trägern,
- ☉ [ÖNORM B 1995-1-1 (2015)], Anhang I
Verbindungen mit eingeklebten Stahlstäben.

2.5 Kriterien für die Eignung der Modellierungsstrategien

Wie bereits erwähnt, kommen unterschiedliche Strategien zur Modellierung von Holzwerkstoffplatten zur Anwendung. Aus den schon beschriebenen Strategien lassen sich unterschiedliche Systeme im Plattenverbund generieren. Diese variieren unter anderem durch die Anordnung der Platten im Plattenverbund oder durch die Befestigung der Einzelplatte an die Unterkonstruktion.

Die aus den Strategien 1 und 2 **generierten Systeme werden anhand bestimmter Kriterien mit den Referenzsystemen (Strategie 3) verglichen**. Durch den Vergleich soll überprüft werden, ob die unterschiedlichen Strategien zur statischen Modellierung geeignet sind.

Der Fokus wird hierbei auf folgende Kriterien gelegt:

- ☉ Gleichwertigkeit der Systemverformungen
- ☉ Gleichwertigkeit der bemessungsrelevanten Schnittgrößen und Spannungen
- ☉ Gleichwertigkeit der Auflagerkräfte bei statisch unbestimmt gelagerten Deckenscheibensystemen
- ☉ Gleichwertigkeit bzw. direkte Ablesbarkeit der Verbindungsmittelkräfte
- ☉ Bemessung der Einzelbauteile (z.B. Balken, Verbindungsmittel, Holzwerkstoffplatten)
- ☉ Einfache Dokumentationsmöglichkeiten

2.6 Stufe 1: Einzelplatte

2.6.1 Grundsätzliches

In diesem Kapitel wird der Fokus auf die einzelne Holzwerkstoffplatte der Beplankung - als kleinstmögliches baustatisches Element der Substruktur - gelegt.

Im **ersten Schritt** wird die Werkstoffplatte nach den Grundsätzen von System 1 (siehe Kapitel 2.6.2) und 3 (siehe Kapitel 2.6.4) modelliert, wobei System 3 als Referenzmodell gilt. Im **zweiten Schritt** wird die Platte mit drei unterschiedlichen Lastfällen beansprucht. Abschließend erfolgt in einem **dritten Schritt** die Validierung der Ansätze durch Abgleich der Ergebnisse des Referenzmodell mit denen aus System 1.

Für die Modellierung der einzelnen Platte gemäß System 1 und 3 (siehe Abbildung 14 und 20) sind in diesem Kapitel für Stufe 1 folgende Punkte zu beachten:

- ⊗ Die in Abbildung 14 und 20 entlang der horizontalen Achsen A und B dargestellten Auflager werden in Stufe 1 nicht berücksichtigt. Somit wird unterstellt, dass die Platte ausschließlich entlang der vertikalen Achsen 1 bis 4 gelagert ist.
- ⊗ Die direkte Lasteinleitung erfolgt ausschließlich am Plattenrand (entlang der Achsen A und B).
- ⊗ Die Unterkonstruktion wird als starr angenommen.
- ⊗ Die Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Unterkonstruktion werden hingegen berücksichtigt.

2.6.2 Strategie 1

2.6.2.1 System 0: Schubkreuzmodell

System 0 basiert auf den Annahmen der Schubfeldtheorie¹⁴. Im Wesentlichen besagt die Theorie, dass Scheibennormalkräfte von der Unterkonstruktion und Scheibenschubkräfte von der Beplankung aufgenommen werden. Dies setzt voraus, dass alle Plattenränder der Beplankung durch die Unterkonstruktion begrenzt sind (keine freien Plattenränder) und zwischen Platte und Unterkonstruktion lediglich Schubkräfte übertragen werden können.

Die Beplankung wird, wie in Abbildung 13 ersichtlich, im System 0 durch Schubkreuze (Querschnitt 4 und 5) ersetzt. Die Merkmale eines Schubkreuzes sind die biegesteife Verbindung des Balkenstabes (Querschnitt 4) mit dem Koppelstab (Querschnitt 5) sowie das ausschließliche Übertragen von Querkraften (Scheibenschubkräften, $N=M=0$) an den Stabenden. Diese sind in Abbildung 13 mit B und C gekennzeichnet. Während Auflager B und C.1 Nachgiebigkeiten ($u_y = k_{ser} \cdot \text{Länge}$, k_{ser} siehe Tabelle 6) zwischen Beplankung und Unterkonstruktion berücksichtigen, stellt Gelenk C.2 eine starre Verbindung zweier Schubkreuze im Platteninneren dar.

Aufgrund der angenommenen Vernachlässigung von Auflagern entlang der Achsen A und B (siehe Kapitel 2.6.1 Grundsätzliches), weist das System 0 bei der Modellierung in Stufe 1 Instabilitäten (u.a. kein Systemgleichgewicht) auf. Somit kann ein **sinnvoller Systemvergleich erst in Stufe 2** (Plattenverbund) erfolgen.

¹⁴gemäß [Holztafelbau VO (2010)], Kapitel 6 bzw. [Hall (2012)], Kapitel 1.2

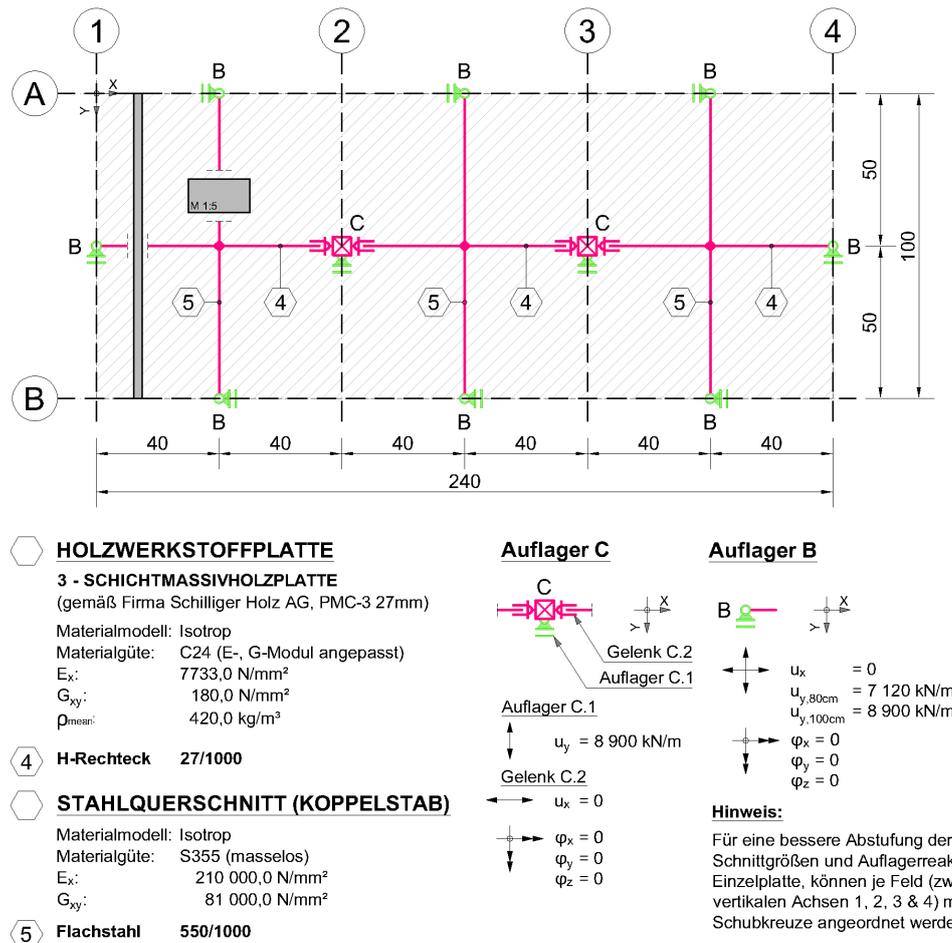


Abbildung 13: Dreifeldträger: Stufe 1: Strategie 1 - System 0

2.6.2.2 System 1: Rahmenmodell

Bei Anwendung von **System 1** stellen **freie Plattenränder grundsätzlich kein Problem** dar.

Die Beplankung besteht aus mehreren Rahmen, welche aus einem zentralen Balkenstab (Querschnitt 6) und mehreren starren Koppelstäben (Querschnitte 7) zusammengesetzt ist. Rahmenmodelle werden als Sub-System zur Modellierung von Einzelplatten als wandartige Träger eingesetzt. Wie aus der Abbildung 14 erkennbar, erfüllen **Koppelstäbe die Funktion**, den Balkenstab mit aus seiner Sicht exzentrisch angeordneten Verbindungsmitteln zu verknüpfen. Somit können Normal- und Querkräfte, welche auf die Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Unterkonstruktion wirken, durch Koppelstäbe auf die Balkenstabachse - wie exzentrisch angreifende äußere Kräfte - übertragen werden.

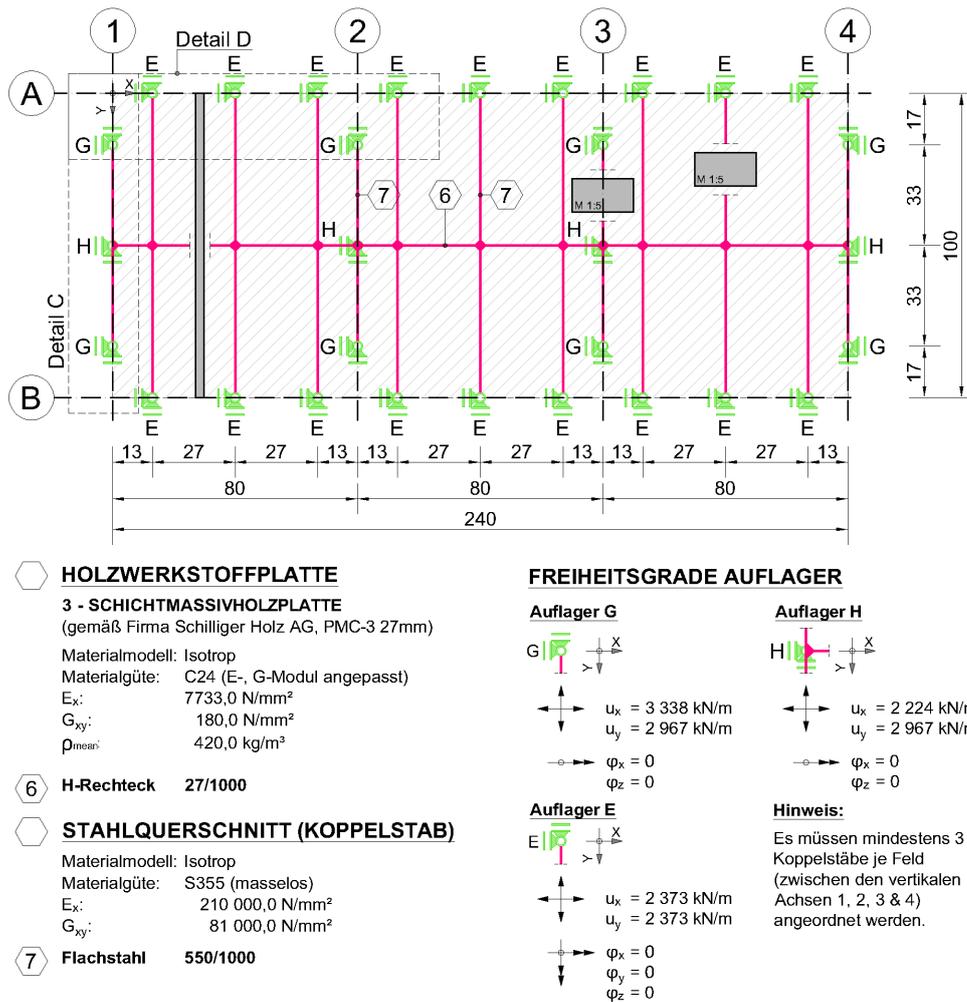


Abbildung 14: Dreifeldträger: Stufe 1: Strategie 1 - System 1

A Motivation zur Modellierung von Verbindungsmittel

Die Art der Modellierung von Verbindungsmitteln zwischen Beplankung und Unterkonstruktion ist je nach gewählter Strategie unterschiedlich. Sowohl die Modellierung am Stab- (Strategie 1) als auch am Flächenmodell (Strategie 3) besitzt einige **Vor- und Nachteile**.

Stabmodell:

- Die Nachgiebigkeiten der Stabgelenke ändern sich aufgrund von unterschiedlichen Plattenformaten und der unregelmäßigen Unterkonstruktion (variabler Balkenabstand).
- Die resultierenden Verbindungsmittelkräfte am Rahmenmodell (siehe Abbildung 17 und 19) sind zum Zweck der Auswertung auf Einzelverbindungsmittelkräfte umzurechnen.
- + Der Kraftfluss innerhalb einer Wand- und Deckenscheibe kann direkt abgelesen und verfolgt werden.

- + Die Scheibenschnittgrößen und Verbindungsmittelkräfte (Anschlusskräfte) können durch die Koppel- und Balkenstäbe einfach und übersichtlich dokumentiert werden.

Flächenmodell:

- + Die Nachgiebigkeiten der Liniengelenke ändern sich trotz unterschiedlicher Plattenformate und unregelmäßiger Unterkonstruktion nicht.
- + Die Einzelverbindungsmittelkräfte können direkt am Liniengelenk abgelesen werden. Voraussetzung ist, dass die angewendete Statiksoftware eine entsprechende Funktion hierfür vorsieht.
 - Das Ablesen und Verfolgen des Kraftflusses innerhalb einer Wand- und Deckenscheibe gestaltet sich als aufwändig und unübersichtlich, speziell im Umgang mit Singularitäten ($\hat{=}$ Spannungsspitzen).
 - Die Dokumentation der Scheibenschnittgrößen und Verbindungsmittelkräfte (Anschlusskräfte) ist relativ zeitintensiv.
 - Die Eingabe von und das anschließende Berechnen mit Liniengelenken ist mit der Statiksoftware RFEM zurzeit fehleranfällig (siehe Kapitel 1.4).

Nachfolgend wird die Modellierung von Verbindungsmitteln am Stabmodell zwischen Beplankung und Unterkonstruktion entlang der Plattenschmal- und Plattenlängsseite vorgestellt.

B Verbindungsmittel entlang der Plattenschmalseite

B.1 BAUSTATISCHE MODELLBILDUNG MITTELS RESULTIERENDER SCHNITTGRÖSSEN

Die **Modellierung der Verbindungsmittel (Nägel) zwischen Beplankung am Plattenrand und Unterkonstruktion** wird mittels Detail C (siehe Abbildung 14) näher beschrieben.

Beispielhaft wird hier in einem **ersten Schritt** (siehe Abbildung 15) der Plattenrand einer kleinformatischen Platte entlang der Achse 1 betrachtet, welcher durch die gleichmäßig angeordneten Verbindungsmittel normal und parallel zur Achse 1 kontinuierlich gelagert wird. Diese Linienlagerung weist aufgrund der Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel eine Federsteifigkeit k_{ser} auf, welche wiederum jeweils normal und parallel zum Plattenrand wirkt. Das Linienlager (Verbindungsmittel) wird durch **drei unterschiedlich linearisierte Reaktionskräfte** - im Detail C mit f_M , f_N und f_V bezeichnet - beansprucht. Diese können unter der Annahme einer linearen Verschiebung des Plattenrandes um eine Einheit „1“ berechnet werden (siehe Formel (2.26) unter Berücksichtigung der Tabelle 6). Die Reaktionskraft f_M ergibt aufsummiert das **Moment (M)**, f_N die **Normalkraft (N)**, und f_V die **Querkraft (V)**.

Detail C - Schritt 1

Federsteifigkeit entlang der Plattenschmalseite

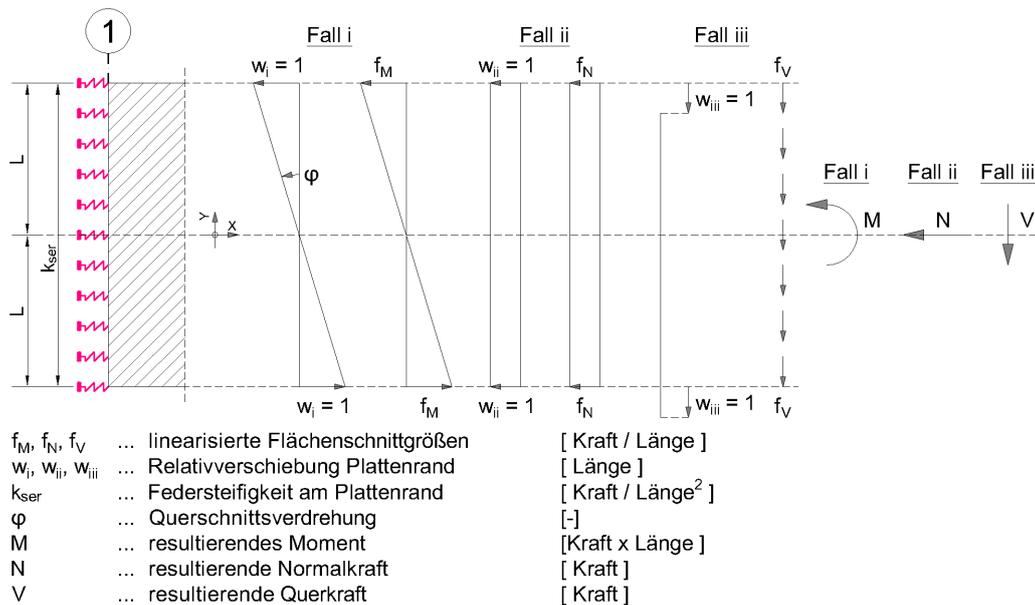


Abbildung 15: Reaktionskräfte zur Unterkonstruktion: Stufe 1: Strategie 1 - System 1, Detail C, Schritt 1

Reaktionskraft f_M an der Plattenschmalseite:

$$f_M = k_{ser} \cdot \varphi \cdot y(L) = k_{ser} \cdot w_i = 8900 \cdot 1,0 = 8900 \frac{kN}{m} \quad (2.26)$$

Im **zweiten Schritt** werden die ermittelten Reaktionskräfte aus **Schritt 1** entlang des Koppelstabes als Belastung aufgebracht (siehe Abbildung 16, Achse 1 (Querschnitt 7) Fall i, ii und iii). Die Federsteifigkeiten des Linienlagers können dadurch mit Hilfe der drei Fälle auf die Punktlager G und H umgerechnet werden (zur Berechnung siehe Formeln (2.27) bis (2.30)). Voraussetzungen für die Umlegung der Federsteifigkeiten sind Koppelstäbe, die eine Starrkörperbewegung verursachen. Zusätzlich wird angenommen, dass die Verschiebung des Koppelstabes (aus Schritt 2) der des Plattenrandes (aus Schritt 1) dem Grunde nach gleicht.

Die **Lage** der beiden **Auflager G** in Abbildung 16 ergibt sich aus **Fall i**. Die in diesem Fall als Belastung aufgebrachte Reaktionskraft f_M besteht aus **zwei Dreieckslasten**, in deren **Schwerpunkte die Auflager im Rahmen der Elastizitätstheorie sinnvollerweise gesetzt werden müssen**. Durch diese Vorgehensweise entstehen im Rahmenmodell zum Teil verkürzte Koppelstäbe, welche jeweils mit dem Auflager G begrenzt sind (wie in Abbildung 14 in Achse 1 bis 4 ersichtlich). Alternativ hätte man auch am Ende des Balkenstabes (Querschnitt 6) eine Drehfeder anbringen können, welche den Koppelstab (Querschnitt 7) und die beiden Auflager am Stabende (Auflager G) ersetzt. Um eine Verzerrung des Schnittkraftverlaufs in der Unterkonstruktion (siehe Stufe 2) zu vermeiden, wurde auf diese Ausführungsvariante verzichtet.

Die **Vorgehensweise zur Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeit** ist aus folgender Lite-

Detail C - Schritt 2

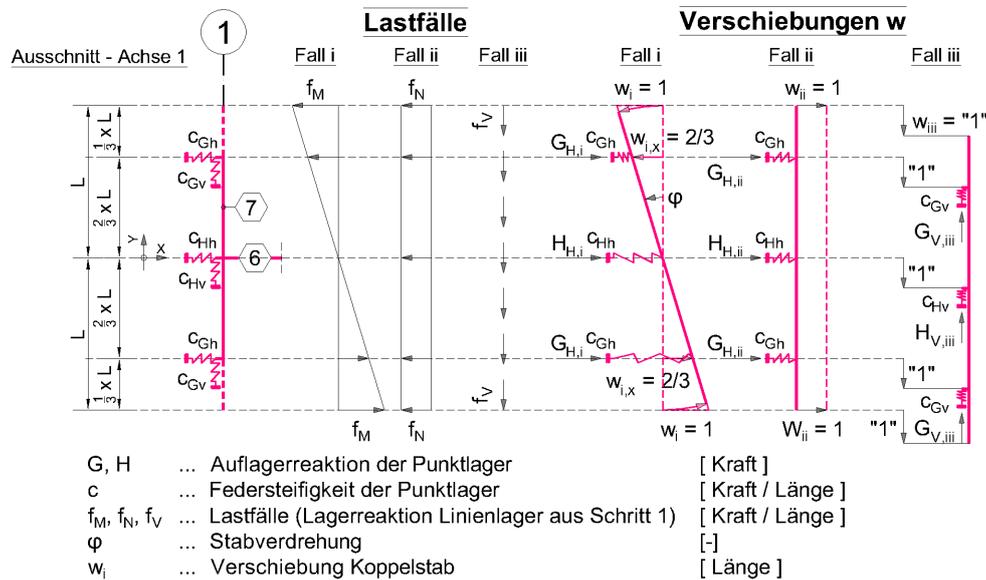
Federsteifigkeiten der Gelenke G & H
am Rahmen- bzw. Stabmodell

Abbildung 16: Stufe 1: Strategie 1 - System 1, Detail C, Schritt 2

ratur entnommen: [Baustatik VO (2011)] Seite 279, Kapitel 15.4.3

Auflagerreaktion $G_{H,i}$:

$$G_{H,i} = f_M \cdot L \cdot \frac{1}{2} = 8900 \cdot 0,50 \cdot \frac{1}{2} = 2225 \text{ kN} \quad (2.27)$$

Federsteifigkeit c_{Gh} :

$$c_{Gh} = \frac{G_{H,i}}{w_{i,x}} = \frac{2225}{\frac{2}{3}} = 3338 \text{ kN} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.28)$$

Federsteifigkeit c_{Hh} :

$$c_{Hh} = k_{ser} \cdot 2 \cdot L - c_{Gh} \cdot 2 = 8900 \cdot 2 \cdot 0,5 - 3338 \cdot 2 = 2224 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.29)$$

Federsteifigkeit c_{Gv} und c_{Hv} :

$$c_{Gv} = c_{Hv} = \frac{k_{ser} \cdot 2 \cdot L}{3} = \frac{8900 \cdot 2 \cdot 0,50}{3} = 2967 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.30)$$

Die **horizontale Federsteifigkeit des Punktlagers H** ergibt sich aus Fall ii. Durch die Belastung mit der Normalkraft entsteht im Gegensatz zu Fall i eine abweichende Verschiebung des Plattenrandes. Da die horizontalen Federsteifigkeiten der beiden Auflager G bereits zuvor bestimmt worden sind, muss die noch fehlende Federsteifigkeit dem Auflager H zugewiesen werden. Wie mit der Formel (2.29) beschrieben, stellt Auflager H somit eine Differenzgröße aus der gesamten Federsteifigkeit der Linienlagerung (aus Schritt 1) abzüglich jener der beiden Auflager G dar.

Die **vertikale Federsteifigkeit der Punktlager G und H** ergibt sich aus Fall iii. Aufgrund der gleichmäßigen Verschiebung kann diese den Auflagern jeweils zu gleichen Teilen zugeordnet werden (siehe Formel (2.30)).

B.2 RÜCKRECHNUNG DER SYSTEMSCHNITTGRÖSSEN AUF BEMESSUNGSRELEVANTE EINZELVERBINDUNGSMITTEL

Die Vorgehensweise zur Rückrechnung für die **Bemessung der Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Unterkonstruktion entlang der Plattenschmalseite** wird mittels Detail C Schritt 3 (Abbildung 17) näher beschrieben.

Hierzu müssen die Auflagerreaktionen der Punktlager A, B und C in Reaktionen einer kontinuierlich gelagerten Platte (vergleiche Linienlager aus Schritt 1) rückgerechnet werden. Die punktuellen Auflagerreaktionen setzen sich aus einer Kombination der Lastfälle i, ii und iii aus Schritt 2 zusammen. Wie aus der Abbildung 17 ersichtlich, wird die Rückrechnung daher in Analogie zu Schritt 2 vorgenommen.

Aus **Fall a** lässt sich erkennen, dass das Auflager B nur eine Normalkraft entlang des Plattenrandes erzeugt. **Fall b** zeigt an, dass die Auflagerreaktionen A und C einerseits als Normalkraft und andererseits als Moment auf den Plattenrand wirken. Durch Addition der beiden **Fälle a + b** lässt sich somit der maximale Verlauf der Kraftkomponenten senkrecht zum Plattenrand ermitteln. Darüber hinaus beschreibt **Fall c** eine gleichmäßige Verteilung der Kraftkomponenten parallel zum Plattenrand. Die finale Rückrechnung der Einzelverbindungsmittelkräfte zwischen Beplankung und Unterkonstruktion ergibt sich aus der Kombination der Fälle a + b und c. Die numerische Rückrechnung kann den Formeln (2.31) bis (2.35) entnommen werden.

$$\text{Fall a:} \quad n_1 = \frac{B_h}{2 \cdot L} \quad (2.31)$$

$$\text{Fall b:} \quad \Sigma H = 0 \implies N_2 = \frac{A_h + C_h}{2} \implies n_2 = \frac{N_2}{L} \quad (2.32)$$

$$\Sigma M = 0 \implies N_3 = \frac{A_h - C_h}{2} \implies n_3 = \frac{N_3 \cdot 2}{L} \quad (2.33)$$

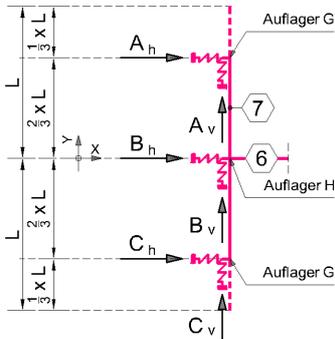
$$\text{Fall a + Fall b:} \quad n_i = n_1 + n_2 + n_3 \quad \text{mit } i = 4, 5 \quad (2.34)$$

$$\text{Fall c:} \quad v_1 = \frac{A_v}{\frac{2}{3} \cdot L} = \frac{B_v}{\frac{2}{3} \cdot L} = \frac{C_v}{\frac{2}{3} \cdot L} \quad (2.35)$$

Detail C - Schritt 3

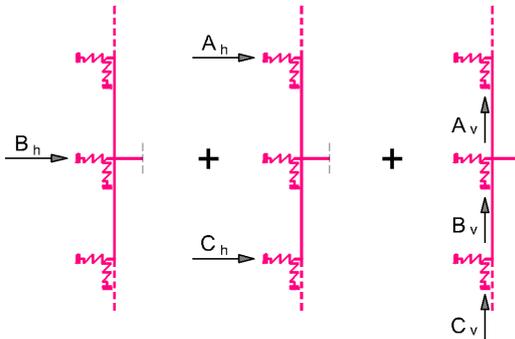
Bestimmung der Verbindungsmittelkräfte entlang der Plattenschmalseite

**AUFLAGERREAKTION
GESAMT**



AUFLAGERREAKTION - EINZELN

Fall a (vgl. Fall ii aus Schritt 2) Fall b (vgl. Fall i + ii aus Schritt 2) Fall c (vgl. Fall iii aus Schritt 2)



RÜCKRECHNUNG DER AUFLAGERREAKTIONEN A, B & C

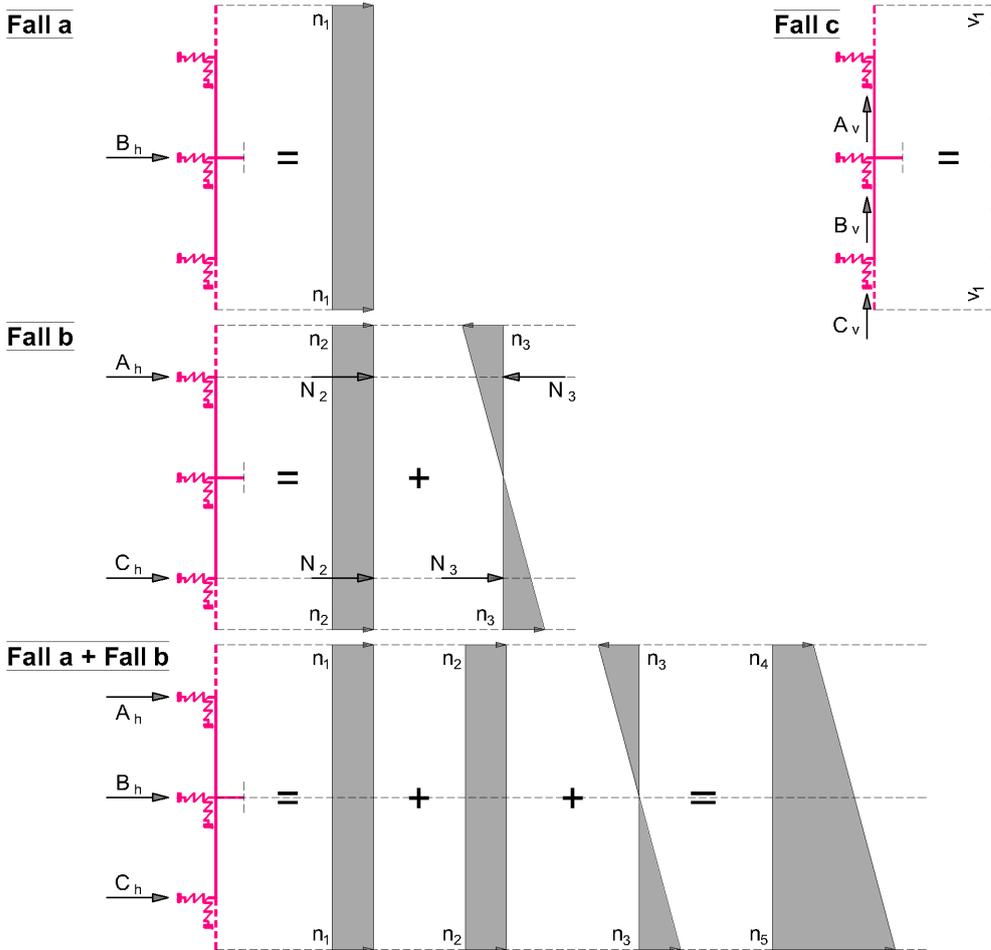


Abbildung 17: Stufe 1: Strategie 1 - System 1, Detail C, Schritt 3

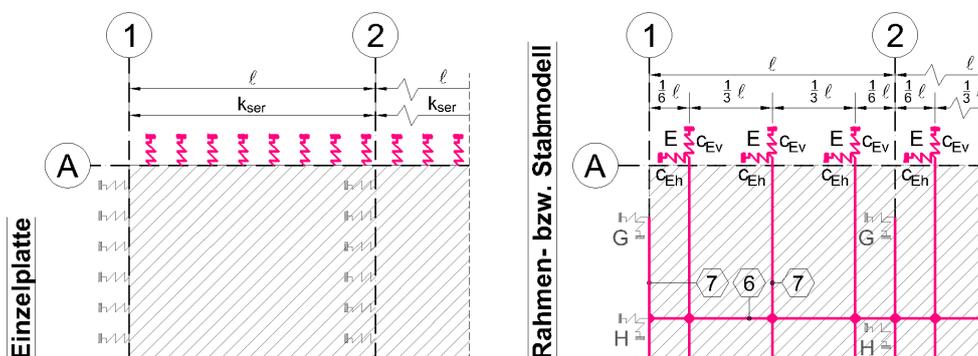
C Verbindungsmittel entlang der Plattenlängsseite

C.1 „KONTINUIERLICHE VERBINDUNG DER PLATTENLÄNGSSEITE MIT EINEM INDIREKTEN STOß“

Abbildung 18 zeigt den Ausschnitt einer Holzwerkstoffplatte, die entlang der Achsen 1, 2 und A kontinuierlich mit der Unterkonstruktion verbunden ist. Analog zu den Ausführungen zur Plattenschmalseite (Achsen 1 und 2) weist auch die Verbindung entlang der Plattenlängsseite (Achse A) aufgrund der Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel (Nägel) eine Federsteifigkeit k_{ser} auf, welche jeweils normal und parallel zum Plattenrand wirkt. Um die Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel auch am Rahmen- bzw. Stabmodell berücksichtigen zu können, muss die Federsteifigkeit der kontinuierlich gelagerten Platte auf jene eines Punktlagers (**Auflager E**) umgerechnet werden. Durch die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Federsteifigkeit (k_{ser}) auf die Punktlager E zwischen Achse 1 und 2, ergibt sich die Einflusslänge ($= \frac{1}{n} \cdot l$) zur Ermittlung der Federsteifigkeiten (c_{Eh} und c_{Ev}) sowie die Lage der Koppelstäbe. (Hinweis: Gilt nur für diese spezielle Anordnung der Koppelstäbe = gleiche Lastezugsbreite je Koppelstab).

Detail D

Federsteifigkeit an der Plattenlängsseite



k_{ser} ... Federsteifigkeit am Plattenrand [Kraft / Länge²]
 c ... Federsteifigkeit der Punktlager [Kraft / Länge]

Abbildung 18: Stufe 1: Strategie 1 - System 1, Konstruktionsvariante „kontinuierliche Verbindung bei einem indirekten Stoß“ entlang der Plattenlängsseite

Die Ermittlung der Federsteifigkeiten c_{Eh} und c_{Ev} eines Punktlagers E kann der Formel (2.36) bzw. (2.37) entnommen werden:

Federsteifigkeit c_{Eh} mit $n =$ Anzahl der Punktlager E zwischen Achse 1 und 2:

$$c_{Eh} = k_{ser} \cdot \frac{1}{n} \cdot l = 8900 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,8 = 2373 \frac{kN}{m} \quad (2.36)$$

Federsteifigkeit c_{Ev} mit $n =$ Anzahl der Punktlager E zwischen Achse 1 und 2:

$$c_{Ev} = k_{ser} \cdot \frac{1}{n} \cdot l = 8900 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,8 = 2373 \frac{kN}{m} \quad (2.37)$$

Abschließend kann darauf hingewiesen werden, dass die Genauigkeit der Berechnung von Scheibenschnittgrößen der Holzwerkstoffplatte mit zunehmender Anzahl von Kopelstäben (Querschnitt 7) zwischen den Achsen 1 und 2 steigt. Dies gilt auch zwischen den übrigen vertikalen Achsen entlang der Plattenlängsseite. Es ist außerdem anzumerken, dass das Raster der Unterkonstruktion dem der Achsen entspricht.

C.2 RÜCKRECHNUNG AUF EINZELVERBINDUNGSMITTEL-BEANSPRUCHUNG

Die Vorgehensweise zur Bemessung der Verbindungsmittel zwischen Bepunktung und Unterkonstruktion entlang der Plattenlängsseite wird mittels Detail D (Abbildung 19) näher beschrieben. Hierzu müssen die punktuellen Auflagerreaktionen der Auflager E in kontinuierliche Auflagerreaktionen rückgerechnet werden. Die punktuellen Auflagerreaktionen setzen sich wie in Abbildung 19 ersichtlich aus Normal- und Querkraft zusammen. Alternativ könnte der treppenartige Verlauf auch durch einen kontinuierlichen Kurvenverlauf approximiert bzw. ersetzt werden.

Detail D

Rückrechnung auf Einzelverbindungsmittel-Bbeanspruchung entlang der Plattenlängsseite

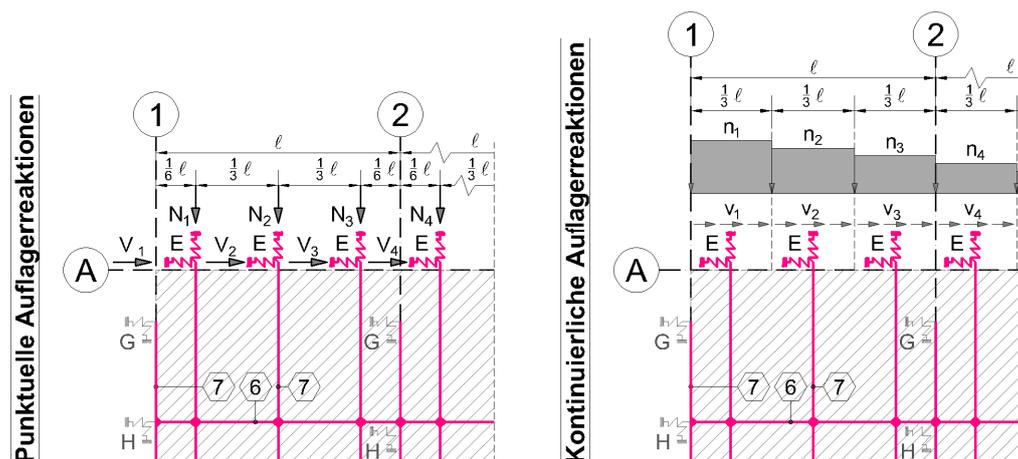


Abbildung 19: Stufe 1: Strategie 1 - System 1, Rückrechnung der Einzelverbindungsmittel entlang der Plattenlängsseite

Die finale Bemessung der Verbindungsmittel ergibt sich aus der Kombination der vertikalen und horizontalen Anteile der kontinuierlichen Auflagerreaktionen. Die numerische Rückrechnung kann den Formeln (2.38) und (2.39) entnommen werden.

Rückrechnung Normalkraft N_i mit $i = 1$ bis n | $n =$ Anzahl der Punktlager E:

$$n_i = N_i \cdot \frac{1}{l} \cdot i \quad (2.38)$$

Rückrechnung Querkraft V_i mit $i = 1$ bis n | $n =$ Anzahl der Punktlager E:

$$v_i = V_i \cdot \frac{1}{l} \cdot i \quad (2.39)$$

2.6.3 Strategie 2: orthotropes Flächenmodell mit reduziertem Schubmodul

Die Grundidee der Strategie zwei wird im Kapitel 2.2 beschrieben. Die Geometrie- und Materialangaben der orthotropen Fläche können der Abbildung 20 aus Kapitel 2.6.4 entnommen werden. Der Unterschied zwischen Strategie zwei und drei liegt darin, dass bei Anwendung der Strategie zwei die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel (Befestigung mit der Unterkonstruktion) ausschließlich durch eine pauschale Reduktion des Schub- (G^*) und E-Moduls (E^*) berücksichtigt wird. Den Linienauflagern aus Abbildung 20 wird somit keine Federsteifigkeit zugewiesen.

Der Vergleich mit anderen Strategien auf Basis einer Einzelplatte erscheint bei Anwendung der zweiten Strategie **nicht geeignet**. Die Auswirkungen des reduzierten Schub- und E-Moduls können erst im Plattenverbund überprüft werden (siehe Kapitel 2.7 Stufe 2: Plattenverbund aus mehreren Einzelplatten).

2.6.4 Strategie 3: orthotropes Flächenmodell mit Nachgiebigkeiten (Referenzmodell)

In Strategie drei können die Flächensteifigkeitskennwerte einer orthotropen Fläche aus Tabelle 2 bzw. Abbildung 20 entnommen werden.

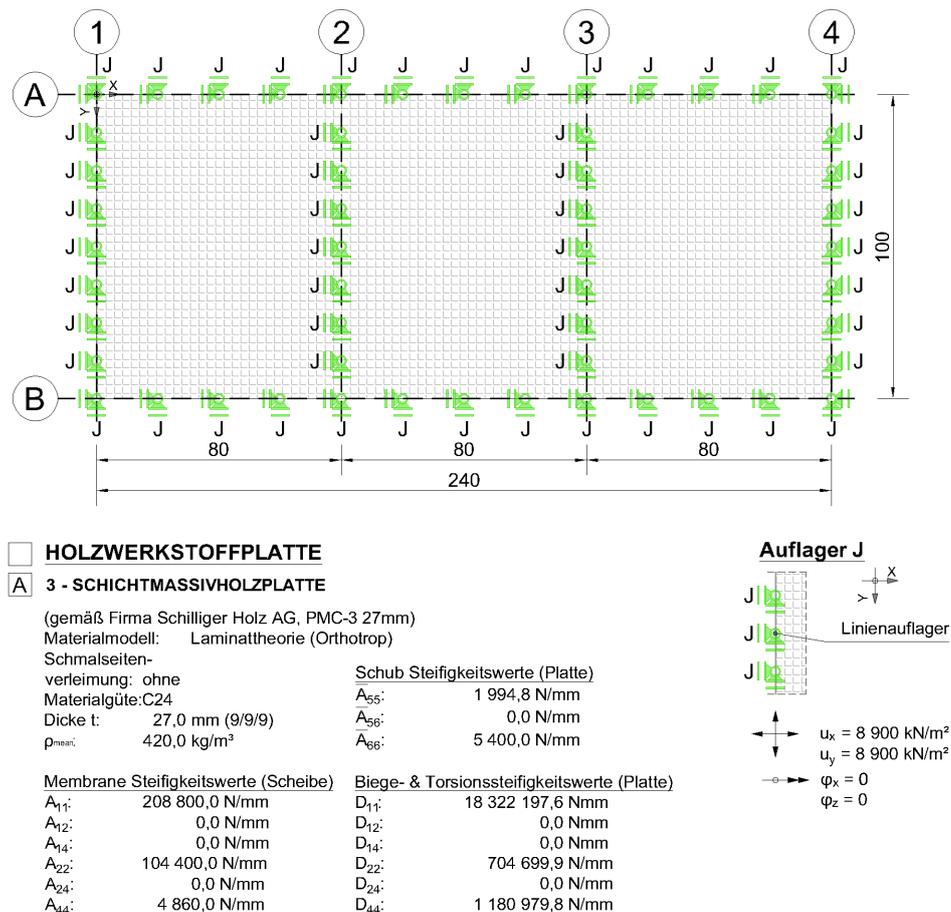


Abbildung 20: Stufe 1: Strategie 3 - System 3

Anders als in Strategie zwei (siehe Kapitel 2.6.3), werden die normal und parallel zum Plattenrand nachgiebigen Verbindungsmittel (Nägel) in Abbildung 20 durch die Linienlager J simuliert. Ebenso können Flächen, zB aufgrund von konzentrierten Anordnungen von Verbindungsmitteln für Schubkräfte am Plattenrand, punktuell gelagert sein. Die Federsteifigkeit k_{ser} der kontinuierlichen Lagerung kann der Tabelle 6 aus Kapitel 2.4.4 entnommen werden.

In Strategie drei stellen, wie schon im System 1 der Strategie eins, freie Plattenränder kein Problem dar.

2.6.5 Lastfälle

In diesem Abschnitt soll die Scheibentragwirkung einer einzelnen Holzwerkstoffplatte der Beplankung anhand dreier Lastfälle näher analysiert werden. Die Lastfälle sind **frei gewählt** und der typischen Beanspruchung einer Einzelplatte im Plattenverbund nachempfunden. Diese belasten die Holzwerkstoffplatte ausschließlich in Scheibenebene. Die Beanspruchung der Holzwerkstoffplatte als Platte (ausgelöst durch zB Eigenlasten und Nutzlasten) wird von der Analyse ausgenommen. Die drei zu untersuchenden Laststeinwirkungen werden als Lastfall 1, 2 und 3 bezeichnet und sind in Abbildung 21 und 22 dargestellt.

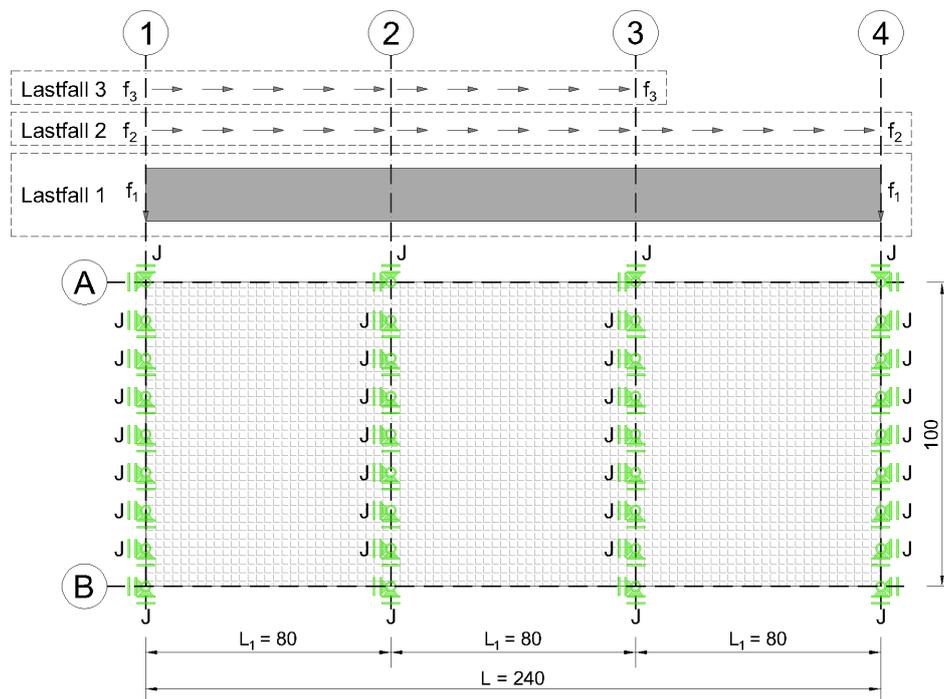


Abbildung 21: Stufe 1: Strategie 3 - System 3, Lastfälle

Lastfall 1 beansprucht die Scheibe normal ($f_1 = 5,0 \text{ kN/m}$) und **Lastfall 2** parallel ($f_2 = 5,0 \text{ kN/m}$) zum oberen Plattenrand. **Lastfall 3** zeigt eine parallele Beanspruchung ($f_3 = 5,0 \text{ kN/m}$) des oberen Plattenrandes, welche jedoch nur entlang der ersten zwei Felder der Holzwerkstoffplatte wirkt.

