



Andreas Eder, BSc

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Englhardt

Mitbetreuer

Dipl.-Ing. Vlad Alexandru Silvestru, BSc

Institut für Hochbau

Graz, Juni 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn Oliver Enghardt für die Möglichkeit zur Verfassung dieser Arbeit am Institut für Hochbau sowie für die gute Betreuung bedanken. Ebenso gebührt ein großer Dank Herrn Dipl.-Ing. BSc Vlad Silvestru, der mir stets bei Problemen weiterhelfen konnte und mir mit konstruktiver Kritik und guten Tipps zur Seite stand.

Besonders herzlich möchte ich mich bei der wundervollen Unterstützung meiner Eltern bedanken, die mich während meiner gesamten Studienzeit nicht nur finanziell unterstützt haben, sondern mir immer mit gutem Rat zur Seite standen. Ohne sie wäre mein Studium sicherlich nicht so reibungslos abgelaufen. Ebenfalls möchte ich mich für die tolle Unterstützung bei meiner Oma und meinen beiden Geschwistern bedanken.

Zuletzt gebührt ein großes Dankeschön meinen Freunden und Studienkollegen in Graz, mit denen ich eine fantastische Zeit hatte und bestimmt noch einige schöne Momente erleben darf.

Graz, Juni 2016

Andreas Eder

Kurzfassung

In der zeitgenössischen Architektur spielt die Anforderung nach maximale Transparenz im Fassadenbau eine bedeutende Rolle. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, ist es das Ziel die Glasscheibe nicht nur als Füllelement des Stahlrahmens zu sehen, sondern auch zur Lastabtragung in und quer zur Ebene heranzuziehen. Speziell bei einer Beanspruchung durch Winddruck in Richtung der Fassadenebene, übernehmen derzeit aussteifende Stahlelemente die Lastabtragung. Um jedoch auf diese verzichten zu können, wird eine kombinierte Tragwirkung der Glasscheibe und des Stahlrahmens, bei welcher die Glasscheibe die schubaussteifende Wirkung übernimmt, angestrebt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es den Einfluss verschiedener Parameter auf das Tragverhalten einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion zu untersuchen und zu quantifizieren. Sowohl für die Modellierung als auch für die Berechnung des zu untersuchenden Systems wird das Finite Elemente Programm *SOFiSTiK*, mit der Möglichkeit einer parametrischen Eingabe über das Programmmodul *Teddy* herangezogen. Das analysierte System setzt sich einem Stahlrahmen und einer Glasscheibe zusammen, welche am Scheibenrand über eine Randverklebung und im Bereich der Glasecken über Klotzungen mit dem Stahlrahmen gekoppelt wird. Das Tragverhalten wird vorwiegend unter einer horizontalen Knotenlast in Scheibenebene untersucht. Zudem sollen aber auch verschiedene Lastfälle wie Windsog mit horizontaler Aussteifungslast simuliert werden.

Anschließend werden ausgewählte Parameter, wie die Geometrie der Scheibe, die Geometrie des Stahlrahmens und die E-Moduli der Klotzung und des Klebstoffes variiert. Anhand der Berechnungsergebnisse in Form von Verformungen und Spannungen der Glasscheibe und des Stahlrahmens erfolgt eine Gegenüberstellung mit einem Referenzsystem. Des Weiteren wird ein Vorschlag zur Vordimensionierung der Glasscheibe anhand eines vereinfachten Stabmodells aufgezeigt. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst, ein Resümee erstellt und ein Ausblick über weiterführende Untersuchungen gegeben.

Abstract

In contemporary architecture maximizing the transparency of facades often plays a significant role. To meet this requirement, opaque structural components such as steel bracings can be reduced by using the glazing not only as an infilling material but also as a load-bearing element that is able to transmit both out-of-plane and in-plane forces. Nowadays steel bracings are mainly used in the case of in-plane loads through wind pressure to carry the shear loads to the supports. By activating the glass panels as shear elements in a hybrid glass-steel structure, steel bracings can be avoided.

The main goal of this thesis is to determine and quantify the influence of various parameters on the load-bearing behaviour of a hybrid glass-steel construction. For the numerical simulation the finite element program SOFiSTiK is used, which enables a parametric input via the program module Teddy. The system consists of a steel frame and a glass panel, which are adhesively bonded along the edges. Additionally, setting blocks are used between the steel frame and the glass panel at the glass corners. Predominantly, the structural behaviour for an in-plane point load on one of the corners is analysed. Furthermore, various load cases such as combined out-of-plane wind suction and the horizontal in-plane load are simulated.

In addition, selected parameters such as the geometry of the glass panel, the geometry of the steel frame, the E-moduli of the materials used for the setting blocks and the adhesive support are varied. The resulting deformations and stresses in the glass panel as well as in the steel frame are compared to results obtained for a reference system. Based on these outcomes, a proposal for determining the glass thickness is made by using a simplified model. Finally, the overall results are summarised and an outlook on further research is given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	3
1.3	Ziel der Arbeit	4
2	Stand der Technik und Wissenschaft	5
2.1	Glas als Aussteifungselement.....	5
2.2	Allgemeines zu Kunststoffen.....	6
2.3	Eckklotzung.....	8
2.3.1	Eigenschaften ausgewählter Klotzungsmaterialien	10
2.3.1.1	Allgemeine Anforderungen.....	10
2.3.1.2	Polyamide (PA).....	11
2.3.1.3	Polyoxymethylen (POM).....	12
2.3.1.4	Polyetherimide (PEI).....	13
2.3.1.5	Polyetheretherketone (PEEK).....	14
2.3.2	Eignung des Klotzungsmaterials für schubbeanspruchte Scheiben	15
2.4	Randklebung	16
2.4.1	Eigenschaften ausgewählter Klebstoffe.....	17
2.4.1.1	Allgemeine Anforderungen.....	17
2.4.1.2	Silikone (SI)	18
2.4.1.3	Epoxidharzklebstoffe (EP)	19
2.4.1.4	Polyurethane (PU)	19
2.4.1.5	Acrylate (A)	19
2.4.2	Eignung des Klebstoffs für schubbeanspruchte Scheiben.....	19
2.4.3	Besonderheiten bei der Bemessung von Klebefugen:.....	20
2.4.3.1	Bemessung der Randverklebung unter Schubbeanspruchung	21
2.5	Beultragverhalten.....	22
2.5.1	Einscheibensicherheitsglas (ESG)	25
2.5.2	Verbundsicherheitsglas (VSG)	26
2.5.3	Einfluss der Scheibenlagerung auf das Beultragverhalten.....	26
2.6	Vorschlag für die Bemessung von schubbeanspruchten Scheiben.....	28
3	Numerische Untersuchung zum Tragverhalten	29
3.1	Allgemeiner Vorgang zur Stabilitätsuntersuchung mittels FEM.....	30

3.2	Modellbildung.....	31
3.2.1	Element- & Materialwahl	31
3.2.1.1	Diskretisierung	33
3.2.1.2	Lagerung	35
3.2.1.3	Ermittlung der Federsteifigkeit.....	36
3.2.2	Vorverformung.....	36
3.2.2.1	Beuleigenformen.....	37
3.2.2.2	Einfluss der Klotzungsquersteifigkeit auf die Hauptspannungen.....	39
3.2.2.3	Wahl der Beulformen für die Vorverformung	42
3.3	Belastung	43
3.3.1	Lasteinleitung.....	44
3.4	Berechnungsverfahren.....	47
4	Parameterstudie.....	48
4.1	Referenzmodell.....	49
4.1.1	Vorverformung.....	49
4.1.2	Verschiebung aus der Scheibenebene	50
4.1.3	Hauptspannungen	51
5	Ergebnisse: Glasscheibe	56
5.1	Eigenformen & Eigenwerte.....	56
5.2	Verschiebungen und Spannungen der Glasscheibe.....	59
5.2.1	E-Modul Klotzung	61
5.2.2	E-Modul Klebung	63
5.2.3	Scheibenhöhe	65
5.2.4	Scheibenbreite.....	67
5.2.5	Scheibendicke.....	68
5.2.6	Vorverformungsfaktor.....	70
5.2.7	Definition der Rahmenparameter.....	71
5.2.8	Rahmendicke	72
5.2.9	Rahmentiefe	73
5.2.10	Rahmeneckprofildicke.....	75
5.2.11	Stegdicke	76
5.2.12	Lastfallkombinationen.....	77
6	Ergebnisse: Stahlrahmen.....	80
6.1	Maximale Verschiebung des Stahlrahmens in globaler x-Richtung.....	88
6.2	Vergleichsspannungen des Rahmens	89

7	Verbundsicherheitsglas (VSG)	92
8	Vordimensionierung - Stabmodell	98
9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	102
9.1	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Parameterstudie.....	102
10	Ausblick	105
11	Literaturverzeichnis	106
12	Abbildungsverzeichnis	108
13	Tabellenverzeichnis	113
14	Anhang	114
14.1	Spannungsbilder.....	114
14.1.1	E-Modul Klebstoff.....	115
14.1.1.1	E-Modul Klebstoff mit 1,0 N/mm ² :.....	115
14.1.1.2	E-Modul Klebstoff mit 10 N/mm ² :.....	117
14.1.1.3	E-Modul Klebstoff mit 100 N/mm ² :.....	119
14.1.1.4	E-Modul Klebstoff mit 1000 N/mm ² :.....	121
14.1.2	E-Modul Klotzung.....	123
14.1.2.1	E-Modul Klotzung mit 1,4 N/mm ² :.....	123
14.1.2.2	E-Modul Klotzung mit 250 N/mm ² :.....	125
14.1.2.3	E-Modul Klotzung mit 10.000 N/mm ² :.....	127
14.1.2.4	E-Modul Klotzung mit 70.000 N/mm ² :.....	129
14.1.3	Scheibenbreite.....	131
14.1.3.1	Scheibenbreite 1000 mm:.....	131
14.1.3.3	Scheibenbreite 2000 mm:.....	133
14.1.3.4	Scheibenbreite 2500 mm:.....	135
14.1.3.5	Scheibenbreite 3000 mm:.....	137
14.1.4	Scheibendicke:.....	139
14.1.4.1	Scheibendicke 6mm:.....	139
14.1.4.2	Scheibendicke 8 mm:.....	141
14.1.4.3	Scheibendicke 12 mm:.....	143
14.1.4.4	Scheibendicke 15 mm:.....	145
14.1.5	Scheibenhöhe.....	147
14.1.5.1	Scheibenhöhe 1500 mm:.....	147
14.1.5.2	Scheibenhöhe 2500 mm:.....	149
14.1.5.3	Scheibenhöhe 4500 mm:.....	151

14.1.5.4	Scheibenhöhe 5500 mm:	153
14.1.6	Rahmendicke	155
14.1.6.1	Rahmendicke 5 mm:	155
14.1.6.2	Rahmendicke 15 mm:.....	157
14.1.6.3	Rahmendicke 20 mm:.....	159
14.1.6.4	Rahmendicke 25 mm:.....	161
14.1.7	Rahmeneckprofildicke	163
14.1.7.1	Rahmeneckprofildicke 0 mm:.....	163
14.1.7.2	Rahmeneckprofildicke 5 mm:.....	165
14.1.7.3	Rahmeneckprofildicke 10 mm:	167
14.1.7.4	Rahmeneckprofildicke 20 mm:	169
14.1.8	Rahmenstegdicke.....	171
14.1.8.1	Rahmenstegdicke 5 mm :	171
14.1.8.2	Rahmenstegdicke 15 mm :	173
14.1.8.3	Rahmenstegdicke 20 mm :	175
14.1.8.4	Rahmenstegdicke 25 mm :	177
14.1.9	Rahmentiefe	179
14.1.9.1	Rahmentiefe 0 mm:.....	179
14.1.9.2	Rahmentiefe 45 mm:	181
14.1.9.3	Rahmentiefe 135 mm:.....	183
14.1.9.4	Rahmentiefe 180 mm:.....	185
14.1.10	Vorverformung.....	187
14.1.10.1	Faktor 250:	187
14.1.10.2	Faktor 500:	189
14.1.10.3	Faktor 750:	191
14.1.10.4	Faktor 1000:.....	193
14.1.10.5	Faktor 1250:.....	195
14.1.11	Lastfallkombinationen.....	197
14.1.11.1	LF H+V _K :	197
14.1.11.2	LF H+V _G :.....	200
14.1.11.3	LF H+W:	203
14.1.11.4	LF H+V _K +W:	206
14.1.11.5	LF H+V _G +W:	209
14.2	Verschiebung aus der Ebene – Rahmen.....	212
14.2.1	E-Modul Klotzung – System mit 2. Vorverformung	212
14.2.2	E-Modul Klebstoff – System mit 2. Vorverformung	212
14.2.3	Scheibenbreite – System mit 2. Vorverformung.....	213

14.2.4	Scheibendicke – System mit 2. Vorverformung	213
14.2.5	Rahmendicke – System mit 2. Vorverformung	214
14.2.6	Rahmeneckprofildicke – System mit 1. Vorverformung	214
14.2.7	Rahmeneckprofildicke – System mit 2. Vorverformung	215
14.2.8	Rahmentiefe – System mit 1. Vorverformung.....	215
14.2.9	Rahmentiefe – System mit 2. Vorverformung.....	215
14.2.10	Rahmenstegdicke – System mit 1. Vorverformung	216
14.2.11	Rahmenstegdicke – System mit 2. Vorverformung	216
14.2.12	Vorverformungsfaktor – System mit 2. Vorverformung	217
14.2.13	Lastfallkombination – System mit 2. Vorverformung.....	217
14.3	Hauptspannungsbilder für das System mit der VSG-Scheibe	218
14.3.1.1	2 x 6 mm mit G-Modul von 0,004 N/mm ²	218
14.3.1.2	2 x 6 mm mit G-Modul von 0,04 N/mm ²	219
14.3.1.3	2 x 6 mm mit G-Modul von 0,4 N/mm ²	220
14.3.1.4	2 x 6 mm mit G-Modul von 4 N/mm ²	221
14.3.1.5	2 x 6 mm mit G-Modul von 40 N/mm ²	222
14.3.1.6	2 x 8 mm mit G-Modul von 0,004 N/mm ²	223
14.3.1.7	2 x 8 mm mit G-Modul von 0,04 N/mm ²	224
14.3.1.8	2 x 8 mm mit G-Modul von 0,4 N/mm ²	225
14.3.1.9	2 x 8 mm mit G-Modul von 4 N/mm ²	226
14.3.1.10	2 x 8 mm mit G-Modul von 40 N/mm ²	227
14.4	Dokumentation der Eingabe in Teddy für das Referenzmodell:.....	228
14.5	Eingabe in Teddy für das Referenzmodell mit einer VSG-Scheibe:.....	245

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Verlangen nach maximaler Transparenz von Gebäudehüllen, um somit eine Fusion zwischen Innenraum und äußeren Umgebung zu schaffen, ist in der zeitgenössischen Architektur von großer Bedeutung. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, werden meist filigrane Konstruktionen aus Stahl und Glas eingesetzt, welche dem Begriff „Leichtbau“ zuzuordnen sind. Der Begriff Leichtbau impliziert den Drang nach optimaler Lastableitung und der geeigneten Kombination verschiedener Werkstoffe, mit dem Ziel, eine optimale Ausnutzung der jeweiligen Werkstoffeigenschaften zu erreichen. Charakteristisch dafür sind unter anderem die Stabgitterschalen mit eingesetztem Glas, wie beispielweise die Innenhofüberdachung des Museums für Hamburgische Geschichte illustriert (siehe Abb. 2).



Abb. 1 Innenhofüberdachung des Museums für Hamburgische Geschichte [1]

Stabgitterschalen bestehen aus gelenkig verbundenen Stahlprofilen, die zu einem Dreieck oder Viereck zusammengebaut werden, welche dann die Unterkonstruktion für die Glasscheiben bilden. Damit bei der Variante des Vierecks mit gelenkigen Knoten das System auch in Scheibenebene stabil ist, wird es mit Zugdiagonalen oder Seilaukreuzungen ausgesteift. Die Glasscheibe übernimmt hier lediglich die Funktion des Schutzes vor Witterungseinflüssen sowie die Ableitung der auftretenden Lasten aus Wind quer zur Scheibenebene. Aufgrund des großen Flächenanteils des Glases gegenüber des kleinen Flächenanteils der Stahlrahmenelemente und der besonderen Eigenschaft, dass Glas sehr hohe Druckspannungen übertragen kann (ca. das 10-fache der Zugspannungen), lässt sich die Lastabtragung durch die Nutzung der Glasscheibe als Aussteifungselement in Scheibenebene optimieren [2]. Da dadurch die Zugdiagonale bzw. Seilaukreuzungen entfallen würden, lässt sich eine

wesentlich wirtschaftlichere Variante erzielen (siehe Abb. 2). Dies hat nicht nur den Vorteil, dass eine ästhetischere Hüllkonstruktion entsteht, sondern folglich auch die Transparenz erhöht wird und somit eine maximale Lichtdurchflutung des Raumes geschaffen werden kann. Einige innovative Bauprojekte wie beispielweise die Ganzglaskonstruktionen zur Umhüllung des historischen Drucktanks des Leibnizer-Instituts für Festkörper und Werkstoffforschung in Dresden oder auch der Glaspavillon „Hans-Schmitz-Haus“ bedienen sich bereits der Möglichkeit Glasscheiben zur Gebäudeaussteifung einzusetzen. (siehe Abb. 3 und Abb. 4)

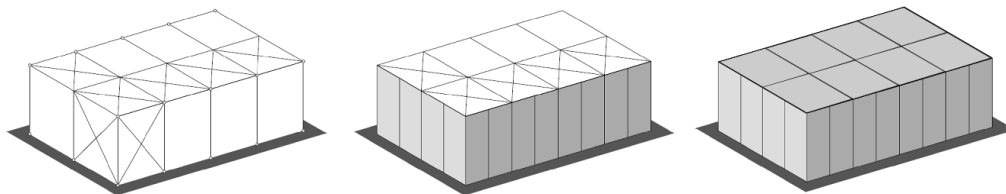


Abb. 2 Nutzung von Glas zur horizontalen Gebäudeaussteifung [3]



Abb. 3 Links: Ganzglashülle über den hist. Druckbehältern [4], Rechts: Glaspavillon am Broadfield House in Kingswinford [5]



Abb. 4 Glaspavillon „Hans-Schmitz-Haus“ [6]

Um das Ziel der Realisierung maximal transparenter Glasstahlkonstruktionen durch innovative Konstruktionen zu erreichen, wird am Institut für Hochbau der Technischen Universität Graz gezielt danach geforscht. Das durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unterstützte Forschungsprojekt „Glas Building Skins – Transparente selbsttragende Gebäudehüllen unter Einsatz der

hybriden Verbundtragwirkung von Glas-Stahl-Konstruktionen“ trägt dazu bei und stellt den Rahmen dieser Arbeit dar.

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung ist das von den am Forschungsprojekt beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Hochbau vorgeschlagene Modell numerisch abzubilden (siehe Abb. 5). Die Abmessungen des numerischen Referenzmodells wurden gemeinsam mit den Betreuern dieser Arbeit festgelegt. Das numerische Modell wird in späterer Folge anhand von Versuchen verifiziert, jedoch ist dies nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit. Augenmerk wird auf eine geeignete und ingenieurmäßige Abbildung der Tragstruktur mit vertretbarem Modellierungsaufwand gelegt. Hierzu soll ein Stahlrahmen mit geklotzter als auch geklebter monolithischer Glasscheibe unter einer horizontalen Belastung in Scheibenebene abgebildet werden. Ziel ist es, den Einfluss ausgewählter Parameter anhand einer Parameterstudie zu untersuchen und zu verifizieren. Genauer wird dazu in Kapitel 4 eingegangen. Als Programm wird das Finite Elemente Programm *Sofistik* [7] verwendet. Dieses bietet durch die eigens entwickelte Makrosprache im Programmmodul *Teddy* die Möglichkeit einer textbasierten Eingabe (CADINP-Eingabe). Dadurch können alle Abmessungen und Belastungen variabel gestaltet werden, wodurch eine deutlich schnellere Anpassung des Modells für die Berechnung der verschiedenen Parameter erzielt werden kann.

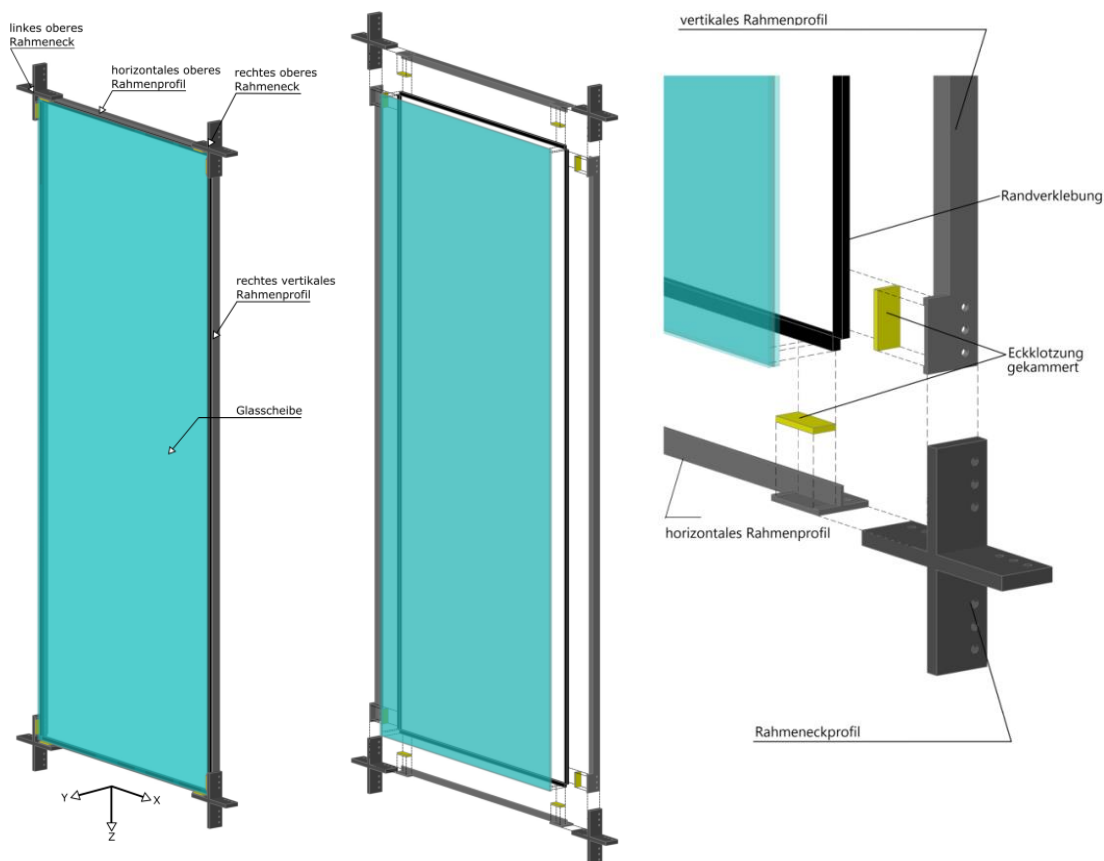


Abb. 5 Konstruktionsaufbau

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der verschiedenen Parameter auf das Tragverhalten des Systems zu erfassen und zu quantifizieren sowie eine Grundlage für weitere Entwicklungen in diesem Bereich bereitzustellen. Dazu werden der Stand der Technik sowie aktuelle Forschungsergebnisse zum Thema schubbeanspruchter Glasscheiben aufgezeigt. Anschließend wird mithilfe des FEM-Programms *Sofistik* das Tragverhalten der hybriden Glas-Stahl-Konstruktion anhand einer Parameterstudie untersucht. Darüber hinaus soll eine vereinfachte Berechnung zur Vordimensionierung der monolithischen Glasscheibe, für den Lastfall einer horizontalen Lasteinwirkung in Scheibenebene, erfolgen. Abschließend werden die Erkenntnisse aus den Ergebnissen in einem Resümee zusammengefasst und ein Ausblick über weiterführende Schritte gegeben.

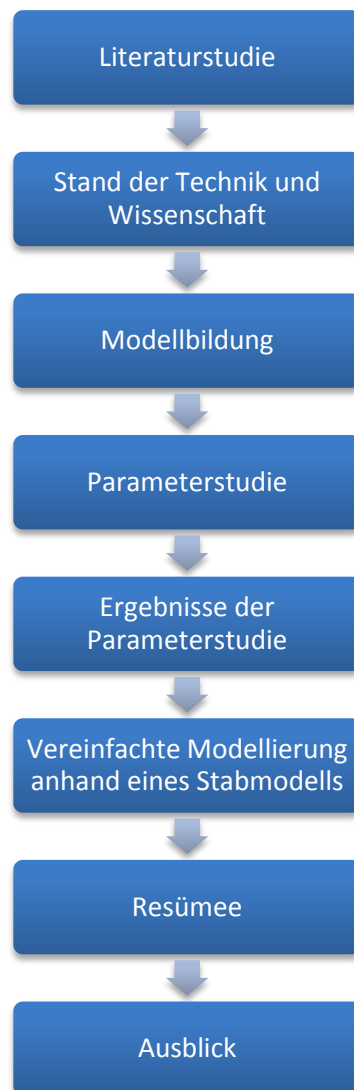


Abb. 6 Übersicht über die Aufgaben dieser Arbeit

2 Stand der Technik und Wissenschaft

2.1 Glas als Aussteifungselement

Aufgrund der hohen Druckfestigkeit des Materials wird eine überwiegende Druckbeanspruchung von Glas angestrebt. Die Unterteilung eines Tragwerks kann in Elemente, die primär für die Lastabtragung und Stabilität der Konstruktion verantwortlich sind (Primärtragwerk) und Elemente, welche nur eine untergeordnete Rolle zur Lastabtragung beitragen (Sekundärtragwerk) unterteilt werden. Derzeit wird Glas bei Hüllkonstruktionen vorwiegend nur als sekundäres Tragwerkselement verwendet. Wie in Kapitel 1.1 bereits erwähnt, werden dadurch Lasten primär quer zur Scheibenebene abgetragen, wodurch lediglich die Plattentragwirkung für die Lastabtragung aktiviert wird (siehe Abb. 7 (b)). Durch die Ausnutzung der schubaussteifenden Wirkung (siehe Abb. 7 (a) und Abb. 7 (c)) der Glaselemente trägt das Glas primär bei der Lastabtragung mit, wodurch die Stahlkonstruktion filigraner ausgeführt werden kann. Dadurch können sowohl Material als auch Kosten eingespart werden. Wobei bei Abb. 7 (c) noch anzumerken ist, dass die Beanspruchung von der Art der Lasteinleitung abhängig ist, da bei einer geklotzten Scheibe die vertikale Last über Druckbeanspruchung und bei einer geklebten über Schubtragwirkung abgetragen wird. Der Drang dieses noch ungenutzte Potenzial bestmöglich auszuschöpfen wird durch verschiedenste Forschungsvorhaben sowie einige bereits gebaute Projekte, wie die Innenhofüberdachung in Abb. 8 verdeutlicht. Die Lasteinleitung bzw. Lastausleitung erfolgt über Edelstahlschuhe, welche auf die gefasteten Glaskanten aufgesetzt und anschließend mit einem Vergussmörtel ausgefüllt wurden und somit die Aussteifungslasten in der Ebene über die Glasscheiben zum Auflager weiterleiten. Dieses bereits gebaute Beispiel wurde aufgrund der fehlenden Normen für die Bemessung von schubbeanspruchten Scheiben, durch Zustimmung im Einzelfall genehmigt [8].

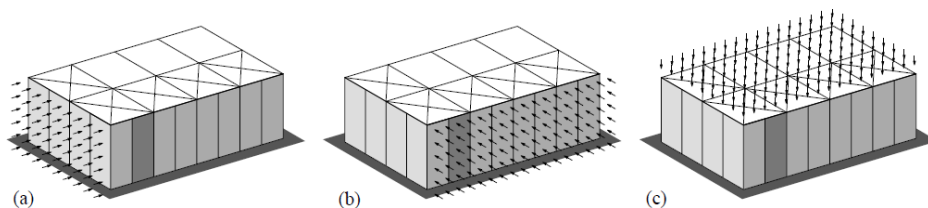


Abb. 7 (a) Schubtragwirkung infolge Querkraft, (b) Plattentragwirkung, (c) Schubtragwirkung bzw. Druckbeanspruchung infolge Normalkraft (vgl. [3])



Abb. 8 Innenhofüberdachung des Maximilian-Museums in Augsburg [9]

Einen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten und die Stabilität der Glasscheibe hat die Lasteinleitung vom Stahlrahmen über ein Zwischenmaterial in die Glasscheibe. Daher wird auf die für diese Arbeit wesentlichen Arten zur Lasteinleitung und den gängigsten Materialien eingegangen.

Lasteinleitungsmöglichkeiten:

- Klotzungen an den Ecken.
- Randverklebung von Glas und Stahlrahmen
- Kombination aus Eckklotzung und Randverklebung

2.2 Allgemeines zu Kunststoffen

Je nach Art der Vernetzung zwischen den Molekülketten werden die Kunststoffe entweder den Thermoplasten, Elastomeren oder den Duromeren zugeordnet (siehe Abb. 9). Die Art der Vernetzung bestimmt maßgeblich die Eigenschaften des Kunststoffes.

Kunststoffgruppen:

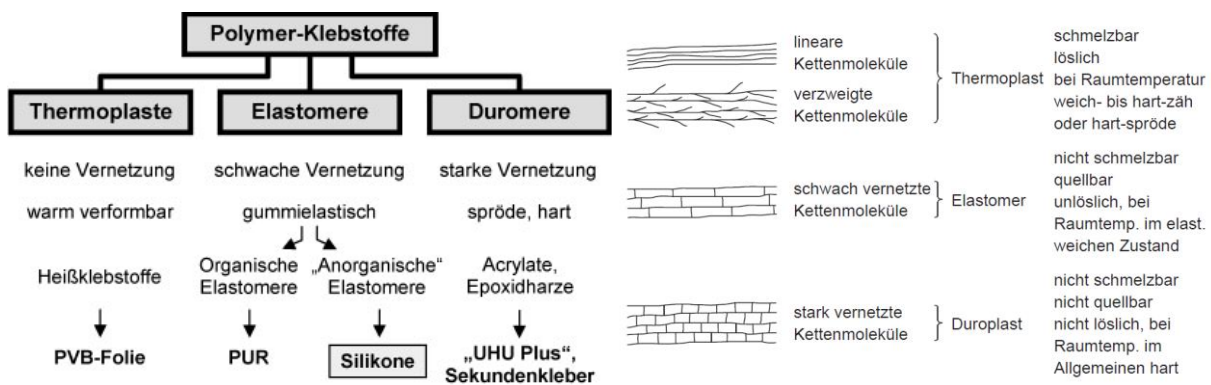


Abb. 9 Polymere Klebstoffe links [10] und Einteilung in die Molekülvernetzung rechts [11]

Thermoplaste:

Generell versteht man unter Thermoplaste Polymere die sich unter bestimmten Temperaturbereichen reversibel verformen lassen. Diese Verformung kann beliebig oft wiederholt werden, da keine Vernetzung der Molekülketten vorhanden ist [12].

Vorteile:

- Hohe Druckfestigkeit
- Beliebig oft erweichbar
- Mittlere Steifigkeit
- Temperaturstabil

Nachteile:

- Starke Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften (Zug- sowie Druckfestigkeit, Steifigkeit)
- Geringe bis mittlere Reißdehnung
- Kriechen, Relaxation

Elastomere:

Elastomere sind weitmaschig chemisch vernetzte Kunststoffe und zeichnen sich durch ihr gummielastisches Verhalten aus. Elastomere verhalten sich unter Zug- und Druckbelastung elastisch. Nach der Belastung nehmen diese wieder die ursprüngliche Form ein. Diese sind nicht thermisch verformbar und schmelzen im Gegensatz zu den Thermoplasten nicht. Sie sind der Kategorie der hochdehnfähigen Kunststoffe zuzuordnen [13].

Vorteile:

- Mittlere bis hohe Reißdehnung
- Nicht schmelzbar
- Nicht löslich
- Temperaturstabil

Nachteile:

- Kriechen, Relaxation
- Quellbar
- Geringe Steifigkeit

Duromere:

Duromere sind nach der Polyreaktion nicht mehr verformbar. Aufgrund der chemischen Bindung und Nebervalenzbindungen sowie durch die engmaschige Vernetzung der Molekülketten ist der Werkstoff glasartig, hart, nicht schmelzbar und weist eine hohe Steifigkeit auf. Durch das spröde Materialverhalten kann es bei einer bestimmten mechanischen Beanspruchung zu Rissen oder zu einem Sprödebruch kommen [13].

Vorteile:

- Hohe Druckfestigkeit
- Nicht quellbar, löslich
- Hohe Steifigkeit, Zugfestigkeit
- Hohe Reißdehnung
- Geringes bis kein Kriechen
- Wärmebeständig

Nachteile:

- Spröde, hart

2.3 Eckklotzung

Generell lassen sich zwei Arten von Klotzungen unterscheiden:

- Distanzklotze (Lagesicherung)
- Tragklotze (Lastabtragung)

In dieser Arbeit sind bei dem Begriff Klotzung ausschließlich Tragklotze gemeint.

Für die Aktivierung der schubaussteifenden Wirkung der Glasscheibe müssen teils beträchtliche Belastungen in die Glaskanten ein- bzw. ausgeleitet werden. Wesentlich für die Lasteinleitung über Klotzungen sind die Beschaffenheit der Glaskanten sowie die verwendeten Klotzungsmaterialien. Speziell bei Verbundsicherheitsgläsern ist auf die Beschaffenheit der Glaskanten zu achten, da es infolge der Produktion zu einem Kantenversatz kommen kann, welcher sich negativ auf die Lasteinleitung und somit auf die gesamte Tragfähigkeit der Scheibe auswirkt. Dieser kann entweder durch verschiedene Verpressmörtel oder mit der in Abb. 10 dargestellten Möglichkeit nach Wellershoff [2] ausgeglichen werden. Für die Versuchsdurchführung wurden hierfür Glasscheiben mit einem maximalen Kantenversatz von 2 mm verwendet. Anschließend wurden die Glaskanten gefast und mit einem entsprechenden Stahlschuh, welcher als Kontaktmaterial 2 mm dicke Aluminiumplättchen besitzt, belastet [2].

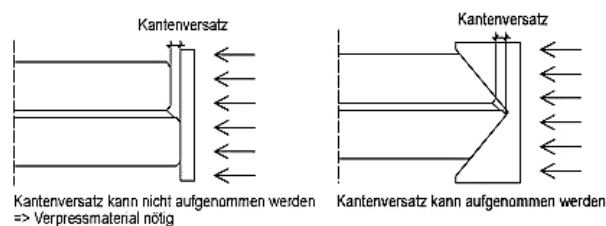


Abb. 10 Möglichkeiten zum Ausgleich des Kantenversatzes [2]

Anzumerken ist jedoch, dass eine höhere Tragfähigkeit durch das Verpressen mit Mörtel erzielt werden konnte und die gefasteten Glasscheiben eher für Verbindungen mit geringerer Beanspruchung geeignet sind (vgl. [2], S. 558). Ein wesentlicher Vorteil dieser neuartigen Einleitungsmöglichkeit stellt die geringe Montagezeit dar. Bei Einscheibensicherheitsgläsern stellt sich die Problematik des Kantenversatzes nicht, daher können meist anstelle des Vergussmörtels wesentlich steifere Klotzungsmaterialien verwendet werden, wodurch höhere Lasten in die Glaskanten eingeleitet werden können. Durch die hohe Drucklast sind besonders der Kriecheffekt sowie das Steifigkeitsverhalten des Materials bei Langzeitbelastungen interessant. Ein Überblick über die Eigenschaften der verwendeten Materialien im konstruktiven Glasbau werden im Kapitel 2.3.1 gegeben. Des Weiteren wirkt sich der Randabstand der Klotzung signifikant auf die Tragfähigkeit der Glasscheibe aus. Dieser sollte mindestens 20 mm betragen, wobei ein Abstand von 40 mm (vgl. [8], S.182) empfohlen wird. Ein bereits gebautes Beispiel für die Einleitung hoher Druckkräfte über eine Klotzungskonstruktion wird mit der Überdachung des Innenhofs des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin aufgezeigt (siehe Abb. 11). Hier erfolgt die Lastübertragung durch einen Kontaktklotz aus Kunststoff in die 19 mm starke ESG-Scheibe.

Der Glasaufbau beginnend von oben nach unten:

- 8 mm ESG
- 16 mm Scheibenzwischenraum
- 19 mm ESG
- 3,04 mm PVB-Folie
- 8 mm TVG

Die Lasten in Scheibenebene werden über die 19 mm starke ESG-Scheibe abgeleitet [8].

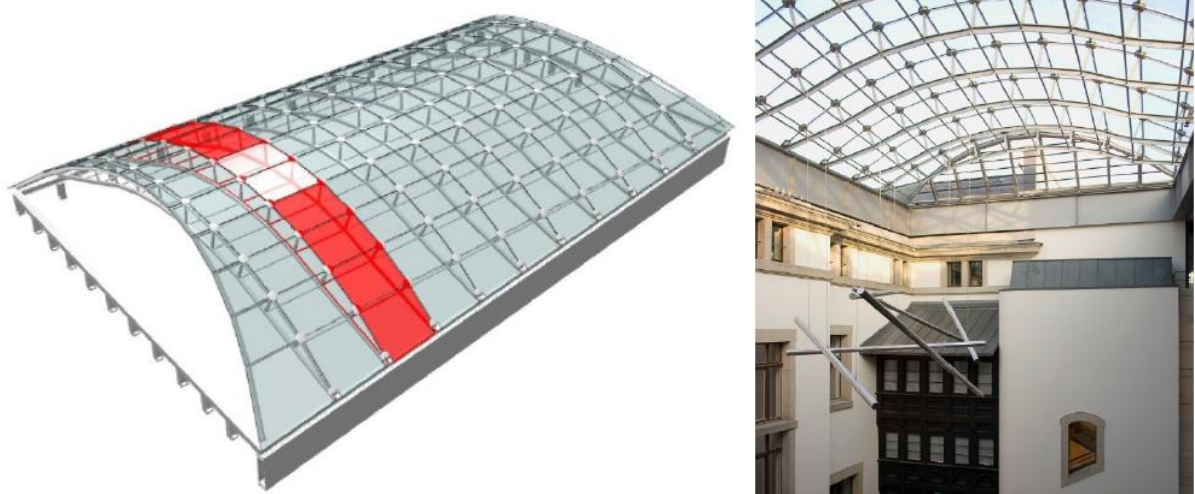


Abb. 11 Überdachung des Innenhofs des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais [8]

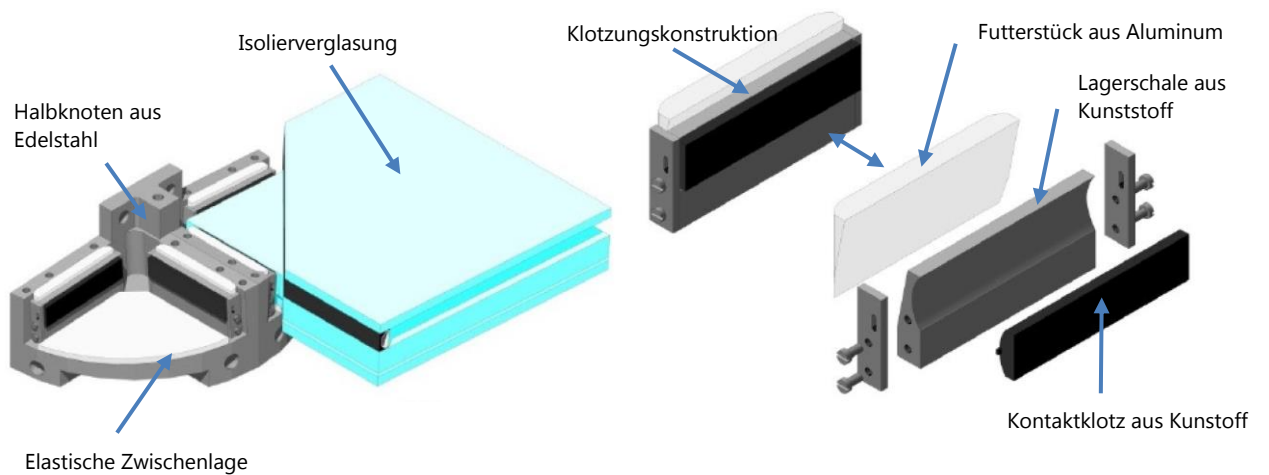


Abb. 12 Klotzungskonstruktion [8]

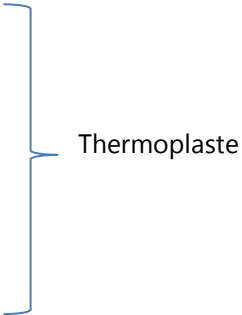
2.3.1 Eigenschaften ausgewählter Klotzungsmaterialien

2.3.1.1 Allgemeine Anforderungen

Allgemeine Anforderungen an Klotzungen nach [8] [14]:

- Hohe Druckfestigkeit und Steifigkeit
- Geringere Oberflächenhärte als Glas
- Materialverträglichkeit zu PVB-Folien sowie zum Randverbund von Isoliergläsern
- Temperaturbeständigkeit (meist zw. -20 °C bis +80 °C)
- Geringe Kriechverformung
- Geringe plastische Verformung
- Beständigkeit gegen UV-Strahlung, Chemikalien und Verwitterungseinflüssen, geringe Feuchtigkeitsaufnahmen

Folgende Materialien werden unter anderem für die Lasteinleitung an den Glaskanten im konstruktiven Glasbau verwendet [14] [8]:

- Polyamid (PA)
 - Polyetherimid (PEI)
 - Polyetheretherketon (PEEK)
 - Polyoxymethylen (POM)
 - Polypropylen (PP)
 - Polyethylen (PE)
 - Aluminium
 - Kunstharz-Mörtel
- 
- Thermoplaste

„Obwohl insbesondere für Glasmörtel ausreichend viele Erfahrungen vorliegen, sind für die Lasteinleitung im Knotenpunkt formstabile Klotzungsmaterialien sinnvoll. Diese sind prinzipiell billiger, erlauben eine nachträgliche Justierung und sind bei ihrer Montage einfacher einzubauen.“ ([15], S. 9)

Genauer werden die Kunststoffe Polyamid (PA), Polyetherimid (PEI), Polyoxymethylen (POM), Polyetheretherketon (PEEK) und deren Eignung als Klotzungsmaterial für schubbeanspruchte Scheiben beschrieben. Die dargestellten Werte sind als Richtwerte zu verstehen, um einen Vergleich zwischen den verschiedenen Materialien zu ermöglichen.

2.3.1.2 Polyamide (PA)

Die bekanntesten Polyamide sind PA 6 und PA 66. Die Zahlen geben hier die Anzahl der Kohlenstoffatome an, welche für die Herstellung benötigt werden. Ein Nachteil der Polyamide ist, dass die mechanischen Eigenschaften von PA stark vom Feuchtegehalt abhängig sind. Zudem ändert sich das Volumen mit änderndem Feuchtegehalt des Bauteils. Durch die Zugabe von Glasfaseranteilen kann die Zugfestigkeit und Steifigkeit erhöht werden (siehe Tab. 2) und die Wasseraufnahme reduziert werden [14] [8].

Eigenschaft	
Festigkeit und Steifigkeit:	Hoch
Einsatztemperaturbereich:	-30°C bis +85°C
Gleit- und Verschleißverhalten:	Gut
Wasseraufnahme:	Hoch
Nicht beständig durch Angriff von:	Heißem Wasser
Beständig gegen:	Hohe Beständigkeit gegen Lösemittel und Schmiermittel
UV-Beständigkeit:	Nicht beständig; Verbesserung durch Zugabe von UV-Stabilisatoren (z.B.: Rußpartikel)
Verarbeitbarkeit:	Leicht
Kosten:	Ca.6 €/kg

Tab. 1 Eigenschaften von PA [13]

Eigenschaft	Einheit	PA 6	PA 6 GF30%	PA 66	PA 66 GF35%
Rohdichte:	g/cm ³	1,13	1,37	1,14	1,37
Streckspannung:	N/mm ²	40	100	65	160
Reißdehnung:	%	200	-	150	5
E-Modul (Zug):	N/mm ²	1400	5000	2000	10000
Kugeldruckhärte:	N/mm ²	70	110	90	170
Max. Einsatztemperatur in Luft dauernd:	°C	80-100	100-130	80-120	100-130
Schmelztemperatur:	°C	220	220	255	255
Wärmeausdehnungskoeffizient:	10 ⁻⁶ /K	80	30	80	20
Wasseraufnahme bei Normalklima 23/50 (Sättigung)	%	2,5 - 3,5	1,6 – 2,2	2,5 – 3,1	1,5 – 1,9

Tab. 2 Mechanische Eigenschaften von PA [13]

2.3.1.3 Polyoxymethylen (POM)

POM-Homopolymerisat (POM-H) besteht ausschließlich aus Formaldehyd. Bei POM-Copolymer (POM-C) hingegen handelt es sich um ein Gemisch aus Formaldehyd und ca. 2% - bis 4% Ringether Monomeren. Durch die Zugabe von Zusatzstoffen (z.B.: Glasfasern) können die mechanischen Eigenschaften von POM und POM-C deutlich verbessert werden (siehe Tab. 4).

Eigenschaft	
Festigkeit und Steifigkeit:	Hoch
Einsatztemperaturbereich:	-50°C bis +100°C
Gleit- und Verschleißverhalten:	Gut
Wasseraufnahme:	Gering
Nicht beständig durch Angriff von:	Heißem Wasser
Beständigkeit:	<ul style="list-style-type: none"> • Bildung von Spannungsrissen • Hohe Lösungsmittelbeständigkeit • Hohe Formbeständigkeit bei Wärmezufuhr
UV-Beständigkeit:	Nicht beständig; Kann durch Zugabe von UV-Stabilisatoren (z.B.: Rußpartikel) verbessert werden.
Kosten:	Ca. 5 €/kg

Tab. 3 Eigenschaften von POM [13]

Eigenschaft	Einheit	POM bzw. POM-H	POM-C	POM-C GF 30%
Rohdichte:	g/cm ³	1,42	1,41	1,6
Streckspannung:	N/mm ²	67 bis 72	65 bis 70	140
Reißdehnung:	%	25 bis 70	25 bis 70	3
E-Modul (Zug):	N/mm ²	3200	2800	10000
Kugeldruckhärte:	N/mm ²	160	145	180
Max. Einsatztemperatur in Luft dauernd:	°C	90 bis 110	90 bis 110	90 bis 110
Schmelztemperatur:	°C	175	164 bis 167	164 bis 167
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient:	10 ⁻⁶ /K	90	110	40
Wasseraufnahme bei Normalklima 23/50 (Sättigung)	%	0,22 bis 0,25		

Tab. 4 Mechanische Eigenschaften von POM und POM-C [13] [14]

2.3.1.4 Polyetherimide (PEI)

Polyetherimide, auch unter dem Handelsnamen Ultem bekannt, gehören zu der Gruppe der Polyimide und werden durch die Einlagerung von Ethergruppen flexibler.

Eigenschaft	
Festigkeit und Steifigkeit:	Sehr hohe Festigkeit, hohe Steifigkeit und Härte
Einsatztemperaturbereich:	-50°C bis +170°C
Gleit- und Verschleißverhalten:	Gut
Wasseraufnahme:	Gering
Nicht beständig durch Angriff von:	Heißem Wasser
Beständigkeit:	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Flammwidrigkeit und geringe Rauchentwicklung • Hohe Witterungsbeständigkeit • Hohe Formbeständigkeit bei Wärmezufuhr (>200°C)
UV-Beständigkeit:	Sehr gut
Kosten:	Ca. 17 €/kg

Tab. 5 *Eigenschaften von PEI [8] [13]*

Eigenschaft	Einheit	PEI (Ultem 100)	PEI GF 30 (Ultem 2300)
Rohdichte:	g/cm ³	1,28	1,51
Streckspannung:	N/mm ²	105	160
Reißdehnung:	%	60	3
E-Modul (Zug):	N/mm ²	3000	9000
E-Modul (Druck)	N/mm ²	2900	3800
Kugeldruckhärte:	N/mm ²	140 [16]	165 [16]
Max. Einsatztemperatur in Luft dauernd:	°C	170	170
Schmelztemperatur:	°C	219	228
Wärmeausdehnungskoeffizient:	10 ⁻⁶ /K	50	Bei gerichteten Stahlfasern: 20 (längs), 60 (quer)
Wasseraufnahme bei Normalklima 23/50 (Sättigung)	%	0,7 [16]	0,5 [16]

Tab. 6 *Mechanische Eigenschaften von PEI [8]*

2.3.1.5 Polyetheretherketone (PEEK)

Polyetheretherketon ist ein Hochleistungskunststoff, welcher vor allem für seine sehr hohe Zugfestigkeit und der extrem hohen Einsatztemperatur bekannt ist. Jedoch wird dieser aufgrund des hohen Preises nur für den Einsatz in extremen Umgebungsbedingungen angewendet (z.B. Luft- und Raumfahrt).

Eigenschaft	
Festigkeit und Steifigkeit:	Hoch, hohe Wechselfestigkeit
Einsatztemperaturbereich:	-60°C bis +260°C
Gleit- und Verschleißverhalten:	Gut
Wasseraufnahme:	Gering
Nicht beständig durch Angriff von:	Heißem Wasser
Beständigkeit:	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Chemikalien- und Strahlenbeständigkeit • Schwer entflammbar • Hohe Witterungsbeständigkeit • Hohe Formbeständigkeit bei Wärmezufuhr (>200°C)
UV-Beständigkeit:	Nicht beständig, nur durch Modifizierung möglich
Kosten:	Ca. 150 €/kg

Tab. 7 Eigenschaften von PEEK [8] [13]

Eigenschaft	Einheit	PEEK	PEEK - GF 30
Rohdichte:	g/cm ³	1,32	1,49
Streckspannung:	N/mm ²	97	156
Reißdehnung:	%	>50	2
E-Modul (Zug):	N/mm ²	3600	9700
Kugeldruckhärte:	N/mm ²	-	-
Max. Einsatztemperatur in Luft dauernd:	°C	240	240
Schmelztemperatur:	°C	340	340
Wärmeausdehnungskoeffizient:	10 ⁻⁶ /K	47 [16]	4-38 [16]
Wasseraufnahme bei Normalklima 23/50 (Sättigung)	%	0,5	0,11

Tab. 8 Mechanische Eigenschaften von PEEK [8]

2.3.2 Eignung des Klotzungsmaterials für schubbeanspruchte Scheiben

Als besonders geeignet stellt sich der Kunststoff PEI heraus, da dieser eine sehr hohe Kurz- sowie Langzeit-Druckfestigkeit, eine niedrige Kriechneigung und eine geringe Temperaturabhängigkeit aufweist. Zudem kommt ein linear-elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten, wodurch die Bemessung deutlich vereinfacht wird. Der Kunststoff PEEK weist ähnlich gute Eigenschaften auf, wird jedoch auf Grund des sehr hohen Preises eher wenig Verwendung im konstruktiven Glasbau finden. POM-C als auch PA6 und PA66 weisen eine hohe Kriechneigung auf, weshalb sich diese eher bedingt für den Einsatz als Klotzungsmaterial eignen. Bei glasfaserverstärkten Kunststoffen ist die Faserorientierung für die Bemessung zu berücksichtigen (richtungsabhängige Steifigkeit). Auch die mögliche Temperaturänderung, welche einen Einfluss auf das Steifigkeitsverhalten hat, muss bei der Bemessung berücksichtigt werden. Deutlichen Einfluss auf das Verformungsverhalten von Klotzungsmaterialien haben die Querdehnzahl sowie der Reibungskoeffizient zwischen Klotzung und Glas. Generell sollte die Reibung zwischen den Kontaktmaterialien und der Glaskante gering gehalten werden, da sonst aufgrund der Querdehnung große Querkzugkräfte entstehen. Bei Druckspannungen über 30 N/mm² werden die Kriechverformungen bemessungsrelevant (vgl. [8] S. 228 ff.).

Material	Eingangswertung ¹⁴⁷									Preis [€/kg]	Endwertung
		Zugfestigkeit	E-Modul (Zug)	Druckfestigkeit (kurz)	E-Modul (Druck)	Kriechverhalten	Temperaturabhängigkeit	Einsatztemperaturbereich	Glasübergangstemperatur		
POM-C	o	+	+	+	+	o	+	+	+	5,50	o
POM-C GF25	++	++	+++	o	++	++	+	+	+	15,80	+
PET	+	++	+	++	+	+++	++	o	o	7,70	+
PEEK	+	+++	++			+++	+++	+++	++	150,40	++
PEEK GF30	++	++	+++	+	+++	+++	+++	+++	++	188,00	++
PEI	+	+++	+	+++	+	+++	+++	+++	+++	17,60	+++
PA6	+	o	o	+	o	-	o	o	-	6,30	-
PA6 GF30	++	+	+	++	++	-	o	+	o	14,30	-
PA66	+	+	o	+	+	-	o	o	-	8,70	-
PA66 GF30	+++	++	+	+	+	-	o	+	o	15,20	-

Legende: - ungeeignet + geeignet +++ sehr gut geeignet.
o bedingt geeignet ++ gut geeignet

Tab. 9 Eignung als Klotzungsmaterial [8]

2.4 Randlebung

Das Verkleben von Glasscheiben ist schon länger aus der Automobilindustrie bekannt. Durch das Verkleben der Fensterscheiben mit der Karosserie wird eine wesentlich steifere Konstruktion, vor allem durch die erhöhte Torsionssteifigkeit, erreicht. Mittlerweile hat das Verkleben von Glasscheiben und Unterkonstruktion auch im konstruktiven Glasbau Fuß gefasst. Das Structural Sealant Glazing (SSG) wird im Fassadenbau bereits seit geraumer Zeit angewendet. Zusätzlich zur Verklebung muss die Konstruktion jedoch mechanisch gesichert werden. Zudem muss das Eigengewicht über Klotzungen abgetragen werden [17]. Geregelt wird das SSG durch eine Zulassung nach der Richtlinie ETAG 002 [18]. Dabei wird ein Silikon-Elastomer mit linienförmiger Klebefuge und rechteckigem Klebstoffquerschnitt als Verklebungsmaterial vorausgesetzt [10]. Durch das SSG können schlankere und transparentere Konstruktionen gebaut werden. Die Verklebung trägt jedoch primär in Plattenrichtung ab (Windlasten) und wird nicht für den Lastabtrag in Scheibenebene herangezogen. Die Nutzung der Verklebung zum Lastabtrag in Scheibenebene bringt viele Vorteile mit sich. Einer der bedeutenden Vorteile von randverklebten Glasscheiben gegenüber zu geklotzten Glasscheiben ist, dass durch die Verklebung eine kontinuierliche Lasteinleitung erfolgt und somit Spannungsspitzen, wie sie in den Bereichen der Lasteinleitung bei eckgeklotzten Scheiben entstehen, vermieden werden können. Ein bereits gebautes Beispiel bei dem eingeklebte Verglasungen zur Aussteifung herangezogen worden sind, ist der Retail Store Highland Village (siehe Abb. 13). Lediglich durch die Verklebung der Scheiben mit dem Stahlrahmen konnten die horizontalen Verformungen gewährleistet werden [19].

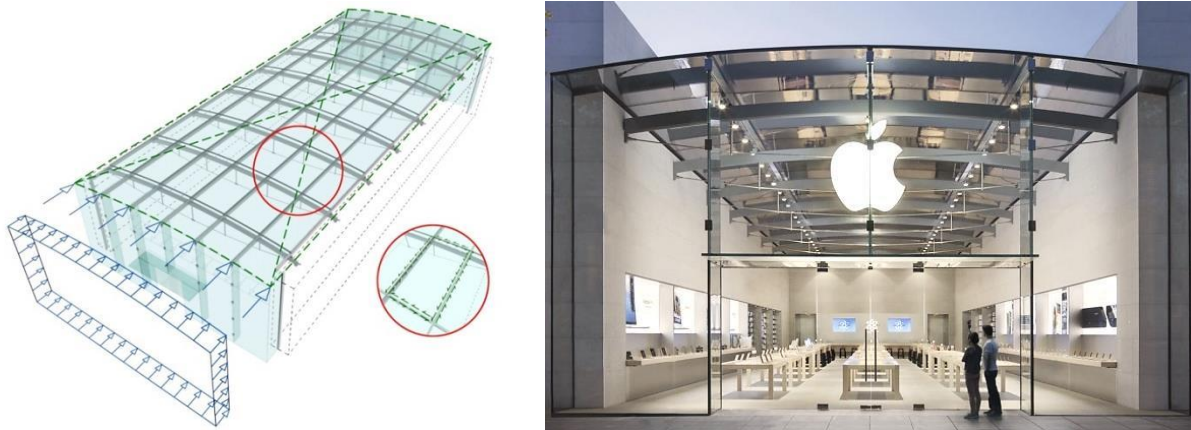


Abb. 13 Retail Store Highland Village [19] [20]

2.4.1 Eigenschaften ausgewählter Klebstoffe

2.4.1.1 Allgemeine Anforderungen

Allgemeine Anforderungen an Klebstoffe [21]:

- Ausreichende Festigkeit, Steifigkeit und Elastizität
- Dauerhaftigkeit
- Geeignetes elastisches Verhalten bei linienförmiger oder flächiger Verbindung von Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten
- Materialverträglichkeit angrenzender Materialien
- Niedrige Kriechneigung
- Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse
- Hinreichend gute Alterungseigenschaften
- Gebrauchstemperaturbereich von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$
- Transparenz des Klebstoffes für bestimmte Anwendungen

Versagensformen von Klebstoffen [21]:

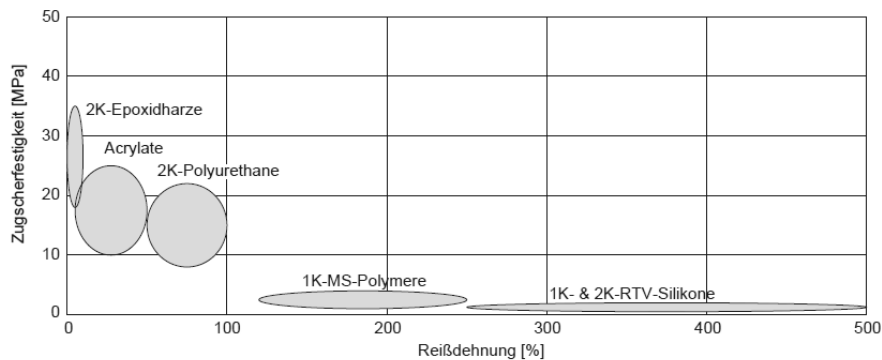
- Kohäsiver-Bruch (Klebstoff selbst versagt)
- Adhäsiver-Bruch (Versagen der Haftung zwischen Fügepart und Klebstoff)
- Mischbruch aus kohäsivem und adhäsivem Versagen
- Substratbruch (Versagen des Bauteils)

Der Adhäsive Bruch sollte vermieden werden, da dieser ohne Ankündigung zu einem plötzlichen Versagen führt. Deshalb sollte bei der Auswahl des geeigneten Klebstoffes, ein Kleber mit der Neigung zu adhäsiven Brüchen ausgeschlossen werden.

Verbindungstyp [21]:

- Punktförmige Klebeverbindung (Punkthalter)
- Linienförmige Klebeverbindung (z.B.: bei SSG-Systemen)
- Flächige Verbindung (geklebte Rahmenecken)

In den folgenden Kapiteln werden Silikone, Epoxidharze, Polyurethane und Acrylate näher beschrieben und es wird auf ihre Eignung für schubbeanspruchte Scheiben eingegangen. Einleitend soll dazu das Verhältnis zwischen Zugscherfestigkeit und Reißdehnung von den gängigsten Klebstoffen aufgezeigt werden (siehe Tab. 10).



Tab. 10 Mechanische Eigenschaften von im Glasbau eingesetzter Klebstoffe [12]

2.4.1.2 Silikone (SI)

Silikone gehören zu der Gruppe der Elastomere und weisen nur geringe Festigkeiten, dafür extrem hohe Bruchdehnungen, auf (siehe Tab. 10). Diese sind sehr beständig gegen Witterungseinflüsse, sowie UV-Strahlung und haben gute Haftungseigenschaften. Ein wesentlicher Vorteil von Silikonklebstoffen ist die einfache Ausführung der Klebefugen, welche sich in der Praxis über die Jahre bereits bewährt hat [17]. Die lange Aushärtungszeit (21 Tage bis zur vollen Einsatzfähigkeit) und die lichtundurchlässige Eigenschaft [17] werden zu den Nachteilen gezählt. Als einziger der angeführten Klebstoffarten wird die Anwendung von Silikon-Elastomeren in der Europäischen Technischen Richtlinie (ETAG 002) [18] geregelt. Um Herstellungstoleranzen und die unterschiedlichen Temperaturendehnungen der zu verbindenden Materialien aufnehmen zu können sind Klebefugenquerschnitte im Verhältnis zwischen 1:1 und 1:3, eine Mindestklebstoffdicke von 6 mm und eine Klebefugenbreite von 6 bis 20 mm einzuhalten. Des Weiteren sind nur rechteckige Scheiben mit allseitiger linienförmiger Verklebung geregelt. Eine Bemessungsmöglichkeit für beliebige Geometrien und Anordnungen von Silikonklebefugen wurde in [22] erarbeitet. Die Firma Sika bietet unter anderem verschiedenste Silikone für strukturelles Kleben an. In [23] wurde der Silikonklebstoff Sikasil® SG-550 verwendet. Dieser besitzt eine deutlich höhere mechanische Festigkeit als gewöhnliche SSG-Klebstoffe, hat jedoch den Nachteil, dass dieser schlecht zu verarbeiten ist. Dadurch können bei gleicher Fugendicke jedoch deutlich höhere Lasten übertragen werden.

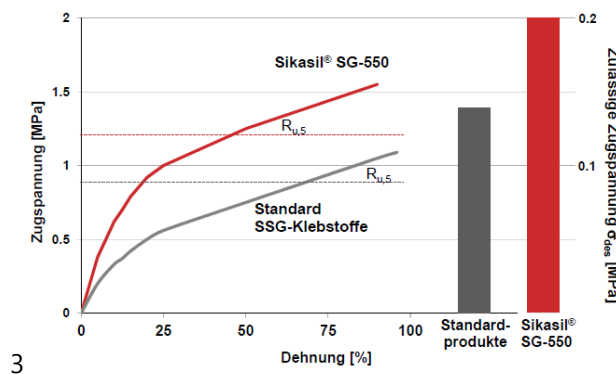


Abb. 14 Vergleich: Sikasil® SG550 mit gewöhnlichen SSG-Klebstoffen

2.4.1.3 Epoxidharzklebstoffe (EP)

Im konstruktiven Glasbau werden hauptsächlich Zwei-Komponenten-Epoxidharzkleber verwendet. Der Grund dafür ist, dass die Reaktion bereits bei Raumtemperatur abläuft und keine hohen Temperaturen zur Aushärtung erforderlich sind. Epoxidharzklebstoffe weisen eine hohe Festigkeit auf, besitzen jedoch eine sehr geringe Bruchdehnung (Tab. 10). Diese werden aufgrund ihrer Materialeigenschaften den Duroplasten zugeordnet.

2.4.1.4 Polyurethane (PU)

Auch bei den Polyurethanklebstoffen wird hauptsächlich auf die Zwei-Komponenten-Polyurethanklebstoffe zurückgegriffen. Je nach verwendeten Ausgangsstoffen können die Eigenschaften (z.B.: Festigkeit, Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse) von Polyurethanen deutlich beeinflusst werden. Abhängig von der Modifikation der Eigenschaften infolge unterschiedlicher Zusätze bei der Herstellung, können PU-Klebstoffe entweder den Duroplasten oder den Elastomeren zugeordnet werden. Die Zugscherfestigkeit liegt dabei im Bereich der Acrylate mit einer deutlich höheren Bruchdehnung.

2.4.1.5 Acrylate (A)

Acrylate werden den Thermoplasten zugeordnet und weisen eine hohe Festigkeit auf, erreichen dabei jedoch nur eine geringe Bruchdehnung. Gegenüber Silikon sind die meisten Acrylate transparent und somit speziell für Ganzglaskonstruktionen interessant. Die Erhärtung erfolgt bei 1-komponentigen Acrylaten unter Strahlungseinfluss (z.B.: UV-Strahlung). Diese sollte senkrecht zur Klebefläche erfolgen, um eine unvollständige Aushärtung des Klebstoffes zu verhindern. Gegenüber Silikon weist Acrylat eine wesentlich geringere Erhärtungszeit auf [24]. Des Weiteren kommt es zu keiner Verfärbung des Klebstoffs bei UV- und lichthärtenden Acrylaten [25]. Untersuchungen in [26] haben gezeigt, dass in einem Temperaturbereich von -25°C bis 75°C ein E-Modul von 1400 bis 40 MPa und Poissonzahlen von 0,30 bis 0,44 erreicht werden können.

2.4.2 Eignung des Klebstoffs für schubbeanspruchte Scheiben

Silikonklebstoffe weisen eine geringe Steifigkeit und eine hohe Kriechneigung auf und eignen sich somit nur bedingt für die ständige Lastabtragung. Generell konnte eine deutliche Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften im Gebrauchstemperaturbereich von -20°C bis +80°C bei der Untersuchung von Acrylat-, Polyurethan- sowie Epoxidharzklebstoffe durch ([27], S.225) festgestellt werden. Ein sprunghafter Übergang der Eigenschaftsveränderung konnte bei Epoxidharz- sowie Polyurethanklebstoffen festgestellt werden. Die Eigenschaften von Acrylatklebstoffen ändern sich annähernd gleichbleibend und erreichen trotz hoher Temperaturen sehr hohe Festigkeitswerte. Das Steifigkeitsverhalten von Polyurethanklebstoffen ist ähnlich dem der

Epoxidharzklebstoffe, wie man bei tiefen Temperaturbedingungen (unter -25°C) anhand der ähnlichen Steifigkeit erkennen kann. Jedoch nimmt die Steifigkeit bei gleichbleibender Last unter Raumtemperatur wesentlich ab, wodurch es zu einer deutlichen Verformung kommen kann (vgl. [27], S.107-109). Acrylatklebstoffe (5 bis 10%) weisen gegenüber Epoxidharzen (4 bis 5%) und Polyurethanen (3 bis 5%) bei der Aushärtung ein relativ starkes Schwindverhalten auf. Dies sollte bei der Detailausbildung berücksichtigt werden. Bei Acrylat-Klebefugen mit größeren Abmessungen wird eine stufenweise Aushärtung empfohlen, wodurch die inneren Spannungen reduziert werden können [17] [27].

In Tab. 11 wird eine Übersicht über die Eigenschaften ausgewählter Klebstoffarten gegeben. Jedoch soll dies nur eine grobe Richtlinie darstellen, da durch verschiedene Zusätze bei der Herstellung die Eigenschaften wesentlich verändert werden können. Besonders Polyurethan lässt sich stark modifizieren [28].

	Zug- und Schubfestigkeit	Steifigkeit	Verformungsverhalten	Viskosität	Temperaturwiderstand	Alterungsverhalten	UV-Beständigkeit	Transparenz, Farbe
Epoxidharz	+++	+++	+	+++	++	++	++	+
Polyurethan	++	+++	++	++	++	++	++	++
Acrylat	++	++	++	++	++	+++	+++	+++
Silikon	+	+	+++	+	+++	+++	+++	+

Legende: + gut, ++ sehr gut, +++ ausgezeichnet

Tab. 11 Übersicht der Klebstoffeigenschaften nach [28]

2.4.3 Besonderheiten bei der Bemessung von Klebefugen:

Der Schubspannungsverlauf in der Klebefuge wird wesentlich vom Verformungsverhalten des Klebstoffes beeinflusst. Hohe Spannungsspitzen sind bei elastischen (verformungsarmen) Klebstoffen infolge Scherbeanspruchung zu erwarten. Wohingegen es bei Klebstoffen mit viskoelastischen Verformungsverhalten zu einer geringeren Schubbeanspruchung an den Klebefugenenden kommt. Das obere Bild in Abb. 15 zeigt das Verformungsverhalten eines verformungsarmen Klebstoffes und das untere Bild das Verformungsverhalten eines plastischen Klebstoffes. Obwohl es zu einer größeren Verschiebung beim plastischen Klebstoff kommt, ist die maximale Schubspannung aufgrund der Plastifizierung geringer [17].

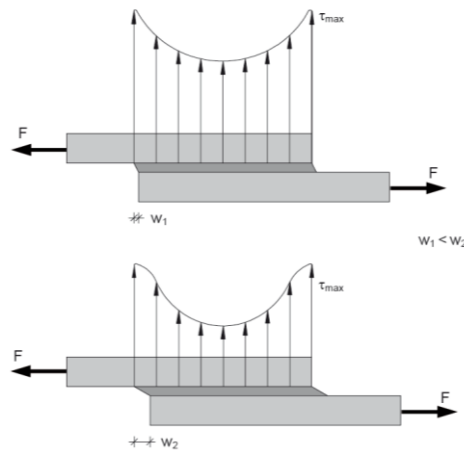


Abb. 15 Verformungsvermögen unterschiedlich steifer Klebstoffe [17]

Zur Berücksichtigung des Verformungsverhaltens des Klebstoffes sind jedoch komplexe Werkstoffmodelle notwendig, welche auf den jeweils verwendeten Klebstoff abgestimmt werden müssen. Daher werden meist in der Praxis linear-elastische Werkstoffmodelle zur Bemessung herangezogen. Diese liegen in den meisten Fällen auf der konservativen Seite und sind für eine Vordimensionierung der Klebstoffdicke ausreichend.