Bei der Modellierung gemäß System 1 (siehe Abbildung 22) werden Punktlasten auf die Stabenden der Koppelstäbe aufgebracht. Zu Vergleichszwecke wird auch das Flächenmodell aus System 3 an den gleichen Stellen mit den Punktlasten beansprucht. Da dem System 3 grundsätzlich eine kontinuierliche Belastung des Plattenrandes unterstellt wird, ist die Gleichlast aus Abbildung 21 anhand der Formel (2.40) zu einer Punktlast umzurechnen.

Äquivalente Punktlasten F_i ($i = 1, 2, 3$ und $n =$ Anzahl der Koppelstäbe zwischen zwei benachbarten vertikalen Achsen):

$$F_i = f_i \cdot \frac{1}{n} \cdot L_1 = 5,0 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,80 = 1,33 \text{ kN} \quad (2.40)$$

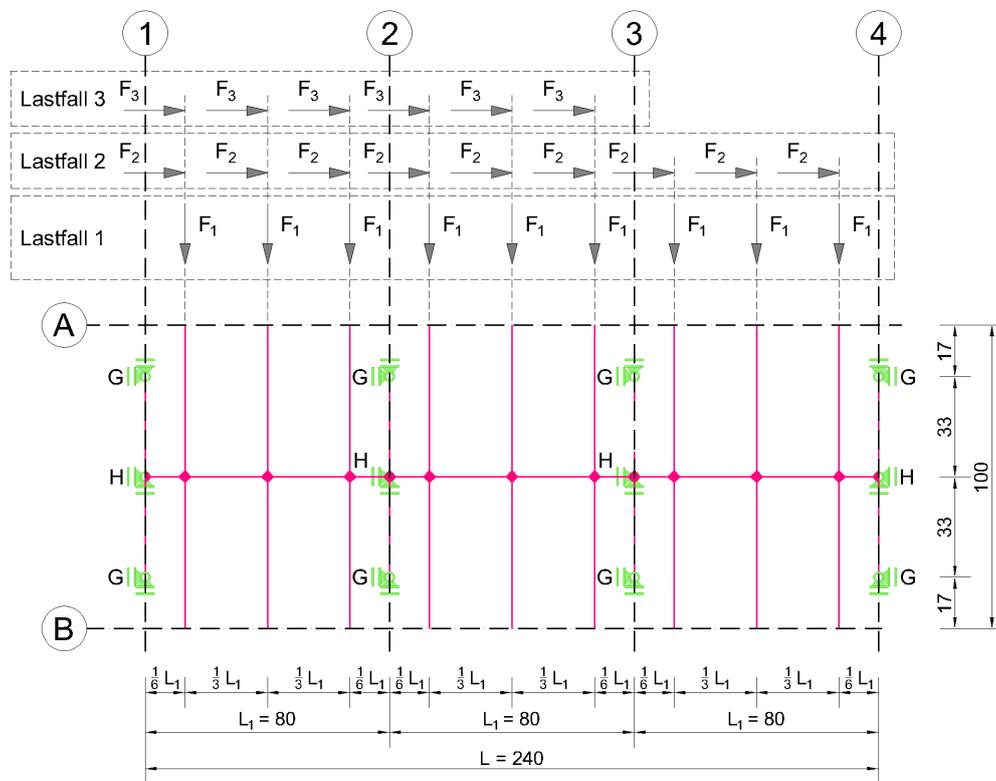


Abbildung 22: Stufe 1: Strategie 1 - System 1, Lastfälle

2.6.6 Gegenüberstellung, Diskussion & Resümee der Ergebnisse

2.6.6.1 Ergebnismatrix

Im Anhang A sind die Berechnungsergebnisse, welche sich aus der Belastung der Systeme 1 und 3 ergeben, in Form einer Ergebnismatrix dargestellt. Die Ergebnismatrix unterteilt sich in drei Teilmatrizen (Lastfall 1, 2 und 3). Eine Teilmatrix besteht jeweils aus drei Zeilen und zehn Spalten.

Zeile A beinhaltet das mit Punktlasten beanspruchte System 1 (Rahmenmodell). Zum besseren Vergleich der Ergebnisse wird System 3 (Flächen- bzw. Referenzmodell) in **Zeile B** ebenfalls mit Punktlasten beansprucht (zur Umrechnung der Gleichlast in Punktlasten siehe Kapitel 2.6.5). **Zeile C** zeigt das mit einer Gleichlast beanspruchte System 3.

In den Spalten der Ergebnismatrix sind die folgenden **Vergleichskriterien** aus Kapitel 2.5 dargestellt:

- ⊗ System und Last
- ⊗ horizontale und vertikale Auflagerreaktionen
- ⊗ horizontale und vertikale Verformungen
- ⊗ Normalkraft, Querkraft und Moment
- ⊗ Normalspannungen und Schubspannungen

2.6.6.2 Diskussion der Ergebnisse

..... A Auflagerreaktionen & Verbindungsmittelkräfte

Im Anhang A sind in **Spalte 2 & 3** die Auflagerreaktionen der Lastfälle 1 & 2 abgebildet.

Bei Betrachtung der Verläufe der **horizontalen und vertikalen Auflagerreaktionen der Zeilen B und C (System 3)** sind kaum Unterschiede zu erkennen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Art der Beanspruchung (Punkt- oder Gleichlast) nur wenig Einfluss auf den Verlauf ausübt.

Um die Verläufe der **Auflagerreaktionen des Systems 3 (Zeile C) mit jenen des Systems 1 (Zeile A)** vergleichen zu können, wurden die punktuellen Auflagerreaktionen des Systems 1 gemäß Kapitel 2.6.2.2 Abbildung 17 in linienförmig verteilte Auflagerreaktionen einer kontinuierlich gelagerten Platte rückgerechnet (siehe manuelle Ergänzung im Anhang A, Zeile A, Spalte 2 und 3).

Nach erfolgter Rückrechnung und Abgleich mit den Auflagergrößen der Linienlager von Zeile C sind Differenzen erkennbar. Im Gegensatz zu System 3 weisen die **horizontalen Auflagerreaktionen** im System 1 einen linearen Verlauf auf. Ebenso nehmen die errechneten Einspannmomente an der Plattenschmalseite unterschiedliche Werte an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der nichtlineare Verlauf der relativen Verschiebung aufgrund der geringen Scheibenschubsteifigkeit (Querschnittsverwölbung) entlang der Verbindungsmittel der Plattenschmalseite nur mittels Flächenmodell korrekt dargestellt werden kann. Mit zunehmender Schubsteifigkeit der Holzwerkstoffplatte relativiert sich der Einfluss der Querschnittsverwölbung und die Auflagerreaktionen aus System 3 nähern sich dem linearen Verlauf aus System 1 an. Die Verläufe der **vertikalen Auflagerreaktionen** der Zeilen A und C weisen ebenfalls Differenzen auf. Zeile A zeigt einen konstanten, Zeile C allerdings einen linearen Verlauf an. Der lineare Verlauf ergibt sich aus dem Einfluss der Dehnsteifigkeit quer zur Haupttragrichtung der Holzwerkstoffplatte, welche wiederum nur im Flächenmodell berücksichtigt werden kann.

Gute Übereinstimmungen liefern hingegen die aufsummierten Werte der horizontalen und vertikalen Auflagerreaktionen entlang der jeweiligen Plattenschmalseite.

Es ist darauf hinzuweisen, dass das **plastische Verformungsvermögen der metallischen Verbindungsmittel** imstande ist, die Verteilung der Auflagerreaktionen in Folge Querschnittsverwölbung bzw. Vernachlässigung der Dehnsteifigkeit quer zur Haupttragrichtung auszugleichen. Die Unterstellung eines linearen bzw. konstanten Verlaufs für horizontale bzw. vertikale Auflagerreaktionen im System 1 führen somit zu einer guten Annäherung an System 3. Die **Ermittlung** der Auflagerreaktionen kann für die weitere Modellierung von Holzwerkstoffplatten demnach **gemäß den vereinfachten Annahmen des Systems 1** erfolgen.

Grundsätzlich können bei Betrachtung einer Einzelplatte die für die **Bemessung von Verbindungsmitteln** relevanten Werte anhand der Auflagerreaktionen direkt abgelesen und dokumentiert werden. Im Gegensatz zu System 3 müssen im System 1 die punktuellen Auflagerreaktionen für die Bemessung jedoch vorab umgerechnet werden. In Stufe 2 aus Kapitel 2.7 (Plattenverbund aus mehreren Einzelplatten) ist die direkte Ablesbarkeit nicht mehr gegeben.

.....
B Verformungen
.....

In den **Spalten 4 und 5** im Anhang A werden die horizontalen und vertikalen Verformungskomponenten der einzelnen Systeme dargestellt.

Bei Abgleich des **horizontalen und vertikalen Verformungsverhaltens der Zeilen B und C (System 3)** ergeben sich für alle Lastfälle nur marginale Differenzen. Analog zu den Auflagerreaktionen kann daraus geschlossen werden, dass sich die Art der Beanspruchung (Punkt- oder Gleichlast) nur wenig auf die Verformung auswirkt.

Bei Betrachtung des **horizontalen Verformungsverhaltens der Zeile A (System 1) und C (System 3)** sind jedoch Abweichungen erkennbar. Während System 3 einen nicht-linearen Verlauf (=Querschnittsverwölbung) entlang der Plattenschmalseite aufweist, verhält sich die Verformung im System 1 aufgrund der starren Koppelstäbe linear. Die schubweichen Scheibensteifigkeiten üben - wie bei den Auflagerreaktionen - somit einen Einfluss auf das Verformungsverhalten aus. Bei größerer Schubsteifigkeit verringert sich der Anteil der Schubverwölbung im System 3, woraus sich eine bessere Übereinstimmung mit System 1 ergibt.

Die **vertikalen Verformungen** der einzelnen Systeme zeigen in den Zeilen A und C eine gute Übereinstimmung der Verformungsfigur. Auch die Größenordnungen der Verformungen weichen kaum voneinander ab. Daraus lässt sich ableiten, dass die Biegesteifigkeiten der Systeme 1 und 3 einander beinahe entsprechen.

Die **Ermittlung** der Verformung von Holzwerkstoffplatten kann daher vereinfacht **auf Basis von System 1** vorgenommen werden. Die **Auswertung und Dokumentation**

kann - sowohl im System 1 als auch im System 3 - direkt am verformten Modell durchgeführt werden.

C Schnittgrößen (N, V & M) und Spannungen

Im Anhang A sind in den **Spalten 6 bis 8** die Schnittgrößen und in den **Spalten 9 und 10** die Spannungen des jeweiligen Lastfalls abgebildet.

Um **System 3 (Zeile B und C) mit System 1 (Zeile A)** vergleichen zu können, müssen die Flächenschnittgrößen mithilfe eines Ergebnisstabes zu Stabschnittgrößen aufintegriert werden. Beim nunmehrigen Abgleich lässt sich erkennen, dass die **Schnittgrößen (N, V & M)** der beiden Systeme keine wesentlichen Differenzen aufweisen. Die Größenordnung aller Schnittgrößen untereinander ist nahezu identisch. Einzig der Verlauf zeigt in Zeile C ein abweichendes Bild, was sich jedoch mit der unterschiedlichen Belastung (Gleichlast anstelle von Punktlast) erklären lässt. Während Punktlasten Sprünge im Schnittkraftverlauf verursachen, erzeugen Gleichlasten einen linearen Verlauf. Dieser Effekt ist zB für Lastfall 1 in Spalte 7 im Anhang A besonders gut ersichtlich. Durch die abschnittsweise Mittelung des linearen Verlaufs der Zeile C kann ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Zeilen A und B erzielt werden.

Die soeben gewonnenen Erkenntnisse aus dem Abgleich der Schnittgrößen können grundsätzlich auch auf den **Vergleich der Spannungen** umgelegt werden, da sich die Normalspannung aus den Schnittgrößen N und M sowie die Schubspannung aus der Querkraft V zusammensetzen (siehe Spalten 9 und 10 im Anhang A). Der **Normalspannungsverlauf** spiegelt global eine sehr gute Übereinstimmung zwischen System 1 und 3 wieder. Einzig Spannungsspitzen, welche in Störbereichen (Auflager und Lasteinleitungspunkte) auftreten, können durch das Stabmodell (System 1) nicht abgebildet werden. Bei Betrachtung der **Schubspannung** lässt sich erkennen, dass diese im System 1 und 3 die gleichen Vorzeichen, jedoch unterschiedliche Größenordnungen besitzen. Dieser Unterschied ergibt sich aus den geringen Scheibenschubsteifigkeiten sowie den durch die Lasteinleitung verursachten Störungen im System 3.

Da die **Bemessung der Holzwerkstoffplatte** grundsätzlich mit Hilfe von Spannungen durchgeführt wird, ist zu beachten, dass bei Anwendung des Systems 1 genügend Koppelelemente zur Gewährleistung eines gleichmäßigen Momentenverlaufs bzw. einer gleichmäßigen Belastung des Plattenrandes vorhanden sind. Bei Nichterfüllung dieses Kriteriums hat die Bemessung über ein Subsystem gemäß System 3 zu erfolgen, in dem auch auf eine gleichmäßige Belastung geachtet werden muss.

2.6.6.3 Resümee

Durch die vereinfachte Modellierung der Einzelplatte gemäß System 1 soll eine **direkte Ablesbarkeit bemessungsrelevanter Werte, Minimierung von Rechenzeiten** im Statikprogramm sowie ein gutes **Verständnis des statischen Systems** vermittelt werden.

Die analysierten Ergebnisse führen zu einer guten Näherung an das Referenzmodell (System 3). Dennoch sollte einem bewusst sein, dass die Stabtheorie (System 1) die Flächentheorie (System 3) nicht vollständig ersetzen kann. Dort, wo das statische System eine genauere Berechnung im Modell fordert, ist die lokale Modellierung einzelner Platten mittels Flächentheorie unerlässlich.

2.7 Stufe 2: Plattenverbund aus mehreren Einzelplatten

2.7.1 Grundsätzliches

In diesem Kapitel der Diplomarbeit soll das Zusammenwirken einzelner Holzwerkstoffplatten im Verbund beleuchtet und die Wirkung der vereinfachten Strategien im Plattenverbund überprüft werden.

In einem **ersten Schritt** werden die einzelnen **Komponenten** des zu untersuchenden **Plattenverbundmodells** näher vorgestellt.

Die Charakterisierung des Plattenverbundmodells hinsichtlich der Plattenanordnung, Plattenstöße und Verbindungen der Unterkonstruktion erfolgt - anhand der **Konstruktionsvarianten** a bis d - im **zweiten Schritt**.

Im **dritten Schritt** wird die **Lagerung** und **Belastung** des Plattenverbundmodells beschrieben.

Im **vierten Schritt** erfolgt die baustatische Modellbildung der **Einzelplatten im Plattenverbund** nach den jeweiligen Grundsätzen der **Strategie eins** (System 0: Schubkreuzmodell bzw. System 1: Rahmenmodell), **Strategie zwei** (System 2: vereinfachtes Flächenmodell) und **Strategie drei** (System 3: Flächen- bzw. Referenzmodell).

Die gewählte Konstruktionsvariante und das eingesetzte System ergeben das zu untersuchende Plattenverbundmodell. Die hier exemplarisch angeführte Bezeichnung »System a.1« kombiniert demnach die Konstruktionsvariante a und die baustatische Modellierung der Beplankung nach System 1.

Abschließend erfolgt in einem **fünften Schritt** die Validierung der Ansätze durch **Abgleich ausgewählter Ergebnisse**.

2.7.2 Konstruktionskomponenten

Die Konstruktionskomponenten sind aus Abbildung 23 ersichtlich. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt des Plattenverbundmodells mit den zugrundeliegenden Querschnittsdimensionen, Werkstoffparametern und Verbindungen. Die detaillierten Werkstoffparameter der Holzwerkstoffplatte können der Tabelle 1 aus Kapitel 2.3.8.3 entnommen werden, jene der Unterkonstruktion sind in Tabelle 4 im Kapitel 2.3.10 enthalten.

Die in Abbildung 23 dargestellte 3-Schichtmassivholzplatte ist durch Nägel mit der Unterkonstruktion verbunden. Die Nachgiebigkeiten von den Verbindungsmitteln sind in Tabelle 6 im Kapitel 2.4.4 abgebildet.

Die in der Unterkonstruktion enthaltenen Querschnitte 1, 2 und 3 werden in weiterer Folge als Deckenbalken, Füllstab und Stoßlasche bezeichnet. Die Füllstäbe sind durch Schwalbenschwanzanschlüsse (limitierte Zugtragfähigkeit) an den Deckenbalken angeschlossen. Die Stoßlaschen stellen ausschließlich den Schubverbund zwischen den Plattenrändern her und sind nicht mit dem Deckenbalken verbunden.

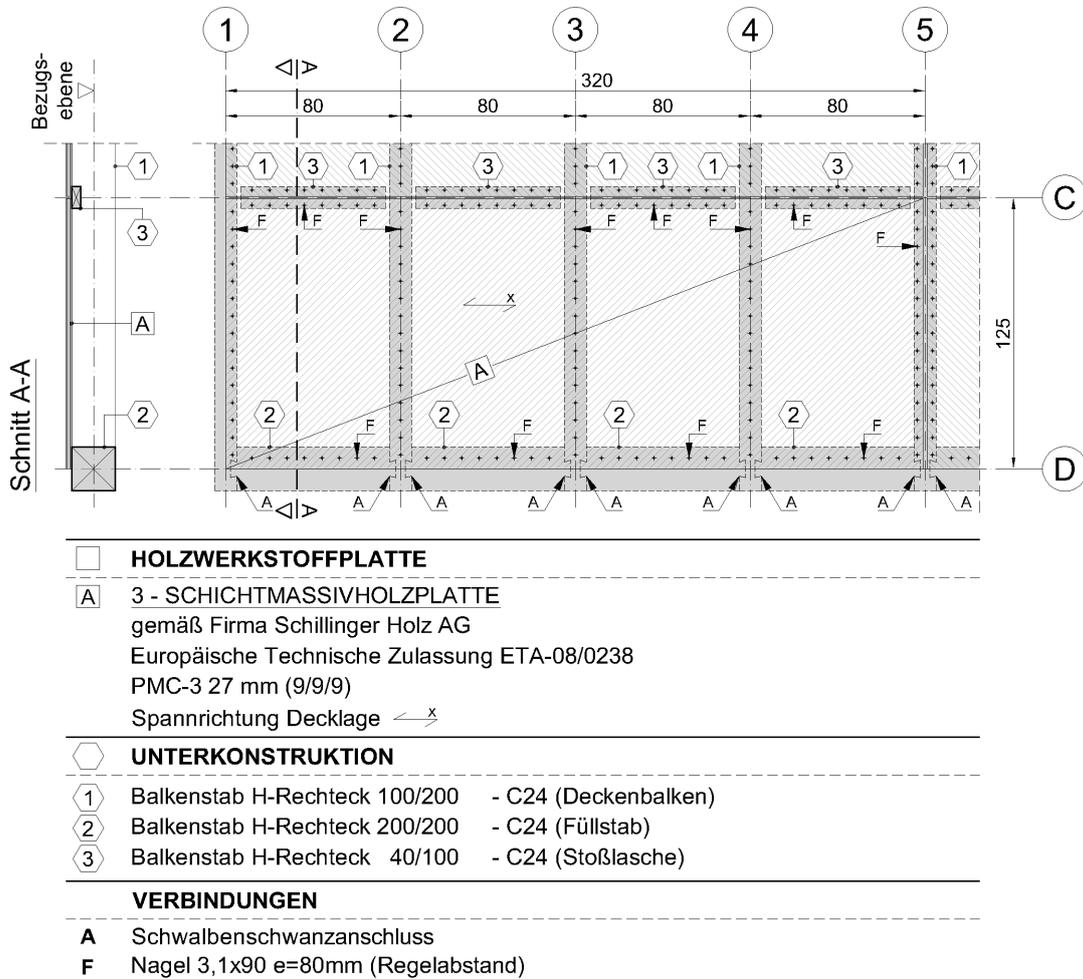


Abbildung 23: Stufe 2: Komponenten der Konstruktion

Die statische Modellbildung der Unterkonstruktion und Beplankung erfolgt grundsätzlich in der aus Abbildung 23 ersichtlichen Bezugsebene. Um Konflikte in der Modellbildung von Strategie eins mit der Unterkonstruktion zu vermeiden, wird die Plattenebene von der Bezugsebene (Unterkonstruktion) geometrisch getrennt. Die Beplankung wird durch möglichst (im Vergleich zur realen Baugeometrie) kurze starre Koppelstäbe mit der Unterkonstruktion verbunden.

2.7.3 Konstruktionsvarianten

Wie bereits eingangs erwähnt, unterscheiden sich die einzelnen Konstruktionsvarianten zur Untersuchung des Plattenverbundes hinsichtlich Plattenanordnung, Plattenstoß

entlang der Plattenlängsseite und Normalkrafttragfähigkeit des Schwalbenschwanzanschlusses der Unterkonstruktion.

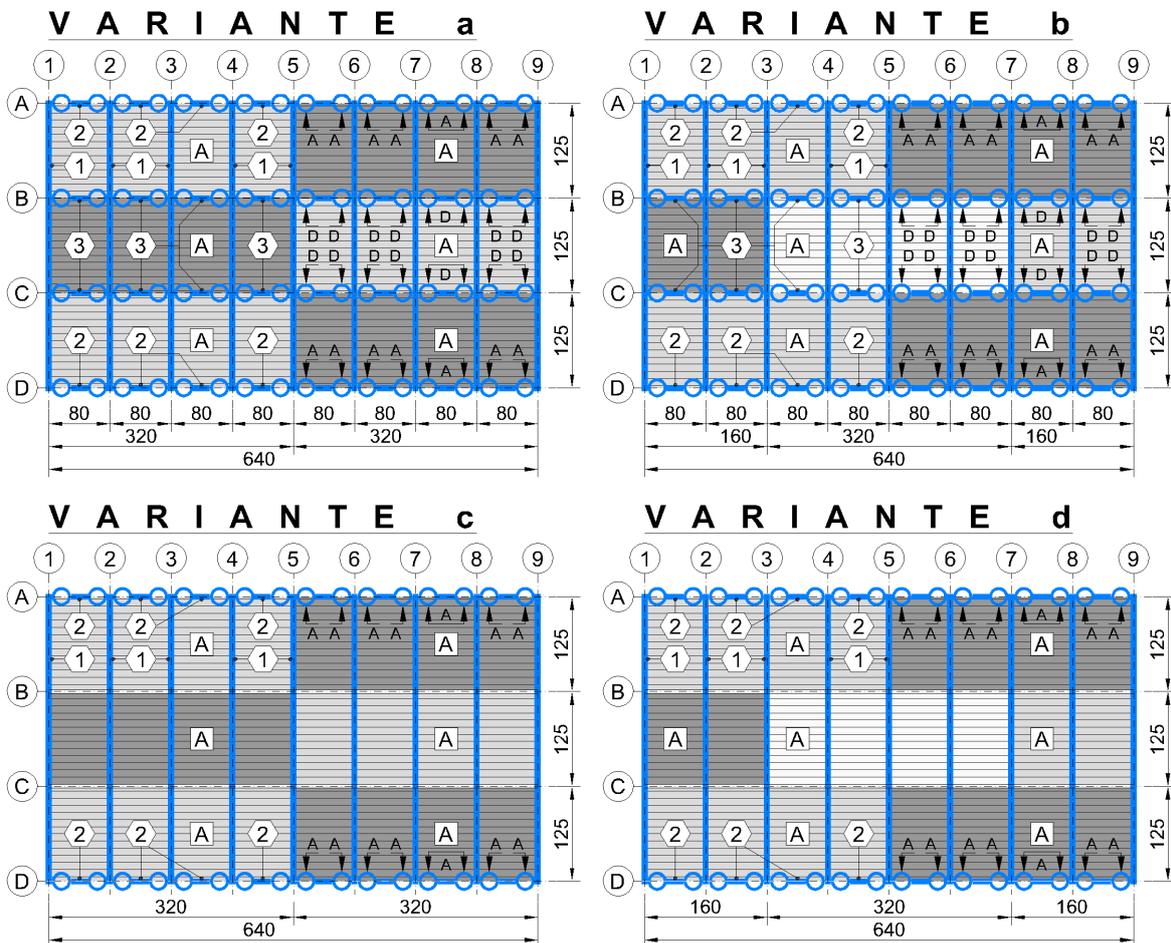


Abbildung 24: Stufe 2: Konstruktionsvarianten

Im Rahmen der Diplomarbeit wird die direkte Kraftübertragung (Druckkontakt und Reibung) zwischen den Plattenrändern grundsätzlich vernachlässigt. Bei indirekten Plattenstößen (siehe Abbildung 2) ist jedoch im Kontext mit den Deckenbalken, Füllstäben und Stoßlaschen eine Schubkraftübertragung realisierbar. Plattenränder, die durch Stoßlaschen verbunden sind, werden in weiterer Folge als gedeckt bezeichnet. Nicht verbundene Plattenränder werden als ungedeckt titulierte.

.....
A Variante a: Unversetzte Plattenanordnung mit gedecktem Stoß
.....

In Variante a sind die Platten - wie aus Abbildung 24 ersichtlich - regelmäßig angeordnet (Kreuzfugenanordnung) und in Anlehnung an die [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] Kapitel 10.8.1 (1) sind alle Plattenränder schubfest miteinander verbunden.

Um einen geschlossenen Ober- bzw. Untergurt entlang der horizontalen Achsen A und D zu gewährleisten (gemäß [ÖNORM B 1995-1-1 (2015)], Kapitel 9.2.3.2, (7)), wird dem

Schwalbenschwanzanschluss (Gelenk A) in Variante a eine Übertragung von Druck- und Zugnormalkräften ohne Limitierung zugewiesen. Außerdem wird, wie zuvor im Kapitel 2.7.2 erwähnt, keine Kraft direkt von den **Stoßlaschen** an die Deckenbalken übertragen (Gelenk D).

.....
B Variante b: Versetzte Plattenanordnung mit gedecktem Stoß
.....

Durch die versetzte Anordnung der Einzelplatten in Variante b (T-Fugenanordnung), wird die vertikale Stoßfuge entlang der Achse 5 unterbrochen. Die Kraftübertragung erfolgt entlang dieser Stoßfuge demnach nicht mehr ausschließlich durch die Verbindungsmittel, sondern auch über die Platte selbst.

Der Schwalbenschwanzanschluss (Gelenk A) und die Verbindung der Stoßlasche an den Deckenbalken (Gelenk D) weichen nicht von Variante a ab und werden im Abschnitt A erläutert.

.....
C Variante c: Unversetzte Plattenanordnung mit ungedecktem Stoß
.....

Konstruktionsvariante c unterscheidet sich von Variante a durch die **Vernachlässigung der Zugnormalkrafttragfähigkeit der Schwalbenschwanzverbindung** (Gelenk A). In dieser Variante ist damit der Ober- bzw. Untergurt nicht mehr geschlossen. Darüber hinaus können durch den **Entfall der Stoßlaschen** (Querschnitt 3) entlang der Plattenlängsseite keine Kräfte übertragen werden.

Variante c weicht somit von den Grundsätzen der [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] ab (siehe Konstruktionsvariante a) und soll die Auswirkungen bei Vernachlässigung dieser Aussagen aufzeigen.

.....
D Variante d: Versetzte Plattenanordnung mit ungedecktem Stoß
.....

Die versetzte Plattenanordnung kann der Abbildung 24 entnommen werden und entspricht grundsätzlich der Variante b.

Die **Vernachlässigung der Zugnormalkraftübertragung im Gelenk A** sowie der **Entfall von Stoßlaschen** entspricht jener der Variante c. Somit gelten die in diesem Zusammenhang getroffenen obigen Ausführungen auch in dieser Konstruktionsvariante.

2.7.4 Lagerungsbedingungen und Lastfälle

In diesem Kapitel soll die Scheibentragwirkung der jeweiligen Konstruktionsvariante anhand zweier Lastfälle näher analysiert werden. Die Plattentragwirkung wird von der Analyse ausgenommen. In Abbildung 25 sind die beiden Lastfälle (Lastfall 1 und 2) und die Lagerungsbedingungen für das jeweilige Plattenverbundmodell (Konstruktionsvariante a, b, c und d) dargestellt.

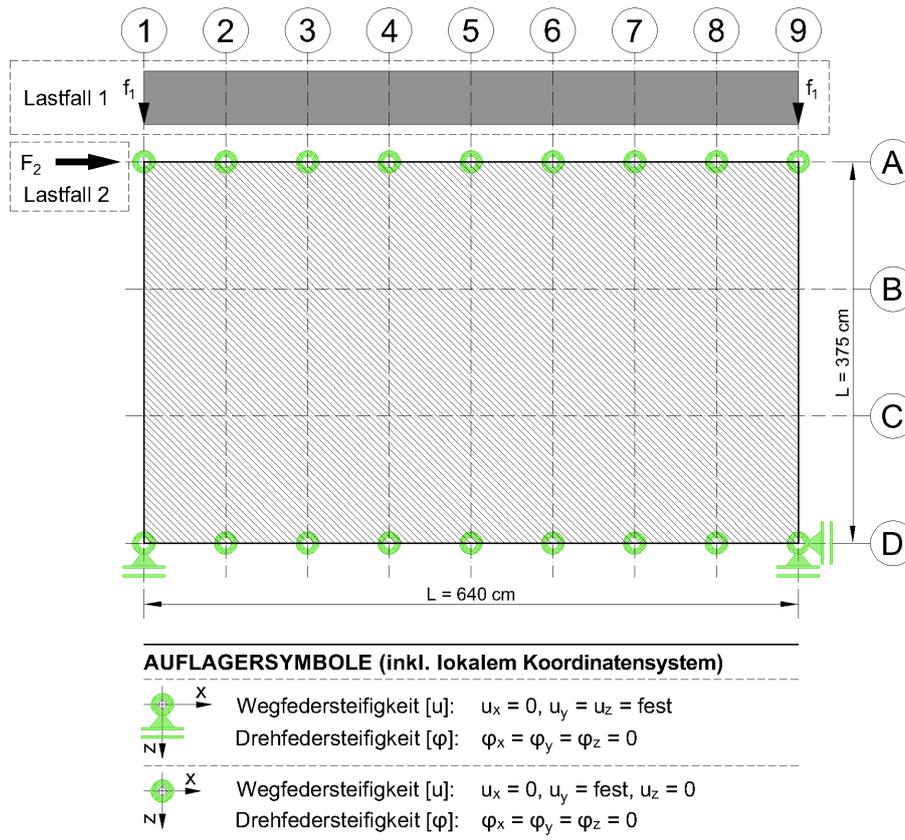


Abbildung 25: Stufe 2: Lagerungsbedingungen und Lastfälle

Lastfall 1 orientiert sich an der [ÖNORM B 1995-1-1 (2015)], Abschnitt 9.2.3.2, Punkt 5. Dabei wird die Scheibe durch eine Stablast normal ($f_1 = 5,0 \text{ kN/m}$) zu den Füllstäben der horizontalen Achse A (oberer Rand des Plattenverbundmodells) beansprucht. **Lastfall 2** zeigt eine Punktlast ($F_2 = 8,5 \text{ kN}$), welche parallel zum oberen Plattenrand der Scheibe wirkt. Der Angriffspunkt der Last befindet sich im Schnittpunkt von Achse A und Achse 1.

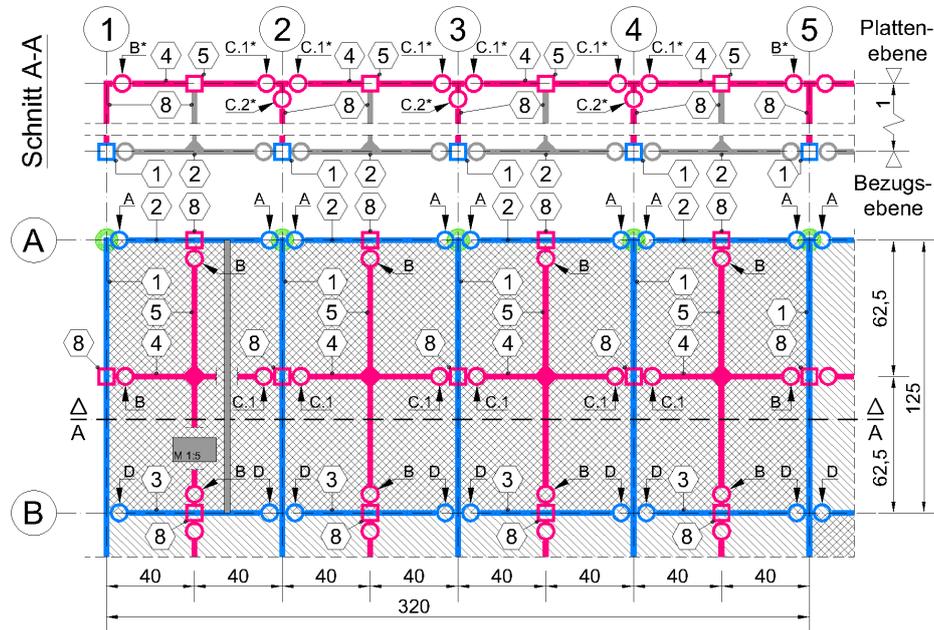
2.7.5 Strategie 1

2.7.5.1 System 0: Schubkreuzmodell

Die **theoretischen Grundlagen des Schubkreuzmodells** wurden bereits in **Kapitel 2.6.2.1** erörtert.

Abbildung 26 zeigt eine Einzelplatte des Plattenverbundes, welche nach den Grundsätzen des Systems 0 modelliert ist. Aus dieser Abbildung sind die für System 0 relevanten Werkstoffparameter der Holzwerkstoffplatte, Details zur Unterkonstruktion, Querschnitte, Geometrie sowie Gelenksdefinitionen der einzelnen Verbindungen ersichtlich. Genauere Werkstoffeigenschaften der Balkenstäbe der im System 0 eingesetzten Holzwerkstoffplatte können aus den Tabellen 3 und 4 entnommen werden. Die Gelenksdefi-

nitionen für die Verbindungsmittel zwischen Holzwerkstoffplatte und Unterkonstruktion wurden unter Berücksichtigung der Ausführungen in Kapitel 2.6.2.1 festgelegt.



HOLZWERKSTOFFPLATTE	
4	Balkenstab H-Rechteck 27/1250 - 3-Schichtmassivholzplatte
5	Balkenstab H-Rechteck 550/1000 - Koppelstab
8	Balkenstab H-Rechteck 100/100 - Koppelstab
VERBINDUNGEN (*... im Schnitt A-A dargestellt)	
A Schwalbenschwanzanschluss	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = u_z = \text{fest}$
	Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$
B Verbindung zwischen Holzwerkstoffplatte und Unterkonstruktion	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = 0, u_y = 100 \text{ kN/m (Annahme), } u_z = \text{fest}$
	$u_{z, 80\text{cm}} = 7\,120 \text{ kN/m bzw. } u_{z, 125\text{cm}} = 11\,125 \text{ kN/m}$
	Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = 0, \varphi_z = 1 \text{ kNm/rad (Annahme)}$
C.1 Verbindung innerhalb der Holzwerkstoffplatte	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = 0, u_y = 100 \text{ kN/m (Annahme), } u_z = \text{fest}$
	Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = 0, \varphi_z = 1 \text{ kNm/rad (Annahme)}$
C.1* Verbindung zwischen Holzwerkstoffplatte und Unterkonstruktion	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = \text{fest, } u_y = 11\,125 \text{ kN/m, } u_z = \text{fest}$
	Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = \text{fest}$
D Anschluss Stoßlasche	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = 0, u_y = 100 \text{ kN/m und } u_z = 1 \text{ kN/m (Annahme)}$
	Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$

Abbildung 26: Stufe 2: Strategie 1 - System 0

Hinsichtlich der Unterkonstruktion ist zu erwähnen, dass das **Schubkreuzmodell** im Plattenverbund **nur mit geschlossenem Ober- und Untergurt funktioniert**. Da die Beplankung im System 0 nur Schubkräfte aufnehmen kann, muss die Biegetragfähigkeit der Scheibe durch die Unterkonstruktion gewährleistet werden. Der Schwalbenschwanzverbindung des Ober- und Untergurtes wird daher eine Übertragung von Druck- und Zugnormalkräfte (Druck- bzw. Zuggurt) zugewiesen. Darüber hinaus setzt die Mo-

dellierung gem. System 0 voraus, dass **alle Plattenränder der Holzwerkstoffplatte durch die Unterkonstruktion begrenzt** sind (siehe Kapitel 2.6.2.1). Ungedeckte Stöße können daher mit diesem System nicht behandelt werden.

Dementsprechend kann **System 0** nur in den **Konstruktionsvarianten a und b** zur Anwendung gelangen.

2.7.5.2 System 1: Rahmenmodell

Für **grundlegende Ausführungen** zum Rahmenmodell wird auf **Kapitel 2.6.2.2** verwiesen.

Die Modellierung einer Einzelplatte im Plattenverbund gem. System 1 wird in Abbildung 27 dargestellt, in welcher die modellrelevanten Eigenschaften der Holzwerkstoffplatte (Werkstoffparameter, Geometrie, Querschnitte und Gelenksdefinitionen) sowie der Unterkonstruktion (Geometrie, Querschnitte und Verbindungen) abgebildet sind. Details zu den Werkstoffeigenschaften der Balkenstäbe der Holzwerkstoffplatte können - analog zu System 0 - aus den Tabellen 3 und 4 entnommen werden. Die Gelenksdefinitionen für die Verbindungsmittel zwischen Holzwerkstoffplatte und Unterkonstruktion wurden unter Berücksichtigung der Ausführungen in Kapitel 2.6.2.2 festgelegt.

Im Gegensatz zu System 0 wird im Rahmenmodell **die Biegetragfähigkeit der Holzwerkstoffplatte berücksichtigt**. **Geschlossene Ober- und Untergurte sowie gedeckte Stöße** an der Plattenlängsseite sind daher **nicht zwingend erforderlich**.

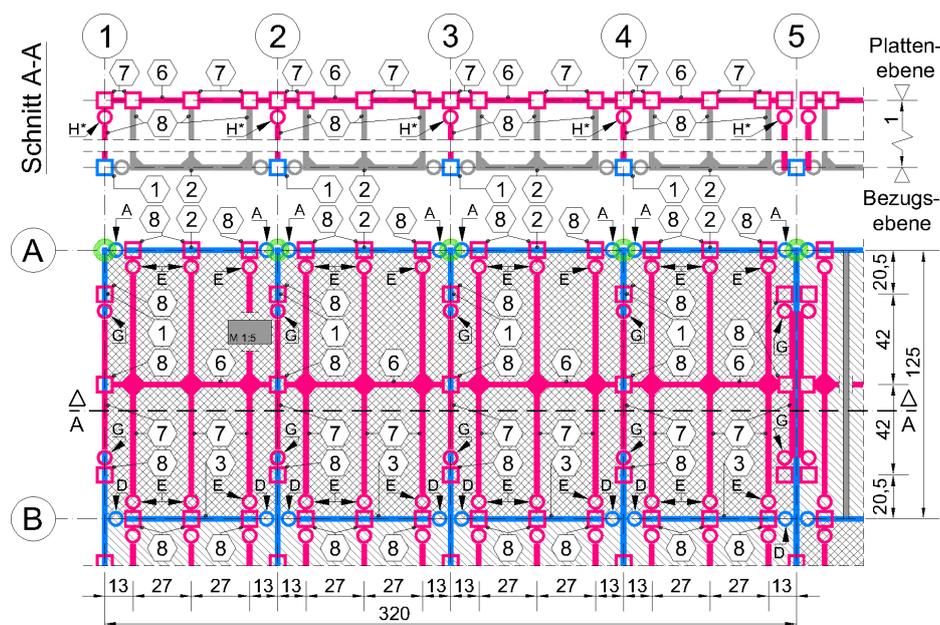


Abbildung 27: Stufe 2: Strategie 1, System 1, Teil 1

HOLZWERKSTOFFPLATTE	
6	Balkenstab H-Rechteck 27/1250 - 3-Schichtmassivholzplatte
7	Balkenstab H-Rechteck 550/1000 - Koppelstab
8	Balkenstab H-Rechteck 100/100 - Koppelstab
VERBINDUNGEN (*... im Schnitt A-A dargestellt)	
A Schwalbenschwanzanschluss	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = u_z = \text{fest}$ (Konstruktionsvariante a & b) $u_x = \text{fest}$ (Druck) bzw. 0 (Zug), $u_y = u_z = \text{fest}$ (Konstruktionsvariante c & d) Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$
D Anschluss Stoßlasche (Konstruktionsvariante a & b)	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = 0$, $u_y = 100 \text{ kN/m}$ und $u_z = 1 \text{ kN/m}$ (Annahme) Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$
E Verbindung zwischen Holzwerkstoffplatte und Unterkonstruktion	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = 2\,373 \text{ kN/m}$, $u_y = 100 \text{ kN/m}$ (Annahme), $u_z = 2\,373 \text{ kN/m}$ Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = 1 \text{ kN/m}$ (Annahme), $\varphi_y = \varphi_z = 0$
G Verbindung zwischen Holzwerkstoffplatte und Unterkonstruktion	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = 4\,172 \text{ kN/m}$, $u_y = 100 \text{ kN/m}$ (Annahme), $u_z = 3\,708 \text{ kN/m}$ Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = 0$, $\varphi_z = 1 \text{ kN/m}$ (Annahme)
H* Verbindung zwischen Holzwerkstoffplatte und Unterkonstruktion	
	Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = 2\,781 \text{ kN/m}$, $u_y = 3\,708 \text{ kN/m}$, $u_z = 100 \text{ kN/m}$ (Annahme) Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = 0$, $\varphi_y = 1 \text{ kN/m}$ (Annahme), $\varphi_z = 0$

Abbildung 28: Stufe 2: Strategie 1, System 1, Teil 2

System 1 eignet sich somit für alle im Kapitel 2.7.3 angegebenen Konstruktionsvarianten (a, b, c und d). Bei Anwendung der Konstruktionsvarianten c und d sind aufgrund der ungedeckten Plattenlängsstöße alle Stoßlaschen (Querschnitt 3) und die damit verbundenen Koppelstäbe (Querschnitt 7) in Abbildung 27 zu vernachlässigen.

2.7.6 Strategie 2: orthotropes Flächenmodell mit reduziertem Schubmodul

Die Grundlagen für das System 2 können aus Kapitel 2.6.3 entnommen werden.

Die relevanten Werkstoffeigenschaften der Holzwerkstoffplatte sind grundsätzlich aus Tabelle 2 ablesbar. Die Reduktion des Schub- (G^*) und E-Moduls (E^*) ist abhängig von der jeweiligen Konstruktionsvariante und müsste anhand von diversen Kriterien adaptiert werden. Die Skalierung wird für Zwecke der Diplomarbeit vorerst jedoch nicht durchgeführt. Da in der zweiten Strategie die vielen kleinformatigen Platten als eine großformatige orthotrope Fläche angesehen wird, sind sowohl die **Plattenanordnung als auch die Plattenstöße** (wie auch die Stoßlaschen) der einzelnen Konstruktionsvarianten für das System 2 **nicht von Bedeutung**. Zusätzlich bleiben im System 2 die Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel unberücksichtigt.

Hinsichtlich relevanter Details zur Unterkonstruktion wird auf Kapitel 2.7.7 verwiesen.

2.7.7 Strategie 3: orthotropes Flächenmodell mit Nachgiebigkeiten und realen Plattengrößen (Referenzmodell)

Die Grundidee für das System 3 wird im Kapitel 2.2 sowie im Kapitel 2.6.4 kurz erläutert.

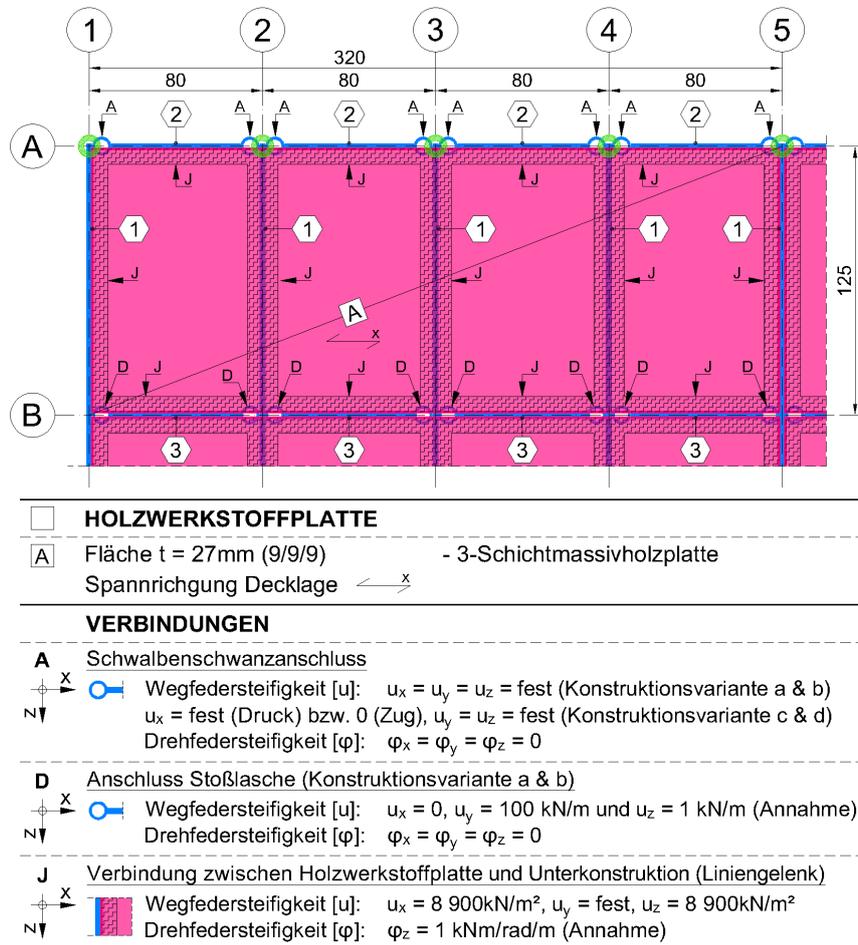


Abbildung 29: Stufe 2: Strategie 3, System 3

Abbildung 29 zeigt den Ausschnitt einer Einzelplatte des Plattenverbundes, welche gem. System 3 modelliert wurde. Aus dieser Abbildung sind die systemrelevanten Eigenschaften (Werkstoffparameter, Gelenksdefinitionen, Querschnitte und die Geometrie der Holzwerkstoffplatte bzw. der Unterkonstruktion) ersichtlich. Detailliertere Informationen zu den Werkstoffeigenschaften der Holzwerkstoffplatte sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

Hinsichtlich geschlossener Ober- und Untergurte sowie den gedeckten Stößen an den Plattenlängsseiten sieht System 3 **keine Einschränkungen** vor.