2.4.3.1 Bemessung der Randverklebung unter Schubbeanspruchung

Die Dimensionierung für randverklebte Scheiben kann mit Formel (1) für Silikonklebstoffe, welche in der ETAG 002-1 [18] geregelt sind, erfolgen. Grundlage für die Anwendung der Formel (1) ist, dass ein umlaufender rechteckiger Klebefugenquerschnitt vorliegt und eine homogene Spannungsverteilung in der Klebefuge angenommen wird. Zudem wird die Steifigkeit der Unterkonstruktion nicht berücksichtigt [18] [21].

$$\sigma_{des} \text{ bzw. } \tau_{des} = \frac{\Sigma \text{Einwirkungen}}{\Sigma A} \leq \frac{R_{u,5}}{\gamma} \tag{1}$$

mit:

σ_{des} = Bemessungswert der Zugspannung

τ_{des} = Bemessungswert der Schubspannung

A = Klebstofffläche

$R_{u,5}$ = charakteristische Festigkeit aus Versuchen (bei 75 % Aussagewahrscheinlichkeit und 5 % Fraktile)

γ = 6 (Globaler Sicherheitsbeiwert berücksichtigt: Alterung, Witterungseinflüsse etc.)

Die Verklebungsdicke soll mindestens 6 mm betragen und folgende Grenzwerte einhalten:

$$e \leq h_c \leq 3e \tag{2}$$

mit:

e = Verklebungsdicke

h_c = Verklebungsbreite

Eine andere Bemessungsvariante gibt Wellershoff in [29] an:

$$\frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} = \frac{\tau_{Ek} * \gamma_F}{\frac{\tau_{Rk} * f_{T,t}}{\gamma_M}} \leq 1 \quad (3)$$

mit:

τ_{Ek} = charakteristische Wert der Schubspannung

τ_{Rk} = charakteristische Wert der Kurzzeitschubfestigkeit

$f_{T,t}$ = Reduktionsfaktor der Schubfestigkeit des Klebstoffs infolge der Belastungszeit und der Klebstofftemperatur ()

γ_F = Teilsicherheitsfaktor der Belastung

γ_M = Teilsicherheitsfaktor der Beanspruchbarkeit

Der Reduktionsfaktor der Schubfestigkeit ist jedoch durch aufwendige Versuche zu bestimmen, da noch keine ausreichenden Literaturangaben zum Verhalten der jeweiligen Klebstoffe vorliegen.

2.5 Beultragverhalten

Aufgrund der hohen Druckfestigkeit eignet sich Glas besonders für die Abtragung hoher Drucklasten. Da Tragstrukturen aus Glas meist sehr filigran ausgeführt werden, wird das Stabilitätsversagen oft bemessungsrelevant. Besonders aus dem Stahlbau ist das Stabilitätsverhalten von scheibenartigen Bauteilen bekannt und wird meist unter dem Begriff Plattenbeulen behandelt. Charakteristisch für das Plattenbeulen ist, dass eine ebene Mittelebene des Systems vorliegt. Ist die Mittelebene des Systems gekrümmt, spricht man hingegen vom Schalenbeulen (siehe Abb. 16).

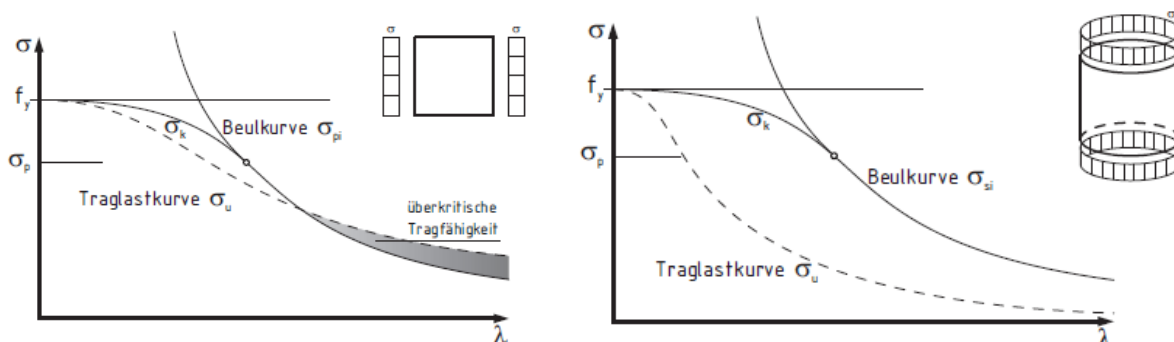


Abb. 16 Plattenbeulen (links), Schalenbeulen (rechts) [30]

Welche Beulform sich einstellt, ist vor allem von der Lagerung, der Belastungsart, das Verhältnis von Länge zu Breite, der Steifigkeit der Platte sowie von der Größe der materiellen und geometrischen Imperfektion abhängig. In Abb. 17 werden die unterschiedlichen Belastungsmöglichkeiten mit den zugehörigen Beulformen der Glasscheibe schematisch dargestellt.

Da es für den konstruktiven Glasbau nur für wenige Fälle Bemessungsregeln für die Stabilität von tragenden Glasscheiben mit einer Beanspruchung in Scheibenrichtung gibt, werden oft für erste Abschätzungen die Bemessungsgleichungen aus dem Stahlbau herangezogen, jedoch ist dies mit Vorsicht zu genießen, da sich doch die Materialeigenschaften deutlich unterscheiden. Zu unterscheiden ist auch, ob es sich um ein lokales Beulproblem (einzelnes Tragelement z.B.: Steg) oder um ein globales Beulproblem (gesamte Tragstruktur) handelt. (vgl. [31], [32]).

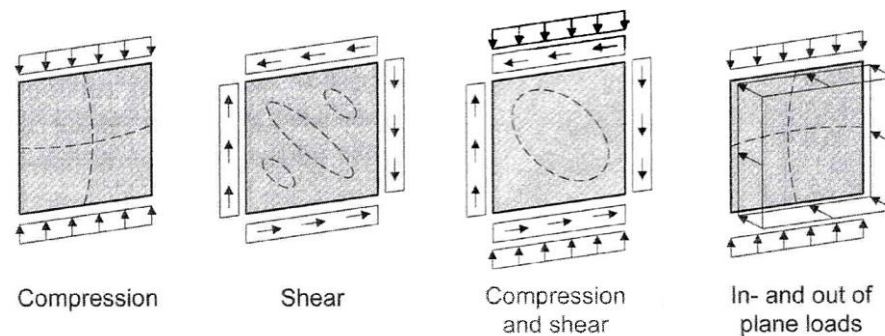


Abb. 17 Beulformen in Abhängigkeit der Belastung [21]

Scheiben können aufgrund der doppelt gekrümmten Beulform, Beanspruchungen über der kritischen Beullast aufnehmen. Die kritische Beullast ist jene Last, bei der das perfekte System ausweicht und auf Stabilität versagen würde. Jedoch kann aufgrund des überkritischen Tragverhaltens, nach Erreichen der kritischen Beullast, erneut ein stabiler Gleichgewichtszustand gefunden werden, wodurch das Verzweigungsproblem in ein Spannungsproblem übergeht. Möglich ist dies durch die doppelt gekrümmte Beulform, wodurch sich ein Membranspannungszustand einstellt und Spannungen an die steiferen Ränder umgelagert werden. Dadurch nimmt die Beanspruchung der Plattenmitte ab und die der Ränder zu. Das überkritische Tragverhalten kann bei knickstabähnlichem Verhalten jedoch nicht ausgenutzt werden. Knickstabähnliches Verhalten tritt bei Platten ohne Lagerung der Längsränder mit Beanspruchung in Längsrichtung¹ auf (siehe Abb. 18). Ebenfalls kann das überkritische Tragverhalten bei einer Scheibenlänge, welche deutlich größer als die Scheibenbreite ist, und die Belastungsrichtung quer zur Längsrichtung wirkt, nicht ausgenutzt werden. Die Nutzung des überkritischen Beultragverhaltens wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen, da dadurch wirtschaftlichere und transparentere Lösungen erarbeitet werden können. Jedoch sind für die Nutzung des überkritischen Tragverhaltens großen Verformungen des Systems erforderlich, daher muss einerseits darauf geachtet werden, dass dies notwendigen Verformungen von den Verbindungen aufgenommen werden können und andererseits der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit eingehalten werden kann. Es wurden bereits einige Untersuchungen zur Stabilität von Glasscheiben von [33], [31], [34] gemacht.

¹ Als Längsrichtung wird hier die größere Abmessung der Scheibe bezeichnet.

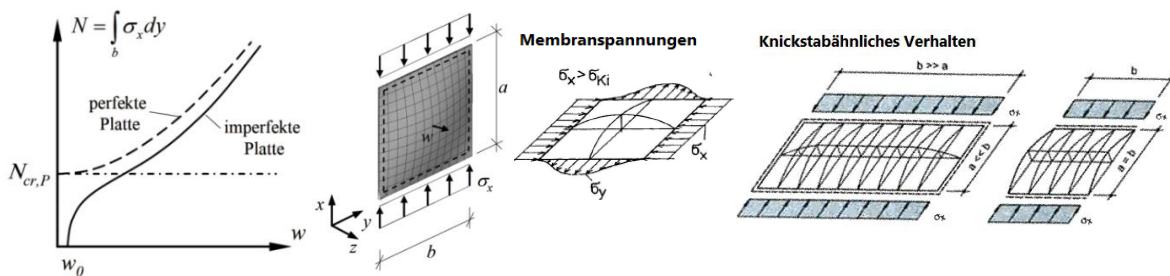


Abb. 18 Überkritisches Tragverhalten links und knickstabähnliches Verhalten rechts ([31], [33])

Die kritische Beulspannung kann analytisch für eine allseitig gelenkig gelagerte Platte unter Längsdruck mit Formel (4) ermittelt werden (vgl. [32]):

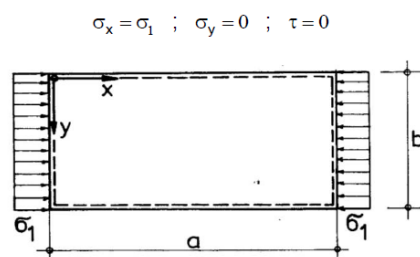


Abb. 19 Allseitig gelenkige Platte unter Längsdruck [32]

$$\sigma_{kr} = \underbrace{\frac{E * \pi^2}{12(1 - \mu^2)}}_{\sigma_e} \left(\frac{t}{b}\right)^2 * \underbrace{\left[\frac{m * b}{a} + \frac{a}{m * b}\right]^2}_k \quad (4)$$

mit:

m = Anzahl der Halbwellen in Plattenlängsrichtung

a = Abmessung in Längsrichtung

b = Abmessung in Querrichtung

t = Dicke der Platte

E = E-Modul der Platte

μ = Querdehnzahl der Platte

Voraussetzungen für die Anwendung der Formel (4) sind:

- Gleichgewicht am verformten System
- Kleine Verformungen
- Ideal-elastisches Materialgesetz
- Ideal ebene Form (keine Vorkrümmung)

Die Bezeichnung des ersten Terms mit σ_e stellt die Euler'sche Bezugsspannung dar. Diese beinhaltet alle geometrischen Größen und Werkstoffkennwerte. Der Wert k erfasst die Belastungsart die Lagerung und das Seitenverhältnis der Platte (vgl. [32]).

2.5.1 Einscheibensicherheitsglas (ESG)

Die wesentlichen analytischen Lösungsmöglichkeiten zur Ermittlung der kritischen Beullast werden für die für diese Arbeit relevanten Beanspruchungen (siehe Abb. 20) angeführt.

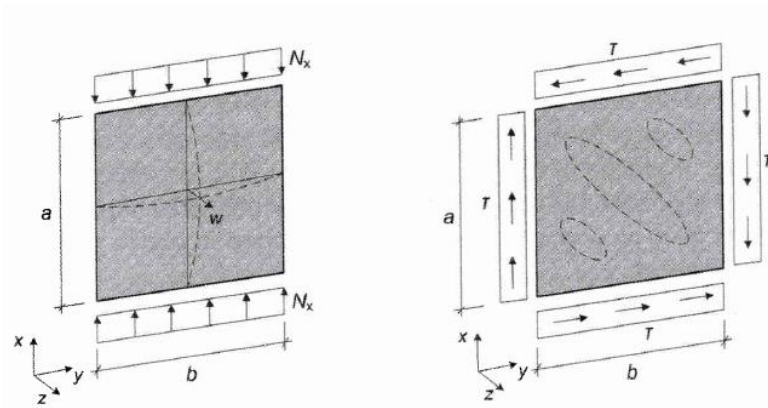


Abb. 20 Längsdruckbelastung links und Schubbelastung rechts [21]

Die Gleichung (4) kann somit zur analytischen Bestimmung der kritischen Beulspannung für monolithische umlaufend gelagerte Glasscheiben unter reiner Druckbeanspruchung verwendet werden. Die kritische Beullast in Längsrichtung $N_{kr,x}$ erhält man, wenn man die kritische Spannung durch die Scheibendicke t dividiert.

$$N_{kr,x} = \frac{\sigma_{kr}}{t} \quad (5)$$

Bei reiner Schubbeanspruchung der monolithischen Scheibe kann die kritische Beullast wie folgt ermittelt werden:

$$T_{kr} = \frac{E * \pi^2 * t}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 * k_{\tau} \quad (6)$$

t = Dicke der Glasscheibe

Mit dem Schubeulfaktor k_{τ} :

$$k_{\tau} = \begin{cases} 4,00 + \frac{5,34}{\alpha^2} & \text{für } \alpha < 1 \\ 5,34 + \frac{4,00}{\alpha^2} & \text{für } \alpha \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

wobei:

$$\alpha = \frac{a}{b}$$

2.5.2 Verbundsicherheitsglas (VSG)

Für Verbundsicherheitsglasscheiben kann die kritische Beullast in Längsrichtung mit Gleichung (8) errechnet werden:

$$N_{kr,x} = \frac{D * \pi^2}{b^2} * \left[\frac{m * b}{a} + \frac{a}{m * b} \right]^2 * \frac{\frac{D_1 + D_2}{D} * \left(\left(m * \frac{b}{a} \right)^2 + 1 \right) + A * \frac{b^2}{\pi^2 * D_S}}{\left(\left(m * \frac{b}{a} \right)^2 + 1 \right) + A * \frac{b^2}{\pi^2 * D_S}} \quad (8)$$

$$A = \frac{G_{int} (z_1 + z_2)^2}{t_{int}} \quad (9)$$

$$D_S = \frac{E * t_1 * z_1^2 + E * t_2 * z_2^2}{1 - \mu^2} \quad (10)$$

$$D_i = \frac{E * t_i^3}{12 * (1 - \mu^2)} \quad (11)$$

$$D = D_1 + D_2 + D_S \quad (12)$$

mit:

G_{int} = Schubmodul der Zwischenschicht (z.B.: PVB-Folie)

z_1 = Abstand vom Schwerpunkt der 1. Scheibe zum Gesamtschwerpunkt der Scheibenkonstruktion

z_2 = Abstand vom Schwerpunkt der 2. Scheibe zum Gesamtschwerpunkt der Scheibenkonstruktion

t_1 = Glasdicke der 1. Scheibe

t_2 = Glasdicke der 2. Scheibe

Für eine reine Schubbeanspruchung der VSG-Scheibe kann für die Ermittlung der Beullast die Gleichung (13) herangezogen werden.

$$T_{kr} = \frac{E * \pi^2 * t}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 * k_\tau * k_{VSG} \quad (13)$$

$t = t_1 + t_{PVB} + t_2$ (Gesamter Scheibenaufbau)

Der Faktor k_{VSG} berücksichtigt die Schubsteifigkeit der Zwischenschicht. In der Dissertation von Wellershoff [35] werden dazu Werte angegeben [21].

2.5.3 Einfluss der Scheibenlagerung auf das Beultragverhalten

Die Lagerung der Scheibe hat einen deutlichen Einfluss auf das Beulverhalten und die Versagensform der Glasscheibe. Je nach Lasteinleitung, ob diese über eine Eckklotzung oder eine Randverklebung erfolgt, stellen sich unterschiedliche Beuleigenformen ein. In Abb. 21 kann man gut erkennen, dass sich infolge der ausschließlich geklotzten Scheibe eine große Halbwelle entlang der druckbeanspruchten Scheibendiagonale ergibt. Bei der randverklebten Scheibe bilden sich an den Rändern zwei kleinere Halbwellen in die Gegenrichtung der größeren Halbwelle in der Mitte. Die Verschiebungen dieser

beiden Ergebnisse aus Abb. 21 können nicht direkt verglichen werden, da zwar die Scheibenabmessungen gleich sind (quadratische Scheibe mit 1600 mm), jedoch die Dicke der dünnsten eckgeklotzten Scheibe (K10) 6 mm und die der randverklebten Scheibe 3,86 mm beträgt. Es kann festgestellt werden, dass sich durch die Randverklebung gegenüber der Eckklotzung wesentlich geringere Verformungen aus der Scheibenebene ergeben, da die zwei kleineren Halbwellen entgegen der Verformung der mittleren Halbwellen wirken. Bei der eckgeklotzten Scheibe kann hingegen die Zugdiagonale nicht aktiviert werden, da die Klotzung keine Zugkräfte überträgt. Eine schematische Lastabtragung wird in Abb. 22 dargestellt. In Abb. 23 kennzeichnen die roten Pfeile die Richtung der Zughauptspannungen und die blauen Pfeile die Richtung der Druckhauptspannungen. Eine deutliche Rissbildung ist aufgrund der Überschreitung der Hauptzugspannungen zu erkennen.

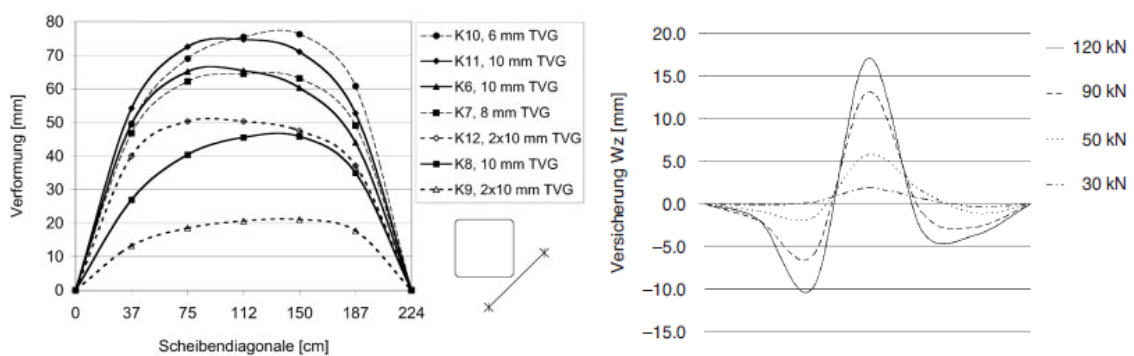


Abb. 21 Beulkurve über die Druckdiagonale: Eckklotzung (links) [2], Randklebung (rechts) [29]

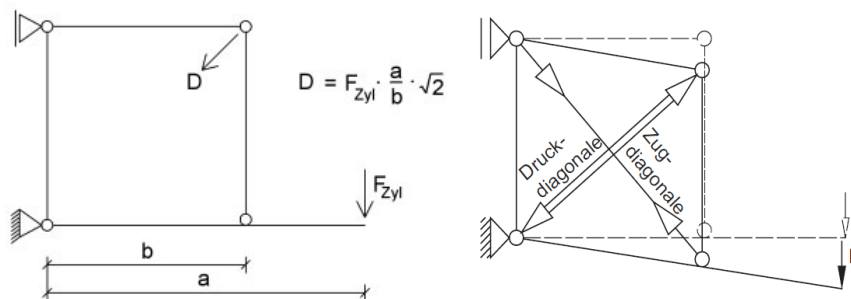


Abb. 22 Schematischer Lastabtrag: Eckklotzung (links), Randklebung (rechts)



Abb. 23 Bruchverhalten: Eckklotzung (links), Randklebung (rechts) [29]

2.6 Vorschlag für die Bemessung von schubbeanspruchten Scheiben

In Anlehnung an den Bemessungsvorgang von Jan Ebert ([8], S.172) wird für schubbeanspruchte Scheiben ein Vorschlag zur Bemessung aufgezeigt:

1. Konstruktionsentwurf

2. Scheibenart und Verglasungsaufbau (VSG, ESG, TVG bzw. Kombination oder Isolierglas)

3. Lastaufstellung und Lastfallkombination der maßgebenden Belastungen

4. Entwicklung eines geeigneten statischen Modells (Stabwerksmodell bis hin zum FE-Modell)

5. Vordimensionierung (Scheibendicken anhand Flächenlasten bzw. thermischer Belastung)

6. Lagerung der Scheibe: Klotzung oder Klebung bzw. Kombination

7. Randverklebung:

- Auswahl des geeigneten Klebstoffes
 - i. Verformungsverhalten
 - ii. E-Modul
 - iii. Zugfestigkeit
 - iv. Alterungseigenschaften
 - v. Querdehnungsverhalten
 - vi. Kriechverhalten, etc.

8. Eckklotzung:

- i. Klotzung auf Einzelscheibe oder VSG
- ii. Aufbau: einfache oder mehrteilige Klotzung bzw. mit Vergussmörtel
- iii. Toleranzausgleich notwendig?
- iv. Verdrehungsmöglichkeit der Klotzung notwendig?
- v. Anordnung der Klotzung (Abstand von der Glaskante mind. 20 mm empfohlen)
- vi. Max. 2 Klotzungen pro Scheibenkante
- Abschätzen der zu erwartenden Klotzungslasten am Tragmodell (mit hoher Anfangssteifigkeit)
- Auswahl des Klotzungsmaterials
 - i. E-Modul (Druck)
 - ii. Druckspannungs-Dehnungs-Verlauf
 - iii. Kurzzeit Druckfestigkeit
 - iv. Querdehnung unter Druck
 - v. Temperaturabhängigkeit
 - vi. Kriechverhalten für das zu erwartende Lastniveau
 - vii. Reibungskoeffizient zu Glas, etc.

9. Vordimensionierung der Klotzung bzw. Klebung

10. Überprüfen der tatsächlichen Belastung mit der realen Steifigkeit der Klotzung bzw. Klebung

11. Ausreichendes Verformungsverhalten der Scheibenlagerung?

12. Bemessung der maßgebenden Scheibe:

- Lokal: Spannungsnachweis im Lasteinleitungsbereich
- Global: Spannungs- und Stabilitätsnachweis

3 Numerische Untersuchung zum Tragverhalten

Das zu Beginn besprochene Modell wird mit Finiten Elementen abgebildet und der Einfluss der Parameter auf das Tragverhalten wird numerisch untersucht. Das Modell in Abb. 24 zeigt das Referenzsystem, dass in Sofistik mit den entsprechenden Abmessungen modelliert wurde. Die Abmessungen wurden parametrisiert, um eine einfache Anpassung für die Variation der verschiedenen Parameter zu gewährleisten.

Bei der Betrachtung der Spannungsbilder in den folgenden Kapiteln wird zwischen Scheibenoberseite und Scheibenunterseite unterschieden. Mit Scheibenoberseite ist die Scheibenvorderseite und mit Scheibenunterseite die Scheibenhinterseite, jene Seite an der die Randverklebung erfolgt, gemeint.

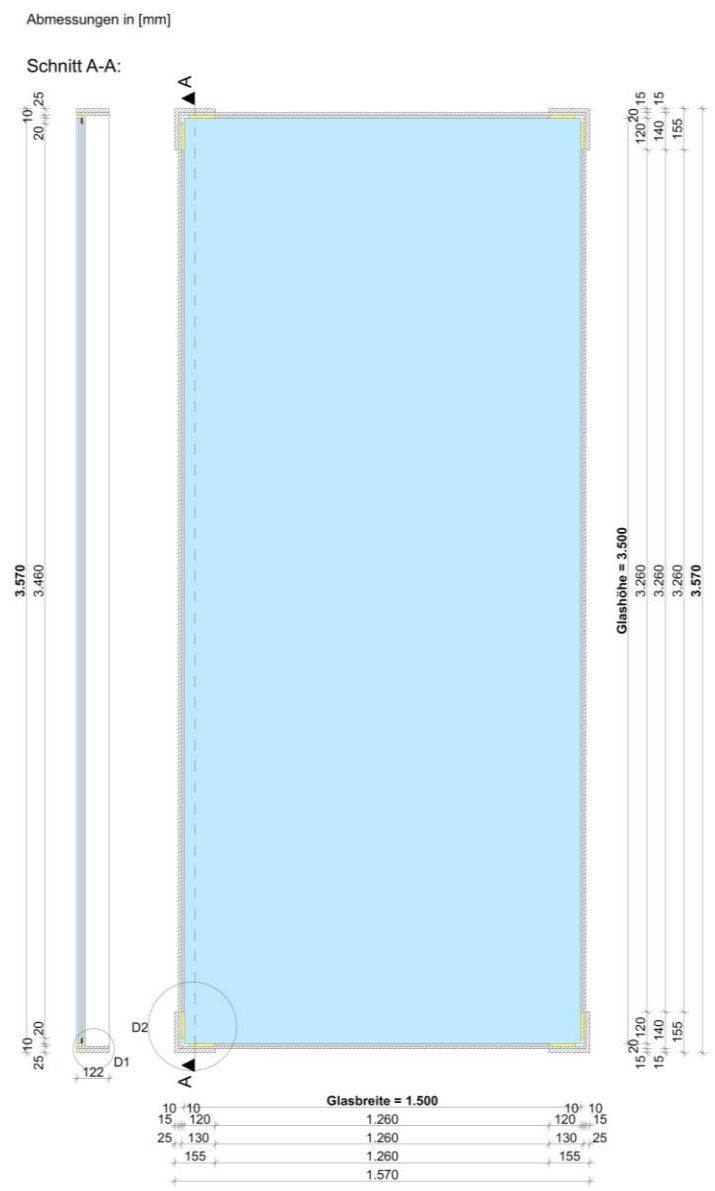


Abb. 24 Abmessungen des Referenzsystems

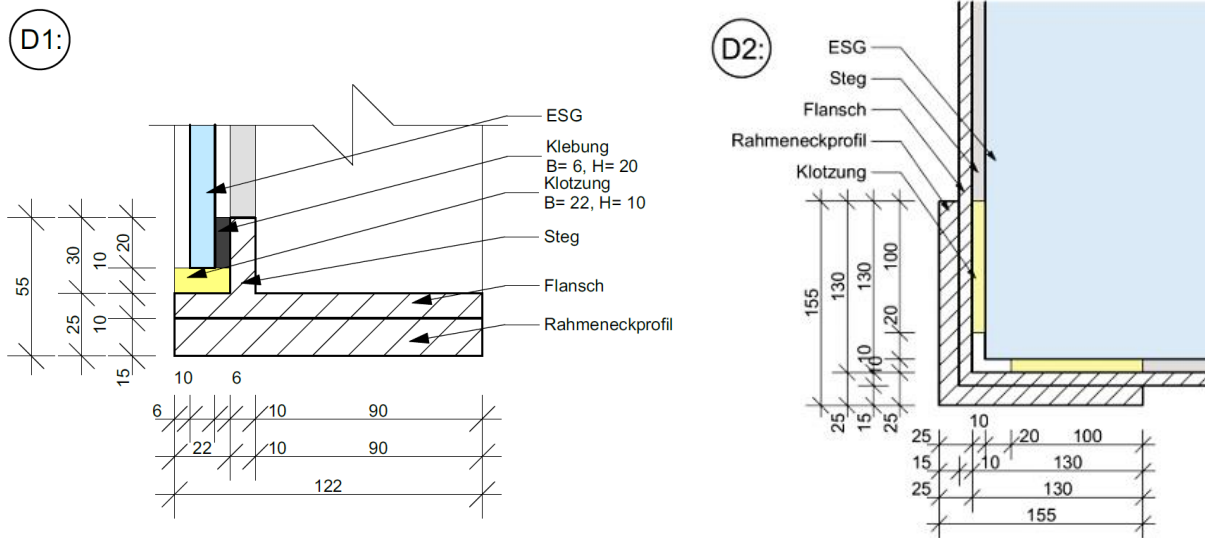


Abb. 25 Bezeichnung der Bauteile

3.1 Allgemeiner Vorgang zur Stabilitätsuntersuchung mittels FEM

Allgemein kann eine Stabilitätsanalyse mit der Finiten Element Methode wie folgt durchgeführt werden:

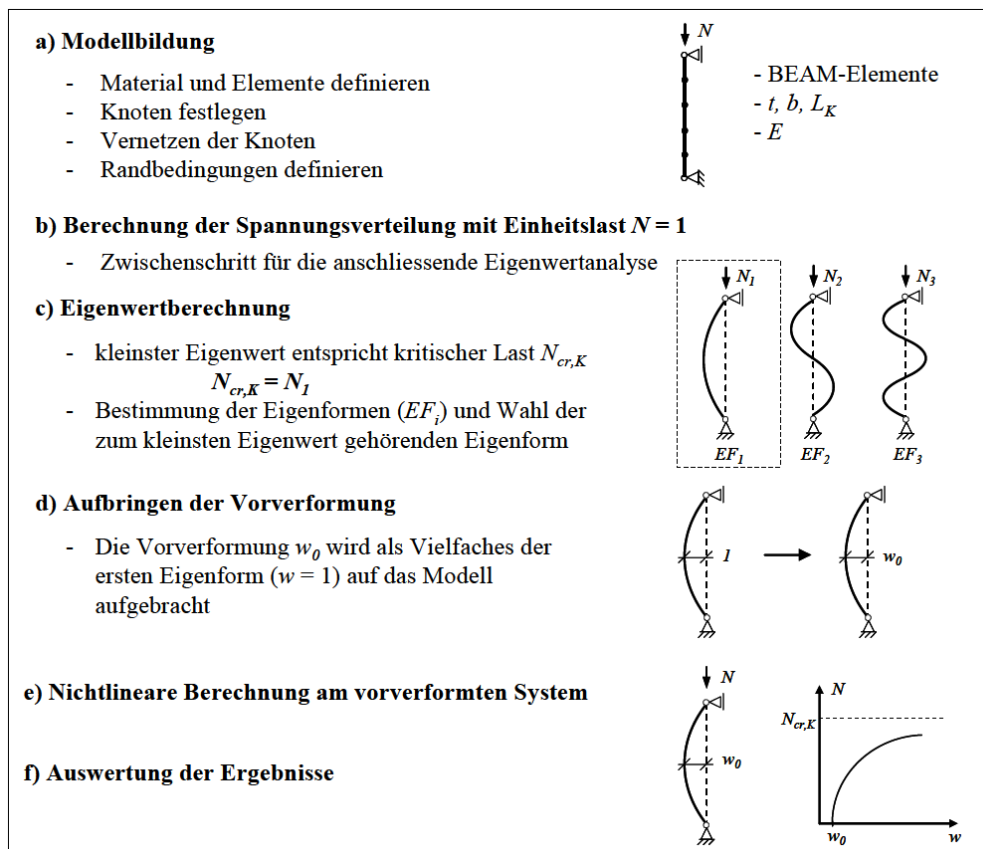


Abb. 26 Ablauf der Stabilitätsberechnung nach [31]

3.2 Modellbildung

3.2.1 Element- & Materialwahl

Für die Abbildung des Stahlrahmens und der Glasscheibe werden Schalenelemente gewählt. Schalenelemente besitzen sowohl eine Scheiben- als auch eine Plattentragwirkung. Allgemein verwendet Sofistik als Referenzelemente für die Abbildung von Schalenelementen 4-knotige Viereckselemente mit einem bilinearen Verschiebungsansatz. Durch das Ableiten der Verschiebungsfunktion erhält man die konstanten Dehnungen und Spannungen über ein Element.

$$u(x) = u_1 + \frac{x}{l} (u_2 - u_1) \quad (14)$$

$$\Delta \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{l} (u_2 - u_1) \quad (15)$$

$$\Delta \sigma = E * \Delta \varepsilon_x = \frac{E}{l} (u_2 - u_1) \quad (16)$$

Vorausgesetzt wird ein Ebenbleiben des Querschnitts, dieser ist jedoch nicht unbedingt senkrecht zur Mittelebene. Die Plattentragwirkung basiert auf der Mindlinschen Plattentheorie mit einer Erweiterung um einen nichtkonformen Ansatz. Der konforme Ansatz² ist bei Biegebeanspruchung meist deutlich zu steif (Shear Locking), weshalb von Taylor und Wilson der nichtkonforme Ansatz entwickelt wurde. Beim nichtkonformen Ansatz handelt es sich um zusätzliche Funktionen zur Beschreibung zusätzlicher Spannungszustände. Diese Funktionen sind in allen Knoten null und dienen somit nur einer zusätzlichen Verschiebung der Ränder, wodurch die Steifigkeit des Elements bei Biegebeanspruchung verringert wird. Da die Verschiebung zwischen den Elementen jedoch nicht mehr stetig ist, wird dieser Ansatz nichtkonform genannt (vgl. ASE-Handbuch [36] und [37]).

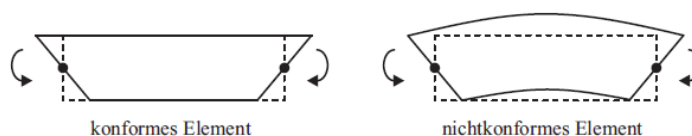


Abb. 27 Konformes Element (links), Nichtkonformes Element (rechts) [37]

Als geeignetste Form gilt das Quadrat, gefolgt vom Rechteck und dem Parallelogramm. Das allgemeine Viereck ist als drittbeste Form zu nennen. Dreiecke sind hingegen weitgehend zu vermeiden. Daher wird bei der Modellierung darauf geachtet, dass möglichst quadratische oder rechteckige Elemente verwendet werden. Des Weiteren wird bei der Diskretisierung auf ein möglichst gleichmäßiges Netz geachtet, wodurch in der Regel bei geeigneter Feinheit des Netzes bessere Ergebnisse erzielt werden können.

² Man spricht von einem konformen Ansatz, wenn die Verschiebungen und Verdrehungen zwischen den Elementen keine Sprünge aufweisen [36].

Die Elementwahl und die Materialeigenschaften werden die folgt definiert:

	Elementwahl	Material
Glasscheibe	Schalenelemente (Quad-Elemente)	Glas - linear elastisches Materialgesetz
Stahlrahmen	Schalenelemente (Quad-Elemente)	S 355 - bilineares Materialgesetz (ideal elastisch – ideal plastisch) → Vereinfacht für den gesamten Stahlrahmen angenommen.
Klotzung	Federelemente mit Zugausfall	
Klebung	Federelemente	

Tab. 12 Elementwahl zur Abbildung der Tragstruktur

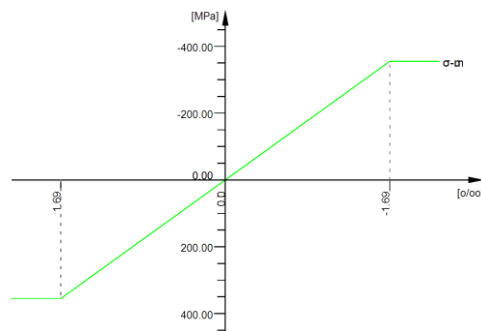


Abb. 28 Das verwendete bilineare Materialgesetz für den Baustahl S355 in Sofistik

Elastizitätsmodul	E	210000	[MPa]	Materialsicherheit	1.00	[-]
Querdehnzahl	μ	0.30	[-]	Fließgrenze	f_y	355.00 [MPa]
Schubmodul	G	80769	[MPa]	Druckfließgrenze	f_{yc}	355.00 [MPa]
Kompressionsmodul	K	175000	[MPa]	Zugfestigkeit	f_t	490.00 [MPa]
Wichte	γ	78.5	[kN/m ³]	Druckfestigkeit	f_c	490.00 [MPa]
Rohdichte	ρ	7850.00	[kg/m ³]	Bruchdehnung		100.00 [‰]
Ausdehnungskoeffizient	α	1.20E-05	[1/K]	Verbundwert relativ		0.00 [-]
max. Erzeugnisdicke		40.00	[mm]	Verbundwert k1 (EN1992)k1		0.00 [-]
				Verfestigungsmodul	E_h	0.00 [MPa]
				Proportionalitätsgrenzefp		355.00 [MPa]
				Schwingbreite	σ -dyn	0.00 [MPa]

Tab. 13 Materialeigenschaften des Baustahls S 355 in Sofistik

Elastizitätsmodul	E	70000	[MPa]	Materialsicherheit	1.00	[-]
Querdehnzahl	μ	0.23	[-]	Rechenfestigkeit f_y	120.00	[MPa]
Schubmodul	G	28455	[MPa]	Endfestigkeit f_t	120.00	[MPa]
Kompressionsmodul	K	43210	[MPa]			
Wichte	γ	25.0	[kN/m ³]			
Wichte Auftrieb	γ_a	15.0	[kN/m ³]			
Ausdehnungskoeffizient	α	9.00E-06	[1/K]			

Tab. 14 Glaseigenschaften in Sofistik

3.2.1.1 Diskretisierung

Die Vernetzung erfolgt, wie bereits in Kapitel 3.2.1 erwähnt, mit viereckigen Schalenelementen. Ein feineres Netz wird in den hochbeanspruchten Bereichen gewählt. Das sind speziell die Eckbereiche der Scheibe oder die Stellen bei denen ein deutlicher Steifigkeitsunterschied zu erwarten ist (Bereich der Klotzung, Klebung). Die Feinheit des Netzes wird mit einer Konvergenzstudie angepasst.

Anzumerken ist, dass die Knoten generell schubstarr miteinander verbunden werden, wenn keine anderen Einstellungen gemacht werden.

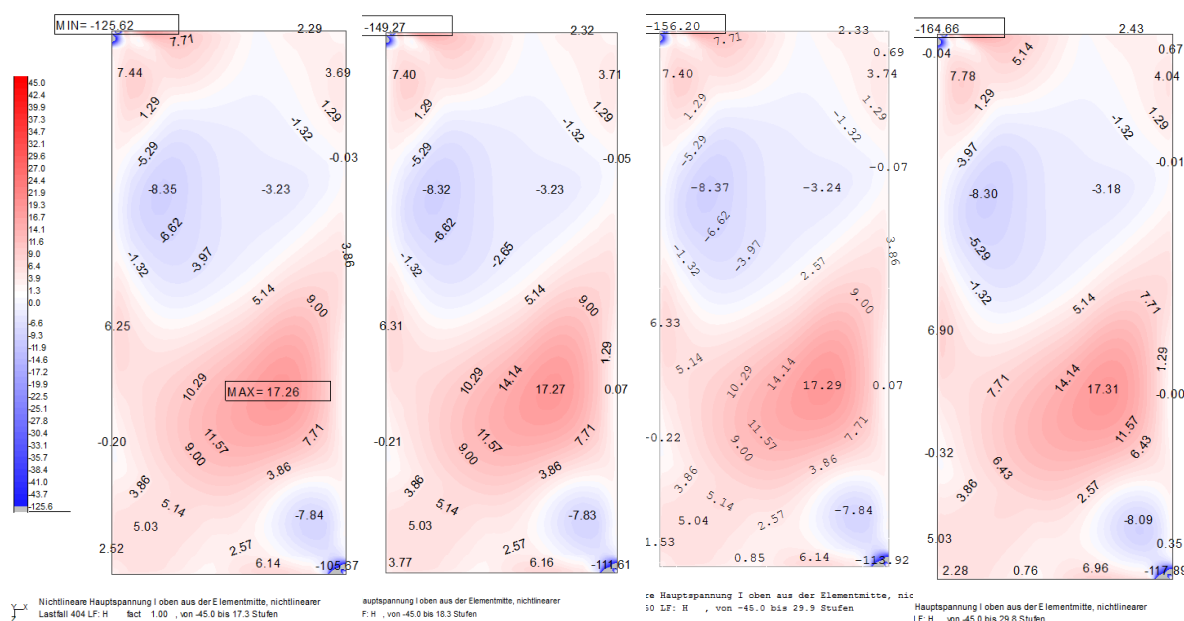


Abb. 29 Hauptspannungen: mit F10_G12_S3 (Referenz), F18_G12_S4, F10_G12_S6 und F14_G28_S6

Dabei steht die Bezeichnung F10_G12_S3 für:

- F10 = Die Klotzung wird in 10 Elemente unterteilt
- G12 = Die Länge vom Klotzungsende bis zu Scheibenmitte wird in 12 Elemente unterteilt
- S3 = Die Klebung wird über die Höhe in 3 Elemente unterteilt

Ausreichend gute Ergebnisse mit vertretbarer Rechendauer haben die folgenden Teilungen ergeben:

- Klebungshöhe: 3 Teilungen
- Klotzungslänge: 10 Teilungen
- Glasscheibenbreite zwischen den Klotzungen: 24 Teilungen
- Glasscheibenhöhe zwischen den Klotzungen: 48 Teilungen
- Rahmentiefe: 10 Teilungen

Die Abb. 30 zeigt das Ergebnis der diskretisierten Bereiche der Tragstruktur:

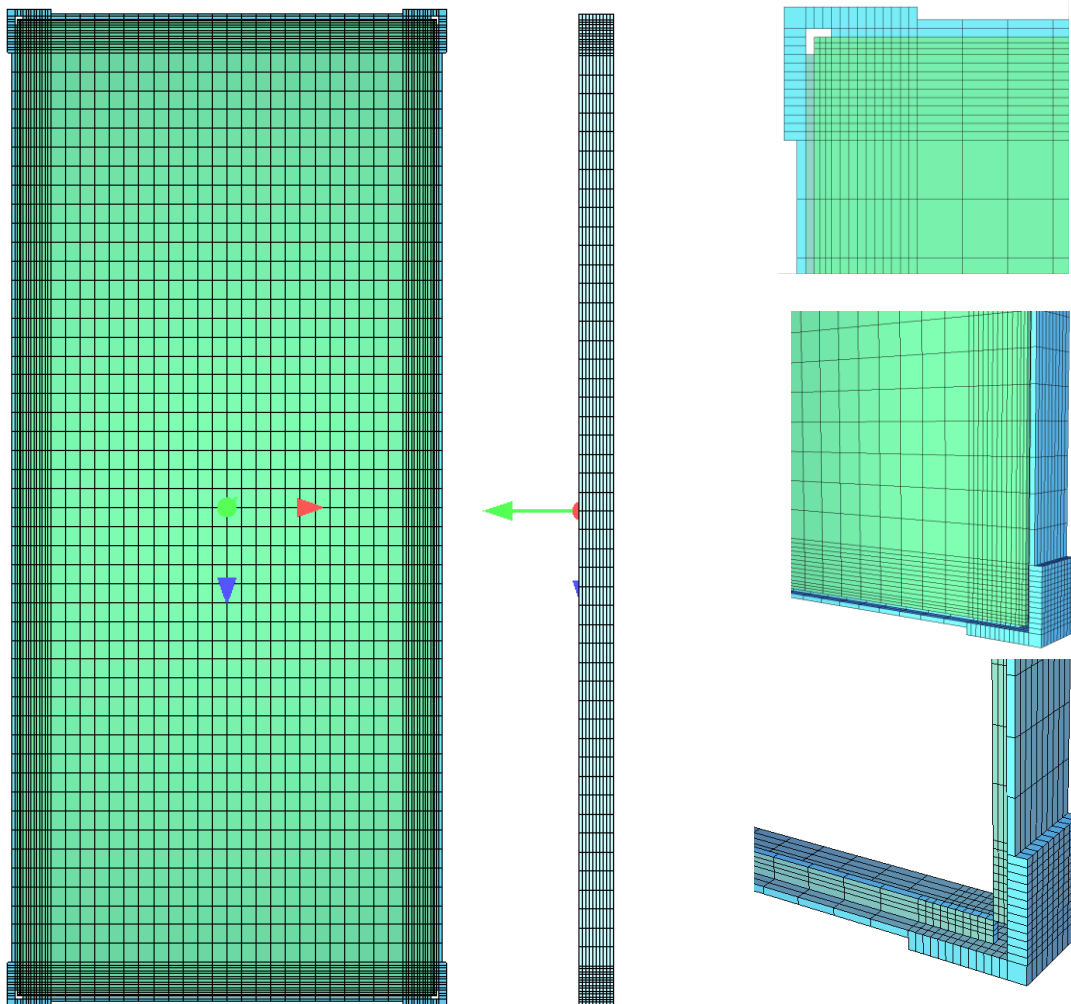


Abb. 30 Diskretisierung der Tragstruktur

3.2.1.2 Lagerung

Für die Lagerung des Gesamtsystems werden starre Knotenlager gewählt. Die Unterseite des unteren linken Rahmenecks wird mit einer flächenhaften Knotenlagerung modelliert. Diese sperrt die Verschiebungen in x , y , und z -Richtung. Infolge der flächigen Lagerung der Knoten können ebenso Momente übertragen werden, wodurch diese Lagerung als Einspannung gesehen werden kann. Die Unterseite des rechten unteren Rahmenecks besitzt bis auf eine freigegebene Verschiebung in x -Richtung die gleichen Eigenschaften. Durch das verschiebliche Lager an der gegenüberliegenden Seite der Lasteinleitung, kommt es zu einer Aktivierung des unteren Rahmenprofils, da dieses die horizontale Last zum festen Auflager wieder zurückleiten muss. Jedoch konnte bei einer Auflagervariation kein wesentlicher Einfluss auf die Spannungen und Verformungen erkannt werden. Dies ist wahrscheinlich auf die hohe Zugsteifigkeit des horizontalen Stahlprofils zurückzuführen. Die oberen Ecken werden gegen eine Verschiebung in y -Richtung gehalten.

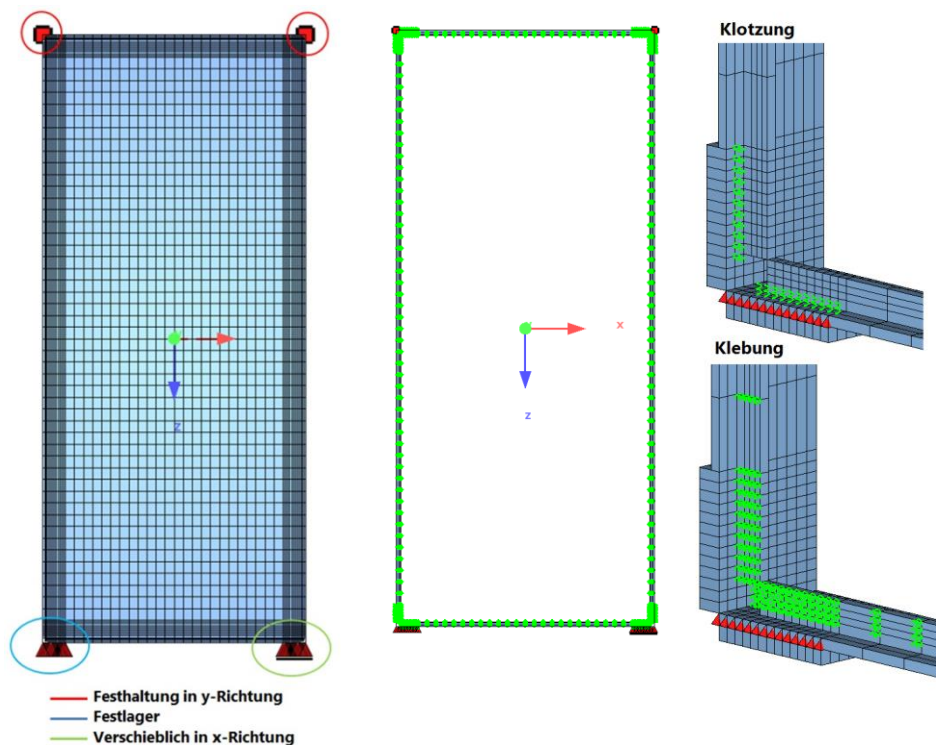


Abb. 31 Lagerung des Gesamtsystems (links), Klebung- und Klotzungsfedern (rechts)

Die Kopplung zwischen Stahlrahmen und Glasscheibe erfolgt über Federn, welche einerseits die Klotzung darstellen und andererseits die Klebung definieren. Die Klotzungsfedern werden mit Linienfedern, welche bei einer Zugbeanspruchung ausfallen, modelliert. Die Randklebung wird mit einer flächenhaften Federkopplung zwischen der Glasscheibe und dem Steg des Stahlrahmens simuliert.

3.2.1.3 Ermittlung der Federsteifigkeit

Ermittlung der Klotzungssteifigkeit für das Referenzsystem:

Durch die Angabe des Anfangs- und Endknoten, ermittelt Sofistik die Klotzungslänge automatisch und berücksichtigt diese bei der Ermittlung der Einflussbreite pro Feder. Daher muss die Steifigkeit wie in Gleichung (17) definiert werden.

$$c_{p_{K,Linie}} = \frac{E_K * b_k}{h_K} = 2500 * \frac{22}{10} = 5500 \left[\frac{N}{mm^2} \right] = 5500 * 10^3 \left[\frac{kN}{m^2} \right] \quad (17)$$

Mit:

$c_{p_{K,Linie}} = [N/mm^2]$... linienhafte Federsteifigkeit der Klotzung

$b_k = 22 [mm]$... Breite der Klotzung

$E_K = 2500 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$... E – Modul der Klotzung (POM)

$h_K = 10 [mm]$... Höhe der Klotzung

Ermittlung der Klebersteifigkeit für das Referenzsystem:

Infolge der flächenhaften Federkopplung ermittelt Sofistik die Einflussfläche jeder Feder automatisch. Daher muss der E-Modul des Klebstoffes nur mehr durch die Klebstoffdicke dividiert werden (siehe Gleichung (18)).

$$c_{p_{K,Fläche}} = \frac{E_{Kl}}{t_{Kl}} = \frac{1400}{6} = 233,33 \left[\frac{N}{mm^3} \right] = 233,33 * 10^6 \left[\frac{kN}{m^3} \right] = \quad (18)$$

Mit:

$c_{p_{K,Fläche}} = [N/mm^3]$... flächenhafte Federsteifigkeit der Randklebung

$t_{Kl} = 6 [mm]$... Dicke der Randklebung

$E_{Kl} = 1400 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$... E – Modul des Klebstoffs

3.2.2 Vorverformung

Da im konstruktiven Glasbau aufgrund der schlanken Glasscheiben meist ein Stabilitätsversagen noch vor der Überschreitung der Hauptzugspannungen auftritt, ist es notwendig eine Stabilitätsanalyse durchzuführen. Ein perfekt gerades System kommt in der Realität nie vor, da das System immer eine gewisse Vorverformung aufweist und somit deutlich schneller ausweicht als ein perfekt gerades System. Daher wird als Vorverformung die 1. Eigenform gewählt, da diese den geringsten Eigenwert aufweist, bei dem das perfekt gerade System ausweicht. Diese wird anschließend normiert und mit einem Faktor multipliziert (z.B.: L/500 oder L/1000). Für die Berechnung der Beuleigenwerte wird eine horizontale Einzellast mit der Lastgröße von 1 kN gewählt, da somit die Eigenwerte einen Faktor darstellen mit dem die Lastgröße von 1 kN zu multiplizieren ist, um die zugehörige Beuleigenform des Systems zu erhalten. Zur Berücksichtigung des Zugausfalls der Klotzung wird eine nichtlineare Berechnung des Lastfalles durchgeführt.

3.2.2.1 Beuleigenformen

Die folgenden Abbildungen zeigen die ersten vier Beuleigenformen. Die Farbe Blau kennzeichnet die Druckspannungen und Rot die Zugspannungen an der Scheibenoberseite. Bei der Beuleigenwertberechnung hat sich herausgestellt, dass es bei den ersten beiden Beuleigenformen zu einer starken Verformung der Ecken kommt. Diese Verwerfung der Glasscheibe tritt in der Wirklichkeit jedoch nicht auf und stellt somit keine geeignete Vorverformung dar, daher werden die 3. und 4. Eigenform für die Vorverformung in Betracht gezogen. Die zugehörigen Eigenwerte zu den Beuleigenformen werden in Tab. 15 dargestellt.

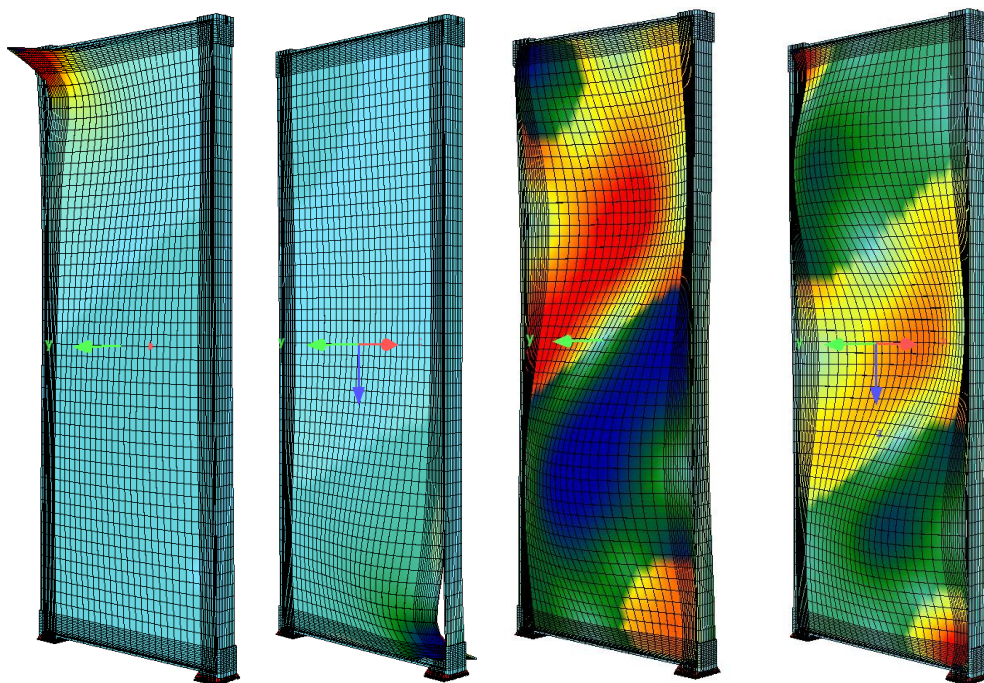


Abb. 32 Die ersten vier Beulformen ohne Quersteifigkeit der druckbeanspruchten Klotzungen (von links nach rechts)

Beulform	Eigenwert
1. Beulform	53,02 kN
2. Beulform	55,79 kN
3. Beulform	64,06 kN
4. Beulform	71,20 kN

Tab. 15 Beuleigenwerte ohne Quersteifigkeit

Bei der Berechnung der imperfekten Referenzscheibe kann festgestellt werden, dass es auch bei der Verwendung der dritten und vierten Beulform als Vorverformung des Systems, zu einem Ausweichen der Glasecken kommt. In der Realität kann ein solches Ausweichen jedoch nicht stattfinden, da sich durch das Hineindrücken der Glasscheibe in die gekammerte Klotzung eine Quersteifigkeit aufbaut und eine Verschiebung somit verhindert wird. Daher wird zusätzlich zur Längssteifigkeit der Klotzung

eine Quersteifigkeit modelliert, jedoch nur bei den druckbeanspruchten Klotzungen. Die Größe der Quersteifigkeit wird zunächst entsprechend der Längssteifigkeit angenommen und anschließend eine Sensitivitätsanalyse zur Größe der Quersteifigkeit gemacht, welche in Kaptiel 3.2.2.2 beschrieben wird.

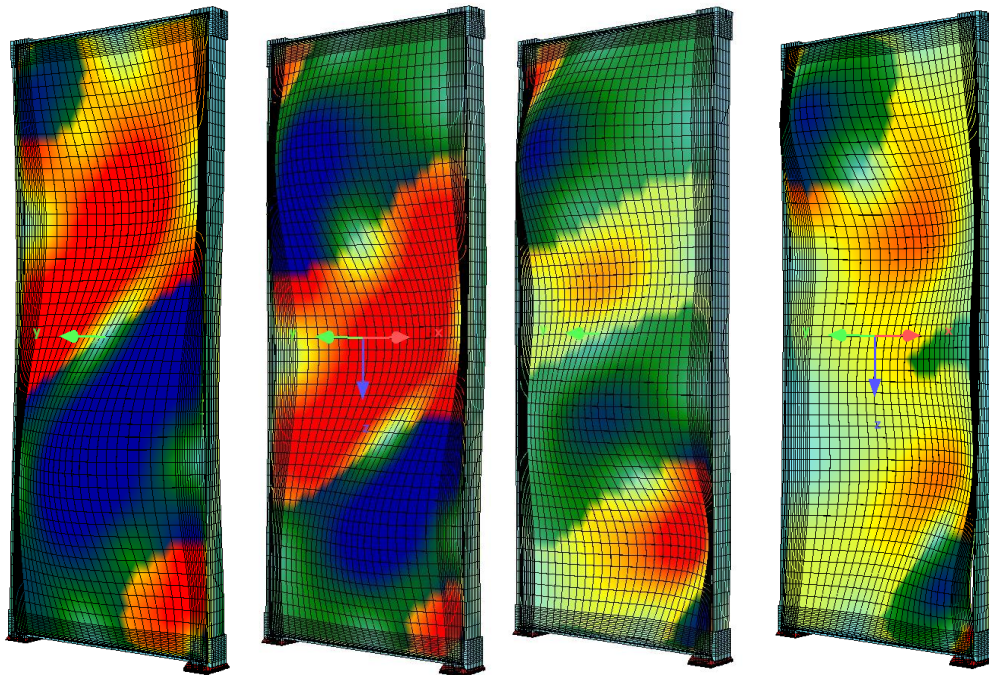


Abb. 33 Die ersten vier Beulformen mit Quersteifigkeit der druckbeanspruchten Klotzungen (von links nach rechts)

Beulform	Eigenwert (Quersteifigkeit = Klotzungssteifigkeit)	Eigenwert (Quersteifigkeit entspricht Klotzungssteifigkeit/100)	Unterschied Beuleigenwerte (Variation der Quersteifigkeit)
1. Beulform	64,04 kN	63,28 kN	0,33 %
2. Beulform	71,10 kN	70,91 kN	0,27 %
3. Beulform	88,23 kN	87,14 kN	1,24 %
4. Beulform	89,24 kN	87,68 kN	1,75 %

Tab. 16 Beuleigenwerte mit Quersteifigkeit

Der zugehörige Eigenwert zur ersten Beulform beträgt 64,04 kN und der Eigenwert der zweiten Beulform 71,10 kN. Die Abweichung der Beuleigenwerte ohne Klotzungsquersteifigkeit zu den Beulformen mit Klotzungsquersteifigkeit betragen 0,67 % (vgl.: 3. Beulform in Tab. 15 zur 1. Beulform in Tab. 16) und 0,51 % (vgl.: 4. Beulform in Tab. 15 zur 2. Beulform in Tab. 16). Des Weiteren wird in Tab. 16 der Einfluss der Größe der Klotzungssteifigkeit auf die Beuleigenwerte gezeigt. Vor allem die ersten beiden Eigenwerte unterscheiden sich nur minimal. Daher kann in diesem Fall daraus geschlossen werden, dass die Veränderung der Klotzungsquersteifigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf die Beuleigenwerte hat (vgl. 3. Eigenwert aus Tab. 15 und 1. Eigenwert aus Tab. 16).

3.2.2.2 Einfluss der Klotzungsquersteifigkeit auf die Hauptspannungen

Vergleicht man die Spannungsbilder in Abb. 34, Abb. 35 und Abb. 36 miteinander, ist festzustellen, dass die Quersteifigkeit der Klotzung einen wesentlichen Einfluss im Lasteinleitungsbereich hat. Hingegen werden die Spannungen bei den sich einstellenden Halbwellen kaum verändert (siehe Abb. 37). Der hohe Spannungsunterschied im Lasteinleitungsbereich rührt daher, dass sich die Scheibe im Eckbereich stark verformen kann, da hier lediglich die Steifigkeit des Klebstoffes die Verformung der Scheibe behindert (siehe Abb. 35 und Abb. 38). Die Eckverformung wird aber aufgrund der geringen Klebstoffsteifigkeit nicht ausreichend zurückgehalten und weicht dadurch im Lasteinleitungsbereich aus, wodurch keine realistische Lasteinleitung mehr vorhanden ist. Somit stellt sich die Berücksichtigung der Klotzungsquersteifigkeit als geeignet heraus, da so eine realistische Lasteinleitung und Verformungen der Glasscheibe simuliert werden können

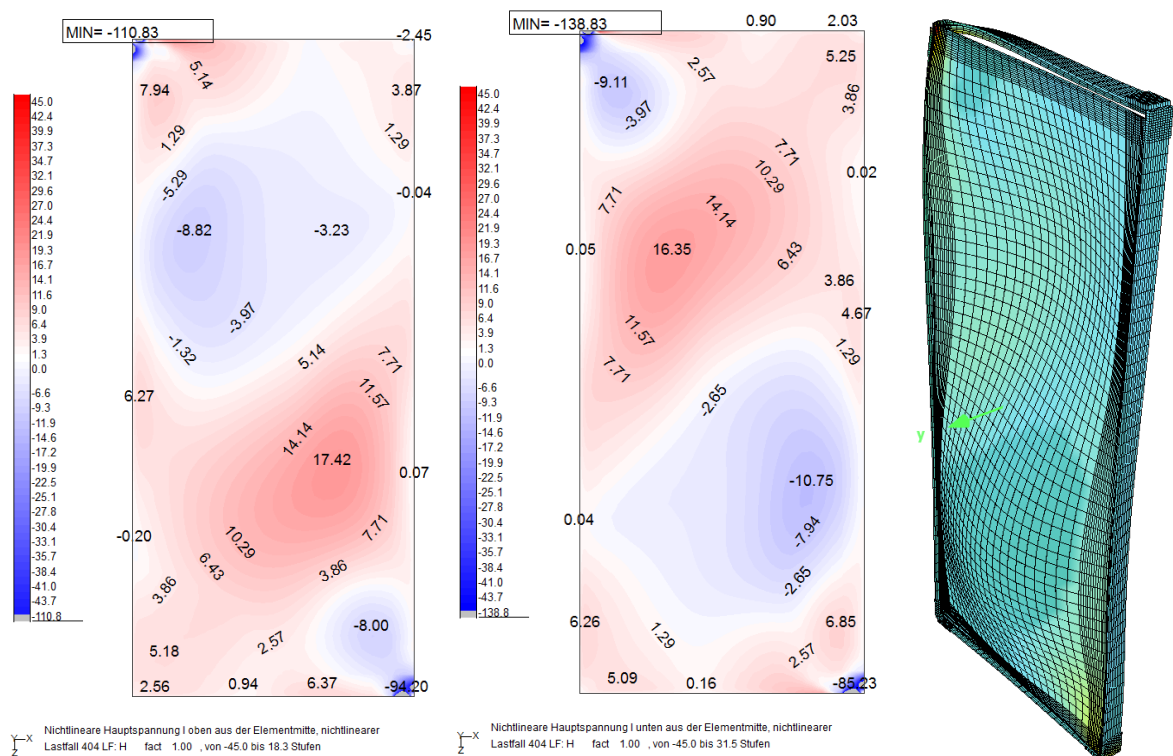


Abb. 34 Hauptspannungen (Glasober- und unterseite) mit Quersteifigkeit (Referenzsystem) (Verformungsfigur 20-fach überhöht)

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

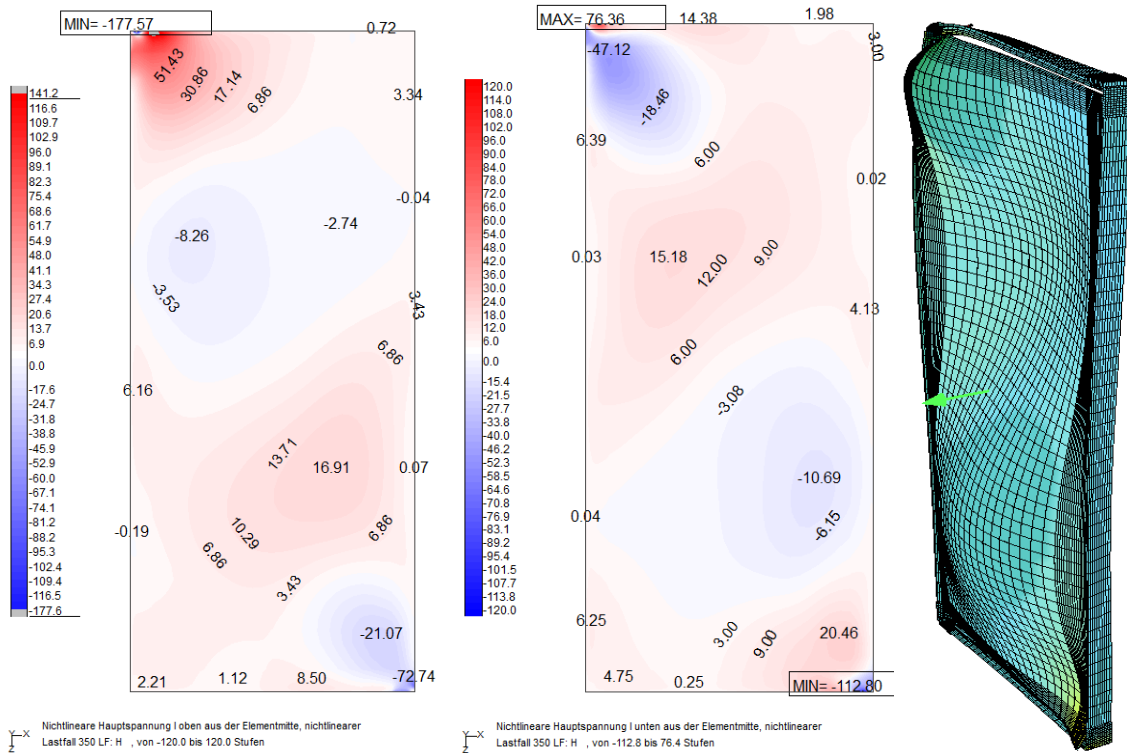


Abb. 35 Hauptspannungen (Glasober- und unterseite) ohne Quersteifigkeit (Verformungsfigur 20-fach überhöht)

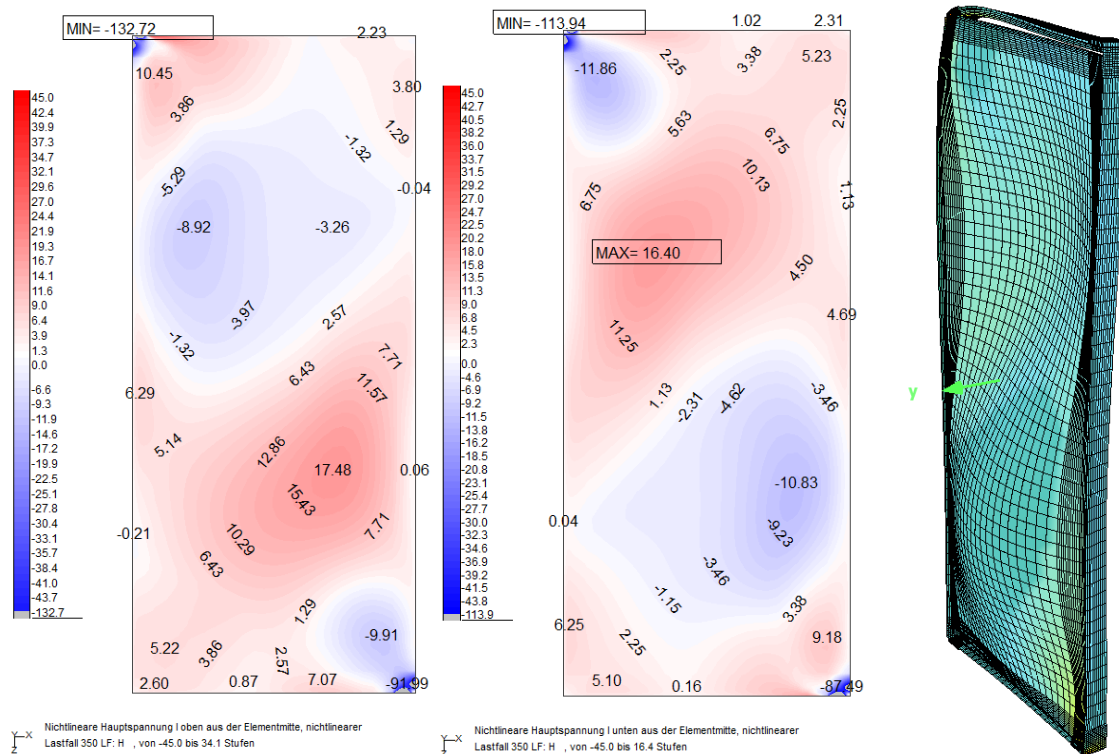


Abb. 36 Hauptspannungen (Glasober- und unterseite) mit Klotzungsquersteifigkeit/100 (Verformungsfigur 20-fach überhöht)

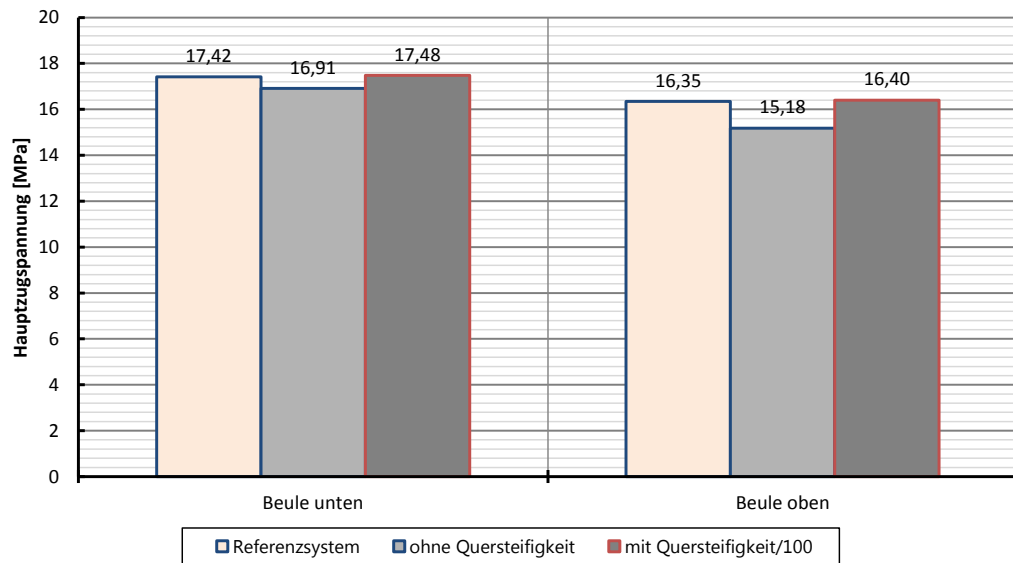


Abb. 37 Vergleich der Hauptzugspannungen bei unterschiedlicher Quersteifigkeit der Klotzung

Wie man in Abb. 38 erkennen kann, wird die Last, bei dem System ohne Klotzungsquersteifigkeit, hauptsächlich über die obere Klotzung eingeleitet. Die hohen Hauptzugspannungen entstehen hauptsächlich aufgrund der großen Eckverformung. Hingegen wird die Last bei dem System mit Klotzungsquersteifigkeit deutlich homogener eingeleitet. Hier geschieht die Lasteinleitung über die obere und seitliche Klotzung. Die Hauptzugspannungen sind aufgrund der wesentlich geringeren Eckverformung deutlich kleiner.

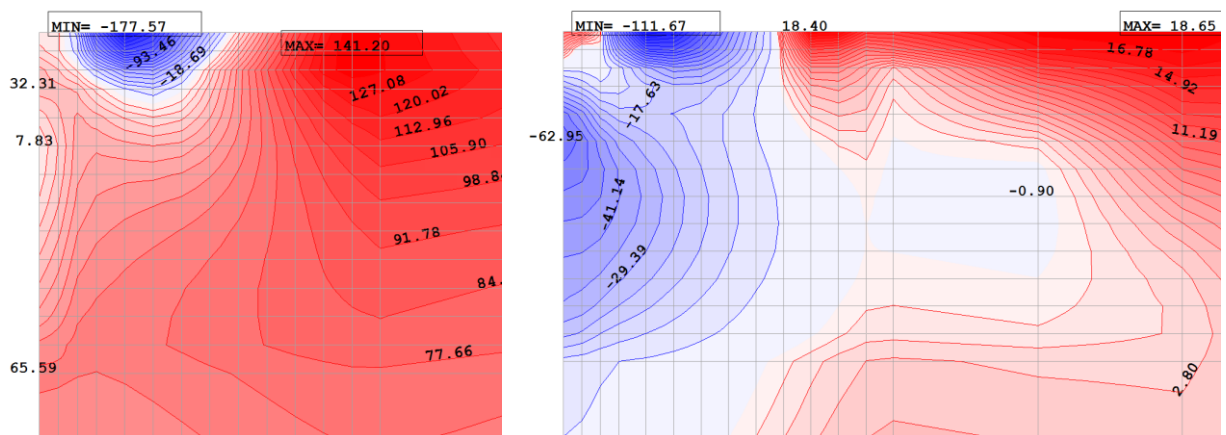


Abb. 38 Hauptspannungen an der Glasoberseite im Lasteinleitungsbereich links ohne und rechts mit Quersteifigkeit des Referenzsystems

3.2.2.3 Wahl der Beulformen für die Vorverformung

Für die Parameterstudie werden die 1. Eigenform und die 2. Eigenform gewählt. Die erste Beuleigenform weist den geringsten Eigenwert auf, bei dem das System ausweicht. Dieser Eigenwert stellt somit die kritische Last dar, bei dem ein Stabilitätsversagen der Konstruktion eintreten würde (ohne Berücksichtigung des überkritischen Beultragverhaltens). Die Wahl auch die zweite Eigenform für die Vorverformung heranzuziehen, ist dadurch begründet, dass bei der Variation der verschiedenen Parameter nicht von vornherein klar ist, bei welcher Vorverformung die ungünstigeren Hauptzugspannungen zu erwarten sind. Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass je stärker die Krümmung der Halbwelle bei gleicher maximaler Amplitude ist, desto höher sind die zu erwartenden Spannungen, da eine größere Umlenkung der Kräfte erfolgt. Die Richtung der zweiten Beuleigenform wurde mit dem Faktor -1 multipliziert, damit die maximale Amplitude der Halbwelle in Richtung der Windbelastung (Windsog) zeigt, wodurch der Klebstoff infolge Windsog ungünstig beansprucht wird.

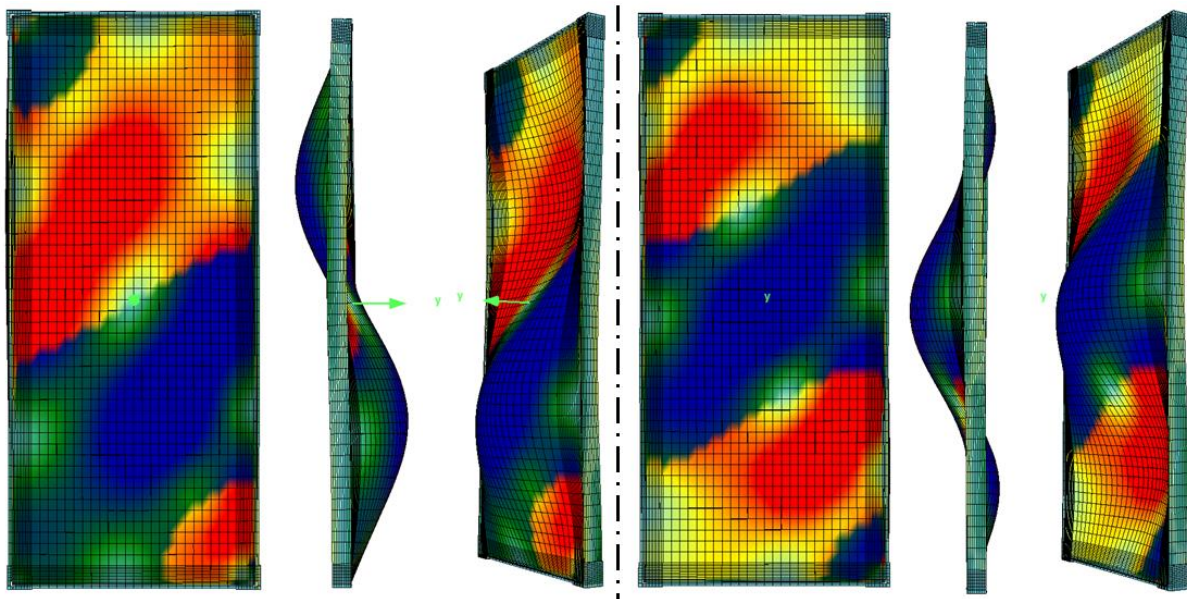


Abb. 39 Referenzsystem: links: 1. Beulform, rechts: 2. Beulform

3.3 Belastung

Generell wird die Glasstahlkonstruktion durch die folgenden drei Belastungsarten beansprucht:

- Horizontale Schublast
- Vertikale Belastung durch darüber liegende Konstruktion
- Flächenlast (Windsog, da dieser für den Klebstoff maßgebend ist.)

Die horizontale Aussteifungslast wird mit einer horizontalen Knotenlast abgebildet, welche im linken oberen Rahmeneck in der Scheibenebene angreift. Um die Ergebnisse der numerischen Berechnung in späterer Folge mit Ergebnissen aus Laborversuchen vergleichen zu können, wird die Lasteinleitung anhand des Versuchsaufbaus modelliert. Zudem wirkt sich die konzentrierte Lasteinleitung in Scheibenebene ungünstig auf das Beultragverhalten der Scheibe aus. Infolge der gesamten Lasteinleitung auf einen Knoten kommt es im Lasteinleitungsbereich zu Spannungsspitzen. Abhilfe kann durch eine linienförmige bzw. flächenhafte Lasteinleitung geschaffen werden. Dadurch wird die Last auf mehrere Knoten aufgeteilt, wodurch die Spannungsspitzen reduziert werden und sich dadurch ein homogeneres Spannungsbild ergibt. Die Lastgröße von 50 kN wurde einerseits vom Betreuer vorgegeben und andererseits hat sich diese dadurch ergeben, da die kritische Beullast für das Referenzsystem rund 64 kN beträgt und man somit für die meisten Systeme unter der kritischen Belastung bleibt. Des Weiteren kann die Belastungsgröße, bis auf wenige Ausnahmen, für die gesamte Parameterstudie beibehalten werden, wodurch einheitliche Randbedingungen für eine einfachere Auswertung geschaffen werden.

Die vertikale Lasteinleitung erfolgt ebenfalls durch eine Knotenlast in den beiden oberen Rahmenecken. Diese vertikale Last stellt die Last darüber befindlicher Fassadenelemente dar. Für die vertikale Belastung wird das Eigengewicht der Konstruktion herangezogen.

Windsog wird durch eine Flächenlast auf die Glasscheibe aufgebracht. Die Größe der Belastung wird mit 1 kN/m^2 angenommen.

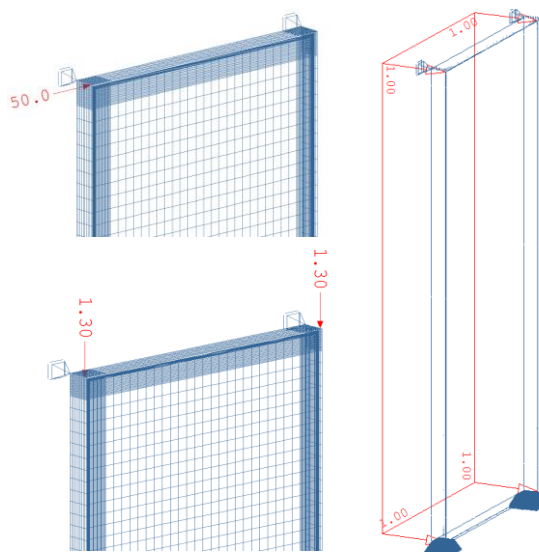


Abb. 40 Lastaufbringung im Modell (Lasten in kN bzw. kN/m²)

3.3.1 Lasteinleitung

Im Bereich der Klotzung sind erhöhte Hauptzugspannungen zu erkennen, welche sich auf Grund des hohen Steifigkeitsunterschiedes (freier Rand zu geklotztem Rand) ergeben. Die Spannungen werden in diesen Bereichen infolge einer Netzverfeinerung immer größer, da sich die Knoten dem Bereich des Steifigkeitssprungs annähern und dort sehr hohe Spannungen auftreten, die sich jedoch durch die Verformung der Klotzung in der Realität etwas verlagern. Da jedoch bei der Referenzscheibe die maximale Hauptzugspannung im Bereich der unteren Halbwelle auftritt, wird der Lasteinleitungsbereich nicht näher untersucht.

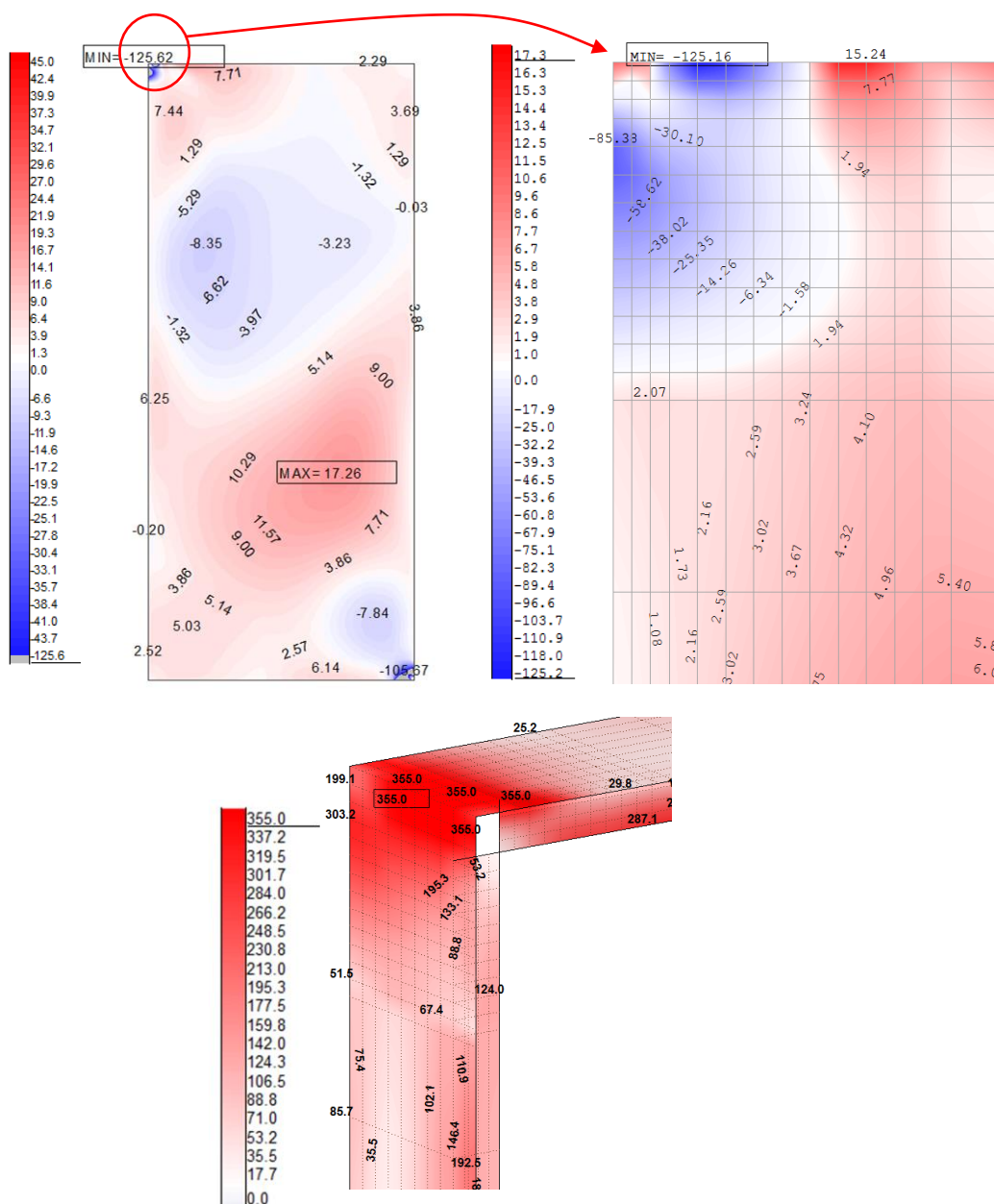


Abb. 41 Links: Hauptspannungen oberes linkes Eck der Referenzscheibe, Rechts: Vergleichsspannungen im Lasteinleitungsbereich des Rahmens

Die Verdrehung des Rahmenprofils im Bereich der Lasteinleitung erfolgt durch die Klotzung der Scheibe. Aufgrund der exzentrischen Reaktionskraft im Klotzungsbereich entsteht eine Torsionsbelastung des Rahmens, welche aufgrund des verdrehweichen Querschnitts zu einer Verdrehung um die globale x-Achse (rote Achse in Abb. 43) entgegen dem Uhrzeigersinn führt. Die Lagerungen der Scheibe und des Gesamtmodells wurden in Abb. 43 ausgeblendet, um die Verformungen besser zu erkennen.

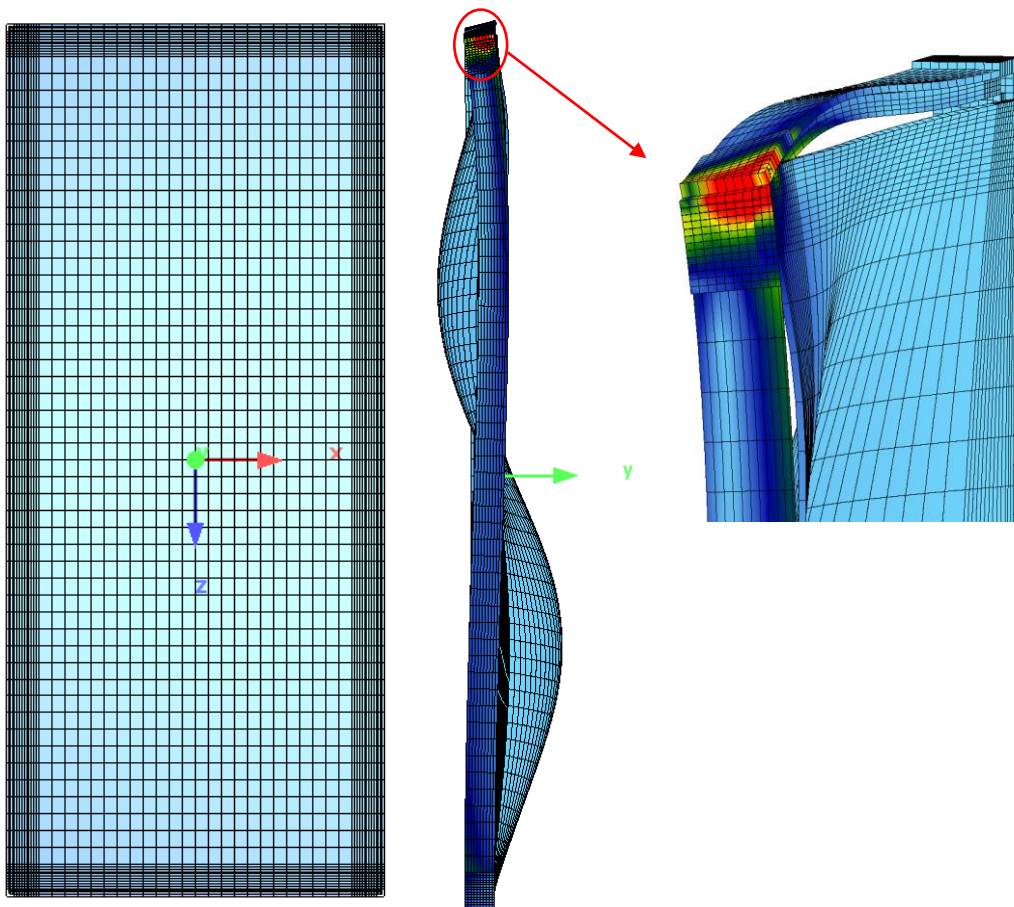


Abb. 43 Verdrehung des Rahmenprofils im Lasteinleitungsbereich (30-fach überhöht)

3.4 Berechnungsverfahren

Als Berechnungsverfahren wird die Theorie 3. Ordnung gewählt, da aufgrund der Vorverformung und der großen horizontalen Belastung mit einer größeren Verformung des Systems zu rechnen ist. Bei der Berechnung werden über das nichtlineare Materialverhalten das bilineare Materialgesetz von Stahl und der Zugausfall der Klotzungsfedern berücksichtigt.

Allgemein wird bei der Theorie 3. Ordnung das Gleichgewicht am verformten System berücksichtigt und ist vor allem für Berechnungen, bei denen größere Verformungen zu erwarten sind (Seilberechnungen, Plattenbeulen, etc.) zu verwenden. Der Unterschied zwischen Theorie 2. Ordnung und 3. Ordnung ist jener, dass bei der Theorie 3. Ordnung die Längenänderung des Systems berücksichtigt wird. Bei der Theorie 2. Ordnung kommt es hingegen nur zu einer Verringerung der geometrischen Steifigkeit, wodurch sich zusätzliche Verschiebungen ergeben, die wiederum eine zusätzliche Beanspruchung verursachen. Bei der Theorie 3. Ordnung hingegen wird die real verformte Lage berücksichtigt. In Abb. 44 ist ein Beispiel dazu angeführt. Bei der Berechnung mit Theorie 2. Ordnung wird der Stab länger und es stellt sich lediglich eine Verschiebung horizontal zum Stab ein. Die Theorie 3. Ordnung verfolgt hingegen den physikalisch richtigen Verformungsweg. Des Weiteren werden auch die Zugkräfte, welche sich infolge einer Längenänderung des Systems ergeben, berücksichtigt. Diese führen zu einem „steiferen“ Verhalten, wodurch die Durchbiegung verringert wird. Mit der Theorie 3. Ordnung kann deshalb auch das überkritische Beultragverhalten analysiert werden. In Sofistik wird mit Hilfe des modifizierten Newton-Verfahrens (siehe [36]) das Gleichungssystem solange iteriert, bis eine Energiekonvergenz erreicht wird oder die Restkräfte einen definierten Grenzwert erreicht haben.

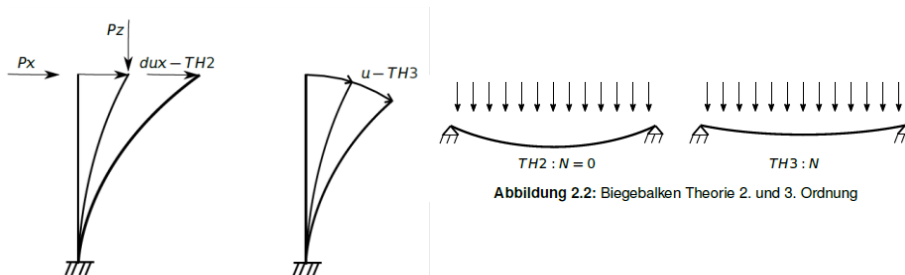


Abb. 44 Unterschied Theorie 2. Ordnung und Theorie 3. Ordnung [36]

Die Berechnungen und Kombinationen erfolgen mit charakteristischen Werten ohne Sicherheitsbeiwert, da das Ziel dieser Arbeit die Nachbildung bzw. Simulation des Versuchsaufbaus ist und somit mit keiner Streuung der Lasteinwirkung zu rechnen ist. Daher werden auch die charakteristischen Spannungen mit den charakteristischen Festigkeitswerten für Glas nach ÖNorm B 3716-1 [38] und für Stahl nach ÖNorm B 1993-1-1 [39] verglichen.

Annahmen für die Berechnung:

- Ebenbleiben des Querschnitts
- Ideal linear elastisches Materialverhalten von Glas
- Ideal elastisch – ideal plastisches Materialverhalten des Baustahls S355

4 Parameterstudie

Die zu untersuchenden Parameter sind in einer Tabelle zusammengestellt. Für jeden Parameter werden fünf unterschiedliche Werte untersucht und anschließend der Einfluss auf die Verformungen und Spannungen der Konstruktion ausgewertet.

PARAMETERMATRIX					
Abmessungen des Referenzsystems:			Belastung des Referenzsystems:		
Scheibenhöhe	3500	[mm]	vertikale Last:	2,6	[kN]
Scheibenbreite	1500	[mm]	Windlast:	1,0	[kN/m ²]
Scheibendicke	10	[mm]	hor. Einzellast:	10	[kN]
E-Modul Klotzung	2500	[N/mm ²]		20	[kN]
E-Modul Klebung	1,4	[N/mm ²]		30	[kN]
Rahmendicke	10	[mm]		40	[kN]
Rahmentiefe	90	[mm]		50	[kN]
Rahmeneckprofilstärke	15	[mm]			
Stegdick	10	[mm]			
Belastungssituation:					
LF 1: H	horizontale Last (Wirkungsrichtung in Scheibenebene)				
Beulformen als Vorverformung:					
1. Eigenform					
2. Eigenform					
Vorverformungsfaktor:					
L/500					
Parameter	1.Wert	2.Wert	3.Wert	4.Wert	5.Wert
Lagerung-Scheibe:					
E-Modul Klotzung [N/mm ²]	1,4	250	2500	10.000	70.000
E-Modul Klebung [N/mm ²]	1,00	1,40	10	100	1000
Scheibe:					
Typ:	ESG				
Scheibenhöhe [mm]	1500	2500	3500	4500	5500
Scheibenbreite [mm]	1000	1500	2000	2500	3000
Scheibendicke [mm]	6	8	10	12	15
Vorverformung:					
	L/250	L/500	L/750	L/1000	L/1250
Rahmen:					
Rahmendicke [mm]	5	10	15	20	25
Rahmentiefe [mm]	0	45	90	135	180
Rahmeneckprofildicke [mm]	0	5	10	15	20
Stegdick [mm]	5	10	15	20	25
Belastungsart:					
Lastfall	LF 1 (H)	LF 2 (H+Vk)	LF 5 (H+Vg)	LF 3 (H+W)	LF 4 (H+W+Vk)
	LF 6 (H+W+Vg)				
LEGENDE:					
LF 1 (H)	horizontale Last (Wirkungsrichtung in Scheibenebene)				
LF 2 (H+Vk)	horizontale Last + vertikale Last (Wirkungsrichtung in Scheibenebene)				
LF 3 (H+W)	horizontale Last + Windsog				
LF 4 (H+W+Vk)	horizontale Last + Windsog + vertikale Last				
LF 5 (H+Vg)	horizontale Last + Windsog + vertikale Last x Faktor 50				
LF 6 (H+W+Vg)	horizontale Last + Windsog + vertikale Last x Faktor 50				

Tab. 17 Parametermatrix

4.1 Referenzmodell

Als Ausgangsmodell wird das Referenzmodell verwendet. Belastet wird das Modell durch eine horizontale Einzellast mit 50 kN in Scheibenebene. Das System wird für die Berechnungen einmal mit der 1. Beulform und danach mit der 2. Beulform mit dem Faktor $\frac{1}{500}$ der Scheibenhöhe³ vorverformt.

4.1.1 Vorverformung

Die Vorverformung wird für das gesamte System ermittelt und anschließend sowohl die Glasscheibe als auch der Stahlrahmen vorverformt. Die Abb. 45 zeigt die beiden Vorverformungsvarianten der Glasscheibe und des Stahlrahmens für das Referenzmodell. Diese sind in Blickrichtung der globalen y-Achse (grüne Achse in Abb. 45) auf die X-Z-Ebene und in einer Seitenansicht in der Y-Z-Ebene dargestellt. Die zunächst auf den Wert 1 normierten Beuleigenformen werden mit dem Faktor $\frac{L}{500}$ multipliziert, wodurch sich eine maximale Vorverformung von 7 mm für die Referenzscheibe ergibt.

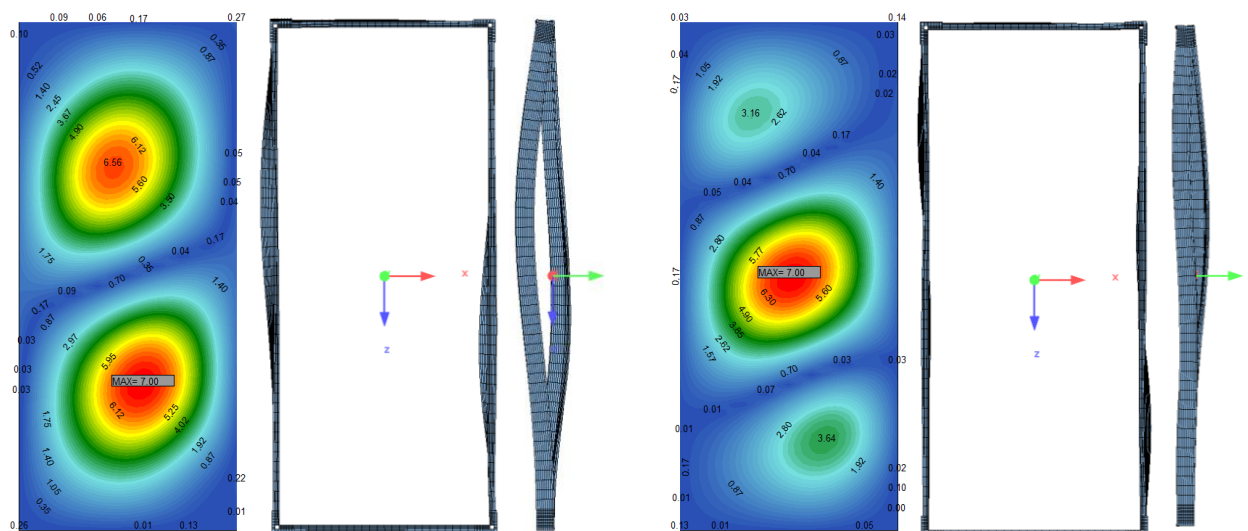


Abb. 45 1. Vorverformung der Glasscheibe und des Stahlrahmens links und 2. Vorverformung rechts; Rahmenvorverformung ist 1500-fach überhöht dargestellt

In weiterer Folge wird für eine bessere Übersicht die Bezeichnung 1. Vorverformung und 2. Vorverformung, welche die Vorverformung des Systems mit der 1. Eigenform bzw. 2. Eigenform beschreibt, eingeführt.

³ Bei der Angabe des Vorverformungsfaktors $L/500$ wird für L die Scheibenhöhe herangezogen.

4.1.2 Verschiebung aus der Scheibenebene

Abb. 46 und Abb. 47 zeigen die Verschiebungen der Glasscheibe aus der Scheibenebene für die beiden Beulformen. Ausgewertet wird entlang der Scheibendiagonale, beginnend vom linken oberen bis zum rechten unteren Scheibeneck. Deutlich zu erkennen ist, dass bei größer werdender Last sich, zusätzlich zu den zwei größeren Beulen, eine kleinere Beule im Lasteinleitungsbereich einstellt. Zudem ist bei jeder Laststeigerung eine annähernd gleichbleibende Zunahme der Verschiebung der Verschiebungskurve zu erkennen. Vergleicht man die Vorverformung mit der Verformung, die sich unter der Lasteinwirkung von 50 kN ergibt, kann eine beinahe doppelt so hohe Verformungszunahme der unteren Halbwelle (siehe Abb. 46) festgestellt werden. Auch das System mit der 2. Vorverformung zeigt unter der Belastung von 50 kN einen beinahe doppelt so großen Verformungszuwachs gegenüber der Vorverformung (siehe Abb. 47). Erkennbar ist, dass bei Belastungen unter der kritischen Beullast in etwa ein linearer Verformungszuwachs zu erwarten ist.

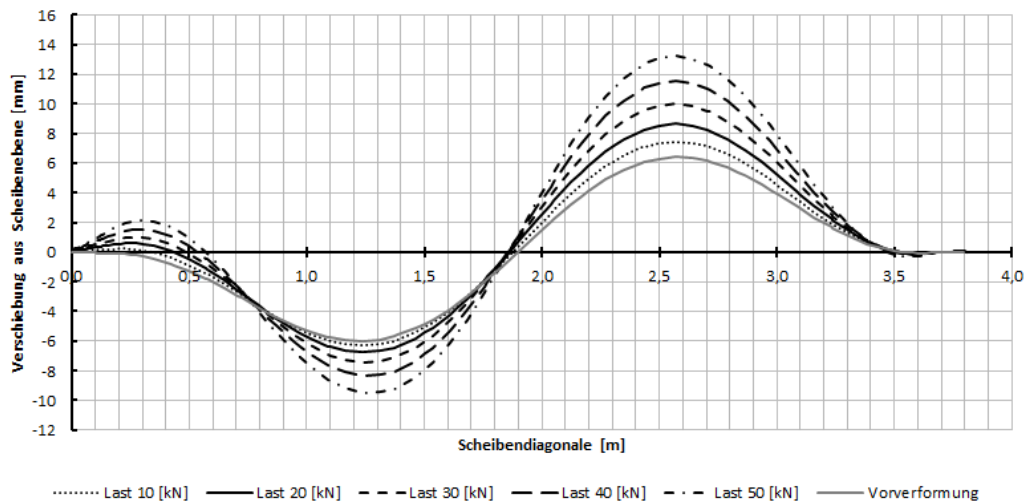


Abb. 46 Verschiebungskurven mit der 1. Vorverformung

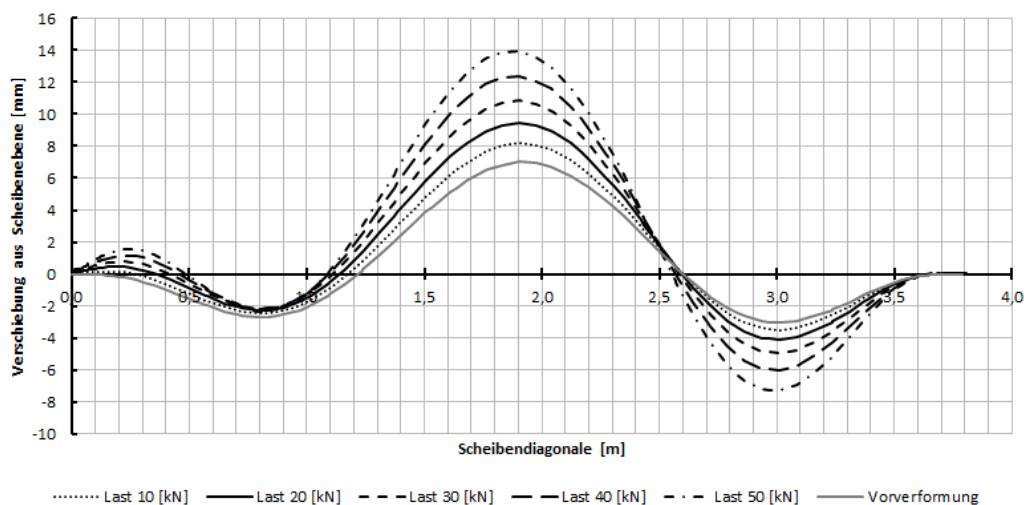


Abb. 47 Verschiebungskurven mit der 2. Vorverformung

4.1.3 Hauptspannungen

In Abb. 48 wird der Einfluss der Belastungsgröße auf die maximalen Hauptzugspannungen der Glasscheibe aufgezeigt. Hierzu wird die Oberseite der Glasscheibe als auch die Unterseite der Glasscheibe mit der 1. Vorverformung (V1) und der 2. Vorverformung (V2) ausgewertet.

Allgemein kann eine lineare Abhängigkeit der Hauptzugspannungen von der Belastungsschrittweite festgestellt werden. Eine leichte Abweichung des linearen Verlaufes kann lediglich beim System mit der 2. Vorverformung an der Scheibenunterseite festgestellt werden. Der Ort der maximal auftretenden Hauptspannungen kann bei jeder Belastungsstufe an der unteren Halbwelle festgestellt werden. Unterstützend zum Diagramm in Abb. 48 werden in Kapitel 4.1.3 die Hauptspannungsbilder der jeweiligen Belastungsschritte dargestellt. Interessant ist, dass bei der Untersuchung der Hauptzugspannungen mit der 2. Vorverformung, nicht die mittlere Halbwelle die größten Hauptzugspannungen aufweist, sondern die Halbwelle im rechten unteren Eck mit einer nur halb so großer Vorverformungsamplitude aus der Ebene. Ein Grund dafür ist, dass durch die starke Krümmung der Halbwelle die Druckkräfte stark umgeleitet werden, wodurch an der gegenüberliegenden Seite hohe Hauptzugspannungen entstehen.

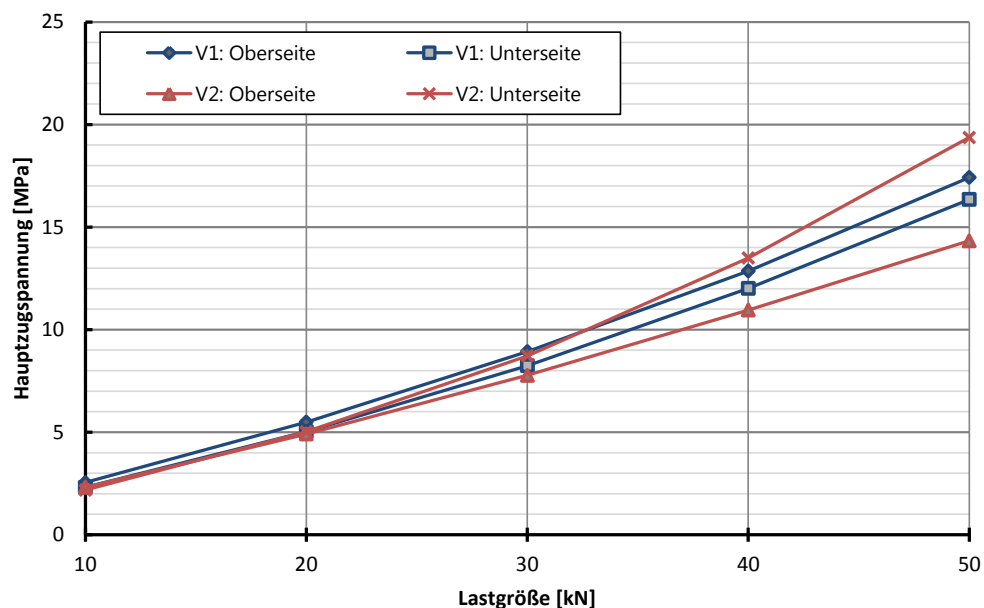


Abb. 48 Einfluss der Belastungsgröße auf die Hauptzugspannungen

Die Hauptspannungen werden in Höhenflächen dargestellt. Die Farbe Rot stellt die Hauptzugspannungen und Blau die Hauptdruckspannungen dar. Die Farbe Weiß kennzeichnet den Nulldurchgang und die sehr hellen Bereiche zeigen die gering beanspruchten Stellen der Scheibe. Für einen leichteren Vergleich wird für die Auswertung eine einheitliche Farbskala verwendet, mit einem Bereich von $+45 \text{ N/mm}^2$ bis -45 N/mm^2 . Die grau angezeigten Werte zeigen Spannungsmaxima, welche über den Bereich der Farbskala hinausgehen. Diese treten überwiegend in den Bereichen der Lasteinleitung bzw. Lastausleitung auf. Zudem kann man feststellen, dass die Hauptzugspannungen bei

einer Belastung knapp unter der kritischen Beullast nur sehr gering sind, da diese wesentlich unter der maximal aufnehmbaren Hauptzugspannung von 120 N/mm^2 für ESG liegen (siehe Abb. 49 und Abb. 50). Dies verdeutlicht, dass das Stabilitätsversagen früher eintritt als das Erreichen der maximal aufnehmbaren Spannung der Glasscheibe.

Hauptspannungen an der Oberseite mit der 1. Eigenform als Vorverformung:

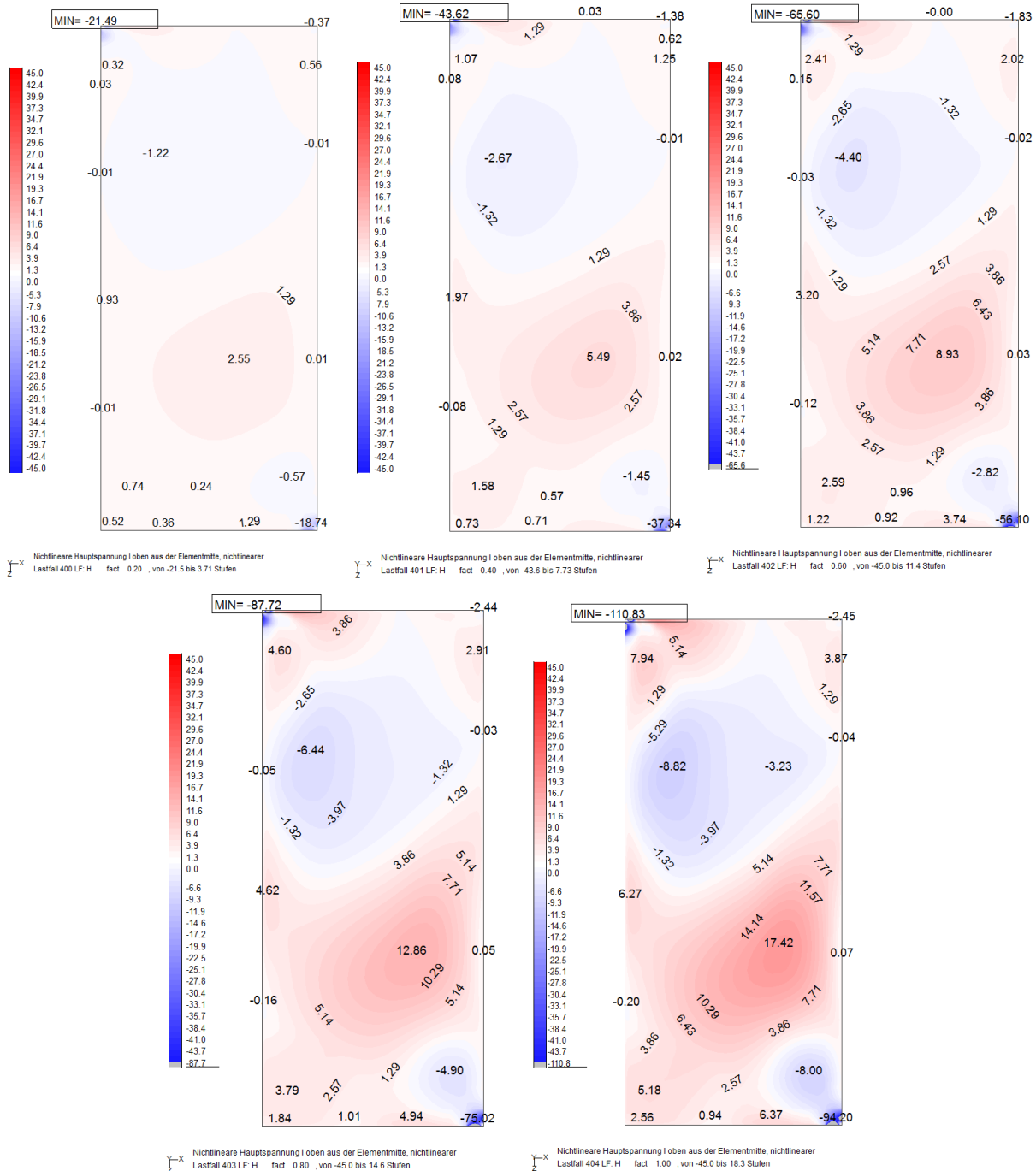


Abb. 49 Hauptzugspannungen auf der Glasoberseite mit der 1. Vorverformung des Systems für 10, 20, 30, 40 und 50 kN Horizontallast (von links nach rechts)

Hauptspannungen an der Unterseite mit der 1. Eigenform als Vorverformung:

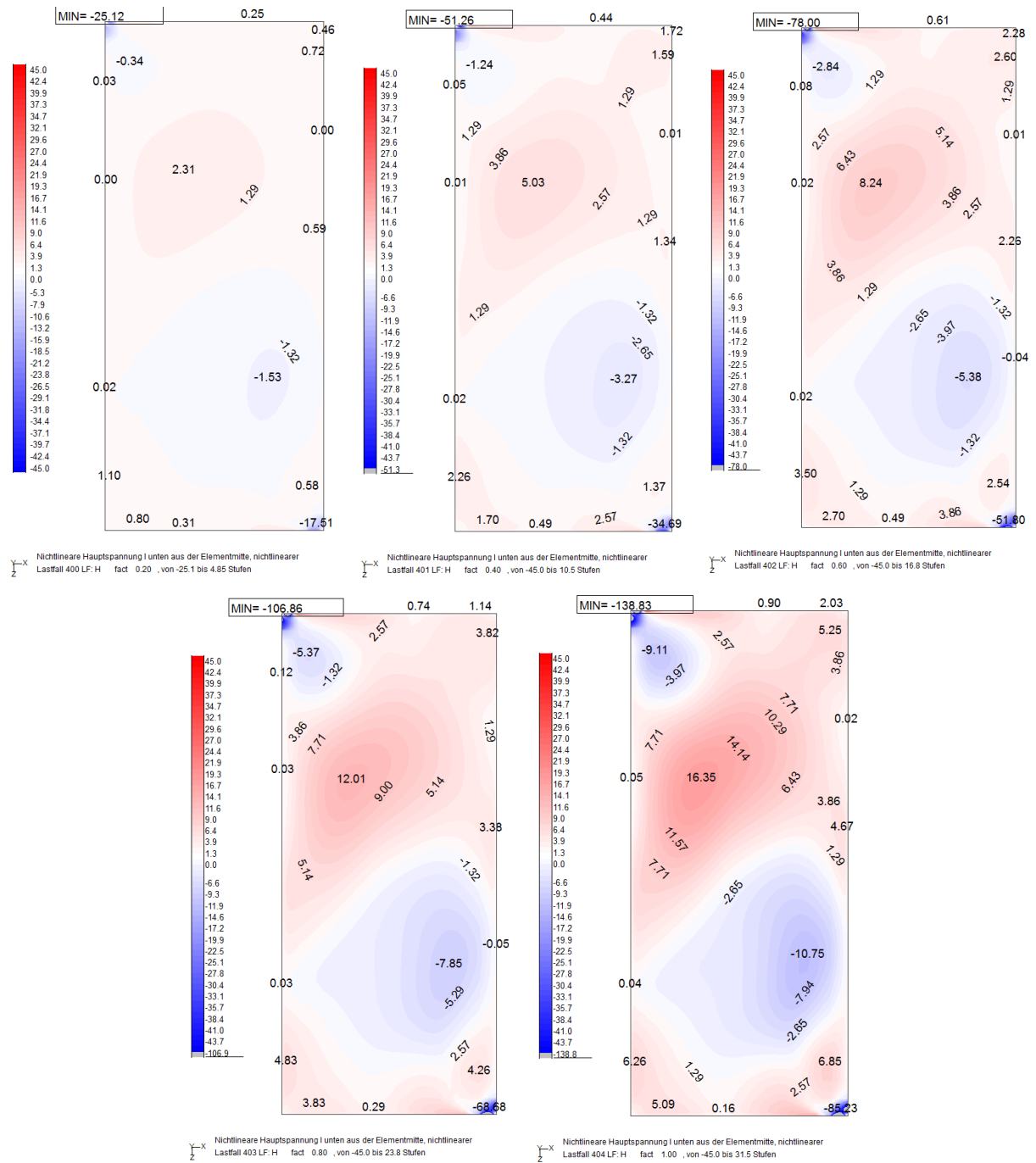


Abb. 50 Hauptzugspannungen auf der Glasunterseite mit der 1. Vorverformung des Systems für 10, 20, 30, 40 und 50 kN Horizontallast (von links nach rechts)

Hauptspannungen an der Oberseite mit der 2. Eigenform als Vorverformung:

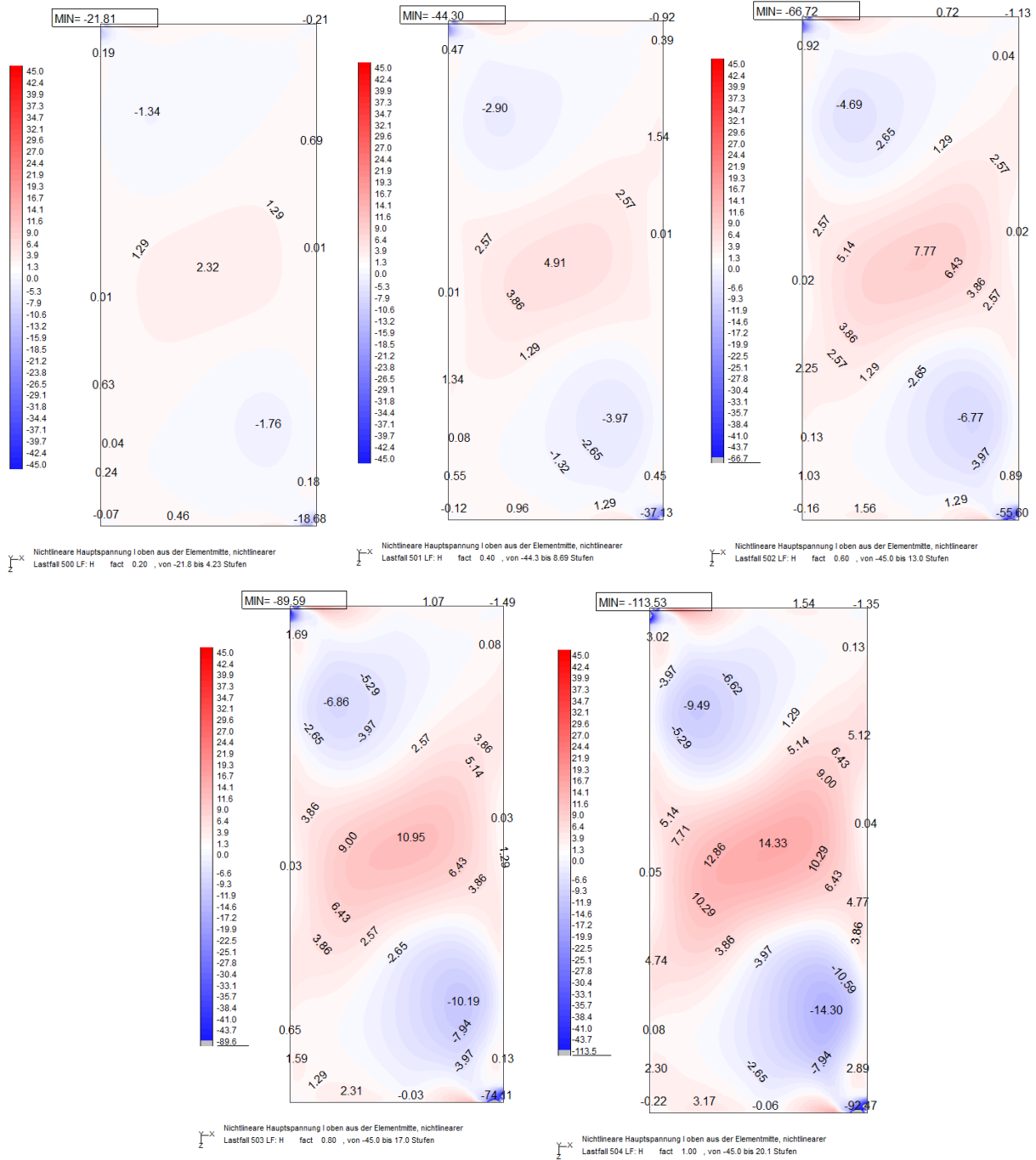


Abb. 51 Hauptzugspannungen auf der Glasoberseite mit der 2. Vorverformung des Systems für 10, 20, 30, 40 und 50 kN Horizontallast (von links nach rechts)

Hauptspannungen an der Unterseite mit der 2. Eigenform als Vorverformung:

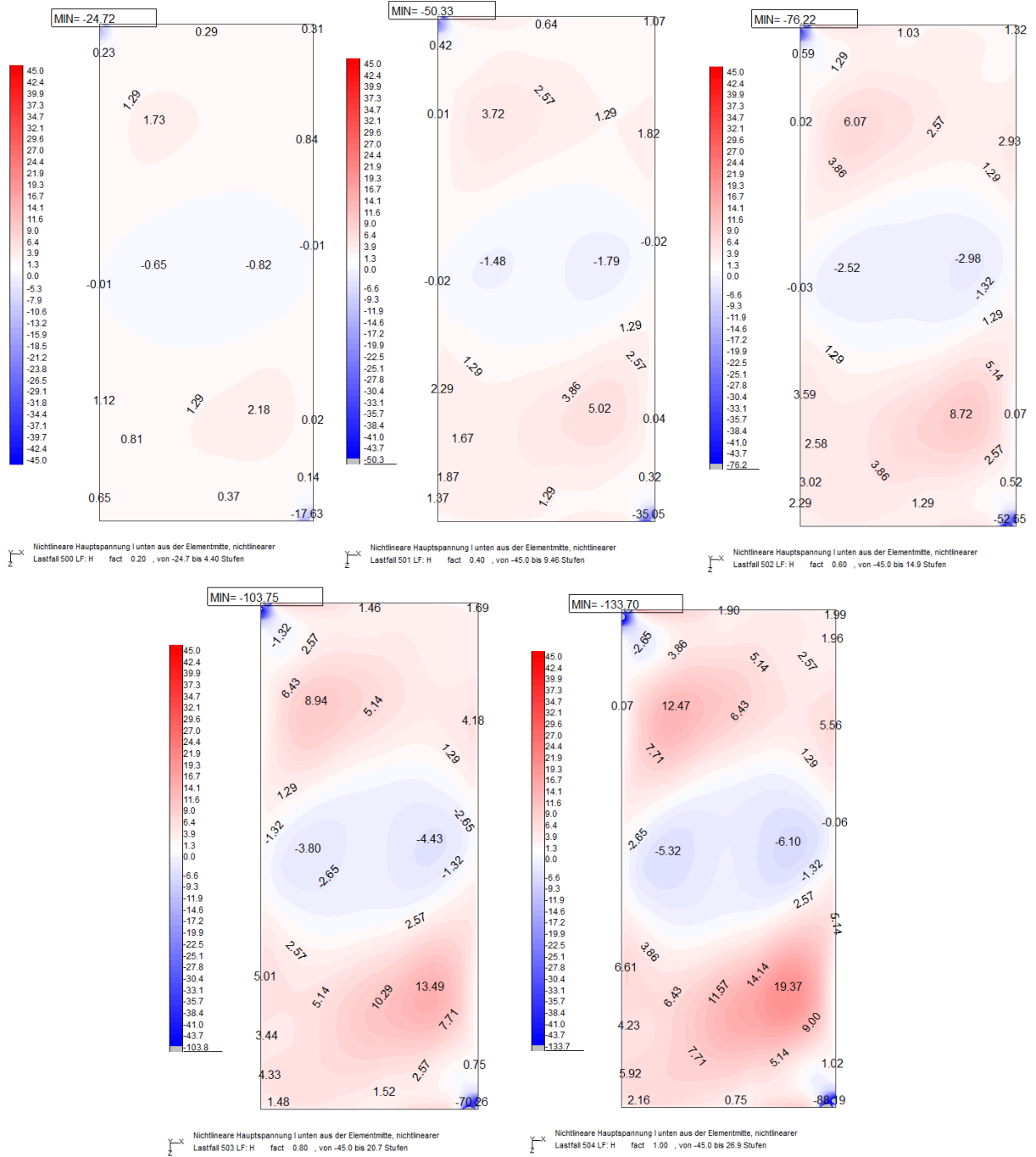
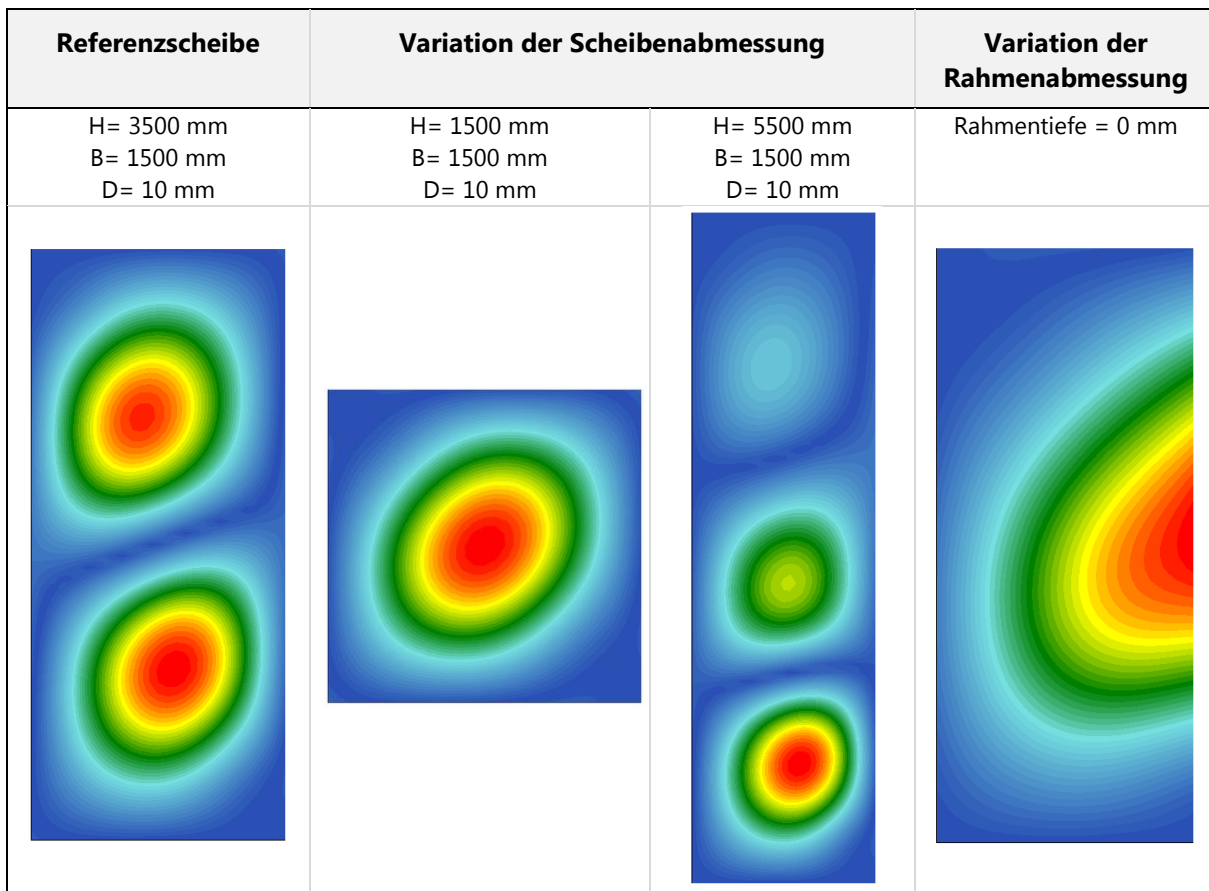


Abb. 52 Hauptzugspannungen auf der Glasunterseite mit der 2. Vorverformung des Systems für 10, 20, 30, 40 und 50 kN Horizontallast (von links nach rechts)

5 Ergebnisse: Glasscheibe

5.1 Eigenformen & Eigenwerte

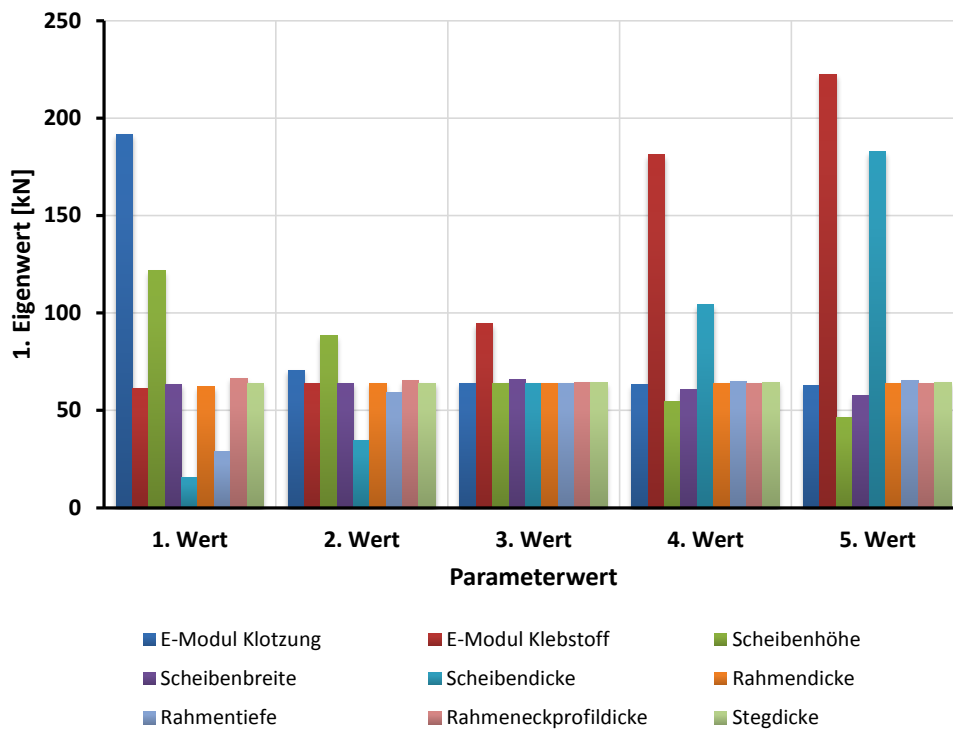
Durch die Variation der verschiedenen Parameter kommt es zu unterschiedlichen Eigenformen und Ausweichrichtungen der Halbwellen. Um einen Vergleich der Verschiebungen der verschiedenen Systeme machen zu können, wird die Verschiebungsrichtung der Halbwellen so angepasst, dass diese der Richtung des Referenzsystems entspricht. Ein signifikanter Einfluss auf die Eigenformen hat sich bei der Variation der Scheibenbreite, Scheibenhöhe und der Rahmentiefe gezeigt. Daher werden die Eigenformen, die sich am deutlichsten vom Referenzsystem unterscheiden, dargestellt. Bei der quadratischen Scheibe stellt sich anstatt der zwei Halbwellen eine größere Halbwelle entlang der Zugdiagonale ein. Dadurch treten deutlich geringe Hauptzugspannungen auf, wodurch sich ein günstigeres Tragverhalten ergibt. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass bei zunehmender Scheibenhöhe die Anzahl der Halbwellen zunimmt und desto größer werden die Hauptzugspannungen. Bei einer Rahmentiefe von 0 mm kommt es aufgrund der geringen Rahmensteifigkeit zu einer Halbwelle, bei der die maximale Auslenkung am Scheibenrand auftritt.



Legende: H = Scheibenhöhe, B = Scheibenbreite, D = Scheibendicke; Belastung: horizontale Einzellast mit 50 kN

Abb. 53 Vergleich der 1. Eigenform bei unterschiedlichen Systemabmessungen

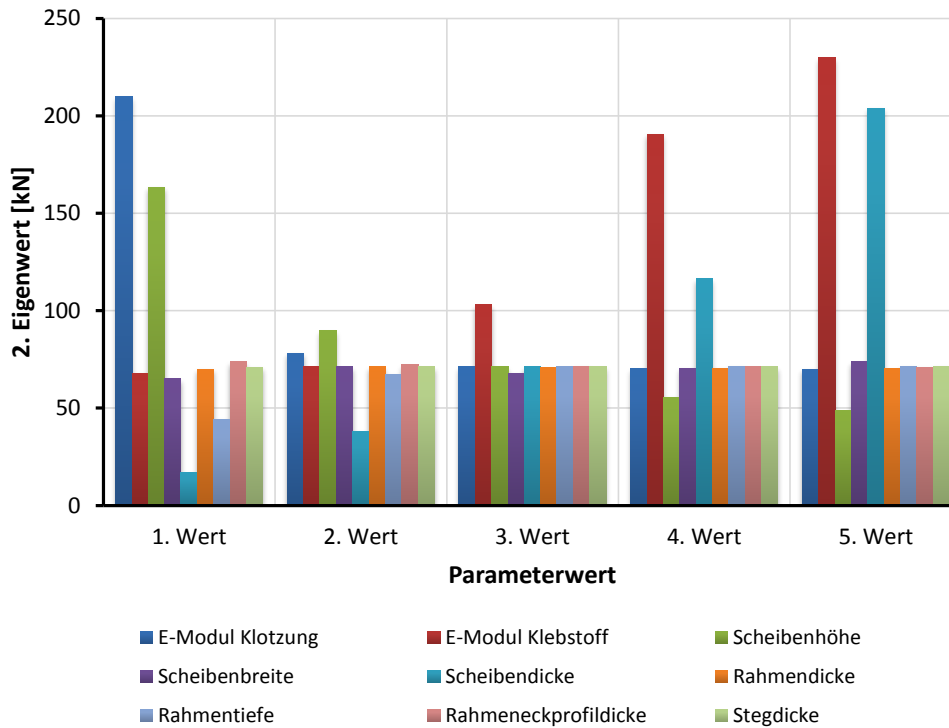
In Tab. 18 wird der Einfluss der Parametervariation auf die Beuleigenwerte gezeigt. Da die Eigenformen für eine Last von 1 kN ermittelt wurden, stellt dieser den Faktor dar, mit welchem die horizontale Last von 1 kN multipliziert werden muss, bei dem das perfekte System ausweicht. Deutlich zu erkennen ist, dass die Variation des E-Moduls vom Klebstoff und der Scheibendicke einen starken Einfluss auf das Stabilitätsverhalten der Tragstruktur haben. Die anderen Werte beeinflussen das Stabilitätsverhalten nur gering.



Eigenwerte der 1. Eigenform					
	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	5. Wert
<i>Anmerkung: Die Parameterwerte können in der Abbildung 49 nachgelesen werden.</i>					
E-Modul	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
E-Modul Klotzung	191,7	70,65	64,04	63,16	62,81
E-Modul Klebstoff	61,24	64,04	94,43	181,11	222,44
Scheibenabmessung					
Scheibenhöhe	121,68	88,36	64,04	54,52	46,41
Scheibenbreite	63,47	64,04	65,71	60,75	57,60
Scheibendicke	15,45	34,63	64,04	104,16	182,89
Rahmenabmessung					
Rahmendicke	62,18	64,04	64,02	63,88	63,85
Rahmentiefe	29,11	58,91	64,04	64,97	65,16
Rahmeneckprofildicke	66,57	65,19	64,50	64,04	63,71
Stegdicke	63,80	64,04	64,23	64,38	64,55

Die Werte des Referenzsystems wurden blau markiert.

Tab. 18 Einfluss der Parametervariation auf die Eigenwerte der 1. Eigenform



Eigenwerte der 2. Eigenform					
	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	5. Wert
<i>Anmerkung: Die Parameterwerte können in der Abbildung 49 nachgelesen werden.</i>					
E-Modul	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
E-Modul Klotzung	209,74	78,23	71,10	70,19	69,85
E-Modul Klebstoff	67,95	71,10	102,98	190,66	229,76
Scheibenabmessung					
Scheibenhöhe	163,35	89,63	71,1	55,51	48,57
Scheibenbreite	64,89	71,10	67,81	70,39	73,88
Scheibendicke	16,83	38,15	71,10	116,25	203,82
Rahmenabmessung					
Rahmendicke	69,97	71,10	70,74	70,42	70,28
Rahmentiefe	44,21	67,26	71,10	71,43	71,37
Rahmeneckprofildicke	73,82	72,28	71,56	71,10	70,79
Stegdicke	70,98	71,10	71,19	71,25	71,34

Die Werte des Referenzsystems wurden blau markiert.

Tab. 19 Einfluss der Parametervariation auf die Eigenwerte der 2. Eigenform

5.2 Verschiebungen und Spannungen der Glasscheibe

Bei der Auswertung der Verschiebung entlang der Glasscheibendiagonale kennzeichnet die durchgezogene Linie die Werte der Referenzscheibe, um einen einfacheren Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen. Abb. 54 und Abb. 55 sowie Tab. 20 geben den Einfluss der Parametervariation auf die Hauptzugspannungen wieder. Erkennbar ist, dass der stärkste Einfluss bei der Variation der Scheibenabmessungen auftritt, wohingegen bei der Variation des Rahmens kaum Veränderungen der maximal auftretenden Hauptzugspannungen erkennbar sind. Auch die Variationen der E-Moduli von Klotzung und Klebstoff zeigt nur einen mäßigen Einfluss auf die maximalen Hauptzugspannungen. Die rot markierten Werte in Tab. 20 kennzeichnen maximalen Hauptzugspannungen, die jedoch nicht an der unteren Halbwelle auftreten. Bei der Rahmentiefe von 0 mm konnte nicht die volle Last aufgebracht werden, weshalb dieser Wert mit einem * versehen wurde. Werden die Ergebnisse in den folgenden Kapiteln für das System mit der 2. Eigenform als Vorverformung nicht explizit angeführt, hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse des Systems mit der 1. Eigenform und der 2. Eigenform eine ähnliche Parameterabhängigkeit ergeben haben und somit kein wesentlicher Unterschied bei der Ergebnisinterpretation zu erwarten ist.

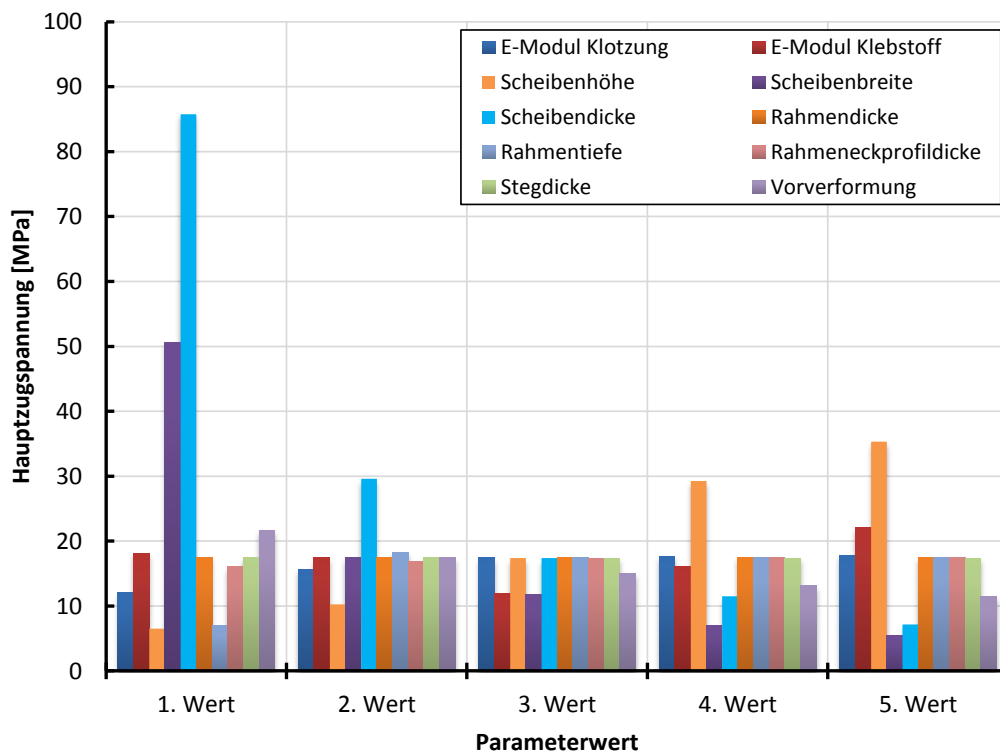


Abb. 54 Einfluss der Parametervariation auf die Hauptzugspannungen mit der 1. Vorverformung des Systems

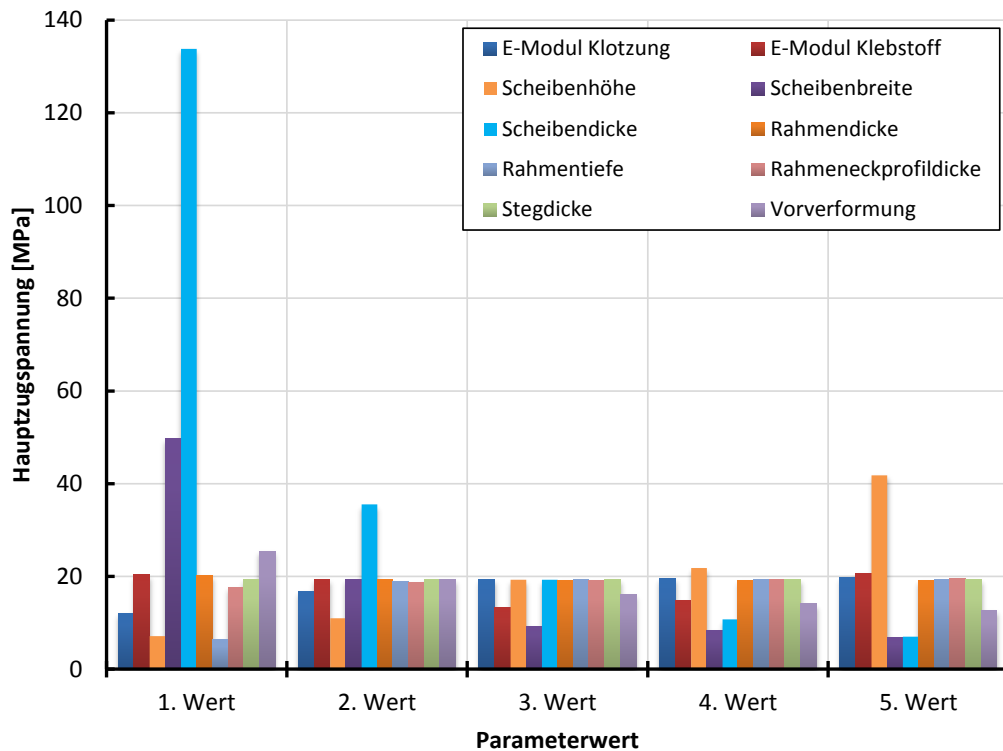


Abb. 55 Einfluss der Parametervariation auf die Hauptzugspannungen mit der 2. Vorverformung des Systems

	Max. Hauptspannung bei 1. Vorverformung					Max. Hauptspannung bei 2. Vorverformung				
	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	5. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	5. Wert
E-Modul	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
E-Modul Klotzung	12,04	15,64	17,42	17,70	17,81	12,07	16,80	19,34	19,67	19,82
E-Modul Klebstoff	18,10	17,42	11,97	16,12	22,07	20,40	19,34	13,20	14,74	20,68
Scheibenabmessung										
Scheibenhöhe	6,53	10,27	17,42	29,28	35,33	7,16	10,98	19,34	21,82	41,83
Scheibenbreite	50,62	17,42	11,82	6,94	5,55	49,68	19,34	9,24	8,33	6,91
Scheibendicke	85,79	29,60	17,42	11,52	7,19	133,78	35,56	19,34	10,77	7,04
Rahmenabmessung										
Rahmendicke	17,47	17,42	17,52	17,50	17,51	20,25	19,34	19,24	19,19	19,12
Rahmentiefe	6,95*	18,24	17,42	17,44	17,51	6,35*	18,87	19,34	19,32	19,27
Rahmeneckprofildicke	16,03	16,83	17,26	17,42	17,54	17,61	18,68	19,18	19,34	19,45
Stegdicke	17,44	17,42	17,41	17,41	17,41	19,32	19,34	19,34	19,35	19,35
Vorverformung	21,66	17,42	15,04	13,08	11,45	25,43	19,34	16,10	14,14	12,74

Anmerkung:

Bei den rot markierten Werten ist die maximale Hauptzugspannung nicht an der unteren Halbwelle.