Daher eignet sich **System 3** für **alle im Kapitel 2.7.3 angegebenen Konstruktionsvarianten** (a, b, c und d). Bei Anwendung der Konstruktionsvarianten c und d sind (analog zu System 1) jedoch aufgrund der ungedeckten Plattenlängsstöße alle Stoßla-

schen (Querschnitt 3) in Abbildung 29 zu vernachlässigen. Daraus folgt, dass an diesen Rändern der Plattenlängsseite eine Kraftübertragung nicht mehr möglich ist. Dieser Umstand wird im baustatischen Modell der Varianten c und d durch eine fiktive Plattenfugenbreite von 20 mm berücksichtigt.

2.7.8 Gegenüberstellung, Diskussion & Resümee der Ergebnisse

2.7.8.1 Ergebnismatrix

Im **Anhang B** werden **ausgewählte Berechnungsergebnisse**, welche sich aus der Belastung der einzelnen Varianten der Plattenverbundmodelle ergeben, **in Form einer Ergebnismatrix** gezeigt. Die Ergebnismatrix unterteilt sich in zwei Teilmatrizen. Im ersten Teil werden die Ergebnisse der Strategie 1 und 3 gegenübergestellt. Im zweiten Teil sind die Ergebnisse aus Strategie 2 gesondert abgebildet.

Aus den **Spalten** sind die jeweiligen Vergleichskriterien resultierend aus dem aufgeführten Lastfall (LF 1 oder 2) ersichtlich. In den **Zeilen** sind die zu vergleichenden Plattenverbundmodelle dargestellt.

Die folgenden **Vergleichskriterien anhand ausgewählter Bauteile des Plattenverbundmodells** werden in der Ergebnismatrix abgebildet:

- ⊗ Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion
- ⊗ Normalkraft, Querkraft und Moment der Beplankung und Gurte
- ⊗ Normalkraft, Querkraft und Moment der Deckenbalken
- ⊗ Scheibennormal- bzw. Normalkraft und Scheibenschub- bzw. Querkraft für die Bemessung der Verbindungsmittel
- ⊗ Normalspannung und Schubspannung der Beplankung

Wie eingangs bereits erwähnt, ergibt sich aus der gewählten Konstruktionsvariante und dem eingesetzten System das zu untersuchende Plattenverbundmodell. Die Bezeichnung »System a.1« bedeutet somit, dass die Konstruktionsvariante a mit nach System 1 modellierten Einzelplatten kombiniert ist.

In der Ergebnismatrix sind folgende **Plattenverbundmodelle** dargestellt:

- ⊗ **System a.0, System a.1, System a.3** und **System b.1**
- ⊗ **System c.1** und **System d.1**
- ⊗ **System 2** (geschlossener Ober- und Untergurt gem. Variante a und b)

Konstruktionsvarianten gemäß Kapitel 2.7.3

a: unversetzte Plattenanordnung, **gedeckter Stoß**, geschlossener Ober- und Untergurt; **b:** versetzte Plattenanordnung, **gedeckter Stoß**, geschlossener Ober- und Untergurt; **c:** unversetzte Plattenanordnung, **ungedekter Stoß**, offener Ober- und Untergurt, **d:** versetzte Plattenanordnung, **ungedekter Stoß**, offener Ober- und Untergurt

Strategien bzw. Systeme der Einzelplatte

0: Schubkreuz- und **1:** Rahmenmodell gemäß Kapitel 2.7.5; **2:** orthotropes Flächenmodell gemäß 2.7.6; **3:** Flächenmodell mit realen Plattengrößen (Referenzmodell) gemäß Kapitel 2.7.7

2.7.8.2 Eignung von Strategie 1 für die baustatische Modellbildung & Analyse der Konstruktionsvarianten

In einem **ersten Schritt** werden die Ergebnisse von Strategie 1 und 3 mithilfe von Konstruktionsvariante a (System a.0, System a.1 und System a.3) miteinander verglichen. Dadurch soll die **Eignung** von Strategie 1 für die baustatische Modellbildung überprüft werden. Konstruktionsvariante a wurde deshalb gewählt, da diese die einfachste normenkonforme Konstruktionsvariante darstellt und System 0 im Plattenverbund geschlossene Ober- und Untergurte sowie gedeckte Stöße fordert. **Im zweiten Schritt** wird eine **Analyse** der Auswirkungen der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten (a, b, c, d) nur mehr am Beispiel von System 1 durchgeführt.

.....
A Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion
.....

Bei **Betrachtung des Verformungsverhaltens** von Beplankung und Unterkonstruktion der einzelnen Systeme anhand von **Konstruktionsvariante a** ergeben sich für Lastfall 1 (Tabelle 28) und Lastfall 2 (Tabelle 30) nur marginale Differenzen. Die einzelnen Systeme zeigen eine gute Übereinstimmung der Verformungsfigur und auch die Größenordnung der Verformungen weicht kaum voneinander ab. Daraus kann geschlossen werden, dass sich die jeweiligen Gesamtsteifigkeiten der Plattenverbundmodelle (System a.0, System a.1 und System a.3) einander beinahe entsprechen. In einem dreidimensional baustatisch modellierten Gebäude liefern die einzelnen Systeme somit **eine gleichwertige, realitätsnahe Verteilung der Kräfte auf weitere Bauteile (zB Wände)**.

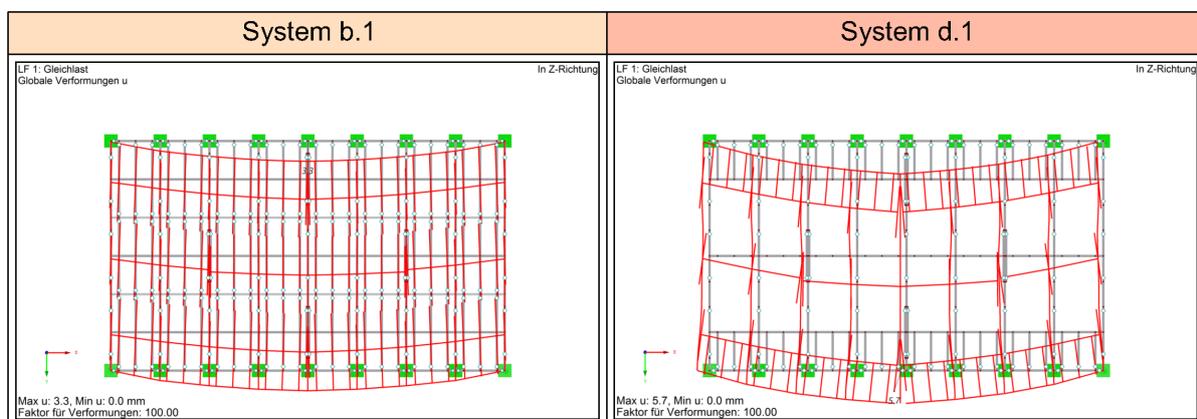


Abbildung 30: Plattenverbund - LF 1 - Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion, Auszug aus Anhang B, Tabelle 29, Schritt 2: System b.1 und System d.1

Durch das **Abweichen von den normenkonformen Varianten a und b** sind bei Betrachtung der **Systeme c.1 und d.1** in Tabelle 29 (bzw. Tabelle 31) jedoch erhebliche Differenzen bezüglich der Größenordnung der Verformung erkennbar. Diese Unterschiede sind auf die Vernachlässigung der Zugnormalkraftübertragung (offene Ober- und Untergurte) bzw. auf den Entfall der Stoßlaschen zurückzuführen. Durch Öffnen des Untergurtes sowie der verstärkten Kraftübertragung entlang der Plattenschmalseite ergibt sich eine abweichende Verformungsfigur.

Während die **versetzte Plattenanordnung** - gegenüber der Konstruktionsvariante a.1 - wenig Einfluss auf das Verformungsverhalten der normenkonformen Konstruktionsvariante b.1 ausübt, führt diese bei Modellierung gemäß System d.1 - gegenüber von System c.1 - zu merklichen Verbesserungen (siehe auch Abschnitt C).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich eine normenkonforme Ausführung des Plattenverbundmodells positiv auf das Verformungsverhalten auswirkt. Zusätzlich können trotz Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel sehr hohe Scheibensteifigkeiten erzielt werden.

Die **Ermittlung der Verformung** von Holzwerkstoffplatten im Plattenverbund kann somit vereinfacht **auf Basis von Strategie 1** vorgenommen werden. Die **Auswertung und Dokumentation** kann direkt am verformten Modell erfolgen.

B Schnittgrößen (N, V & M) der Beplankung und Gurte

Im Anhang B werden in den Tabellen 32 bis 43 die Schnittgrößen der Beplankung und Gurte resultierend aus Lastfall 1 und 2 dargestellt.

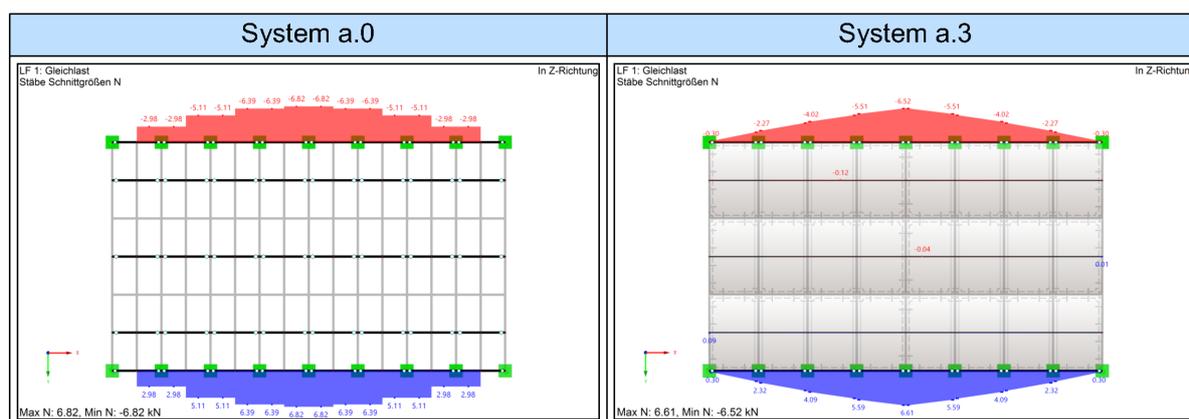


Abbildung 31: Plattenverbund - LF 1 - Normalkraft der Beplankung & Gurte, Auszug aus Anhang B, Tabelle 32, Schritt 1: System a.0 und System a.3

Die Flächenschnittgrößen der Beplankung aus **System a.3** werden zu Vergleichszwecke mithilfe eines Ergebnisstabes zu Stabschnittgrößen aufintegriert. Beim nunmehrigen **Abgleich mit System a.0 bzw. a.1** wird deutlich, dass die Größenordnung und der Verlauf aller Schnittgrößen (N, V & M) zumeist gute Übereinstimmungen liefern. Lediglich

die dem **System a.0** zugrundeliegenden Vereinfachungen der Schubfeldtheorie (Vernachlässigung der Biegesteifigkeit der Beplankung) bewirken einen parabelförmigen Verlauf der Normalkraft im Ober- und Untergurt sowie eine abweichende Größenordnung von Querkraft und Moment im Obergurt. Im Falle einer Belastung des Obergurts wird dieser im Gegensatz zu System a.1 und a.3 nicht durch die Beplankung gestützt. Darüber hinaus führen die Annahmen der Schubfeldtheorie dazu, dass der abweichende Momentenverlauf der Beplankung im System a.0 für die Bemessung nicht greifbar und damit auch nicht zu berücksichtigen ist.

Bezüglich der durch die punktuelle Beanspruchung verursachten Sprünge im Schnittkraftverlauf der Beplankung im System a.1 und der durch die Mittelung der Sprünge zu erzielenden Annäherung an System a.3, wird auf die Ausführungen im Kapitel 2.6.6.2 verwiesen.

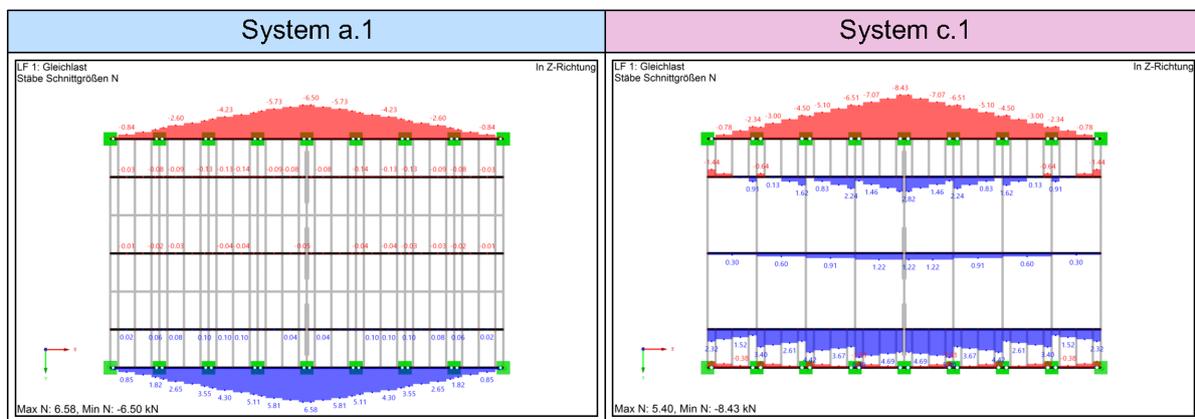


Abbildung 32: Plattenverbund - LF 1 - Normalkraft der Beplankung & Gurte, Auszug aus Anhang B, Tabelle 32 und 33, Schritt 2: System a.1 und System c.1

Bei Betrachtung der **Konstruktionsvariante c.1** lassen sich **Unterschiede zu der normenkonformen Variante a.1** speziell hinsichtlich Normalkraft- und Momentenverlauf erkennen. Die Übertragung der Zugnormalkraft erfolgt aufgrund des offenen Ober- und Untergurts, im Gegensatz zu Konstruktionsvariante a, durch die Beplankung. Der untypische Normalkraftverlauf der Beplankung im System c.1 (Lastfall 1 gemäß Tabelle 33) resultiert aus der Vernachlässigung der Stoßlaschen. Das Zusammenwirken der Einzelplatten erfolgt nun ausschließlich durch die Deckenbalken, wodurch sich der Einfluss der oberen Plattenreihe am abgetreppten Normalkraftverlauf der unteren Plattenreihe erklären lässt. Bezüglich des Momentenverlaufs ist zu erwähnen, dass die Größenordnung aufgrund der ungedeckten Stöße in Variante c zunimmt.

Durch die **versetzte Plattenanordnung der Konstruktionsvarianten b und d** kann grundsätzlich ein Umlagerungseffekt erzielt werden, welcher sich positiv auf die Verteilung der Schnittgrößen in der Beplankung auswirkt. Darüber hinaus führt dies zu einer merklichen Reduktion der Verbindungsmittelkräfte am Plattenstoß und einer größeren Auslastung der Einzelplatte im Plattenverbund (was in Tabelle 41 besonders gut ersichtlich ist).

Abschließend kann festgehalten werden, dass die **Verläufe** und die **Größenordnung der Schnittkräfte** in den jeweiligen Systemen der **Strategie 1** in **guter Näherung** zu den Ergebnissen von Strategie 3 (Referenzmodell) stehen. Außerdem ist anhand der Konstruktionsvarianten zu erkennen, dass eine normenkonforme Ausführung des Plattenverbundmodells vorteilhaft auf das Tragverhalten wirkt. Konstruktive Abweichungen von der Norm können durch Anwendung des Rahmenmodells (aus Strategie 1) baustatisch jedoch ebenfalls effizient bewältigt werden.

.....
C Schnittgrößen (N, V & M) der Deckenbalken

In den Tabellen 44 bis 49 im Anhang B werden die Schnittgrößen der Deckenbalken am Beispiel von Lastfall 1 gegenübergestellt.

Bei **Abgleich der Schnittgrößenverläufe** der einzelnen Systeme **anhand von Konstruktionsvariante a** sind grundsätzlich keine wesentlichen Differenzen ersichtlich. Die Größenordnungen der Schnittgrößen liefern ebenso gute Übereinstimmungen. Einzig bei System a.0 sind aufgrund der Annahmen der Schubfeldtheorie Abweichungen zu erkennen, da in dieser Theorie an Plattenstößen ausschließlich Schubkräfte übertragen werden können. In diesem Fall wird der Deckenbalken nicht durch Querkraft und Moment beansprucht.

Im **Gegensatz zu den Konstruktionsvarianten a und b** ergeben sich bei **Variante c und d** deutlich höhere Querkraft- und Momentenbeanspruchungen der Deckenbalken. Dies ist auf den Entfall der Stoßlaschen zurückzuführen (ungeddeckte Plattenstöße). Wie bereits zuvor erwähnt, erfolgt das Zusammenwirken der Einzelplatten nunmehr ausschließlich durch die Deckenbalken, welche folglich punktuell konzentriert die gesamten Schubkräfte des Plattenlängsstoßes übertragen müssen. Diese zusätzliche Beanspruchung des Deckenbalkens wirkt sich auf die spätere Bemessung aus.

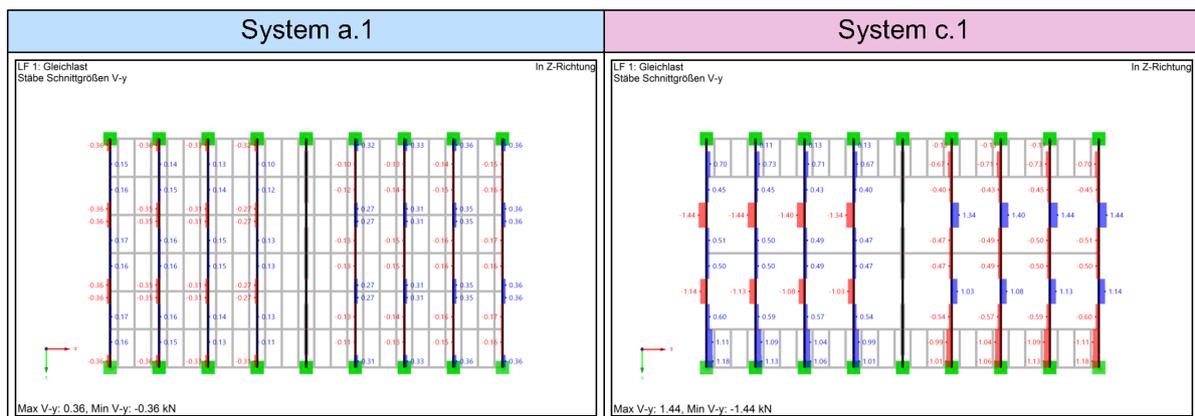


Abbildung 33: Plattenverbund - LF 1 - Querkraft der Deckenbalken, Auszug aus Anhang B, Tabelle 46 und 47, Schritt 2: System a.1 und System c.1

Grundsätzlich nimmt die **versetzte Plattenanordnung** kaum Einfluss auf Querkraft-

und Momentenverlauf der Deckenbalken. Beim Normalkraftverlauf im System d.1 bewirkt diese jedoch eine Aufhängung des Untergurtes, was wiederum zu Zugnormalkräften im mittleren Deckenbalken führt. Dadurch wird das Verformungsverhalten des Plattenverbundmodells positiv beeinflusst (siehe dieses Kapitel, Abschnitt A bzw. Tabelle 29).

In Summe zeigt sich, dass die **Schnittgrößen der Deckenbalken** durch **Strategie 1 sehr gut abgebildet** werden können. Aufgrund der Schubfeldtheorie weist System 0 hinsichtlich Querkraft und Moment Schwächen auf. Da das System jedoch nur mit gedeckten Stößen funktioniert und sich diese Schnittgrößen bei dieser Konstruktionsvariante kaum auf die Bemessung auswirken, können die Schwächen außer Acht gelassen werden.

2.7.8.3 Bemessungsrelevante Schnittgrößen und Spannungen von Bauteilen und Verbindungsmitteln

.....
A Ober- und Untergurt
.....

Die Gurte werden mithilfe der in den Tabellen 32 bis 43 abgebildeten Schnittgrößen bemessen.

Bei Betrachtung der **normenkonformen Konstruktionsvarianten a und b** (gedeckter Stoß & geschlossener Ober- und Untergurt) lässt sich bei **Biegebeanspruchung** der Scheibe erkennen, dass der Ober- bzw. Untergurt hauptsächlich durch Normalkraft beansprucht wird (siehe Tabelle 32 im Anhang B). Außerdem können die Gurte durch **Ein- bzw. Weiterleitung von Lasten bzw. Kräften** (zB Schubkräfte am Plattenstoß) zusätzlich durch Normalkraft, Querkraft und Moment bemessungsrelevant beansprucht werden.

In **Konstruktionsvariante c und d** muss die Beplankung aufgrund der **offenen Gurte** die Zugnormalkrafttragfähigkeit des Untergurtes übernehmen (siehe Abbildung 33). Somit ist die Normalkraft im Untergurt (bei Lastfall 1) nicht mehr bemessungsrelevant.

.....
B Deckenbalken
.....

Die für die Bemessung relevanten Schnittgrößen der Deckenbalken sind für die jeweilige Konstruktionsvarianten in Tabelle 44 bis 49 ersichtlich.

Genau wie im Abschnitt zuvor (A - Ober- und Untergurt) kann der Deckenbalken die **Funktion des Gurtes** übernehmen und wird dadurch vorwiegend mit Normalkraft beansprucht. Das **Einleiten von Lasten durch den Deckenbalken bzw. das Weiterleiten von Kräften** an den Plattenrändern erzeugt in Konstruktionsvariante a und b eine zusätzliche Normalkraftbeanspruchung der Balken.

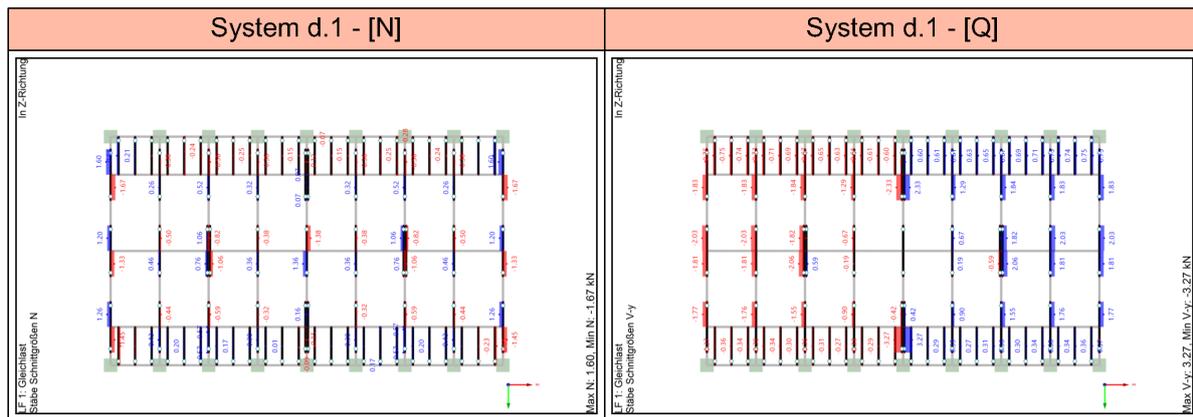


Abbildung 35: Auszug aus Anhang B, Tabelle 50 und 51

Am Beispiel von System d.3 (Tabelle 50 und 51) wird das **Referenzmodell (Strategie 3, System 3)** näher beschrieben. An den Plattenstößen können die für die Bemessung der Verbindungsmittel relevanten Schnittgrößen direkt und ohne Umrechnung den Scheibenschnittgrößen (n_x , n_y und n_{xy}) entnommen werden. Ist die Unterkonstruktion innerhalb der Einzelplatte (somit nicht am Plattenrand) mit der Beplankung verbunden, kann eine direkte Ablesbarkeit nicht mehr vorgenommen werden. Für die Ermittlung der Verbindungsmittelkräfte muss unter diesen Umständen die in die Unterkonstruktion eingeleitete Kraft bekannt sein. Diese kann entweder anhand der Schnittgrößen der Unterkonstruktion oder der Scheibenschnittgrößen rückgerechnet werden.

.....
D Beplankung
.....

Die Bemessung der Beplankung erfolgt durch die in Tabelle 52 und 53 angegebenen Scheibennormal- σ_x und Scheibenschubspannungen τ_{xy} . Wie schon zuvor im Abschnitt C »Verbindungsmittel der Beplankung« erwähnt, werden die bemessungsrelevanten Spannungen an ausgewählten Plattenverbund-Systemen erläutert. Für nähere Details zu den Spannungen (Vergleich der einzelnen Strategien) wird auf Kapitel 2.6.6.2 - Abschnitt C verwiesen.

Das **Schubkreuzmodell (Strategie 1, System 0)** wird durch System b.0 beschrieben. Im System 0 werden die Scheibenschubspannungen von der Beplankung übertragen. Scheibennormalspannungen werden von der Unterkonstruktion aufgenommen. Für die Bemessung der Beplankung ist somit einzig die Schubspannung der Beplankung aus Tabelle 53 maßgebend, die direkt vom Querschnitt 4 (für Querschnittsbezeichnung siehe Abbildung 26) abgelesen werden kann.

Im Gegensatz zum Schubkreuzmodell berücksichtigt das **Rahmenmodell (Strategie 1, System 1)** die Biege- und Normalkrafttragfähigkeit der Einzelplatte. Für die Bemessung der Beplankung am Beispiel von System d.1 ist somit σ_x aus Tabelle 52 und τ_{xy} aus Tabelle 53 zu beachten. Die Scheibenspannungen der Beplankung können vom Querschnitt 6 (für Querschnittsbezeichnung siehe Abbildung 27) abgelesen werden.

Die Modellierung der Beplankung am System d.3 erfolgt durch **Strategie 3 (Flächen- bzw. Referenzmodell)**. Die Scheibenschub- als auch Scheibennormalspannungen können direkt vom Flächenmodell abgelesen werden.

Bei **normenkonformer Ausführung des Plattenverbundmodells** (gemäß Konstruktionsvariante a und b) weist die Beplankung nur geringe Normalkraftbeanspruchung auf (siehe Tabelle 32 und 33). Die Beanspruchung erfolgt in diesem Fall vorwiegend durch Querkraft (siehe Tabelle 34) und Moment (siehe Tabelle 36).

Bei **offenem Ober- und Untergurt** (gemäß Variante c und d) ist die Normalkraft für die Beplankung jedoch zusätzlich bemessungsrelevant. Da die Zugnormalkraft nicht wie üblich von den Gurten aufgenommen werden kann, muss dieser Anteil von der Beplankung übernommen werden (sehr gut am Beispiel von Tabelle 33 im Anhang B ersichtlich).

2.7.8.4 Eignung von Strategie 2 für die baustatische Modellbildung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von System 2 und System a.3 miteinander verglichen, um die **Eignung von Strategie 2 für die baustatische Modellbildung** zu überprüfen. Die Kombination von Konstruktionsvariante a mit Strategie 3 (System a.3) wurde deshalb gewählt, da die Tragwirkung der verbundenen kleinformatigen Einzelplatten durch den gedeckten Stoß dem der fiktiven großformatigen Holzwerkstoffplatte aus System 2 am nächsten kommt. Dem Schwalbenschwanzanschluss im System 2 wird in Anlehnung an die zu vergleichende Konstruktionsvariante a ein geschlossener Ober- und Untergurt zugewiesen.

A Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion

Die Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion - resultierend aus dem Lastfall 1 - kann für System a.3 gemäß Tabelle 28 und System 2 gemäß Tabelle 54 aus Anhang B entnommen werden.

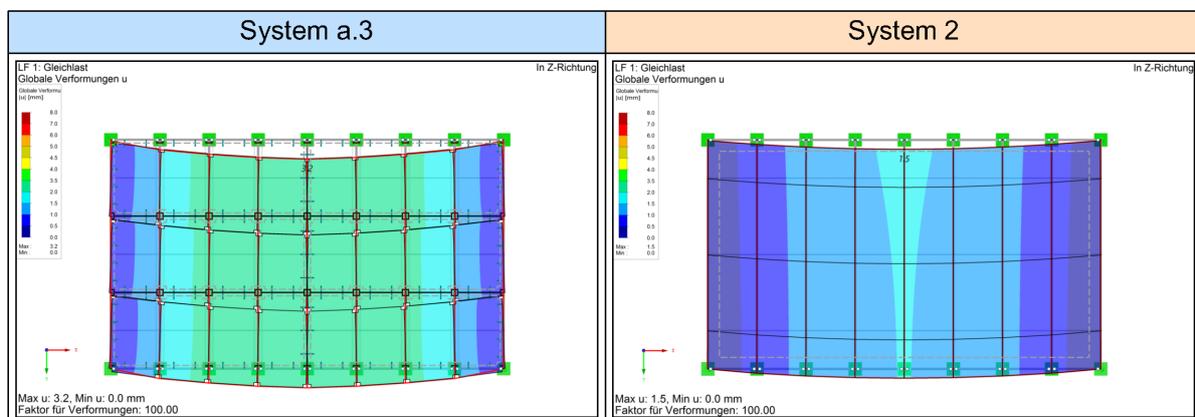


Abbildung 36: Plattenverbund - LF 1 - Verschiebung, Auszug aus Anhang B, Tabelle 28 und 54, System a.3 und System 2

Aufgrund der Vernachlässigung von Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel und Plattenstöße weist System 2 gegenüber System a.3 Differenzen bezüglich der Größenordnung und Verformungsfigur auf. Durch Reduktion des Schub- (G^*) und E-Moduls (E^*) der fiktiven großformatigen Beplankung kann vor allem das **globale Verformungsverhalten** angepasst werden. Das **lokale Verhalten**, wie zB die gegenläufige Verschiebung der Plattenränder entlang der Plattenlängsseite (siehe System a.3, Tabelle 28), kann durch Strategie 2 nicht abgebildet werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass eine globale Abschätzung des Verformungsverhaltens mit Strategie 2 bei Kenntnis der entsprechenden Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Konstruktionsvarianten durchaus möglich ist. Das lokale Verhalten, welches sich maßgebend auf den Schnittkraftverlauf der Unterkonstruktion und Beplankung auswirkt, kann jedoch anhand dieser Strategie nicht beschrieben werden.

.....
 B Schnittgrößen (N, V & M) der Beplankung und Gurte

In den Tabellen 32, 34 und 36 kann die Normalkraft, Querkraft und das Moment der Beplankung und der Gurte für das System a.3 abgelesen werden. Die für den Vergleich relevanten Schnittgrößen für das System 2 sind in Tabelle 55 zu finden.

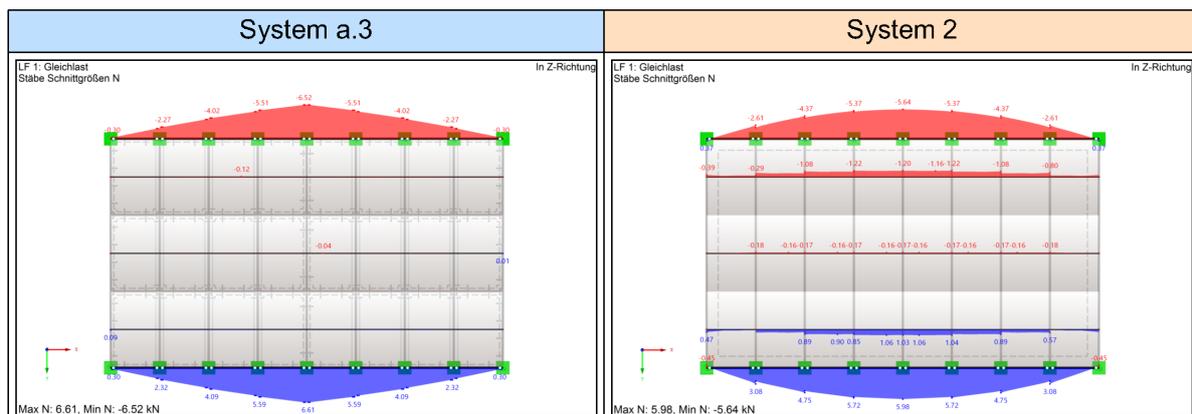


Abbildung 37: Plattenverbund - LF 1 - Normalkraft, Auszug aus Anhang B, Tabelle 32 und 55, System a.3 und System 2

Zu Vergleichszwecken werden die Flächenschnittgrößen der Beplankung mithilfe von Ergebnistäben zu Stabschnittgrößen aufintegriert. Durch **Abgleich der Schnittgrößen** wird deutlich, dass sich der Momenten- als auch Normalkraftverlauf der beiden Systeme maßgeblich von einander unterscheiden. Während die jeweilige Einzelplatte der Beplankung im System a.3 einen ausgeprägten parabelförmigen Momentenverlauf (gemäß Tabelle 36) und keine Normalkraftbeanspruchung (gemäß Tabelle 32) aufweist, zeigt die Einzelplatte für System 2 in Tabelle 55 einen linearen Momentverlauf und Normalkraft an. Außerdem weicht die parabelförmige Normalkraftverteilung im Ober- und Untergurt vom Referenzsystem a.3 ab.

In Summe kann festgehalten werden, dass das **Tragverhalten der fiktiven großformatigen Platte** (System 2) qualitativ jenem der Einzelplatte (System a.3) entspricht. Unterschiede im Schnittkraftverlauf können durch Reduktion des Schub- und E-Moduls nicht angepasst werden.

.....
C Schnittgrößen (N, V & M) der Deckenbalken
.....

Die Normalkraft, Querkraft und das Moment der Deckenbalken für das System a.3 (gemäß Tabelle 44, 46 und 48) und System 2 (gemäß Tabelle 56) können dem Anhang B entnommen werden.

Nach **Abgleich der Normalkraft** lässt sich eine gute Übereinstimmung des Verlaufes jedoch eine merkliche Differenz der Größenordnung zwischen System a.3 und System 2 erkennen. Sprünge im **Querkraft- und Momentenverlauf**, die durch Plattenstöße (vor allem bei ungedecktem Stoß) verursacht werden, können im System 2 aufgrund der fiktiven großformatigen Platte (inklusive Reduktion der Plattensteifigkeiten) nicht berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Normalkraft des Deckenbalkens - bei vernachlässigbaren Querkraft- und Momentenverlauf (zB bei gedecktem Stoß) - durchaus vom System 2 abgelesen und für die Bemessung herangezogen werden kann.

2.7.8.5 Resümee

Die Ergebnisse der **baustatischen Modellbildung nach Strategie 1** (System 0 und 1) führen sowohl beim Verformungsverhalten als auch bei der Verteilung der Schnittgrößen zu einer guten Annäherung an das Referenzmodell der Strategie 3. Strategie 1 ermöglicht eine **direkte Ablesbarkeit** von bemessungsrelevanten Werten, einfache und **übersichtliche Dokumentation, Reduktion der Rechenzeit** im Statikprogramm, ein **gutes Verständnis** des statischen Systems sowie eine **realitätsnahe Verteilung der Kräfte auf weitere Bauteile** eines dreidimensional baustatisch modellierten Gebäudes. Wie jedoch schon im Resümee von Stufe 1 (Einzelplatte) erläutert (siehe Kapitel 2.6.6.3), kann die Stabtheorie (Strategie 1) die Flächentheorie (Strategie 3) nicht vollständig ersetzen. Dort, wo das statische System eine genauere Berechnung im Modell fordert, ist die lokale Modellierung einzelner Platten mittels Flächentheorie weiterhin unerlässlich.

Im Gegensatz zu Strategie 1 (Schubkreuz und Rahmenmodell) führt eine vereinfachte **baustatische Modellbildung nach Strategie 2** (fiktive großformatige Einzelplatte mit reduziertem Schub- und E-Modul) zu keiner guten Übereinstimmung der Schnittgrößen in Beplankung und Unterkonstruktion mit dem Referenzmodell. Die Gesamtsteifigkeit einer Wand- bzw. Deckenscheibe kann jedoch eventuell durch Reduktion des Schub- und E-Moduls der großformatigen Einzelplatte abgeschätzt werden und unter Umständen

eine realitätsnahe Verteilung der Kräfte auf weitere Bauteile ermöglichen. Dies wird im Rahmen der Diplomarbeit jedoch nicht weiter untersucht.

Umsetzung der Erkenntnisse auf eine reale 3D-Struktur

3.1 Grundsätzliches

Dieser Abschnitt der Diplomarbeit widmet sich der Umsetzung der aus Kapitel 2 gewonnenen Erkenntnisse auf eine reale 3D-Struktur am Beispiel eines GRIFFNER Fertigteilhauses.

Im **ersten Schritt** wird hierfür zunächst das GRIFFNER Fertigteilhaus mittels kurzer Baubeschreibung vorgestellt und die Konstruktionskomponenten (Querschnitte, Material und Verbindungsmittel) für die baustatische Modellbildung der 3D-Struktur definiert.

Die nähere Beschreibung der baustatischen Modellbildung von Unterkonstruktion, Beplankung und Lagerung erfolgt in einem **zweiten Schritt**. Für Zwecke der Diplomarbeit beschränkt sich die Analyse der Scheibentragwirkung auf Außenwand- und Deckenbauteile des Erdgeschosses. Durch Gegenüberstellung unterschiedlicher Ausführungsvarianten der Beplankung sollen Auswirkungen auf das Tragverhalten der Teilstruktur (Erdgeschoss) gezeigt werden.

Im **dritten Schritt** wird die Belastung der beispielhaften Teilstruktur erläutert.

Abschließend werden in einem **vierten Schritt** ausgewählte Ergebnisse der unterschiedlichen Ausführungsvarianten der Teilstruktur gegenübergestellt und näher analysiert.

3.2 Baubeschreibung

3.2.1 GRIFFNER Fertigteilhaus

Das in den nachfolgenden Abbildungen 39 bis 43 dargestellte Einfamilienhaus ist ein GRIFFNER Fertigteilhaus der Produkttype »classic«. Das Gebäude besteht aus einem Keller in Stahlbetonmassivbauweise sowie aus zwei darüber liegenden Stockwerken in Holzrahmenbauweise. Die Wände im Obergeschoss sind der Dachform entsprechend

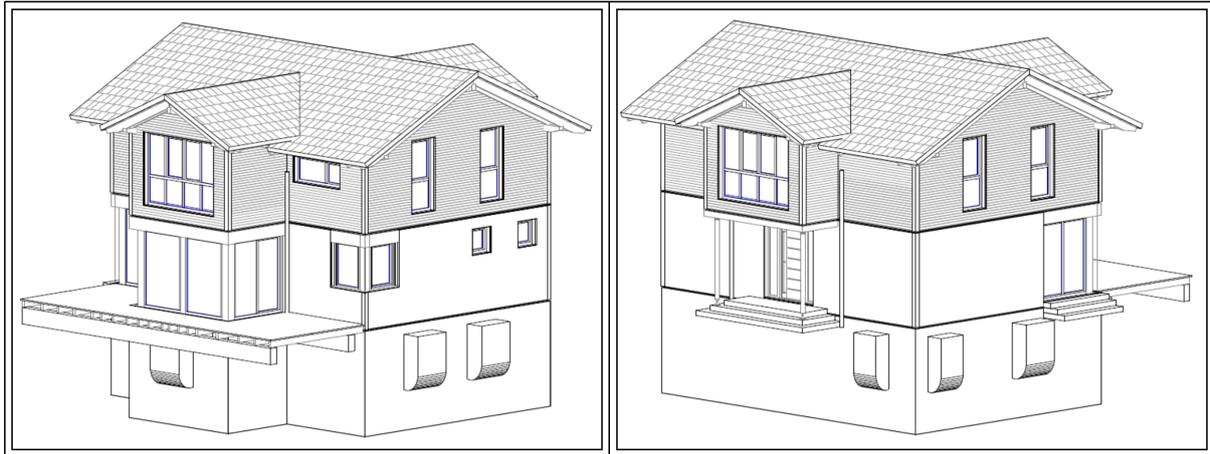


Abbildung 38: GRIFFNER Fertigteilhaus - 3D-Ansicht^a

^agemäß Griffnerhaus GmbH, Haus Kreuzer Christel, Kundennummer: 200218, Haustyp: Classic 4G

mit einem Kniestock versehen. Die einzelnen Wandscheiben der beiden Geschosse weisen ausschließlich an der Giebelwand im Obergeschoss Montagestöße auf. Die Trennung der beiden Stockwerke wird mittels einer Holzbalkendecke vorgenommen. Das Gebäude schließt mit einem Pfettendachstuhl in Form eines gekreuzten Satteldachs ab. Die Decken- und Dachscheiben werden in mehrere Montageelemente unterteilt. Da dies jedoch keinen statischen Einfluss besitzt, kann dieser Umstand in weiterer Folge vernachlässigt werden.

3.2.2 Konstruktionskomponenten

Wie bereits eingangs erwähnt, beschränkt sich die nähere **Betrachtung** des GRIFFNER Fertigteilhauses auf **Außenwand- und Deckenbauteile des Erdgeschosses**. Diese sind in den nachfolgenden Abbildungen farblich hervorgehoben. Obwohl Zwischenwände in der Realausführung teilweise als tragend konstruktiv ausgebildet und mit Kippverankerungen ausgestattet sind, werden diese für Zwecke der Diplomarbeit mit Ausnahme der Wand »I 107« nicht berücksichtigt und sind daher grau hinterlegt.

Ebenso wird bei der Eingabe des baustatischen Modells auf die **reale Aufteilung der Zuganker** (gemäß GRIFFNER), die **vertikale Auflast der Wände** sowie auf die grundsätzlich durch Schrauben (zB Teilgewindeschrauben) verbundenen **schubfesten Eckverbindungen** der Außenwände **verzichtet**. Somit wird der Einfluss des Aufkippens der Wand auf die Wandsteifigkeit wegen fehlender realitätsnaher Auflasten durch das Obergeschoss vernachlässigt und die potentiellen Möglichkeiten zur Optimierung der Zugverankerungen im Rahmen der Diplomarbeit nicht weiter untersucht. Des Weiteren weichen zum Zwecke einer übersichtlichen Auswertung die Schubanker von der gemäß GRIFFNER festgelegten Anordnung ab. Die im Rahmen dieser Diplomarbeit getroffenen Annahmen zu Zug- und Schubverankerungen können dem Detail B (siehe Abbildung 47) aus Anhang C entnommen werden.

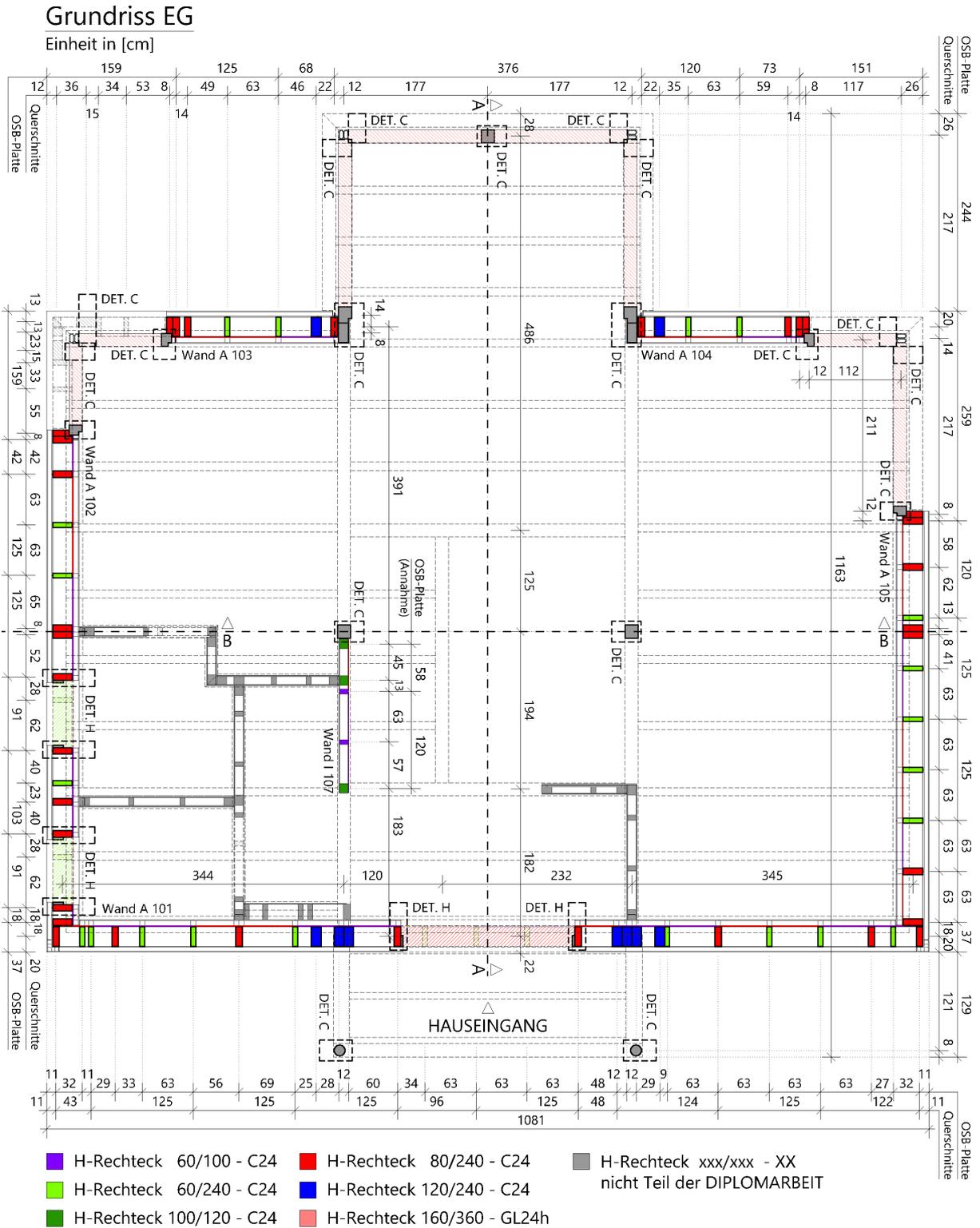


Abbildung 39: GRIFFNER Fertigteilhaus - Grundriss EG

Deckenbalken inkl. Beplankung

Einheit in [cm]

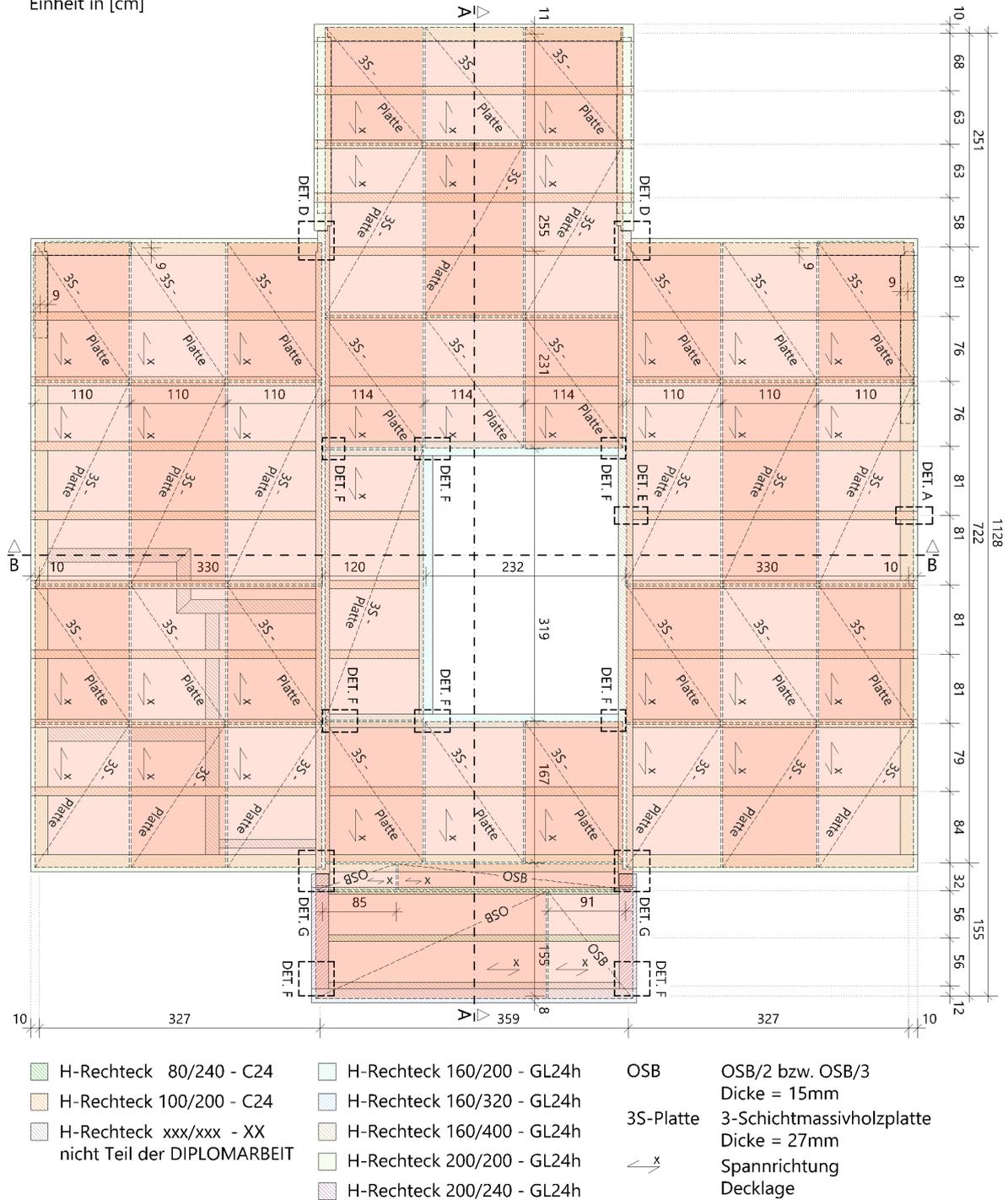


Abbildung 40: GRIFFNER Fertigteilhaus - Deckenbalken inkl. Beplankung

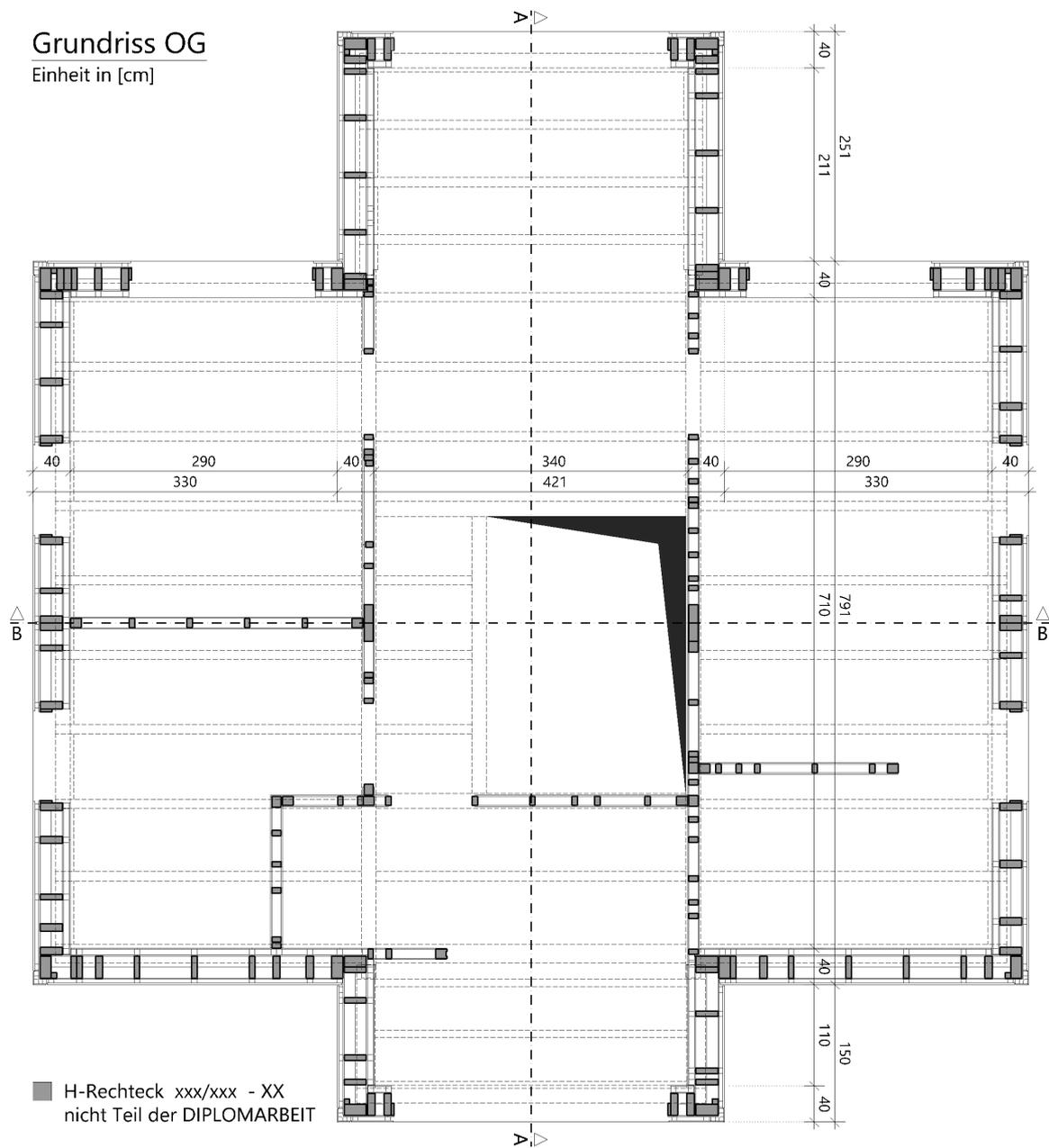


Abbildung 41: GRIFFNER Fertigteilhaus - Grundriss OG

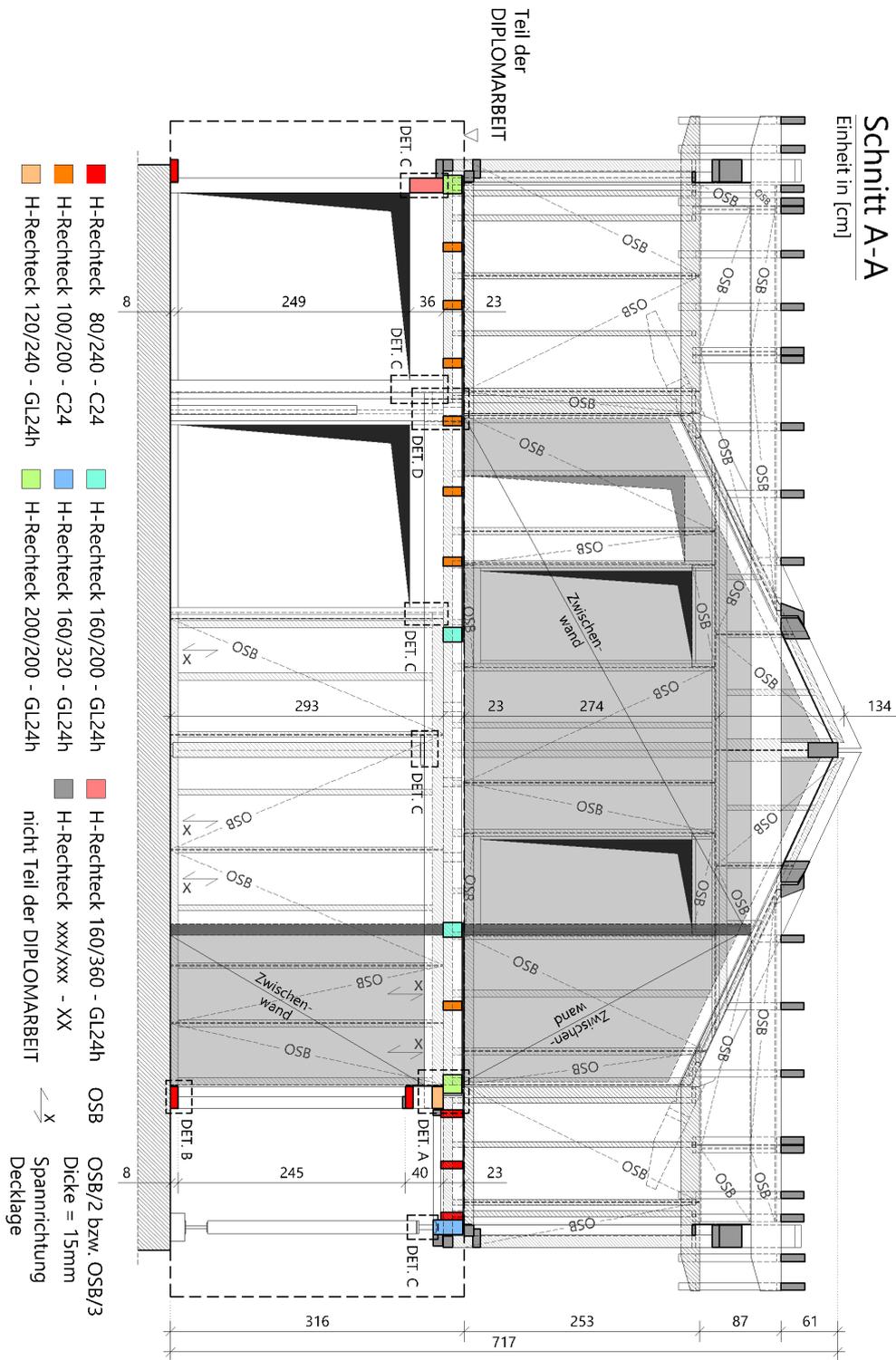


Abbildung 42: GRIFFNER Fertigteilhaus - Schnitt A-A

In den Abbildungen 39 bis 43 sind **Anordnung, Dimension und Werkstoffeigenschaften** der Unterkonstruktion (Balkenquerschnitte) sowie der Beplankung (OSB- bzw. 3-Schichtplatte) definiert. Die für die statische Modellierung der Unterkonstruktion benötigten detaillierten Werkstoffparameter können aus der Tabelle 4 (Kapitel 2.3.10) entnommen werden. Die Werte der Beplankung sind aus der Tabelle 1 im Kapitel 2.3.8.3 ersichtlich.

Hinsichtlich der **Verbindungsmittel** ist zu erwähnen, dass die Beplankung mit der Unterkonstruktion an den Wänden gleichmäßig mit Klammern (Durchmesser: 1,53 mm; Abstand: 70 mm) und an der Decke mit Nägel (Durchmesser: 3,10 mm; Abstand: 80 mm) verbunden ist. Betreffend die für die statische Modellierung relevanten Parameter der Nachgiebigkeit kann auf Tabelle 6 im Kapitel 2.4.4 verwiesen werden.

Anschlüsse der Unterkonstruktion (wie zB Kopplung der Wand- und Deckenscheibe, Verankerung der Wandscheibe mit der Kellerdecke) werden in den nachfolgenden Details des Kapitels 3.3.2 und im Anhang C gezeigt.

3.3 Baustatische Modellbildung

In diesem Abschnitt der Diplomarbeit werden die **Erkenntnisse der Strategie 1** (Stabmodelle) aus Kapitel 2 auf die Beplankung der Teilstruktur (Erdgeschoss) des GRIFFNER Fertigteilhaus **umgelegt**. Dabei soll die **Anwendbarkeit der Strategie 1 demonstriert** und die Auswirkungen bei Vernachlässigung bestimmter Parameter bei der baustatischen Modellbildung der Decken- und Wandscheiben (wie zB Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel) anhand von unterschiedlichen Ausführungsvarianten gezeigt werden. Der Fokus der Analyse wird auf die **Scheibentragwirkung der Außenwand- und Deckenscheiben** gelegt. Die Einflüsse der Modellbildung auf die Plattentragwirkung bleibt für Zwecke der Diplomarbeit unberücksichtigt.

3.3.1 Ausführungsvarianten der Beplankung im Vergleich

Die Abmessung, Anordnung und Werkstoffeigenschaften der Einzelplatten der Beplankung können den Abbildungen 39 bis 43 entnommen werden. Wie bereits erwähnt, sollen durch Gegenüberstellung unterschiedlicher Ausführungsvarianten der Einfluss der baustatischen Modellierungstiefe auf die Bemessungsschnittgrößen und Systemverformungen der Teilstruktur gezeigt werden. Siehe hierzu folgende Tabelle 7:

Tabelle 7: 3D-Struktur: Ausführungsvariante Beplankung

Varianten	Wandscheibe	Deckenscheibe
VAR. 1 Referenz- variante	Schubkreuzmodell inkl. Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel	Rahmenmodell inkl. Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel
VAR. 2	Schubkreuzmodell inkl. Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel	schubstarres Flächenmodell exkl. Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel
VAR. 3	Schubkreuzmodell exkl. Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel	schubstarres Flächenmodell exkl. Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel

Für die Modellierung der **Wandscheiben** wird das **Schubkreuzmodell** gewählt. Für die Anwendung dieser Strategie sprechen vor allem die gedeckten Plattenränder sowie geschlossene Ober- und Untergurte (Kopf- und Fußschwelle). Exemplarisch wird in Abbildung 44 die Anordnung der Schubkreuze am Beispiel der Wand »A 102« gezeigt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die über die Wandhöhe durchgehenden OSB-Platten jeweils mithilfe von zwei übereinander angeordneten Schubkreuzen modelliert werden. Diese Anordnung dient der Verfeinerung des Normalkraftverlaufes der Wandstiele und könnte zur weiteren Abstufung des Kraftverlaufes noch zusätzlich unterteilt werden. Die Modellierung von Stoßlaschen (horizontales Verbindungsholz) zwischen den übereinanderliegenden Schubkreuzen ist für das statische Gleichgewicht in diesem Fall nicht erforderlich. Ausführliche Modellierungsdetails zum Schubkreuzmodell sind im Kapitel 2.6.2.1 enthalten. Durch die Nicht- bzw. Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel an den Stabendgelenken des Schubkreuzmodells ergeben sich die Unterschiede in den jeweiligen Ausführungsvarianten. (Hinweis: Nur am Plattenrand anstoßende Stabenden der Schubkreuze enthalten Arbeitslinien für die Querkraftkomponente infolge von Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel.)

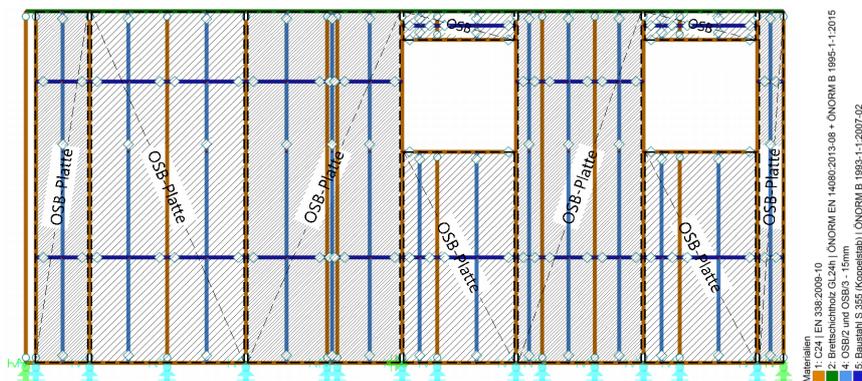


Abbildung 44: GRIFFNER Fertigteilhaus - Wand A 102: Anordnung der Schubkreuze

Im Gegensatz zur Wand- wird die **Deckenscheibe** in der **ersten Ausführungsvariante** (VAR. 1) gemäß den Grundsätzen des **Rahmenmodells** modelliert. Mit dieser Modellierungsstrategie können die Vorgaben des GRIFFNER Fertigteilhauses (wie ungedeckte Plattenstöße sowie teils nicht geschlossene Ober- und Untergurte) abgebildet werden. Für eine nähere Beschreibung des Rahmenmodells siehe Kapitel 2.6.2.2.

Die für das Schubkreuz- bzw. Rahmenmodell gültigen Werkstoffeigenschaften der Beplankung sind in der Tabelle 3 enthalten.

Im Unterschied zu VAR. 1 wird die Beplankung und die Unterkonstruktion der Decke in der **zweiten und dritten Ausführungsvariante** (VAR. 2 und 3) als kompakte Einzelfläche mit annähernd **schubstarrer Scheibensteifigkeit** eingegeben (diese Annahme gilt auch als Grundlage der üblichen vereinfachten Bemessungspraxis). Die Annäherung soll unter Zuhilfenahme einer gewichtslosen isotropen Fläche mit einer Dicke von 20 cm und Werkstoffparameter des Koppelstabs (siehe Tabelle 4) erzielt werden. Die Einzelfläche ist in der Deckenbalkenebene angeordnet. Somit werden Anordnung, Dimension und Werkstoffparameter der Beplankung und Unterkonstruktion aus Abbildung 40 sowie Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel außer Acht gelassen.

3.3.2 Details zur baustatischen Modellbildung der Unterkonstruktion

Die Unterkonstruktion ist aus den Abbildungen 39 bis 43 ersichtlich und bleibt bei der im Kapitel 3.3.1 beschriebenen Ausführungsvariante VAR. 1 unverändert. Bei VAR. 2 und 3 entfällt hingegen aufgrund der schubstarrten isotropen Einzelfläche die Unterkonstruktion der **Deckenscheibe**.

Exemplarisch wird auch die Lage der für die Modellbildung erforderlichen Details ebenfalls in den zuvor erwähnten Abbildungen gezeigt. Detail A wird in Abbildung 45 beispielhaft dargestellt. Die weiteren **Details B bis J** werden **im Anhang C** angeführt.

In den jeweiligen Details sind die Querschnittsdimensionen und Lagen der Stabachsen sowie Werkstoffeigenschaften und Definitionen der Stabendgelenke enthalten. Darüber hinaus werden im Hintergrund (grau hinterlegt) die realen Konstruktionsgegebenheiten des GRIFFNER Fertigteilhauses angedeutet. Am Beispiel von Detail A ist weiters ersichtlich, dass Exzentrizitäten aufgrund der Fokussierung auf die Scheibentragwirkung vernachlässigt werden. So bleibt zB die exzentrische Anordnung der Beplankung bzw. die exzentrische Lagerung der Deckenscheibe auf den Außenwänden unberücksichtigt.

3.4 Lastfälle

In diesem Abschnitt soll die Scheibentragwirkung der Teilstruktur (Erdgeschoss) des GRIFFNER Fertigteilhauses anhand zweier Lastfälle näher analysiert werden. Die Last wird von der Beplankung der Deckenscheibe aufgenommen und anschließend in die restliche Teilstruktur weitergeleitet. Die Plattentragwirkung (ausgelöst durch zB Nutz-

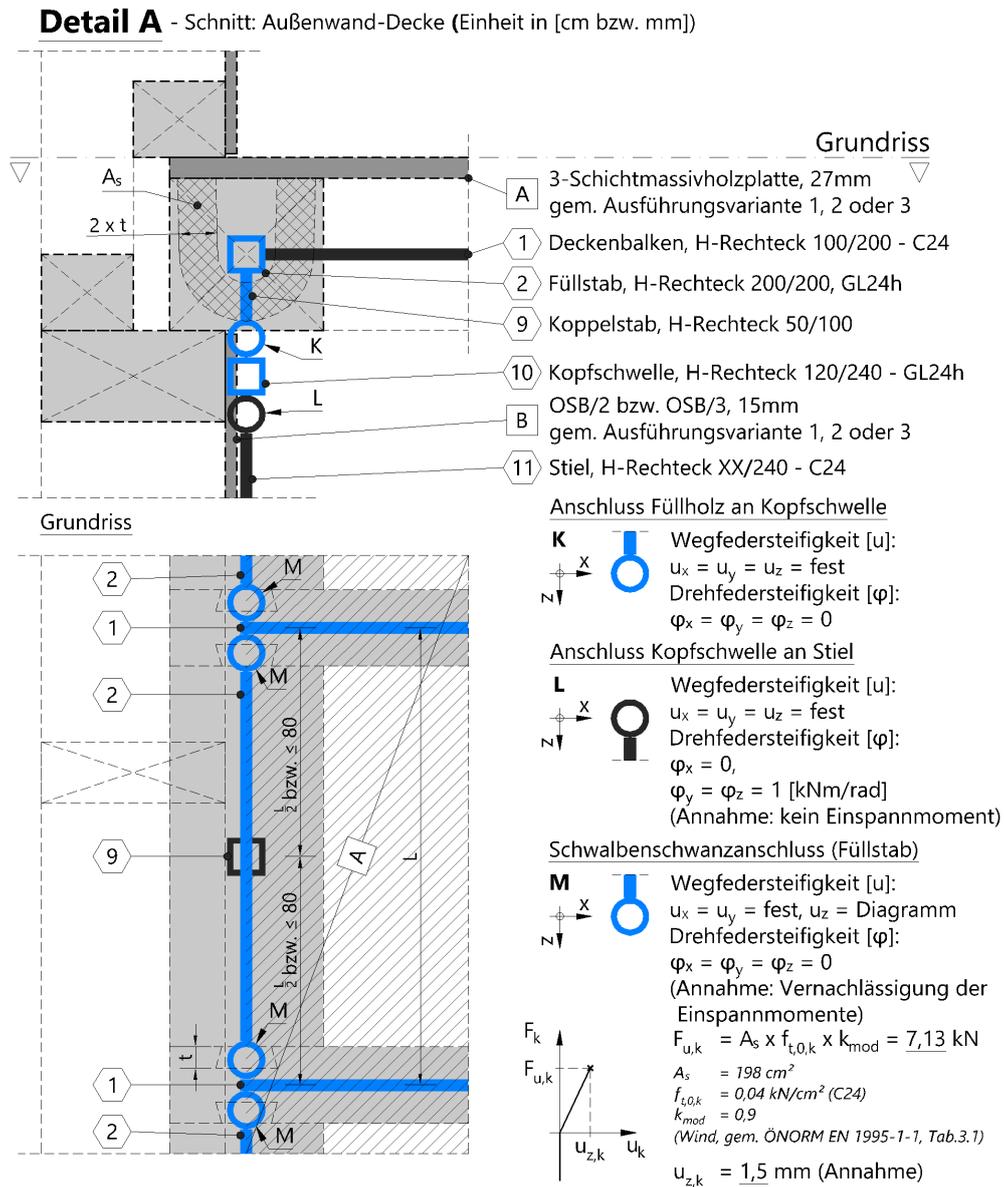


Abbildung 45: GRIFFNER Fertigteilhaus - Detail A: Schnitt Außenwand-Decke

lasten) sowie der Einfluss des Eigengewichts auf die Scheibentragwirkung werden von der Analyse ausgenommen. Abbildung 46 zeigt die beiden Lastfälle (Lastfall 1 & 2).

Lastfall 1 beansprucht die Deckenscheibe mit $f_1 = 1,0 \text{ kN/m}^2$ (vergleichbar mit einer horizontalen Erdbebenlast bei Ausführung eines schweren Estrichs) und wird in VAR. 1 als Stablast und in den VAR. 2 und 3 als Flächenlast aufgebracht.

Lastfall 2 unterscheidet sich von Lastfall 1 lediglich durch die Einwirkungsrichtung der Belastung auf die Teilstruktur.

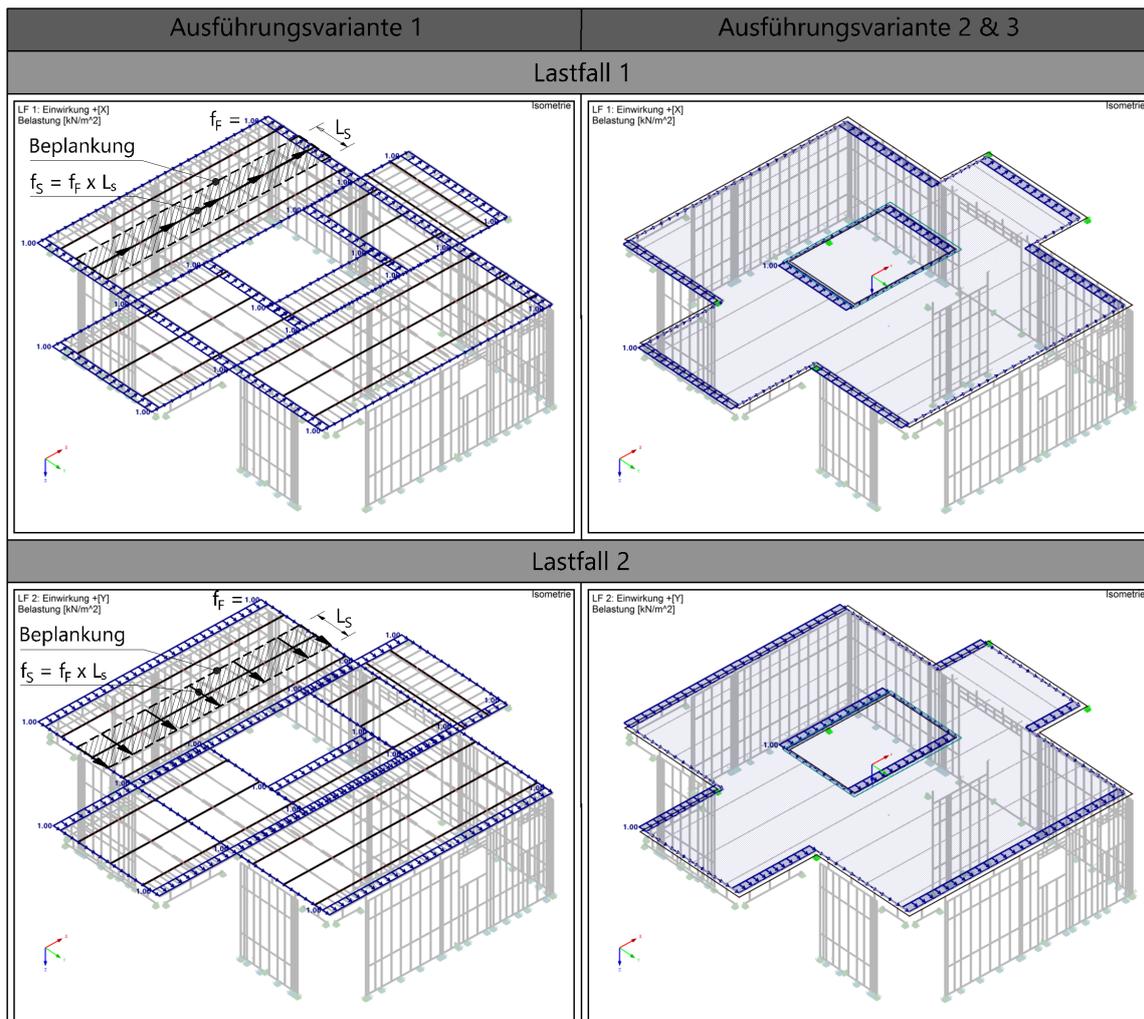


Abbildung 46: GRIFFNER Fertigteilhaas - Lastfall 1 & 2

3.5 Gegenüberstellung, Diskussion & Resümee ausgewählter Ergebnisse

Wie bereits eingangs erwähnt, soll durch Gegenüberstellung unterschiedlicher Ausführungsvarianten der Einfluss der baustatischen Modellierungstiefe auf die Systemverformungen, Schubverankerungen und Bemessungsschnittgrößen der Teilstruktur gezeigt

werden. Dadurch wird demonstriert, inwieweit das baustatische Modell vereinfacht werden und dennoch aussagekräftige Ergebnisse für die Bemessung und Optimierung liefern kann.

3.5.1 Ergebnismatrix

In den nachfolgenden **Tabellen 8 bis 12** werden **ausgewählte Berechnungsergebnisse**, welche sich aus der Belastung (LF 1 und 2) der Teilstruktur ergeben, **in Form einer Ergebnismatrix dargestellt**. Aus den **Zeilen** sind die zu vergleichenden **Ausführungsvarianten** (VAR. 1 bis 3 aus Kapitel 3.3.1) ersichtlich.

In den **Spalten** sind folgende ausgewählte **Vergleichskriterien** abgebildet:

- ⊗ Verformung der Deckenscheibe (Unterkonstruktion)
- ⊗ Resultierende Auflagerreaktionen der horizontalen Schubverankerungen der Wandscheiben
- ⊗ Schnittgrößen (N, V & M) der Deckenscheibe (Unterkonstruktion und Bepan-
kung)

3.5.2 Diskussion der Ergebnisse

.....
A Verformung der Deckenscheibe (Unterkonstruktion)
.....

In den **Spalten 1 und 2** der Tabelle 8 wird der Einfluss der baustatischen Modellierungstiefe auf die **Systemverformungen der Deckenscheibe** gezeigt.

Bei **Abgleich der VAR. 1 mit 2 und 3** ergeben sich für beide Lastfälle wesentliche Unterschiede in der Verformung. Durch Vernachlässigung der Deckensteifigkeit in VAR. 2 (schubstarres Flächenmodell) können die Eigenverformungen der Deckenscheibe nicht mehr abgebildet werden, was zu einer Verdrehung und Verschiebung der Decke als Starrkörper führt. Bei Betrachtung von VAR. 3 lässt sich durch die zusätzliche Nichtberücksichtigung von Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel in den Wandscheiben nochmals eine entscheidende Verringerung der Starrkörperbewegung (Verdrehung und Verschiebung) gegenüber von VAR. 2 erkennen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die vereinfachten Annahmen der VAR. 2 und 3 (siehe Kapitel 3.3.1) die Verformung deutlich unterschätzt wird. Speziell bei Decken mit Durchbrüchen, unbestimmter Lagerung und nachgiebiger Verbindungsmittel ist die Annahme von starren Deckenscheiben somit unzulässig. Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel in den Wandscheiben üben ebenfalls großen Einfluss auf die Verformung der Deckenscheibe aus und dürfen daher auch nicht vernachlässigt werden. Eine **geeignete Nachweisführung der Gebrauchstauglichkeit** kann demzufolge nur **unter Zuhilfenahme von VAR. 1** erzielt werden.

Tabelle 8: GRIFFNER Fertigteilhaus - Deckenscheibe (Unterkonstruktion) - Verformung

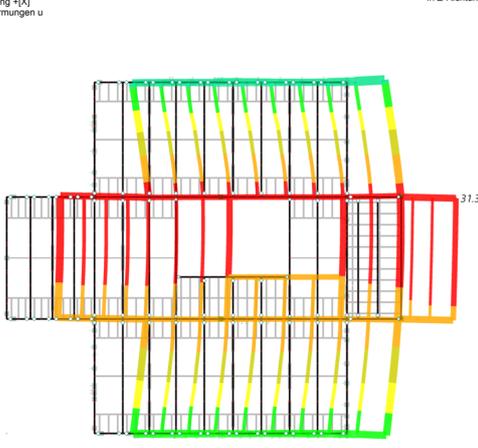
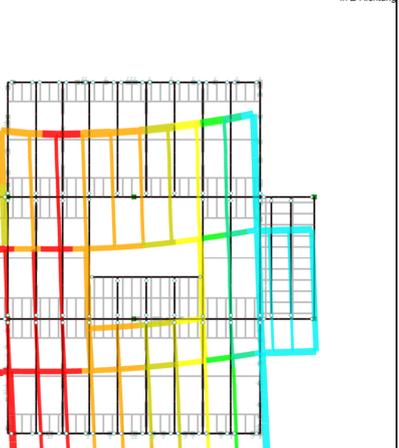
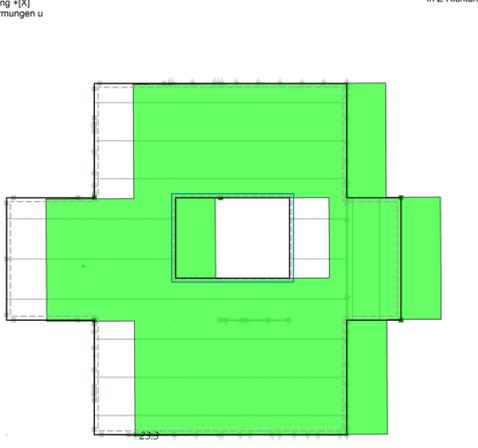
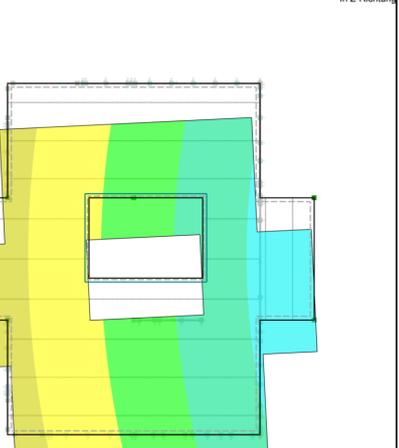
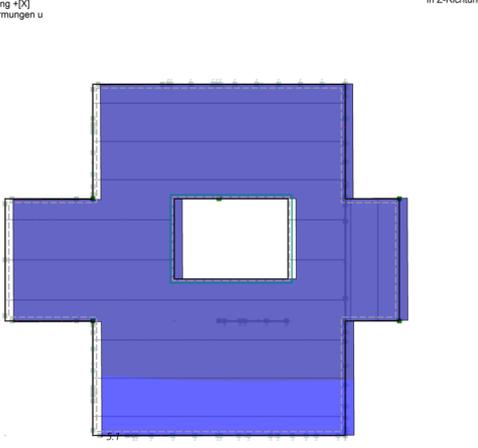
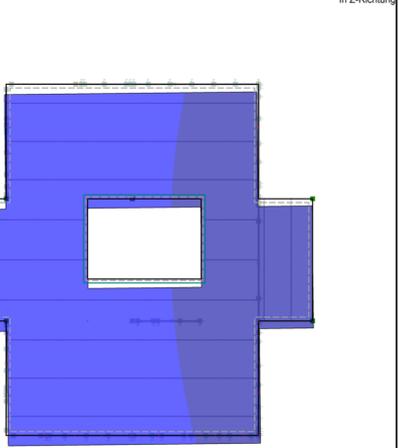
[1] Verformung	LF 1	[2] Verformung	LF 2	VAR. 1
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Globale Verformungen u Globale Vert: u [mm]</p>  <p>Max u: 31.3, Min u: 21.5 [mm] Faktor für Verformungen: 50.00</p>		<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Globale Verformungen u Globale Vert: u [mm]</p>  <p>Max u: 34.5, Min u: 18.3 [mm] Faktor für Verformungen: 50.00</p>		
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Globale Verformungen u Globale Vert: u [mm]</p>  <p>Max u: 23.3, Min u: 22.2 [mm] Faktor für Verformungen: 50.00</p>		<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Globale Verformungen u Globale Vert: u [mm]</p>  <p>Max u: 29.1, Min u: 18.2 [mm] Faktor für Verformungen: 50.00</p>		VAR. 2
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Globale Verformungen u Globale Vert: u [mm]</p>  <p>Max u: 5.1, Min u: 4.3 [mm] Faktor für Verformungen: 50.00</p>		<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Globale Verformungen u Globale Vert: u [mm]</p>  <p>Max u: 6.6, Min u: 4.1 [mm] Faktor für Verformungen: 50.00</p>		VAR. 3

Tabelle 9: GRIFFNER Fertigteilhaus - Auflagerreaktionen - Schubverankerungen

	[3] Auflagerreaktionen	LF 1	[4] Auflagerreaktionen	LF 2
VAR. 1	<p>LF 1: Einwirkung +[X] Lagerreaktionen[kN]</p> <p>Max P-X: 34.5, Min P-X: -0.3 kN</p>	In Z-Richtung	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Lagerreaktionen[kN]</p> <p>Max P-X: 44.1, Min P-X: -6.0 kN</p>	In Z-Richtung
VAR. 2	<p>LF 1: Einwirkung +[X] Lagerreaktionen[kN]</p> <p>Max P-X: 35.8, Min P-X: -0.6 kN</p>	In Z-Richtung	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Lagerreaktionen[kN]</p> <p>Max P-X: 46.4, Min P-X: -7.6 kN</p>	In Z-Richtung
VAR. 3	<p>LF 1: Einwirkung +[X] Lagerreaktionen[kN]</p> <p>Max P-X: 36.8, Min P-X: -2.1 kN</p>	In Z-Richtung	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Lagerreaktionen[kN]</p> <p>Max P-X: 47.2, Min P-X: -8.4 kN</p>	In Z-Richtung

Tabelle 10: GRIFFNER Fertigteilhaus - Deckenscheibe - Normalkraft

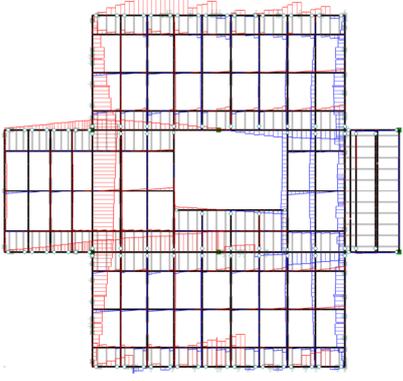
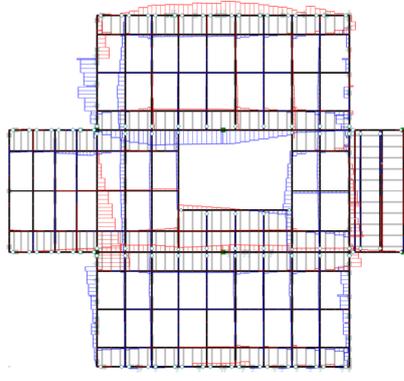
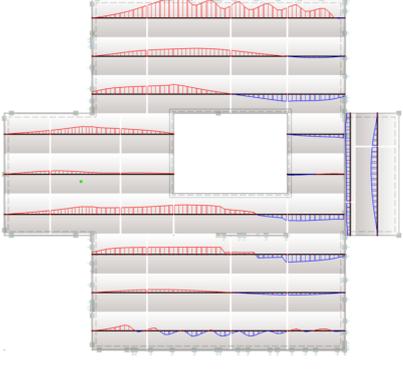
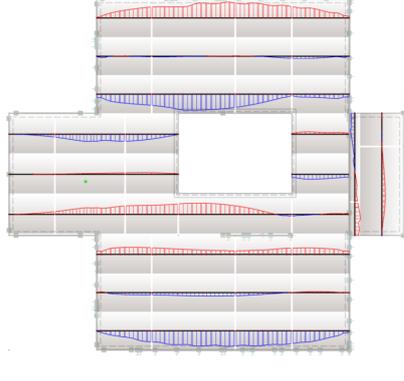
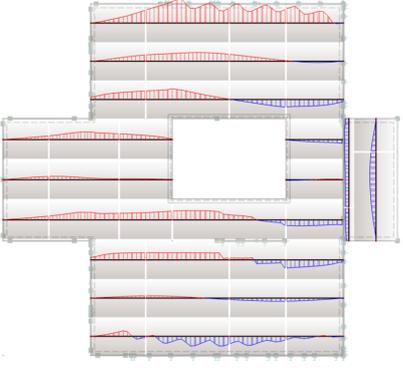
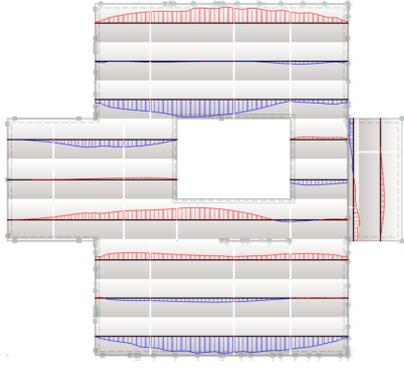
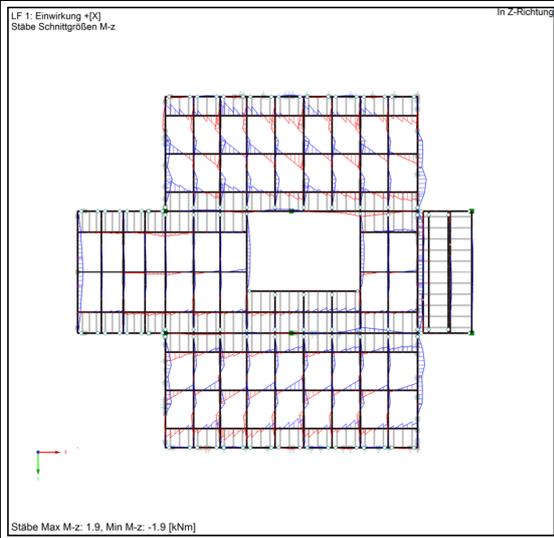
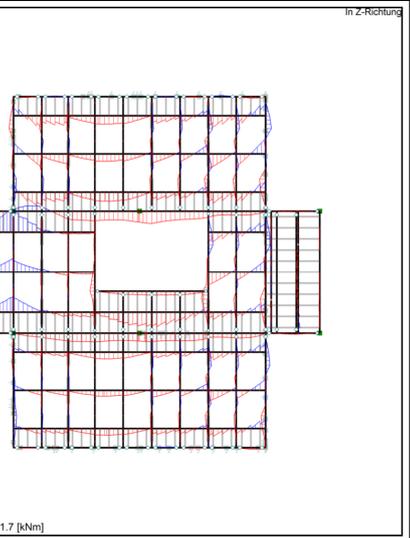
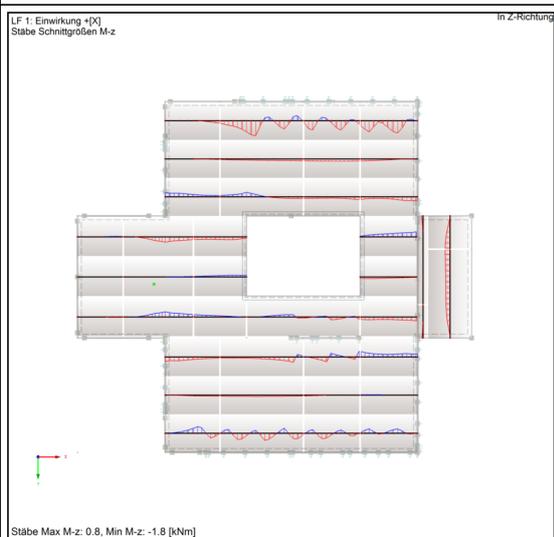
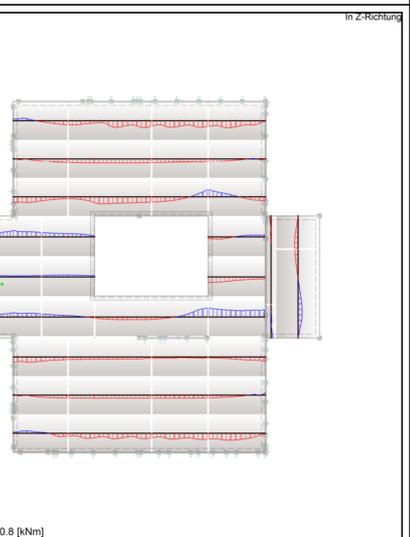
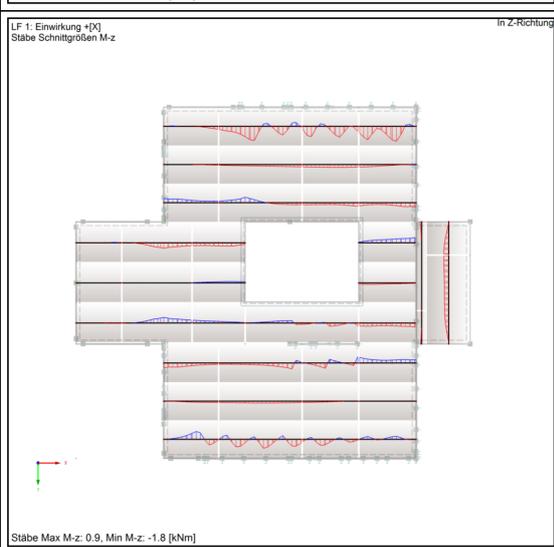
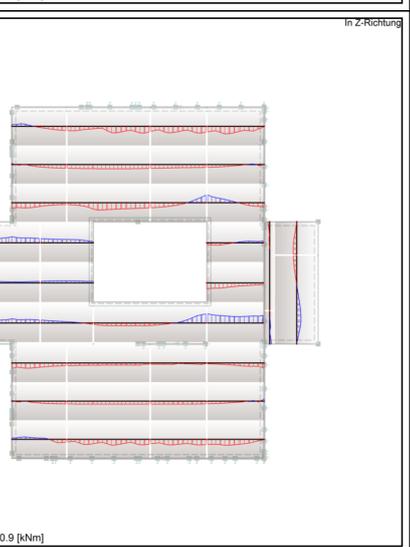
[5] Normalkraft	LF 1	[6] Normalkraft	LF 2	VAR. 1
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen N</p>  <p>Stäbe Max N: 5.8, Min N: -13.1 [kN]</p>	<p>In Z-Richtung</p>	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen N</p>  <p>Stäbe Max N: 8.0, Min N: -13.2 [kN]</p>	<p>In Z-Richtung</p>	
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen N</p>  <p>Stäbe Max N: 3.2, Min N: -9.7 [kN]</p>	<p>In Z-Richtung</p>	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen N</p>  <p>Stäbe Max N: 6.7, Min N: -6.5 [kN]</p>	<p>In Z-Richtung</p>	
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen N</p>  <p>Stäbe Max N: 4.0, Min N: -9.8 [kN]</p>	<p>In Z-Richtung</p>	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen N</p>  <p>Stäbe Max N: 7.0, Min N: -6.3 [kN]</p>	<p>In Z-Richtung</p>	
				VAR. 3

Tabelle 11: GRIFFNER Fertigteilhaus - Deckenscheibe - Querkraft

	[7] Querkraft	LF 1	[8] Querkraft	LF 2
VAR. 1	<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p>Stäbe Max V-y: 5.4, Min V-y: -4.4 [kN]</p>	In Z-Richtung	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p>Stäbe Max V-y: 7.7, Min V-y: -5.6 [kN]</p>	In Z-Richtung
VAR. 2	<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p>Stäbe Max V-y: 7.8, Min V-y: -6.0 [kN]</p>	In Z-Richtung	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p>Stäbe Max V-y: 9.3, Min V-y: -9.0 [kN]</p>	In Z-Richtung
VAR. 3	<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p>Stäbe Max V-y: 7.9, Min V-y: -5.8 [kN]</p>	In Z-Richtung	<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p>Stäbe Max V-y: 9.4, Min V-y: -9.6 [kN]</p>	In Z-Richtung

Tabelle 12: GRIFFNER Fertigteilhaus - Deckenscheibe - Moment

[9] Moment	LF 1	[10] Moment	LF 2	
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen M-z</p>  <p>In Z-Richtung</p> <p>Stäbe Max M-z: 1.9, Min M-z: -1.9 [kNm]</p>		<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen M-z</p>  <p>In Z-Richtung</p> <p>Stäbe Max M-z: 2.7, Min M-z: -1.7 [kNm]</p>		VAR. 1
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen M-z</p>  <p>In Z-Richtung</p> <p>Stäbe Max M-z: 0.8, Min M-z: -1.8 [kNm]</p>		<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen M-z</p>  <p>In Z-Richtung</p> <p>Stäbe Max M-z: 1.1, Min M-z: -0.8 [kNm]</p>		VAR. 2
<p>LF 1: Einwirkung +[X] Stäbe Schnittgrößen M-z</p>  <p>In Z-Richtung</p> <p>Stäbe Max M-z: 0.9, Min M-z: -1.8 [kNm]</p>		<p>LF 2: Einwirkung +[Y] Stäbe Schnittgrößen M-z</p>  <p>In Z-Richtung</p> <p>Stäbe Max M-z: 1.1, Min M-z: -0.9 [kNm]</p>		VAR. 3

.....
B Auflagerreaktionen der Schubverankerungen der Wandscheiben
.....