* Es wurde eine geringere Laststufe verwendet.

Die Werte des Referenzsystems wurden blau markiert.

Tab. 20 Vergleich der maximalen Hauptzugspannungen

5.2.1 E-Modul Klotzung

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Bei der Variation des E-Moduls der Klotzung kann festgestellt werden, dass ab einer Steifigkeit von 250 N/mm^2 kein signifikanter Unterschied bei der Verformung der Scheibe aus der Ebene festzustellen ist. Bei einer sehr geringen Steifigkeit der Klotzung von $1,4 \text{ N/mm}^2$ sind deutlich geringere Verformungen zu beobachten. Mögliche Gründe dafür sind, dass aufgrund der geringen Steifigkeit die Lasteinleitung eher über die Klebung erfolgt, da bei einem Wert von $1,4 \text{ N/mm}^2$ der E-Modul der Klotzung dem der Klebung entspricht und somit eine gleichmäßigere Lasteinleitung zustande kommt. Dadurch kommt es im Bereich der Klotzung zu einer geringeren Beanspruchung, weshalb gegenüber den anderen E-Moduli keine Beule im Lasteinleitungsbereich bei einem E-Modul von $1,4 \text{ N/mm}^2$ auftritt.

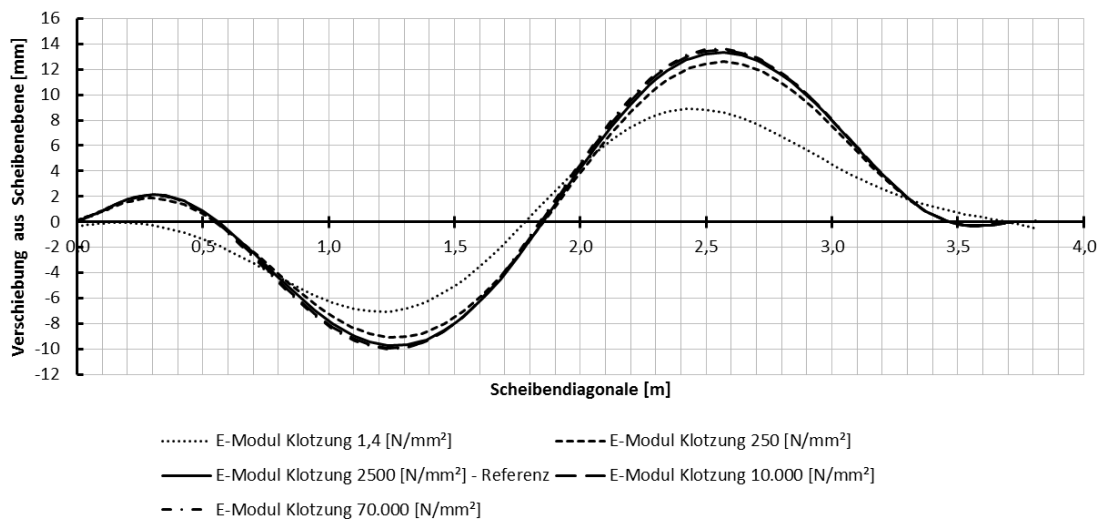


Abb. 56 Einfluss der Variation des E-Moduls der Klotzung auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

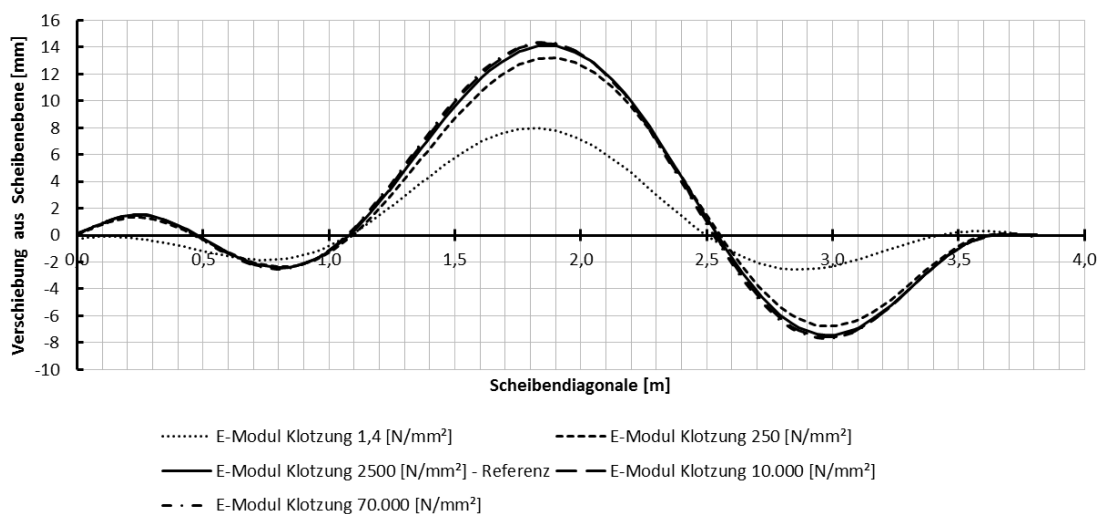


Abb. 57 Einfluss der Variation des E-Moduls der Klotzung auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Bei einem E-Modul von $1,4 \text{ N/mm}^2$ erhält man einen deutlich anderen Hauptspannungsverlauf gegenüber der Referenzscheibe. Die Hauptzugspannungen sind in den Bereichen der Beule aufgrund der geringen Amplitude der Beulform wesentlich geringer, jedoch steigen diese merklich zu den Rändern der zugausfallenden Klotzung hin an, da infolge der Verschiebung der Klebstoff auf Schub aktiviert wird (siehe Abb. 59) und somit die rückhaltenden Zugkräfte deutlich zunehmen.

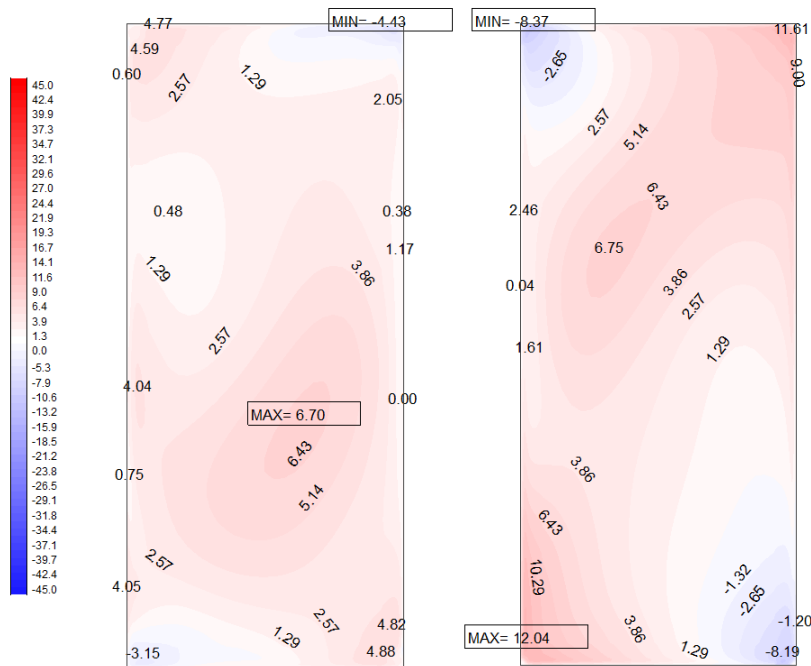


Abb. 58 Einfluss der Variation des E-Moduls der Klotzung auf die Hauptzugspannungen auf der Oberseite links und auf der Unterseite rechts mit der 1. Vorverformung

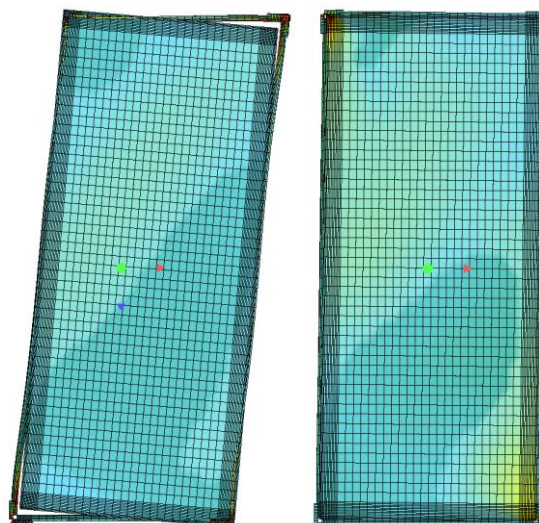


Abb. 59 Vergleich der Verformungsfigur des Systems mit einem E-Modul von $1,4 \text{ N/mm}^2$ links und der des Referenzsystems rechts (4-fach überhöht dargestellt)

5.2.2 E-Modul Klebung

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Variiert man den E-Modul des Klebstoffes, ist aus den Ergebnissen ersichtlich, dass sich ab einer Steifigkeit von rund 10 N/mm^2 eine deutlich geringere Verformung der Scheibe aus der Ebene ergibt. Zudem kommt es im Scheibeneck, an der Stelle der Lasteinleitung, zu einer deutlichen Reduktion der Verformung, wodurch eine homogenere Lasteinleitung gewährleistet werden kann.

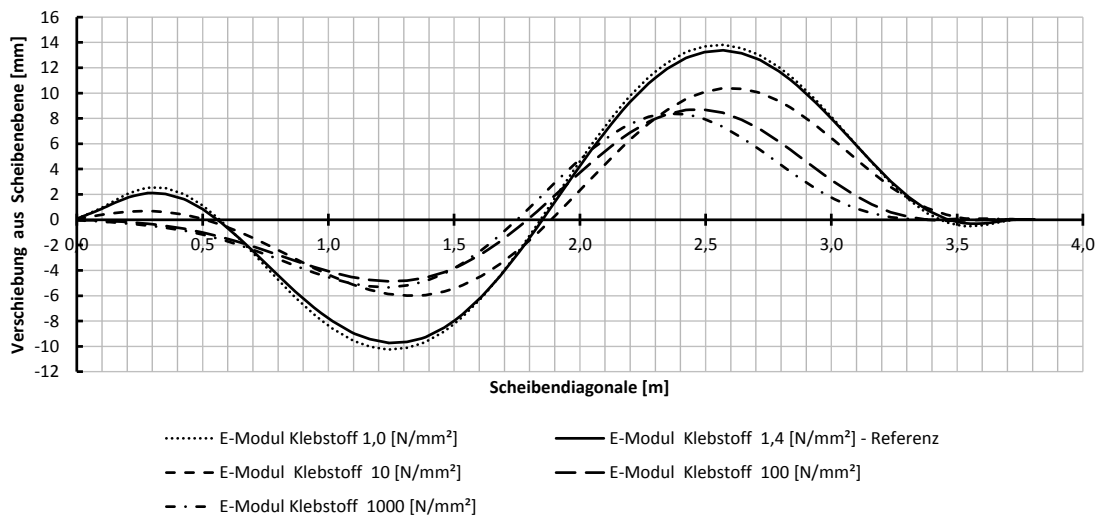


Abb. 60 Einfluss der Variation des E-Moduls des Klebstoffs auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

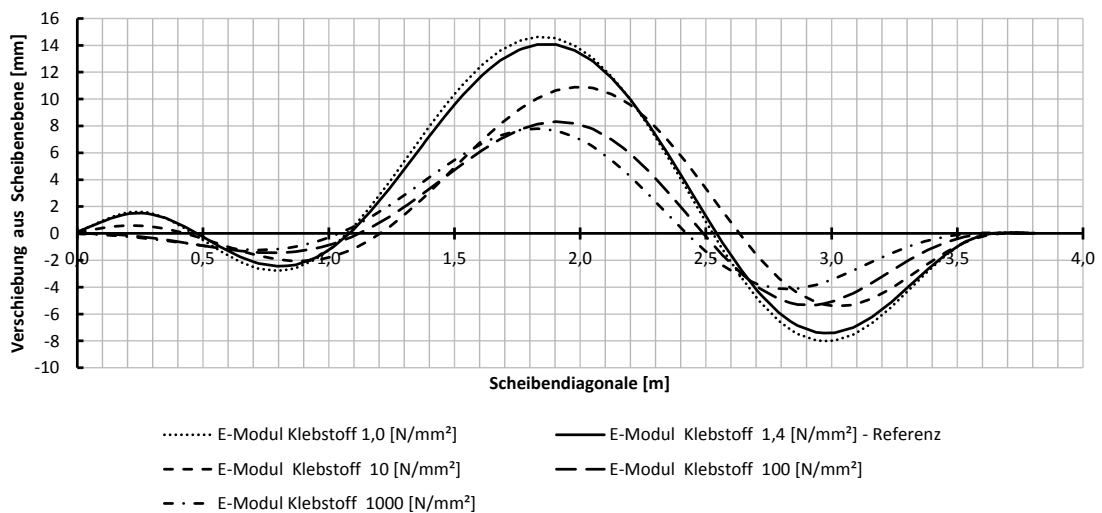


Abb. 61 Einfluss der Variation des E-Moduls des Klebstoffs auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Die Hauptzugspannungen nehmen mit zunehmendem E-Modul des Klebstoffes in der Scheibenmitte ab und zu den Rändern hin zu (siehe Abb. 62 und Abb. 63). Einen deutlichen Einfluss auf die Hauptzugspannungen im Bereich der unteren Beule kann man zwischen E-Moduli von 1,4 N/mm² und 100 N/mm² erkennen, wohingegen die Randhauptzugspannungen ab einem E-Modul von 1,4 N/mm² merklich zunehmen. Die Verformung des Rahmens hingegen wird bei zunehmender Klebersteifigkeit deutlich geringer.

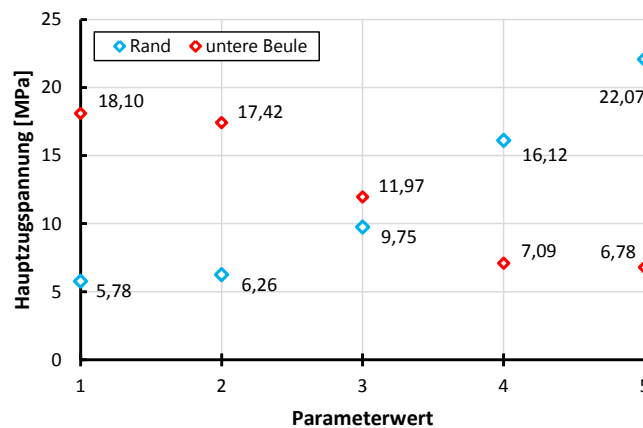


Abb. 62 Einfluss der Klebersteifigkeit auf die Hauptzugspannungen des System mit der 1. Vorverformung

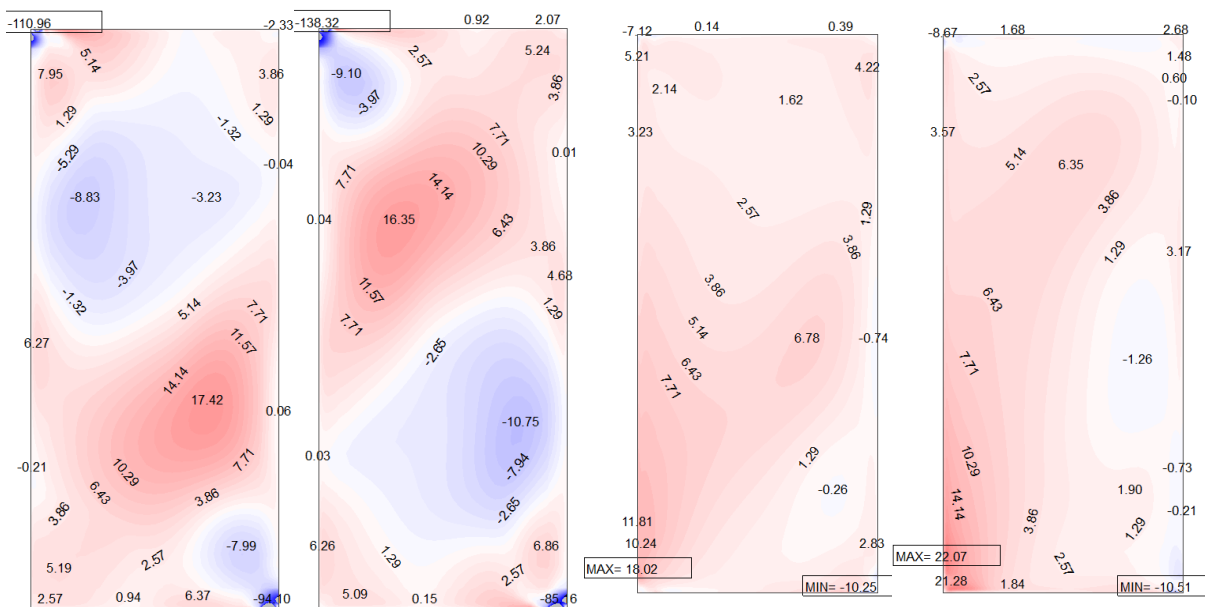


Abb. 63 Vergleich der Hauptzugspannungen des Referenzsystem (1.- und 2. Bild) mit den bei einem E-Modul des Klebstoffs von 1000 N/mm² (3.- und 4. Bild) an der Ober- bzw. Unterseite für das System mit der 1. Vorverformung

5.2.3 Scheibenhöhe

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Bei der Variation der Scheibenhöhe stellt sich, wie schon eingangs erwähnt, abhängig von der Höhe eine wesentlich andere Beulform ein. Bei quadratischen Abmessungen tritt eine größere Beule auf, wohingegen sich bei zunehmender Höhe vier oder mehr Beulen ergeben. Mit zunehmender Höhe werden auch die maximalen Verschiebungen aus der Scheibenebene deutlich größer.

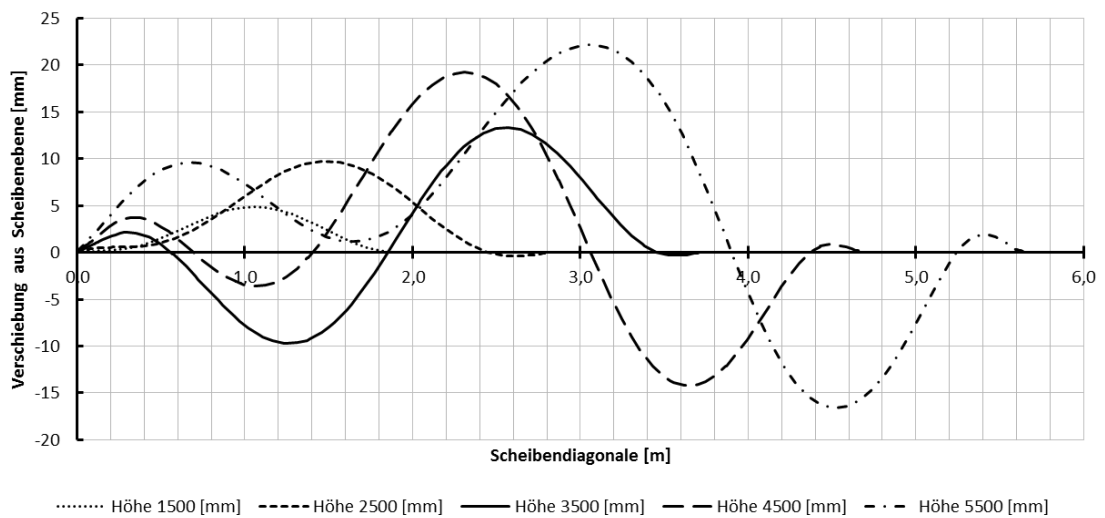


Abb. 64 Einfluss der Variation der Scheibenhöhe auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

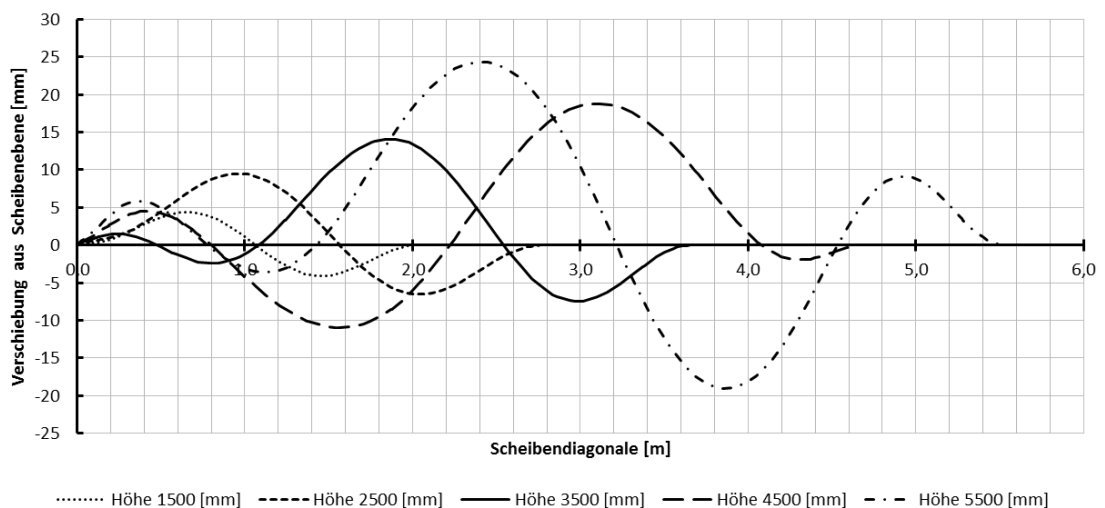


Abb. 65 Einfluss der Variation der Scheibenhöhe auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptspannungen in der Glasscheibe:

Bei der Variation der Scheibenhöhe hat sich die quadratische Scheibe als günstigste Form erwiesen. Geringe Hauptzugspannungen sowie ein hoher Eigenwert zeigen das günstige Tragverhalten der quadratischen Scheibe. Bei zunehmender Scheibenhöhe kommt es hingegen zu einer beinahe linearen Steigerung der Hauptzugspannungen. Die größer werdenden Hauptzugspannungen können durch die stärkere Umlenkung der Druckkräfte erklärt werden, da durch die höhere Anzahl der Halbwellen eine stärkere Krümmung der Halbwellen entsteht. Zudem erhöht sich der Vorverformungswert der Halbwellenamplitude aufgrund der zunehmenden Scheibenhöhe (siehe Abb. 66)

Zur Verdeutlichung der Ergebnisse wird das System mit der 1. Vorverformung für die quadratische Scheibe und für die maximale Scheibenhöhe in Abb. 67 dargestellt. Die maximale Hauptzugspannung beträgt 49,50 kN und tritt im Bereich der Lasteinleitung am oberen linken Scheibeneck auf. Vergleicht man die Hauptspannungswerte der quadratischen Scheibe mit den Werten der Scheibe mit der maximalen Scheibenhöhe, kann man feststellen, dass sich auf Grund der Änderung der Scheibenhöhe ein maximaler Zugspannungszuwachs um den Faktor 7 ergibt.

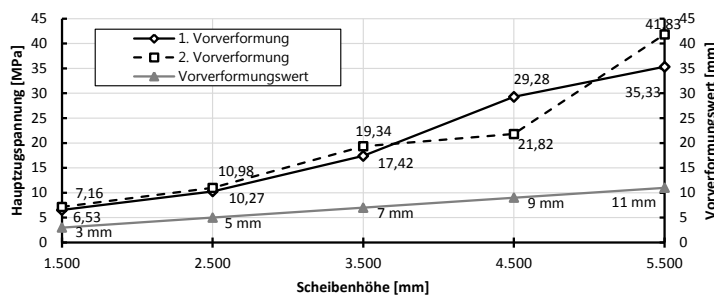


Abb. 66 Maximale Hauptzugspannung in Abhängigkeit der Scheibenhöhe und der Vorverformung

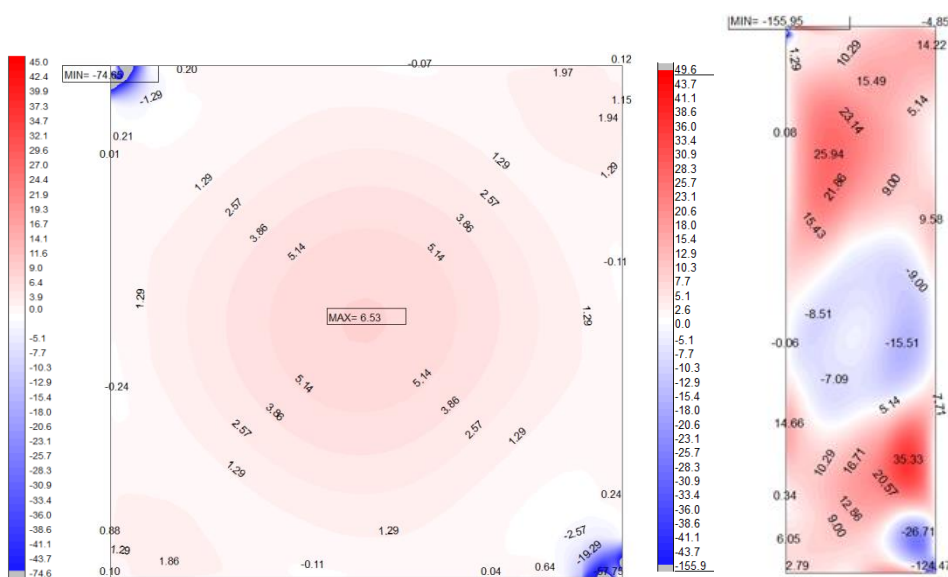


Abb. 67 Hauptspannungen der quadratischen Scheibe (1500x1500 mm) links und der Scheibe mit der maximalen Scheibenhöhe (1500x5500) rechts, für das System mit der 1. Vorverformung

5.2.4 Scheibenbreite

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Ein ähnlicher Einfluss auf die Eigenform, wie bei der Variation der Scheibenhöhe, stellt sich auch bei der Variation der Scheibenbreite ein. Jedoch wirkt sich diese nicht so stark auf die maximal auftretenden Verschiebungen aus. Diese bleiben bei der Variation annähernd gleich.

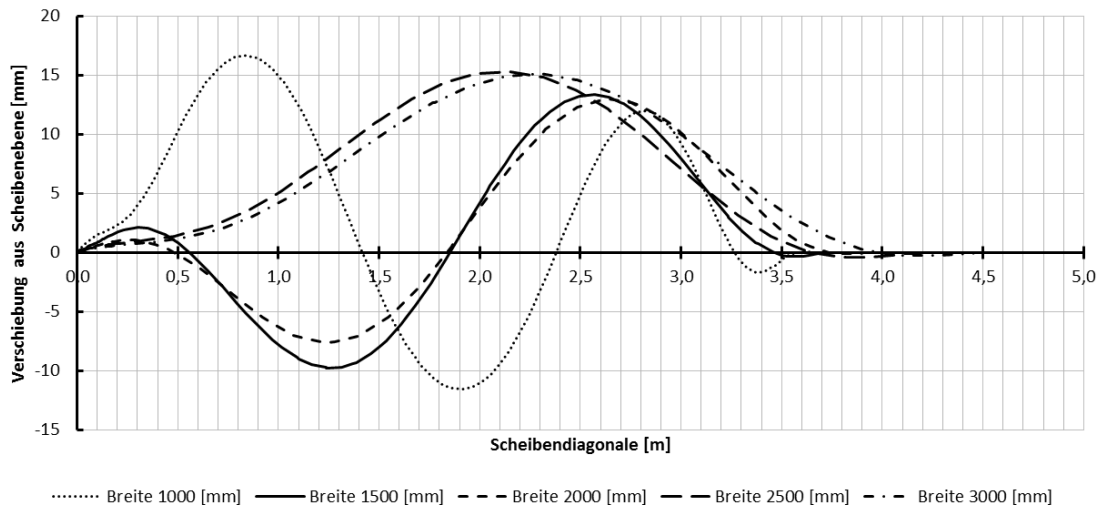


Abb. 68 Einfluss der Variation der Scheibenbreite auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

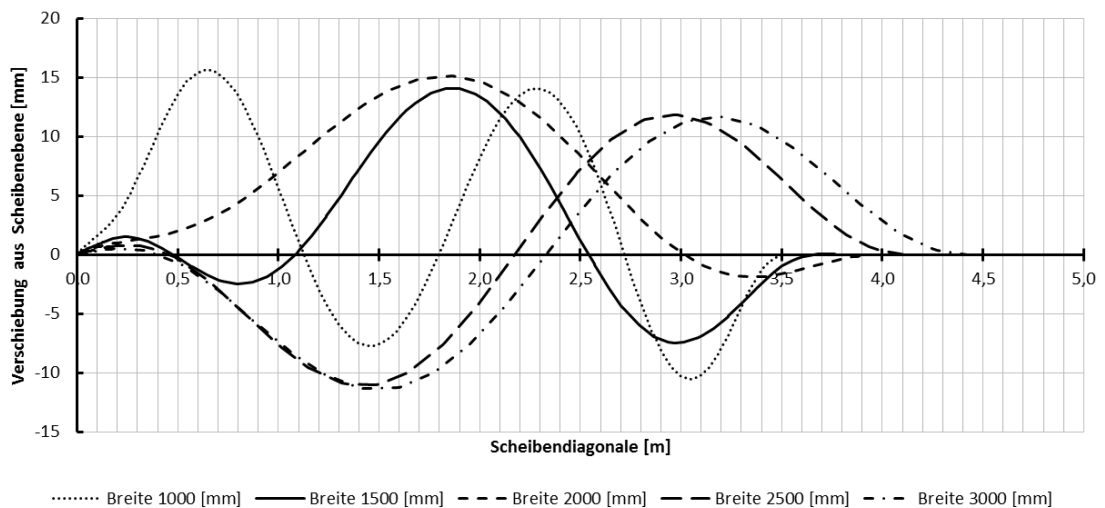


Abb. 69 Einfluss der Variation der Scheibenbreite auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Bei der Variation der Scheibenbreite ergeben sich ab einer Breite von 2 m keine wesentlichen Änderungen der Hauptzugspannungen mehr. Dies gilt sowohl für das System mit der 1. Vorverformung, als auch für das System mit der 2. Vorverformung (siehe Abb. 70).

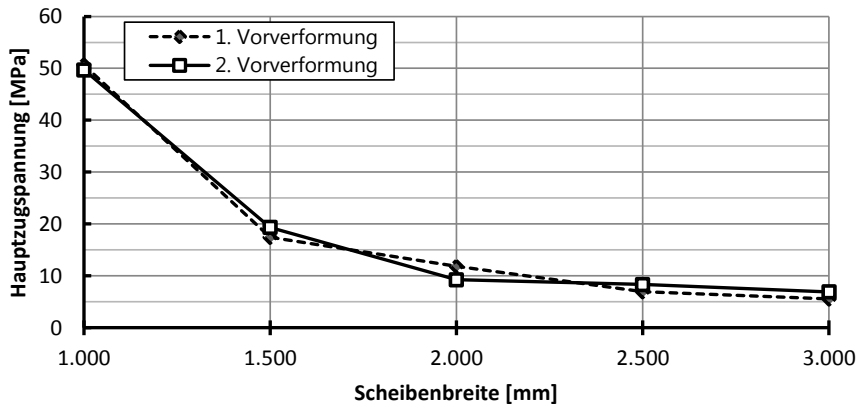


Abb. 70 Einfluss der Scheibenbreite auf die Hauptzugspannungen

5.2.5 Scheibendicke

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Die Scheibendicke hat einen wesentlichen Einfluss auf das Verformungsverhalten der Glasscheibe aus der Ebene. Vergleicht man die Verformungen der Scheibe mit einer Dicke von 6 mm mit denen der Dicke von 8 mm, wird deutlich, dass bei einer geringen Erhöhung der Scheibendicke die Verformungen deutlich reduziert werden.

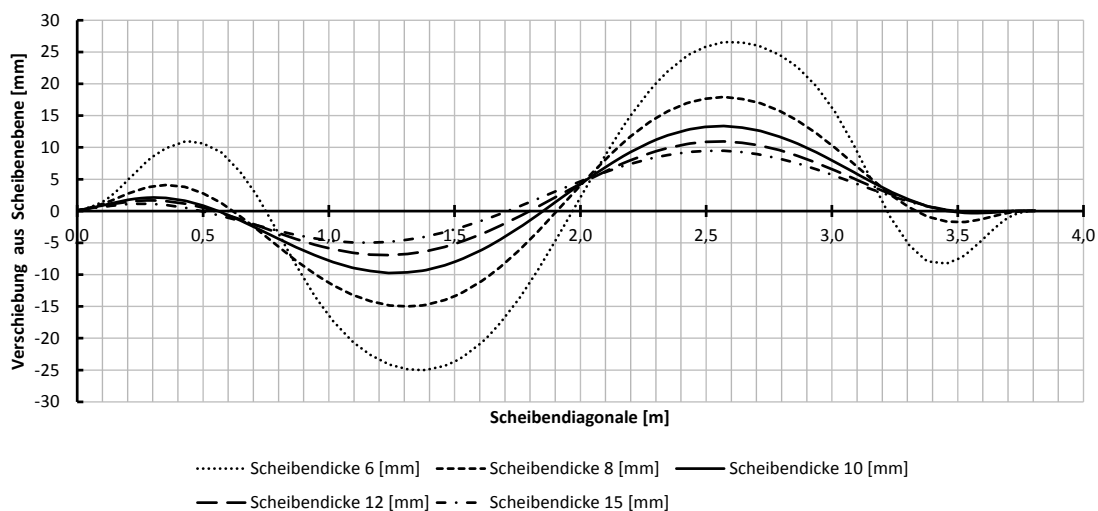


Abb. 71 Einfluss der Variation der Scheibendicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

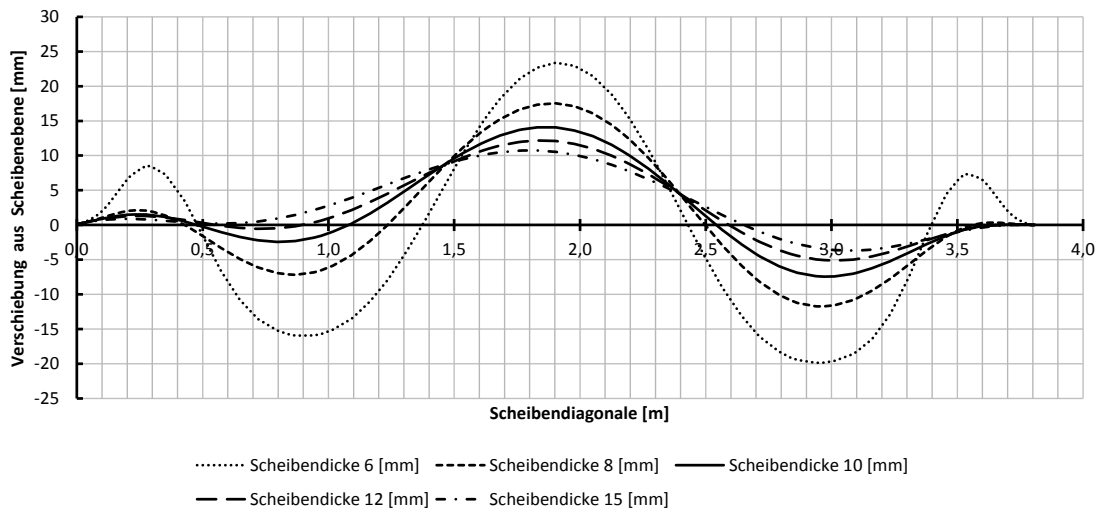


Abb. 72 Einfluss der Variation der Scheibendicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Der deutlichste Einfluss auf die Hauptzugspannungen hat sich bei der Variation der Scheibendicke ergeben. Die größte Hauptzugspannung hat sich bei einer Scheibendicke von 6 mm mit 133,76 N/mm² bei der 2. Vorverformung ergeben. Wegen der hohen Hauptzugspannung wird die Skala statt der gewöhnlichen 45 N/mm² (maximale Zugfestigkeit von Floatglas) auf 120 N/mm² (maximale Zugfestigkeit von ESG) angepasst. Die grauen Bereiche kennzeichnen jene Bereiche, bei denen die maximale Hauptzugspannung überschritten wird. Ab einer Scheibendicke von 12 mm ist der Einfluss auf die Hauptzugspannungen nur mehr sehr gering.

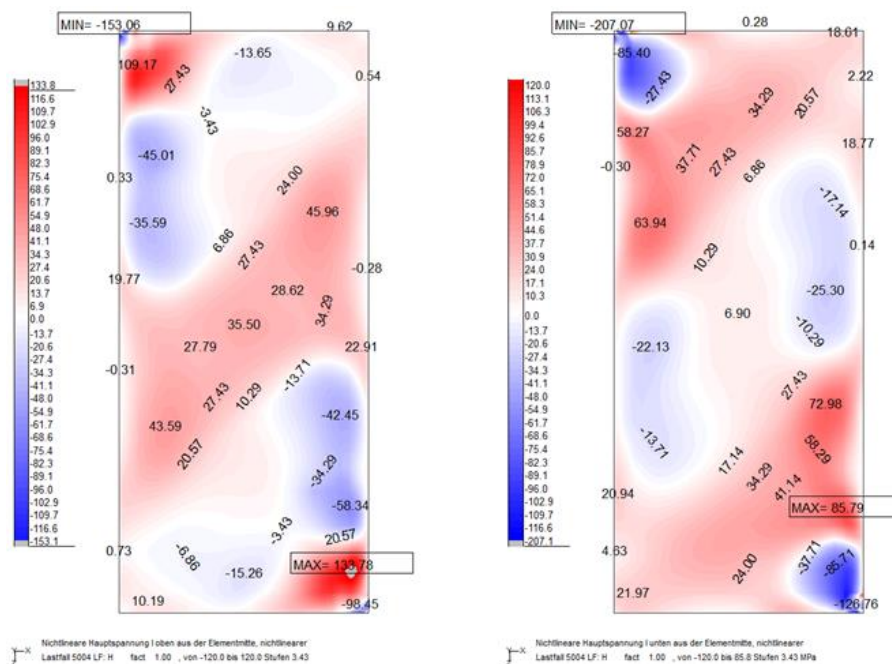


Abb. 73 Hauptspannungen bei einer Scheibendicke von 6 mm auf der Oberseite links und Unterseite rechts mit der 2. Vorverformung

5.2.6 Vorverformungsfaktor

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Diese Grafik zeigt die Variation des Vorverformungsfaktors. Erkennbar ist, dass ein Faktor über 1000 nur zu einer sehr geringen Änderung der Verschiebung aus der Ebene führt. Hingegen wirkt sich ein Faktor unter 500 deutlich auf die Verschiebung aus. In Tab. 21 werden die maximalen Verschiebungen dargestellt in globaler y-Richtung.

Faktor:	250	500	750	1000	1250
Max. Verschiebung:	20 mm	13 mm	10 mm	9 mm	7 mm

Tab. 21 Vergleich der maximalen Verformungswerte bei unterschiedlichem Verformungsfaktor

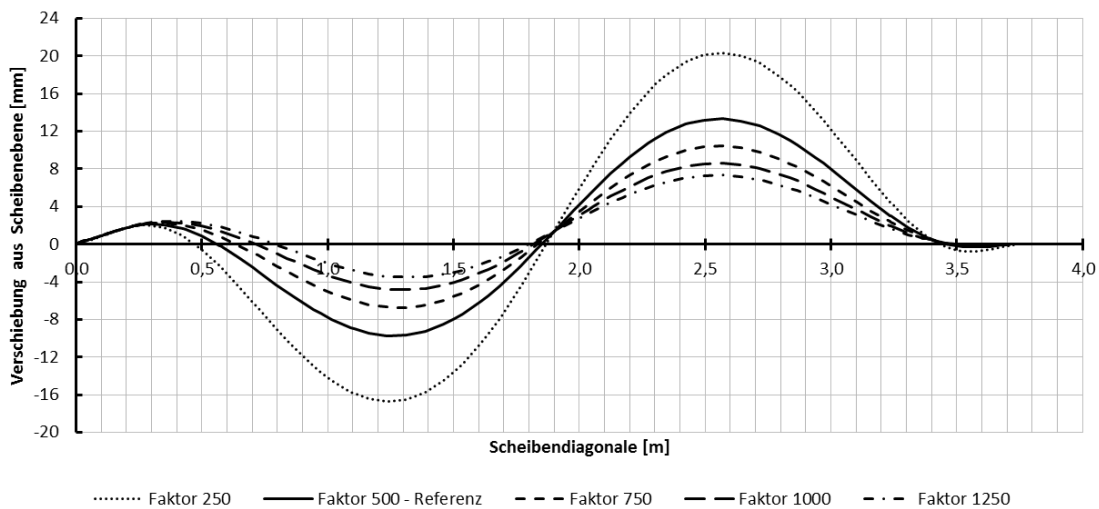


Abb. 74 Einfluss der Variation des Vorverformungsfaktors auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

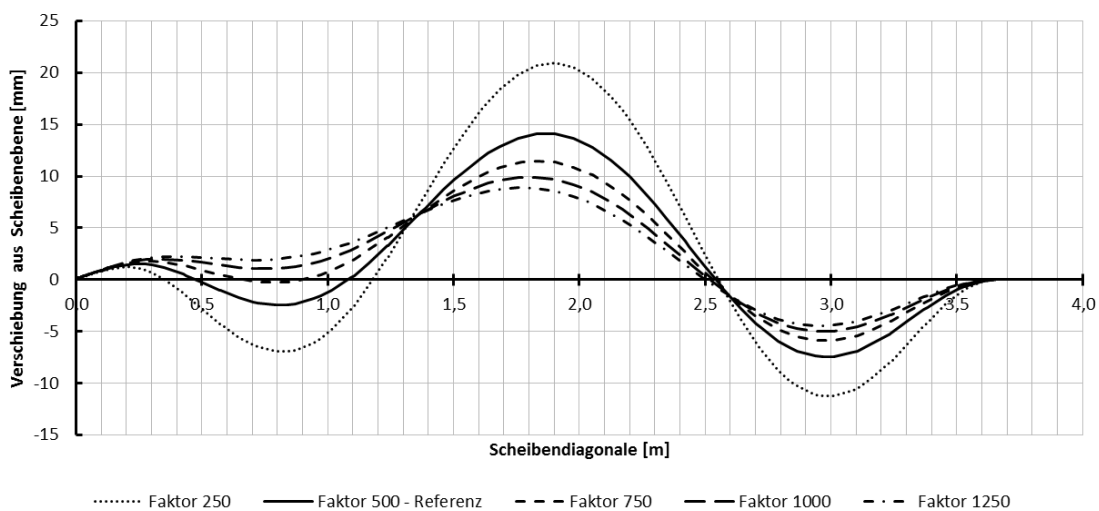


Abb. 75 Einfluss der Variation des Vorverformungsfaktors auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Durch die Erhöhung des Verformungsfaktors nimmt die Hauptzugspannung fast linear ab (siehe Abb. 76). Lediglich zwischen Faktor 250 bis 500 ist ein etwas höherer Abfall der Hauptzugspannungen zu erkennen. Des Weiteren sind die Hauptzugspannungen des Systems mit der 2. Vorverformung etwas größer als die aus der 1. Vorverformung.

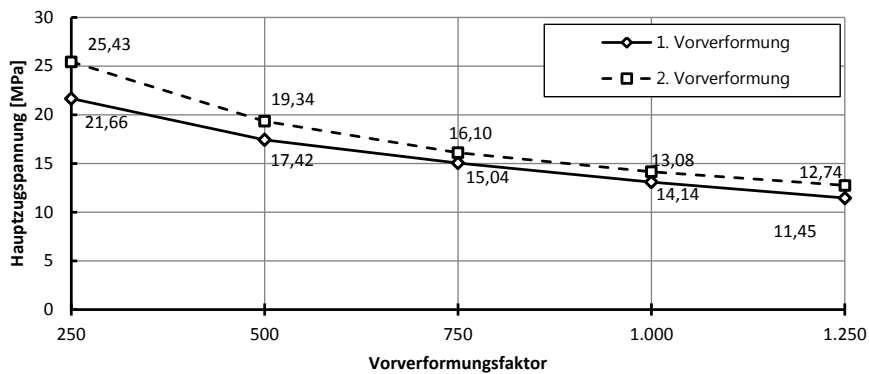


Abb. 76 Einfluss des Vorverformungsfaktors auf die maximalen Hauptzugspannungen

5.2.7 Definition der Rahmenparameter

Bevor auf den Einfluss der verschiedenen Parameter eingegangen wird, wird in Abb. 77 die Definition der unterschiedlichen Parameter, welche anschließend variiert werden, aufgezeigt.

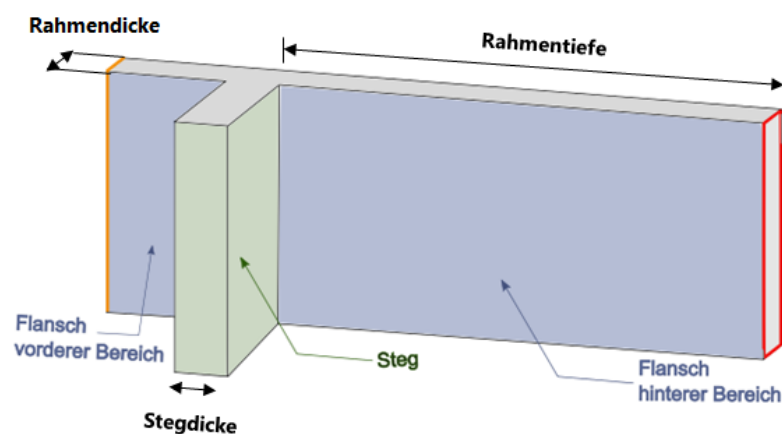


Abb. 77 Definition der Parameter des Stahlrahmens

5.2.8 Rahmendicke

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Aus den beiden folgenden Grafiken Abb. 78 und Abb. 79 ist zu erkennen, dass die Erhöhung der Rahmendicke ab 10 mm kaum einen Einfluss auf die Verschiebung hat.

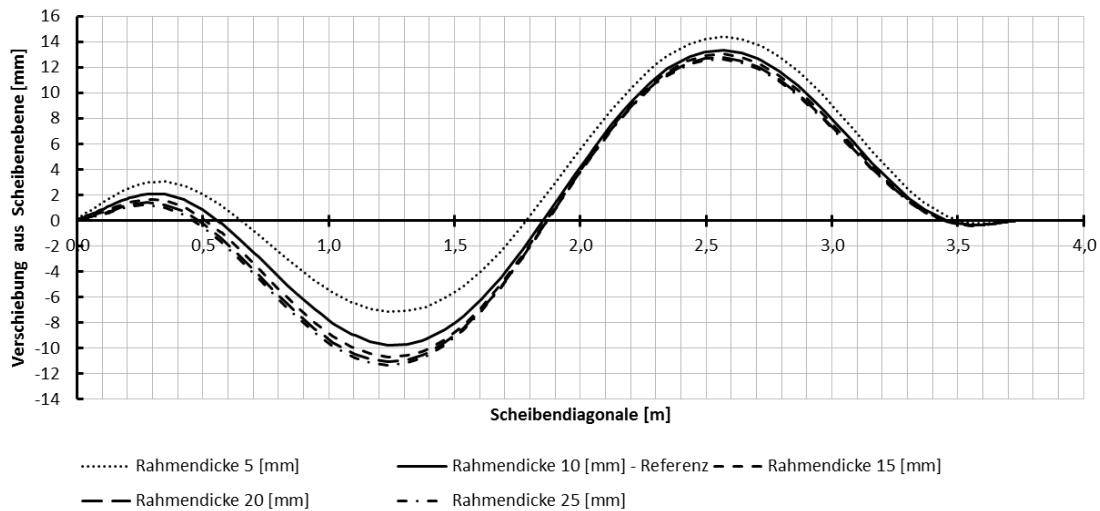


Abb. 78 Einfluss der Variation der Rahmendicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

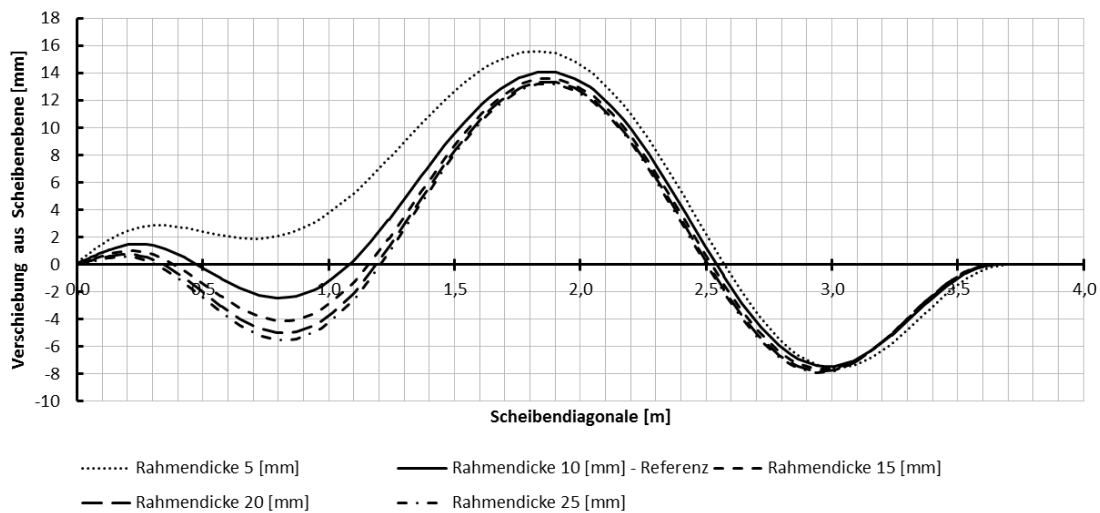


Abb. 79 Einfluss der Variation der Rahmendicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Bei der Variation der Rahmendicke hat sich kein wesentlicher Einfluss auf die Hauptzugspannungen ergeben.

5.2.9 Rahmentiefe

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Bei einer Rahmentiefe von 0 mm konnte lediglich eine Last von 20 kN aufgebracht werden, da das System bei einer Steigerung der Last auf Stabilität versagt hat. Diese geringe Rahmentiefe (nur Flansch vorne) wirkt sich am deutlichsten auf die Verformung der Scheibe und der sich einstellenden Eigenformen aus. Betrachtet man das System mit der 1. Vorverformung bildet sich anstelle der drei Halbwellen eine große Halbwellen aus. Ähnliche verhält sich das System mit der 2. Vorverformung. Anstelle der vier Halbwellen ergeben sich zwei große Halbwellen. Die maximale Verschiebung ist gegenüber der maximalen Verschiebung des Referenzsystems trotz einer geringeren Belastung größer. Die maximale Auslenkung beträgt für das System mit der 1. Vorverformung rund 22 mm und für das System mit der 2. Vorverformung rund 17 mm. Wohingegen bei der Referenzscheibe eine maximale Verformung von ca. 13 mm für das System mit der 1. Vorverformung und für das System mit der 2. Vorverformung von rund 14 mm auftritt (vgl. Abb. 80 und Abb. 81).

Vergleicht man die Verschiebungen der 1. Vorverformung mit der der 2. Vorverformung, wirkt sich bei der 2. Vorverformung die Rahmentiefe von 45 mm deutlich stärker auf die Verformung der Scheibe aus. Der Einfluss auf die Verschiebungen verringert sich merklich ab einer Rahmentiefe von 90 mm, wohingegen bei der 1. Vorverformung dieser bereits ab einer Rahmentiefe von 45 mm signifikant abnimmt. Eine Erhöhung der Rahmentiefe über 90 mm ergibt für beide Varianten des vorverformten Systems keinen wesentlichen Einfluss auf die Verschiebungen der Glasscheibe aus der Ebene.

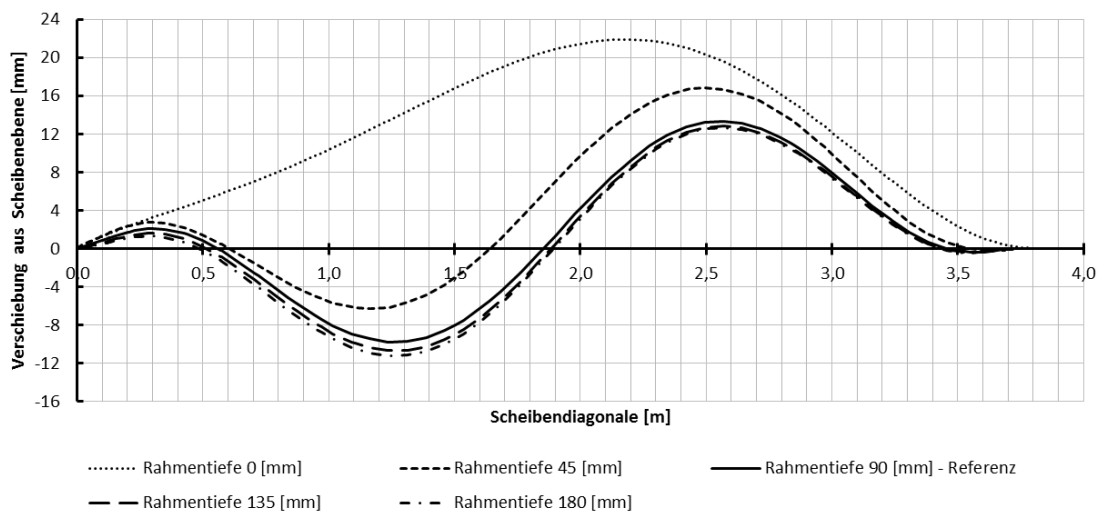


Abb. 80 Einfluss der Variation der Rahmentiefe auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

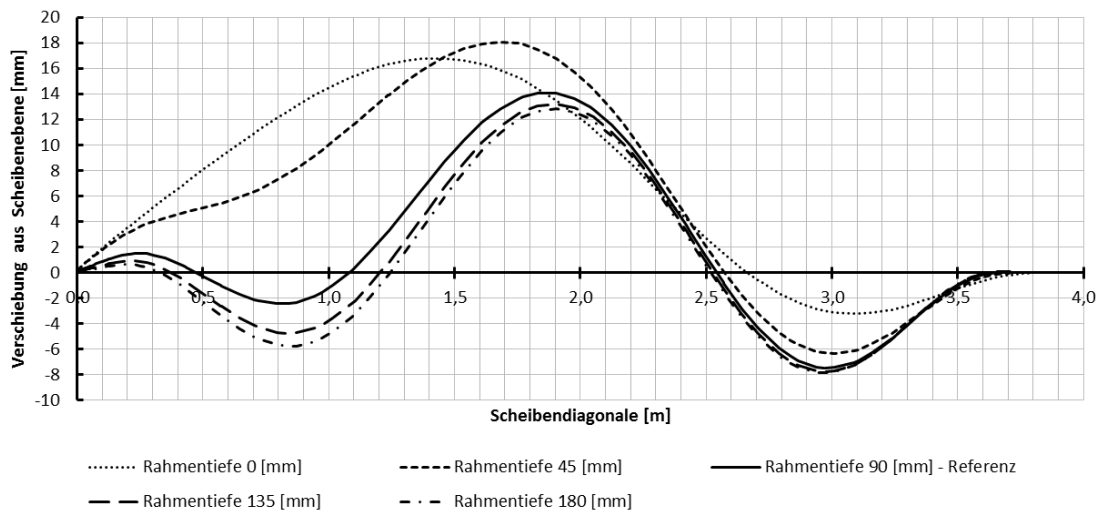


Abb. 81 Einfluss der Variation der Rahmentiefe auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Bei einer Rahmentiefe von 0 mm konnte nicht die gesamte Last von 50 kN aufgebracht werden, da es zuvor zu einem Stabilitätsversagen der Konstruktion geführt hat. Das System wurde daraufhin mit 20 kN belastet. Daher auch die geringere Hauptzugspannung bei einer Rahmentiefe von 0 mm gegenüber den anderen Werten. Die Abb. 82 zeigt, dass die Variation der Rahmentiefe bei einer horizontalen Belastung auf die Hauptzugspannungen keinen wesentlichen Einfluss hat.

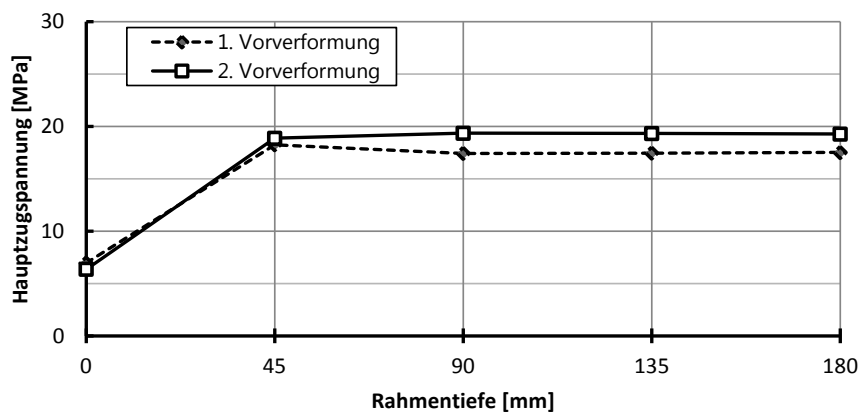


Abb. 82 Einfluss der Rahmentiefe auf die Hauptzugspannungen

5.2.10 Rahmeneckprofildicke

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Die Variation der Rahmeneckprofildicke hat kaum einen Einfluss auf die Verschiebung der Scheibe (siehe Abb. 83 und Abb. 84).

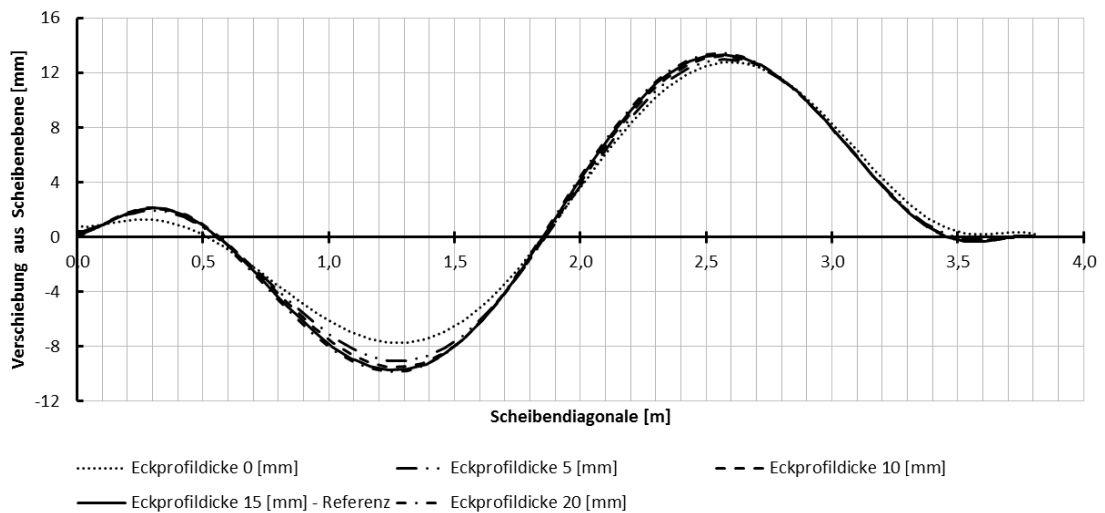


Abb. 83 Einfluss der Variation der Rahmeneckprofildicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

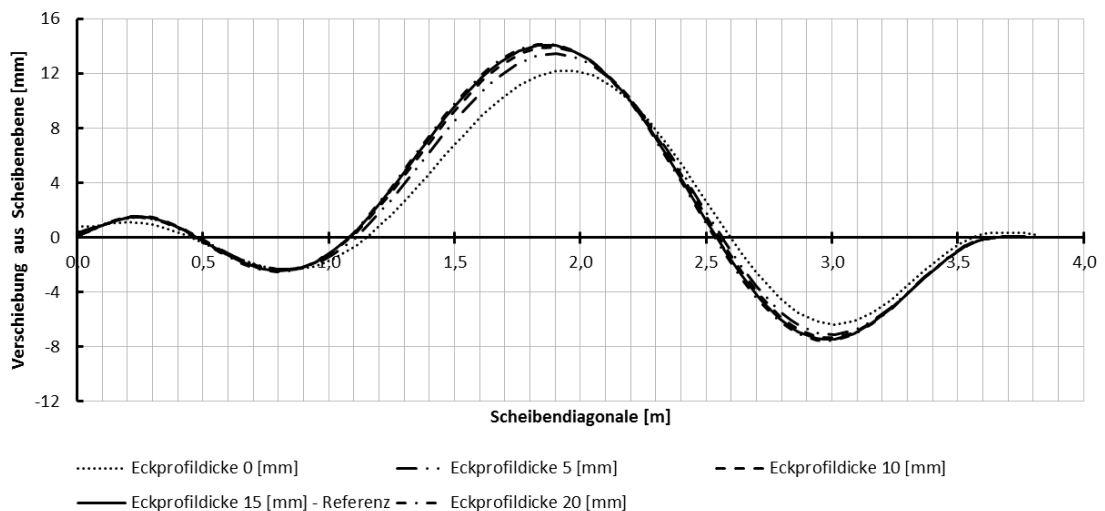


Abb. 84 Einfluss der Variation der Rahmeneckprofildicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Der Einfluss der Eckprofildicke auf die Spannungen ist verschwindend gering und wird daher nicht näher behandelt. Dieses Verhalten konnte sowohl bei der 1. Vorverformung als auch bei der 2. Vorverformung festgestellt werden.

5.2.11 Stegdicke

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Auch die Veränderung der Stegdicke beeinflusst das Verformungsverhalten der Scheibe aus der Ebene nur minimal.

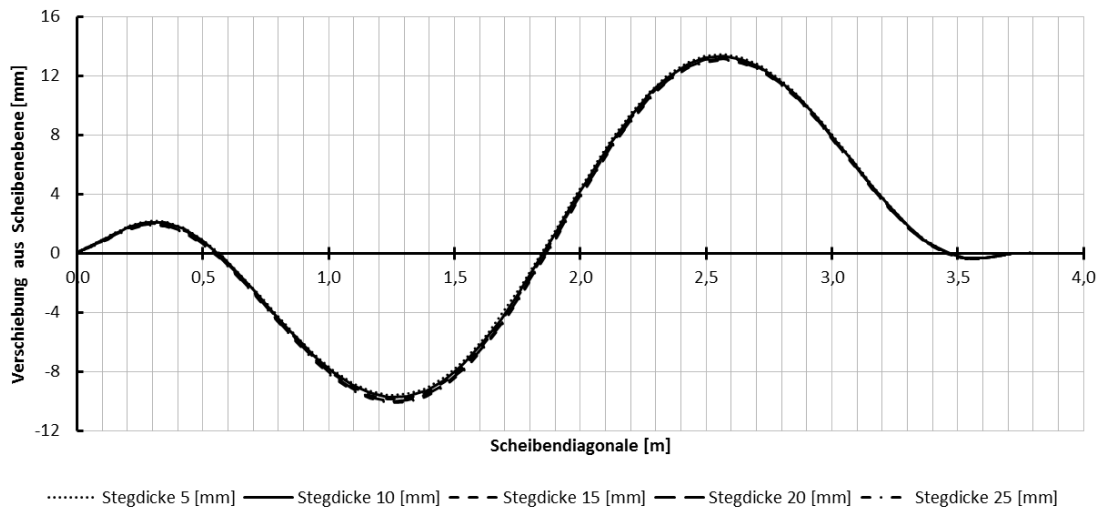


Abb. 85 Einfluss der Variation der Stegdicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

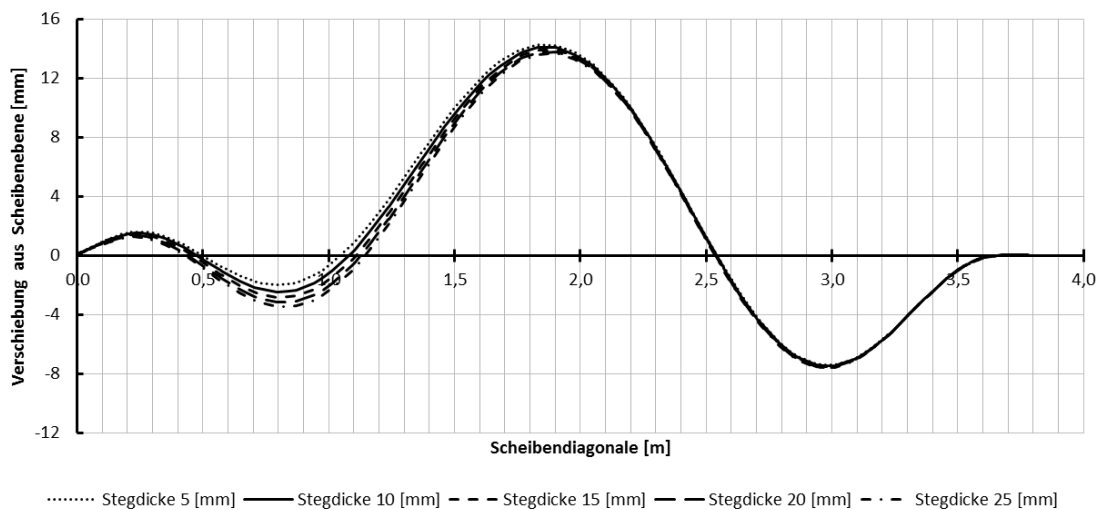


Abb. 86 Einfluss der Variation der Stegdicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Der Einfluss der Stegdicke auf die Spannungen ist verschwindend gering und wird daher nicht näher behandelt. Dieses Verhalten konnte sowohl bei der 1. Vorverformung als auch bei der 2. Vorverformung festgestellt werden.

5.2.12 Lastfallkombinationen

Verschiebungen entlang der Scheibendiagonale:

Vergleicht man die Verschiebungskurve des Lastfalls H mit dem Lastfall $H+V_K$ in Abb. 87, ist erkennbar, dass durch eine geringe vertikale Last, beispielsweise das Gewicht eines darüber befindlichen Elements, kaum eine zusätzliche Verschiebung entlang der Scheibendiagonale entsteht. Daher wurde die vertikale Last mit dem Faktor 50 multipliziert, um den Einfluss zu verdeutlichen. Die vertikale Last wirkt der Verdrehung des Rahmenecks, welche durch die Lasteinleitung in die Klotzung (Torsionsbeanspruchung des Rahmens) entsteht, entgegen, wodurch es zu einer geringeren Verdrehung des oberen Rahmenecks kommt und somit zu einer gleichmäßigeren Lasteinleitung. Infolge dessen verringert sich die Amplitude der ersten Halbwellen im Bereich der Lasteinleitung. Erkennbar ist, dass die vertikale Belastung die Verschiebungen in globaler y-Richtung reduziert und entgegen der globalen y-Richtung, aufgrund der Verdrehung des rechten oberen Rahmenecks, erhöht. Dies sowohl beim System mit der 1. Vorverformung als auch beim System mit der 2. Vorverformung zu erkennen (vgl. Abb. 87 und Abb. 88). Aufgrund der höheren Beanspruchung kommt es beim Lastfall $H+V_g$ für das System mit der 1. Vorverformung an der zweiten oberen Halbwellen zu einem Verformungszuwachs von rund 4 mm (siehe Abb. 87).

Ein deutlicher Einfluss auf die Verschiebung ist bei der Lastfallkombination der horizontalen Last mit der Belastung unter Windsog zu erkennen. Die maximale Verformung aus der Scheibenebene, infolge der zusätzlichen Windbelastung, ist mit 20 mm an der unteren Halbwellen deutlich höher als die der Referenzscheibe mit rund 13 mm.

Für den Lastfall $H+W+V_g$ ergeben sich durch die größere vertikale Belastung eine Zunahme der Verformung am zweiten Umlenkpunkt und eine Verminderung am ersten und dritten Umlenkpunkt.

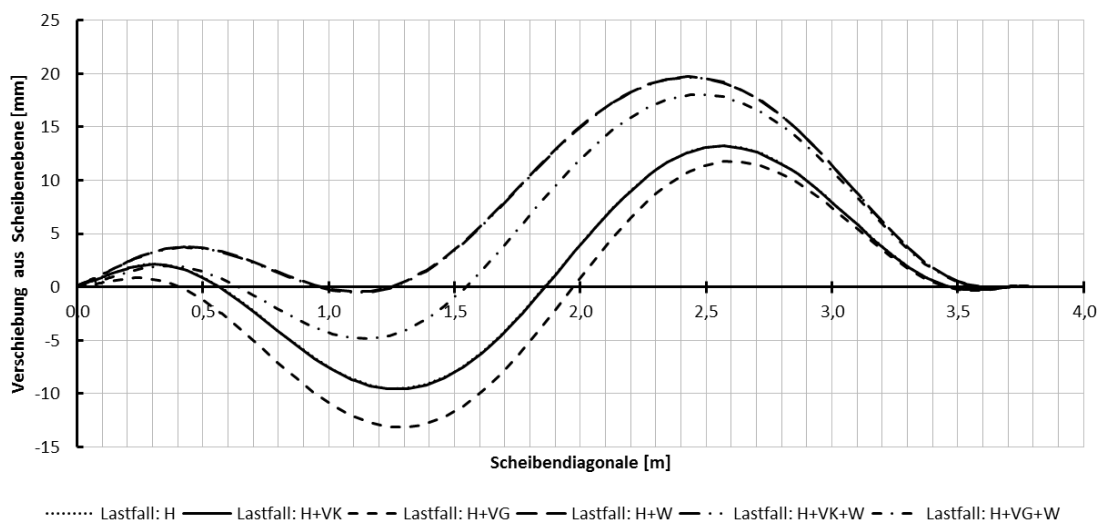


Abb. 87 Einfluss der Variation der Lastfallvariation auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung

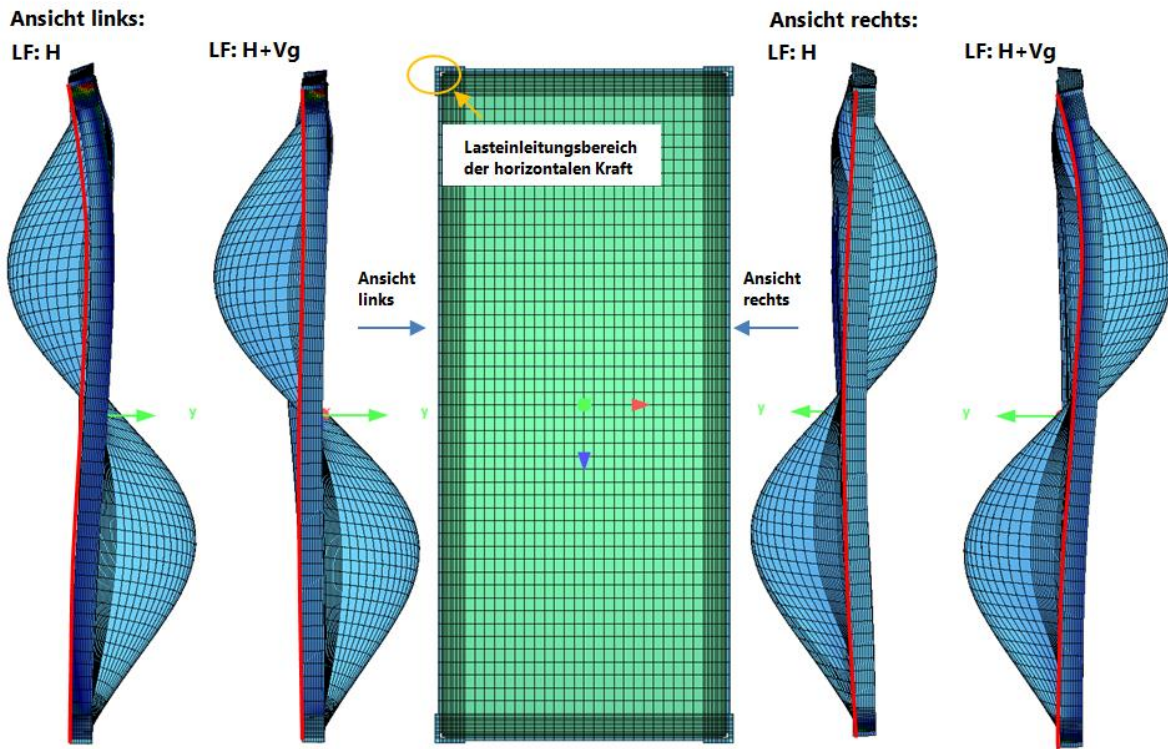


Abb. 88 Verformungsbild des System mit der 1. Vorverformung unter LF: H und LF: H+Vg (40-fach überhöht dargestellt)

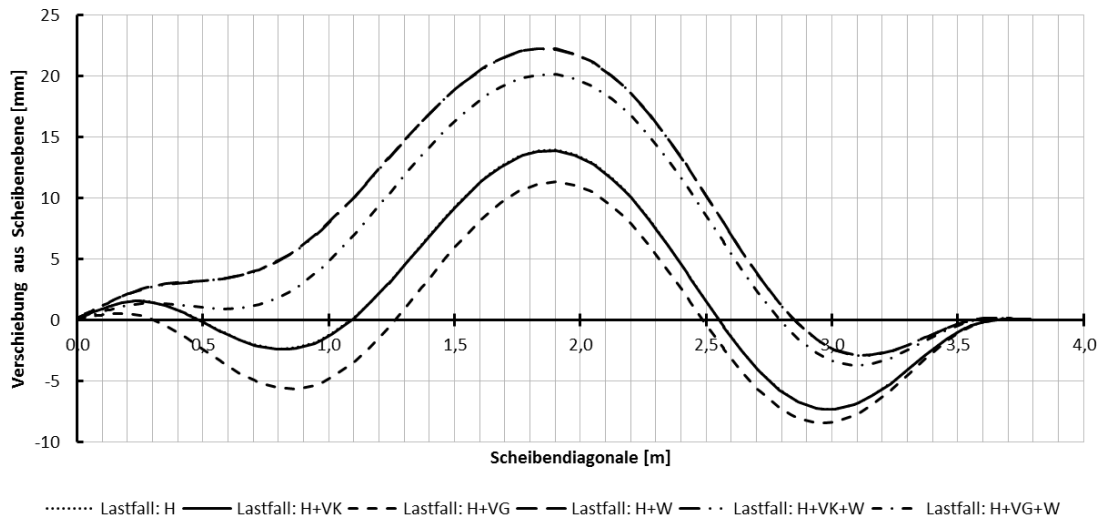


Abb. 89 Einfluss der Variation der Lastfallvariation auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung

Hauptzugspannungen in der Glasscheibe:

Der Einfluss der vertikalen Last eines Elements wirkt sich auch bei den Hauptspannungen nicht merklich aus. Auch die Erhöhung der vertikalen Last um den Faktor 50 hat zu keiner deutlichen Erhöhung der Hauptspannung geführt. Diese Erkenntnisse sind sowohl beim System mit der 1. Vorverformung als auch mit der 2. Vorverformung zu erkennen.

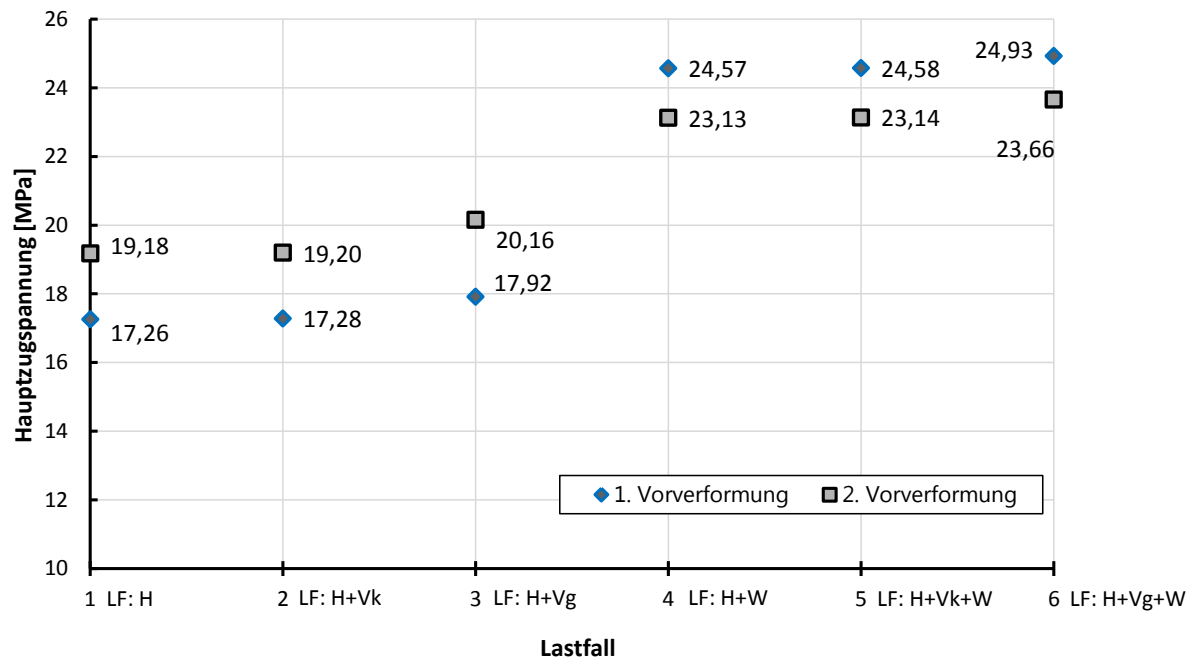


Abb. 90 Maximale Hauptspannungen des jeweiligen Lastfalls

6 Ergebnisse: Stahlrahmen

Die Auswertung des Stahlrahmens erfolgt ähnlich wie die der Glasscheibe. Zur Reduzierung der Anzahl der Grafiken werden die Ergebnisse der Verschiebungen und der Vergleichsspannungen nur für das Referenzsystem vollständig angegeben. Unterstützend zur textlichen Beschreibung werden bei verschiedenen Parametern die Verschiebungsdiagramme dargestellt. Die restlichen Verschiebungs- und Spannungsbilder werden im Anhang angeführt.

Aufgrund der geringen Steifigkeit des offenen Stahlprofils kommt es, unter der hohen Druckbeanspruchung des rechten vertikalen Rahmenprofils, zu einer deutlichen Verformung des Flansches. Das Ausweichen des Rahmens wird durch die Subtraktion der Verschiebung des vorderen und des hinteren Flanschbereichs in globaler x-Richtung ermittelt (siehe Abb. 91). Die sich daraus ergebende relative Verschiebung zeigt das Ausweichen des Flansches unter Druckbeanspruchung.

Die Verschiebung wird beginnend vom oberen bis zum unteren rechten Rahmeneck dargestellt. Aufgrund des bereits vorverformten Rahmenprofils entgegen der globalen x-Richtung wird diese Verschiebung infolge der Druckbeanspruchung verstärkt. In den folgenden Grafiken wird diese Verschiebung als Verschiebung aus der Rahmenebene bezeichnet.

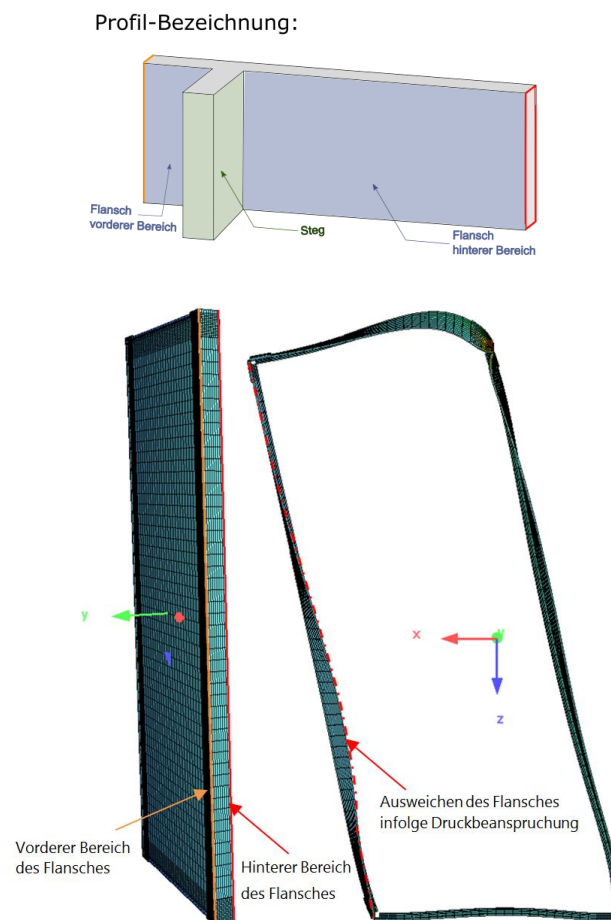


Abb. 91 Bezeichnungen des rechten vertikalen T-Profiles

Abb. 92 und Abb. 93 zeigen den Einfluss der Belastungsgröße der horizontalen Knotenlast in Scheibenebene auf das Verformungsverhalten (Ausweichen des Flanschs) des rechten Rahmenprofils des Referenzsystems. Dabei ist eine annähernd gleiche Verformungszunahme von rund 0,2 mm zu erkennen. Ein etwas stärkerer Zuwachs ist bei der Laststeigerung von 40 kN auf 50 kN erkennbar. Die maximale Verschiebung für die Belastungsgröße von 50 kN beträgt 1,6 mm für das System mit der 1. Eigenform als Vorverformung und für das System mit der 2. Eigenform als Vorverformung rund 0,78 mm.

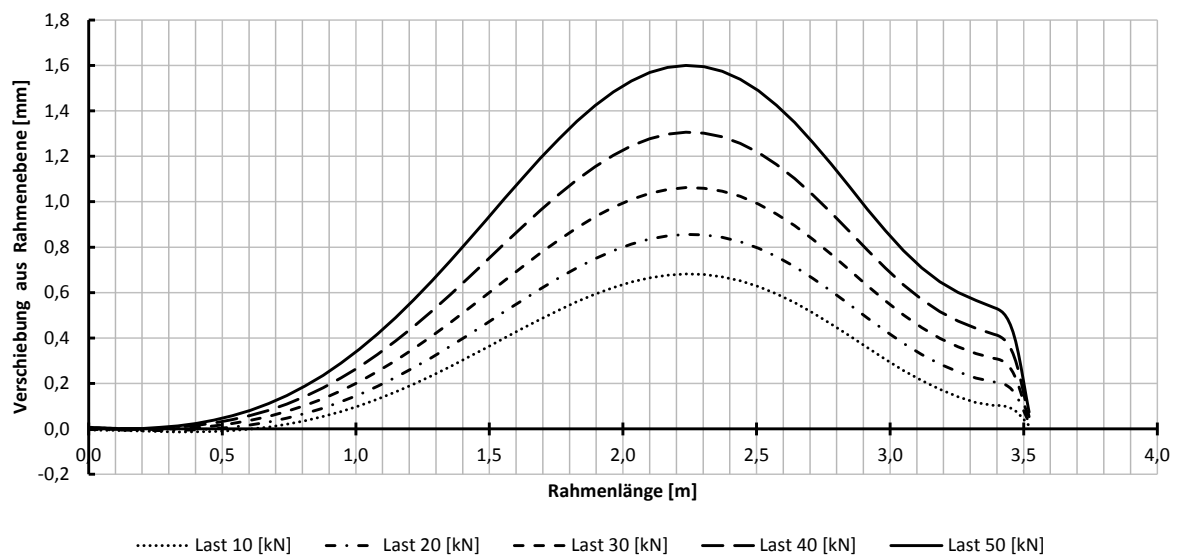


Abb. 92 Einfluss der Belastungsgröße auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung

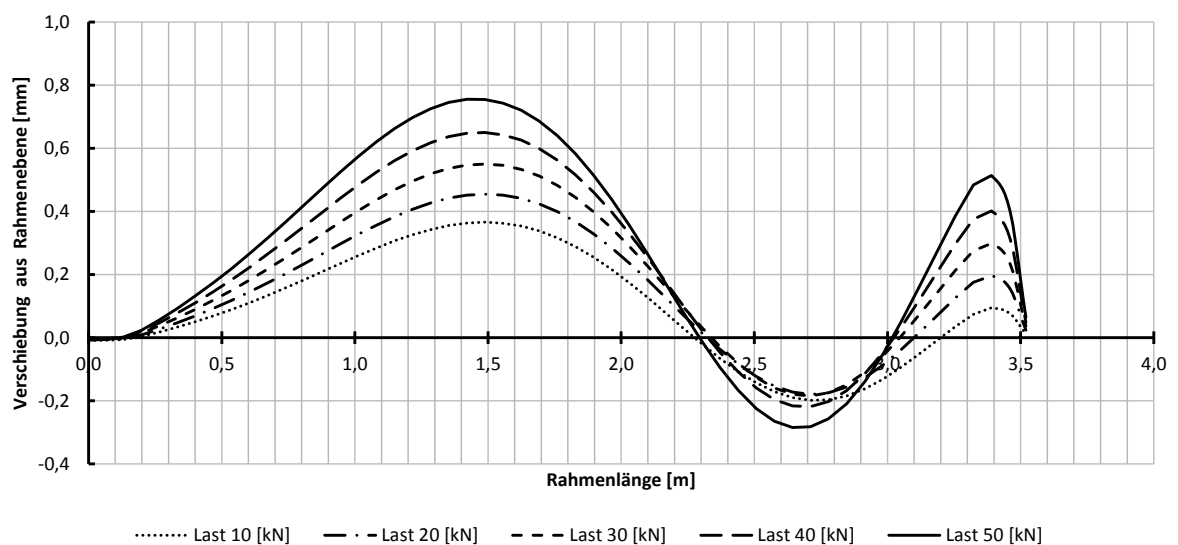


Abb. 93 Einfluss der Belastungsgröße auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 2. Vorverformung

Aus Abb. 94 und Abb. 95 kann man erkennen, dass sich die maximale Verschiebung des Flansches bei der Variation der Rahmendicke mit rund 7,4 mm ergibt, da hier die geringste Rahmensteifigkeit vorhanden ist (siehe Abb. 94).

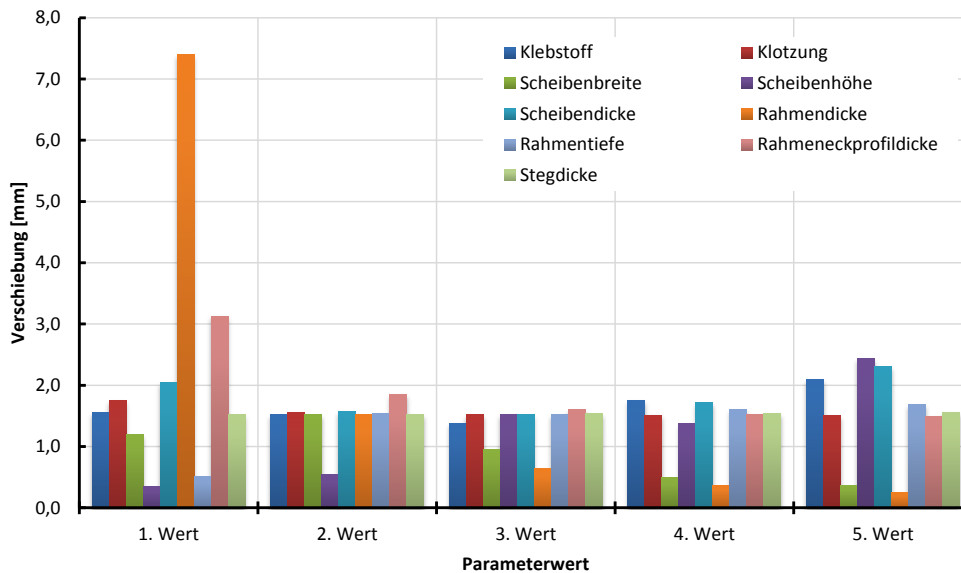


Abb. 94 Maximalwerte der relativen Flanschverformung für das System mit der 1. Vorverformung

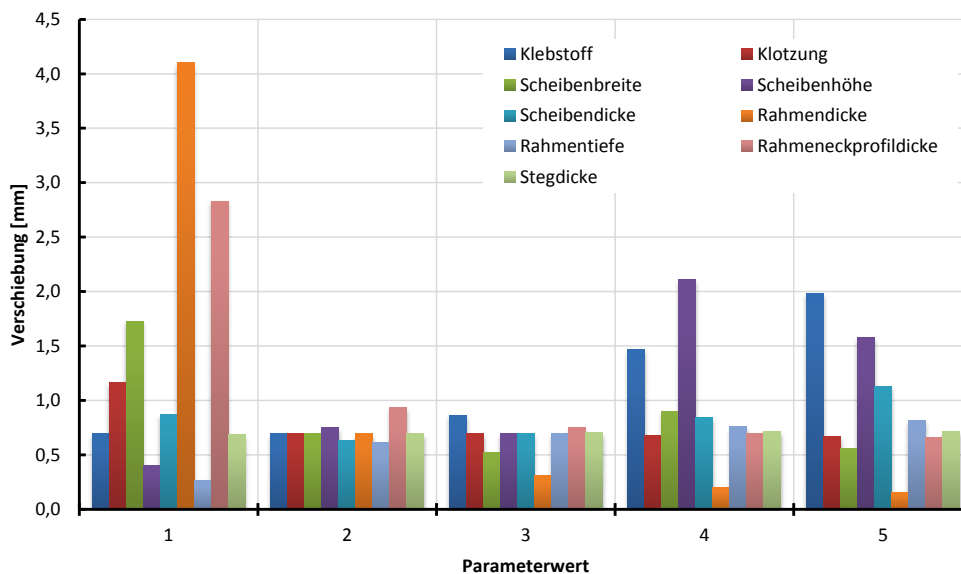


Abb. 95 Maximalwerte der relativen Flanschverformung für das System mit der 2. Vorverformung

E-Modul Klotzung:

Die Variation der Klotzungssteifigkeit wirkt sich lediglich bei einer sehr geringen Steifigkeit von 1,4 N/mm² deutlich aus (siehe Abb. 96). Hier kommt es zu einer wesentlich anderen Beulform und sehr großen Verschiebungen. Ab einer Steifigkeit von 250 N/mm² sind keine wesentlichen Einflüsse mehr erkennbar.

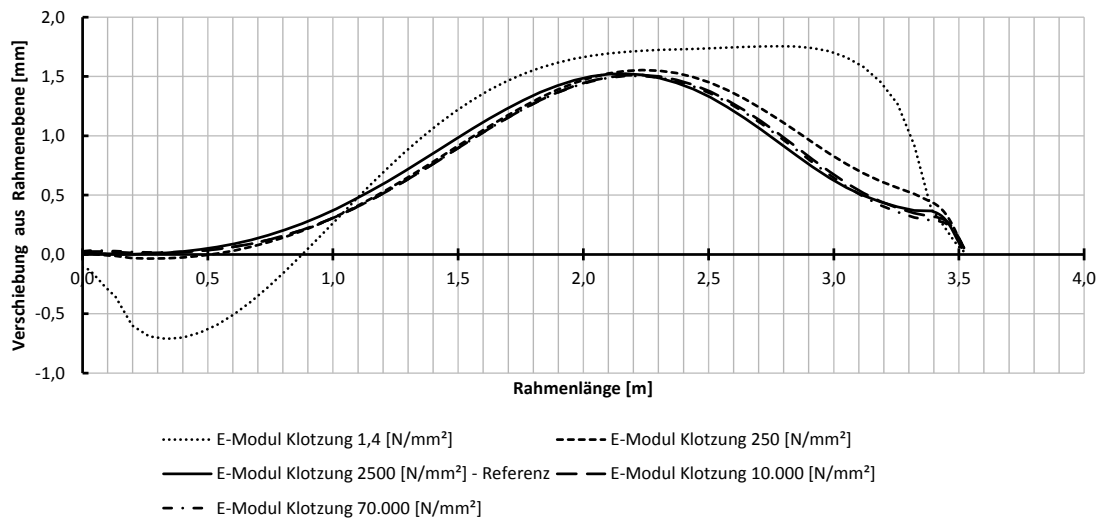


Abb. 96 Einfluss des E-Moduls der Klotzung auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung

E-Modul Klebstoff:

Bei der Variation des E-Moduls des Klebstoffs kann festgestellt werden, dass bei zunehmender Klebstoffsteifigkeit sich die Verschiebung erhöht. Zudem kommt es bei der 1. Vorverformung im oberen Eck zu einer zweiten kleineren Halbwellen, welche sich entgegen (in x-Richtung) der großen Halbwellen einstellt (siehe Abb. 97). Begründet wird die Zunahme der Verformung durch die höhere Druckbeanspruchung des Flansches infolge der Steifigkeitszunahme. Bei der 2. Vorverformung kommt es infolge der Steifigkeitserhöhung nur zu einer Zunahme der Verschiebung, eine Änderung der Verformungsfigur tritt nicht ein.

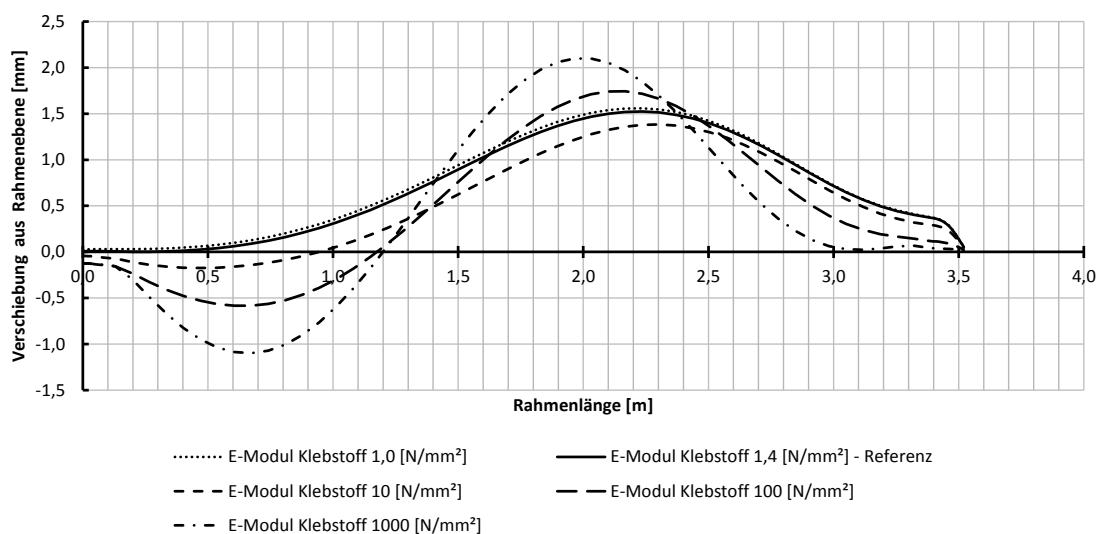


Abb. 97 Einfluss des E-Moduls des Klebstoffs auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung

Scheibenhöhe:

Bei zunehmender Scheibenhöhe erhöht sich die Anzahl der Halbwellen. Für das System mit der 1. Vorverformung tritt bis zu einer Höhe von 3500 mm nur eine Halbwellen entgegen der globalen x-Richtung auf (siehe Abb. 98). Ab einer Scheibenhöhe von 5500 mm treten bei der 2. Vorverformung vier Halbwellen auf (siehe Abb. 99). Die größte absolute Verschiebung ergibt sich bei der 1. Vorverformung mit 2,5 mm (Abb. 98).

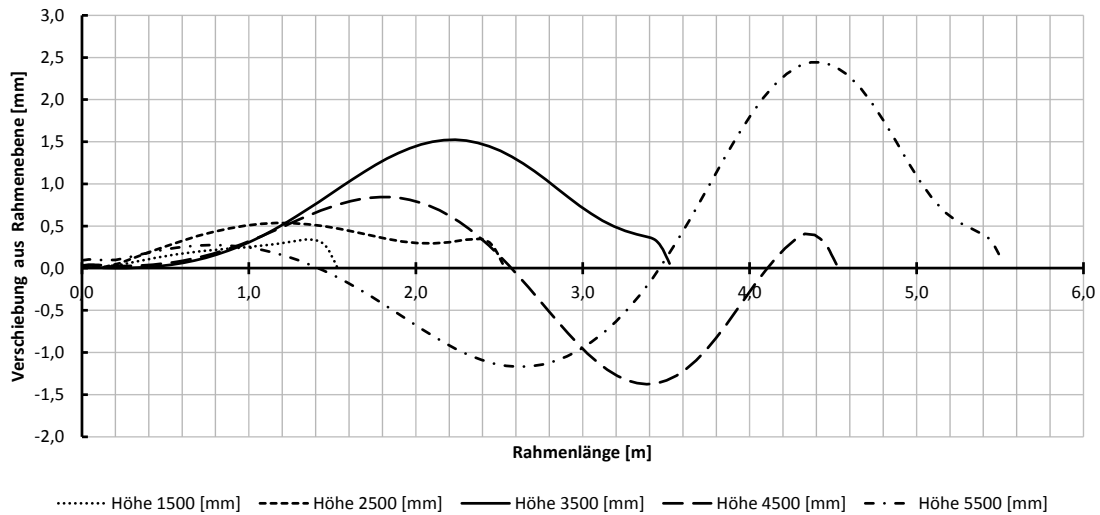


Abb. 98 Einfluss der Scheibenhöhe auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung

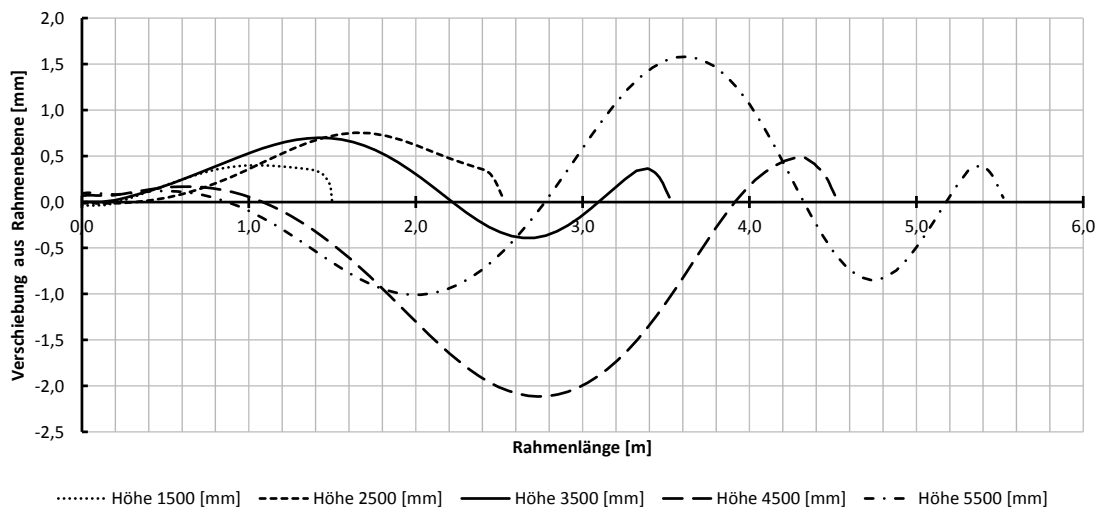


Abb. 99 Einfluss der Scheibenhöhe auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 2. Vorverformung

Scheibenbreite:

Eine deutlich andere Verformungsfigur stellt sich bei einer Scheibenbreite von 1000 mm ein. Anstelle einer großen Halbwelle ergeben sich drei Halbwellen, wobei die oberen beiden eine deutlich größere Amplitude besitzen. Die größte Verschiebung ergibt sich bei der Breite von 1500 mm mit 1,5 mm. Ab dieser Breite nimmt die Verformung bei zunehmender Breite deutlich ab.

Scheibendicke:

Bei der Variation der Scheibendicke ist mit der Zunahme der Dicke eine Zunahme der Verschiebung zu erkennen. Lediglich bei einer Scheibendicke von 6 mm kommt es aufgrund der geringen Steifigkeit zu einer wesentlich stärkeren Verformung, da die Belastung mit 50 kN wesentlich über dem kritischen Beulfaktor von 15 kN liegt und sich somit das gesamte System stärker verformt. Die Vorverformungsvariante (1.-oder 2. Vorverformung) hat in diesem Fall keinen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten des Rahmens gezeigt.

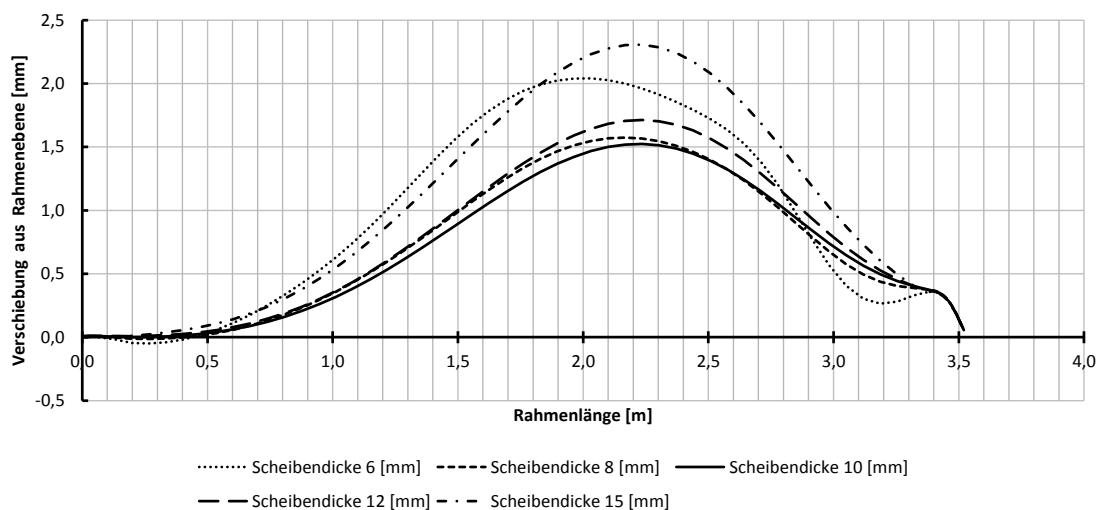


Abb. 100 Einfluss der Scheibendicke auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung

Rahmendicke:

Eine Rahmendicke von 5 mm verursacht eine Verschiebung von 7 mm, wohingegen die Verschiebung des Referenzsystems nur 1,5 mm beträgt. Dadurch wird deutlich, dass diese geringe Erhöhung der Rahmendicke die Steifigkeit deutlich beeinflusst. Ab einer Rahmendicke von 15 mm kommt es zu keiner wesentlichen Verbesserung.

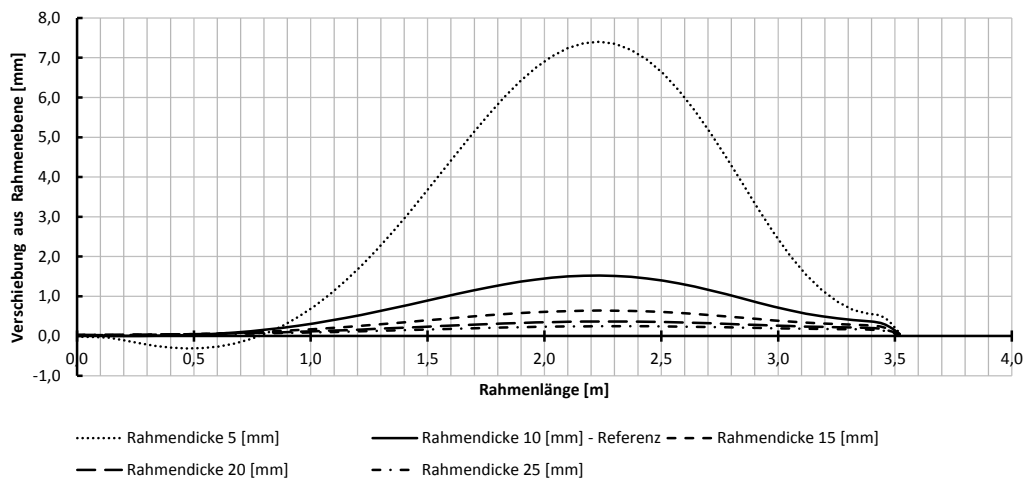


Abb. 101 Einfluss der Rahmendicke auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung

Rahmentiefe:

Die größere Rahmentiefe verursacht nur geringfügig größere Verformungen des Flansches. Die maximale Verschiebung beträgt 0,8 mm und tritt bei der maximalen Rahmentiefe von 180 mm auf. Hingegen beträgt die Verschiebung bei einer Rahmentiefe von 45 mm 0,6 mm und ist somit nicht wesentlich niedriger.

Rahmeneckprofildicke:

Die größte Verformung tritt bei einer Eckprofildicke von 0 mm aufgrund der geringen Ecksteifigkeit (nur die Rahmenstärke) auf. Ab einer Dicke von 5 mm sind die Verformungen deutlich geringer. Relativ gleichbleibend ist die Verschiebung ab einer Stärke von 10 mm.

Stegdicke:

Die Variation der Stegdicke hat keinen bedeutenden Einfluss auf die Verschiebung des Flansches aus der Rahmenebene.

Lastfall:

Die größten Verschiebungen ergeben sich für die Lastgruppe: LF: H+VG+W, LF: H+W, LF: H+VG. Diese weisen im Wesentlichen die gleiche Verschiebung auf. Die Verschiebung des LF: H+VG+W ist etwas größer als die der beiden anderen Lastfälle. Diese liegt bei rund 2,8 mm. Die Lastfälle LF: H, LF: H+VK, LF: H+VK+W erzeugen annähernd die gleiche Verschiebung mit rund 1,6 mm (siehe Abb. 102). Das gleiche Verhalten zeigt sich bei der 2. Vorverformung. Die maximale Verschiebung beträgt 1,9 mm und die größte Verschiebung der anderen Lastfallgruppe rund 0,7 mm.

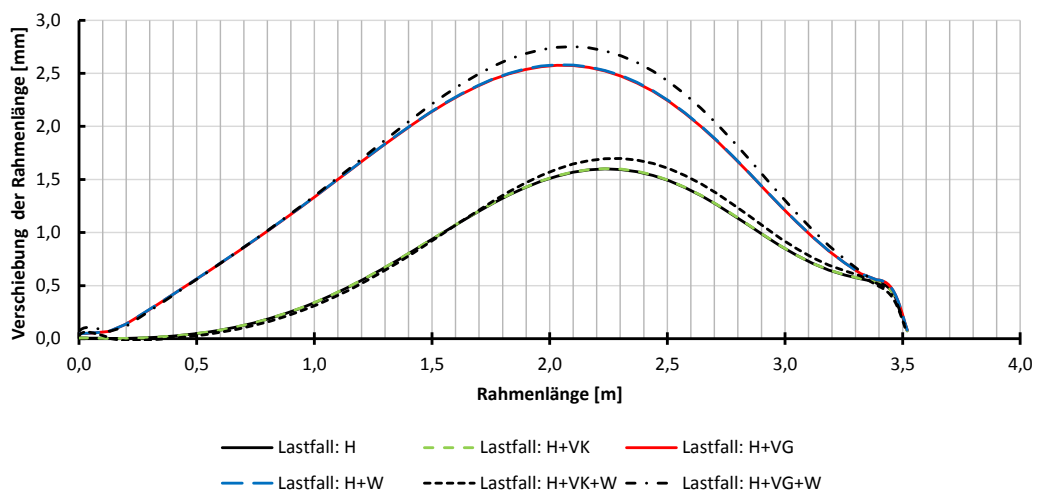


Abb. 102 Einfluss der Belastungsart auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung

Vorverformung:

Bei der Variation des Vorverformungsfaktors hat sich ab einem Faktor von 750 keine wesentliche Verringerung der Verschiebung ergeben. Die größte Verschiebung tritt beim Faktor 250 mit 2,5 mm auf, welche um rund 60 % größer ist, als jene des Referenzsystems (Faktor mit 500). Das gleiche Verhalten konnte für das System mit der 2. Vorverformung festgestellt werden.

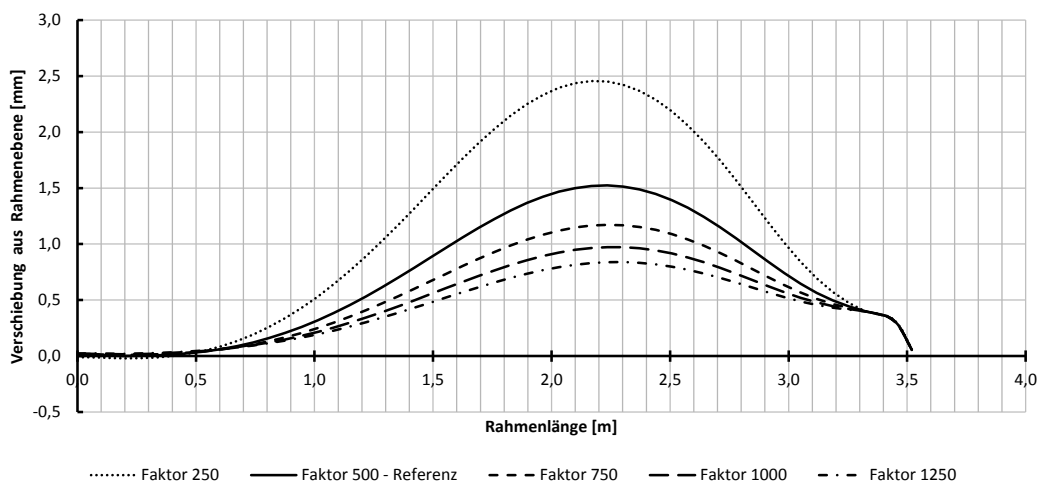


Abb. 103 Einfluss des Vorverformungsfaktors auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung

6.1 Maximale Verschiebung des Stahlrahmens in globaler x-Richtung

Die maximale horizontale Verschiebung des Stahlrahmens tritt an der Stelle der Lasteinleitung am linken oberen Rahmeneck auf. Zusätzlich zur horizontalen Beanspruchung wird aufgrund der exzentrischen Lasteinleitung vom Stahlrahmen über die obere linke Klotzung in die Glasscheibe ein zusätzliches Moment im Gegenuhrzeigersinn um die globale y-Achse erzeugt, welches die Verschiebung dadurch verstärkt. Die größte Verschiebung ergibt sich bei einem E-Modul der Klotzung von 1,4 N/mm² mit 97 mm. Die deutlich größere Verschiebung rührt daher, dass die Kopplung der Glasscheibe und des Stahlrahmens nur über Federn mit entsprechender Steifigkeit erfolgt und kein Kontaktverhalten zwischen Glasscheibe und Stahlrahmen definiert wurde. Deshalb legt sich die Glasscheibe nicht an den Stahlrahmen an, sondern schiebt sich durch den Rahmen. Daher ist diese Verschiebungsgröße nicht besonders aussagekräftig, da in der Realität so eine Verschiebung nicht auftreten wird.

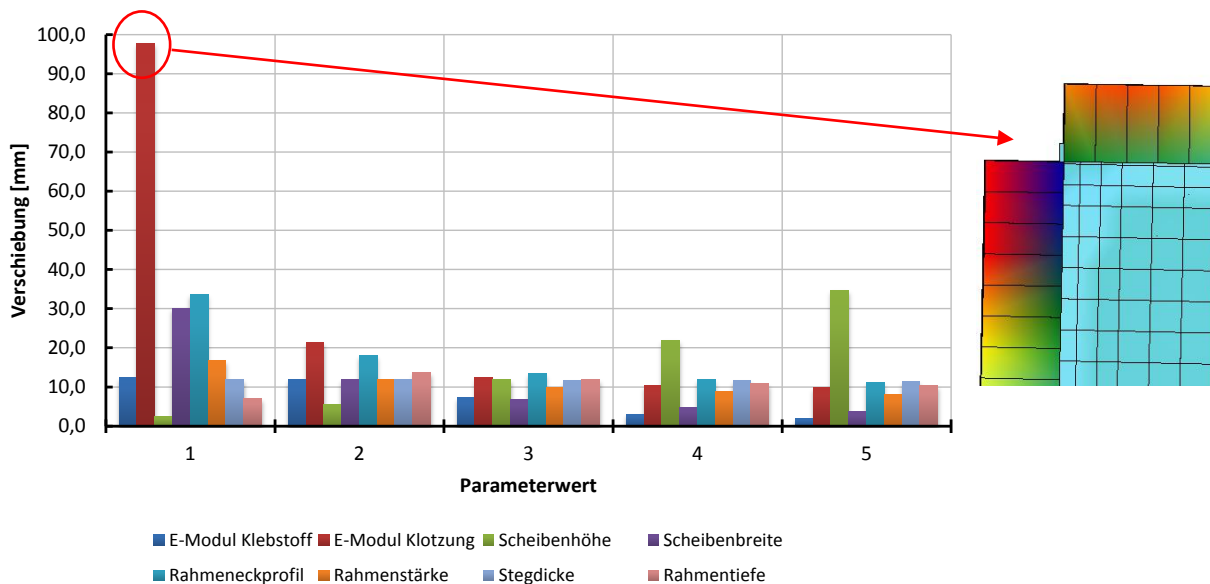


Abb. 104 Links die Darstellung der maximalen horizontalen Verschiebung des linken oberen Rahmenecks der jeweiligen Parameter und rechts die nicht überhöhte Verschiebung vom Rahmeneck zur Glasscheibe

6.2 Vergleichsspannungen des Rahmens

Der Stahlrahmen wird bei der Parametervariation bis auf den Lasteinleitungs- bzw. Lastausleitungsbereich nur gering ausgenutzt. Größere Vergleichsspannungen treten am linken vertikalen Stahlprofil auf. Erkennbar ist auch, dass diese bei größer werdender Verschiebung des Stahlprofils deutlich zunehmen, wohingegen sich die Vergleichsspannungen auf der rechten Rahmenseite eher nur gering vergrößern. Die Lagerung des Rahmens an der Unterseite spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Wesentlich für die größeren Vergleichsspannungen des linken vertikalen Rahmenprofils ist die deutliche Verdrehung des Rahmenecks im Lasteinleitungsbereich. Dadurch kommt es sowohl zu deutlich größeren Schubspannungen als auch zu Hauptspannungen. Die Vergleichsspannungen werden nach *von Mises* berechnet:

$$\sigma_{v,Stahl} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2} \quad (19)$$

Die größten Spannungen ergeben sich bei der Variation der Rahmendicke. Die Grafiken mit den berechneten Spannungsbildern zu den anderen Parametern werden im Anhang angehängt.

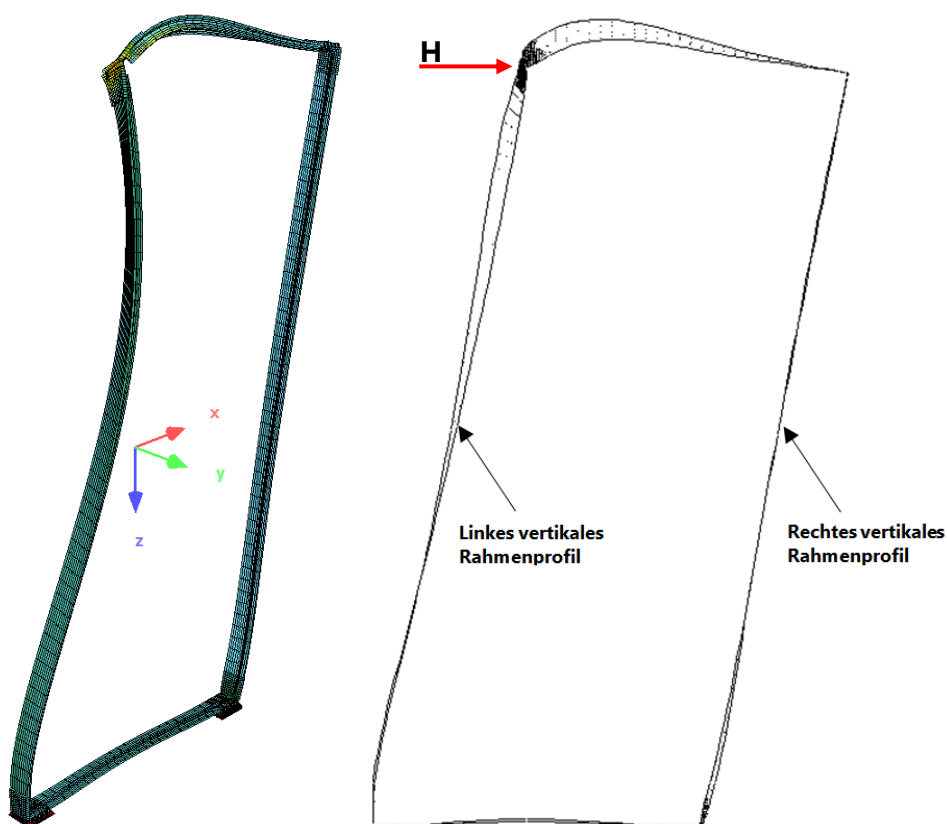


Abb. 106 Verwindung des Stahlprofils im Lasteinleitungsbereich (50-fach überhöht)

Referenzsystem mit einer horizontalen Belastung von 50 kN:

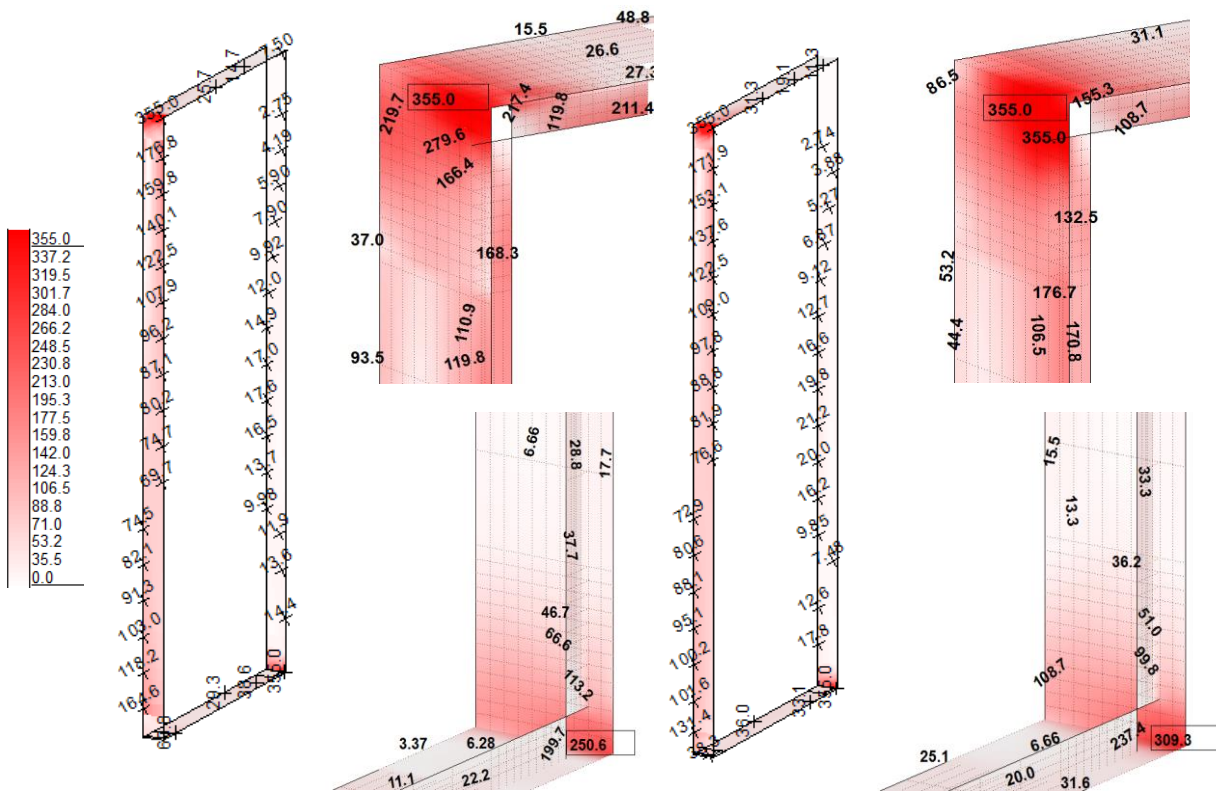


Abb. 107 Vergleichsspannungen Referenz: Oberseite links und Unterseite rechts, 1. Vorverformung

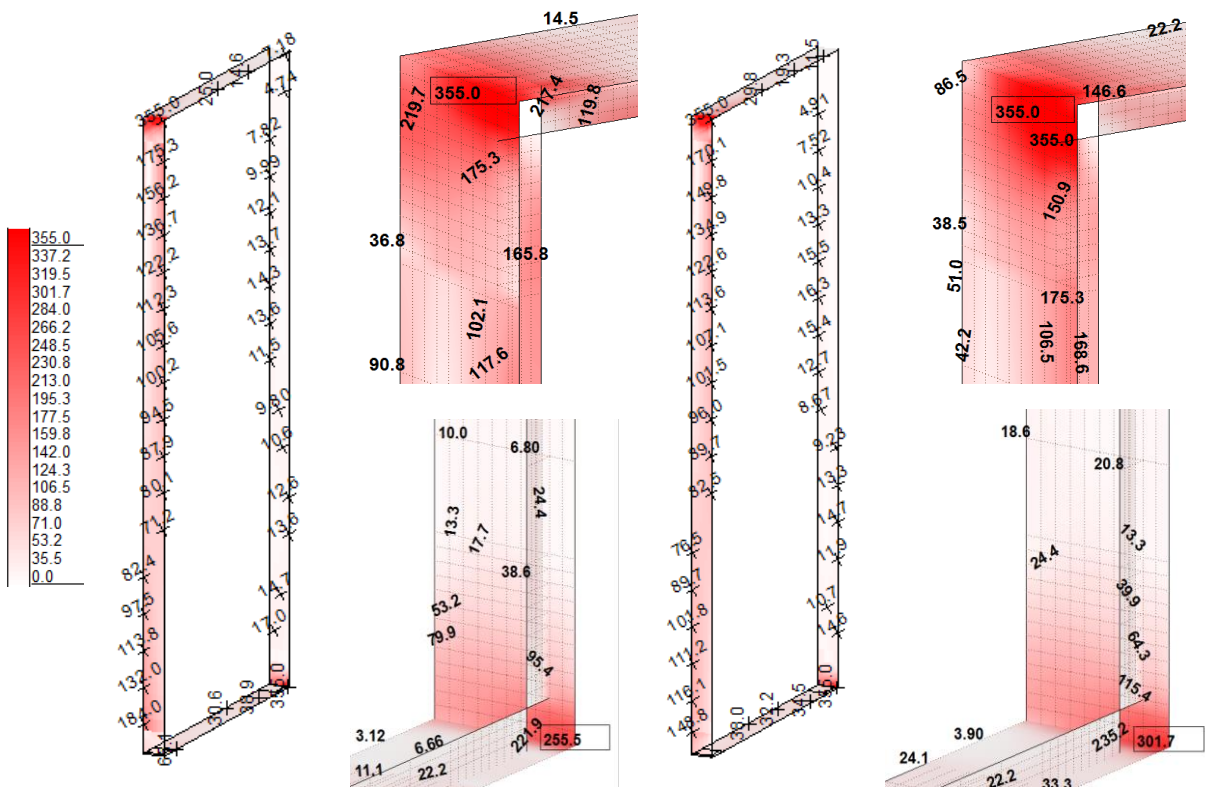


Abb. 108 Vergleichsspannungen Referenz: Oberseite links und Unterseite rechts, 2. Vorverformung

Rahmendicke mit 5 mm:

Bei einer Rahmendicke von 5 mm wird der Rahmen am stärksten beansprucht. Die Vergleichsspannungen ändern sich bei den anderen Parametern lediglich in der Größe, daher werden diese nicht explizit dargestellt, sondern werden im Anhang angehängt.

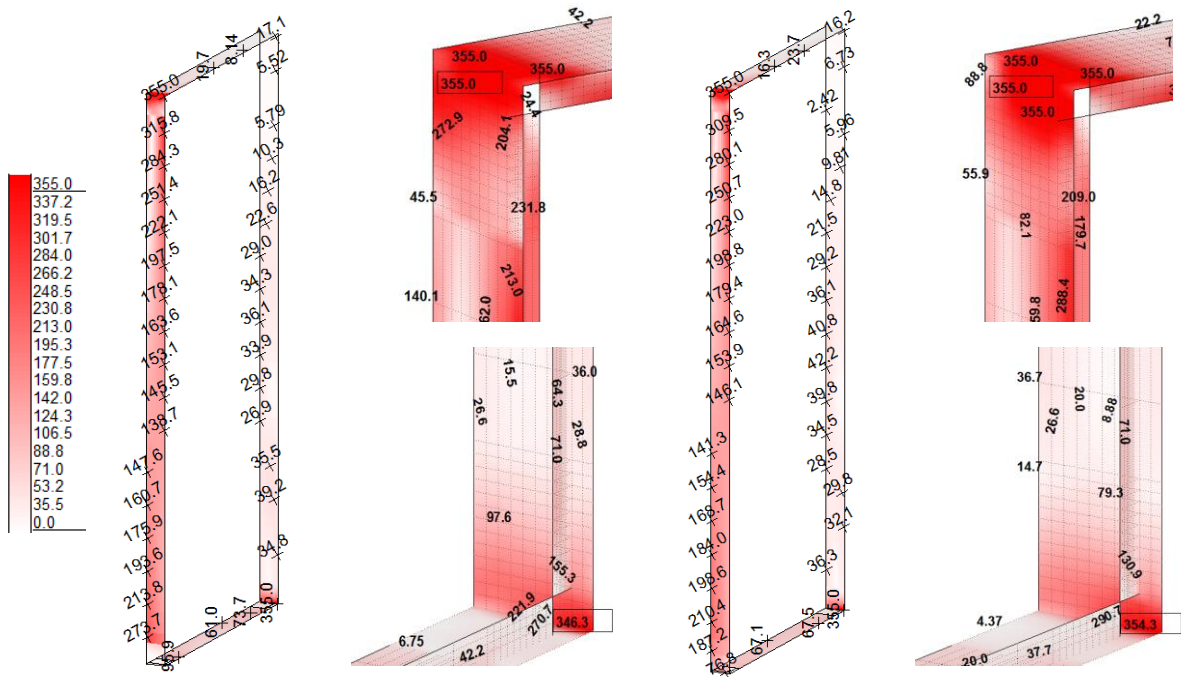


Abb. 109 Vergleichsspannungen Rahmendicke: Oberseite links und Unterseite rechts mit 1. Vorverformung

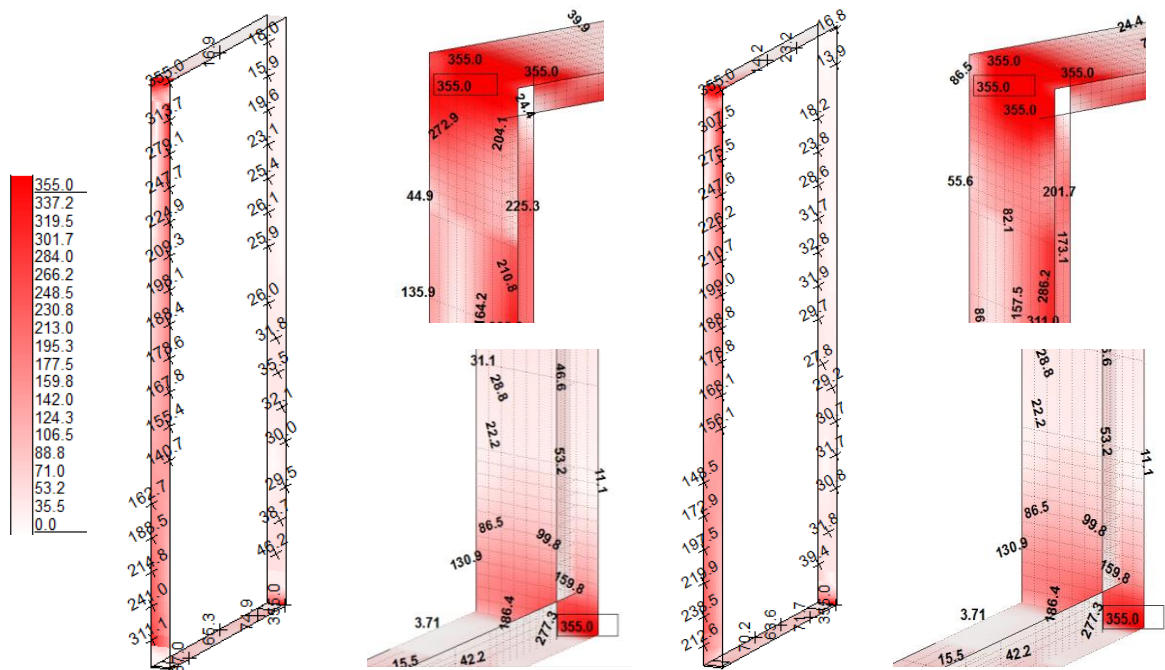


Abb. 110 Vergleichsspannungen Rahmendicke: Oberseite links und Unterseite rechts mit 2. Vorverformung

7 Verbundsicherheitsglas (VSG)

Als Variante zum Referenzsystem mit monolithischer Glasscheibe, wird jenes mit einer Verbundsicherheitsglasscheibe untersucht. Dazu werden einerseits der Schubmodul (G-Modul) der Zwischenschicht (z.B. PVB-Folie) und andererseits die Scheibendicke variiert. Ausgewertet wird der Einfluss auf die Verschiebung der Glasscheibe aus der Ebene, die Hauptspannungen sowie die Eigenwerte.

Belastet wird das System über zwei Einzellasten mit jeweils 25 kN, welche am linken oberen Rahmeneck in Richtung der jeweiligen Scheibenebene wirken.

Die Kraftübertragung vom Rahmen zu den beiden Scheiben erfolgt einerseits über Klotzungen in den Scheibenecken und andererseits linienförmig über die Randverklebung der hinteren Scheibe.

Abgebildet werden die Klotzungen und Randverklebungen mit Federn, wobei bei den Klotzungsfedern ein Ausfall bei Zugbeanspruchung berücksichtigt wird. Der Verbund zwischen den Scheiben wird ebenfalls mit Federn abgebildet. Dabei entspricht die Federsteifigkeit in Scheibenebene dem tatsächlichen Schubmodul der PVB-Folie, die Federsteifigkeit quer zur Scheibenebene (in globaler y-Richtung) wird mit einem E-Modul von 70.000 N/mm^2 modelliert. Die PVB-Foliendicke beträgt 1,52 mm und wird nicht verändert. Folgende Parameter werden variiert:

Scheibendicke				
2 x 6 [mm]				
2 x 8 [mm]				
Schubmodul der PVB-Folie				
1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	5. Wert
0,004 [N/mm ²]	0,04 N/mm ²]	0,4 [N/mm ²]	4 [N/mm ²]	40 [N/mm ²]

Tab. 22 Parameter der VSG-Scheibe

In Abb. 111 ist der deutliche Einfluss des Schubmoduls auf die Eigenwerte erkennbar. Ab einem G-Modul von 0,4 nehmen die Eigenwerte deutlich zu. Davor ist nur eine geringe Veränderung der Eigenwerte erkennbar. Dies ist damit begründet, dass das Widerstandsmoment der VSG-Scheibe durch den Verbund der einzelnen Scheiben deutlich zunimmt und bei starrem Verbund das Widerstandsmoment einer monolithischen Scheibe mit äquivalenter Dicke entspricht.

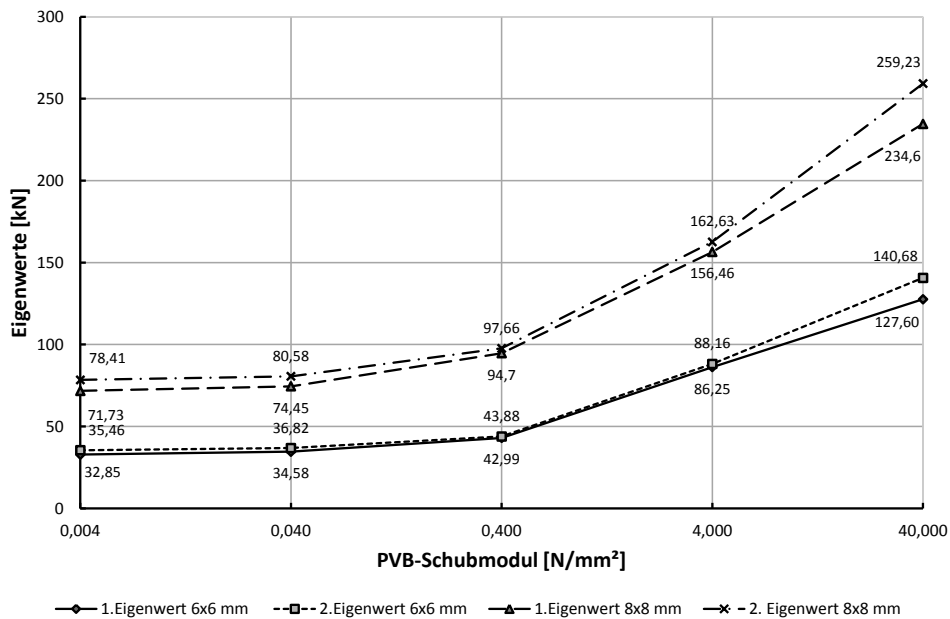


Abb. 111 Einfluss der Schubmodulvariation der PVB-Folie auf die Eigenwerte

Die Abb. 112 und Abb. 113 zeigen die Verformungen der äußeren Scheibe aus der Scheibenebene (nicht randverklebte Scheibe) entlang der Scheibendiagonale. Erkennbar ist, dass mit zunehmendem G-Modul die Verschiebungen aus der Ebene reduziert werden. Dies gilt auch für die VSG-Scheibe mit einer Scheibendicke von 8 mm (siehe Abb. 114 und Abb. 115).