In Tabelle 9 sind in den **Spalten 3 und 4** die **Auflagerreaktionen der Schubverankerungen** des jeweiligen Lastfalls abgebildet.

Bei **Gegenüberstellung der VAR. 1 mit 2 und 3** sind vor allem bei Betrachtung von **LF 1** merkliche Differenzen zu erkennen. In diesem Fall wirkt die Deckenscheibe aufgrund der drei parallel zur Belastung ausgerichteten Wandscheiben (Außenwand A 102 und A 105 bzw. Zwischenwand I 107, siehe Abbildung 39) als Durchlaufträger. Die normal zu Belastung wirkenden Wandscheiben üben nur wenig Einfluss auf das Tragverhalten aus. Durch die Berücksichtigung der Deckensteifigkeit in VAR. 1 zeigt sich eine von VAR. 2 und 3 abweichende Verteilung der Auflagerreaktionen des Durchlaufträgers. Dieser Effekt ist vor allem am Auflager der Zwischenwand ersichtlich. Hier wird die Auflagerreaktion der Schubverankerung in VAR. 2 und 3 um ca. 20% unterschätzt.

Im **LF 2** zeigen Lagerreaktionen der parallel zur Belastung ausgerichteten Wände (Außenwand A 101, A 103 und A 104) in den einzelnen Ausführungsvarianten kaum Unterschiede (Einfeldträger). Aufgrund der unsymmetrischen Anordnung der normal zur Belastung ausgerichteten Wandscheiben und der exzentrischen Lasteinleitung (bezogen auf den Steifigkeitsschwerpunkt der aussteifenden Wände, siehe Kapitel 1.2) weichen die Lagerreaktionen voneinander ab und werden in VAR. 2 und 3 grundsätzlich überschätzt.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Deckensteifigkeit eine entscheidende Rolle bei der Verteilung der Auflagerreaktionen der Schubverankerungen von Wandscheiben spielt. Bei einer überschlagsmäßigen **Vordimensionierung** ist die **Annahme einer schubstarrten Deckenscheibe vertretbar**. Für die **Detailbemessung** von Schubverankerungen ist, wie bereits im Abschnitt zuvor erwähnt, bei Decken mit Durchbrüchen, unbestimmter Lagerung und nachgiebiger Verbindungsmittel die **Berücksichtigung der realen Deckenscheibensteifigkeit** jedoch **unumgänglich** (siehe auch kritische Anmerkungen im Kapitel 1.2).

.....
C Schnittgrößen (N, V & M) der Deckenscheibe (Unterkonstruktion und Beplankung)
.....

In den **Spalten 5 bis 10** der Tabellen 10 bis 12 werden **die Schnittgrößen (Normal-, Querkraft und Moment) der Deckenscheibe**, welche der Bemessung von Unterkonstruktion, Beplankung und deren Befestigung dienen, dargestellt.

Um den **Vergleich von VAR. 2 und 3 mit VAR. 1** zu ermöglichen, wurden die Flächenschnittgrößen der Unterkonstruktion und Beplankung aus VAR. 2 und 3 mithilfe von Ergebnisstäben zu Stabschnittgrößen aufintegriert. Durch das Vereinen von Unterkonstruktion und Beplankung im schubstarrten Flächenmodell gehen jedoch viele essentielle Informationen (wie zB Anschlüsse der Unterkonstruktion, Anordnung der Einzelplatten der Beplankung, Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel, etc.) verloren. Daher sind,

wie in den Tabellen gut ersichtlich, die aufintegrierten Schnittkraftverläufe der Ergebnisstäbe - mit Ausnahme von Querkraft V - qualitativ und quantitativ nicht mehr direkt mit VAR. 1 vergleichbar. Da der Querkraftverlauf der VAR. 2 und 3 qualitativ (aber nicht quantitativ) mit VAR. 1 übereinstimmt, könnte die Schnittkraft V für eine Vorbemessung der Beplankung unter Umständen herangezogen werden. Aufgrund des Abweichens der restlichen Scheibenschnittgrößen, ist eine finale Bemessung der Beplankung jedoch nicht zielführend.

In Summe zeigt sich, dass die **Bemessung der Unterkonstruktion und Beplankung** der Deckenscheibe **ausschließlich durch Schnittgrößen der VAR. 1 erfolgen muss** und die **Eingabe als schubstarre Fläche nicht als sinnvoll** erachtet werden kann.

3.5.3 Resümee

Durch die **vereinfachte Modellierung** der Wand- und Deckenscheiben **gemäß den Ausführungsvarianten 2 und 3** soll der Einfluss der baustatischen Modellierungstiefe auf die Bemessungsschnittgrößen und Systemverformungen der Teilstruktur gegenüber der Variante 1 aufgezeigt werden. Die analysierten Ergebnisse führen jedoch vor allem bei Betrachtung des Verformungsverhaltens und der Schnittgrößen der Deckenscheibe zu **keiner guten Übereinstimmung mit Ausführungsvariante 1**.

Daraus kann geschlossen werden, dass ohne korrekte mechanische Modellierung die Bemessung und anschließende Optimierung des Gebäudes nicht möglich ist bzw. Ungenauigkeiten und Unsicherheiten - ausgelöst durch vereinfachte Annahmen bei der Eingabe des Modells - durch erhöhte Teilsicherheitsfaktoren kompensiert werden müssten. Die vorgenommenen Vereinfachungen aus VAR. 2 und 3 führen somit zu keinen verwertbaren Ergebnissen und heben auch nicht das statische Verständnis der Baustruktur.

Zusammenfassung

Grundidee bzw. Ziel dieser Diplomarbeit war es, **bestehende Strukturen baustatischer Modellbildung im Fertighausbau** in Zusammenarbeit mit der Firma GRIFFNER zu **optimieren**. **Ausgangspunkt** einer wirtschaftlichen und effizienten Nachweissführung bildet eine realitätsnahe **baustatische Modellbildung am 3D System**. Das Hauptaugenmerk liegt dabei vor allem in der ordnungsgemäßen Abbildung der Wand-, Decken- und Dachsteifigkeiten innerhalb eines Gebäudes, um die für die Bemessung erforderlichen Verformungen, Schnittgrößen und Auflagerreaktionen innerhalb der Struktur wirklichkeitsnahe abbilden zu können.

Im Holzrahmenbau übt die **Beplankung und deren Verbindung mit der Unterkonstruktion großen Einfluss auf die Scheibensteifigkeit** von Wand-, Decken- und Dachscheiben aus. In der **derzeitigen Praxis** wird dieser Einfluss auf das statische Tragverhalten allerdings aufgrund mangelndem Problembewusstsein und beschränkter Leistungsfähigkeit der eingesetzten Statiksoftware nur **stark vereinfacht berücksichtigt**. Somit werden unter anderem horizontale Erdbeben- und Windlasten über starre Deckscheiben auf mehrere, meist nachgiebige Wandscheiben verteilt oder auch die Anordnung und Größe der Einzelplatten der Beplankung sowie deren Befestigung mit der Unterkonstruktion bei der Ermittlung der Decken- sowie Wandscheibensteifigkeit vernachlässigt (siehe Kapitel 1.2). Die Folge daraus sind unter anderem Unter- bzw. Überschätzung von Schnittgrößen und Fehleinschätzung des Verformungsverhaltens.

Beim anfänglichen Versuch einzelne Platten der Beplankung im 3D-Modell des gesamten GRIFFNER Fertighauses realitätsnah als Flächen zu modellieren, stellte sich die Eingabe und Berechnung mit dem Statikprogramm RFEM als äußerst aufwändig, zeintensiv und unübersichtlich heraus (siehe dazu auch Kapitel 1.4). Aus diesen Gründen wurde versucht, **effizientere baustatische Modelle für die Scheibentragwirkung der Beplankung** zu entwickeln.

In diesem Zusammenhang wurden **zwei unterschiedliche Strategien bzw. Systeme** entwickelt und mit einem Referenzmodell verglichen:

- ❁ **Strategie 1** (Stabtheorie):
Schubkreuzmodell (System 0) und Rahmenmodell (System 1)
- ❁ **Strategie 2** (vereinfachte Flächentheorie):
orthotropes Flächenmodell mit reduziertem Schub- und E-Modul (System 2)
- ❁ **Strategie 3** (Flächentheorie):
orthotropes Flächenmodell mit Nachgieigkeiten (System 3, Referenzmodell)

Die **Überprüfung der Strategien** auf ihre Eignung für die baustatische Modellbildung wurde **in zwei Stufen** durchgeführt.

In der **ersten Stufe** wurde zwecks Entflechtung der Komplexität das **Tragverhalten einer einzelnen Holzwerkstoffplatte der Beplankung** analysiert, weshalb zunächst lediglich ein Vergleich von Rahmen- und Referenzmodell sinnvoll war. Nach **Abgleich der erhaltenen Ergebnisse** zeigte sich, dass die Ermittlung von Auflagerreaktionen (als Ausgangsbasis für die Rückrechnung der Verbindungsmittelkräfte), Verformungen und Schnittkräften (N, V & M) der Einzelplatte **gemäß System 1 zu einer guten Näherung an System 3** führte. Ebenfalls spiegelte der Normalspannungsverlauf (bestehend aus Biegung und Normalkraft) parallel zur Plattenlängsseite global eine sehr gute Übereinstimmung zwischen System 1 und 3 wieder. Einzig die Spannungsspitzen im Störbereich (Auflager und Lasteinleitung) konnten durch System 1 nicht abgedeckt werden. Zusätzlich resultierten quantitative Unterschiede in den Schubspannungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Querschnittsverwölbungen nur mittels Flächenmodell dargestellt werden können. Mit zunehmender Schubsteifigkeit der Holzwerkstoffplatte relativiert sich jedoch der Einfluss der Querschnittsverwölbung auf die Schubspannungen.

In der **zweiten Stufe** wurde das **Zusammenwirken einzelner Holzwerkstoffplatten im Verbund** beleuchtet. Bei der baustatischen Modellbildung nach **Strategie 1** (Schubkreuz- und Rahmenmodell) wurden sowohl beim Verformungsverhalten als auch bei der Verteilung der Schnittgrößen von Beplankung und Unterkonstruktion **gute Annäherungen an das Referenzmodell** der Strategie 3 festgestellt. Strategie 1 ermöglicht somit eine direkte Ablesbarkeit von für die Bemessung der Verbindungsmittel, Beplankung und Unterkonstruktion relevanten Werten sowie eine realitätsnahe Verteilung der Kräfte auf weitere Bauteile eines dreidimensional baustatisch modellierten Gebäudes. **Strategie 2** verfolgt das Ziel, die kleinformatischen Einzelplatten und deren nachgiebige Verbindung mit der Unterkonstruktion durch eine homogenisierte orthotrope Fläche mit reduziertem Schub- und E-Modul zu ersetzen (analog zur Bemessungspraxis mit Schubfeldern aus Trapezblech). Für Zwecke des qualitativen Vergleichs von Strategie 2 mit 3 (Referenzmodell) war die Anpassung des Schub- und E-Moduls vorerst jedoch nicht nötig. Die ohne Reduktion ermittelten Ergebnisse der Strategie 2, ergaben grundsätzlich **keine guten Übereinstimmungen mit den berechneten Verformungen und Schnittkraftverläufen des Referenzmodells**. Es konnte weder das globale, noch das lokale Verformungsverhalten (wie zB die gegenläufige Verschiebung der Plattenränder entlang der Plattenlängsseite) abgebildet werden. Da eine Verbesserung der Ergebnisse

mittels Reduktion des Schub- und E-Moduls nicht absehbar war, wurde auf eine nähere Analyse der Strategie 2 im Rahmen dieser Diplomarbeit verzichtet.

Aus den zuvor gewonnen Erkenntnissen konnte geschlossen werden, dass **Strategie 1** eine sehr gute Alternative zu Strategie 3 (Referenzmodell) bildet und daher **zur Modellierung einer realen 3D-Struktur eingesetzt werden kann**.

Am Beispiel der 3D-Teilstruktur eines GRIFFNER Fertighauses (Erdgeschoss) wurde anschließend **nicht nur die Anwendbarkeit der Strategie 1** (Schubkreuz- bzw. Rahmenmodell) **demonstriert, sondern** im Rahmen einer Parameterstudie zusätzlich **auch die Auswirkungen der Vernachlässigung bestimmter Parameter** im Sinne einer üblichen vereinfachten Nachweisführungspraxis **aufgezeigt**. Die Variation im baustatischen 3D-Modell erfolgte einerseits mit dem Ersatz der realen Deckensteifigkeit (Unterkonstruktion, Beplankung sowie Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel) durch eine homogenisierte Einzelfläche mit annähernd schubstarrer Steifigkeit, sowie andererseits durch die Nichtberücksichtigung von Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel der Beplankung aller Wandscheiben.

Die vorgenommenen Vereinfachungen führten jedoch zu keinen für die finale Bemessung des Gebäudes verwertbaren Ergebnissen. Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel in den Wandscheiben üben großen Einfluss auf die Verformung der Deckenscheibe aus und dürfen nicht außer Acht gelassen werden. Bei Decken mit Durchbrüchen, unbestimmter Lagerung und nachgiebiger Verbindungsmittel wurde sowohl bei der Ermittlung von Verformungen als auch von Auflagerreaktionen festgestellt, dass die Annahme von starren Deckenscheiben unzulässig ist. Durch die Nichtberücksichtigung der realen Deckenscheibensteifigkeit werden Verformungen deutlich unterschätzt sowie die Lagerreaktionen der Schubverankerungen zumeist über- als auch unterschätzt. Zusätzlich lässt die Annahme von starren Deckenscheiben eine Ermittlung von Schnittgrößen für die Bemessung der Unterkonstruktion, Beplankung und deren Verbindung aufgrund von zu hohen Informationsverlusten (zB durch Vernachlässigung der Anschlüsse der Unterkonstruktion, der Anordnung der Einzelplatten der Beplankung, der Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel) nicht zu. Somit kann weder eine vollständige und sinnvolle Vor- noch eine zielführende Detailbemessung durchgeführt werden.

Ergänzend zur oben angeführten Ergebnisauswertung können die folgende Aussagen als **Feedback an den Holzbauingenieur** gegeben werden:

- ☉ Bei der **Modellierung der Beplankung** bildet die Stabtheorie eine **gute Alternative zur Flächentheorie**. Diese ist für eine übliche Anwendung absolut ausreichend und ermöglicht eine ressourcenschonende Rechenleistung. Ein vollständiger Ersatz ist jedoch nicht möglich. Dort, wo das statische System eine genauere Berechnung im Modell fordert (zB bei Spannungsspitzen infolge von Durchbrüchen und einspringenden Ecken, unregelmäßigen Plattenformaten, Überlagerung von Scheiben- und Plattenschnittgrößen), ist die lokale Modellierung einzelner Platten mittels Flächentheorie unerlässlich und auch zumutbar.

- ☉ Durch die Modellbildung der Beplankung mit **baustatisch intelligenten bzw. alternativen Methoden** (zB Stabtheorie) wird die Berechnungszeit im Statikprogramm RFEM reduziert und das baustatische Verständnis für das Gebäude erleichtert.
- ☉ **Annahmen**, die im Rahmen der baustatischen Modellbildung getroffen werden, **müssen auch konstruktiv realisierbar sein**. Zum Beispiel müssen die im baustatischen Modell ermittelten Relativverschiebungen zwischen Beplankung und Unterkonstruktion, welche durch die Annahme von nachgiebigen Verbindungsmittel entstehen, in der Realität auch tatsächlich mit der Verformungscharakteristik der eingesetzten Verbindungsmittel übereinstimmen.
- ☉ **Ungenauigkeiten** bzw. Unsicherheiten - ausgelöst **durch vereinfachte Annahmen** bei der baustatischen Eingabe eines Gebäudes - sollten hinterfragt werden und müssten durch erhöhte Teilsicherheitsfaktoren kompensiert werden (was in der [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] zwar prinzipiell vorgesehen, jedoch nicht umgesetzt wird).
- ☉ Das **Vermeiden von Fehler in der Bauteilbemessung** infolge falscher Schnittgrößen ist ohne ordnungsgemäße Berücksichtigung der Wand-, Decken- und Dachscheibensteifigkeiten (siehe Kapitel 1.2) nur schwer möglich.
- ☉ Die **Beurteilung der Akzeptierbarkeit von Ausführungsfehler** in der Baupraxis ist nur mit erhöhter Modellierungstiefe möglich.

Außerdem wird die Möglichkeit im Rahmen dieser Diplomarbeit genutzt, um den **Softwarehersteller ein Feedback** zu geben. Im Sinne einer flüssigen baustatischen Modellierung und einer fehlerfreien Ergebnisermittlung von Gebäudestrukturen im Statikprogramm RFEM wäre zu wünschen, dass die nachstehend angeführten Probleme im Zuge eines **Softwareupdates** demnächst behoben werden:

- ☉ Bei der Eingabe von Flächen und Stäben in einer Ebene kann es zu **Überschneidungen zwischen Balkenstäbe und Liniengelenke** kommen. In der FE-Netzgenerierung können dadurch **fehlerhafte Verknüpfungen** zwischen Stab-, Flächen- und Liniengelenksteifigkeiten auftreten, welche die Ergebnisse erheblich verfälschen können (siehe Kapitel 1.4).
- ☉ Jede Fläche und jedes Liniengelenk einer einzelnen Platte muss extra eingegeben werden, da eine **Vervielfältigung durch Kopieren sehr oft nicht möglich** ist. Beispielsweise wird beim Kopieren von Linienfreigaben die Verknüpfung zu einer bereits bestehenden Fläche nicht automatisch erkannt bzw. lassen sich Liniengelenke überhaupt nicht vervielfältigen.
- ☉ Die für die **Verbindungsmittelbemessung der Beplankung** notwendigen Kräfte müssen derzeit von den Schnittgrößen der Unterkonstruktion bzw. Beplankung rückgerechnet werden, da eine **direkte Ablesbarkeit von den Liniengelenken** analog zur Darstellbarkeit von Auflagerkraftkomponenten bei Linienlager hervorheben nicht gegeben ist.

Im Sinne einer **benutzerfreundlichen Eingabe** wäre eine Software-unterstützte Modellierung der nachfolgenden Substrukturen wünschenswert:

- ☉ Auf **Einzelplattenebene** wäre eine Einbindung der Stabtheorie (Strategie 1) für die Modellbildung der Beplankung sinnvoll, um eine automatische Generierung gemäß Schubkreuz- und Rahmenmodell zu ermöglichen. Die mühselige händische Eingabe der einzelnen Bestandteile (Geometrie und Werkstoffeigenschaften der Balkenstäbe sowie Gelenksdefinitionen) könnte somit minimiert werden.
- ☉ Auf der Ebene eines **Wandabschnitts mit Öffnungen** wäre eine automatische Generierung von Unterkonstruktion (zB Bezugssteherlage) und Beplankung (zB Plattenanordnung und -formate) empfehlenswert. Zusätzlich sollte der Level für die baustatischen Modellbildung der Beplankung (Auswahl zwischen Stab- und Flächentheorie) wählbar sein.

Abschließend ist zu erwähnen, dass aufbauend auf die Erkenntnisse dieser Diplomarbeit noch Raum für **weiterführende Forschungen** gegeben ist. Beispielsweise könnte mittels Parameterstudie die **Erweiterung der Anwendbarkeit** von Strategie 1 (Schubkreuz- und Rahmenmodell) auf alternative Plattenanordnungen (zB nicht orthogonale Anordnung der Unterkonstruktion zur Plattenlängsseite) überprüft werden. Als **weiterer Entwicklungsschritt** könnte eine reale Gebäudestruktur mit wirklichkeitsnaher Belastung anhand der Stabtheorie modelliert und auf die vorhandenen Optimierungspotentiale (zB Reduktion der Verbindungsmittel, Optimierung der Plattenanordnung und -formate, Verringerung des Produktionsaufwands) untersucht werden.

**Strategien baustatischer Modellbildung - Stufe 1:
Einzelplatte**

Tabelle 13: Einzelplatte - Lastfall 1 - [1] System & Last, [2] horizontale Auflagerreaktionen

Lastfall 1: Beanspruchung normal zum oberen Plattenrand		[2] horizontale Auflagerreaktionen			
[1] System & Last					
A	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 1: Beanspruchung normal zum oberen Plattenrand Belastung [kN]</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>LF 1: Beanspruchung normal zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN]</p> <p>Max P-X: 0.04, Min P-X: -0.04 kN</p> <p> $\sigma_x = 0.330\text{m}$ $u_x = 0.330\text{m}$ $\sigma_z = 0.0264\text{km}$ $M_x = 0.013\text{km}$ </p>	B	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 1: Beanspruchung normal zum oberen Plattenrand Belastung [kN]</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>LF 1: Beanspruchung normal zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN/m]</p> <p>Max P-X: 0.40, Min P-X: -0.40 kN/m</p> <p> $\sigma_x = 0.429\text{m}$ $u_x = 0.407\text{m}$ $\sigma_z = 0.0258\text{km}$ $M_x = 0.008\text{km}$ </p>	C	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 1: Beanspruchung normal zum oberen Plattenrand Belastung [kN/m]</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>LF 1: Beanspruchung normal zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN/m]</p> <p>Max P-X: 0.36, Min P-X: -0.36 kN/m</p> <p> $\sigma_x = 0.364\text{m}$ $u_x = 0.36\text{m}$ $\sigma_z = 0.024\text{km}$ $M_x = 0.008\text{km}$ </p>

Tabelle 14: Einzelplatte - Lastfall 1 - [3] vertikale Auflagerreaktionen, [4] horizontale Verformung

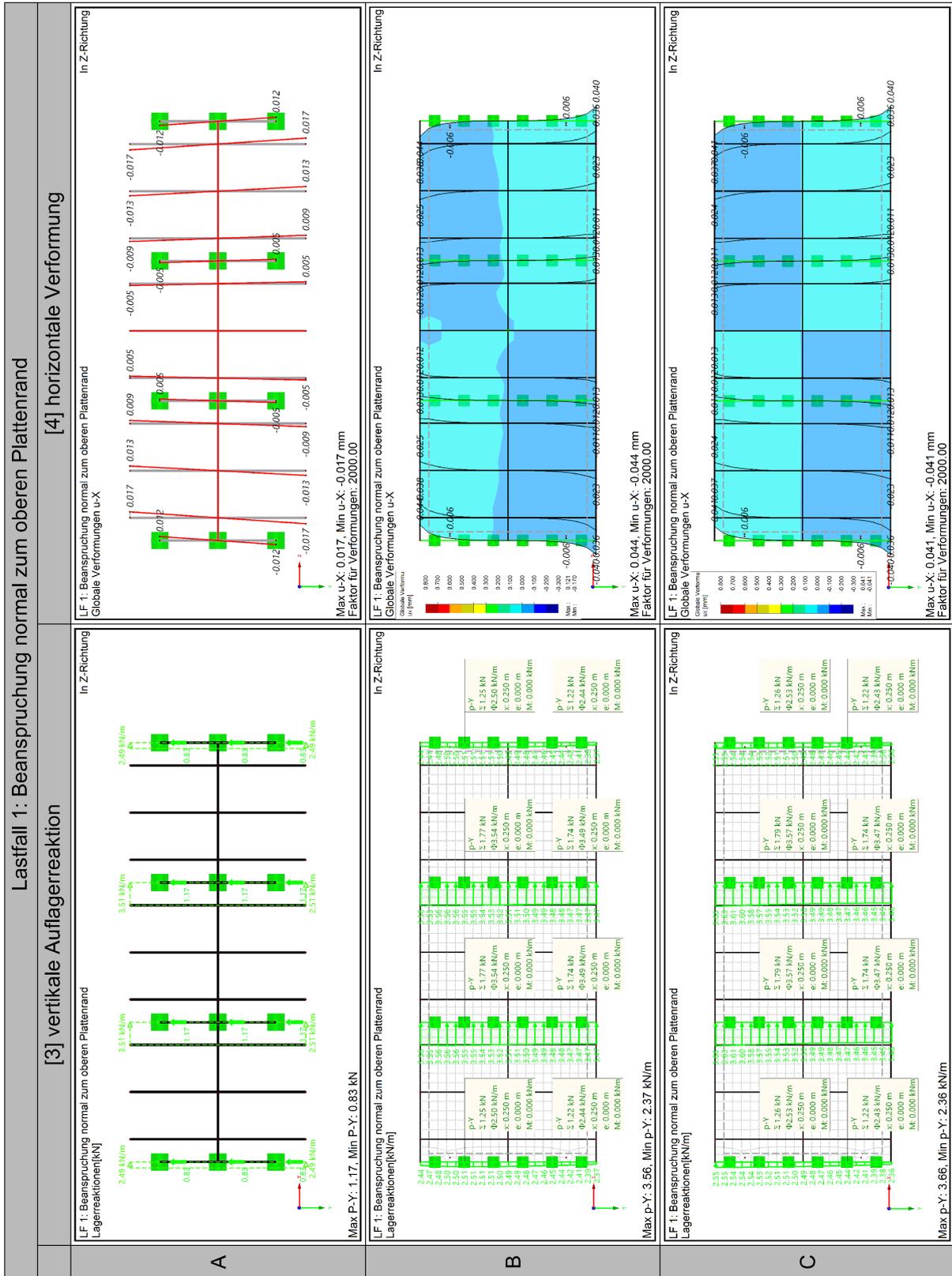


Tabelle 15: Einzelplatte - Lastfall 1 - [5] vertikale Verformung, [6] Normalkraft

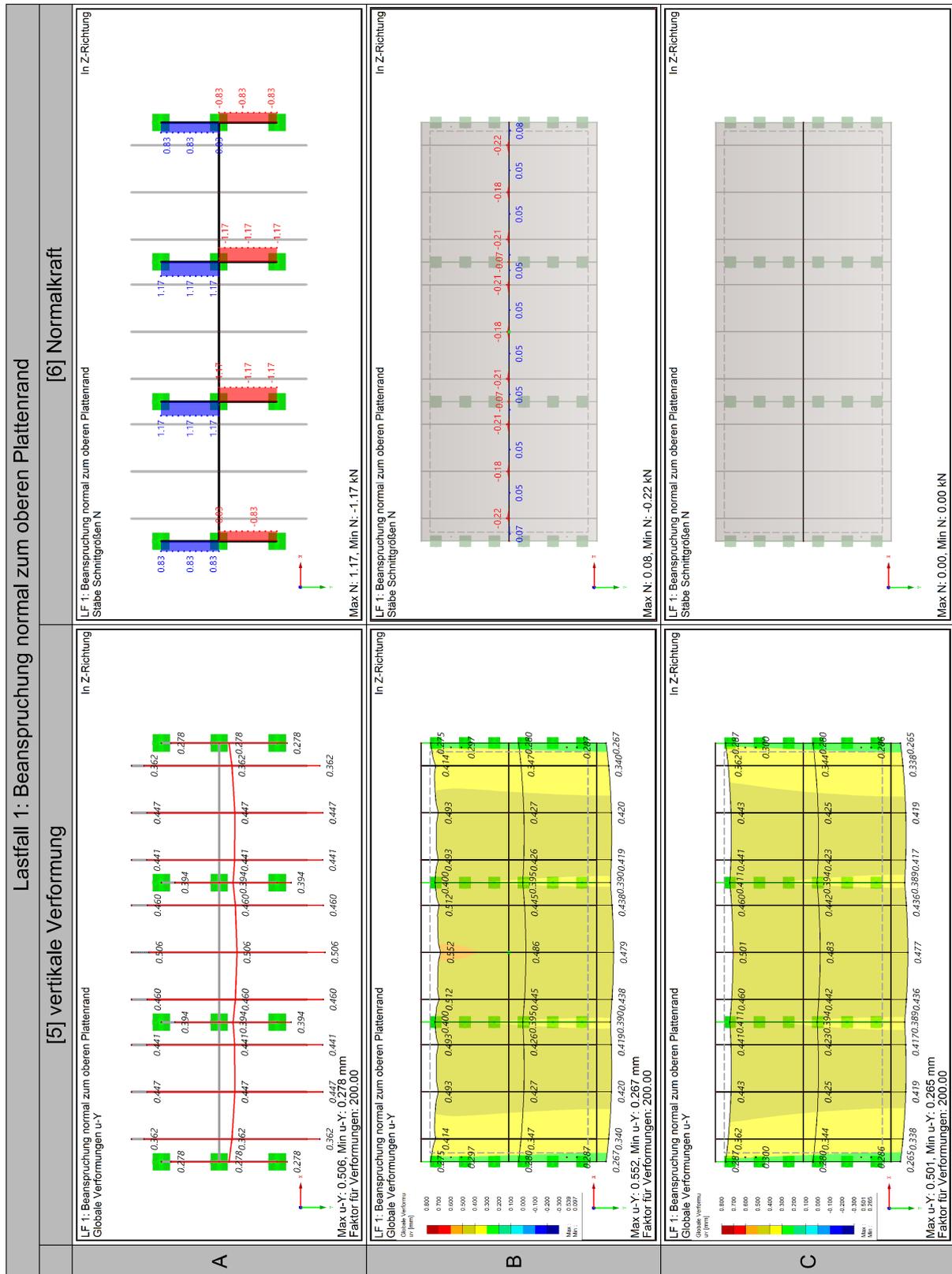


Tabelle 16: Einzelplatte - Lastfall 1 - [7] Querkraft, [8] Moment

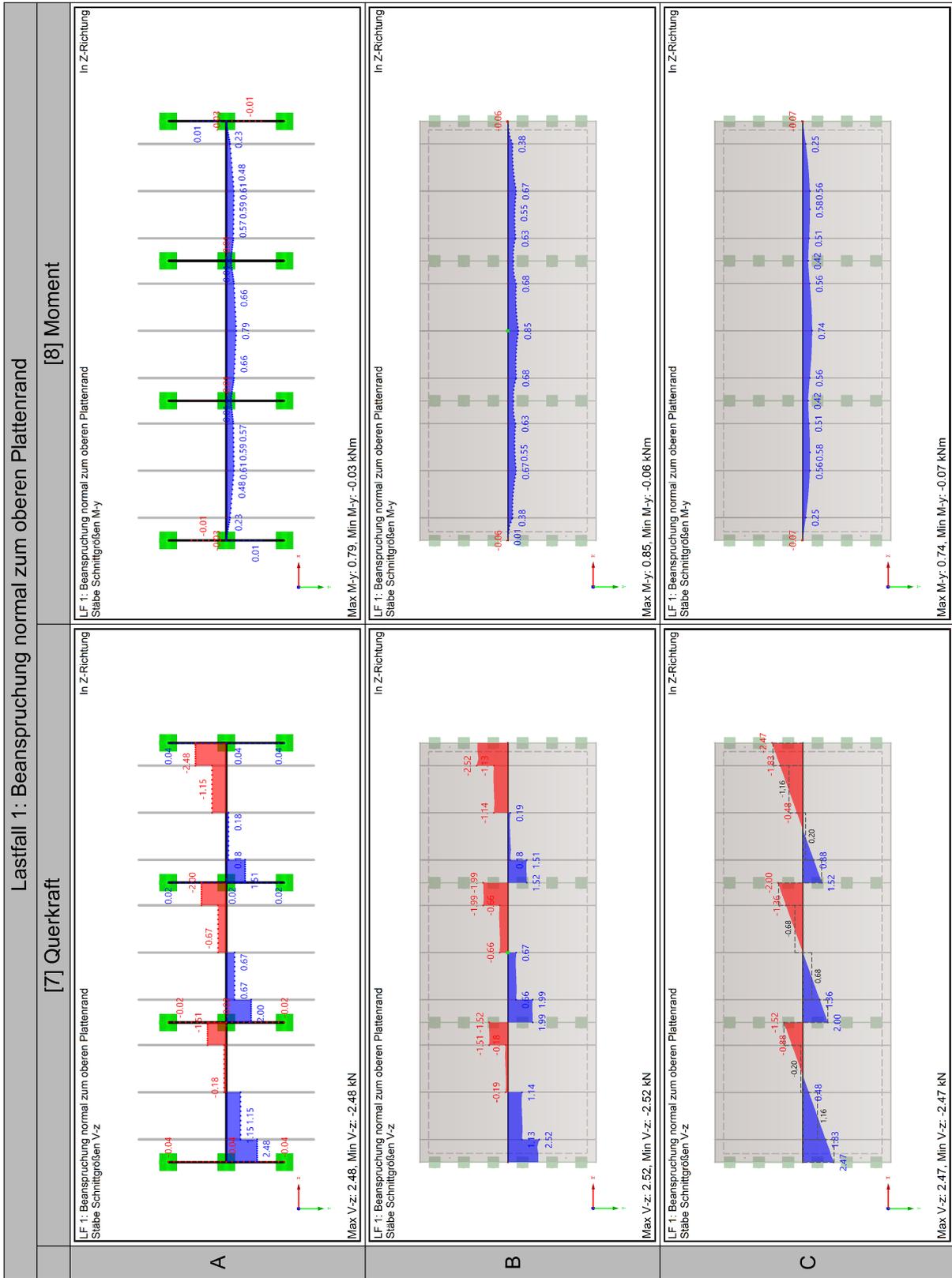


Tabelle 17: Einzelplatte - Lastfall 1 - [9] Normalspannung, [10] Schubspannung

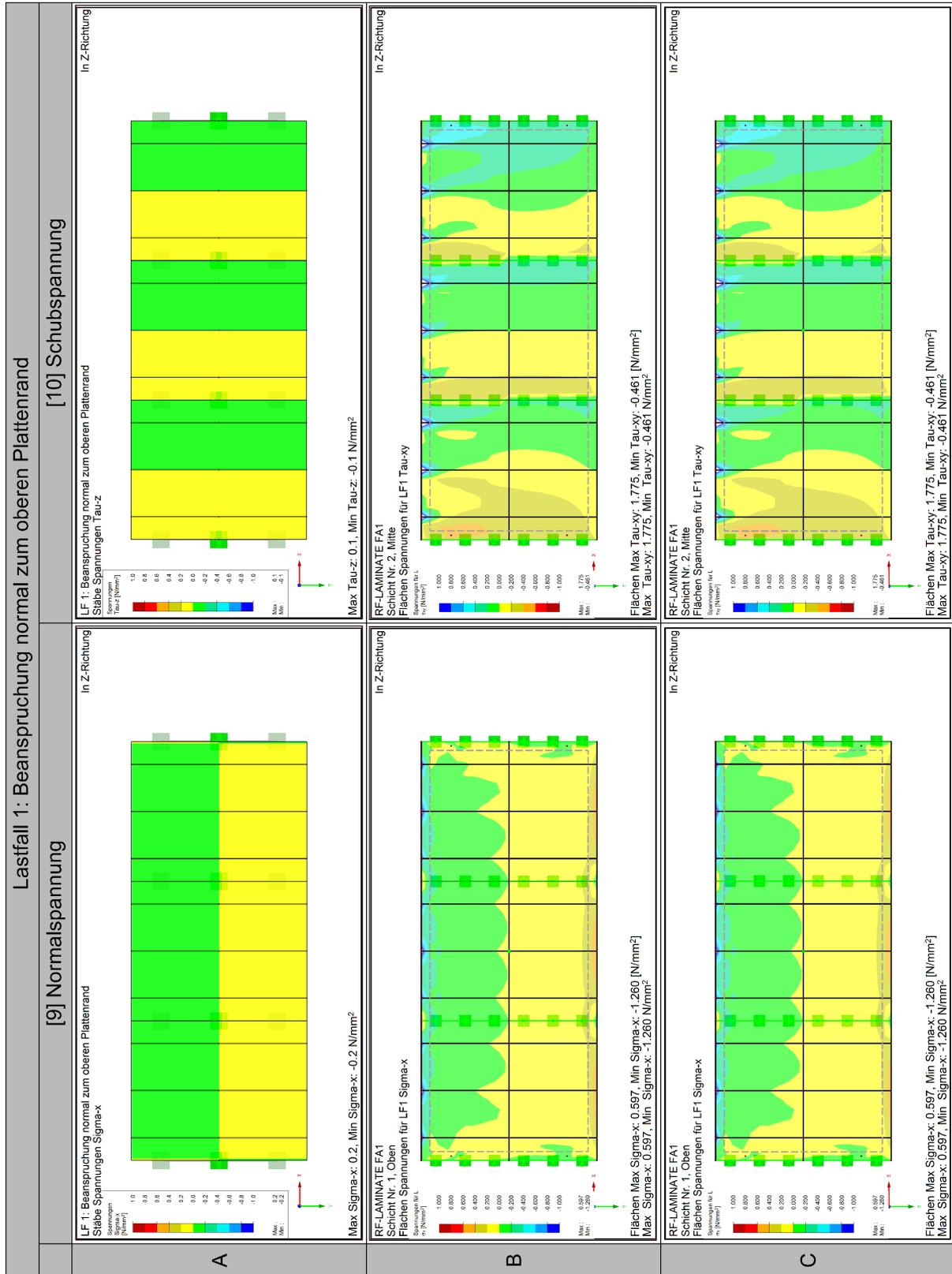


Tabelle 18: Einzelplatte - Lastfall 2 - [1] System & Last, [2] horizontale Auflagerreaktionen

Lastfall 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand		[1] System & Last		[2] horizontale Auflagerreaktionen	
A	In Z-Richtung		In Z-Richtung		In Z-Richtung
	LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Belastung [kN]		LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN]		LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN]
			Max p-X: 1.78, Min p-X: 0.47 kN		
B	In Z-Richtung		In Z-Richtung		In Z-Richtung
	LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Belastung [kN]		LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN]		LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN]
			Max p-X: 6.07, Min p-X: 1.35 kN/m		
C	In Z-Richtung		In Z-Richtung		In Z-Richtung
	LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Belastung [kN/m]		LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN/m]		LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Lagerreaktionen[kN/m]
			Max p-X: 6.16, Min p-X: 1.35 kN/m		

Tabelle 19: Einzelplatte - Lastfall 2 - [3] vertikale Auflagerreaktionen, [4] horizontale Verformung

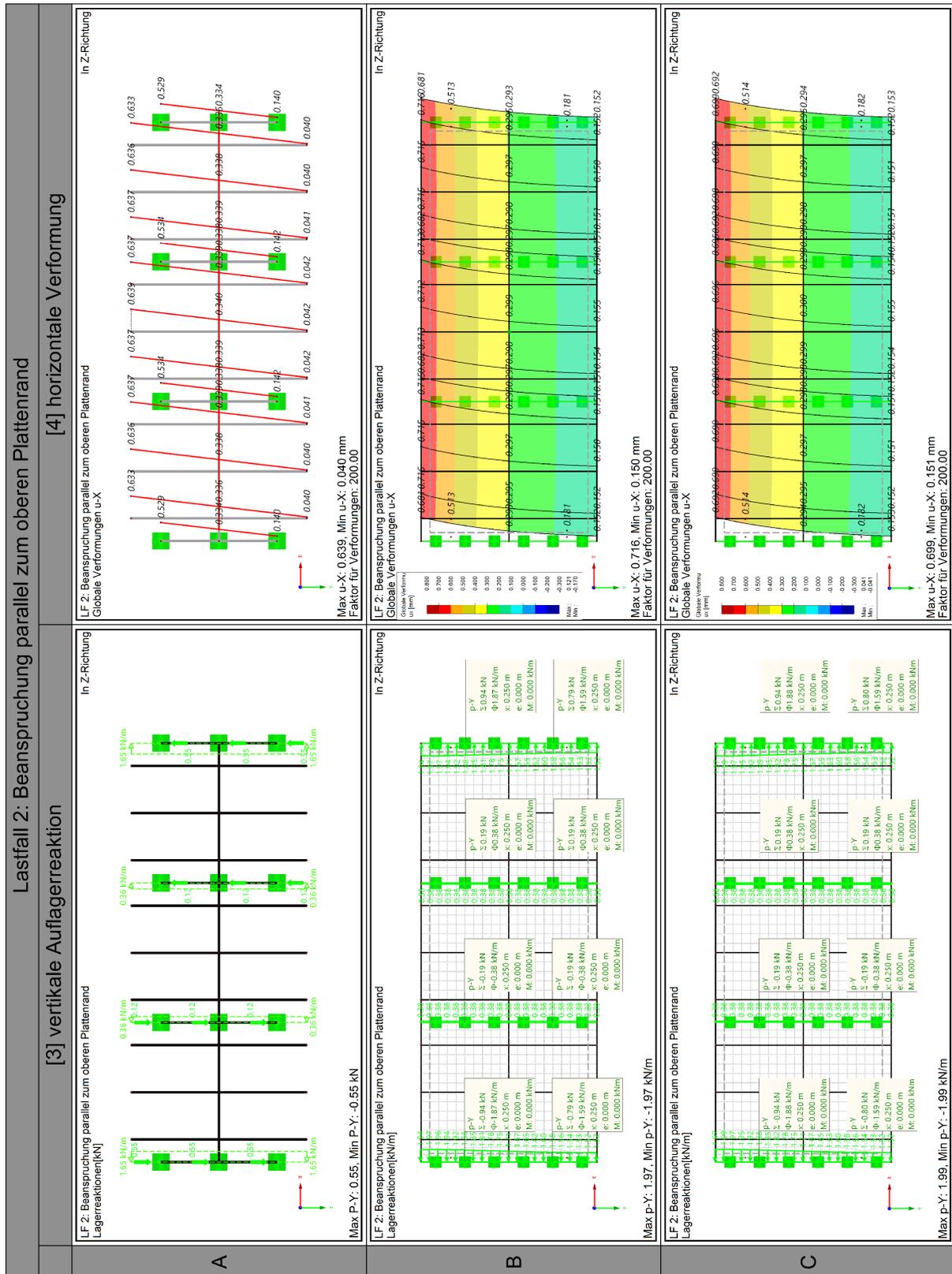


Tabelle 20: Einzelplatte - Lastfall 2 - [5] vertikale Verformung, [6] Normalkraft

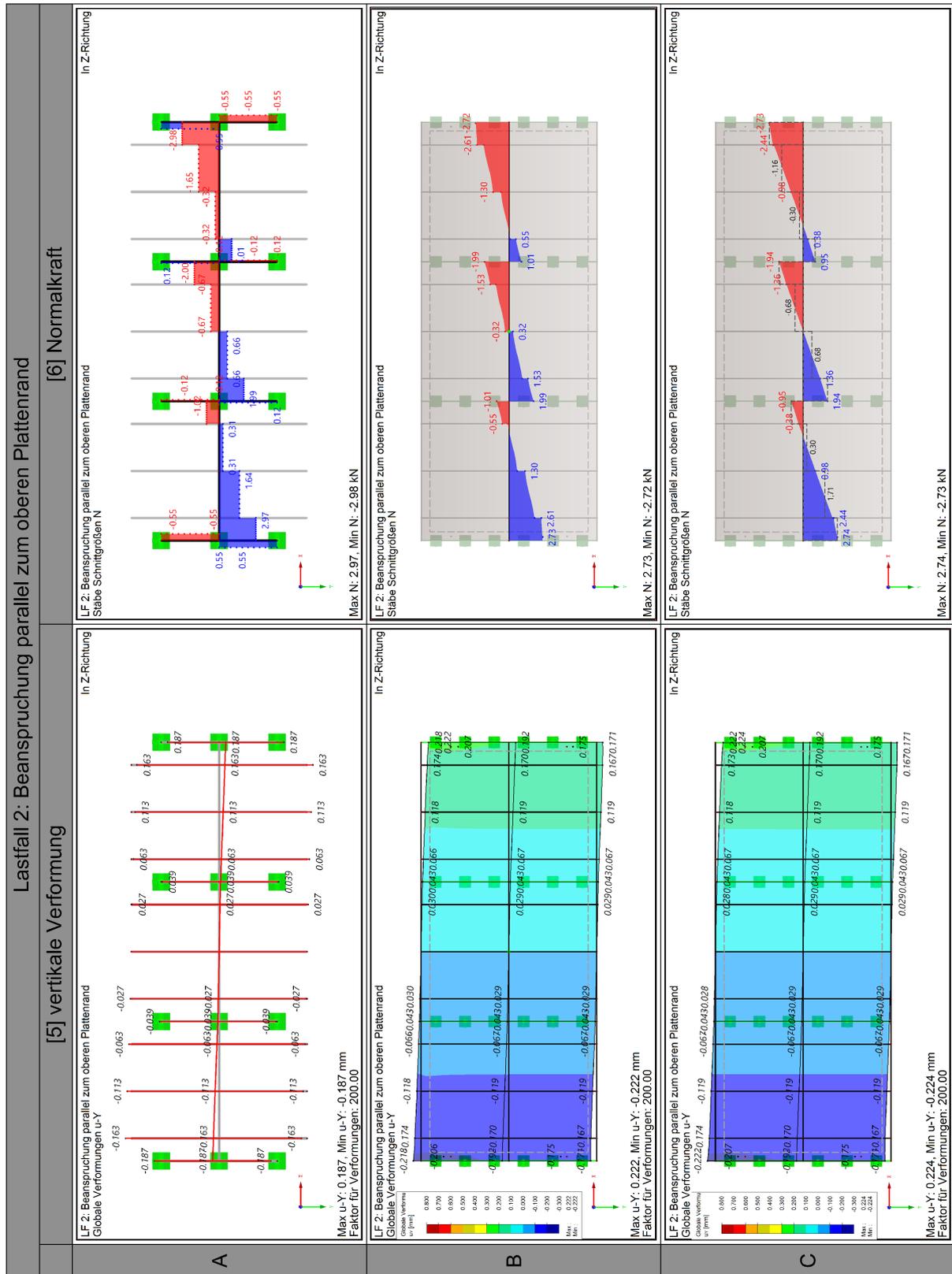


Tabelle 21: Einzelplatte - Lastfall 2 - [7] Querkraft, [8] Moment

Lastfall 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand		[7] Querkraft	[8] Moment
A	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Stäbe Schnittgrößen V-z</p> <p>Max V-z: 0.48, Min V-z: -2.01 kN</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Stäbe Schnittgrößen M-y</p> <p>Max M-y: 0.64, Min M-y: -0.64 kNm</p>	
B	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Stäbe Schnittgrößen V-z</p> <p>Max V-z: 0.00, Min V-z: -2.15 kN</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Stäbe Schnittgrößen M-y</p> <p>Max M-y: 0.42, Min M-y: -0.42 kNm</p>	
C	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Stäbe Schnittgrößen V-z</p> <p>Max V-z: 0.00, Min V-z: -2.13 kN</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 2: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand Stäbe Schnittgrößen M-y</p> <p>Max M-y: 0.32, Min M-y: -0.32 kNm</p>	

Tabelle 22: Einzelplatte - Lastfall 1 - [9] Normalspannung, [10] Schubspannung

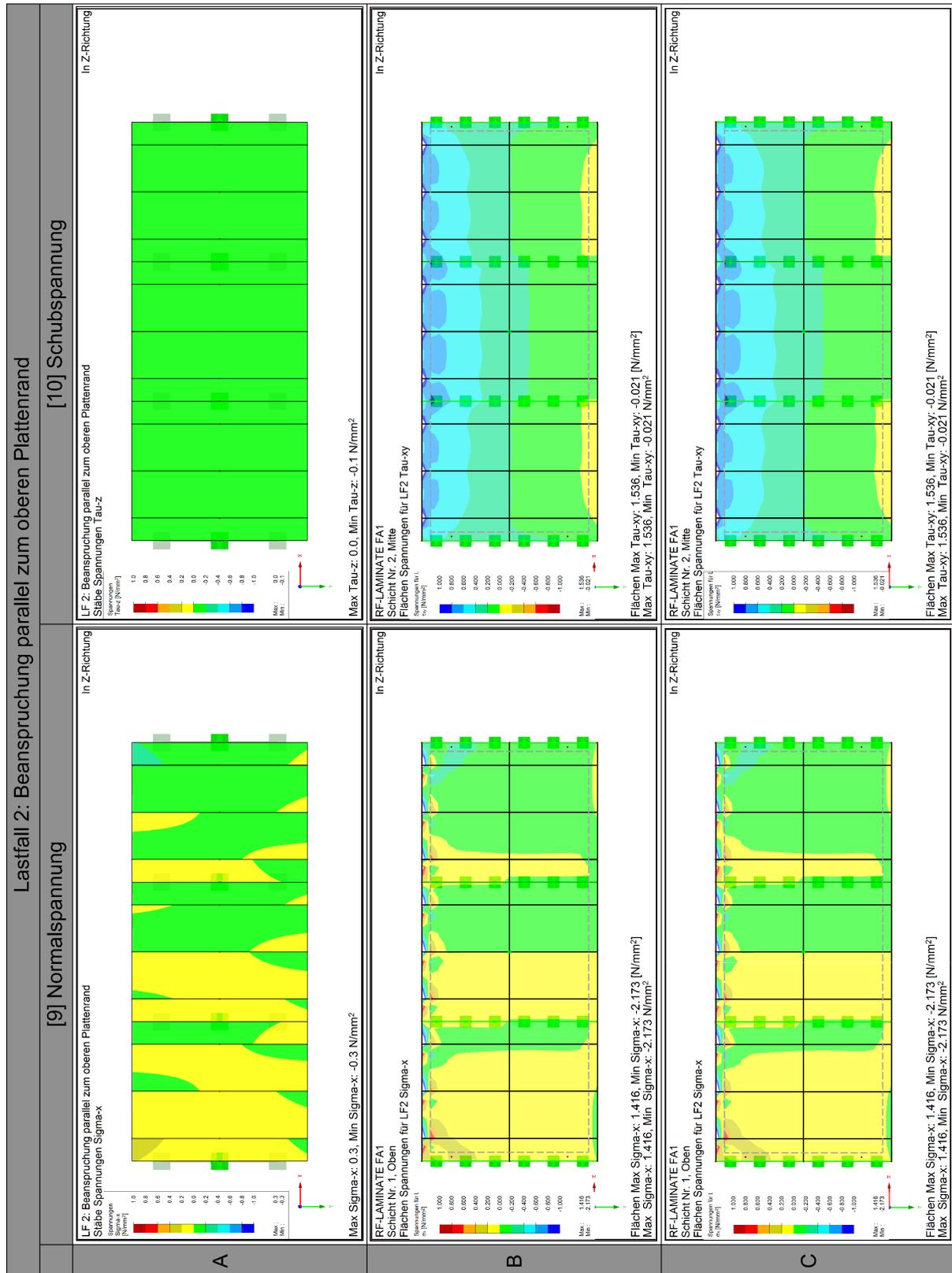


Tabelle 23: Einzelplatte - Lastfall 3 - [1] System & Last, [2] horizontale Auflagerreaktionen

Lastfall 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 & 3)	
[1] System & Last	[2] horizontale Auflagerreaktionen
<p>A</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Belastung [kN]</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Lagerreaktionen[kN]</p> <p>Σ F = 2,04kN Σ F_h = 3,94 kN/m Σ F_v = 5,32 kN/m</p> <p>c: 0,330m u: 0,330m M: 0,334kNm</p> <p>Max p-X: 1,24, Min p-X: 0,29 kN</p>
<p>B</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Belastung [kN/m]</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Lagerreaktionen[kN/m]</p> <p>Σ F = 2,04kN Σ F_h = 3,94 kN/m Σ F_v = 5,32 kN/m</p> <p>c: 0,330m u: 0,330m M: 0,334kNm</p> <p>Max p-X: 1,24, Min p-X: 0,29 kN</p>
<p>C</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Belastung [kN/m]</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Lagerreaktionen[kN/m]</p> <p>Σ F = 2,04kN Σ F_h = 3,94 kN/m Σ F_v = 5,32 kN/m</p> <p>c: 0,330m u: 0,330m M: 0,334kNm</p> <p>Max p-X: 1,24, Min p-X: 0,29 kN</p>

Tabelle 24: Einzelplatte - Lastfall 3 - [3] vertikale Auflagerreaktionen, [4] horizontale Verformung

Lastfall 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 & 3)	
[3] vertikale Auflagerreaktion	[4] horizontale Verformung
<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Lagerreaktionen(kN)</p> <p>Max p-Y: 1.08, Min p-Y: -0.39 kN</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Globale Verformungen u-X</p> <p>Max u-X: 0.447, Min u-X: 0.015 mm Faktor für Verformungen: 200.00</p>
<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Lagerreaktionen(kN/m)</p> <p>Max p-Y: 1.08, Min p-Y: -1.51 kN/m</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Globale Verformungen u-X</p> <p>Max u-X: 0.539, Min u-X: 0.097 mm Faktor für Verformungen: 200.00</p>
<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Lagerreaktionen(kN/m)</p> <p>Max p-Y: 1.08, Min p-Y: -1.53 kN/m</p>	<p>In Z-Richtung</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Globale Verformungen u-X</p> <p>Max u-X: 0.522, Min u-X: 0.097 mm Faktor für Verformungen: 200.00</p>

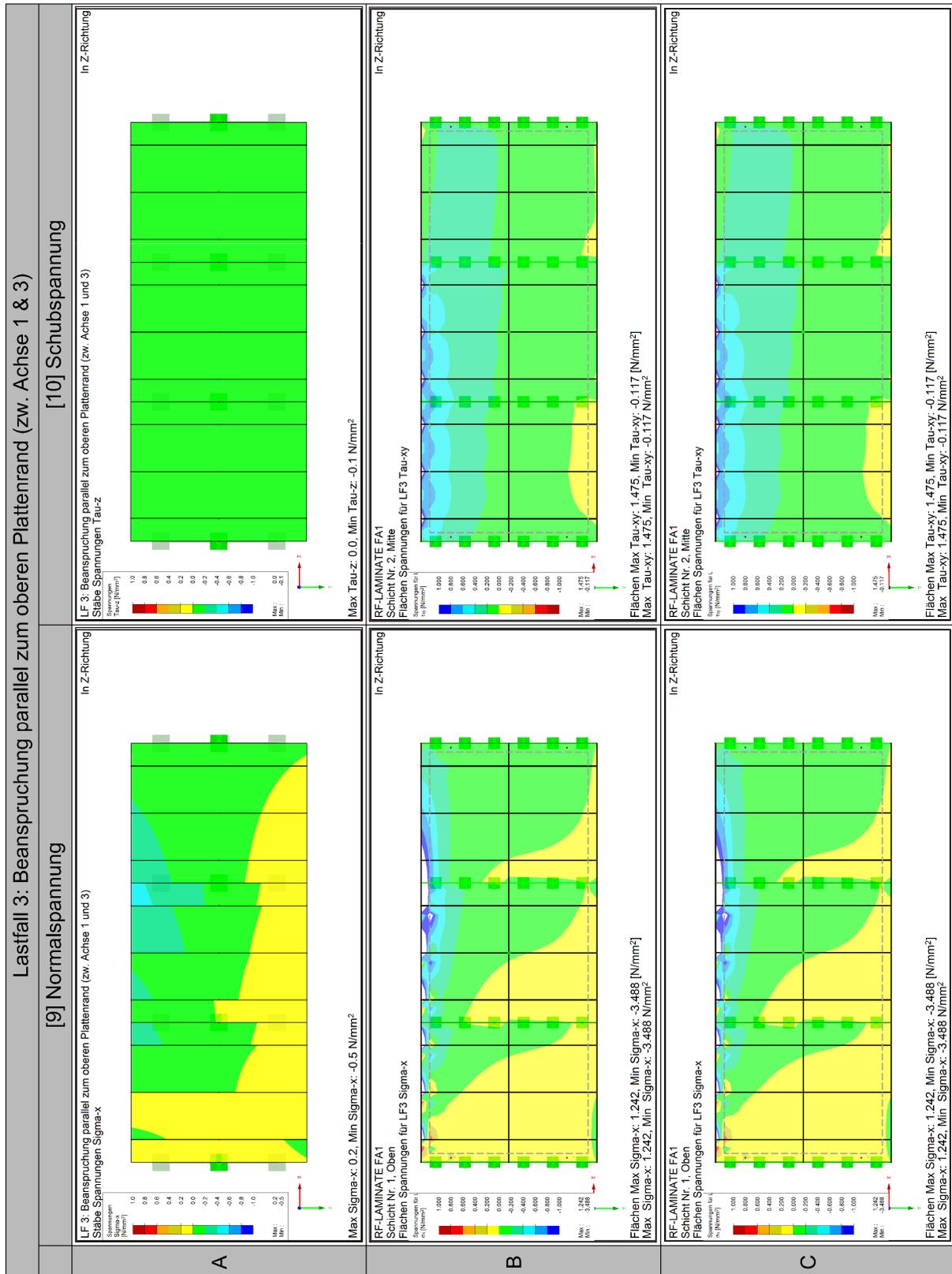
Tabelle 25: Einzelplatte - Lastfall 3 - [5] vertikale Verformung, [6] Normalkraft

Lastfall 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 & 3)	
[5] vertikale Verformung	[6] Normalkraft
<p>A</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Globale Verformungen u-y</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max u-y: 0.117, Min u-y: -0.132 mm Faktor für Verformungen: 200.00</p>	<p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stabe Schnittgrößen N</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max N: 2.04, Min N: -3.89 kN</p>
<p>B</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Globale Verformungen u-y</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max u-y: 0.121, Min u-y: -0.170 mm Faktor für Verformungen: 200.00</p>	<p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stabe Schnittgrößen N</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max N: 1.88, Min N: -3.90 kN</p>
<p>C</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Globale Verformungen u-y</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max u-y: 0.122, Min u-y: -0.172 mm Faktor für Verformungen: 200.00</p>	<p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stabe Schnittgrößen N</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max N: 1.89, Min N: -3.76 kN</p>

Tabelle 26: Einzelplatte - Lastfall 1 - [7] Querkraft, [8] Moment

Lastfall 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 & 3)	
[7] Querkraft	[8] Moment
<p>A</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stäbe Schnittgrößen V-z</p> <p>Max V-z: 0.34, Min V-z: -1.35 kN</p>	<p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stäbe Schnittgrößen M-y</p> <p>Max M-y: 1.53, Min M-y: -0.46 kNm</p>
<p>B</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stäbe Schnittgrößen V-z</p> <p>Max V-z: 0.00, Min V-z: -1.47 kN</p>	<p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stäbe Schnittgrößen M-y</p> <p>Max M-y: 1.29, Min M-y: -0.25 kNm</p>
<p>C</p> <p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stäbe Schnittgrößen V-z</p> <p>Max V-z: 0.00, Min V-z: -1.45 kN</p>	<p>LF 3: Beanspruchung parallel zum oberen Plattenrand (zw. Achse 1 und 3) Stäbe Schnittgrößen M-y</p> <p>Max M-y: 1.23, Min M-y: -0.23 kNm</p>

Tabelle 27: Einzelplatte - Lastfall 1 - [9] Normalspannung, [10] Schubspannung



**Strategien baustatischer Modellbildung - Stufe 2:
Plattenverbund**

Tabelle 28: Plattenverbund - LF 1 - Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion

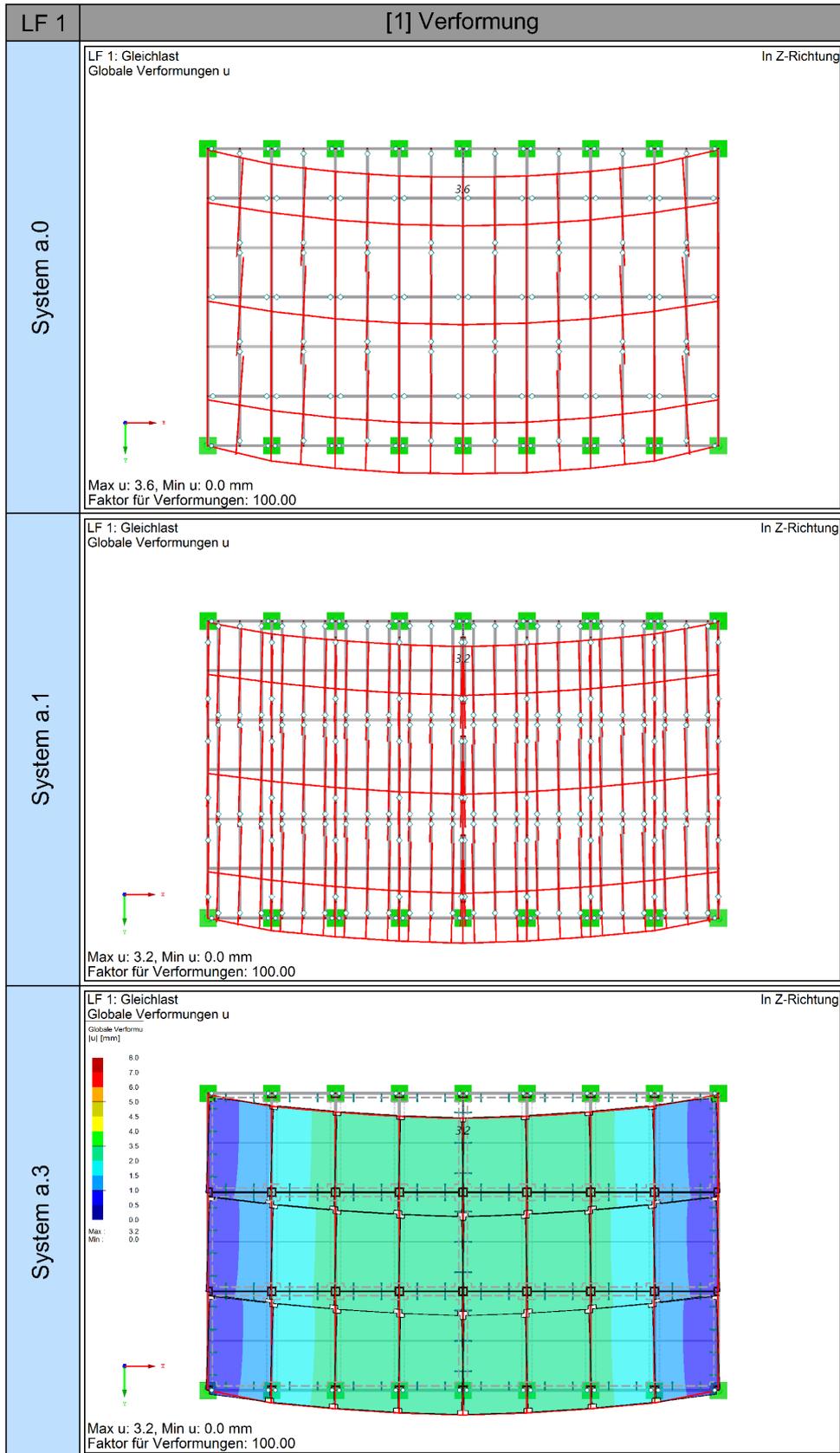


Tabelle 29: Plattenverbund - LF 1 - Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion

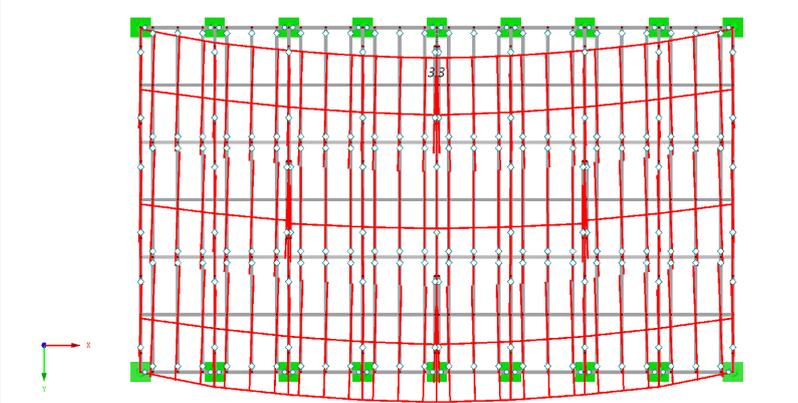
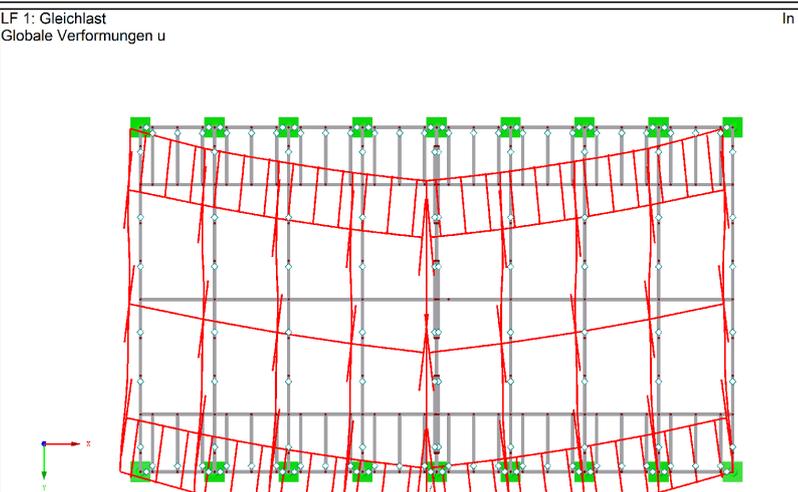
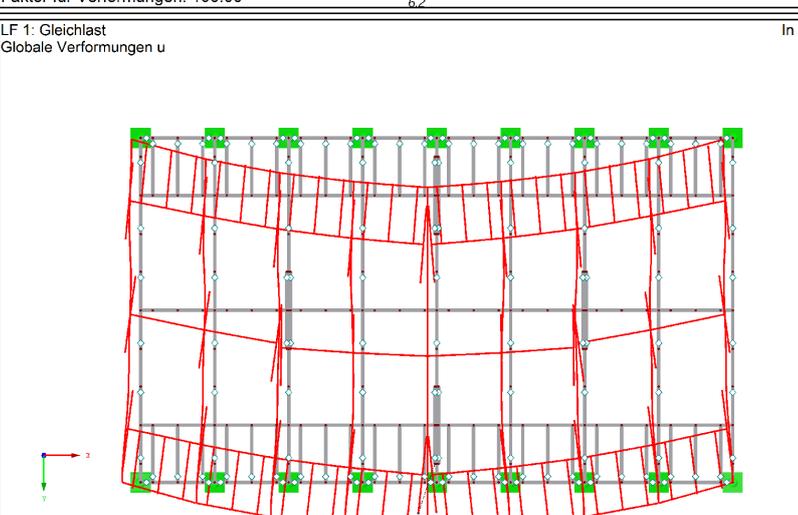
[2] Verformung		LF 1
<p>LF 1: Gleichlast Globale Verformungen u</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max u: 3.3, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	System b.1	
<p>LF 1: Gleichlast Globale Verformungen u</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max u: 6.2, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	System c.1	
<p>LF 1: Gleichlast Globale Verformungen u</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max u: 5.7, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	System d.1	

Tabelle 30: Plattenverbund - LF 2 - Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion

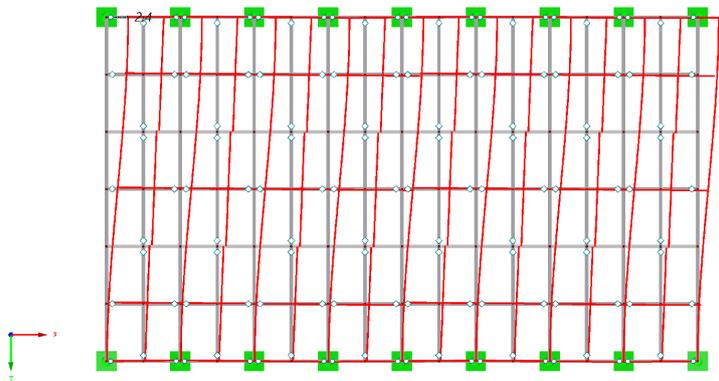
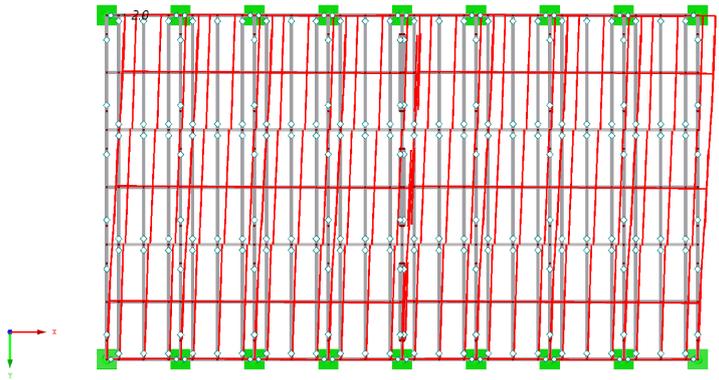
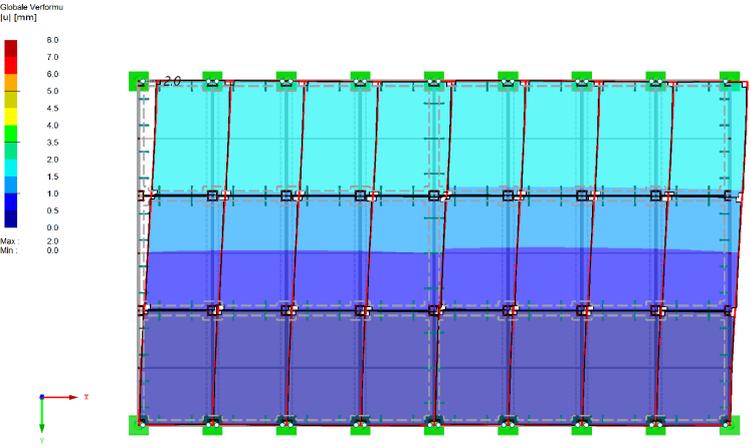
LF 2	[3] Verformung	
System a.0	<p>LF 2: Punktlast Globale Verformungen u</p>  <p>Max u: 2.4, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	In Z-Richtung
System a.1	<p>LF 2: Punktlast Globale Verformungen u</p>  <p>Max u: 2.0, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	In Z-Richtung
System a.3	<p>LF 2: Punktlast Globale Verformungen u</p> <p>Globale Verformu [u] [mm]</p>  <p>Max u: 2.0, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	In Z-Richtung

Tabelle 31: Plattenverbund - LF 2 - Verformung der Beplankung und Unterkonstruktion

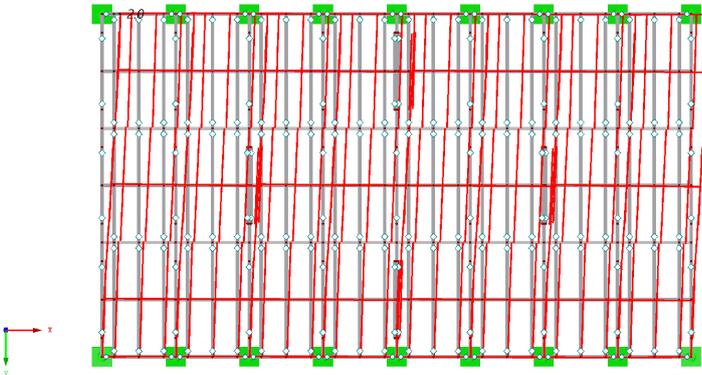
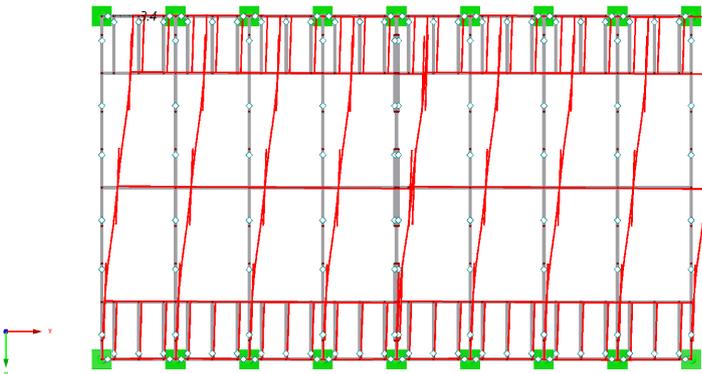
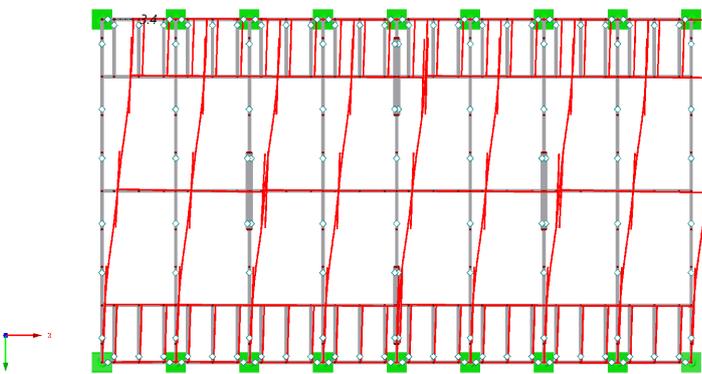
[4] Verformung		LF 2
<p>LF 2: Punktlast Globale Verformungen u</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max u: 2.0, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	System b.1	
<p>LF 2: Punktlast Globale Verformungen u</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max u: 3.4, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	System c.1	
<p>LF 2: Punktlast Globale Verformungen u</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max u: 3.4, Min u: 0.0 mm Faktor für Verformungen: 100.00</p>	System d.1	

Tabelle 32: Plattenverbund - LF 1 - Normalkraft der Beplankung & Gurte

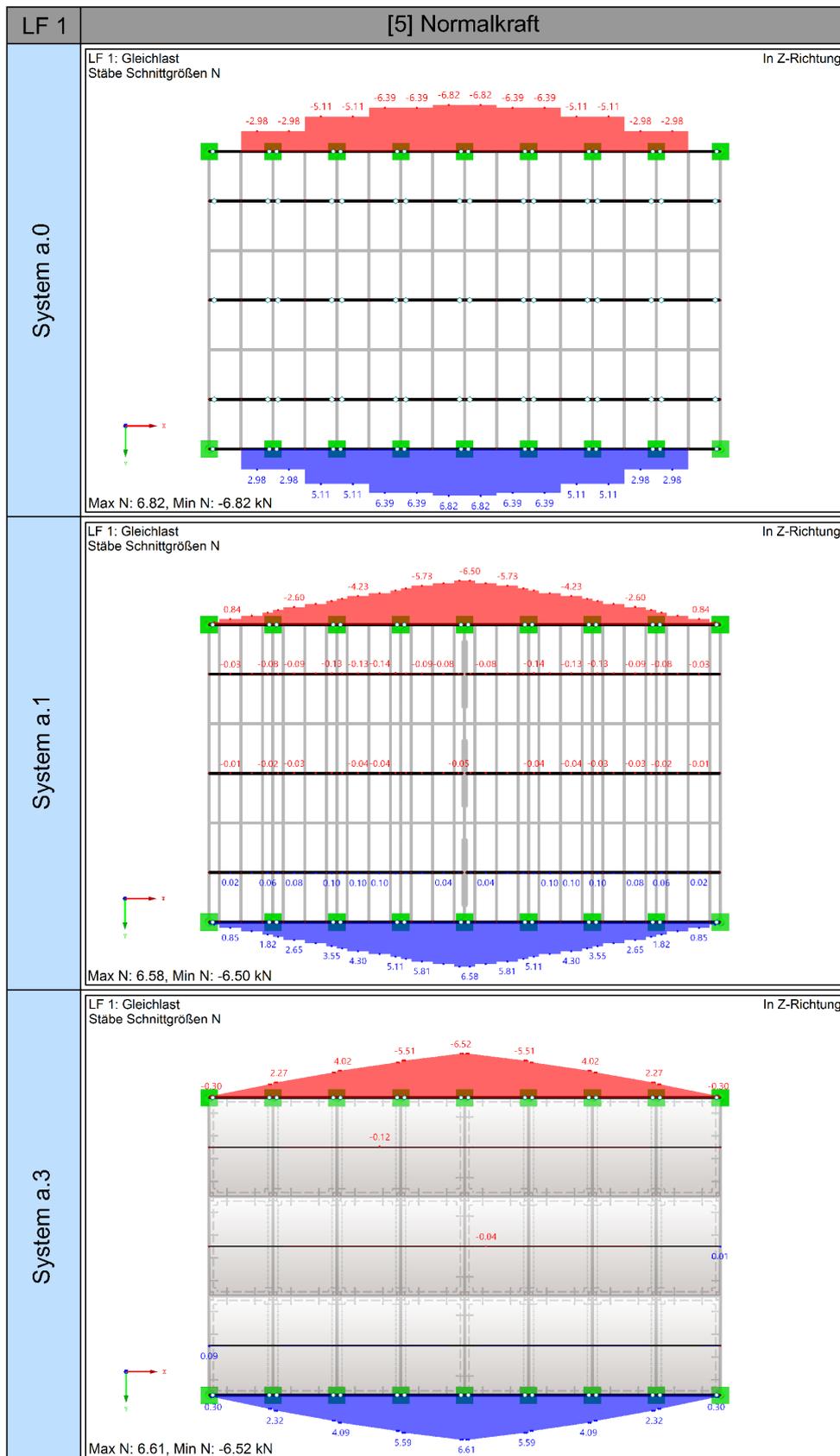


Tabelle 33: Plattenverbund - LF 1 - Normalkraft der Beplankung & Gurte

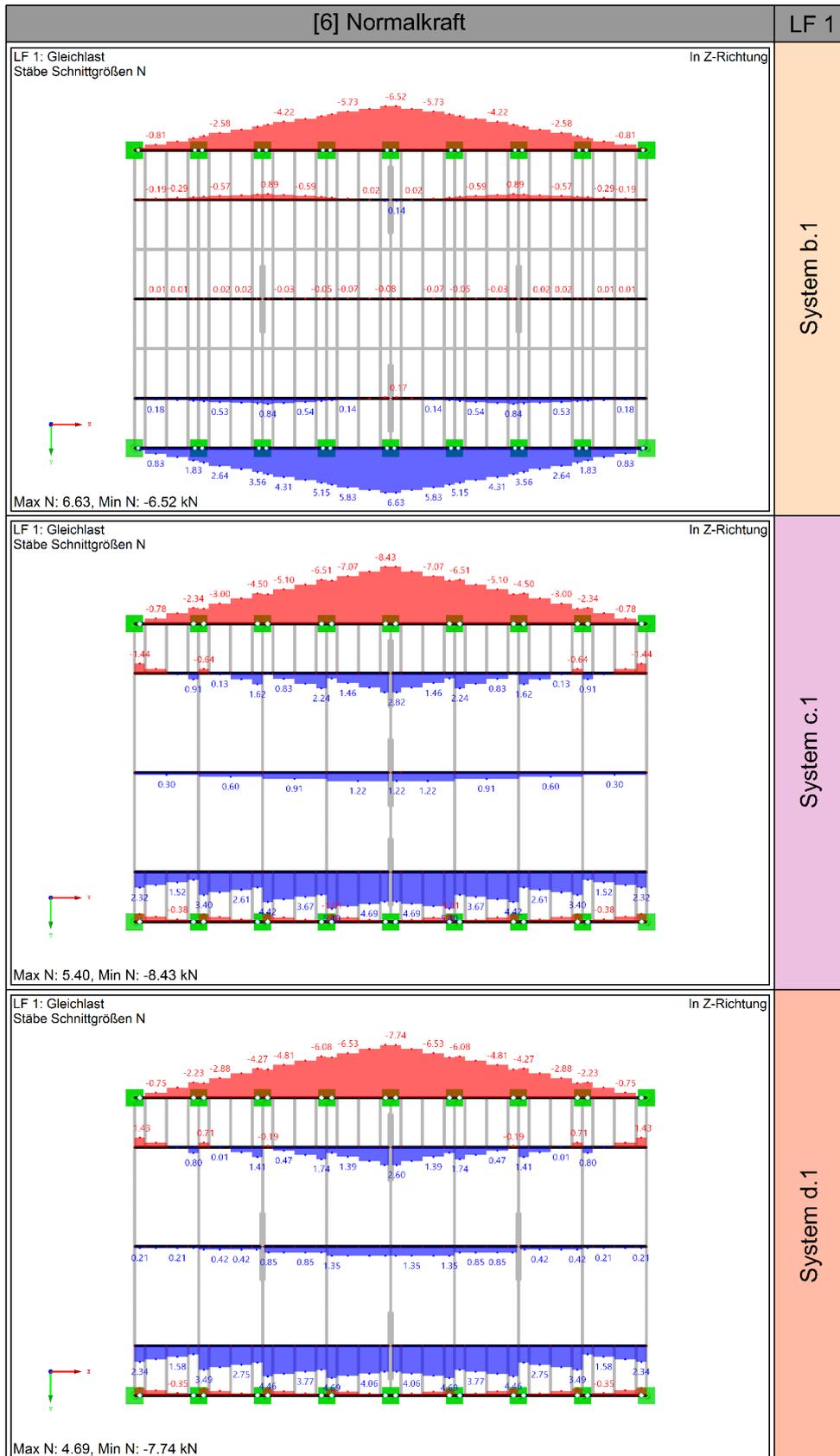


Tabelle 34: Plattenverbund - LF 1 - Querkraft der Beplankung & Gurte

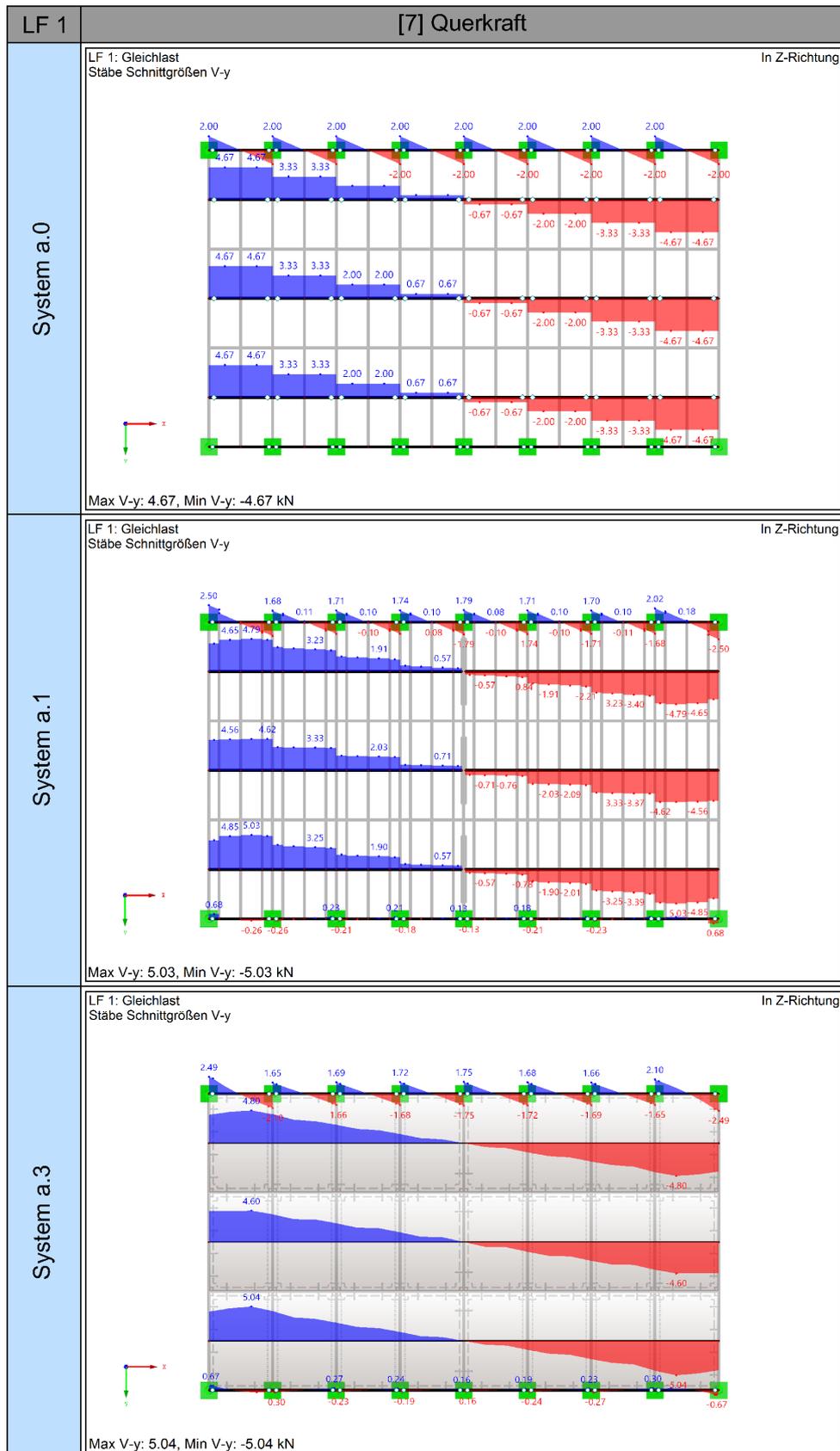


Tabelle 35: Plattenverbund - LF 1 - Querkraft der Beplankung & Gurte

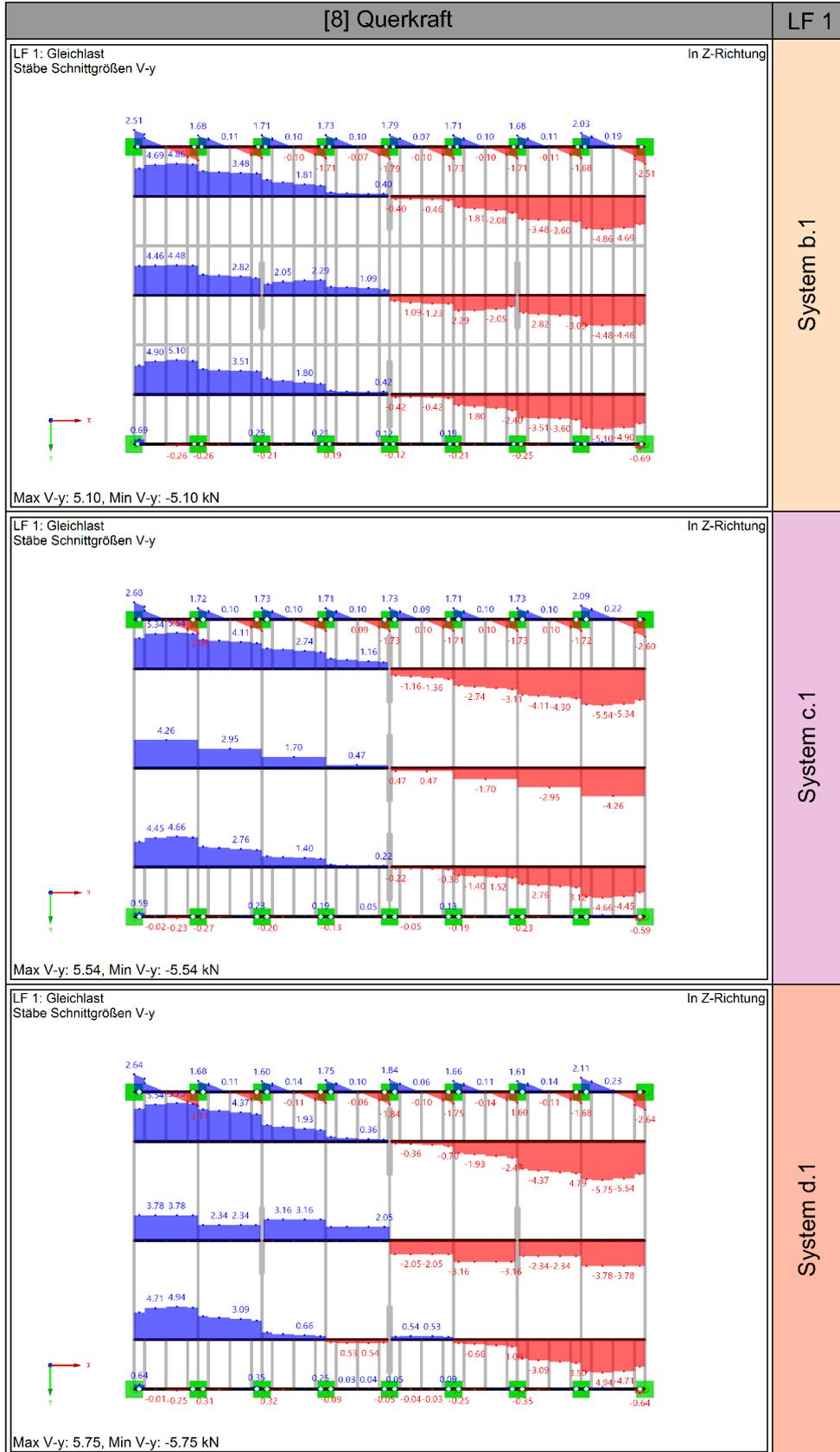


Tabelle 36: Plattenverbund - LF 1 - Moment der Beplankung & Gurte

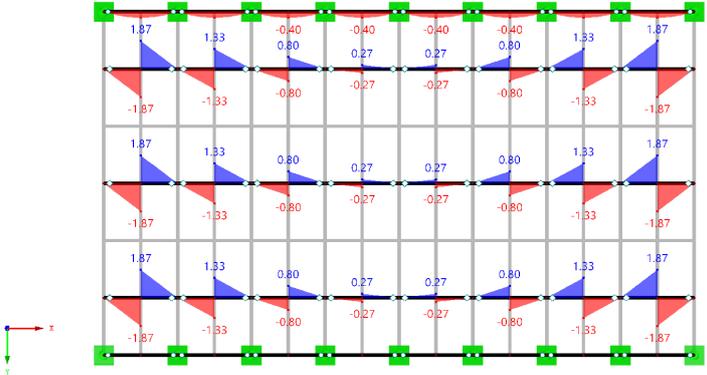
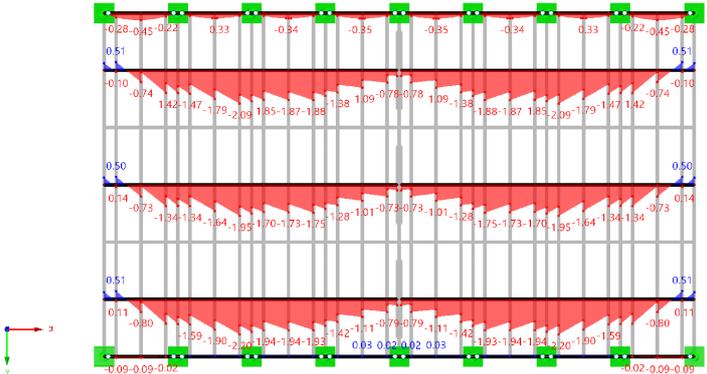
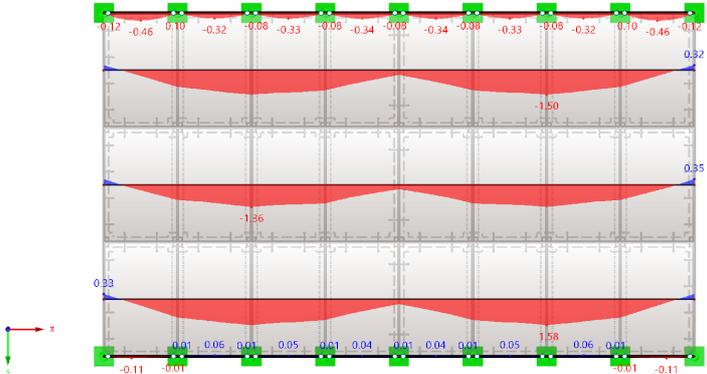
LF 1	[9] Moment
System a.0	<p data-bbox="405 360 574 398">LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p data-bbox="1182 360 1276 380" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="405 871 663 891">Max M-z: 1.87, Min M-z: -1.87 kNm</p>
System a.1	<p data-bbox="405 907 574 945">LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p data-bbox="1182 907 1276 927" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="405 1415 663 1435">Max M-z: 0.51, Min M-z: -2.20 kNm</p>
System a.3	<p data-bbox="405 1453 574 1491">LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p data-bbox="1182 1453 1276 1473" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="405 1962 663 1982">Max M-z: 0.35, Min M-z: -1.58 kNm</p>