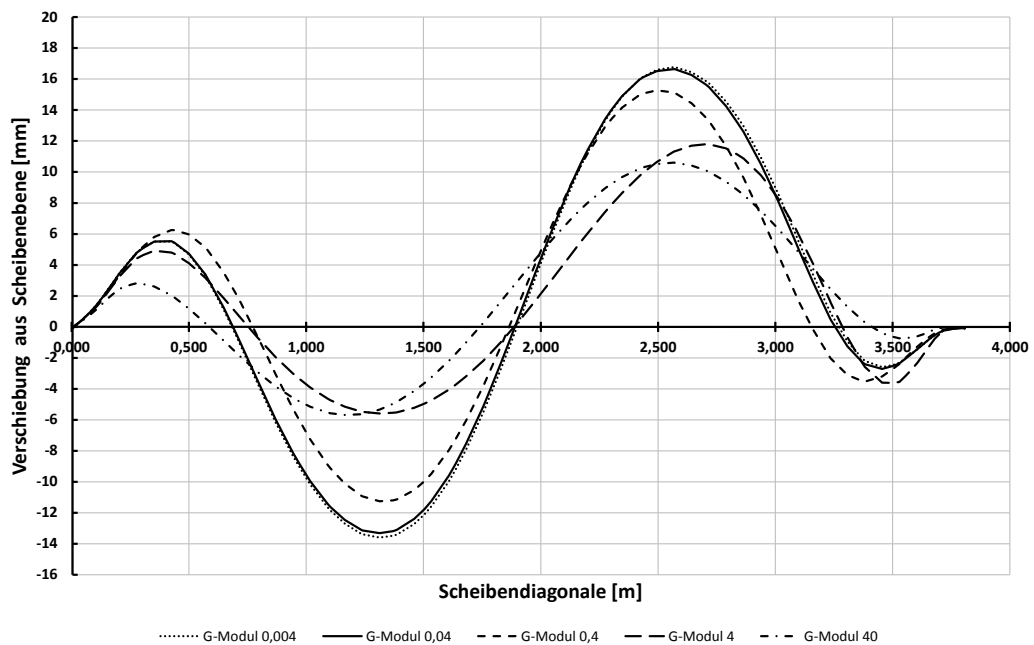


Abb. 112 VSG 2 x 6 mm: Einfluss des G-Moduls auf die Verschiebung der vorderen Scheibe für das System mit der 1. Eigenform als Vorverformung

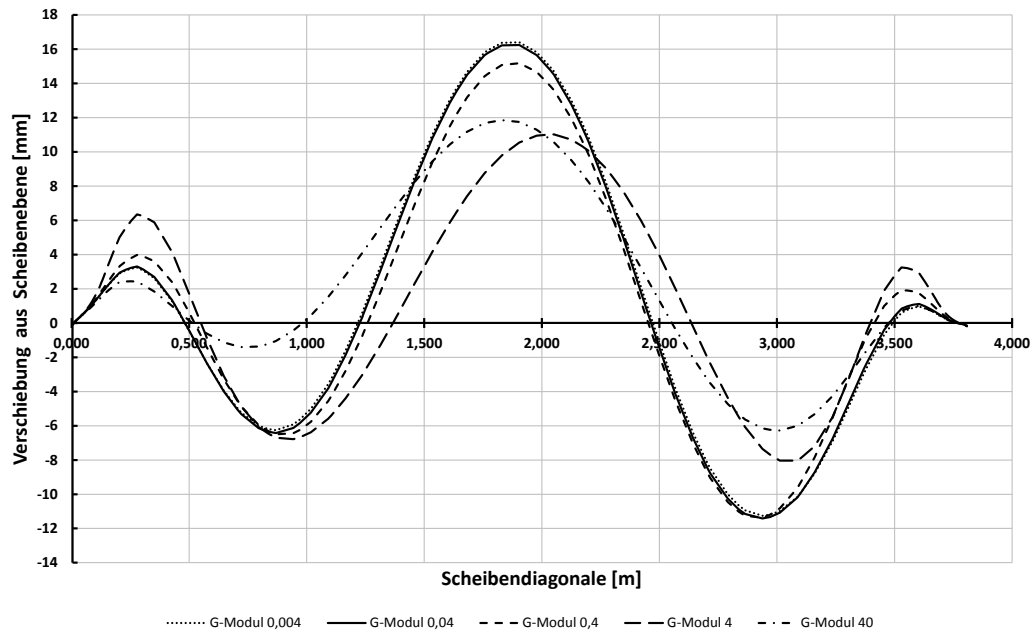


Abb. 113 VSG 2 x 6 mm: Einfluss des G-Moduls auf die Verschiebung der vorderen Scheibe für das System mit der 2. Eigenform als Vorverformung

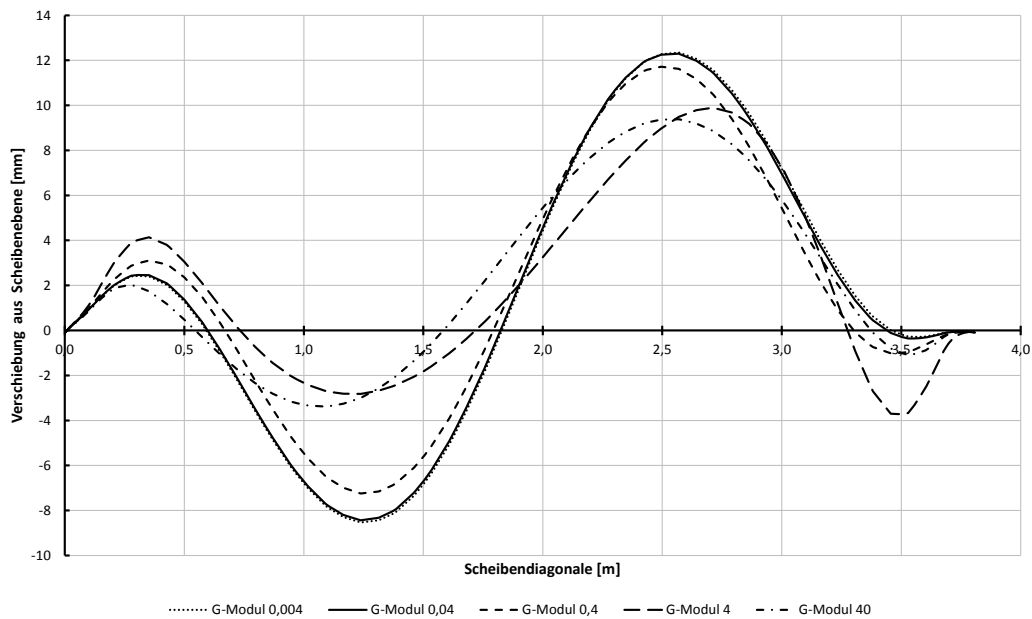


Abb. 114 VSG 2 x 8 mm: Einfluss des G-Moduls auf die Verschiebung der vorderen Scheibe für das System mit der 1. Eigenform als Vorverformung

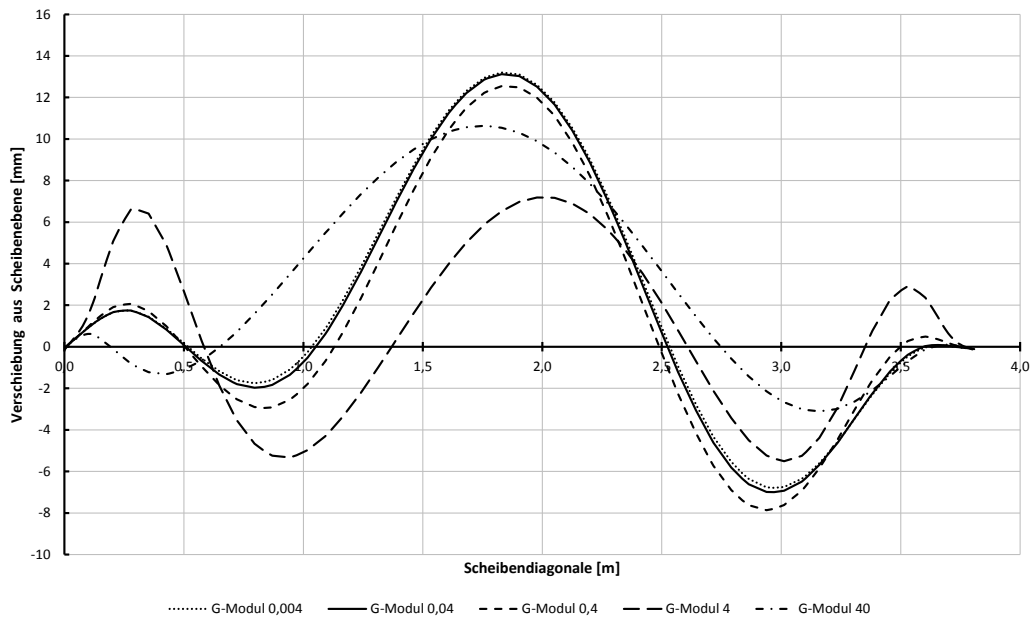


Abb. 115 VSG 2 x 8 mm: Einfluss des G-Moduls auf die Verschiebung der vorderen Scheibe für das System mit der 2. Eigenform als Vorverformung

In Tab. 23 wird der Einfluss der Variation der Parameter auf die maximale Verschiebung des rechten oberen Rahmenecks in globaler x-Richtung aufgezeigt. Deutlich wird, dass die Variation des G-Moduls kaum einen Einfluss hat.

Verschiebung des rechten Rahmenecks				
1. Vorverformung 6x6 mm			2. Vorverformung 6x6 mm	
VSG	6x6 mm		VSG	6x6 mm
Schubmodul PVB-Folie [MPa]			Schubmodul PVB-Folie [MPa]	
0,004	12		0,004	12
0,04	12		0,04	12
0,4	11,7		0,4	11,9
4	11		4	11,4
40	10,5		40	10,7
1. Vorverformung 8x8 mm			2. Vorverformung 8x8 mm	
VSG	8x8 mm		VSG	8x8 mm
Schubmodul PVB-Folie [MPa]			Schubmodul PVB-Folie [MPa]	
0,004	10		0,004	10,1
0,04	9,98		0,04	10,1
0,4	9,91		0,4	10,1
4	9,8		4	10,1
40	9,43		40	9,43

Tab. 23 Einfluss des Schubmoduls der PVB-Folie auf die Verschiebung des rechten Rahmenecks

Die größten Hauptzugspannungen treten bei der äußeren Scheibe in den Rahmenecken der Lasteinleitung bzw. Lastausleitung auf. Mit zunehmendem G-Modul nehmen die Hauptspannungen ab. Am deutlichsten ist das bei der Erhöhung von 4 N/mm² auf 40 N/mm² zu erkennen. Jedoch gibt es derzeit kein geeignetes Material das diesen hohen Schubmodul von 40 N/mm² aufweist und dient

daher nur als Richtwert für eine obere Grenze. Hingegen ist bei einem Schubmodul von $0,4 \text{ N/mm}^2$ (PVB-Folie) zu 4 N/mm^2 (Zwischenmaterial aus Sentry Glas) eine deutliche Verringerung der Spannungen zu erkennen. Bei der Erhöhung der Scheibendicke von 6 mm auf 8 mm ist der Einfluss des Schubmoduls etwas geringer. Exemplarisch wurden dafür die Hauptspannungen für die Varianten mit 2×6 und $2 \times 8 \text{ mm}$ Scheibendicke mit jeweils einem G-Modul der PVB-Schicht von $0,4 \text{ N/mm}^2$ dargestellt. Die Hauptspannungsbilder werden im Anhang angehängt. Allgemein kann festgestellt werden, dass bei einer Vorverformung der Scheibe in globaler y-Richtung die äußere Scheibe und bei einer Vorverformung entgegen der globalen y-Richtung die innere Scheibe, für die Betrachtung der Hauptzugspannungen, maßgebend ist.

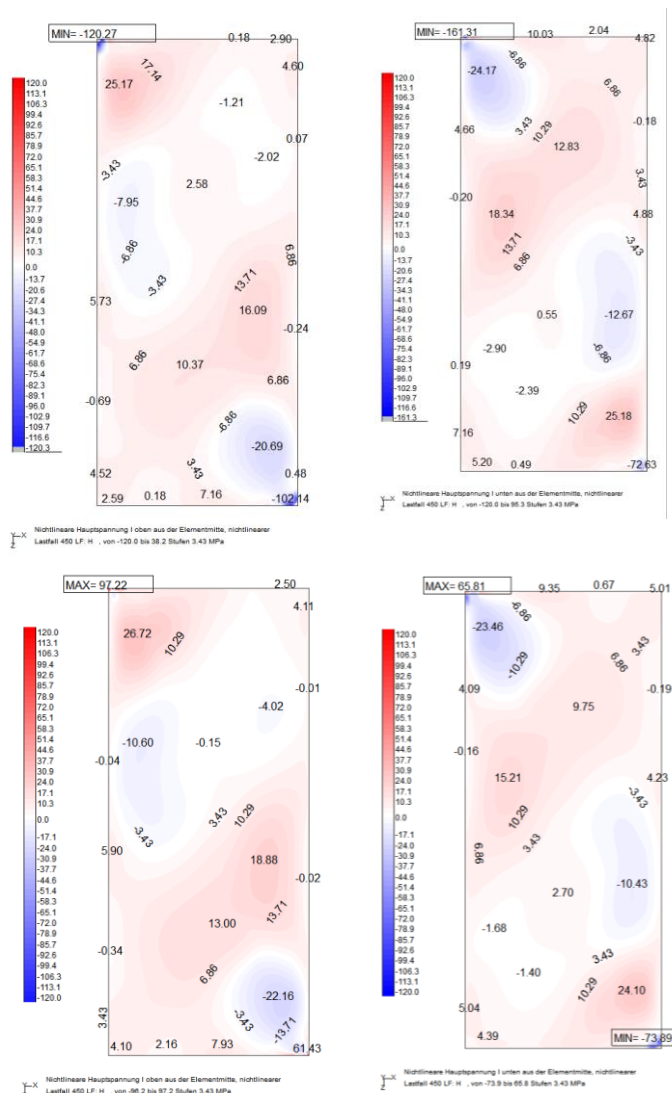


Abb. 116 Hauptspannungen an der Ober- und Unterseite der hinteren Scheibe oben und der vorderen Scheibe unten, für die VSG-Variante mit $2 \times 6 \text{ mm}$ und einem G-Modul von $0,4 \text{ N/mm}^2$, mit der 1. Eigenform als Vorverformung

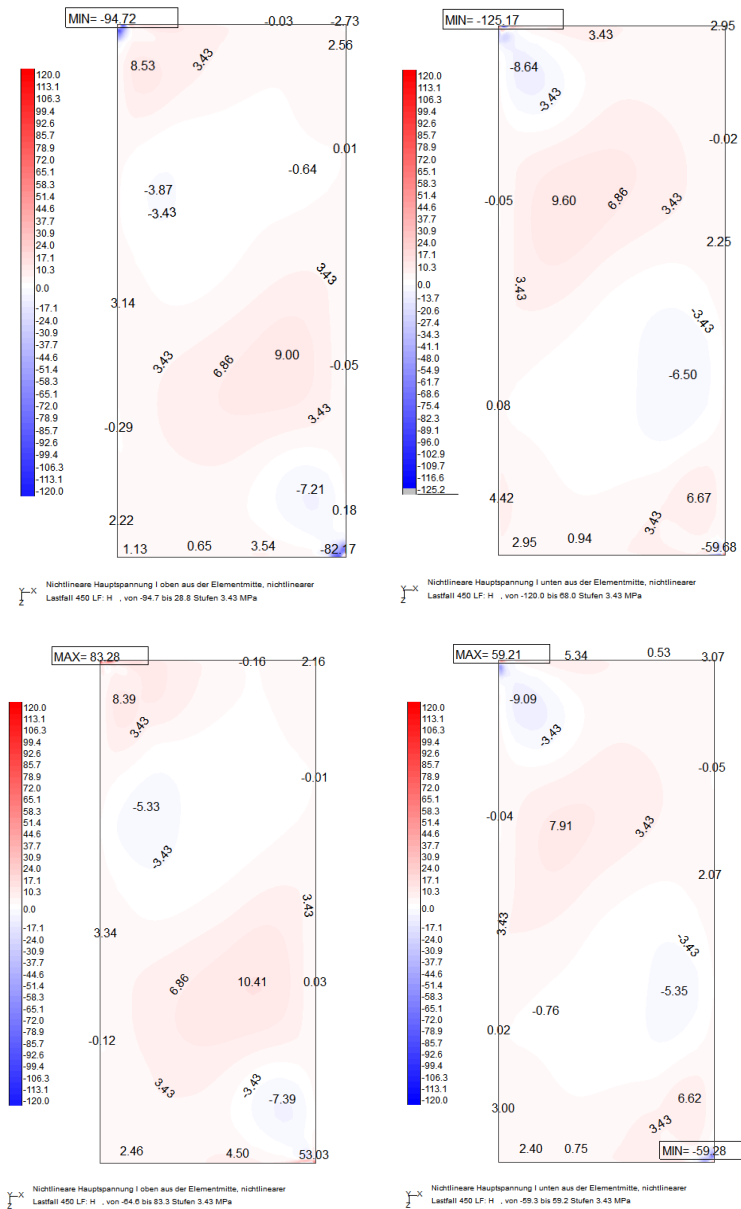


Abb. 117 Hauptspannungen an der Ober- und Unterseite der hinteren Scheibe oben und der vorderen Scheibe unten, für die VSG-Variante mit $2 \times 8 \text{ mm}$ und einem G-Modul von $0,4 \text{ N/mm}^2$, mit der 1. Eigenform als Vorverformung

8 Vordimensionierung - Stabmodell

Für eine rasche und ingenieurmäßige Abschätzung der zu erwartenden Ergebnisse und eine erste Vordimensionierung der Tragelemente verwendet man in der Praxis häufig Stabmodelle. Dadurch entsteht ein deutlich geringerer Aufwand bei der Modellierung und Berechnung. Vor allem bei großen Glasfassaden lässt sich so eine rasche Abschätzung treffen, ob Grenzwerte (z.B. max. Verschiebung) eingehalten werden können (siehe Abb. 118).

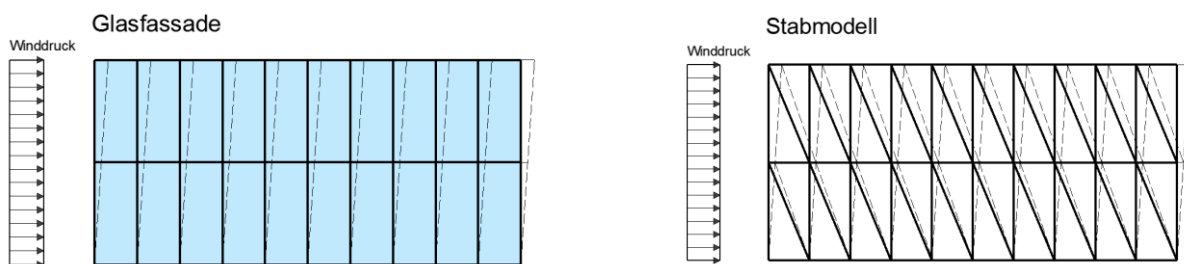


Abb. 118 Schematische Darstellung einer Glasfassade und die vereinfachte Abbildung anhand eines Stabmodells

Für die Verifizierung eines geeigneten Stabmodells werden zwei verschiedene Stabmodelle untersucht und mit dem Referenzsystem verglichen (siehe Abb. 119). Dabei wird die maximale Verschiebung am rechten oberen Rahmeneck in globaler x-Richtung als Vergleichsparameter herangezogen. Die Vordimensionierung wird für den Lastfall: H (horizontale Knotenlast mit 50 kN) durchgeführt.

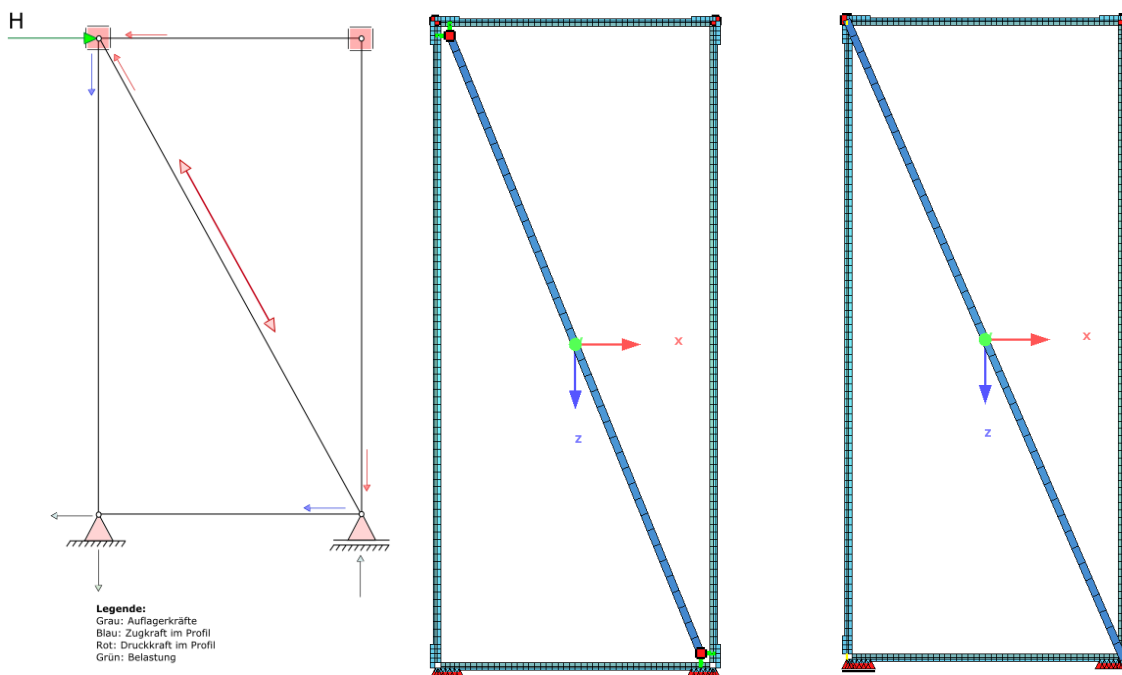


Abb. 119 Schematische Skizze des statischen Systems (links), 1. Stabmodell (Mitte) und 2. Stabmodell (rechts)

Bei beiden Stabmodellen wird die Randverklebung der Glasscheibe nicht abgebildet, weil der primäre Lastabtrag über die Klotzung erfolgt. Das Eigengewicht der Konstruktion wird bei der Berechnung der Verschiebung vernachlässigt. Die Effekte der Vorverformung sowie der Randverklebung werden jedoch bei der Ermittlung der erforderlichen Stabfläche, um die gleiche maximale Verschiebung in globaler x-Richtung zu erreichen, indirekt berücksichtigt. Bei beiden Stabmodellen werden die Rahmenecken einmal biegestarr und einmal gelenkig miteinander gekoppelt.

1. Stabmodell:

Beim ersten Stabmodell wird die Klotzung über Federn berücksichtigt. Die Federsteifigkeit der Einzelfeder errechnet sich nach Gleichung (20).

$$cp_K = \frac{E_K * A_K}{h_K} = 2500 * \frac{2200}{10} = 550000 \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (20)$$

Mit:

$$A_K = b_K [mm] * l_K [mm] = 22 * 100 = 2200 [mm^2] \dots \text{Einflussfläche der Klotzung}$$

$$E_K = 2500 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \dots E - \text{Modul der Klotzung (POM)}$$

$$h_K = 10 [mm] \dots \text{Höhe der Klotzung}$$

Der Diagonalstab wird als Fachwerkstab definiert und mit den Klotzungsfedern verbunden. Zusätzlich muss der Stab aus der Ebene gehalten werden, um ein Verschieben aus der Ebene zu verhindern.

2. Stabmodell:

Beim zweiten Stabmodell wird der Stab direkt mit den Rahmenecken verbunden. Die Verbindung der Rahmenecken erfolgt mit Kopplungen, die je nach Einstellung gelenkig oder biegestarr definiert werden können. Die Klotzungssteifigkeit wird bei diesem Modell vernachlässigt.

Der Stab wird als quadratischer Vollquerschnitt mit einem E-Modul von 210000 N/mm² definiert. Bei beiden Modellen wird die Fläche des Stabes so lange variiert, bis die Gesamtverschiebung des rechten Rahmenecks ähnlich dem des Referenzmodells ist.

Beim ersten Stabmodell hat sich gezeigt, dass sich das System mit den gelenkigen Rahmenecken nicht eignet, da die Verschiebung deutlich größer ist, als die des Referenzsystems. Auch die Variante mit biegesteifen Rahmenecken führt zu keiner zufriedenstellenden Möglichkeit, da ab einer Stababmessung von 200 mm keine wesentliche Verringerung der Verschiebung erreicht werden kann. Eine Erklärung dafür ist die unterschiedliche Lasteinleitung in den Diagonalstab. Beim ersten Stabmodell geht ein großer Anteil der horizontalen Last direkt in das obere horizontale Rahmenprofil. Zudem kommt es aufgrund der versetzten Lasteinleitung über die Klotzungsfedern zu einer stärkeren Verformung des linken oberen Rahmenecks, da durch die Exzentrizität ein Moment um die globale y-Achse entsteht. Aufgrund der geringen Steifigkeit um die y-Achse verformt sich der Rahmen deutlich (siehe Abb. 120). Beim Referenzsystem hingegen ist eine deutlich geringere Verformung zu beobachten, da durch die randverklebte Scheibe die Verformung des Rahmens kontinuierlich behindert wird.

Beim 2. Stabmodell wird durch die direkte Kopplung des Stabes im Rahmeneck ein wesentlicher Anteil der horizontalen Last über den Diagonalstab abgeleitet. Zudem verformt sich das System aufgrund der zentrischen Lasteinleitung in den Diagonalstab deutlich weniger, da hier keine zusätzlichen Momente erzeugt werden. Für eine weitere Betrachtung wird das zweite Stabmodell mit gelenkig verbundenen Rahmenecken herangezogen, da dieses die geringste Abweichung und somit eine relativ gute Abschätzung der Verschiebung liefert (siehe Tab. 24). Variiert wird die Scheibendicke und dazu werden die erforderlichen Stabflächen, die für eine ähnliche Verschiebung des Systems notwendig sind, ermittelt (siehe Abb. 121).

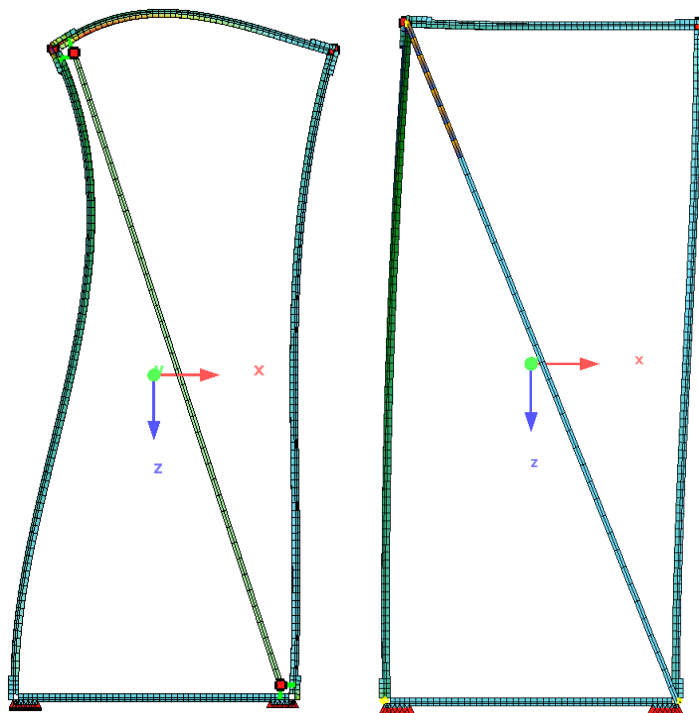


Abb. 120 Verformungsfigur des 1. Stabmodells links und des 2. Stabmodells jeweils mit biegesteifen Rahmenecken rechts (10-fach überhöht)

Verschiebung des Rahmenecks	
Referenzsystem :	
Verschiebung:	11,7 mm
1. Stabmodell biegesteif:	
Stababmessung:	200 mm
Stabfläche:	40000 mm ²
Verschiebung:	15,3 mm
Abweichung:	30,8 %
Verschiebung mit 28 mm	
Stababmessung:	21,5 mm
1. Stabmodell gelenkig:	
Stababmessung:	1000 mm
Stabfläche:	1000000 mm ²
Verschiebung:	68,2 mm
Abweichung:	217,2 %
Verschiebung mit 28 mm	
Stababmessung:	73,6 mm
2. Stabmodell gelenkig :	
Stababmessung:	28 mm
Stabfläche:	784 mm ²
Verschiebung:	11,6 mm
Abweichung:	0,85 %
2. Stabmodell biegesteif :	
Stababmessung:	28 mm
Stabfläche:	784 mm ²
Verschiebung:	11,4 mm
Abweichung:	2,56 %

Tab. 24 Vergleich der Verschiebungen der unterschiedlichen Stabmodelle

Die angeführten Werte in Abb. 121 gelten jedoch nur für das Referenzsystem. Beispielhaft wird die erforderliche Stabfläche für verschiedene Scheibendicken ermittelt. Mit diesem Stabmodell kann für größere Fassadensysteme, bei denen der Konstruktionsaufbau dem des Referenzmodells entspricht, eine Abschätzung der zu erwartenden Verschiebungen in der Ebene getroffen werden.

Variation Scheibendicke	
Scheibendicke:	6 mm
Verschiebung	19,8 mm
erf. Stabfläche*	361 mm ²
Verschiebung	20,3 mm
Scheibendicke:	8 mm
Verschiebung	13,6 mm
erf. Stabfläche*	625 mm ²
Verschiebung	13,5 mm
Scheibendicke:	10 mm
Verschiebung:	11,7 mm
erf. Stabfläche*:	784 mm ²
Verschiebung	11,6 mm
Scheibendicke:	12 mm
Verschiebung	10,8 mm
erf. Stabfläche*:	961 mm ²
Verschiebung	10,3 mm
Scheibendicke:	15 mm
Verschiebung	9,85 mm
erf. Stabfläche*:	1024 mm ²
Verschiebung	9,9 mm

Legende:

* für das 2. Stabmodell (gelenkig)

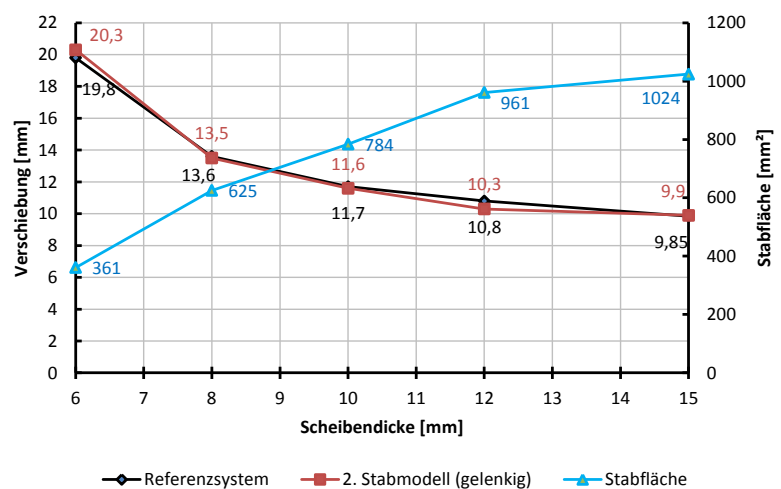


Abb. 121 Erforderliche Stabfläche für das 2. Stabmodell mit gelenkigen Rahmenecken

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse des numerischen Tragverhaltens einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden, bei der die Glasscheibe die schubaussteifende Wirkung der Tragkonstruktion übernimmt. Anhand einer Parameterstudie sollen die Einflüsse auf das Trag- und Stabilitätsverhalten der Konstruktion aufgezeigt und diskutiert werden.

Zum Erreichen der Zielsetzung wurden zunächst die erforderlichen theoretischen Kenntnisse über aussteifende Glasscheiben aufbereitet. In Kapitel 2 wurde die Eignung verschiedener Kunststoffe sowie Klebstoffe zur Lasteinleitung in die Glasscheibe erläutert. Des Weiteren wurden wesentliche Einflüsse auf das Beultragverhalten aufgezeigt und Berechnungsmöglichkeiten für Glasscheiben mit umlaufender Lagerung unter Längsdruck- und Schubbelastung dargelegt. Im dritten Kapitel wurde die Wahl der Elemente zur Modellierung, die Materialwahl, die Lagerung des Stahlrahmens und der Glasscheibe, die Art der Vorverformung, die verschiedenen Belastungen sowie das verwendete Berechnungsverfahren erörtert. Die zu variierenden Parameter wurden im vierten Kapitel in einer Parametermatrix aufgelistet. Anschließend wurde der Einfluss der verschiedenen Parameter auf das Verformungsverhalten sowie auf die Spannungsverteilung der Glasscheibe und des Stahlrahmens erfasst und diskutiert. Im letzten Kapitel wurde eine Möglichkeit für die Vordimensionierung von größeren Fassadensystemen aufgezeigt. Dazu wurden verschiedene Stabmodelle entwickelt und deren Eignung untersucht.

9.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Parameterstudie

Variation der E-Moduli

Bei der Auswertung der verschiedenen Parameter konnte festgestellt werden, dass sich die Variation des E-Moduls der Klotzung deutlich auf das Tragverhalten auswirkte. Die Größe der Steifigkeit spielte eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung der Eigenformen. Es konnte festgestellt werden, dass bei einer geringen Steifigkeit von $1,4 \text{ N/mm}^2$ eine homogenere Spannungsverteilung in der Glasscheibe auftrat und somit wesentlich höhere Beuleigenwerte ermittelt werden konnten. Ein weiterer Grund für die höheren Eigenwerte ist, dass aufgrund der geringen Klotzungssteifigkeit die Last primär über den Klebstoff in die Scheibe eingeleitet wurde, wohingegen bei einer höheren Klotzungssteifigkeit, in dieser Arbeit ab 250 N/mm^2 zu erkennen, die Last primär über die Klotzung in die Scheibe geleitet wurde. Jedoch konnte bei einer Klotzungssteifigkeit von $1,4 \text{ N/mm}^2$ eine große Verschiebung der Glasscheibe und des Stahlrahmens festgestellt werden, die zu einem Anlegen der Glasscheibe an den Stahlrahmen führen würde, wodurch es in diesen Bereichen der Scheibe zu einem Versagen kommen könnte.

Bei der Variation des E-Moduls des Klebstoffs konnte ebenfalls bei zunehmender Steifigkeit ein homogeneres Spannungsbild in der Glasscheibe beobachtet werden, wodurch auch die deutlich zunehmenden Eigenwerte erklärbar waren. Ab einem E-Modul von 10 N/mm^2 kam es entlang der Scheibendiagonale zu einer deutlichen Verminderung der Verschiebung aus der Ebene. Es konnte eine Umlagerung der Hauptzugspannungen von der Scheibenmitte hin zu den Rändern beobachtet werden, wodurch eine erhöhte Beanspruchung des Rahmenprofils samt größerer Verformung erkennbar waren.

Es konnte festgehalten werden, dass sich die Variation der E-Moduli der Klotzung und des Klebstoffs signifikant auf die Ermittlung der Eigenformen und der zugehörigen Eigenwerte der Glasscheibe auswirkte.

Variation der Scheibengeometrie

Bei der Variation der Scheibengeometrie ergab sich ein deutlicher Einfluss der Scheibenhöhe auf die Eigenformen. Mit zunehmender Scheibenhöhe konnte eine größere Anzahl und eine stärkere Krümmung der Halbwellen entlang der Glasscheibendiagonale beobachtet werden. Aufgrund der stärkeren Krümmung waren deutlich höhere Hauptzugspannungen in der Glasscheibe erkennbar. Bei der Referenzscheibe trat die maximale Hauptzugspannung an der unteren Halbwelle auf und betrug $17,4 \text{ N/mm}^2$, wohingegen bei einer Scheibenhöhe von 5500 mm eine Hauptzugspannung an der unteren Halbwelle von $35,3 \text{ N/mm}^2$ festgestellt werden konnte. Diese Erkenntnisse konnten auch für den Stahlrahmen gemacht werden, da mit zunehmender Höhe die Eigensteifigkeit des Rahmens vermindert wurde und dieser aufgrund der hohen Druckbeanspruchung deutlich ausweicht.

Das günstigste Tragverhalten konnte bei der quadratischen Scheibe erzielt werden, da sich nur eine große Halbwelle entlang der Scheibendiagonale einstellte, waren die Spannungen und Verschiebungen verglichen zum Referenzsystem deutlich geringer. Die maximale Hauptzugspannung trat in der Scheibenmitte mit $6,5 \text{ N/mm}^2$ auf.

Einen deutlichen Einfluss auf das Tragverhalten hat die Variation der Scheibendicke gezeigt. Mit zunehmender Scheibendicke erhöhte sich der kritische Eigenwert von $15,5 \text{ kN}$ (Scheibendicke 6 mm) auf $182,9 \text{ kN}$ (Scheibendicke 15 mm). Zudem verringerten sich die Hauptzugspannungen von $85,79 \text{ N/mm}^2$ (Scheibendicke von 6 mm) hin zu $7,19 \text{ N/mm}^2$ (Scheibendicke von 15 mm) deutlich.

Variation der Rahmengenometrie

Bei der Variation der Rahmendicke, der Rahmeneckprofilstärke sowie der Stegdicke konnte kein wesentlicher Einfluss auf die Verformung und auf die Hauptzugspannungen der Glasscheibe festgestellt werden. Beim Stahlrahmen hat sich die Variation der Rahmendicke deutlich auf die Verformungsfigur und Verschiebungsgröße ausgewirkt. Bei einer Rahmendicke von 5 mm kommt es zu einer beinahe 7-fach größeren Verschiebung als beim Referenzsystem mit 10 mm . Große

Verformungen haben sich auch bei einer Eckprofilstärke von 0 mm (kein Eckprofil) ergeben. Diese konnten bereits mit einer Eckprofilstärke von 5 mm deutlich reduziert werden.

Hingegen konnte bei der Variation der Rahmentiefe von 0 mm ein deutlicher Einfluss auf die Verformung, die Hauptzugspannungen und die Eigenwerte der Scheibe bemerkt werden. Ferner konnte lediglich eine maximale horizontale Belastung von 20 kN aufgebracht werden, da eine Belastung über 20 kN zu einem Stabilitätsversagen geführt hat. Ab einer Rahmentiefe von 90 mm gab es keinen wesentlichen Einfluss mehr auf das Tragverhalten der Glasscheibe.

Lastfallkombinationen

Bei der Lastfallvariation konnte der deutlichste Einfluss auf die Verschiebungen und Spannungen der Glasscheibe und des Stahlrahmens bei einer Kombination von horizontaler Belastung und Windsog beobachtet werden. Der Einfluss der vertikalen Belastung war hingegen bei einer Belastungsgröße von 2,6 kN, infolge des Konstruktionseigengewichts eines darüber befindlichen Elements, verschwindend gering. Erst bei einer Lastgröße von über 100 kN konnte ein Einfluss auf die Verschiebungen und Spannungen festgestellt werden.

Vorverformungsfaktor

Der Vorverformungsfaktor hatte auf die Verschiebungen der Scheibe und des Stahlrahmens ab einem Faktor von 750 bis 1250 nur mehr einen geringen Einfluss ergeben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit den zu Beginn gewählten Abmessungen des Referenzsystems, für den Lastfall einer horizontalen Aussteifungslast, ein gutes Stabilitäts- und Tragverhalten erreicht werden konnte. Die Steifigkeit der Klebung sollte von $1,4 \text{ N/mm}^2$ auf 10 N/mm^2 erhöht werden, da dadurch das Tragverhalten entscheidend verbessert werden konnte. Des Weiteren würde der Autor dieser Arbeit eine Rahmendicke von 15 mm empfehlen, da somit die Verschiebungen des Rahmens wesentlich reduziert werden können. Aufgrund der geringen Beanspruchung des Stahlrahmens, sollte ein Baustahl der Güte S 235, außer in den Eckbereichen sollte die Stahlgüte S 355 beibehalten werden, verwendet werden.

10 Ausblick

Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse aus der numerischen Untersuchung können als Grundlage für die Bemessung der Konstruktion und zur Erstellung von weiteren Berechnungsmodellen herangezogen werden. Dafür müssen diese zunächst anhand von versuchstechnischen Untersuchungen verifiziert und auf deren Richtigkeit überprüft werden.

Bei der Variation der Parameter haben sich im Bereich der Lasteinleitung Spannungsspitzen gebildet, welche in weiterer Folge noch genauer zu untersuchen sind. Hierfür sollten unter anderem die Netzfeinheit, die Anordnung der Lasteinleitung, die Lasteinleitungsart sowie das Materialverhalten des Kontaktmaterials genauer analysiert werden. Eine genauere Untersuchung ist für den Stahlrahmen in den hoch beanspruchten Bereichen durchzuführen. Des Weiteren sollte der Einfluss auf das Tragverhalten bei einer Verwendung anderer Materialien (z.B. Edelstahl) für den Stahlrahmen erörtert werden. Zudem sind Überlegungen zur Lösung von Detailpunkten, wie die Kopplung der Stahlrahmen, auszuarbeiten.

Eine Möglichkeit zur vereinfachten Abschätzung der zu erwartenden Verschiebungen und der dafür notwendigen Scheibendicke konnte anhand eines Stabmodells in Kapitel 7 aufgezeigt werden. In weiterer Folge könnte durch eine weitere Variation der Parameter eine allgemeine Aussage getroffen werden, die die Grundlage für die Erstellung einer Formel zur Berechnung von Systemen, die vom Referenzsystem dieser Arbeit abweichen, ermöglicht.

11 Literaturverzeichnis

- [1] **gmp-Architekten:** [Online] [Zitat vom: 07. April 2016.] <http://www.gmp-architekten.de/projekte/museum-fuer-hamburgische-geschichte-innenhof-glasueberdachung.html>.
- [2] **Wellershoff, Frank:** Aussteifung von Gebäudehüllen durch eckgeklotzte Glasscheiben. *Stahlbau 77 (2008), Heft 8.*
- [3] **Mocibob, Danijel:** *Glass Panel under Shear Loading - Use of Glass Envelopes in Building Stabilization. Dissertation.* Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.
- [4] **Döbbel, Florian, Nicklisch, Felix und Rücker, Volker Prautzsch Sebastian:** Geklebte Ganzglaskonstruktion für das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden. *Stahlbau Spezial (2010) - Konstruktiver Glasbau.*
- [5] **DETAIL:** *Diskussion: Auf den zweiten Blick – Glaspavillon am Broadfield House in Kingswinford.* [Online] [Zitat vom: 17. April 2016.] <http://www.detail.de/inspiration/diskussion-auf-den-zweiten-blick-%E2%80%93-glas-pavillon-am-broadfield-house-in-kingswinford-100320.html>.
- [6] **Hans-Schmitz-Haus:** [Online] [Zitat vom: 17. April 2016.] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hans-Schmitz-Haus_Rheinbach.jpg.
- [7] **SOFiSTIK AG :** Sofistik 2014, Version 14.12 - 30.
- [8] **Ebert, Jan:** *Einleitung hoher Lasten in Glaskanten - Ein Beitrag zum Einsatz von Kunststoffen als Klotzungsmaterial. Dissertation.* Dresden : Technische Universität Dresden, 2014.
- [9] **DETAIL:** *Maximilianmuseum in Augsburg.* [Online] [Zitat vom: 10. April 2016.] <http://www.detail.de/inspiration/maximilianmuseum-in-augsburg-107349.html>.
- [10] **Hagl, Anneliese:** Die Innovation - Kleben. *Stahlbau 75 (2006), Heft 6.*
- [11] **Härth-Großgebauer, Kristina:** *Beitrag zum Tragverhalten hybrider Träger aus Glas und Kunststoff.* Dresden : Technische Universität, 2013.
- [12] **Weller, Bernhard, et al.:** Kleben im konstruktiven Glasbau. *Stahlbau-Kalender (2011).*
- [13] **Domininghaus, Hans, et al.:** *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen, 8. Auflage.* Berlin : Springer, 2012.
- [14] **Silvestru, Vlad Alexandru:** *Numerische und versuchstechnische Untersuchung von hängenden Glasschwertern. Masterarbeit.* Graz : Technische Universität Graz, 2012.
- [15] **Weller, Bernhard, Reich, Stefan und Ebert, Jan:** Selbsttragende Glasdächer mit lastabtragender Verglasung. *Stahlbau Spezial (2009) - Konstruktiver Glasbau.*
- [16] **Kern:** [Online] [Zitat vom: 13. April 2016.] http://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyetherimid-peigf30?n=2513_1.
- [17] **Vogt, Iris:** *Strukturelle Klebungen mit UV- und lichthärtenden Acrylaten. Dissertation.* Dresden : Technische Universität Dresden, 2009.
- [18] **ETAG 002-1:** *Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Glazing System - SSGS).* Berlin : Bundesanzeiger Verlag, 1999.
- [19] **Peters, Stefan, et al.:** Konstruktiver Glasbau - Neue Techniken und innovative Entwicklungen. *DBZ 5 (2014), S. 64-67.*
- [20] **Digital Trends:** [Online] [Zitat vom: 17. April 2016.] <http://www.digitaltrends.com/mobile/australian-apple-store-incident/>.
- [21] **Englhardt, Oliver:** *Skriptum - Konstruktiver Glasbau.* Graz : Technische Universität Graz, WS 2014/15.
- [22] **Maniatis, Iris; Siebert, Gerald; Nehring, Gordon:** Dimensionierung von Klebefugen aus Silikon mit beliebiger Geometrie. [Buchverf.] Bernhard Weller und Silke Tasche. *Glasbau 2015, 1.Auflage.* Dresden : Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2015.
- [23] **Doebbel, Florian, et al.:** Höherfeste Silikonverklebungen am Beispiel einer Glas-Fin-Anwendung. [Buchverf.] Bernhard Weller und Silke Tasche. *Glasbau 2014, 1.Auflage.* s.l. : Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2014.

-
- [24] **Weller, Bernhard und Schadow, Thomas:** Forschung und Entwicklung im Konstruktiven Glasbau. *Stahlbau* 76 (2007), Heft 3.
- [25] **Weller, Bernhard und Tasche, Silke:** Strukturelles Kleben im Konstruktiven Glasbau. *Stahlbau Spezial* (2008) - *Konstruktiver Glasbau*.
- [26] **Menkenhagen, Jochen und Koschecknick, Kai:** Experimentelle und numerische Untersuchung zu geklebten Glas-Stahlverbindungen. [Buchverf.] Bernhard Weller und Silke Tasche. *Glasbau 2012, 1.Auflage*. s.l.: Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2012.
- [27] **Prautzsch, Volker:** *Entwicklung transparent geklebter Glas-Rahmenecken und Untersuchung des Tragverhaltens. Dissertation.* Dresden : Technische Universität Dresden, 2015.
- [28] **Feldmann, M., et al.:** *Guidance for European Structural Design of Glass Components.* Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2014.
- [29] **Wellershoff, Frank:** Aussteifung von Gebäudehüllen durch randverklebte Glasscheiben. *Stahlbau* 77 (2008), Heft 1.
- [30] **Priebe, Jürgen:** *Skriptum - Stahlbau III, Stabilitätsprobleme im Stahlbau.* Hamburg : Technische Universität Hamburg-Harburg, 2010.
- [31] **Luible, Andreas:** *Stabilität von Tragelementen aus Glas.* Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.
- [32] **Unterweger, Harald:** *Skriptum - Stahlbau.* Graz : Technische Universität Graz, 2012.
- [33] **Englhardt, Oliver:** *Flächentragwerke aus Glas - Tragverhalten und Stabilität. Dissertation.* Wien : Universität für Bodenkultur Wien, 2007.
- [34] **Neijbert, Greger:** *Buckling of a load bearing timber-glass shear wall-Development of a Finite Element Model.* Sweden : Lund University, 2013.
- [35] **Wellershoff, Frank:** *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen. Dissertation, RWTH-Aachen.* Aachen : Shaker Verlag, 2006.
- [36] **SOFiSTiK AG:** *ASE Handbuch, Version 2014-9.*
- [37] **Borkowski, Gregor:** *Beitrag zur rechnerischen Überprüfung von Betonhohlkastenbrücken, Dissertation.* Hamburg : Technische Universität Hamburg-Harburg, 2014.
- [38] **ÖNorm B 3716-1:** *Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau, Teil 1: Grundlagen, Ausgabe: 2013-02-15.* Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [39] **ÖNorm B 1993-1-1:** *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung).* Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
- [40] **Freitag, Claudia und Wörner, Johann-Dietrich:** Verwendung von Glas zur Aussteifung von Gebäuden. *Stahlbau Spezial* (2011) - *Glasbau/Glass in Building*.
- [41] **Laufs, Wilfried und Mohren, Ruth:** Neuartige Stahl-Glas-Konstruktionen mit Tragwirkung in Scheibenebene. *Bautechnik* 78 (2011), Heft 10.
- [42] **Englhardt, Oliver:** Leichtbau 3.0. *Stahlbau* 82 (2013), Heft 6.
- [43] **Ensinger:** [Online] [Zitat vom: 13. April 2016.] <http://www.ensinger-online.com/modules/public/datapdf/index.php?L=1>.
- [44] **Barth, Christian und Rustler, Walter:** *Finite Elemente in der Baustatik-Praxis.* Dresden : Beuth, 2010.
-

12 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Innenhofüberdachung des Museums für Hamburgische Geschichte [1]	1
Abb. 2	Nutzung von Glas zur horizontalen Gebäudeaussteifung [3]	2
Abb. 3	Links: Ganzglashülle über den hist. Druckbehältern [4], Rechts: Glaspavillon am Broadfield House in Kingswinford [5]	2
Abb. 4	Glaspavillon „Hans-Schmitz-Haus“ [6]	2
Abb. 5	Konstruktionsaufbau	3
Abb. 6	Übersicht über die Aufgaben dieser Arbeit	4
Abb. 7	(a) Schubtragwirkung infolge Querkraft, (b) Plattentragwirkung, (c) Schubtragwirkung bzw. Druckbeanspruchung infolge Normalkraft (vgl. [3])	5
Abb. 8	Innenhofüberdachung des Maximilian-Museums in Augsburg [9]	5
Abb. 9	Polymere Klebstoffe links [10] und Einteilung in die Molekülvernetzung rechts [11]	6
Abb. 10	Möglichkeiten zum Ausgleich des Kantenversatzes [2]	8
Abb. 11	Überdachung des Innenhofs des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais [8]	9
Abb. 12	Klotzungs konstruktion [8]	9
Abb. 13	Retail Store Highland Village [19] [20]	16
Abb. 14	Vergleich: Sikasil® SG550 mit gewöhnlichen SSG-Klebstoffen	18
Abb. 15	Verformungsvermögen unterschiedlich steifer Klebstoffe [17]	21
Abb. 16	Plattenbeulen (links), Schalenbeulen (rechts) [30]	22
Abb. 17	Beulformen in Abhängigkeit der Belastung [21]	23
Abb. 18	Überkritisches Tragverhalten links und knickstabähnliches Verhalten rechts ([31], [33])	24
Abb. 19	Allseitig gelenkige Platte unter Längsdruck [32]	24
Abb. 20	Längsdruckbelastung links und Schubbelastung rechts [21]	25
Abb. 21	Beulkurve über die Druckdiagonale: Eckklotzung (links) [2], Randklebung (rechts) [29]	27
Abb. 22	Schematischer Lastabtrag: Eckklotzung (links), Randklebung (rechts)	27
Abb. 23	Bruchverhalten: Eckklotzung (links), Randklebung (rechts) [29]	27
Abb. 24	Abmessungen des Referenzsystems	29
Abb. 25	Bezeichnung der Bauteile	30
Abb. 26	Ablauf der Stabilitätsberechnung nach [31]	30
Abb. 27	Konformes Element (links), Nichtkonformes Element (rechts) [37]	31
Abb. 28	Das verwendete bilineare Materialgesetz für den Baustahl S355 in Sofistik	32
Abb. 29	Hauptspannungen: mit F10_G12_S3 (Referenz), F18_G12_S4, F10_G12_S6 und F14_G28_S6	33
Abb. 30	Diskretisierung der Tragstruktur	34
Abb. 31	Lagerung des Gesamtsystems (links), Klebung- und Klotzungsfedern (rechts)	35
Abb. 32	Die ersten vier Beulformen ohne Quersteifigkeit der druckbeanspruchten Klotzungen (von links nach rechts)	37
Abb. 33	Die ersten vier Beulformen mit Quersteifigkeit der druckbeanspruchten Klotzungen (von links nach rechts)	38

Abb. 34	Hauptspannungen (Glasober- und unterseite) mit Quersteifigkeit (Referenzsystem) (Verformungsfigur 20-fach überhöht).....	39
Abb. 35	Hauptspannungen (Glasober- und unterseite) ohne Quersteifigkeit (Verformungsfigur 20-fach überhöht)	40
Abb. 36	Hauptspannungen (Glasober- und unterseite) mit Klotzungsquersteifigkeit/100 (Verformungsfigur 20-fach überhöht).....	40
Abb. 37	Vergleich der Hauptzugspannungen bei unterschiedlicher Quersteifigkeit der Klotzung	41
Abb. 38	Hauptspannungen an der Glasoberseite im Lasteinleitungsbereich links ohne und rechts mit Quersteifigkeit des Referenzsystems.....	41
Abb. 39	Referenzsystem: links: 1. Beulform, rechts: 2. Beulform	42
Abb. 40	Lastaufbringung im Modell (Lasten in kN bzw. kN/m ²)	43
Abb. 41	Links: Hauptspannungen oberes linkes Eck der Referenzscheibe, Rechts: Vergleichsspannungen im Lasteinleitungsbereich des Rahmens	44
Abb. 42	Hauptspannungen an der Oberseite F20_G12_S9 (oben und F20_G12_S12 (unten)	45
Abb. 43	Verdrehung des Rahmenprofils im Lasteinleitungsbereich (30-fach überhöht)	46
Abb. 44	Unterschied Theorie 2. Ordnung und Theorie 3. Ordnung [36].....	47
Abb. 45	1.Vorverformung der Glasscheibe und des Stahlrahmens links und 2. Vorverformung rechts; Rahmenvorverformung ist 1500-fach überhöht dargestellt.....	49
Abb. 46	Verschiebungskurven mit der 1. Vorverformung	50
Abb. 47	Verschiebungskurven mit der 2. Vorverformung	50
Abb. 48	Einfluss der Belastungsgröße auf die Hauptzugspannungen	51
Abb. 49	Hauptzugspannungen auf der Glasoberseite mit der 1. Vorverformung des Systems für 10, 20, 30, 40 und 50 kN Horizontallast (von links nach rechts)	52
Abb. 50	Hauptzugspannungen auf der Glasunterseite mit der 1. Vorverformung des Systems für 10, 20, 30, 40 und 50 kN Horizontallast (von links nach rechts)	53
Abb. 51	Hauptzugspannungen auf der Glasoberseite mit der 2. Vorverformung des Systems für 10, 20, 30, 40 und 50 kN Horizontallast (von links nach rechts)	54
Abb. 52	Hauptzugspannungen auf der Glasunterseite mit der 2. Vorverformung des Systems für 10, 20, 30, 40 und 50 kN Horizontallast (von links nach rechts)	55
Abb. 53	Vergleich der 1. Eigenform bei unterschiedlichen Systemabmessungen	56
Abb. 54	Einfluss der Parametervariation auf die Hauptzugspannungen mit der 1. Vorverformung des Systems	59
Abb. 55	Einfluss der Parametervariation auf die Hauptzugspannungen mit der 2. Vorverformung des Systems	60
Abb. 56	Einfluss der Variation des E-Moduls der Klotzung auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	61
Abb. 57	Einfluss der Variation des E-Moduls der Klotzung auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	61
Abb. 58	Einfluss der Variation des E-Moduls der Klotzung auf die Hauptzugspannungen auf der Oberseite links und auf der Unterseite rechts mit der 1. Vorverformung	62
Abb. 59	Vergleich der Verformungsfigur des Systems mit einem E-Modul von 1,4 N/mm ² links und der des Referenzsystems rechts (4-fach überhöht dargestellt).....	62
Abb. 60	Einfluss der Variation des E-Moduls des Klebstoffs auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	63
Abb. 61	Einfluss der Variation des E-Moduls des Klebstoffs auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	63

Abb. 62	Einfluss der Klebersteifigkeit auf die Hauptzugspannungen des System mit der 1. Vorverformung	64
Abb. 63	Vergleich der Hauptzugspannungen des Referenzsystem (1.-und 2. Bild) mit den bei einem E-Modul des Klebstoffs von 1000 N/mm ² (3.- und 4. Bild) an der Ober- bzw. Unterseite für das System mit der 1. Vorverformung	64
Abb. 64	Einfluss der Variation der Scheibenhöhe auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	65
Abb. 65	Einfluss der Variation der Scheibenhöhe auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	65
Abb. 66	Maximale Hauptzugspannung in Abhängigkeit der Scheibenhöhe und der Vorverformung	66
Abb. 67	Hauptspannungen der quadratischen Scheibe (1500x1500 mm) links und der Scheibe mit der maximalen Scheibenhöhe (1500x5500) rechts, für das System mit der 1. Vorverformung	66
Abb. 68	Einfluss der Variation der Scheibenbreite auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	67
Abb. 69	Einfluss der Variation der Scheibenbreite auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	67
Abb. 70	Einfluss der Scheibenbreite auf die Hauptzugspannungen.....	68
Abb. 71	Einfluss der Variation der Scheibendicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	68
Abb. 72	Einfluss der Variation der Scheibendicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	69
Abb. 73	Hauptspannungen bei einer Scheibendicke von 6 mm auf der Oberseite links und Unterseite rechts mit der 2. Vorverformung	69
Abb. 74	Einfluss der Variation des Vorverformungsfaktors auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	70
Abb. 75	Einfluss der Variation des Vorverformungsfaktors auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	70
Abb. 76	Einfluss des Vorverformungsfaktors auf die maximalen Hauptzugspannungen.....	71
Abb. 77	Definition der Parameter des Stahlrahmens	71
Abb. 78	Einfluss der Variation der Rahmendicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	72
Abb. 79	Einfluss der Variation der Rahmendicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	72
Abb. 80	Einfluss der Variation der Rahmentiefe auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	73
Abb. 81	Einfluss der Variation der Rahmentiefe auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	74
Abb. 82	Einfluss der Rahmentiefe auf die Hauptzugspannungen	74
Abb. 83	Einfluss der Variation der Rahmeckprofildicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	75
Abb. 84	Einfluss der Variation der Rahmeckprofildicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	75
Abb. 85	Einfluss der Variation der Stegdicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung	76
Abb. 86	Einfluss der Variation der Stegdicke auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung	76

Abb. 87	Einfluss der Variation der Lastfallvariation auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 1. Vorverformung.....	77
Abb. 88	Verformungsbild des System mit der 1. Vorverformung unter LF: H und LF: H+Vg (40-fach überhöht dargestellt).....	78
Abb. 89	Einfluss der Variation der Lastfallvariation auf die Verschiebung entlang der Scheibendiagonale mit der 2. Vorverformung.....	78
Abb. 90	Maximale Hauptspannungen des jeweiligen Lastfalls	79
Abb. 91	Bezeichnungen des rechten vertikalen T-Profiles.....	80
Abb. 92	Einfluss der Belastungsgröße auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung	81
Abb. 93	Einfluss der Belastungsgröße auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 2. Vorverformung	81
Abb. 94	Maximalwerte der relativen Flanschverformung für das System mit der 1. Vorverformung.....	82
Abb. 95	Maximalwerte der relativen Flanschverformung für das System mit der 2. Vorverformung.....	82
Abb. 96	Einfluss des E-Moduls der Klotzung auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung.....	83
Abb. 97	Einfluss des E-Moduls des Klebstoffs auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung.....	83
Abb. 98	Einfluss der Scheibenhöhe auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung	84
Abb. 99	Einfluss der Scheibenhöhe auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 2. Vorverformung	84
Abb. 100	Einfluss der Scheibendicke auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung	85
Abb. 101	Einfluss der Rahmendicke auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung	86
Abb. 102	Einfluss der Belastungsart auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung	87
Abb. 103	Einfluss des Vorverformungsfaktors auf die Verschiebung aus der Rahmenebene für das System mit der 1. Vorverformung.....	87
Abb. 104	Links die Darstellung der maximalen horizontalen Verschiebung des linken oberen Rahmenecks der jeweiligen Parameter und rechts die nicht überhöhte Verschiebung vom Rahmeneck zur Glasscheibe ..	88
Abb. 106	Verwindung des Stahlprofils im Lasteinleitungsbereich (50-fach überhöht)	89
Abb. 107	Vergleichsspannungen Referenz: Oberseite links und Unterseite rechts, 1. Vorverformung.....	90
Abb. 108	Vergleichsspannungen Referenz: Oberseite links und Unterseite rechts, 2. Vorverformung.....	90
Abb. 109	Vergleichsspannungen Rahmendicke: Oberseite links und Unterseite rechts mit 1. Vorverformung	91
Abb. 110	Vergleichsspannungen Rahmendicke: Oberseite links und Unterseite rechts mit 2. Vorverformung	91
Abb. 111	Einfluss der Schubmodulvariation der PVB-Folie auf die Eigenwerte	93
Abb. 112	VSG 2 x 6 mm: Einfluss des G-Moduls auf die Verschiebung der vorderen Scheibe für das System mit der 1. Eigenform als Vorverformung	93
Abb. 113	VSG 2 x 6 mm: Einfluss des G-Moduls auf die Verschiebung der vorderen Scheibe für das System mit der 2. Eigenform als Vorverformung	94
Abb. 114	VSG 2 x 8 mm: Einfluss des G-Moduls auf die Verschiebung der vorderen Scheibe für das System mit der 1. Eigenform als Vorverformung	94

Abb. 115	VSG 2 x 8 mm: Einfluss des G-Moduls auf die Verschiebung der vorderen Scheibe für das System mit der 2. Eigenform als Vorverformung.....	95
Abb. 116	Hauptspannungen an der Ober- und Unterseite der hinteren Scheibe oben und der vorderen Scheibe unten, für die VSG-Variante mit 2 x 6 mm und einem G-Modul von 0,4 N/mm ² , mit der 1. Eigenform als Vorverformung	96
Abb. 117	Hauptspannungen an der Ober- und Unterseite der hinteren Scheibe oben und der vorderen Scheibe unten, für die VSG-Variante mit 2 x 8 mm und einem G-Modul von 0,4 N/mm ² , mit der 1. Eigenform als Vorverformung	97
Abb. 118	Schematische Darstellung einer Glasfassade und die vereinfachte Abbildung anhand eines Stabmodells	98
Abb. 119	Schematische Skizze des statischen Systems (links), 1. Stabmodell (Mitte) und 2. Stabmodell (rechts)...	98
Abb. 120	Verformungsfigur des 1. Stabmodells links und des 2. Stabmodells jeweils mit biegesteifen Rahmenecken rechts (10-fach überhöht)	100
Abb. 121	Erforderliche Stabfläche für das 2. Stabmodell mit gelenkigen Rahmenecken	101

13 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Eigenschaften von PA [13]	11
Tab. 2	Mechanische Eigenschaften von PA [13]	11
Tab. 3	Eigenschaften von POM [13]	12
Tab. 4	Mechanische Eigenschaften von POM und POM-C [13] [14]	12
Tab. 5	Eigenschaften von PEI [8] [13]	13
Tab. 6	Mechanische Eigenschaften von PEI [8]	13
Tab. 7	Eigenschaften von PEEK [8] [13]	14
Tab. 8	Mechanische Eigenschaften von PEEK [8]	14
Tab. 9	Eignung als Klotzungsmaterial [8]	15
Tab. 10	Mechanische Eigenschaften von im Glasbau eingesetzter Klebstoffe [12]	18
Tab. 11	Übersicht der Klebstoffeigenschaften nach [28]	20
Tab. 12	Elementwahl zur Abbildung der Tragstruktur	32
Tab. 13	Materialeigenschaften des Baustahls S 355 in Sofistik	32
Tab. 14	Glaseigenschaften in Sofistik	32
Tab. 15	Beuleigenwerte ohne Quersteifigkeit	37
Tab. 16	Beuleigenwerte mit Quersteifigkeit	38
Tab. 17	Parametermatrix	48
Tab. 18	Einfluss der Parametervariation auf die Eigenwerte der 1. Eigenform	57
Tab. 19	Einfluss der Parametervariation auf die Eigenwerte der 2. Eigenform	58
Tab. 20	Vergleich der maximalen Hauptzugspannungen	60
Tab. 21	Vergleich der maximalen Verformungswerte bei unterschiedlichem Verformungsfaktor	70
Tab. 22	Parameter der VSG-Scheibe	92
Tab. 23	Einfluss des Schubmoduls der PVB-Folie auf die Verschiebung des rechten Rahmenecks	95
Tab. 24	Vergleich der Verschiebungen der unterschiedlichen Stabmodelle	101

14 Anhang

14.1 Spannungsbilder

Die Seiten 115 – 195 sind als Querformat zu lesen. Die ersten beiden Bilder zeigen die 1.- und 2. Eigenform (links unten im Eck beginnend), die auf den Wert 1 normiert wurde und für die Vorverformung des Systems herangezogen wurde.

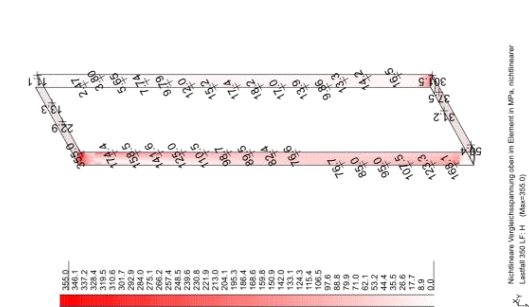
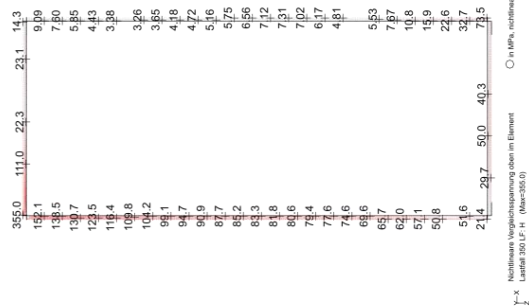
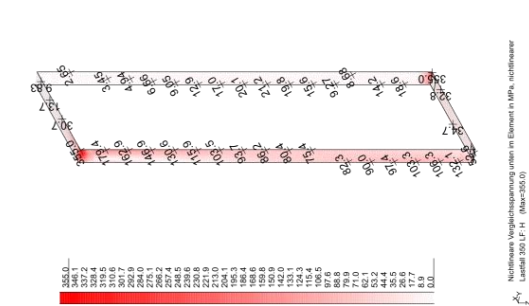
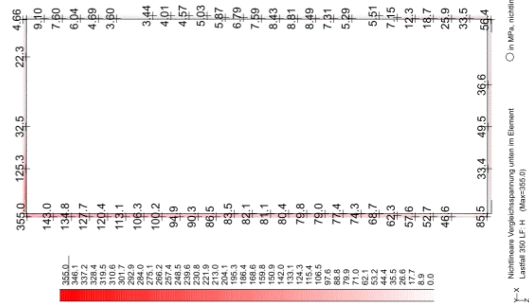
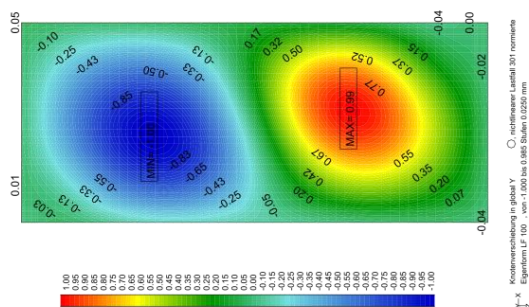
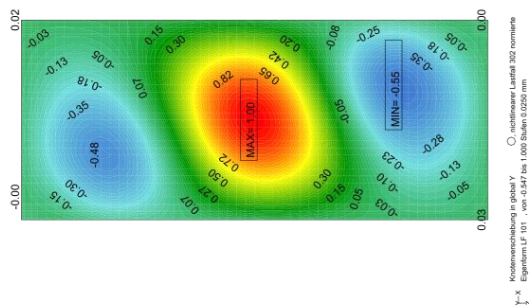
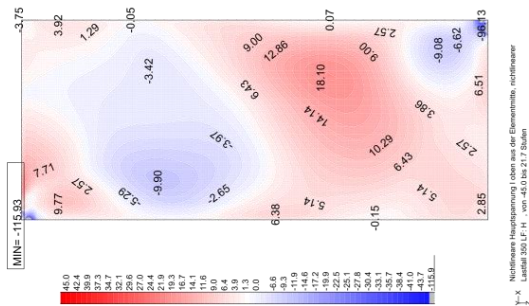
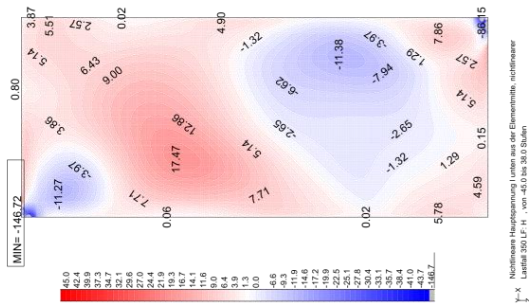
Danach folgend werden die Spannungen für das System der 1. Vorverformung dargestellt:

Zunächst werden die Hauptspannungen an der Glasscheibenoberseite und der Unterseite dargestellt.

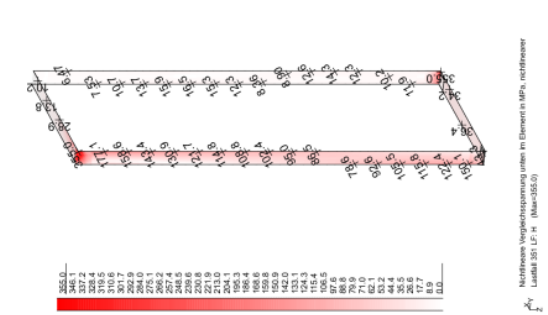
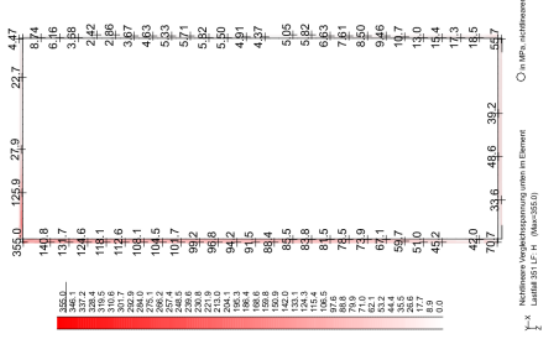
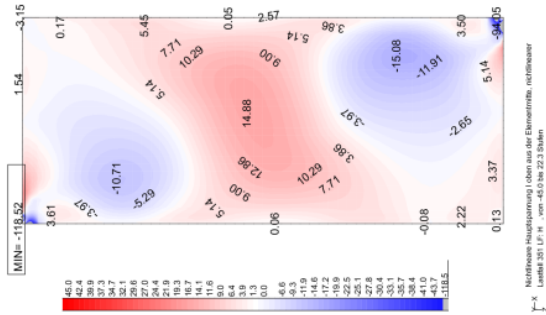
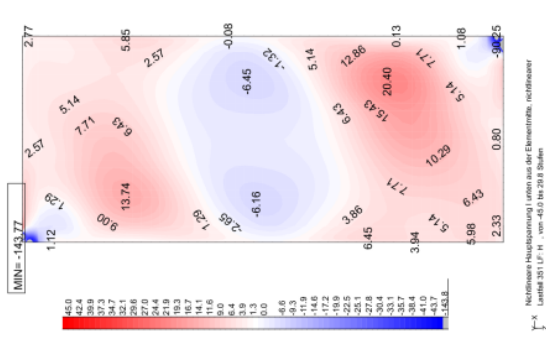
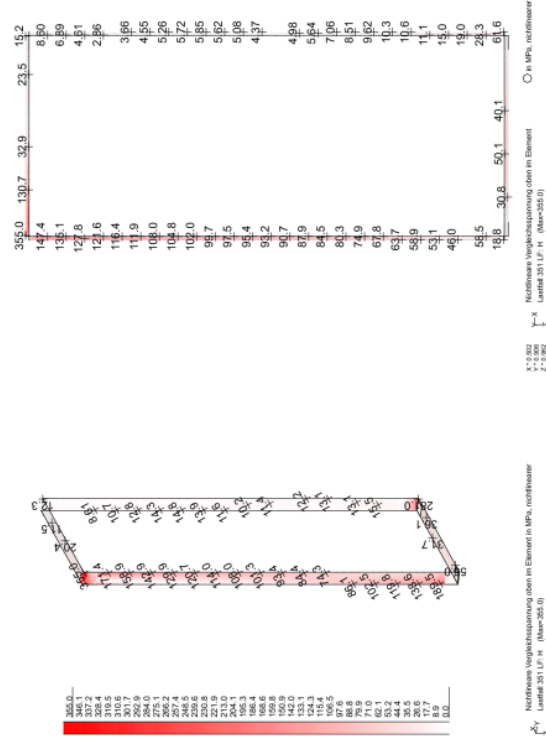
Danach werden die Vergleichsspannungen am Flansch und am Steg an der Oberseite und anschließend an der Unterseite abgebildet. Das Gleiche wird dann anschließend für das System mit der 2. Vorverformung dargestellt.