Tabelle 37: Plattenverbund - LF 1 - Moment der Beplankung & Gurte

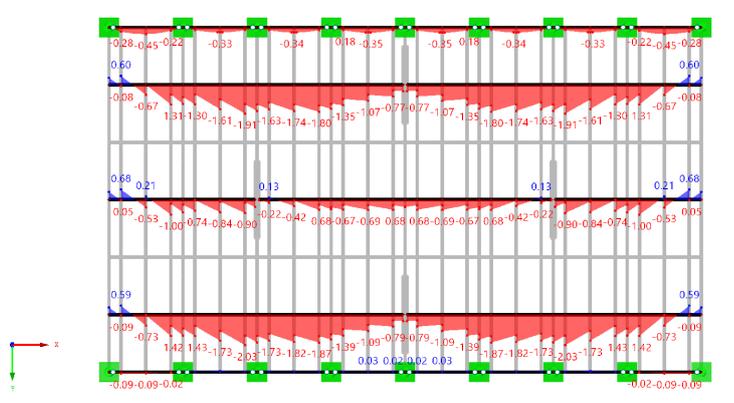
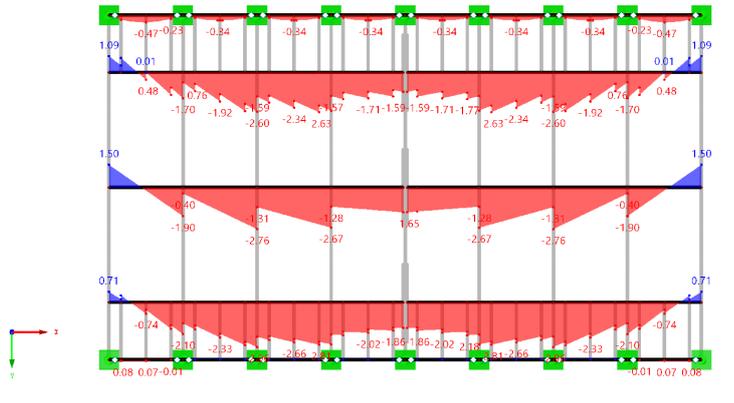
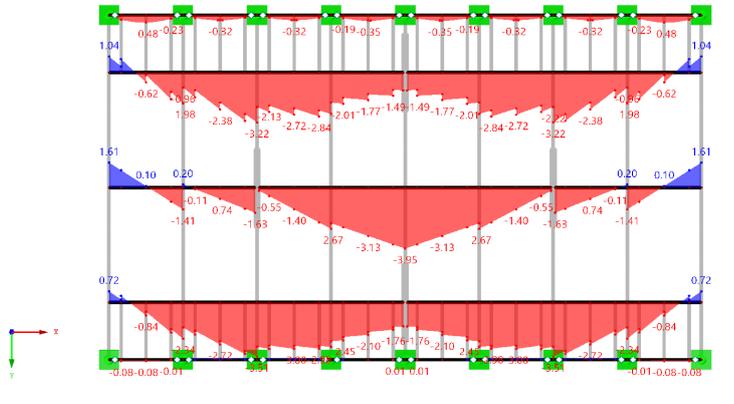
[10] Moment	LF 1
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max M-z: 0.68, Min M-z: -2.03 kNm</p>	System b.1
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max M-z: 1.50, Min M-z: -2.96 kNm</p>	System c.1
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max M-z: 1.61, Min M-z: -3.95 kNm</p>	System d.1

Tabelle 38: Plattenverbund - LF 2 - Normalkraft der Beplankung & Gurte

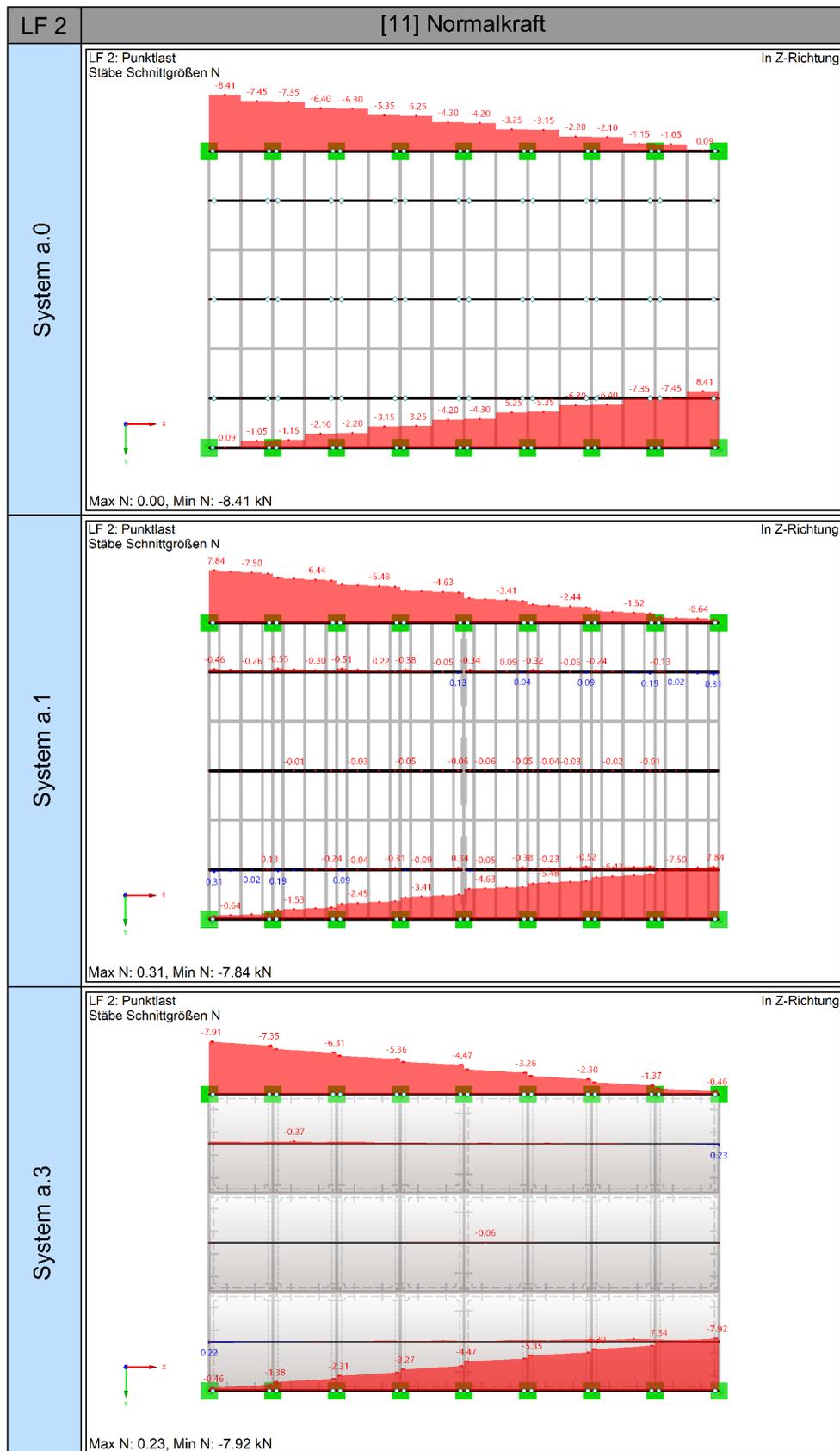


Tabelle 39: Plattenverbund - LF 2 - Normalkraft der Beplankung & Gurte

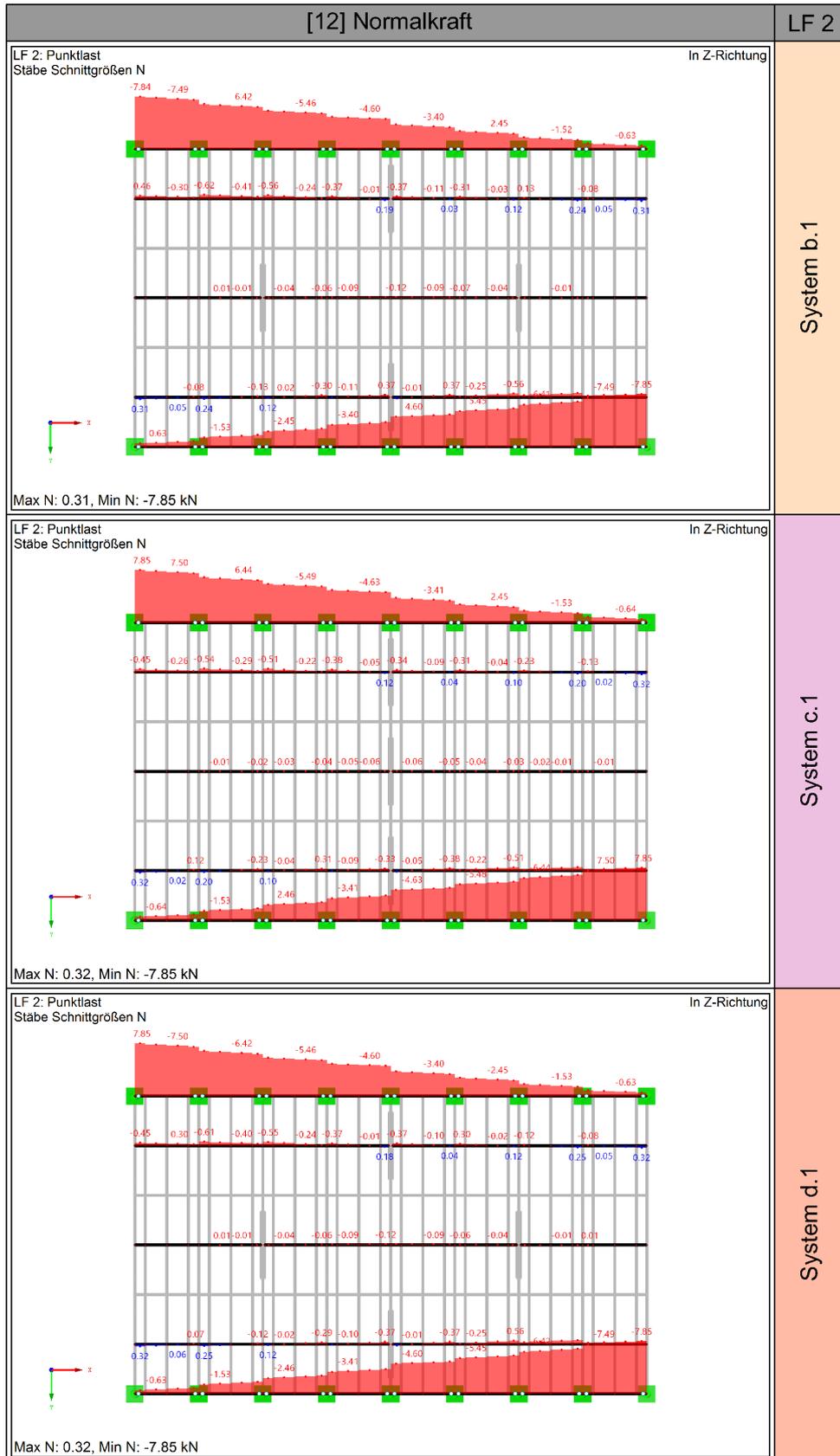


Tabelle 40: Plattenverbund - LF 2 - Querkraft der Beplankung & Gurte

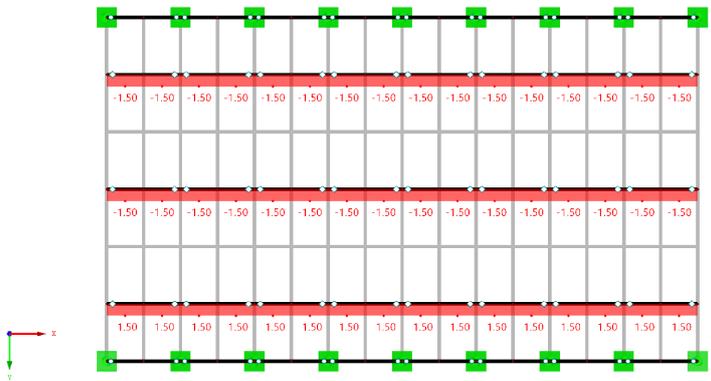
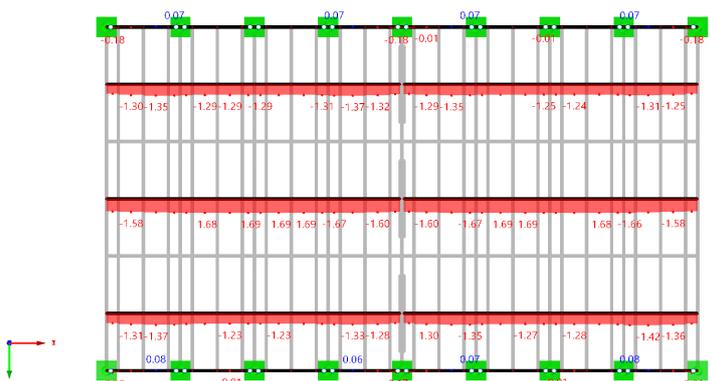
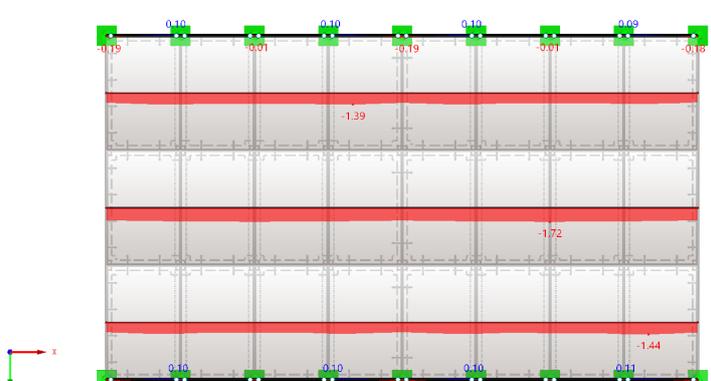
LF 2	[13] Querkraft
System a.0	<p data-bbox="402 353 571 398">LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p data-bbox="1184 353 1276 376" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 869 646 891">Max V-y: 0.00, Min V-y: -1.50 kN</p>
System a.1	<p data-bbox="402 900 571 945">LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p data-bbox="1184 900 1276 922" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 1415 646 1438">Max V-y: 0.08, Min V-y: -1.69 kN</p>
System a.3	<p data-bbox="402 1447 571 1491">LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p data-bbox="1184 1447 1276 1469" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 1962 646 1984">Max V-y: 0.11, Min V-y: -1.72 kN</p>

Tabelle 41: Plattenverbund - LF 2 - Querkraft der Beplankung & Gurte

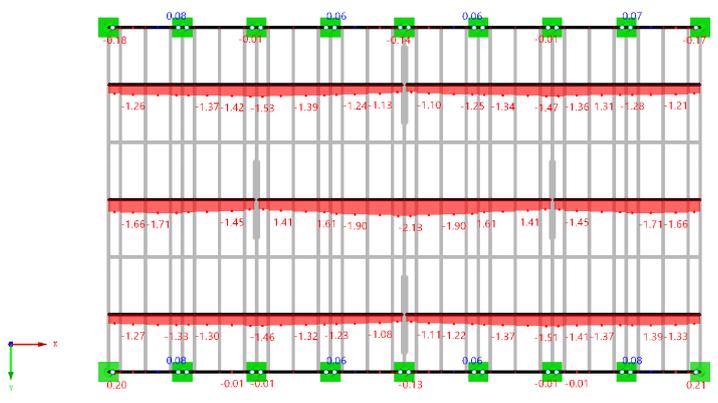
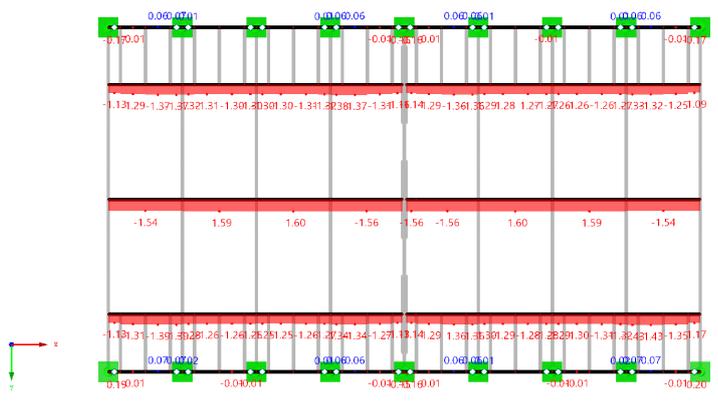
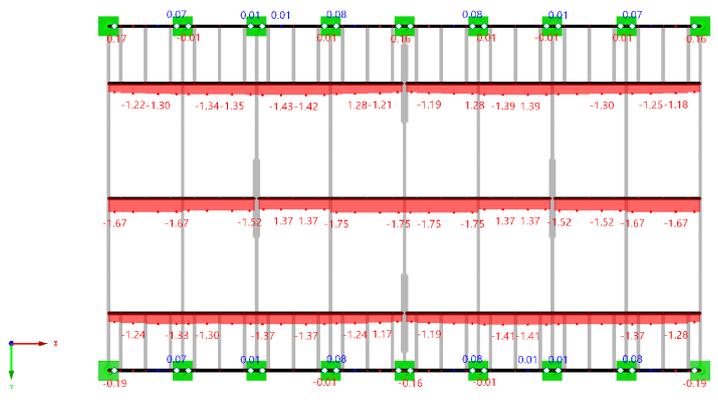
[14] Querkraft	LF 2
<p>LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max V-y: 0.08, Min V-y: -2.13 kN</p>	System b.1
<p>LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max V-y: 0.11, Min V-y: -2.20 kN</p>	System c.1
<p>LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p>Max V-y: 0.08, Min V-y: -1.75 kN</p>	System d.1

Tabelle 42: Plattenverbund - LF 2 - Moment der Beplankung & Gurte

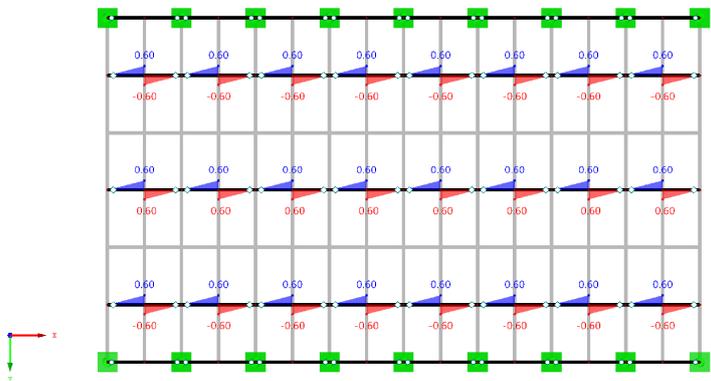
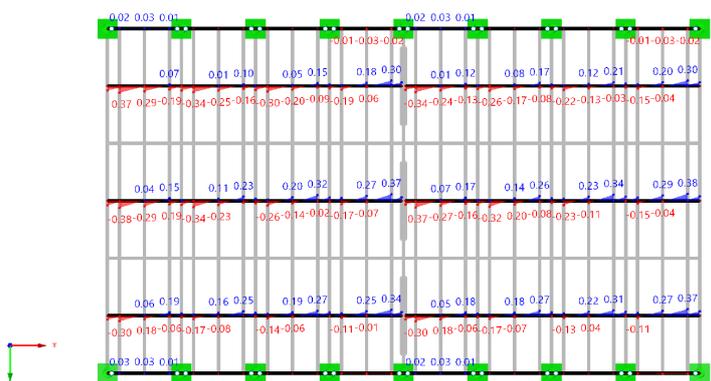
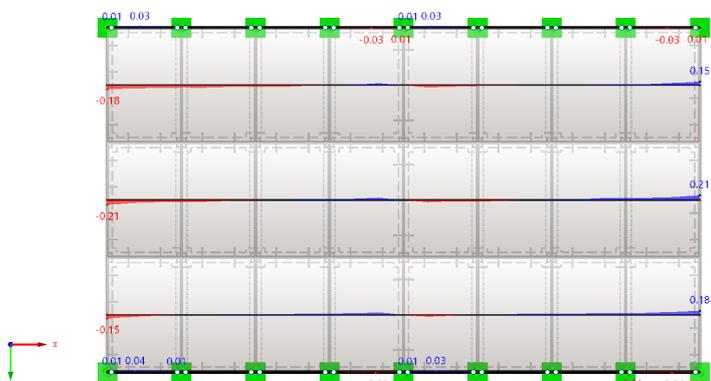
LF 2	[15] Moment
System a.0	<p data-bbox="402 353 574 392">LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p data-bbox="1181 353 1276 380" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 869 662 896">Max M-z: 0.60, Min M-z: -0.60 kNm</p>
System a.1	<p data-bbox="402 902 574 940">LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p data-bbox="1181 902 1276 929" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 1417 662 1444">Max M-z: 0.38, Min M-z: -0.38 kNm</p>
System a.3	<p data-bbox="402 1451 574 1489">LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p data-bbox="1181 1451 1276 1478" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 1966 662 1993">Max M-z: 0.21, Min M-z: -0.21 kNm</p>

Tabelle 43: Plattenverbund - LF 2 - Moment der Beplankung & Gurte

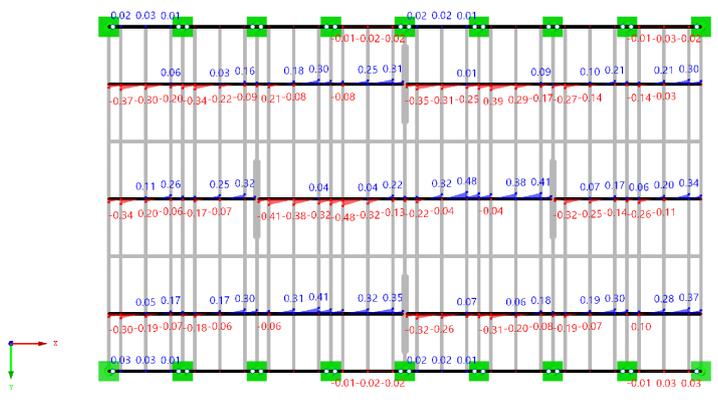
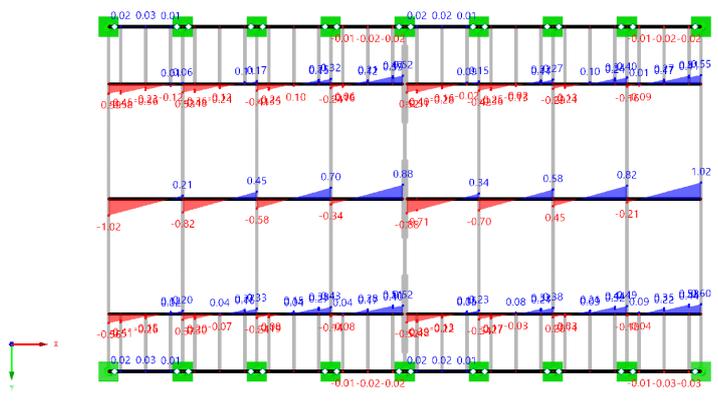
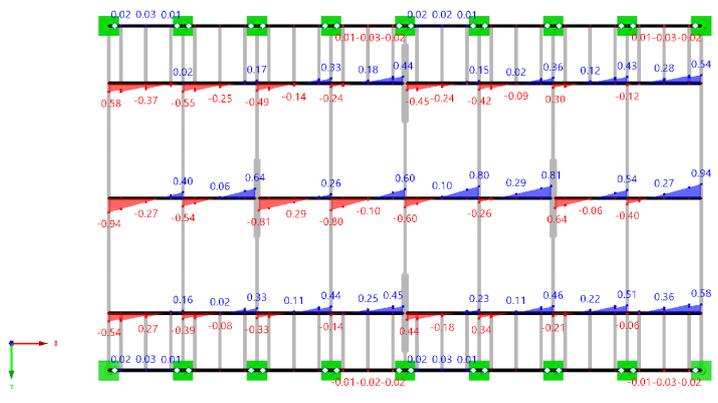
[16] Moment	LF 2
<p>LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p>In Z-Richtung</p>  <p>Max M-z: 0.48, Min M-z: -0.48 kNm</p>	System b.1
<p>LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p>In Z-Richtung</p>  <p>Max M-z: 1.02, Min M-z: -1.02 kNm</p>	System c.1
<p>LF 2: Punktlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p>In Z-Richtung</p>  <p>Max M-z: 0.94, Min M-z: -0.94 kNm</p>	System d.1

Tabelle 44: Plattenverbund - LF 1 - Normalkraft der Deckenbalken

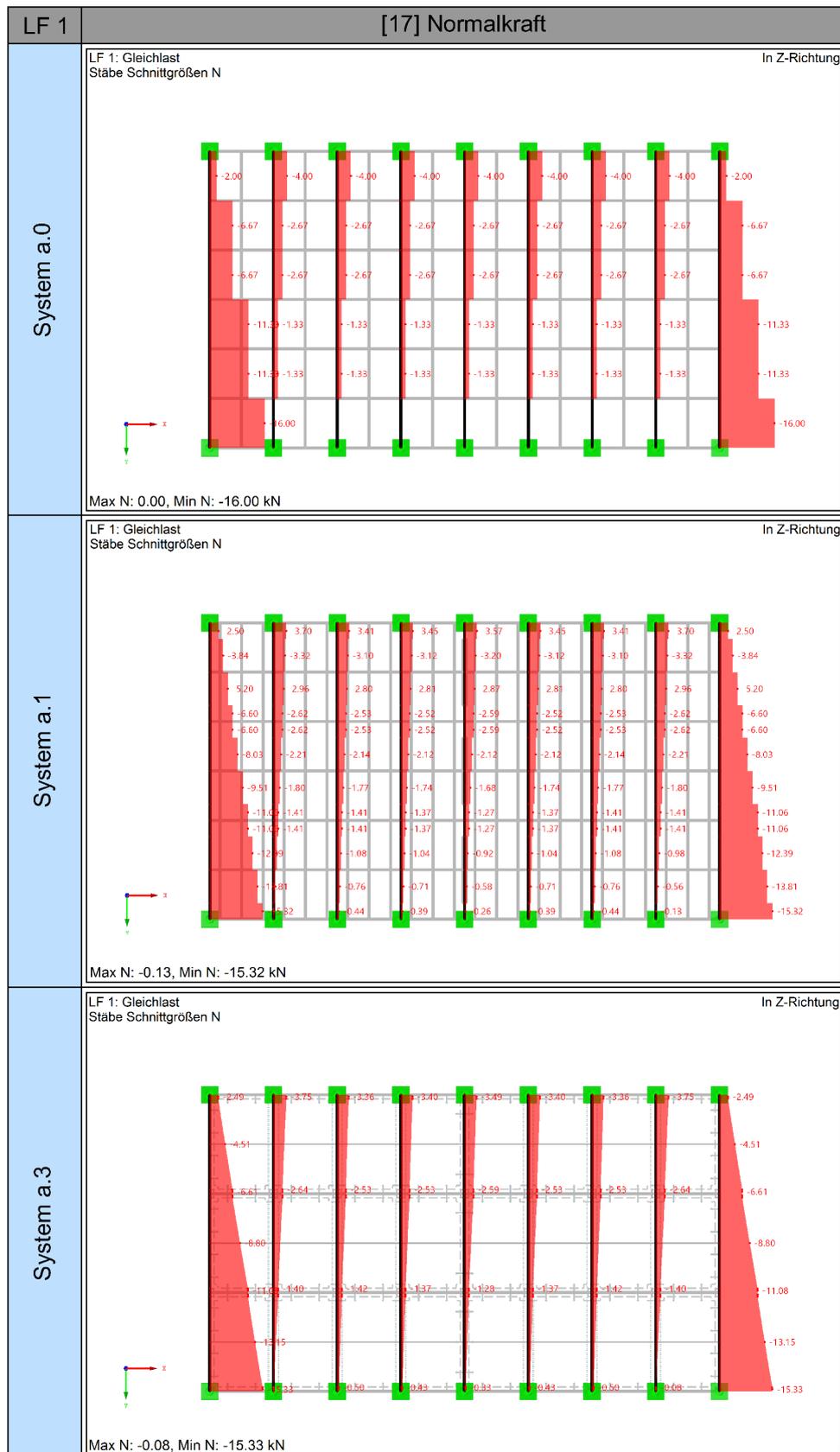


Tabelle 45: Plattenverbund - LF 1 - Normalkraft der Deckenbalken

[18] Normalkraft		LF 1
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen N</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max N: -0.13, Min N: -15.31 kN</p>	System b.1	
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen N</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max N: -0.08, Min N: -15.41 kN</p>	System c.1	
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen N</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max N: 1.02, Min N: -15.36 kN</p>	System d.1	

Tabelle 46: Plattenverbund - LF 1 - Querkraft der Deckenbalken

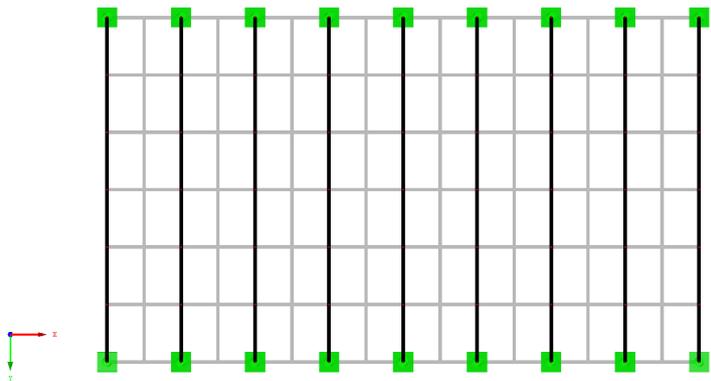
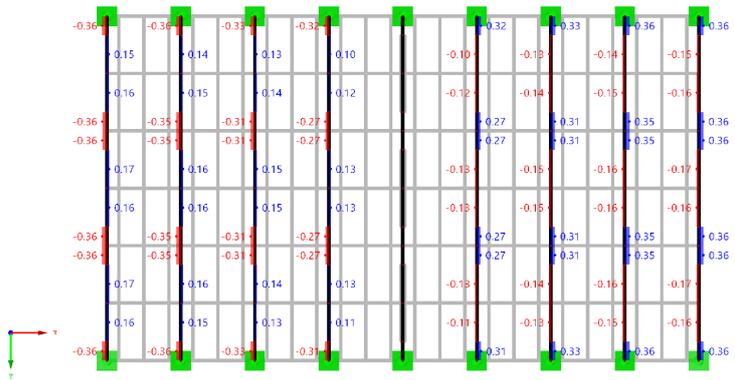
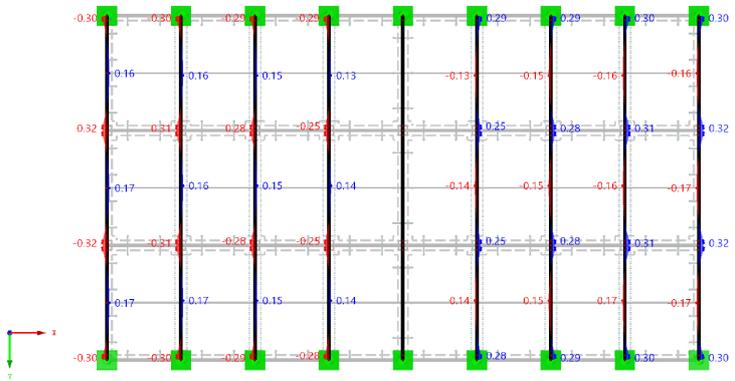
LF 1	[19] Querkraft
System a.0	<p data-bbox="402 353 571 398">LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p data-bbox="1184 353 1276 376" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 869 638 891">Max V-y: 0.00, Min V-y: 0.00 kN</p>
System a.1	<p data-bbox="402 902 571 947">LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p data-bbox="1184 902 1276 925" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 1417 646 1440">Max V-y: 0.36, Min V-y: -0.36 kN</p>
System a.3	<p data-bbox="402 1451 571 1496">LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p data-bbox="1184 1451 1276 1473" style="text-align: right;">In Z-Richtung</p>  <p data-bbox="402 1966 646 1989">Max V-y: 0.32, Min V-y: -0.32 kN</p>

Tabelle 47: Plattenverbund - LF 1 - Querkraft der Deckenbalken

[20] Querkraft		LF 1
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p> <p>Max V-y: 0.42, Min V-y: -0.42 kN</p>	System b.1	
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p> <p>Max V-y: 1.44, Min V-y: -1.44 kN</p>	System c.1	
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen V-y</p> <p style="text-align: right;">In Z-Richtung</p> <p>Max V-y: 1.47, Min V-y: -1.47 kN</p>	System d.1	

Tabelle 48: Plattenverbund - LF 1 - Moment der Deckenbalken

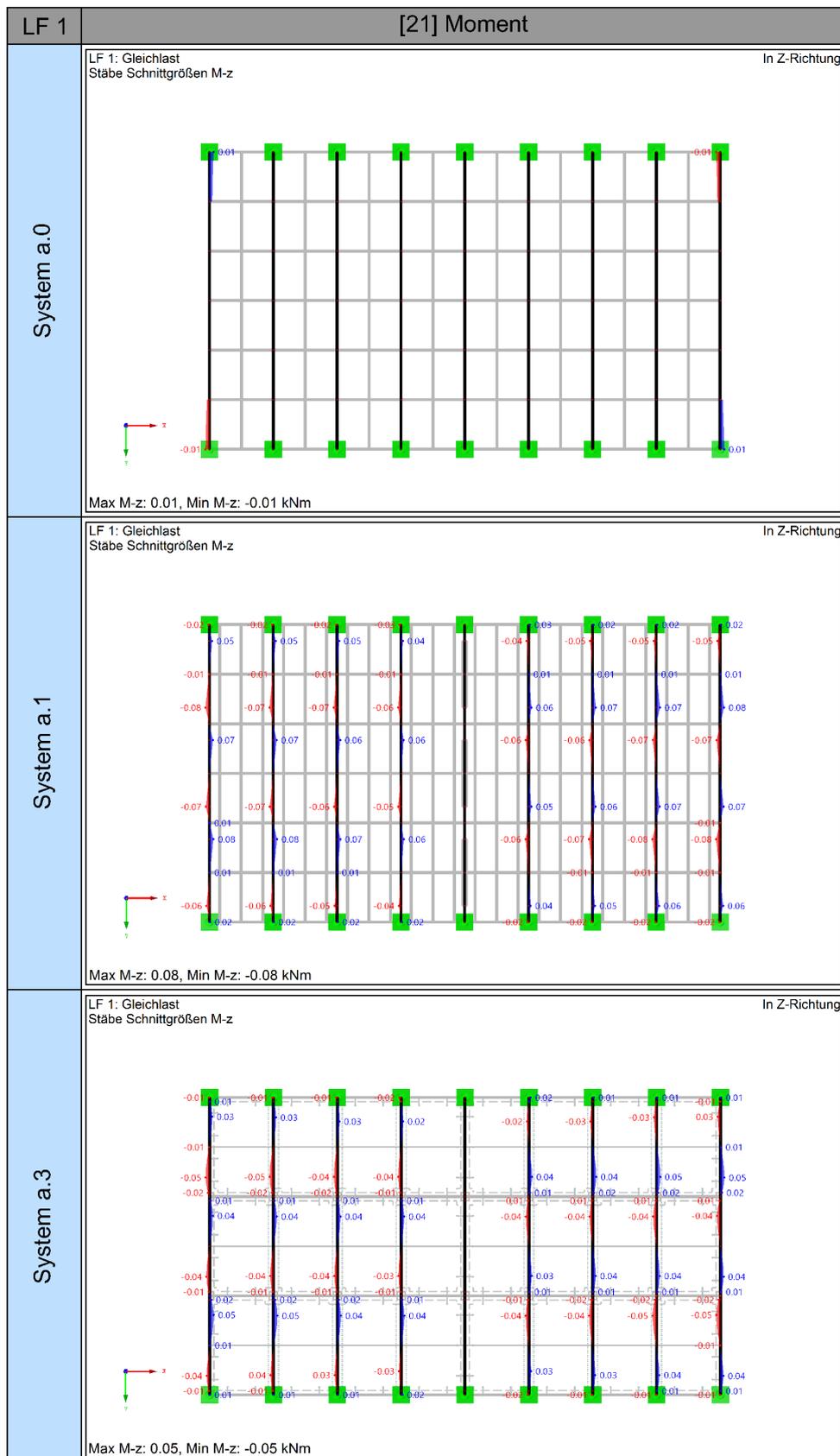


Tabelle 49: Plattenverbund - LF 1 - Moment der Deckenbalken

[22] Moment		LF 1
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max M-z: 0.09, Min M-z: -0.09 kNm</p>	System b.1	
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max M-z: 0.62, Min M-z: -0.62 kNm</p>	System c.1	
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Schnittgrößen M-z</p> <p>In Z-Richtung</p> <p>Max M-z: 0.58, Min M-z: -0.58 kNm</p>	System d.1	

Tabelle 50: Plattenverbund - LF 1 - Scheibennormal- bzw. Normalkraft für die Bemessung der Verbindungsmittel

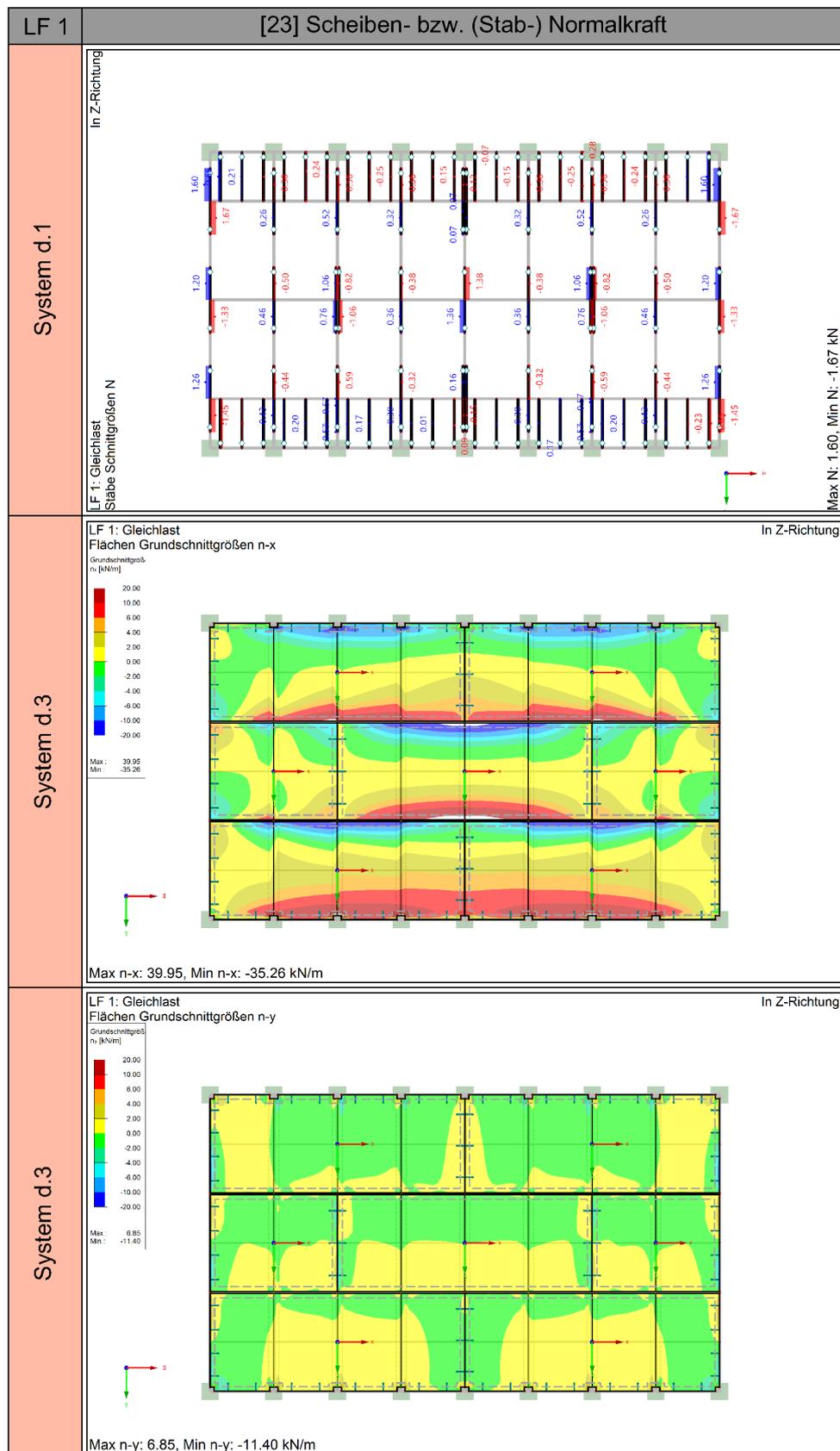


Tabelle 51: Plattenverbund - LF 1 - Scheibenschub- bzw. Querkraft für die Bemessung der Verbindungsmittel

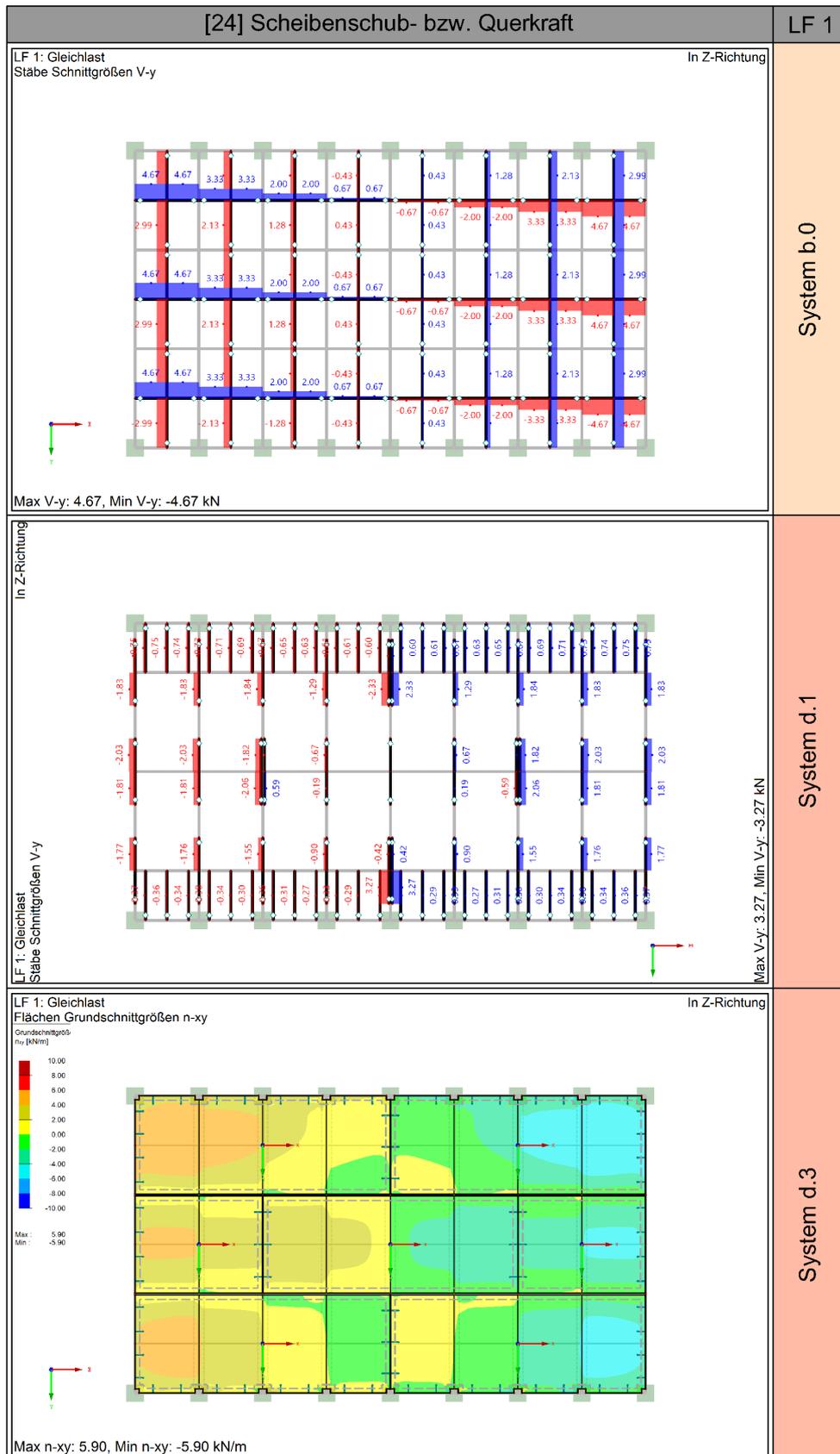


Tabelle 52: Plattenverbund - LF 1 - Normalspannung der Beplankung

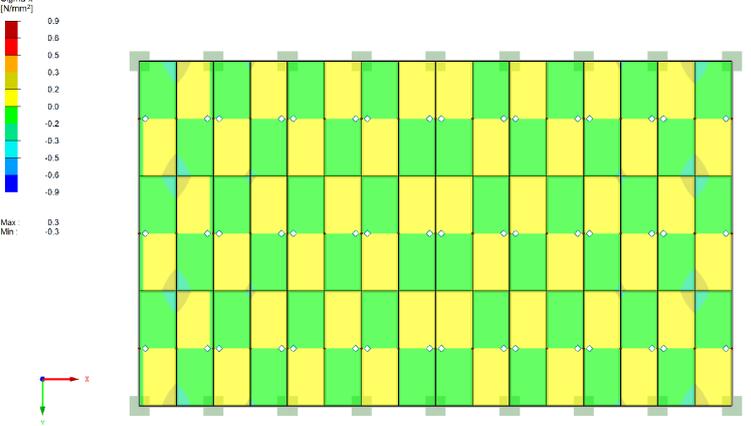
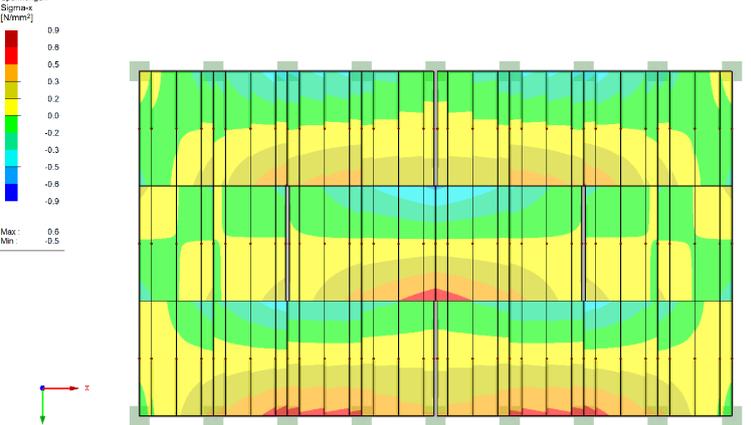
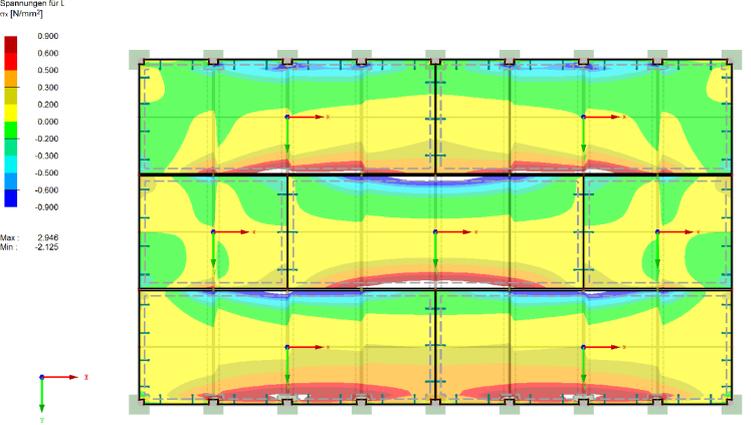
LF 1	[25] Normalspannung	
System b.0	<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Spannungen Sigma-x</p> <p>Spannungen Sigma-x [N/mm²]</p>  <p>Max Sigma-x: 0.3, Min Sigma-x: -0.3 N/mm²</p>	In Z-Richtung
System d.1	<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Spannungen Sigma-x</p> <p>Spannungen Sigma-x [N/mm²]</p>  <p>Max Sigma-x: 0.6, Min Sigma-x: -0.5 N/mm²</p>	In Z-Richtung
System d.3	<p>RF-LAMINATE FA1 Schicht Nr. 1, Mitte Flächen Spannungen für LF1 Sigma-x</p> <p>Spannungen für L x [N/mm²]</p>  <p>Flächen Max Sigma-x: 2.946, Min Sigma-x: -2.125 [N/mm²] Max Sigma-x: 2.946, Min Sigma-x: -2.125 N/mm²</p>	In Z-Richtung

Tabelle 53: Plattenverbund - LF 1 - Schubspannung der Beplankung

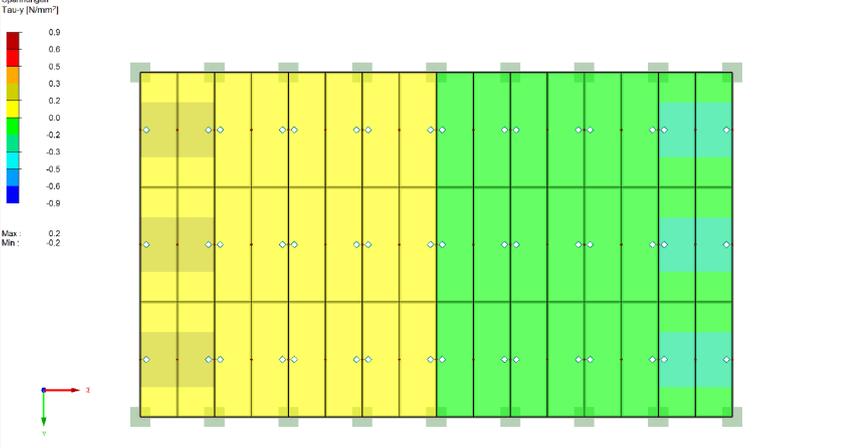
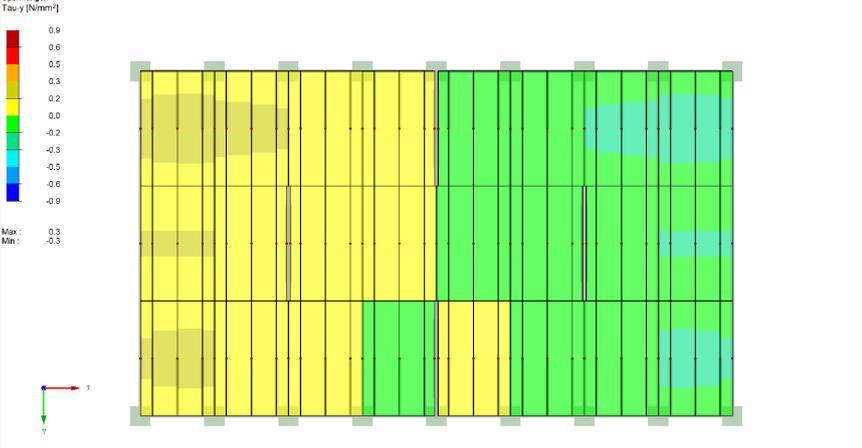
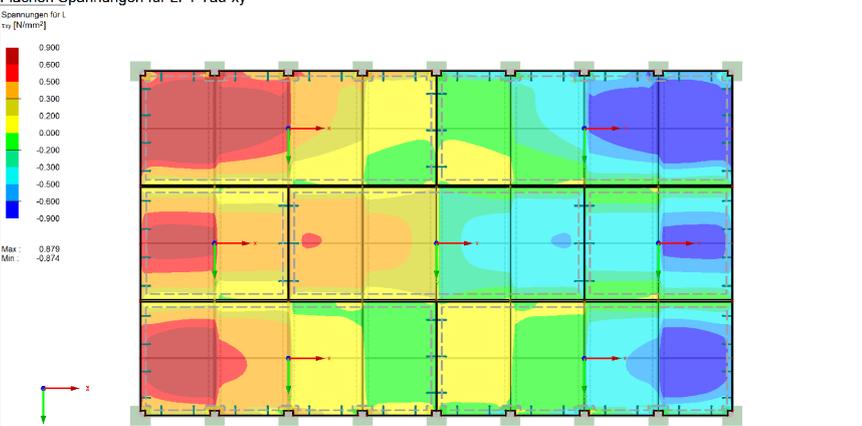
[26] Schubspannung	LF 1
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Spannungen Tau-y</p> <p>In Z-Richtung</p>  <p>Max Tau-y: 0.2, Min Tau-y: -0.2 N/mm²</p>	System b.0
<p>LF 1: Gleichlast Stäbe Spannungen Tau-y</p> <p>In Z-Richtung</p>  <p>Max Tau-y: 0.3, Min Tau-y: -0.3 N/mm²</p>	System d.1
<p>RF-LAMINATE FA1 Schicht Nr. 1, Mitte Flächen Spannungen für LF1 Tau-xy</p> <p>In Z-Richtung</p>  <p>Flächen Max Tau-xy: 0.879, Min Tau-xy: -0.874 [N/mm²] Max Tau-xy: 0.879, Min Tau-xy: -0.874 N/mm²</p>	System d.3

Tabelle 54: Plattenverbund - LF 1 - Strategie 2

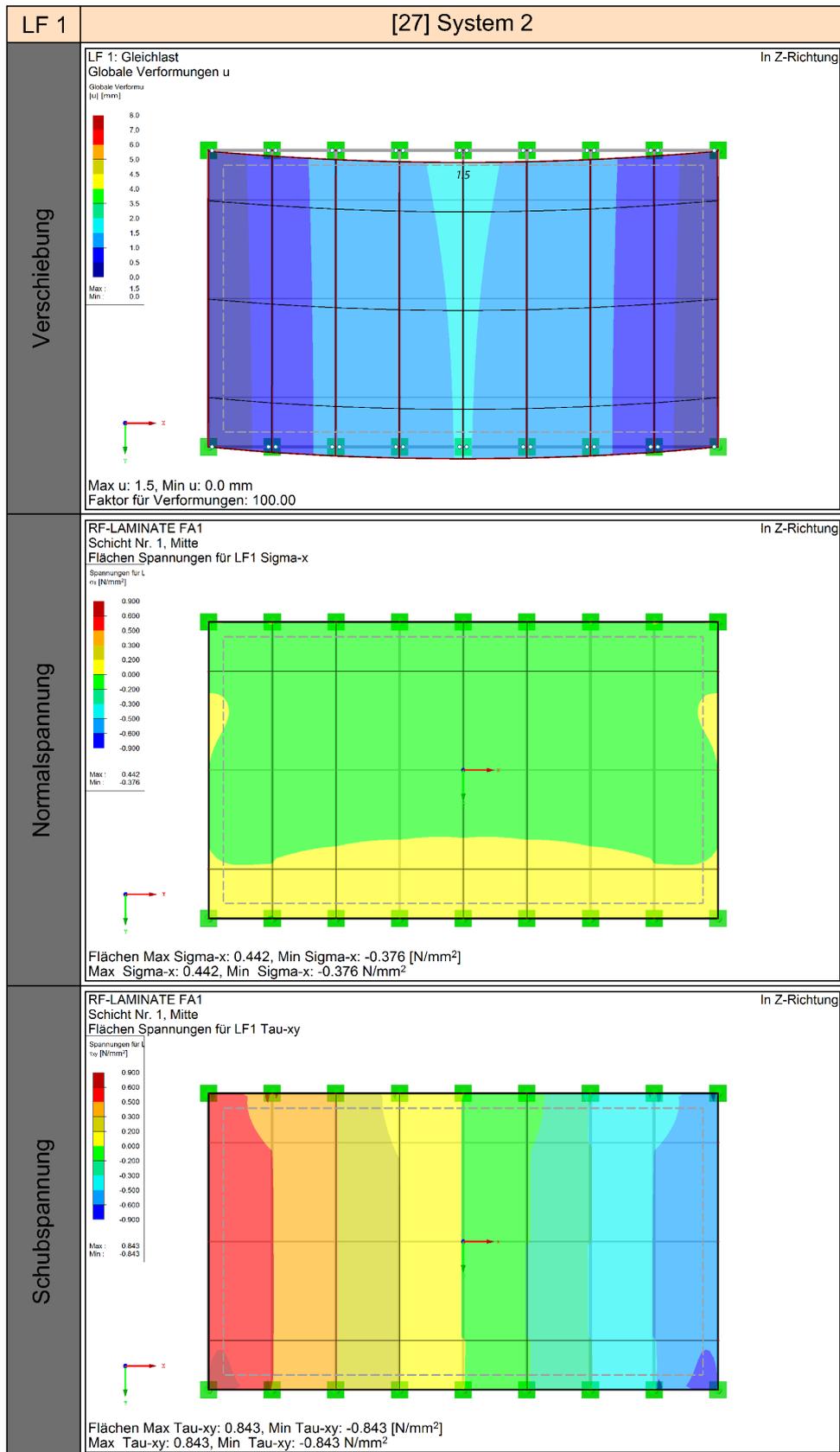


Tabelle 55: Plattenverbund - LF 1 - Strategie 2

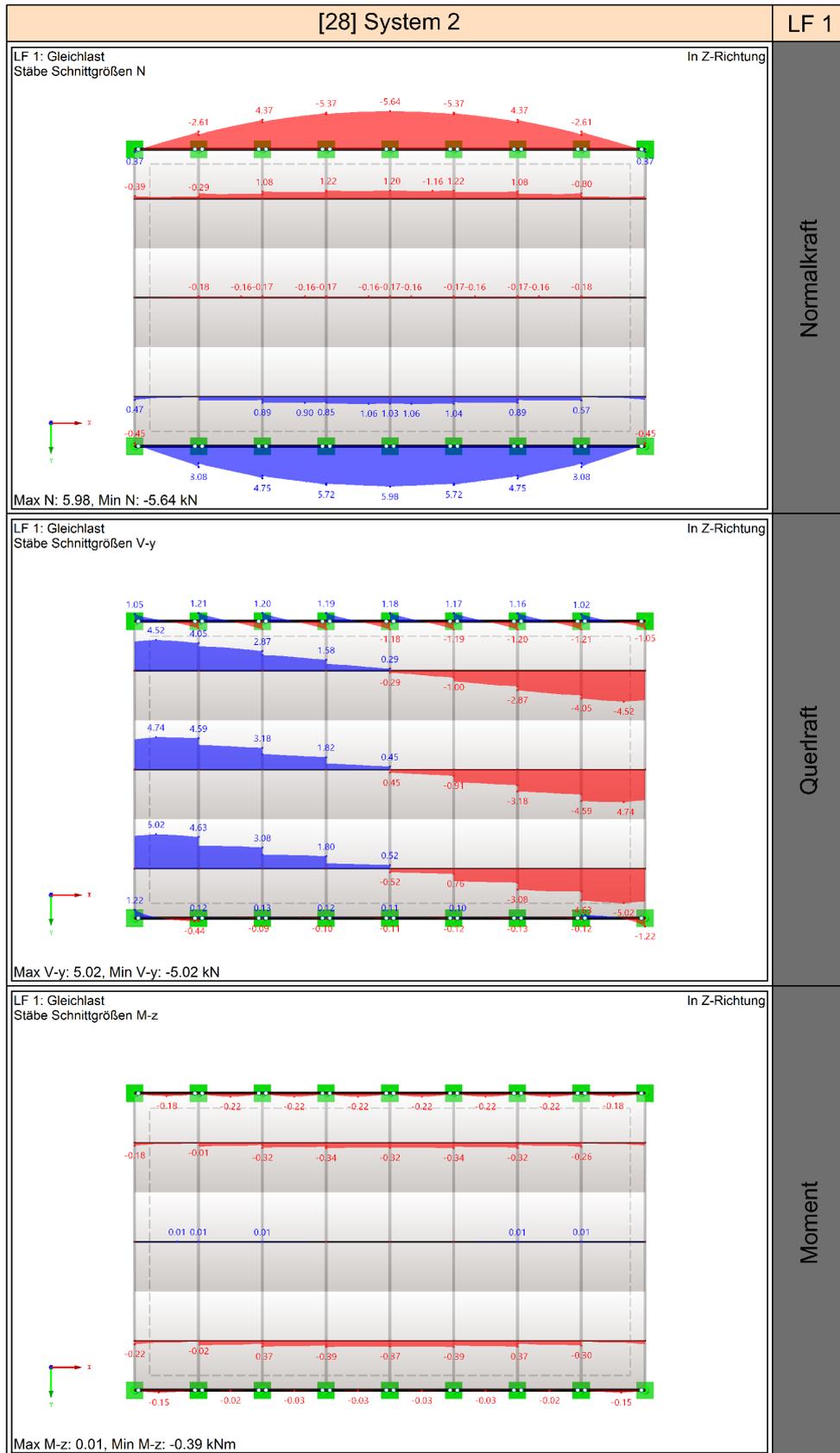


Tabelle 56: Plattenverbund - LF 1 - Strategie 2

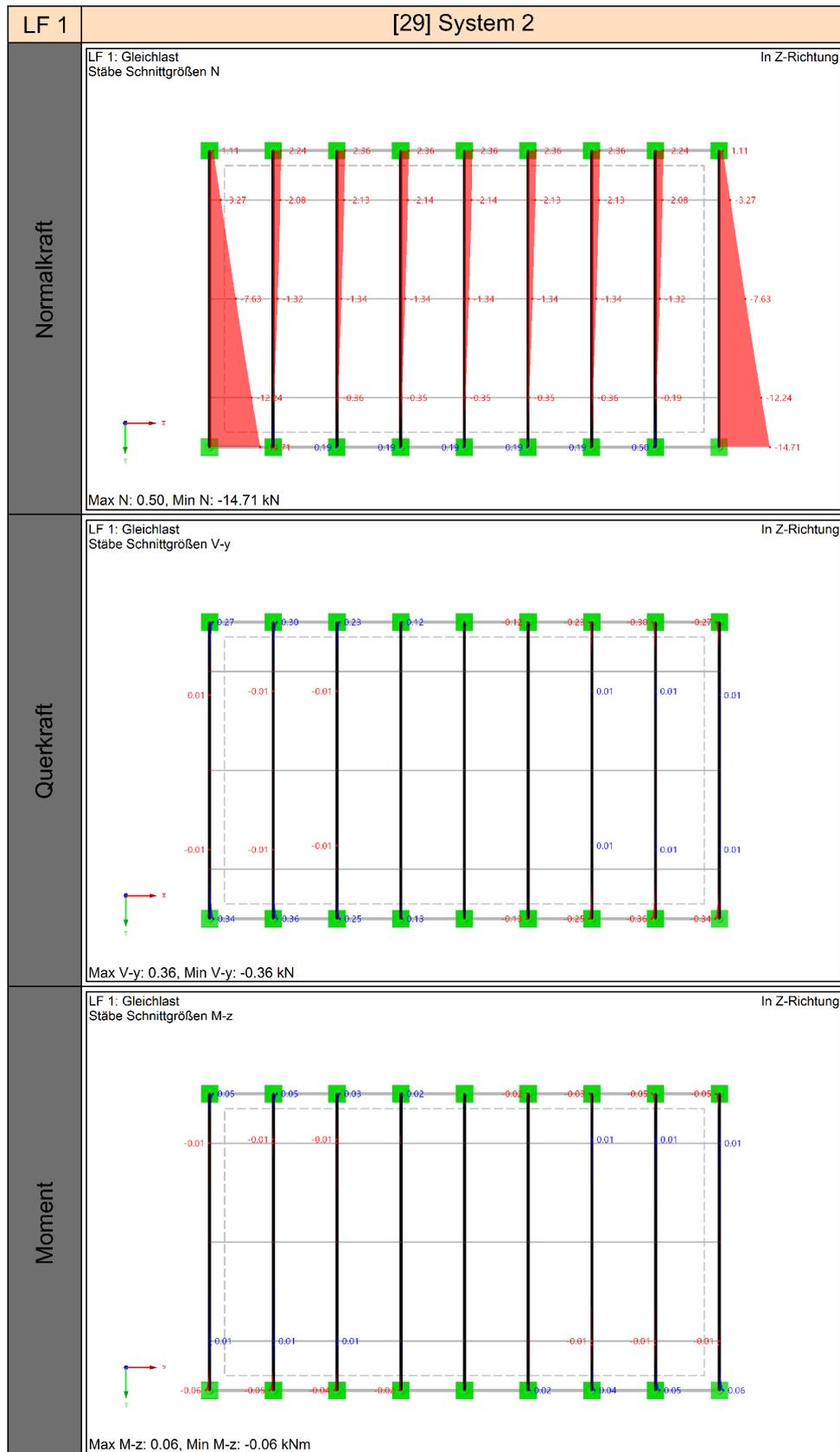


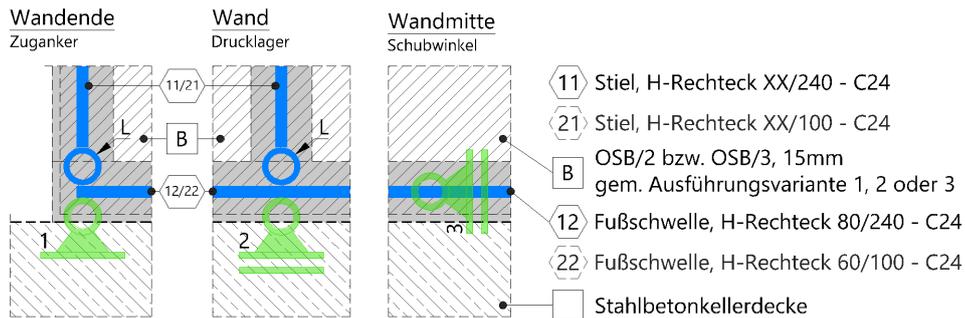
Tabelle 57: Plattenverbund - LF 1 - Strategie 2

[30] System 2		LF 1
<p>LF 1: Gleichlast Flächen Grundschnittgrößen n-x GrundschnittgröÙe n_x [kN/m]</p> <p>Max: 7.96 Min: -6.77</p> <p>Max n-x: 7.96, Min n-x: -6.77 kN/m</p>	In Z-Richtung	Scheibennormalkraft
<p>LF 1: Gleichlast Flächen Grundschnittgrößen n-y GrundschnittgröÙe n_y [kN/m]</p> <p>Max: 3.23 Min: -11.40</p> <p>Max n-y: 3.23, Min n-y: -11.40 kN/m</p>	In Z-Richtung	Scheibennormalkraft
<p>LF 1: Gleichlast Flächen Grundschnittgrößen n-xy GrundschnittgröÙe n_{xy} [kN/m]</p> <p>Max: 5.69 Min: -5.69</p> <p>Max n-xy: 5.69, Min n-xy: -5.69 kN/m</p>	In Z-Richtung	Scheibenschubkraft

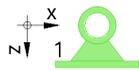
Umsetzung der Erkenntnisse auf eine reale 3D-Struktur

Detail B (Einheit in [mm])

Ansicht: Außenwand bzw. Zwischenwand (Auflager)

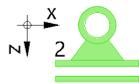


Auflager Wandende (Zuganker)



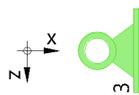
Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = 100$ [kN/m] (Annahme),
 $u_z = \text{fest}$ (Annahme: keine Nachgiebigkeit)
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$
 Anordnung: Fußschwelle, Wandende bzw. Fußschwelle, beidseitig der Hauseingangstür

Auflager Wand (Drucklager)



Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = 100$ [kN/m] (Annahme),
 $u_z = \text{fest}$ (Druck) bzw. 0 (Zug)
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$
 Anordnung: Fußschwelle, unter jedem Stiel (ausgenommen: Wandende bzw. beidseitig der Hauseingangstür)

Auflager Wandmitte (Schubwinkel)



Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = \text{fest}$ (Annahme: keine Nachgiebigkeit),
 $u_y = u_z = 0$
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$
 Anordnung: Fußschwelle, Wandmitte

Anschluss Kopfschwelle an Stiel

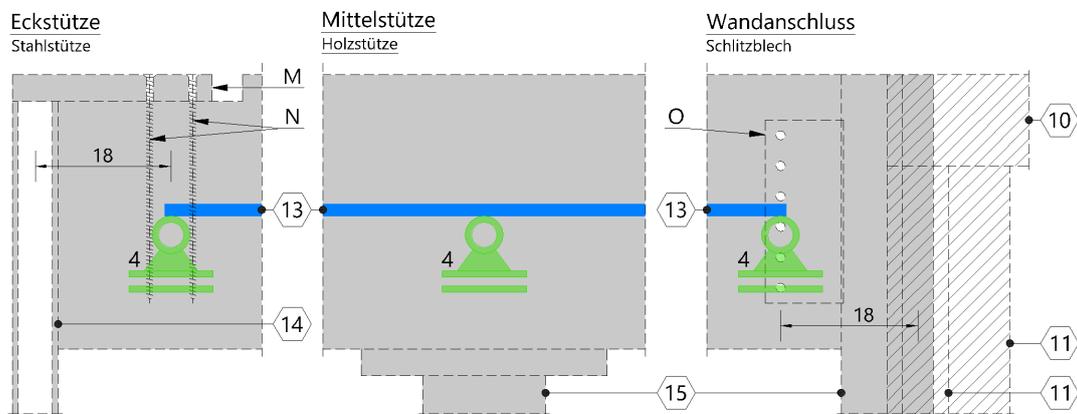


Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = u_z = \text{fest}$
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = 0, \varphi_y = \varphi_z = 1$ [kNm/rad] (Annahme)

Abbildung 47: GRIFFNER Fertigteilhaus - Detail B: Ansicht Außenwand bzw. Zwischenwand (Auflager)

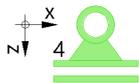
Detail C (Einheit in [cm bzw. mm])

Ansicht: Unterzug-Stütze (Auflager)



- | | | | |
|----|--|---|----------------------|
| 10 | Kopfschwelle, H-Rechteck 120/240 - GL24h | M | Kopfplatte |
| 11 | Stiel, H-Rechteck XX/240 - C24 | N | Vollgewindeschrauben |
| 13 | Unterzug, H-Rechteck XXX/XXX - GL24h | O | Schlitzblech |
| 14 | Stahlstütze | | |
| 15 | Holzstütze | | |

Auflager (Stütze)

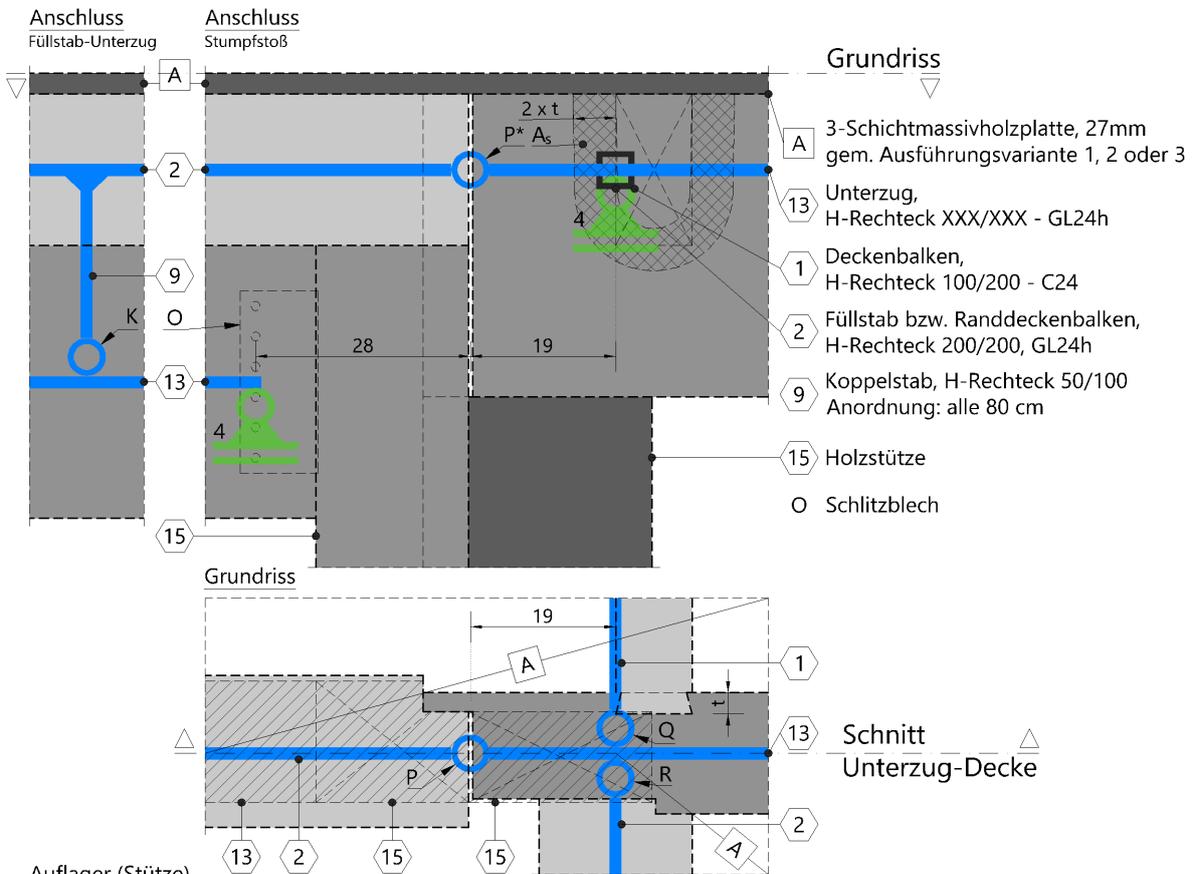


Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = 0, u_z = \text{fest}$ (Annahme: keine Nachgiebigkeit)
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \text{fest}$ (Annahme), $\varphi_y = \varphi_z = 0$
 (Annahme: Vernachlässigung der Einspannmomente)

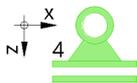
Abbildung 48: GRIFFNER Fertigteilhaus - Detail C: Ansicht Unterzug-Stütze (Auflager)

Detail D+E (Einheit in [cm bzw. mm])

Schnitt: Unterzug-Decke



Auflager (Stütze)



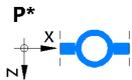
Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = 0, u_z = \text{fest}$ (Annahme: keine Nachgiebigkeit)
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \text{fest}$ (Annahme), $\varphi_y = \varphi_z = 0$
 (Annahme: Vernachlässigung der Einspannmomente)

Anschluss Füllholz an Kopfschwelle



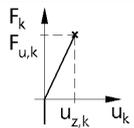
Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = u_z = \text{fest}$
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$
 Anordnung: alle 80 cm

Anschluss Stumpfstoß (siehe Schnitt, P*)



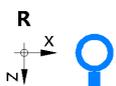
Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = \text{fest}$ (Druck) bzw. 0 (Zug), $u_y = 0, u_z = \text{fest}$ (Annahme), Anmerkung: Übertragung der Zugnormalkraft ausschließlich über die Beplankung
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$

Schwabenschwanzanschluss (Deckenbalken)



Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = u_y = \text{fest}, u_z = \text{Diagramm}$
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$
 (Annahme: Vernachlässigung der Einspannmomente)
 $F_{u,k} = A_s \times f_{t,0,k} \times k_{mod} = 10,0 \text{ kN}, u_{z,k} = 1,5 \text{ mm}$ (Annahme)
 $A_s = 278 \text{ cm}^2, f_{t,0,k} = 0,04 \text{ kN/cm}^2$ (C24), $k_{mod} = 0,9$, (Wind, gem. ÖNORM EN 1995-1-1, Tab.3.1)

Anschluss Stumpfstoß

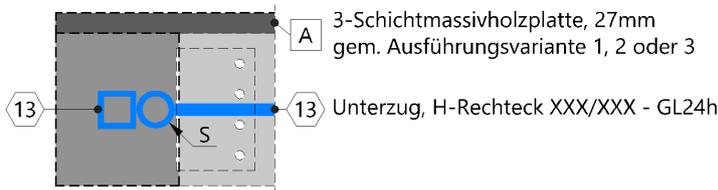


Wegfedersteifigkeit [u]: $u_x = 0, u_y = \text{fest}$ (Annahme), $u_z = \text{fest}$ (Druck) bzw. 0 (Zug)
 Drehfedersteifigkeit [φ]: $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$

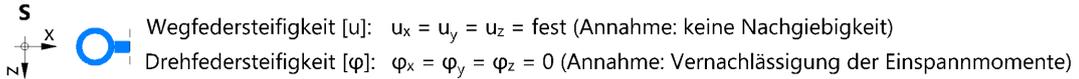
Abbildung 49: GRIFFNER Fertigteilhaus - Detail D & E: Schitt Unterzug-Decke

Detail F (Einheit in [mm])

Schnitt: Unterzug-Decke



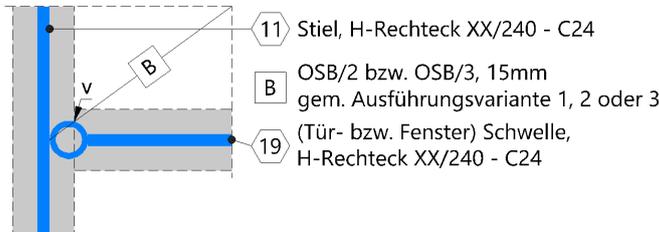
Anschluss Schlitzblech



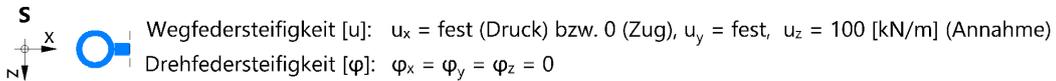
Detail H (Einheit in [mm])

Ansicht: Außenwand (Fenster bzw. Tür)

Anschluss (Fenster- bzw. Tür-) Schwelle



Anschluss (Fenster- bzw. Tür-) Schwelle



Detail J (Einheit in [mm])

Schnitt: Zwischenwand-Decke (Unterzug)

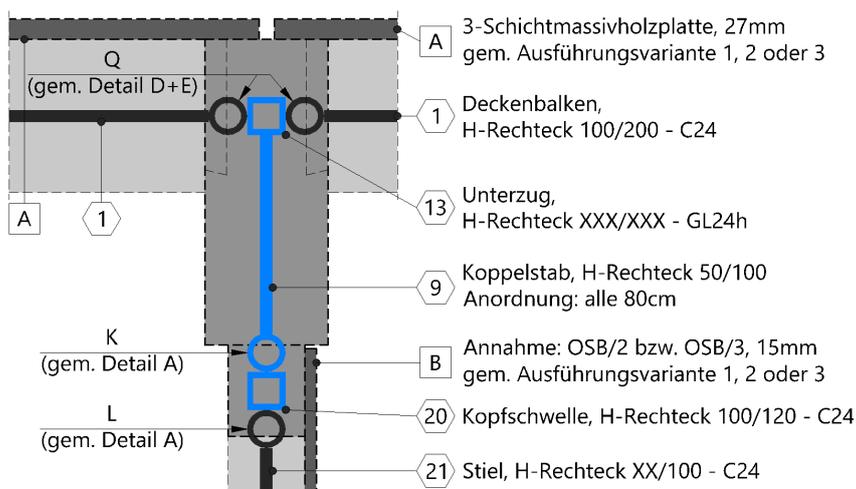
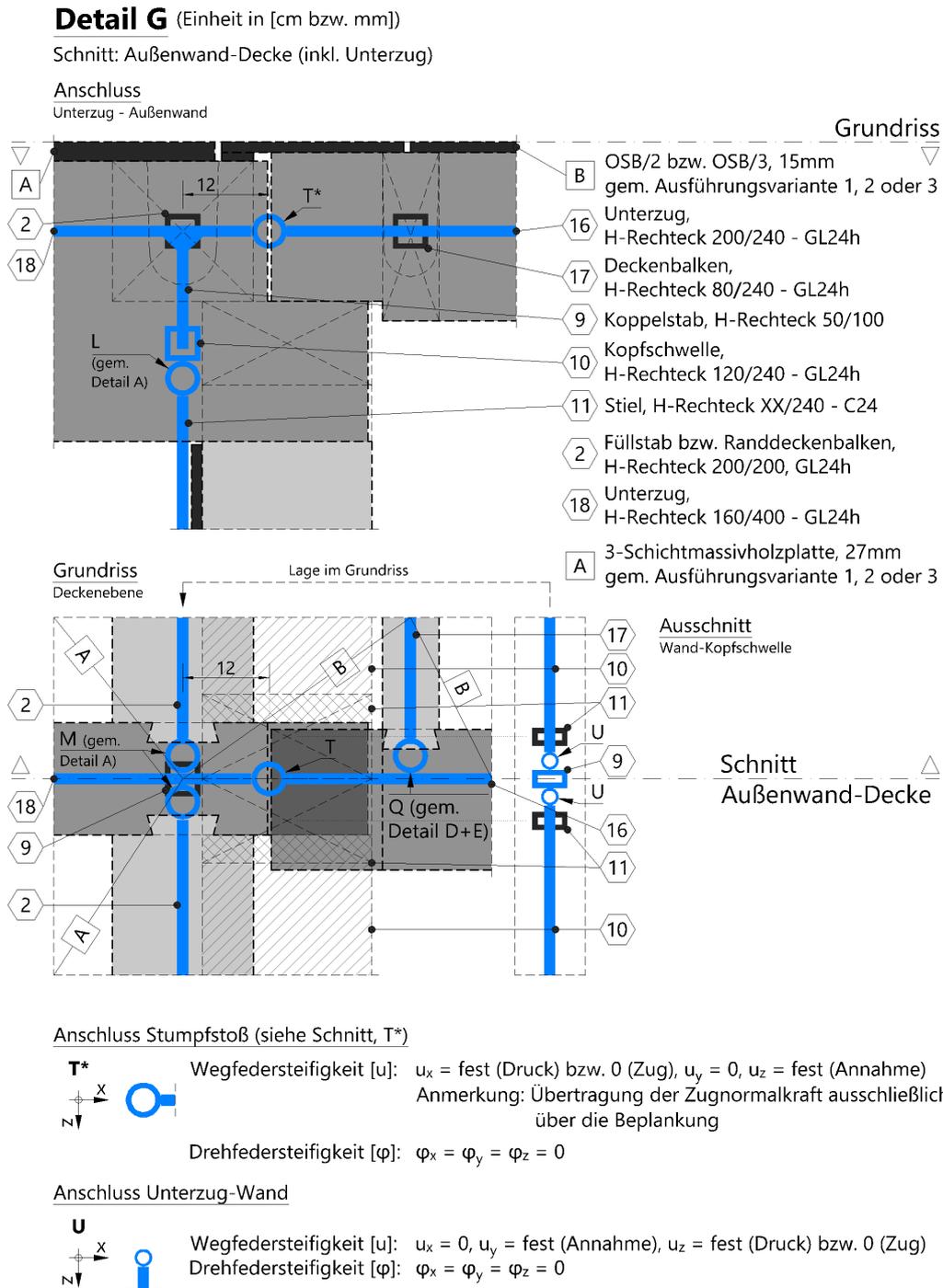


Abbildung 50: GRIFFNER Fertigteilhaushaus - Detail F: Schnitt Unterzug-Decke, H: Ansicht Außenwand (Fenster bzw. Tür) & J: Schnitt Zwischenwand-Decke (Unterzug)



Detail H und J

siehe unter Detail F

Abbildung 51: GRIFFNER Fertigteilhaus - Detail G: Schnitt Außenwand-Decke (inkl. Unterzug)

Literaturverzeichnis

- [Altenbach (1996)] ALTENBACH Holm, ALTENBACH Johannes, RIKARDS Rolands, *Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke - Modellierung und Berechnung von Balken und Platten aus Verbundwerkstoffen*, 1.Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1996.
- [Altenbach (2016)] ALTENBACH Holm, ALTENBACH Johannes, NAUMENKO Pavel, *Ebene Flächentragwerke, Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten*, 2.Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2016.
- [Baustatik VO (2011)] PICHLER Bernhard und EBERHARDSTEINER Josef, *Baustatik - Skriptum zur Vorlesung SS2011*, Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen der Technischen Universität Wien, Wien, 2011.
- [Bodig (1982)] BODIG Jozsef und JAYNE Benjamin A., *Mechanics of Wood and Wood Composites*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1982.
- [Broschüre Erdbebensicherheit (2011)] WALTER Burkhard und Wiesenkämper Tobias, *Nachweis der Erdbebensicherheit von Holzgebäuden*, Ingenieurkammer-Bau Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2011, URL: <http://www.ikbaunrw.de/mitglieder/detail/article/neue-broschuere-informiert-ueber-den-nachweis-der-erdbebensicherheit-von-holzgebaeuden/> (Zugriff: 2016-12-29).
- [BSPHandbuch (2009)] SCHICKHOFER Gerhard, BOGENSPERGER Thomas und MOOSBRUGGER Thomas, *BSPHandbuch Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz*, 1.Auflage, Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, 2009.
- [Griffner (Homepage, 2016)] *Griffner Facts and Figures*, Griffner Fertighaus Gesellschaft m.b.H., Griffner, 2016, URL: <https://www.griffner.com/presse/> (Zugriff: 2017-01-15).
- [Hall (2012)] HALL Christoph, *Dissertation, Methoden zur elastischen und plastischen Modellierung von scheibenartig beanspruchten Holztafeln*, Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolowilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2012.

- [Holztafelbau VO (2010)] KESSEL Martin, *Vorlesung Holztafelbau SS2010*, Institut für Baukonstruktion und Holzbau der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, 2010.
- [Mang (2013)] MANG Herbert und Hofstetter Günter, *Festigkeitslehre*, 4.Auflage, Springer-Verlag, Wien, 2013.
- [Neuhaus (2011)] NEUHAUS Helmuth, *Ingenieurholzbau, Grundlagen - Bemessung - Nachweis - Beispiele*, 3.Auflage, Vieweg+Teubner-Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [Österreichischer Fertighausverband (2016)] Suter Roland, GRUBER Josef und MURHAMMER Christian, *Pressegespräch des Österreichischen Fertighausverbandes*, Österreichischer Fertighausverband, Wien, 14. April 2016, URL: <http://www.fertighausverband.at/presse/> (Zugriff: 2017-01-15).
- [RF-Laminat Handbuch (2016)] *Add-on Module, RF-LAMINATE, Design of Laminate Surfaces, Program Description*, Dlubal Software GmbH, Tiefenbach, 2016.
- [Schürmann (2007)] SCHÜRMAN Helmut, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2.Auflage, Springer-Verlag, Berlin - Heideberg, 2007.
- [Wiedermann (2007)] WIEDERMANN Johannes, *Leichtbau, Elemente und Konstruktion*, 3.Auflage, Springer-Verlag, Berlin - Heideberg, 2007.

Normen

- [DIN 1052 (2008)] *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2008-12-00.
- [DIN EN 1995-1-1/NA (2013)] *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2013-08-00.
- [ÖNORM EN 338 (2009)] *Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2009-12-01.
- [ÖNORM B 1991-1-1 (2011)] *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2011-12-01.
- [ÖNORM EN 1993-1-1 (2014)] *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2014-10-15.
- [ÖNORM EN 1995-1-1 (2011)] *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2011-09-01.
- [ÖNORM B 1995-1-1 (2015)] *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2015-06-15.
- [ÖNORM EN 12369-1 (2001)] *Holzwerkstoffe, Charakteristische Werte für die Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, Teil 1: OSB, Spanplatten und Faserplatten*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2001-04-01.
- [ÖNORM EN 14080 (2013)] *Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2013-08-01.