14.1.1 E-Modul Klebstoff

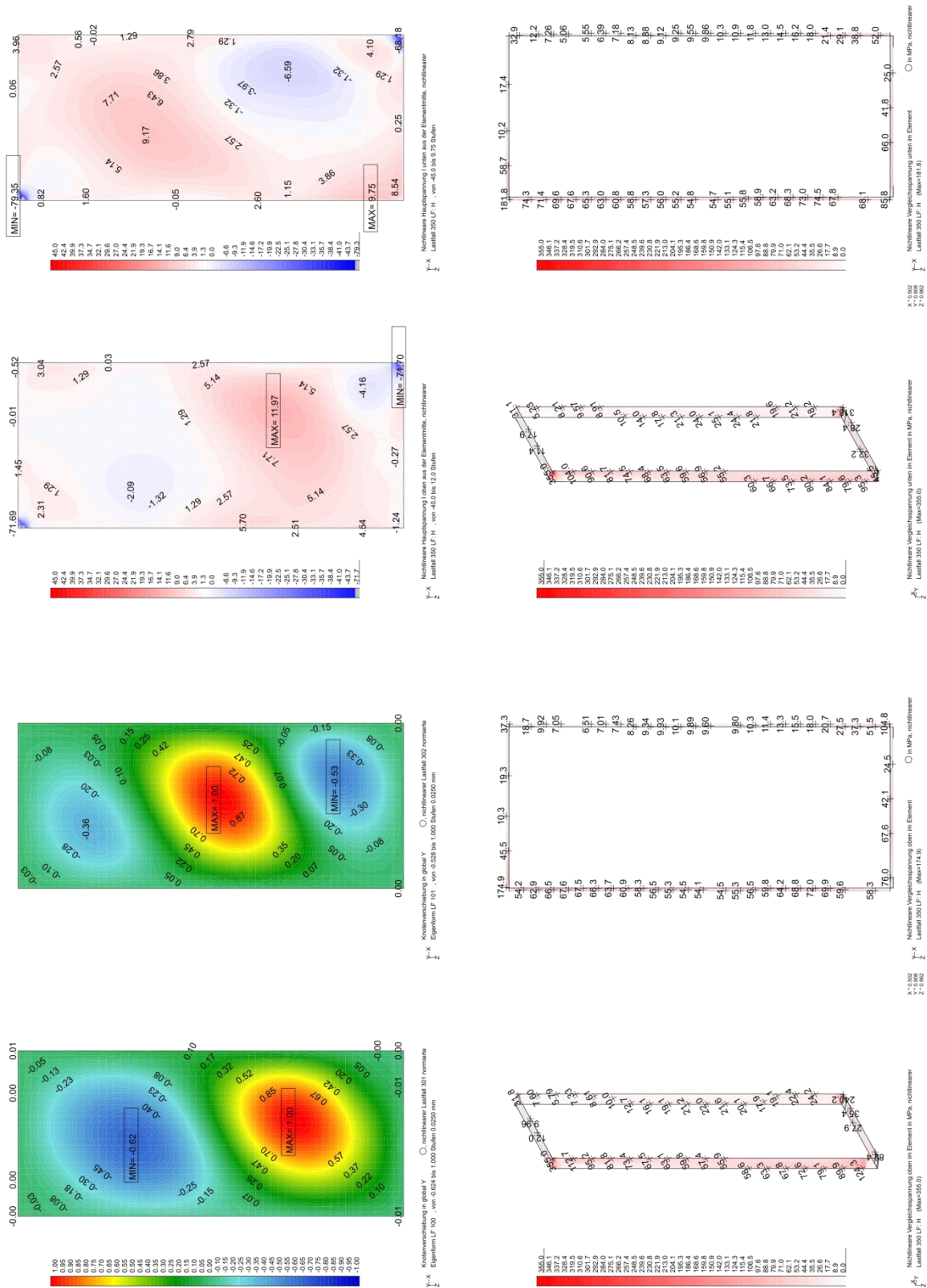
14.1.1.1 E-Modul Klebstoff mit 1,0 N/mm²:



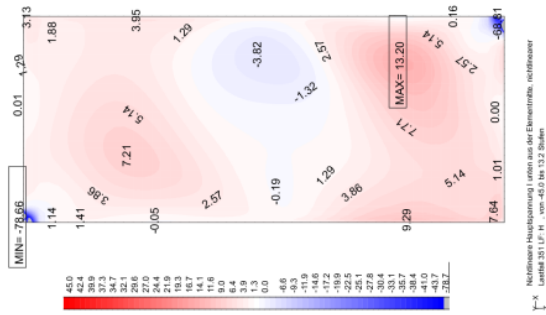
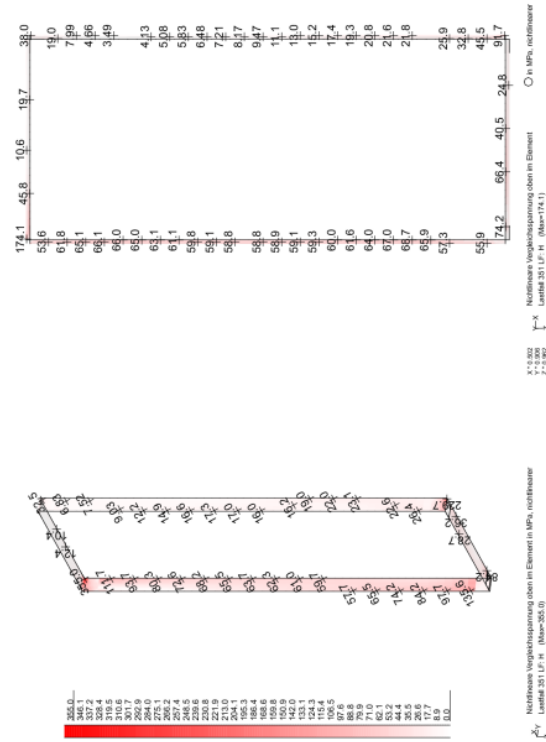
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



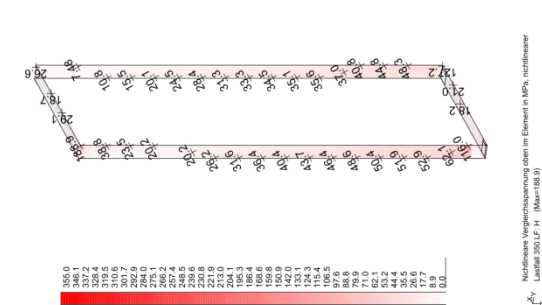
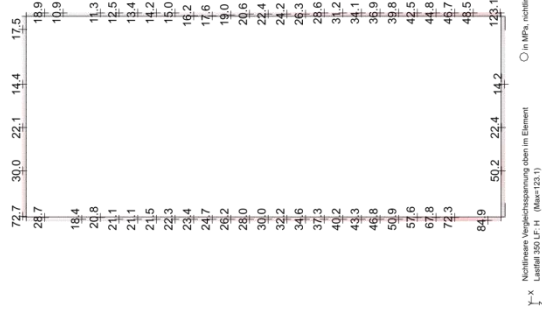
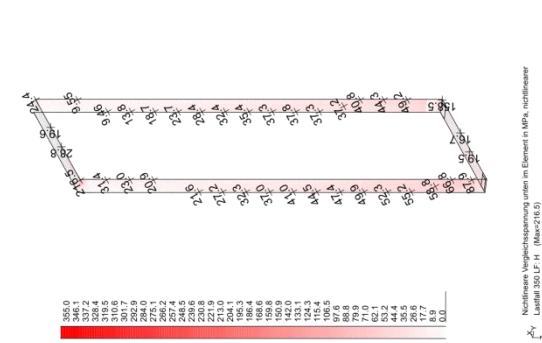
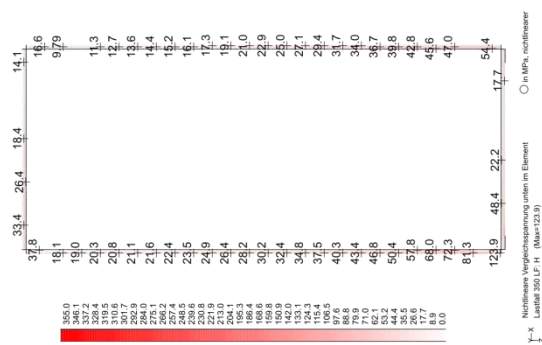
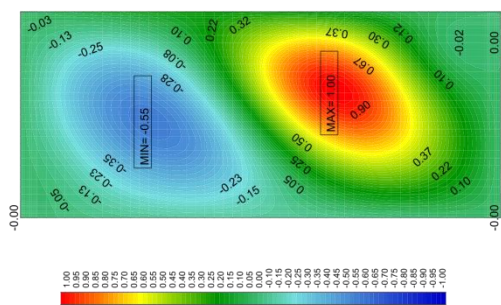
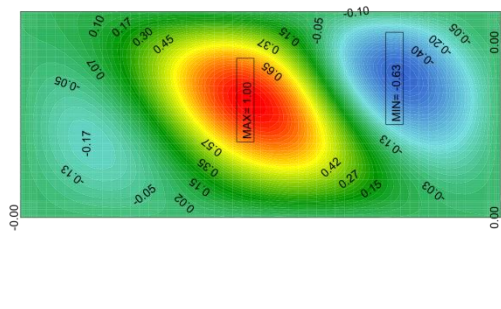
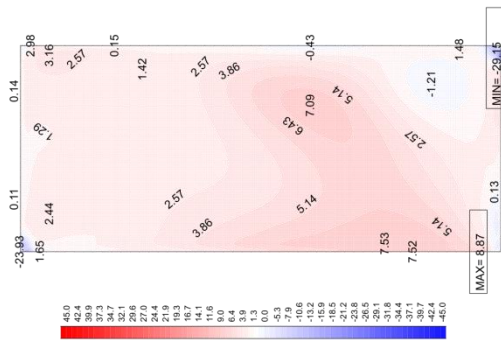
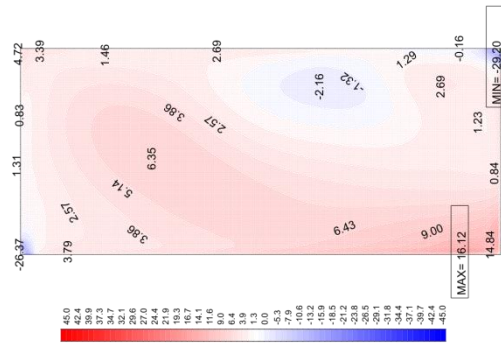
14.1.1.2 E-Modul Klebstoff mit 10 N/mm²:



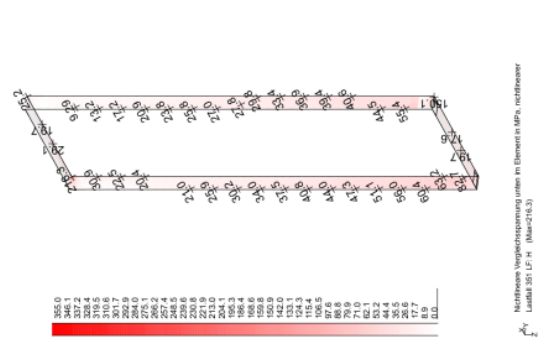
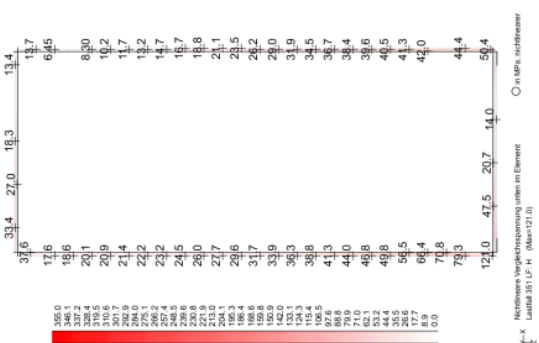
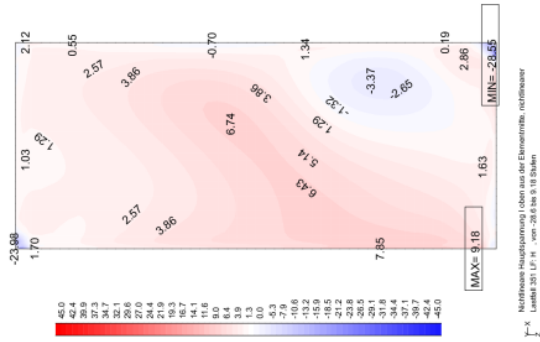
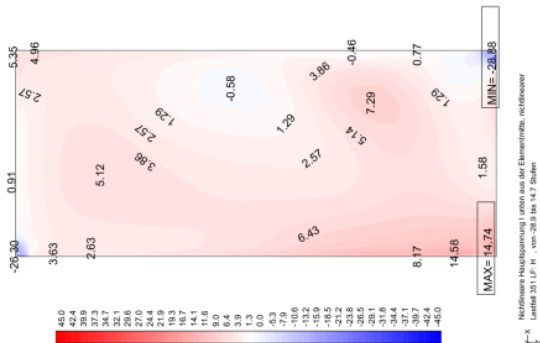
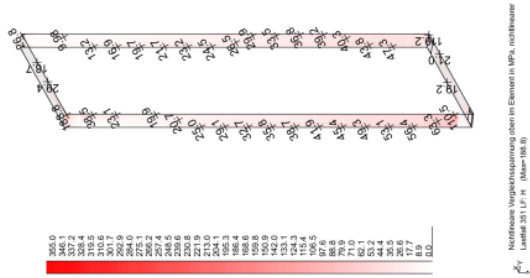
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



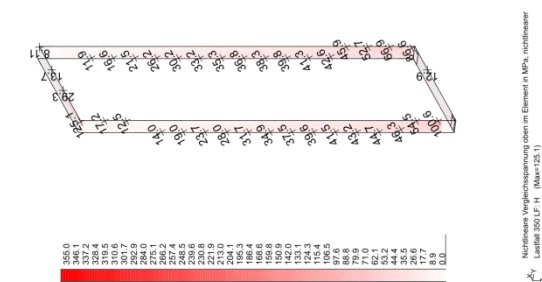
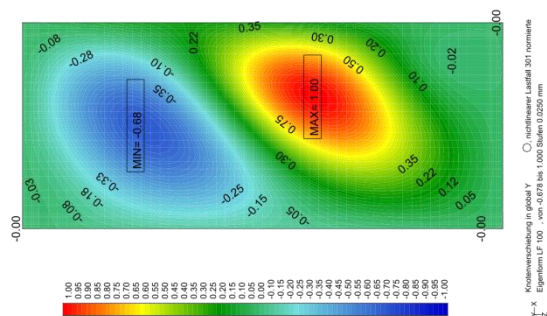
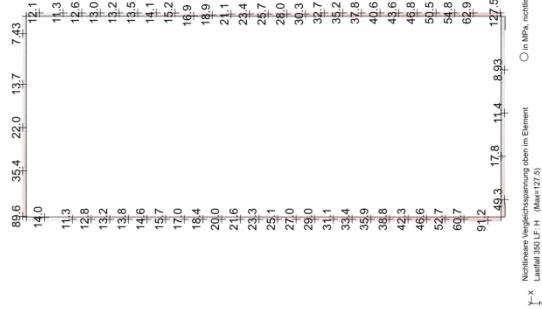
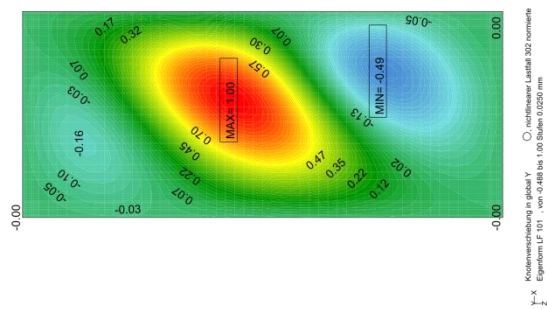
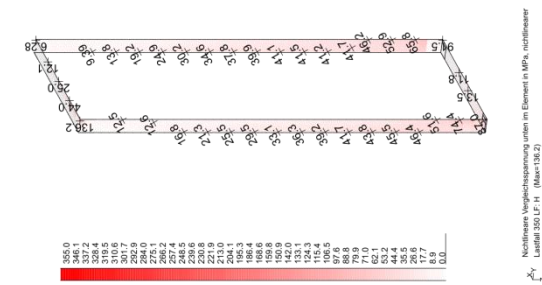
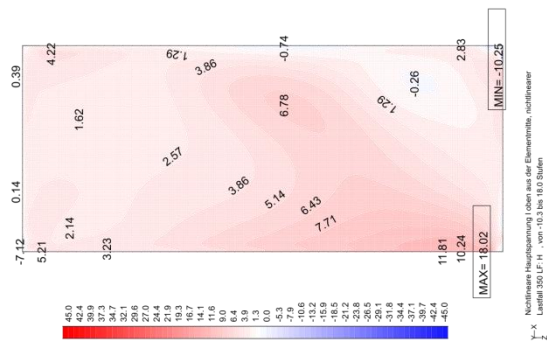
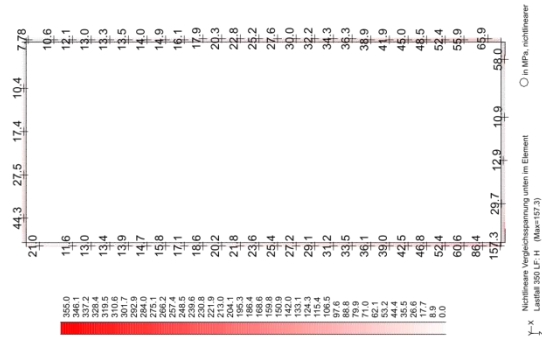
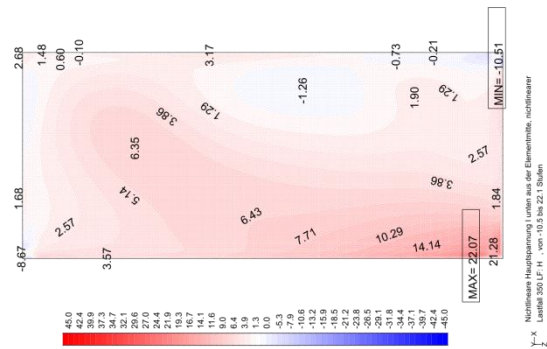
14.1.1.3 E-Modul Klebstoff mit 100 N/mm²:



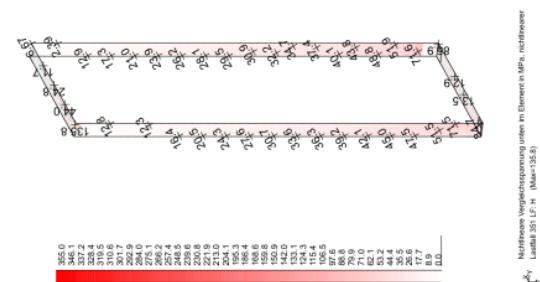
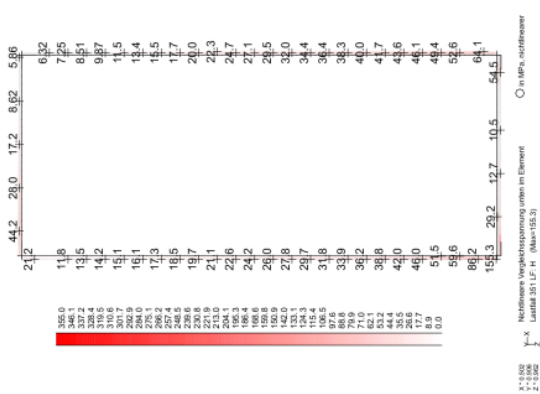
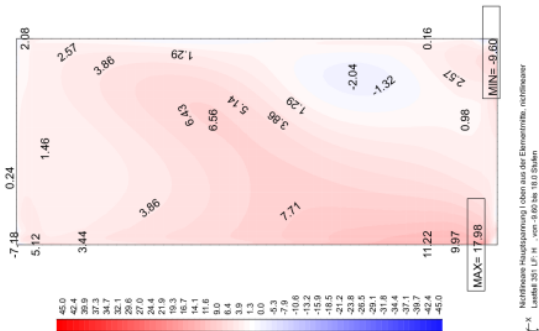
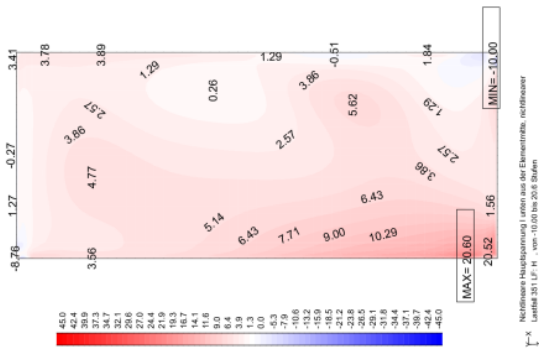
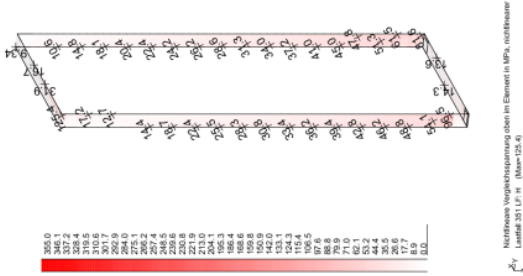
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.1.4 E-Modul Klebstoff mit 1000 N/mm²:

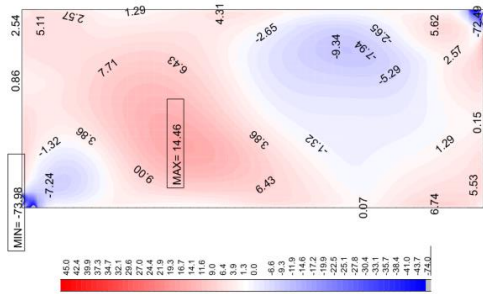


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

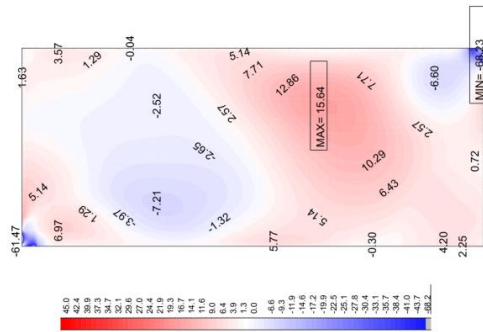


14.1.2 E-Modul Klotzung

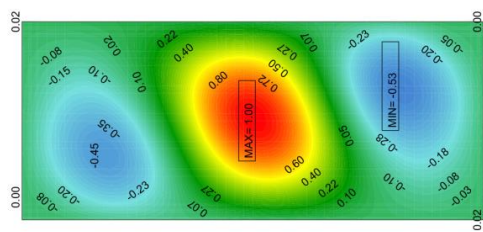
14.1.2.1 E-Modul Klotzung mit 1,4 N/mm²:



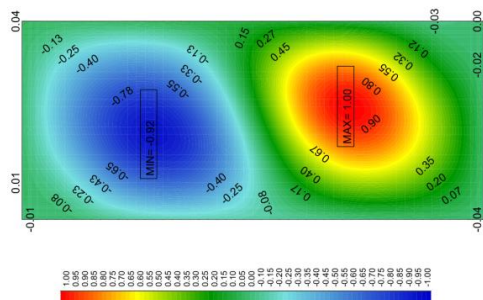
Nichtlineare Vergleichsspannung (oben) im Element, nichtlineare
Lastfall 350.LF.H. von 403 bis 14.8 Stufen



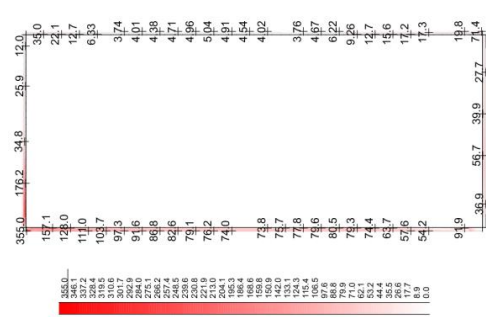
Nichtlineare Vergleichsspannung (unten) im Element, nichtlineare
Lastfall 350.LF.H. von 403 bis 14.8 Stufen



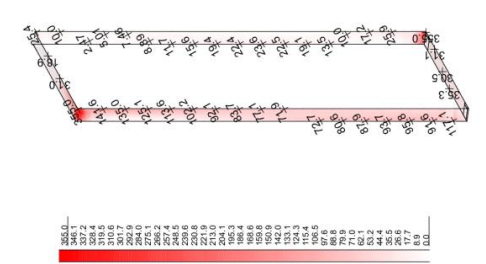
Nichtlineare Vergleichsspannung (oben) im Element, nichtlineare
Lastfall 350.LF.H. von 403 bis 14.8 Stufen



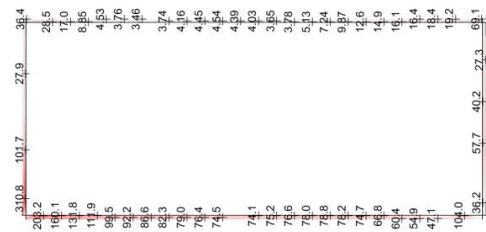
Nichtlineare Vergleichsspannung (unten) im Element, nichtlineare
Lastfall 350.LF.H. von 403 bis 14.8 Stufen



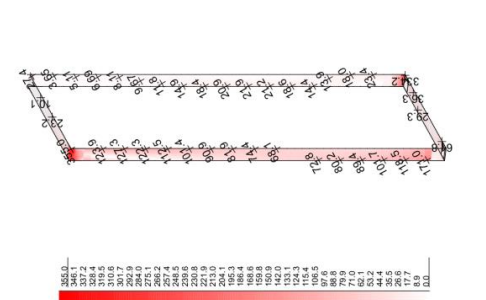
Nichtlineare Vergleichsspannung (oben) im Element, nichtlineare
Lastfall 350.LF.H. (Max=355.0)



Nichtlineare Vergleichsspannung (unten) im Element, nichtlineare
Lastfall 350.LF.H. (Max=355.0)

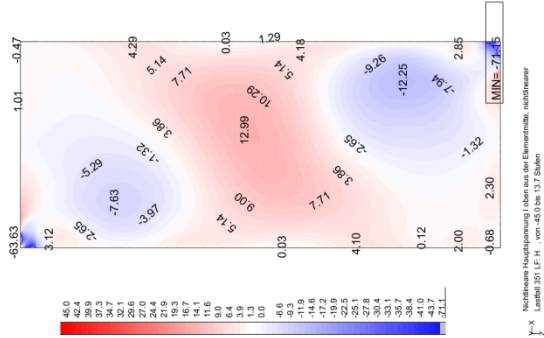
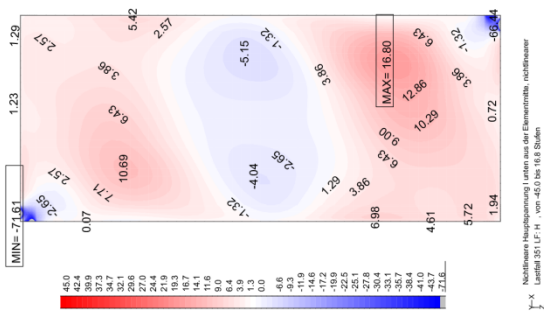
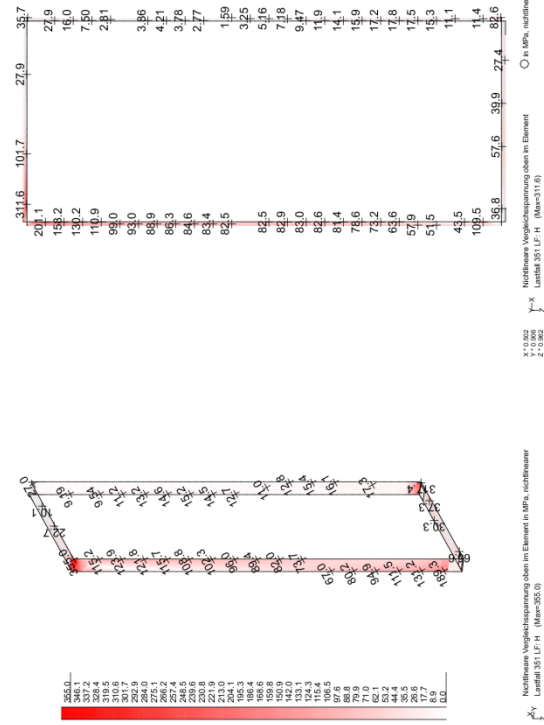


Nichtlineare Vergleichsspannung (oben) im Element, nichtlineare
Lastfall 350.LF.H. (Max=310.8)

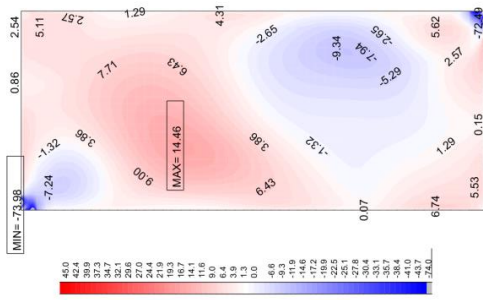


Nichtlineare Vergleichsspannung (unten) im Element, nichtlineare
Lastfall 350.LF.H. (Max=355.0)

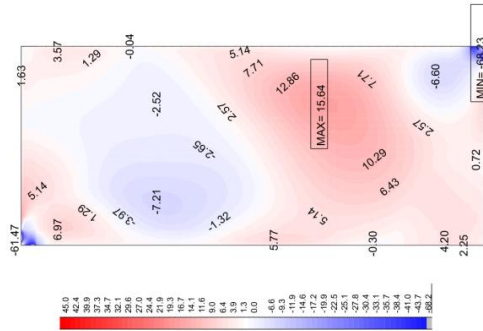
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



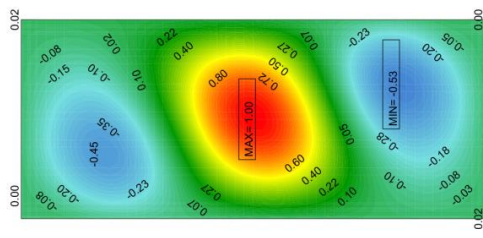
14.1.2.2 E-Modul Klotzung mit 250 N/mm²:



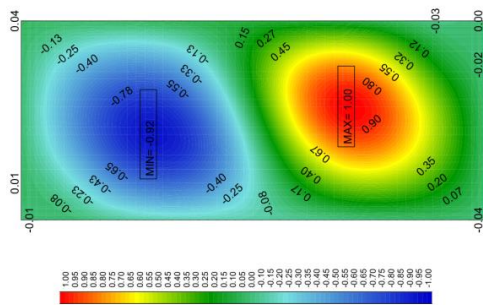
Nachweise Hauptspannung unten aus der Elementliste, nichtlinear
Lastfall 350 (F-H) - von -42.83 bis 15.03kN



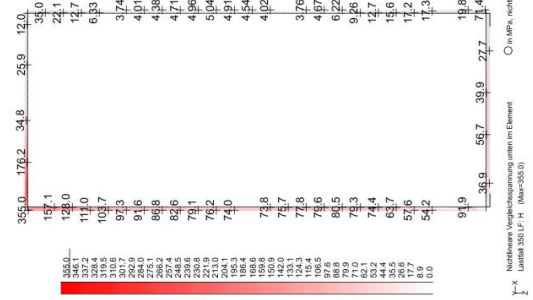
Nachweise Hauptspannung oben aus der Elementliste, nichtlinear
Lastfall 350 (F-H) - von -42.83 bis 15.03kN



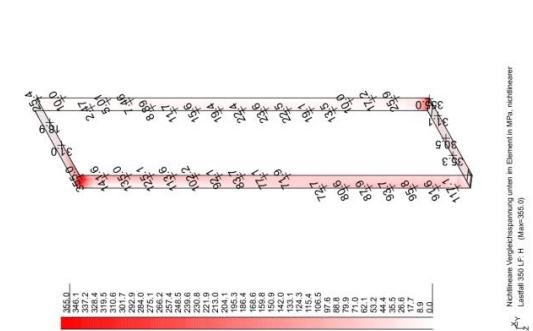
Knotenverschiebung in global Y
Eigenschaft 1 (3) - von 102.2 bis 100.0kN bis 102.0kN



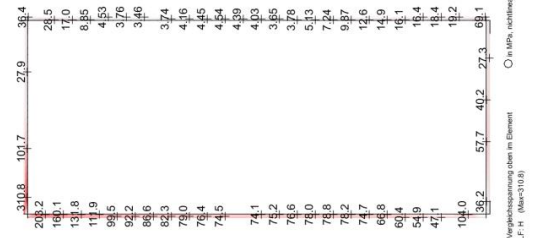
Knotenverschiebung in global Y
Eigenschaft 1 (3) - von 102.2 bis 100.0kN bis 102.0kN



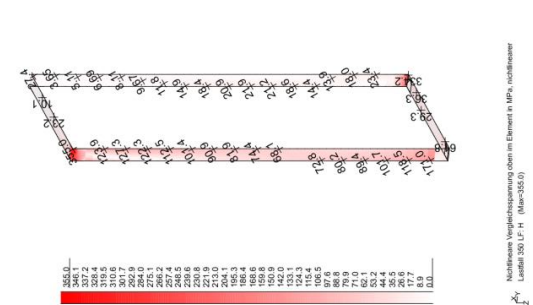
Nachweise Hauptspannung unten im Element
Lastfall 350 (F-H) - (Max=355.0)



Nachweise Hauptspannung oben im Element
Lastfall 350 (F-H) - (Max=355.0)

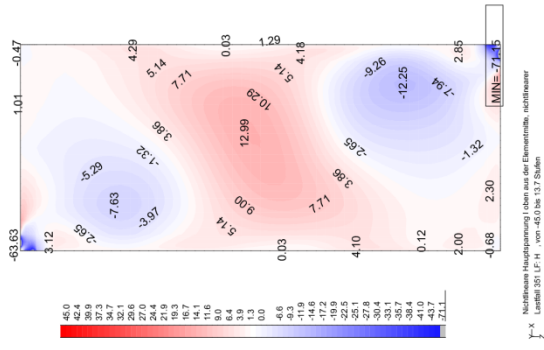
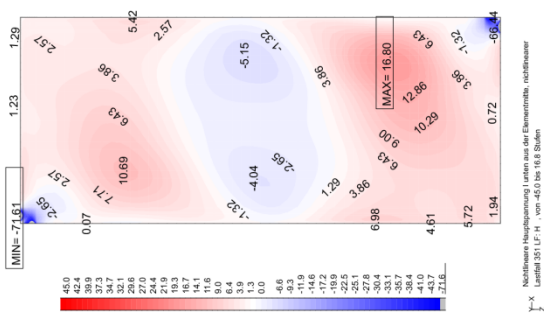
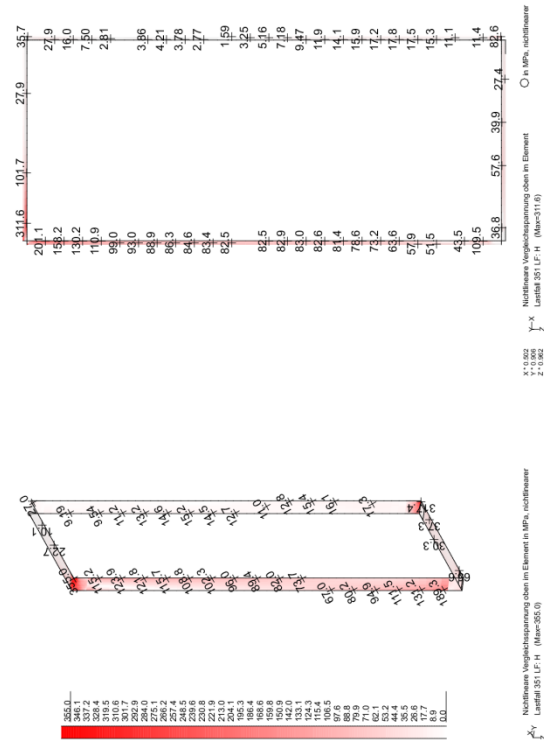


Nachweise Hauptspannung oben im Element
Lastfall 350 (F-H) - (Max=310.8)

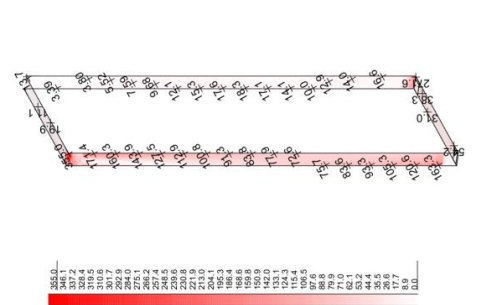
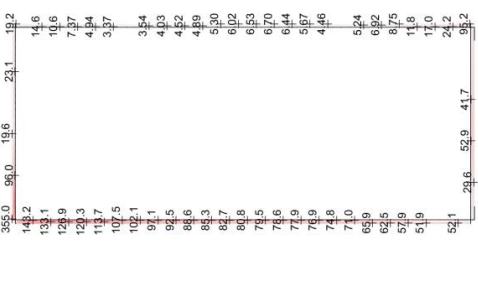
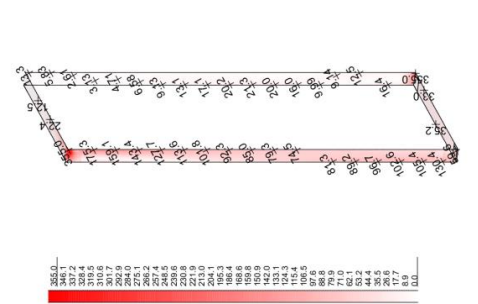
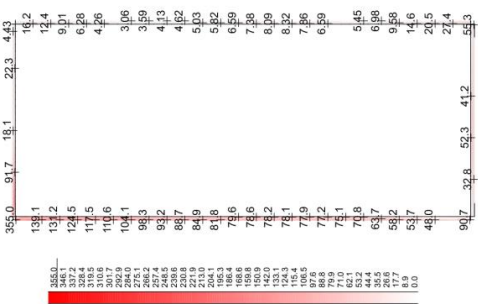
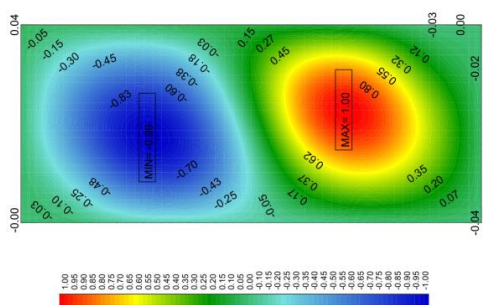
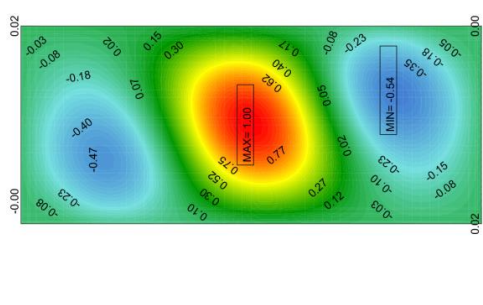
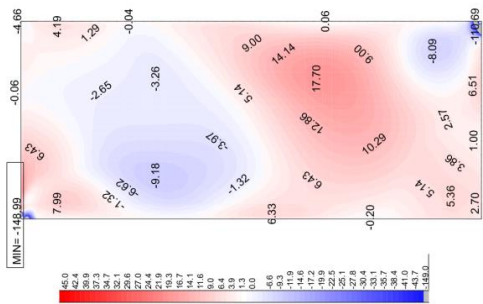
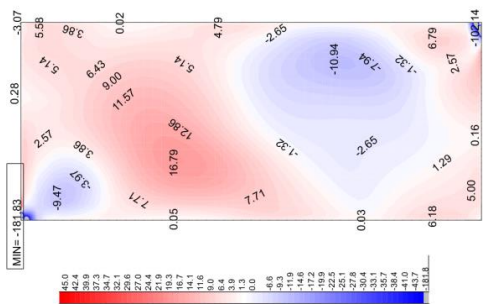


Nachweise Hauptspannung oben im Element
Lastfall 350 (F-H) - (Max=355.0)

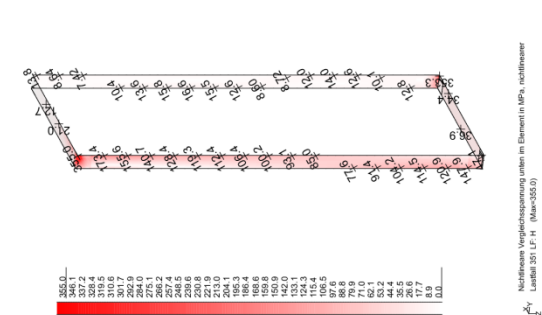
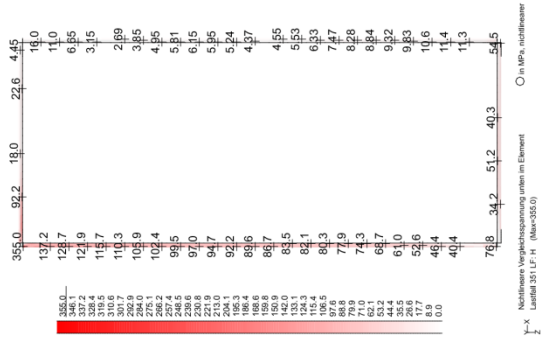
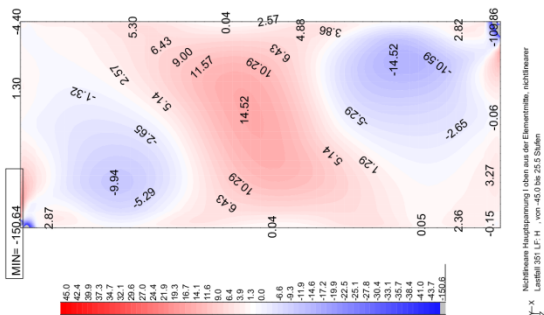
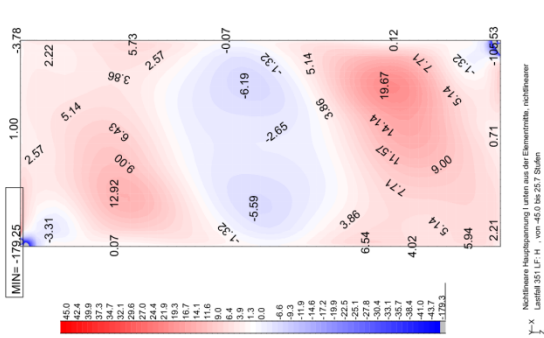
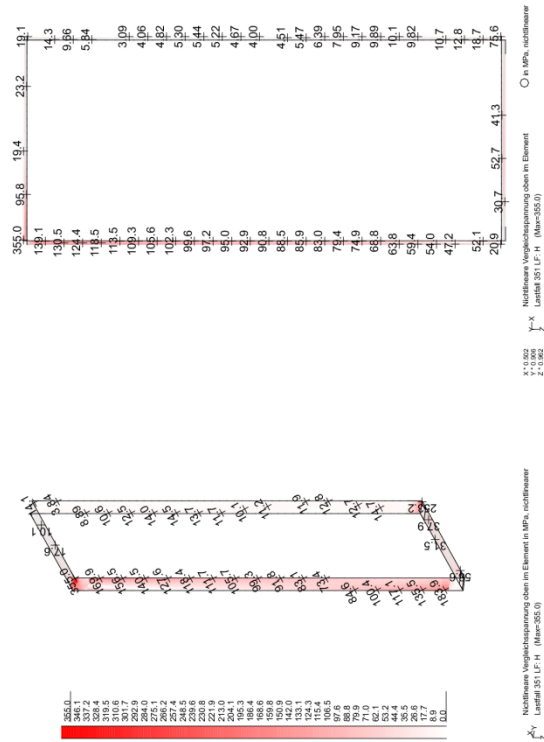
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



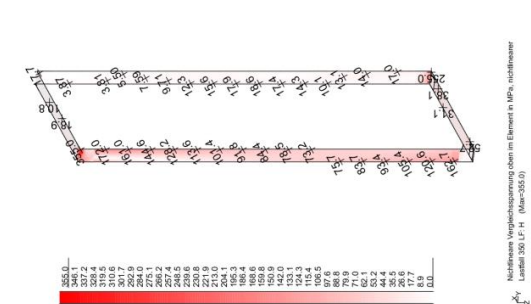
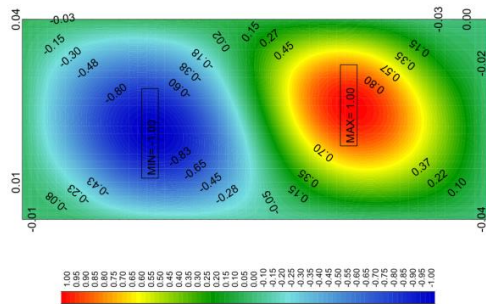
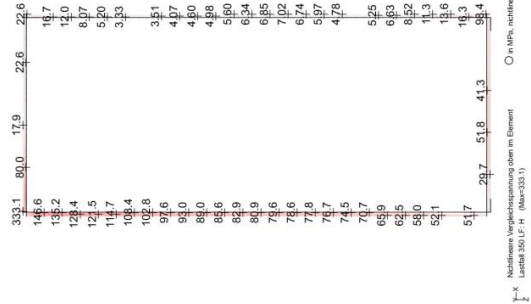
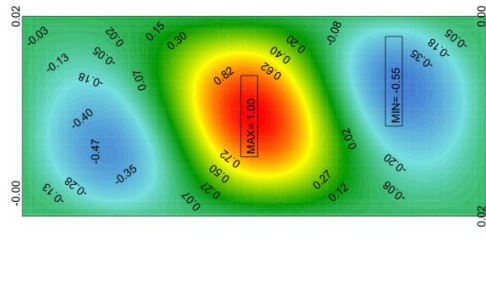
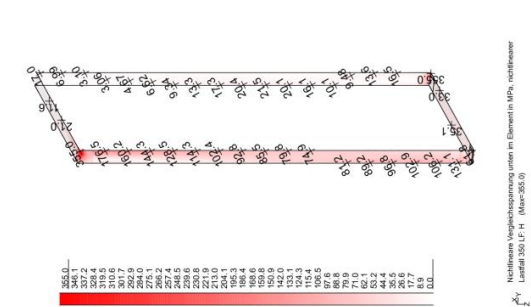
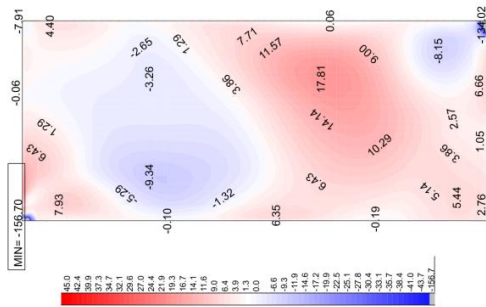
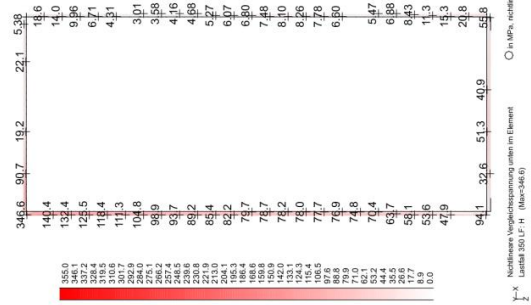
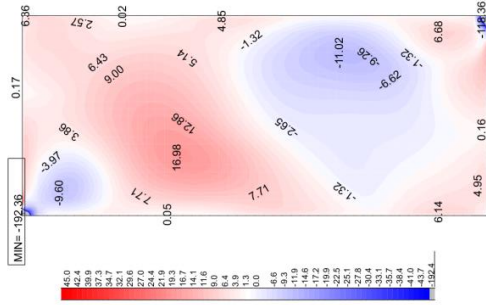
14.1.2.3 E-Modul Klotzung mit 10.000 N/mm²:



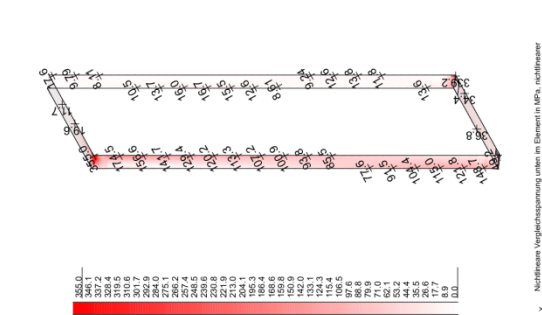
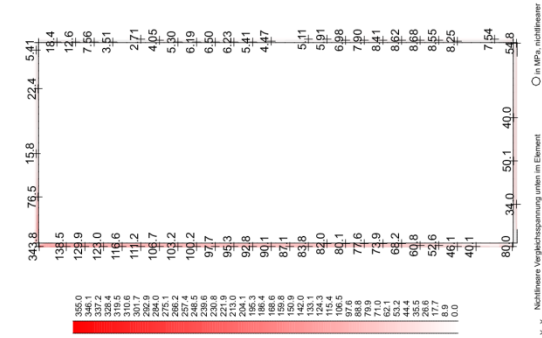
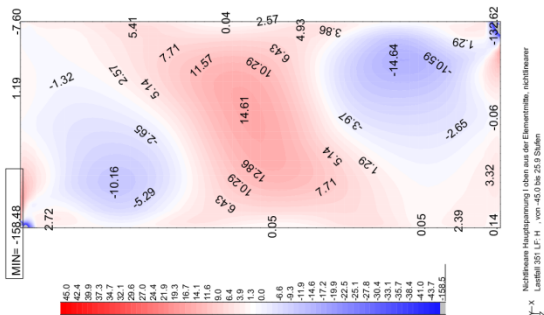
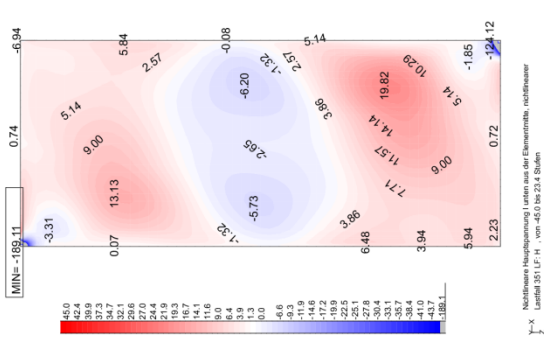
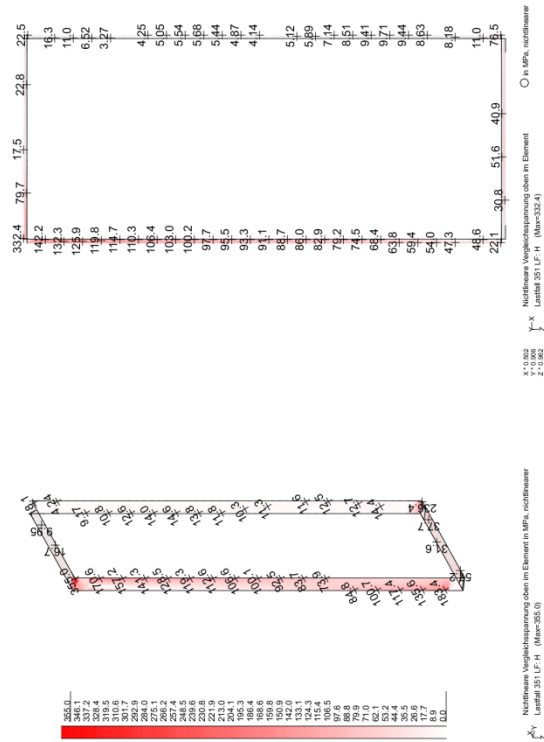
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.2.4 E-Modul Klotzung mit 70.000 N/mm²:

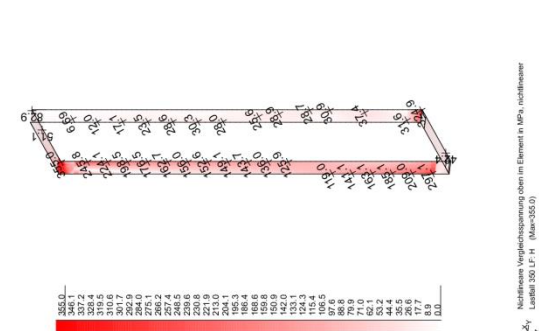
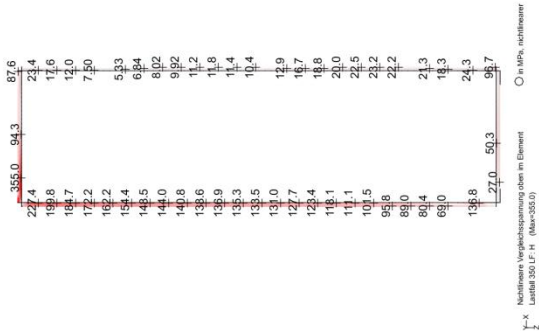
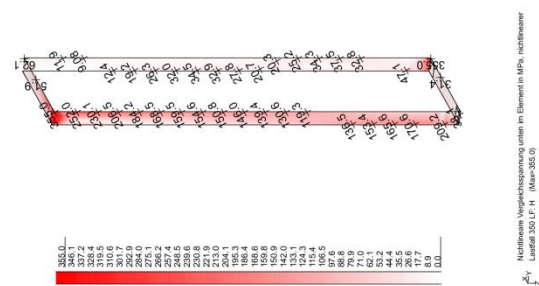
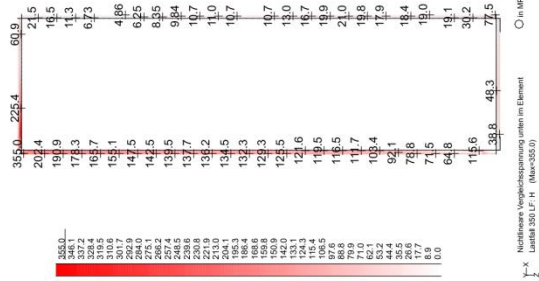
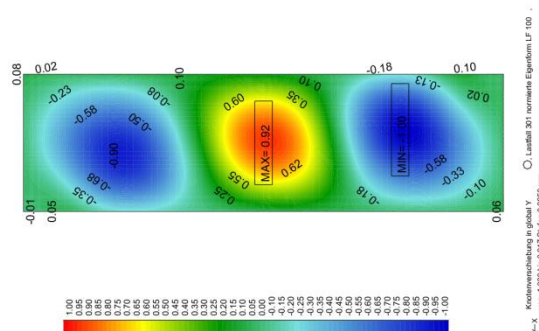
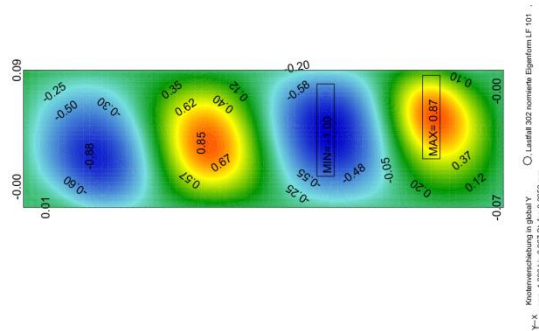
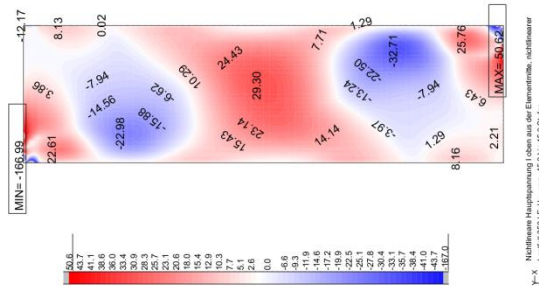
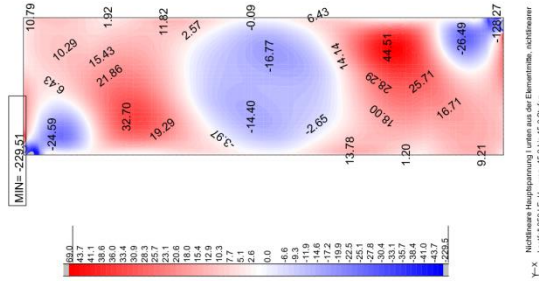


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

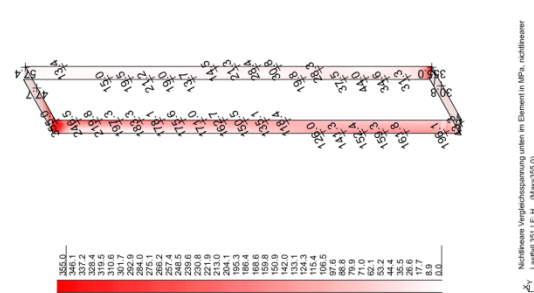
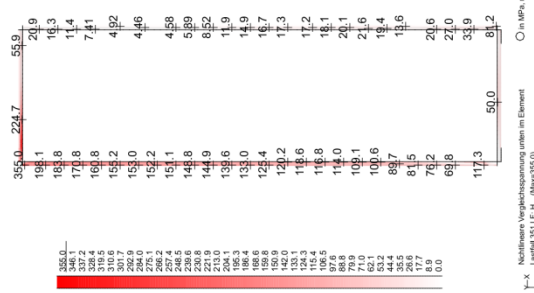
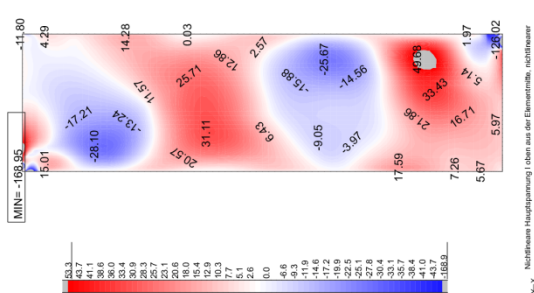
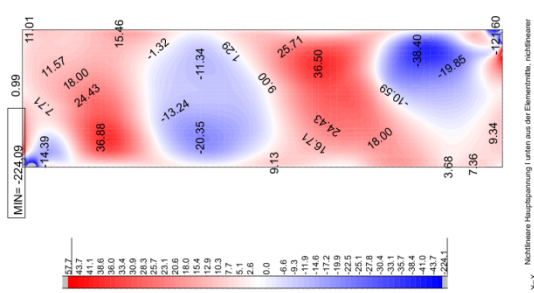
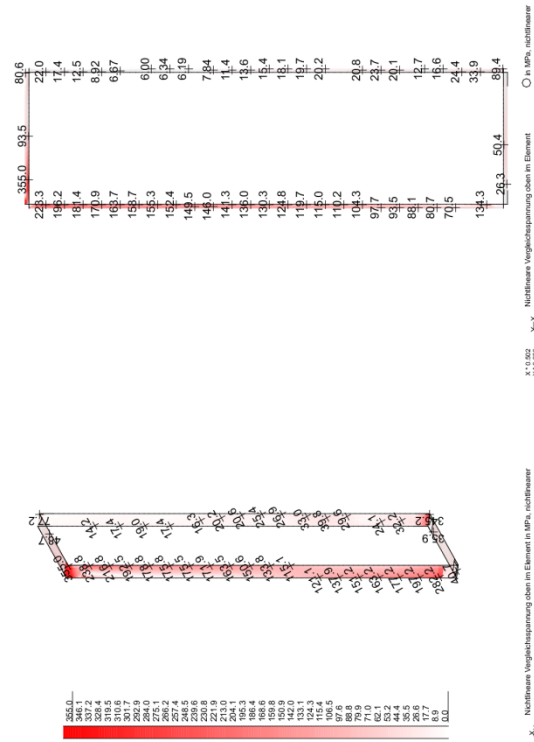


14.1.3 Scheibenbreite

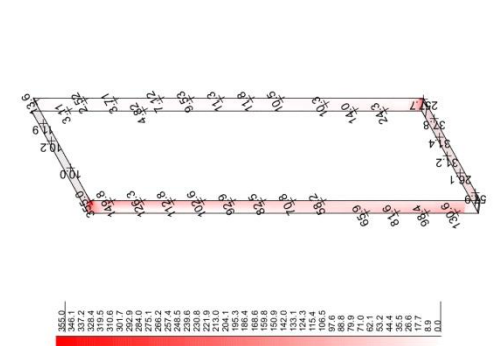
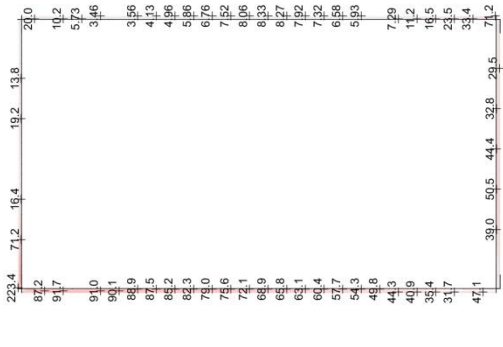
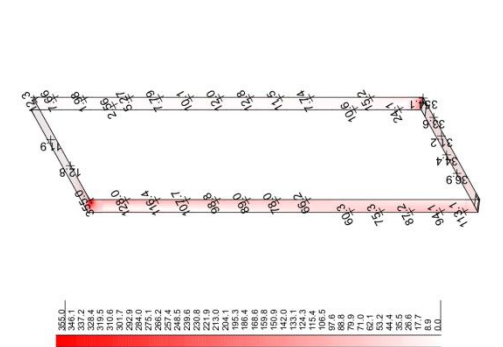
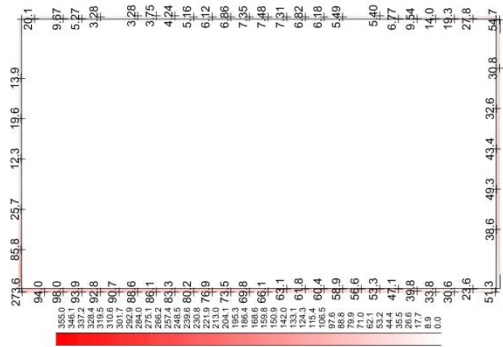
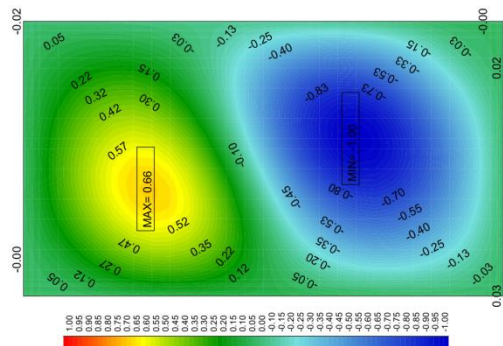
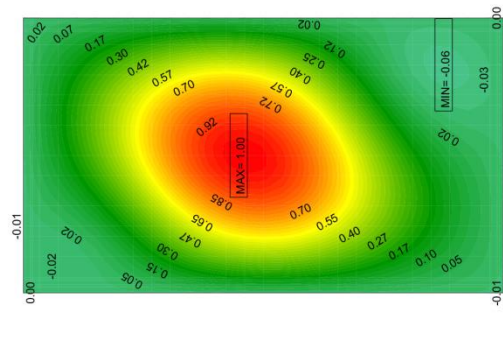
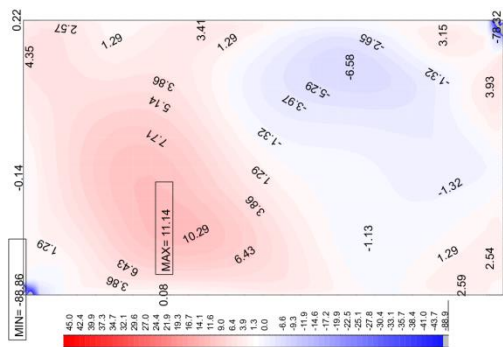
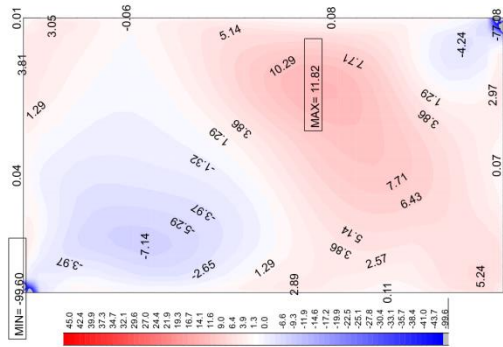
14.1.3.1 Scheibenbreite 1000 mm:



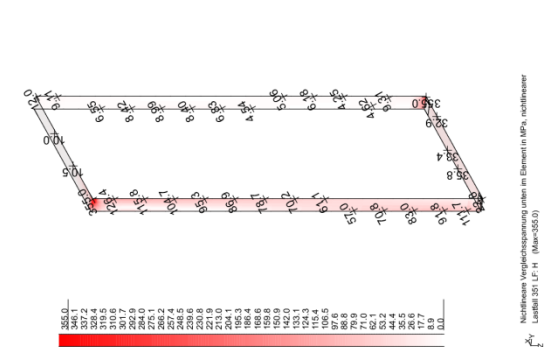
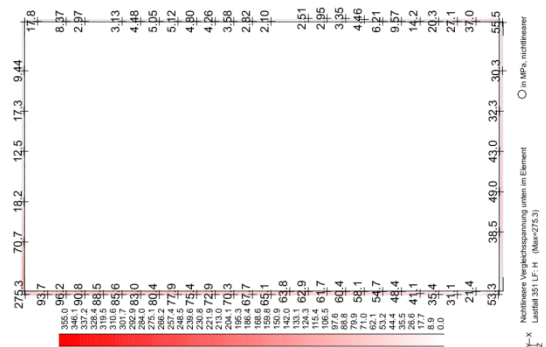
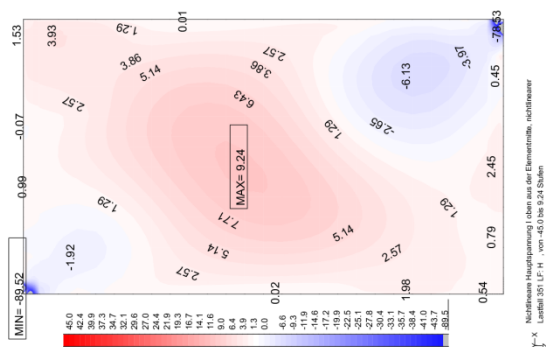
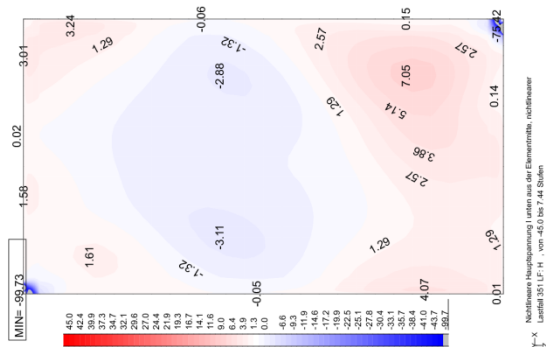
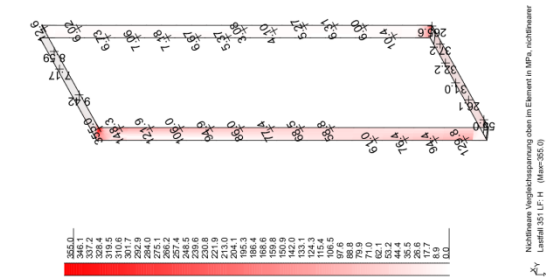
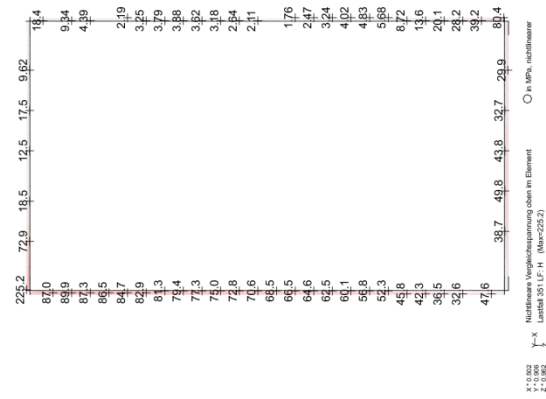
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



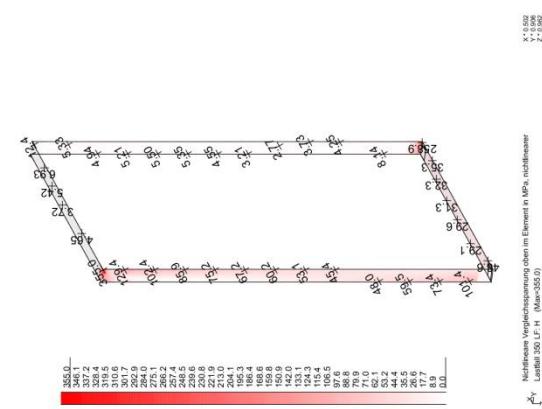
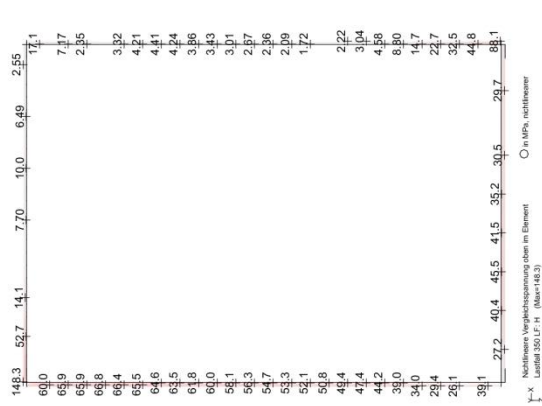
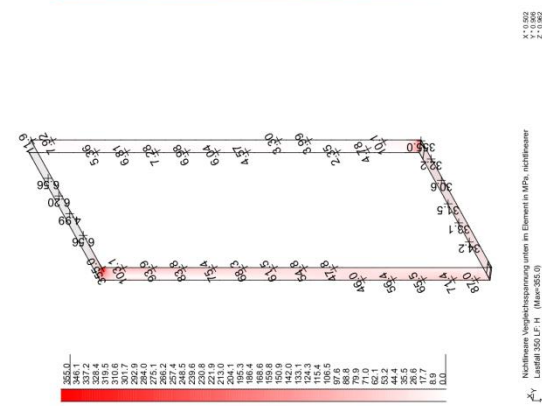
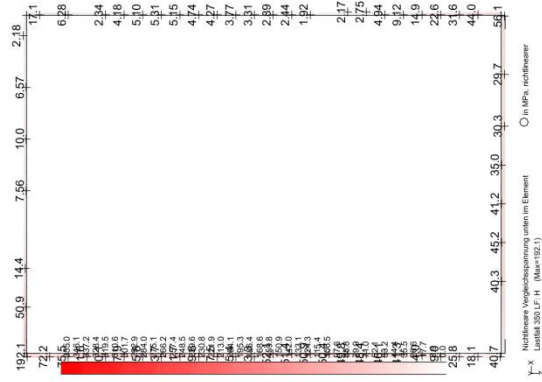
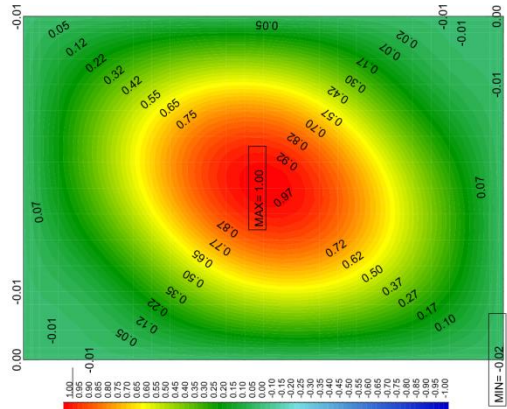
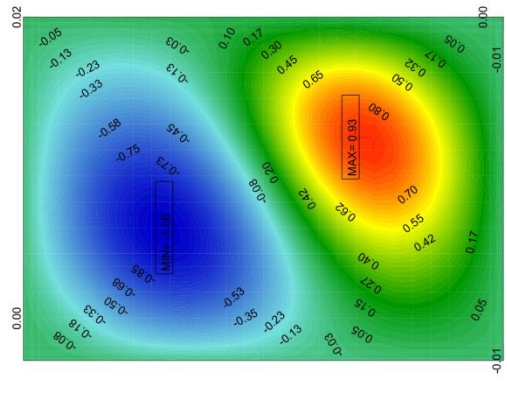
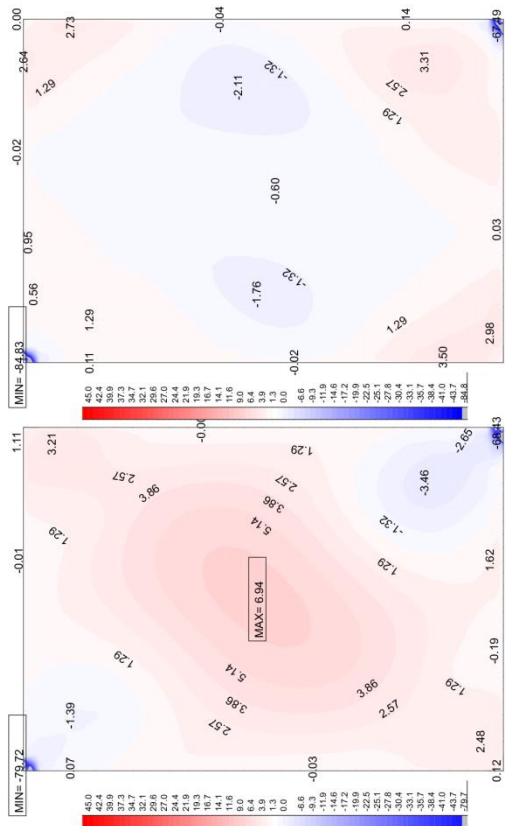
14.1.3.3 Scheibenbreite 2000 mm:



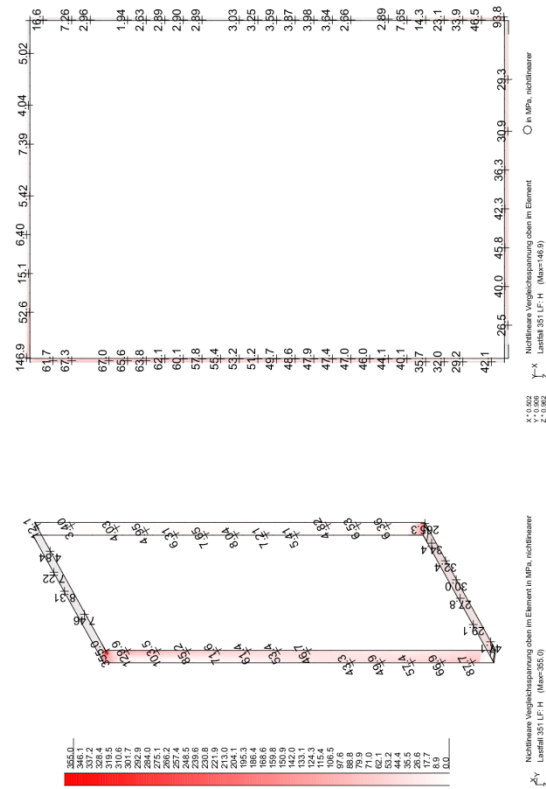
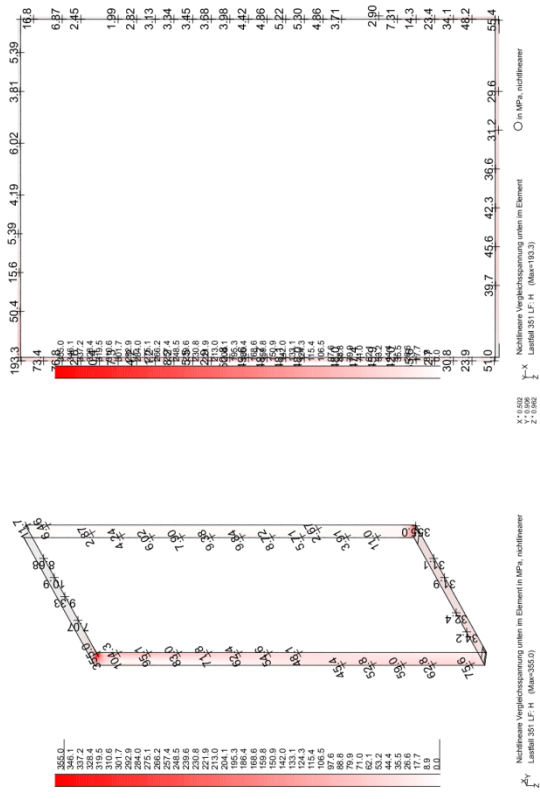
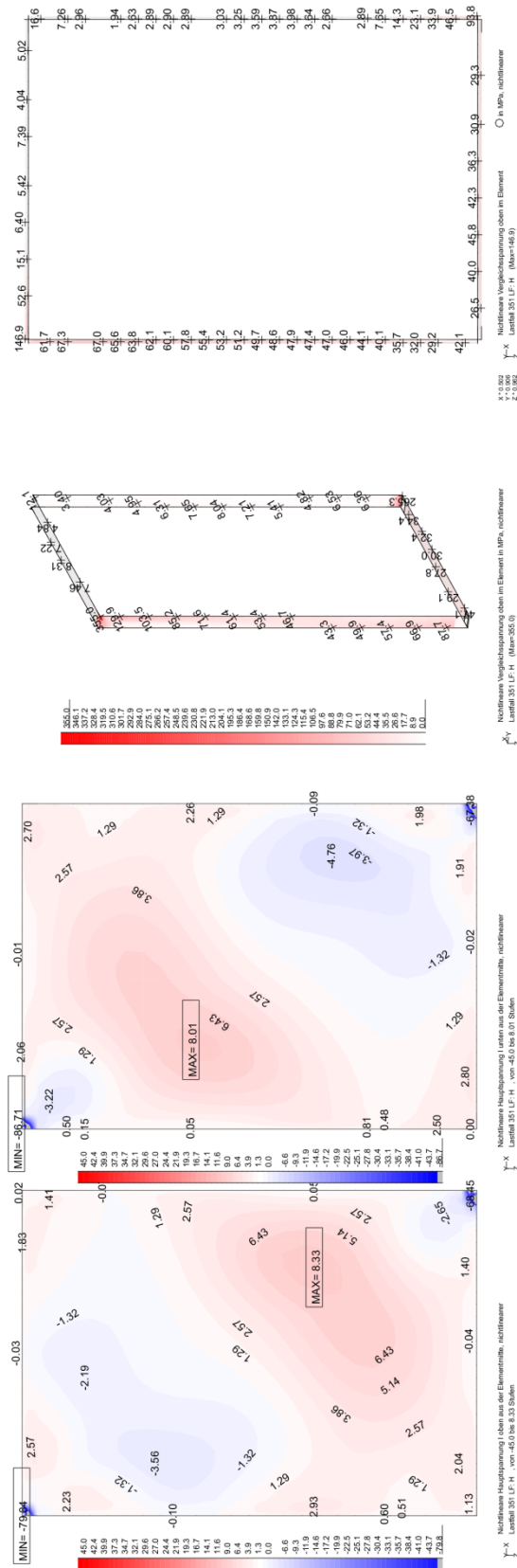
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



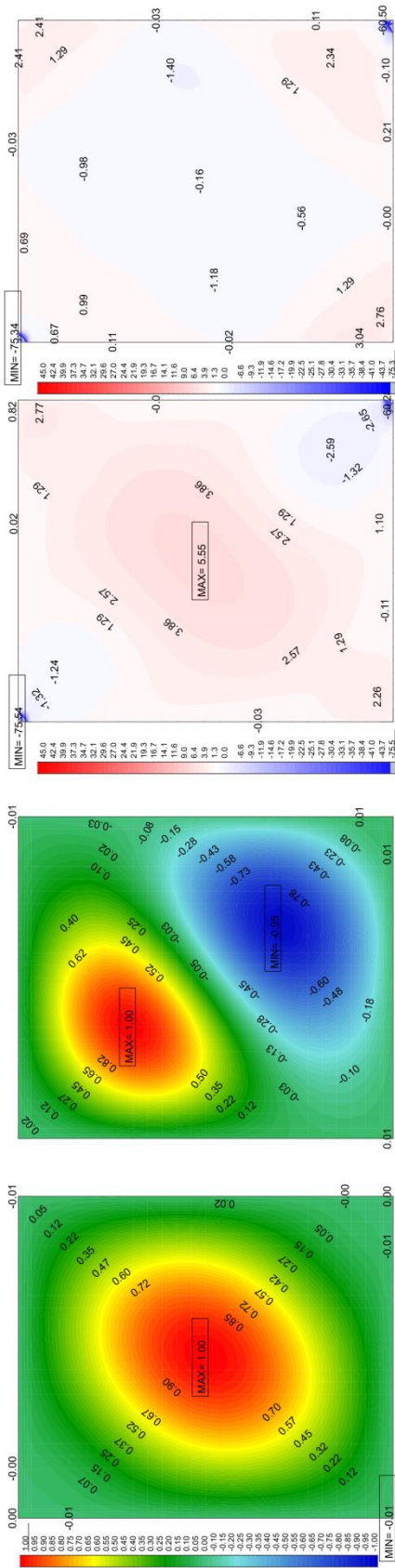
14.1.3.4 Scheibenbreite 2500 mm:



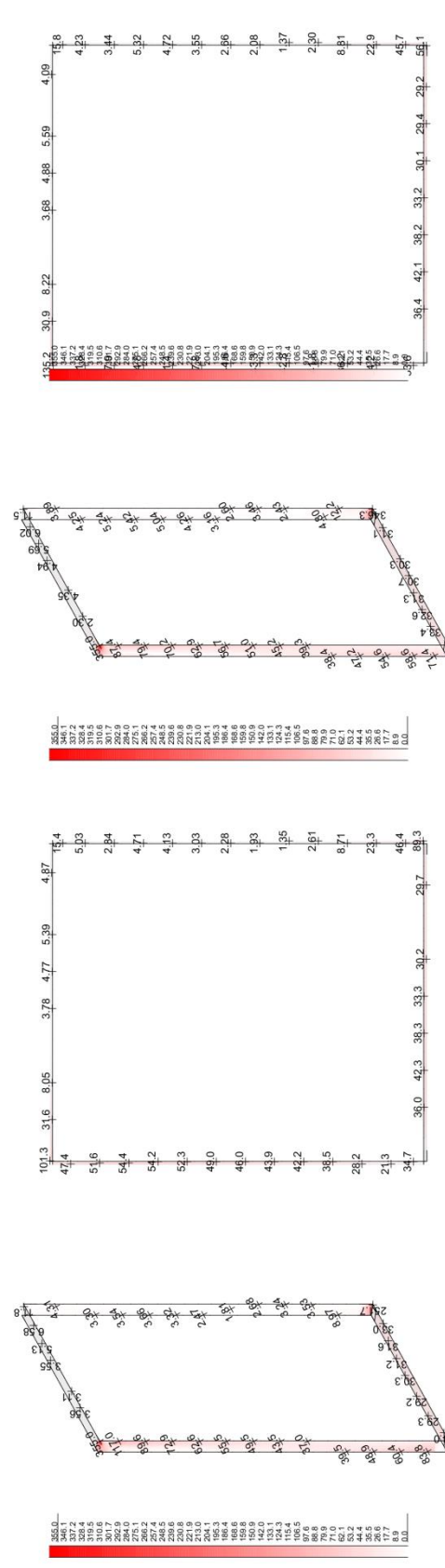
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.3.5 Scheibenbreite 3000 mm:

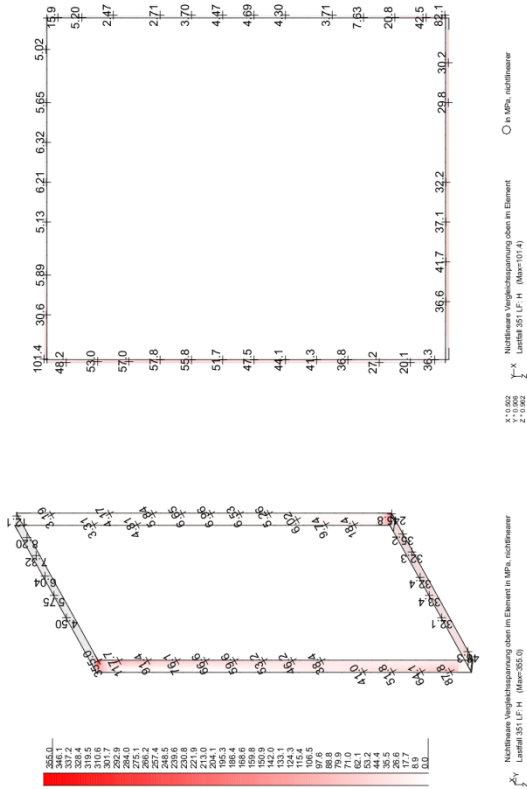


Y-X Knotenverschiebung in global Y von 0,01 bis 1,000 Stielen 0,020 mm. Lastfall 301 normierte Eigenform LF 100. Y-X Knotenverschiebung in global Y von -0,004 bis 1,000 Stielen 0,020 mm. Lastfall 302 normierte Eigenform LF 101. Y-X Nennnormierte Hauptspannung unten aus der Elementmitte, nichtlinear. Lastfall 300 LF-H von -45,0 bis 5,72 Stielen. Y-X Nennnormierte Hauptspannung unten aus der Elementmitte, nichtlinear. Lastfall 300 LF-H von -45,0 bis 5,72 Stielen.



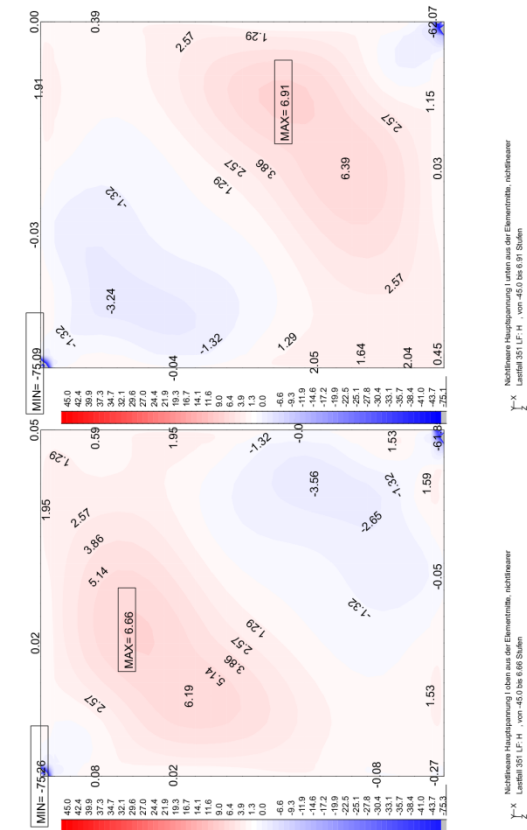
Y-X Nennnormierte Vergleichsspannung oben in Element in MPa, nichtlinear. Lastfall 300 LF-H (Max=355.0). Y-X Nennnormierte Vergleichsspannung oben in Element in MPa, nichtlinear. Lastfall 300 LF-H (Max=355.0). Y-X Nennnormierte Vergleichsspannung unten in Element in MPa, nichtlinear. Lastfall 300 LF-H (Max=352.2). Y-X Nennnormierte Vergleichsspannung unten in Element in MPa, nichtlinear. Lastfall 300 LF-H (Max=352.2).

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



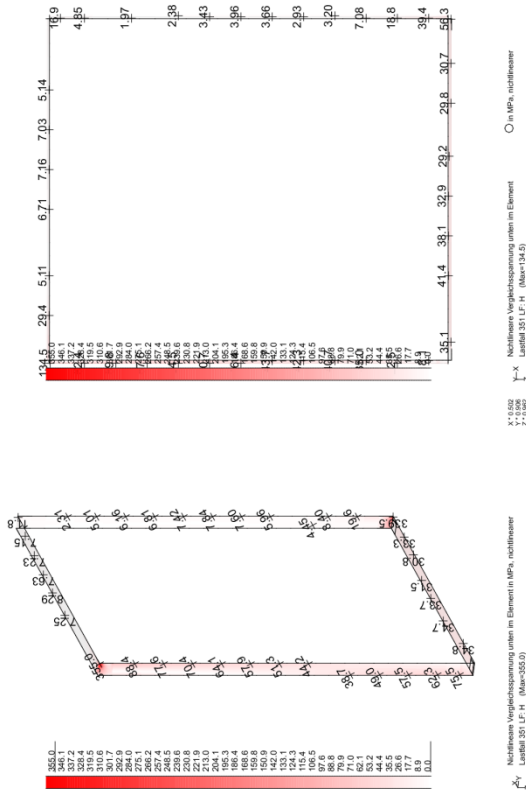
Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element
 Lastfall 351 LP-H (Max=101.4)
 X: 12.022
 Y: 0.0
 Z: 0.002

Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element, nichtlinear
 Lastfall 351 LP-H (Max=355.0)



Nichtlineare Hauptspannung unten im Element, nichtlinear
 Lastfall 351 LP-H, von -45.0 bis 6.66 Stufen

Nichtlineare Hauptspannung oben aus der Elementmitte, nichtlinear
 Lastfall 351 LP-H, von -45.0 bis 6.66 Stufen

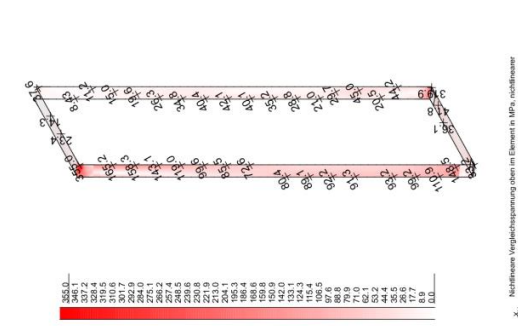
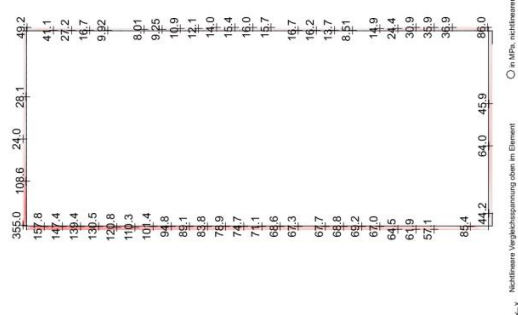
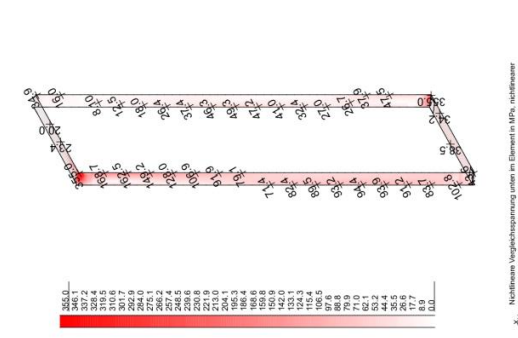
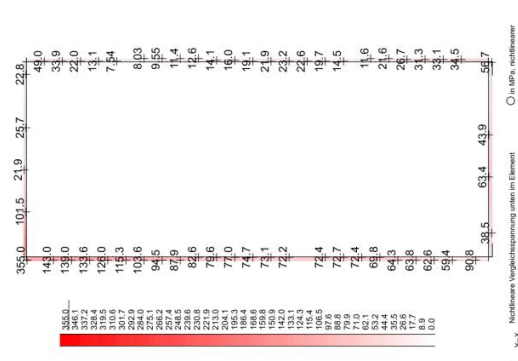
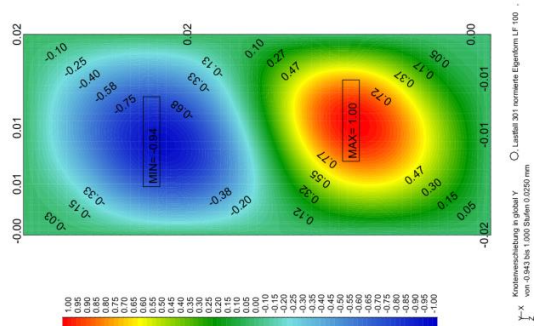
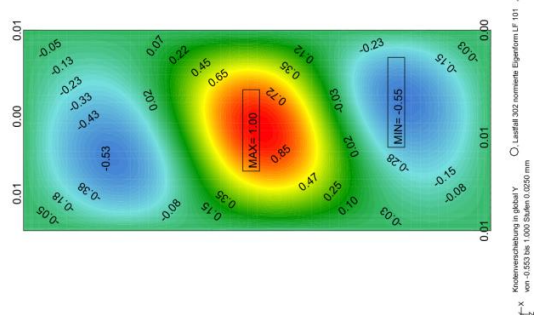
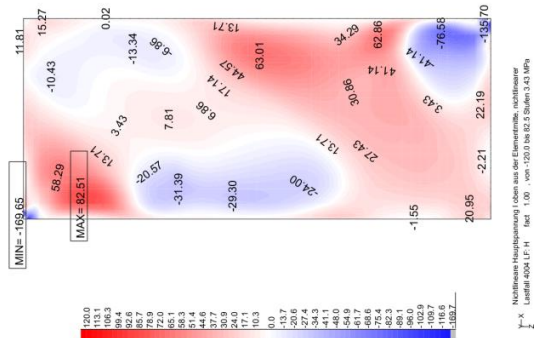
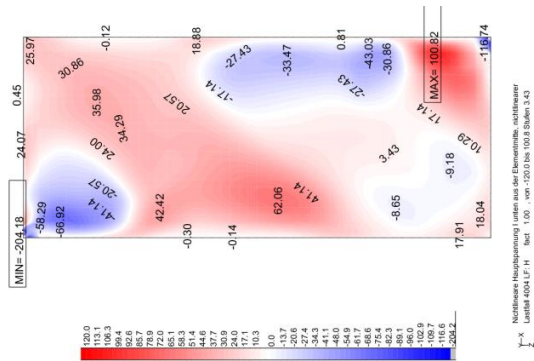


Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element
 Lastfall 351 LP-H (Max=134.5)
 X: 12.022
 Y: 0.0
 Z: 0.002

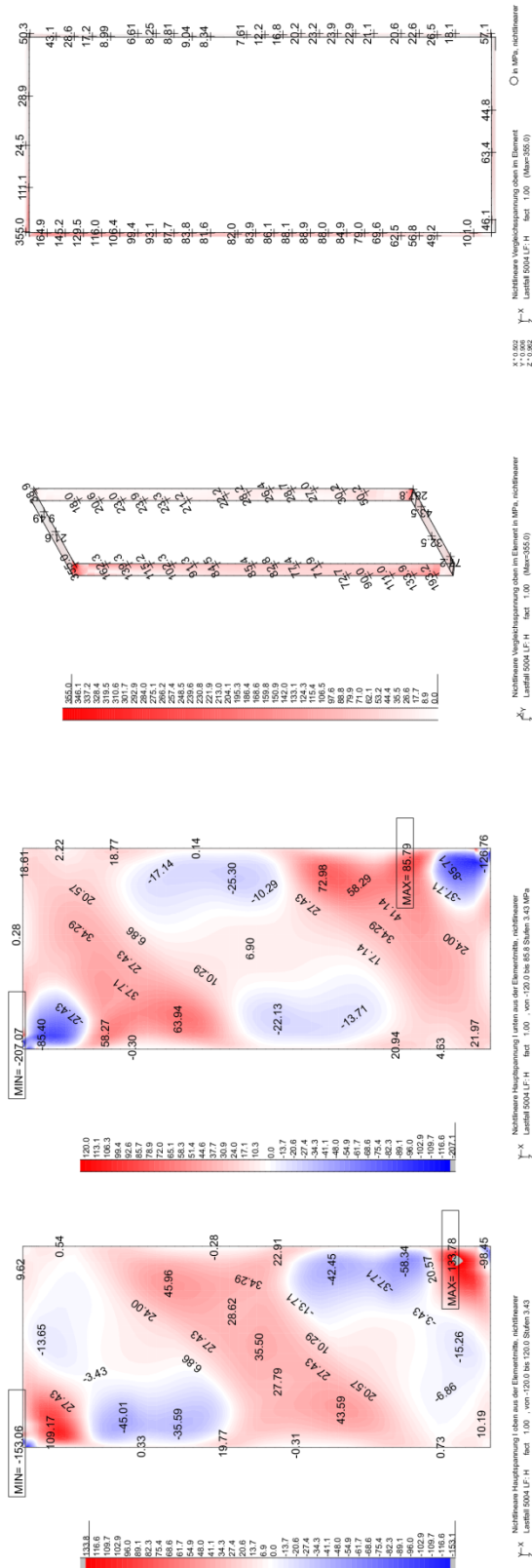
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element
 Lastfall 351 LP-H (Max=355.0)

14.1.4 Scheibendicke:

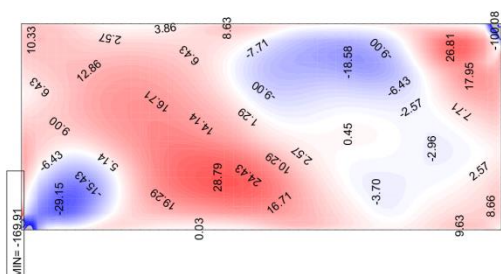
14.1.4.1 Scheibendicke 6mm:



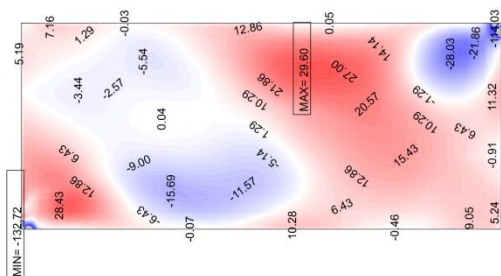
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



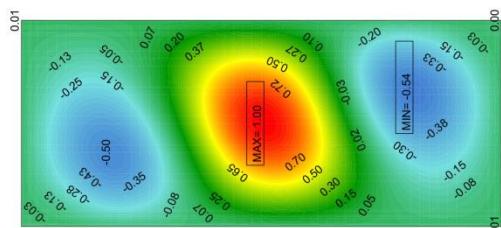
14.1.4.2 Scheibendicke 8 mm:



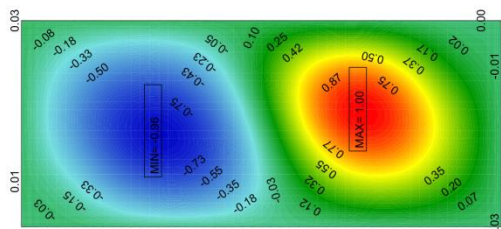
Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung unten aus der Elementm. nichtlineare
Lastfall 4004.LF.H fact 1.00 - von -43.3 bis 43.9 MPa



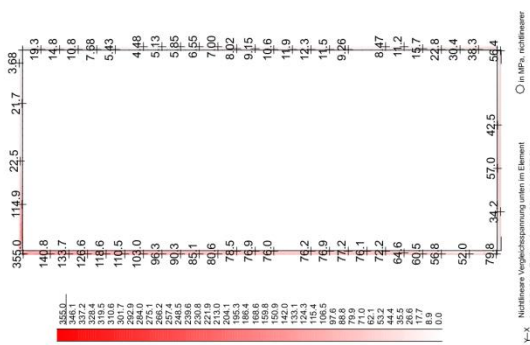
Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben aus der Elementm. nichtlineare
Lastfall 4004.LF.H fact 1.00 - von -43.0 bis 26.6 MPa



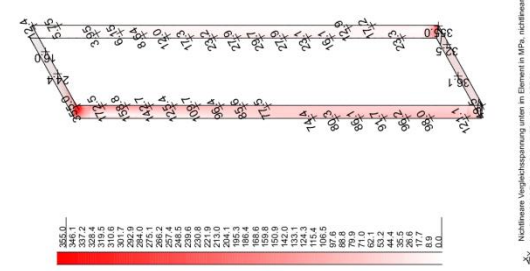
Y-X Knotenverschiebung in global Y
von -0.542 bis 1.000 Skalen 0.020 mm



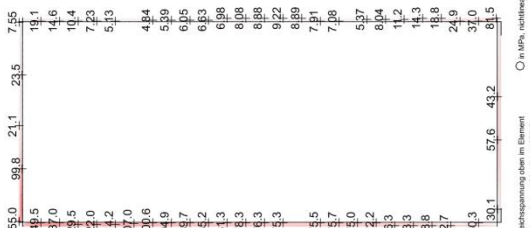
Y-X Knotenverschiebung in global Y
von 0.956 bis 1.000 Skalen 0.020 mm



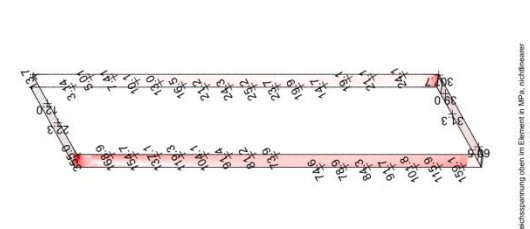
Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung unten in Element
Lastfall 4004.LF.H fact 1.00 (Max=355.0)



Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung unten in Element
Lastfall 4004.LF.H fact 1.00 (Max=355.0)

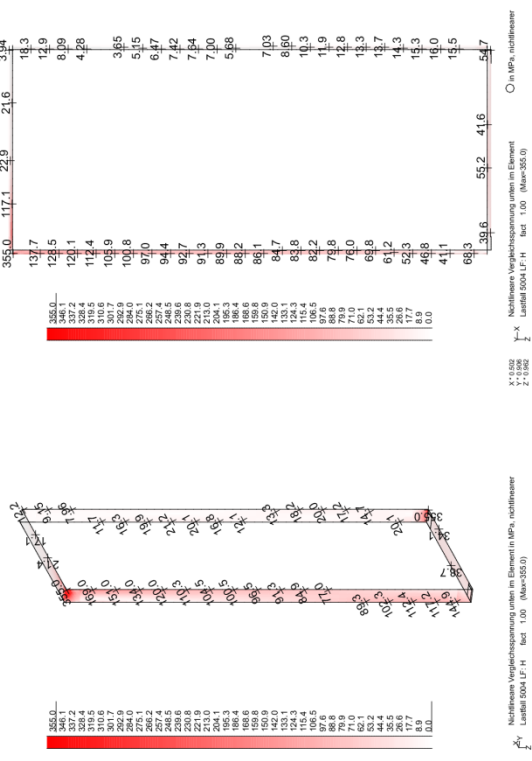
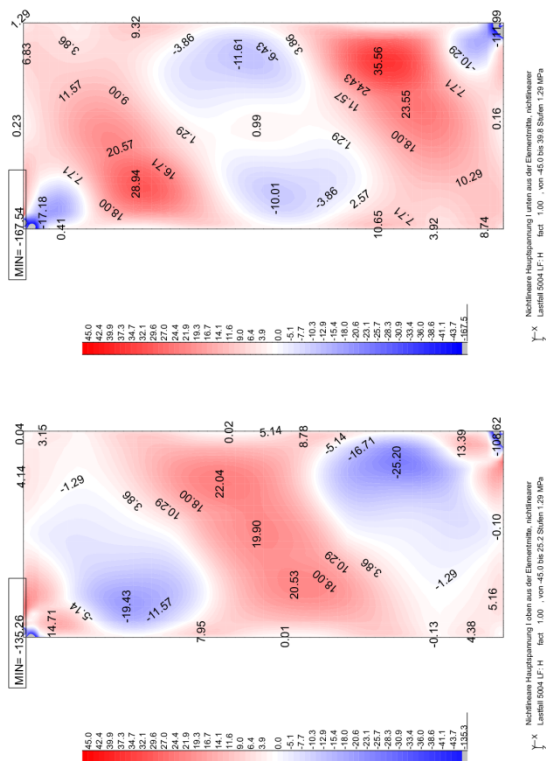
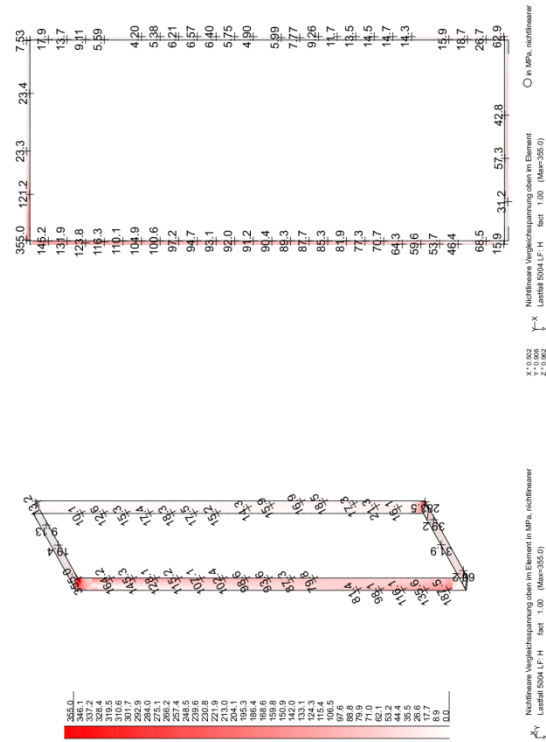


Y-X Knotenverschiebung oben in Element
Lastfall 4004.LF.H fact 1.00 (Max=355.0)

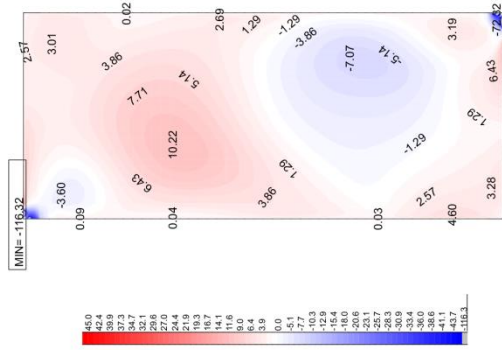


Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben in Element
Lastfall 4004.LF.H fact 1.00 (Max=355.0)

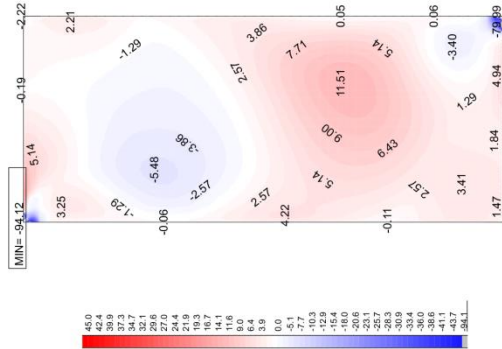
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



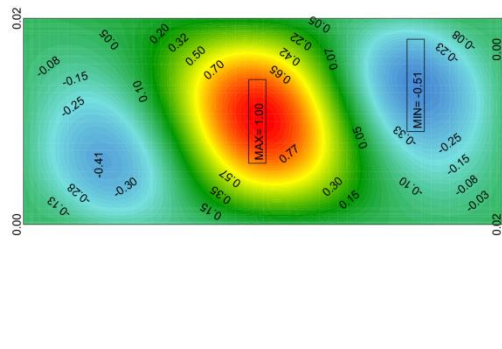
14.1.4.3 Scheibendicke 12 mm:



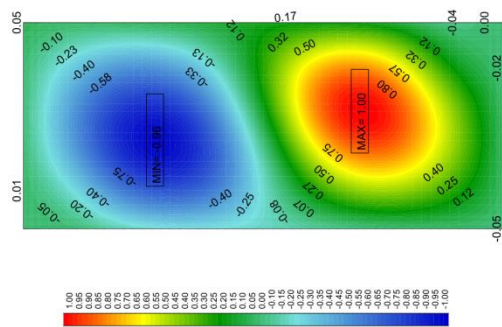
Y-X Nichtlineare Hauptspannung unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 350 (F-H) von -45.0 bis 23.8 Stufen 129 MPa



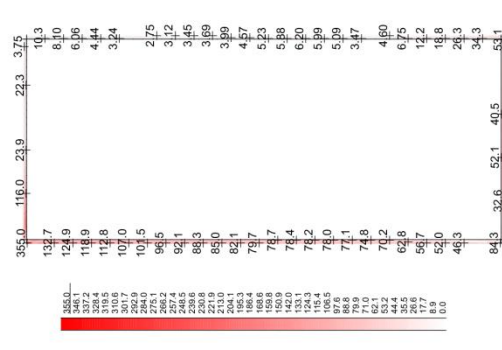
Y-X Nichtlineare Hauptspannung oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 350 (F-H) von -45.0 bis 19.3 Stufen 129 MPa



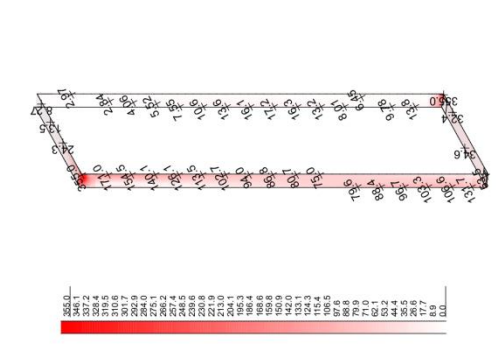
Y-X Knotenverbiegung in global Y von -0.508 bis 1.000 Stufen 0.020 mm
Lastfall 302 normierte Eigenform LF 01



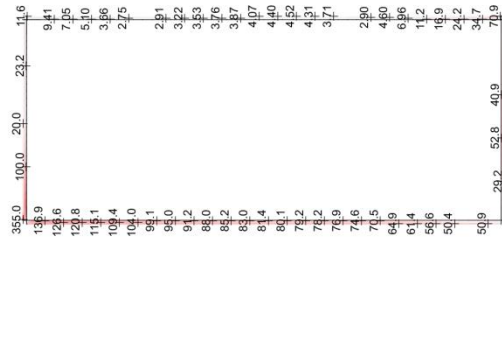
Y-X Knotenverbiegung in global Y von -0.950 bis 1.000 Stufen 0.020 mm
Lastfall 301 normierte Eigenform LF 00



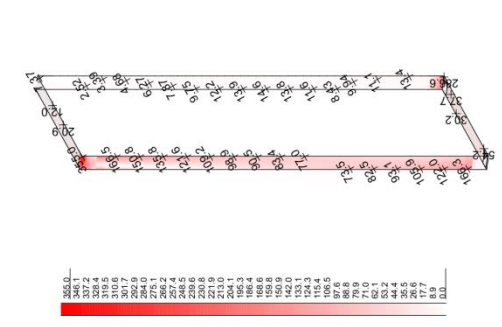
Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element
Lastfall 350 (F-H) (Max=355.0)



Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 350 (F-H) (Max=355.0)

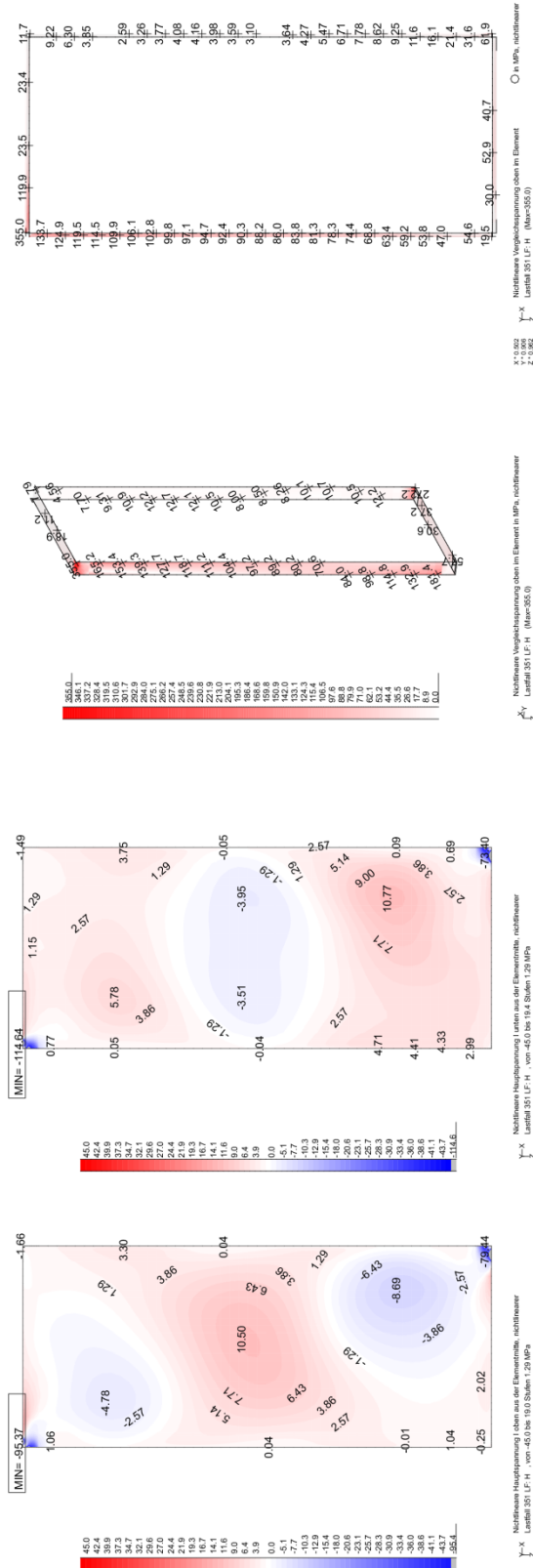


Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element
Lastfall 350 (F-H) (Max=355.0)

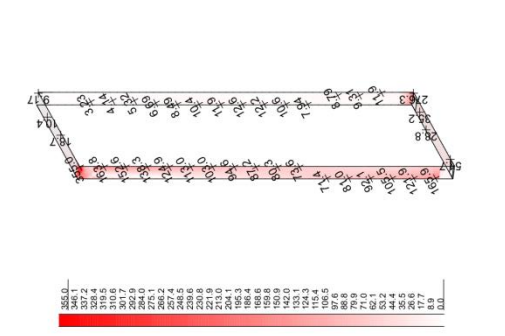
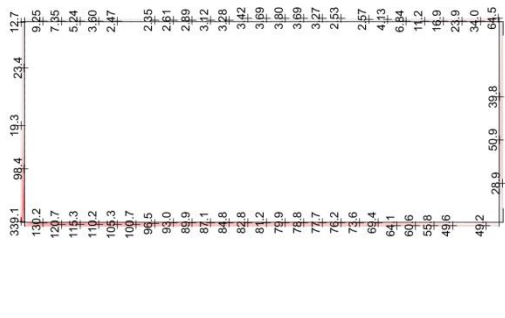
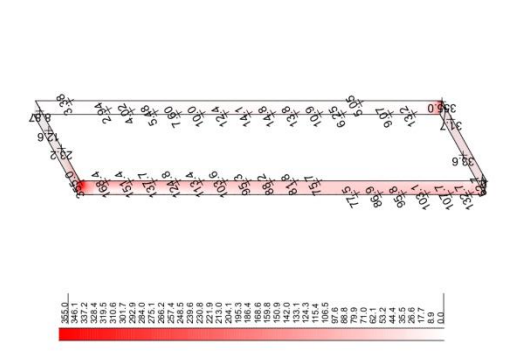
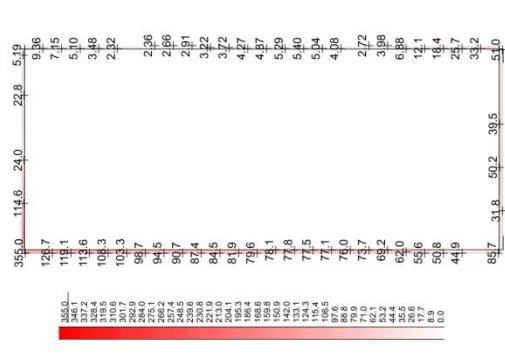
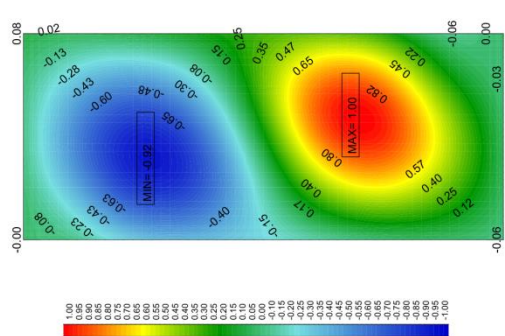
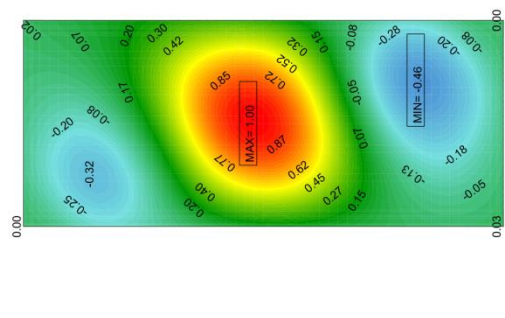
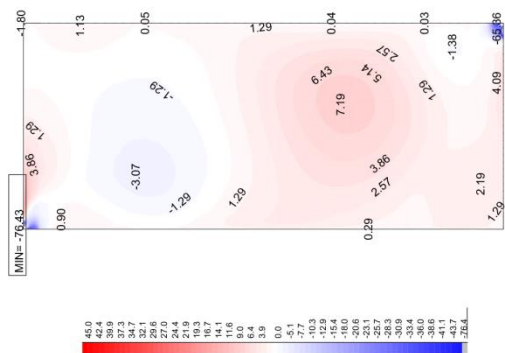
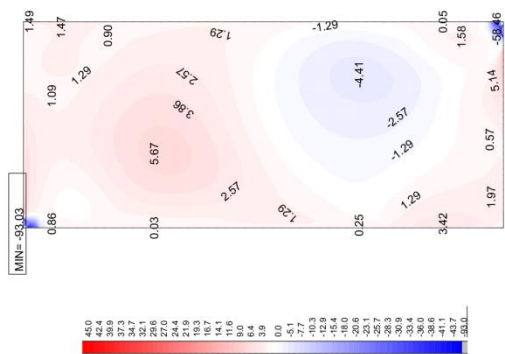


Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 350 (F-H) (Max=355.0)

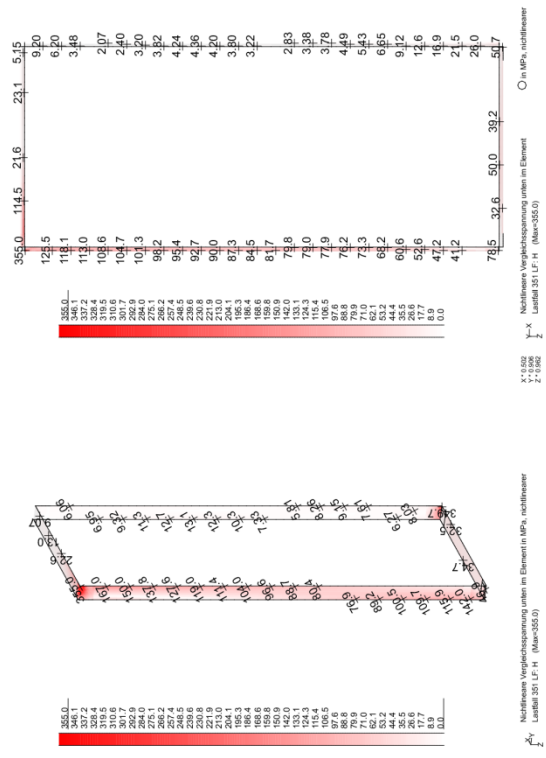
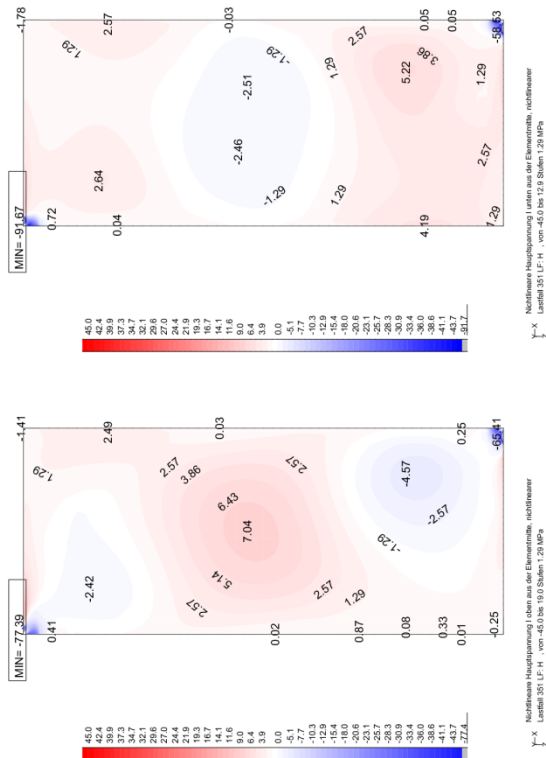
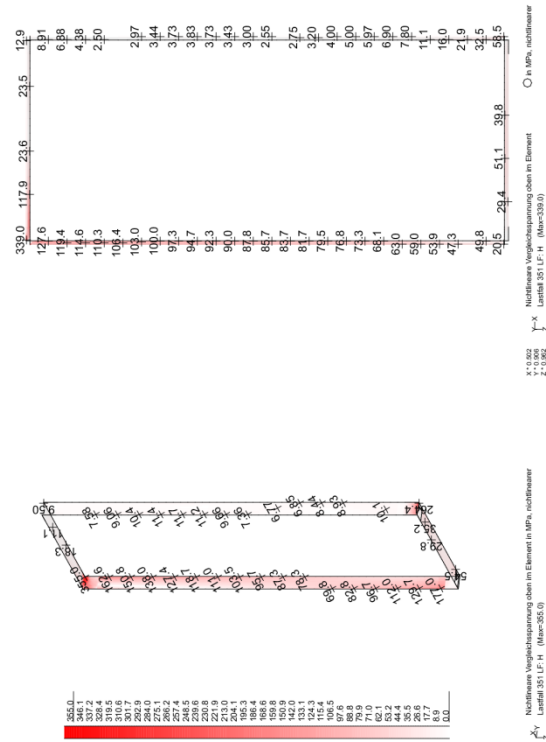
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.4.4 Scheibendicke 15 mm:

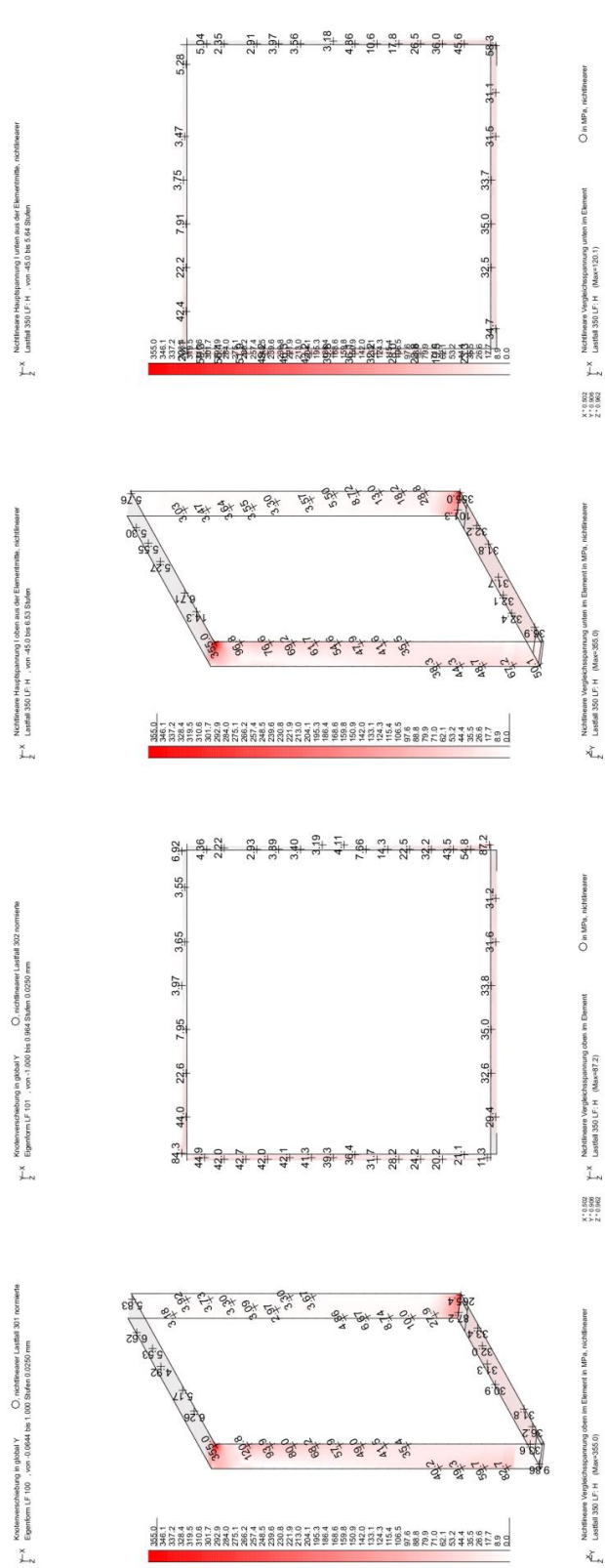
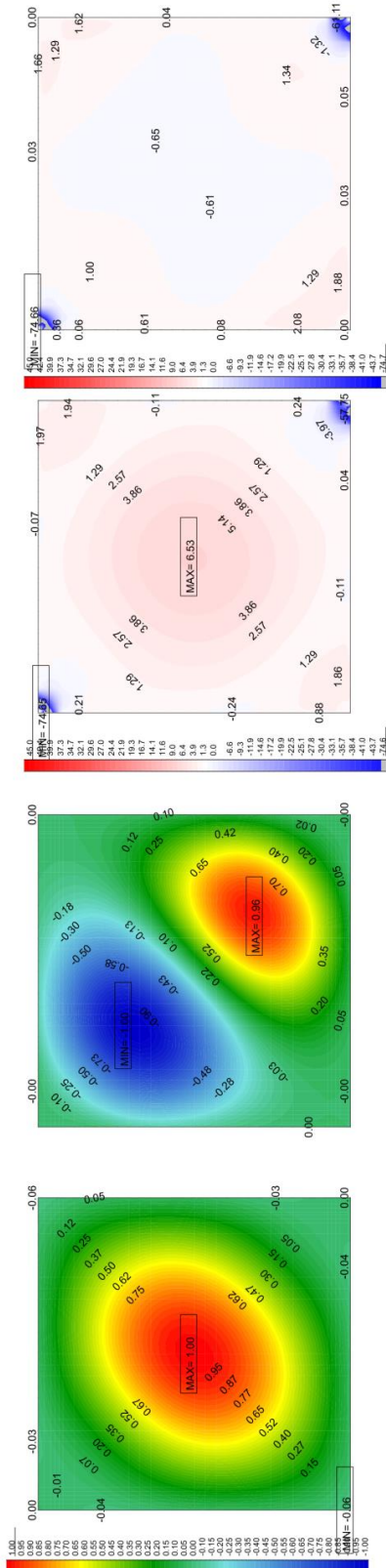


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

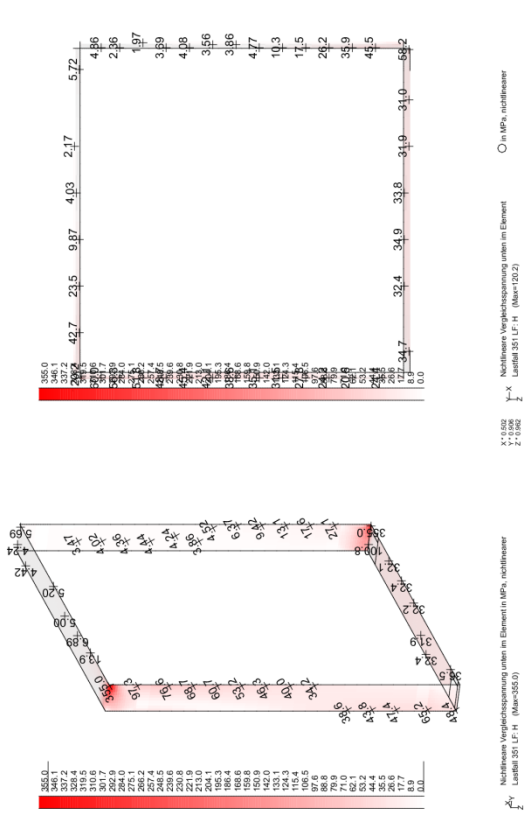
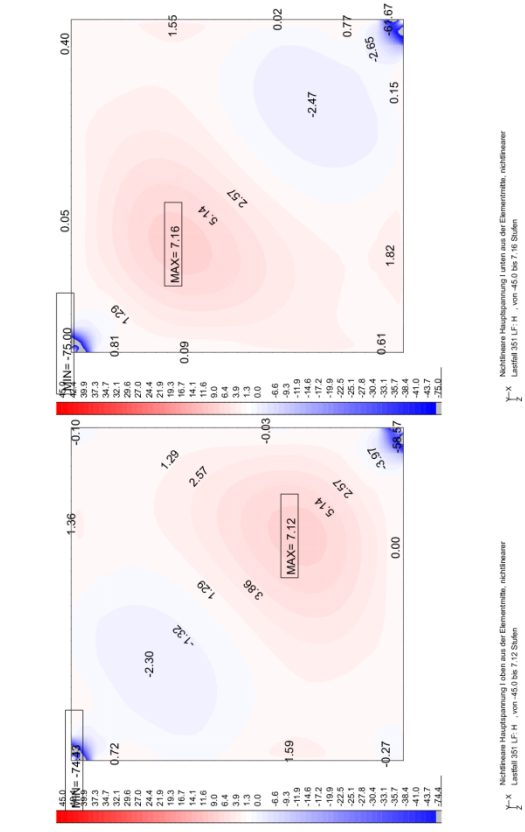
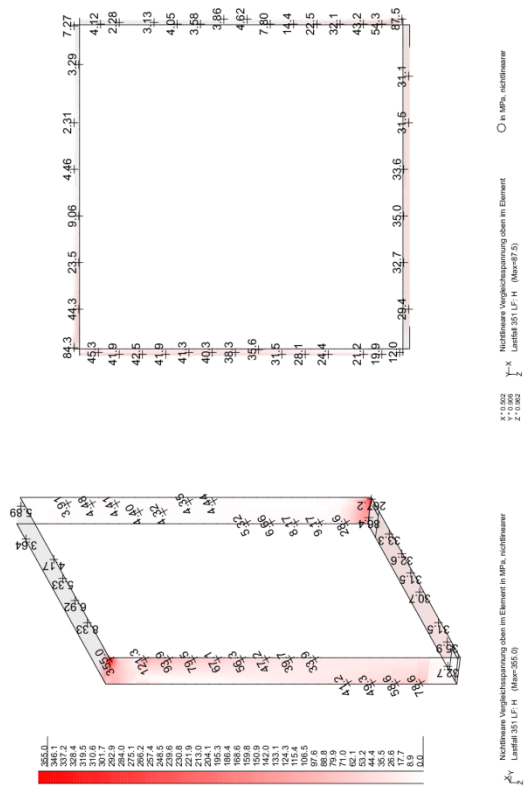


14.1.5 Scheibenhöhe

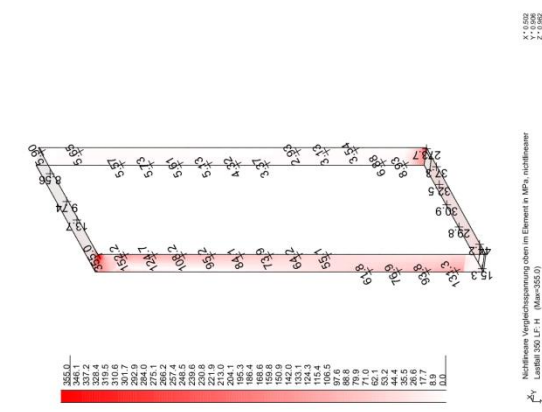
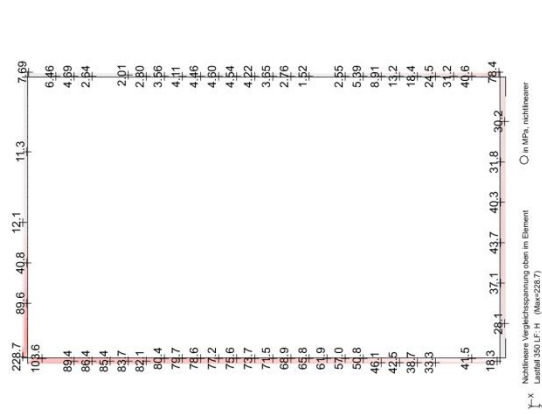
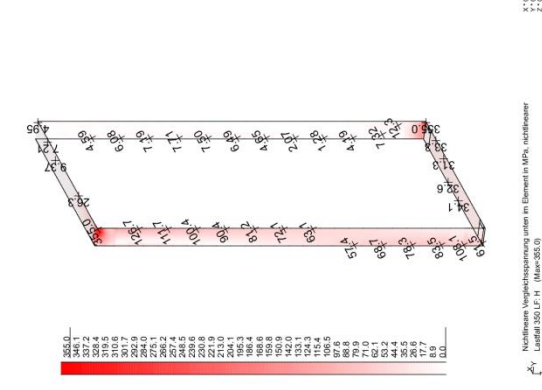
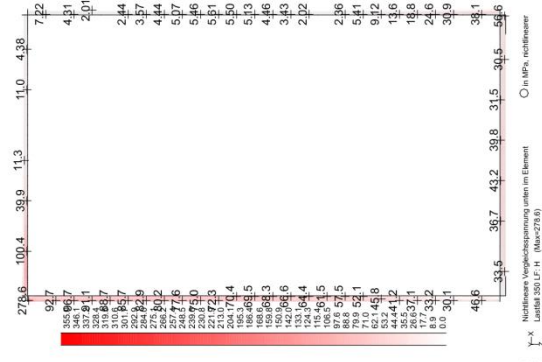
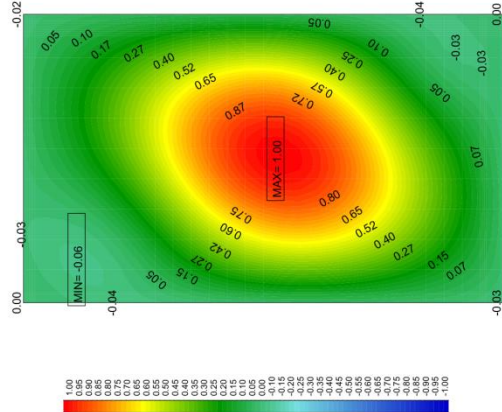
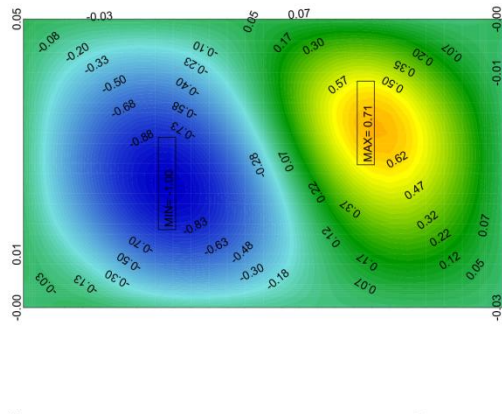
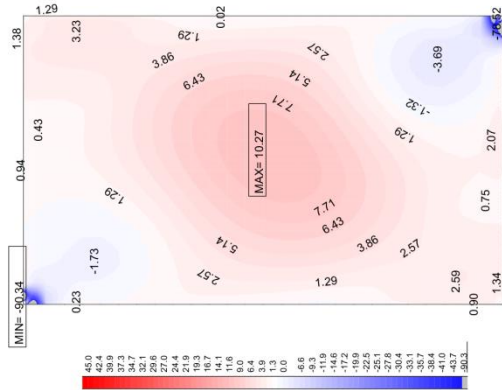
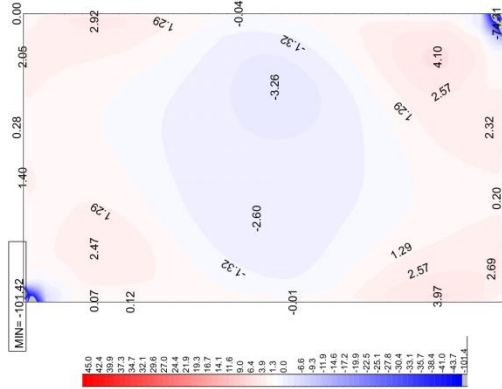
14.1.5.1 Scheibenhöhe 1500 mm:



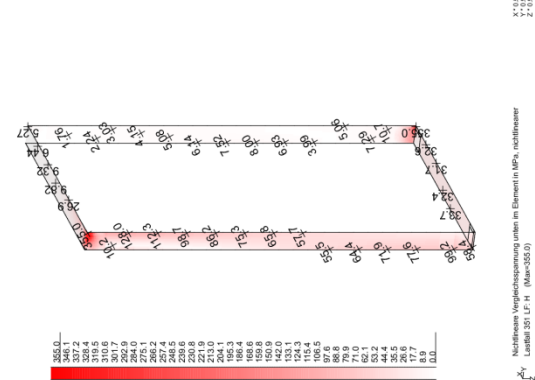
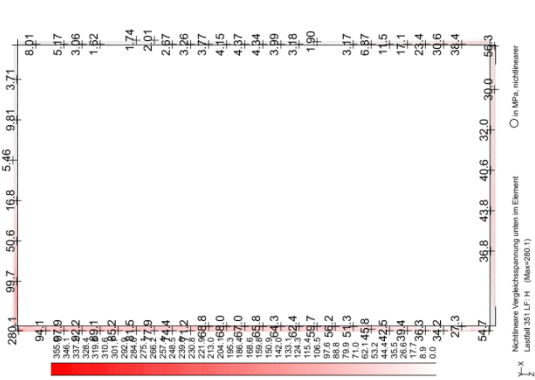
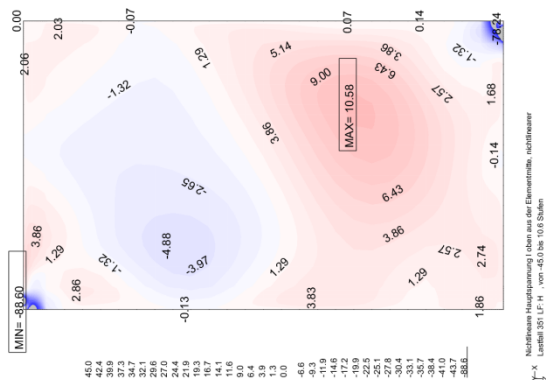
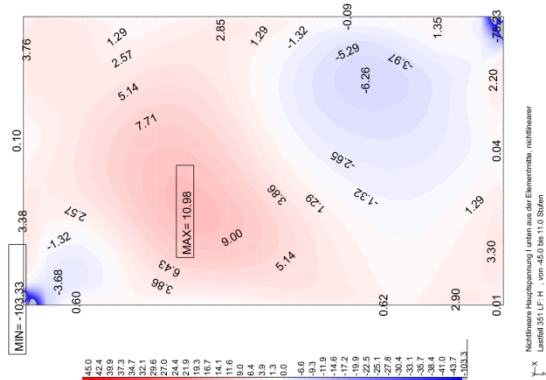
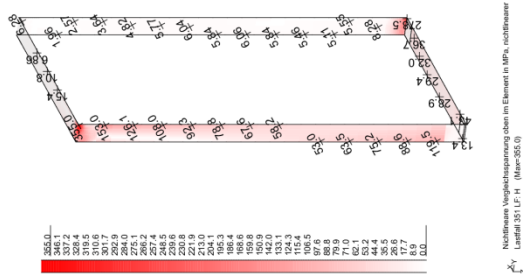
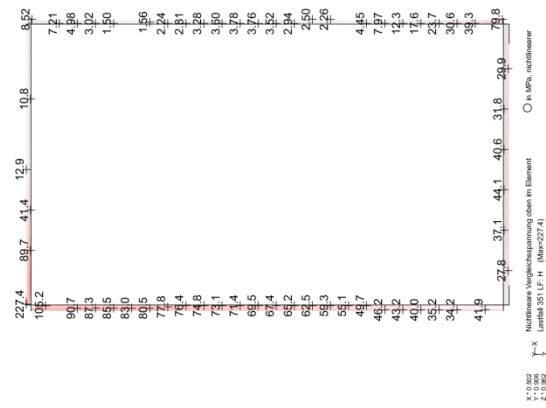
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



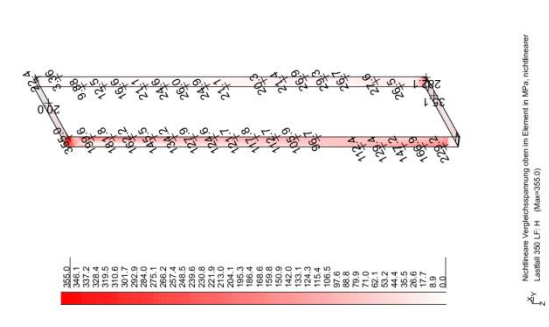
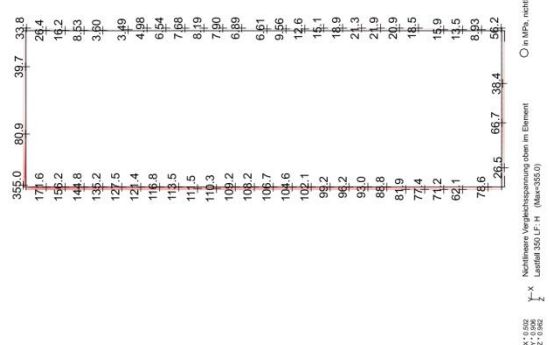
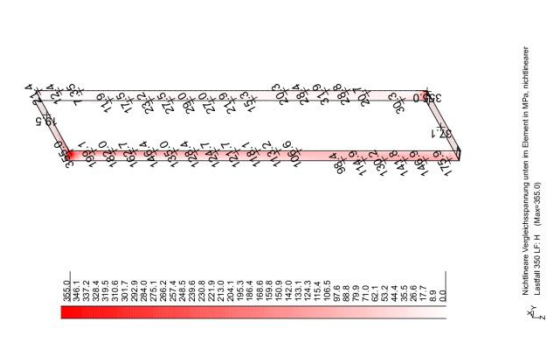
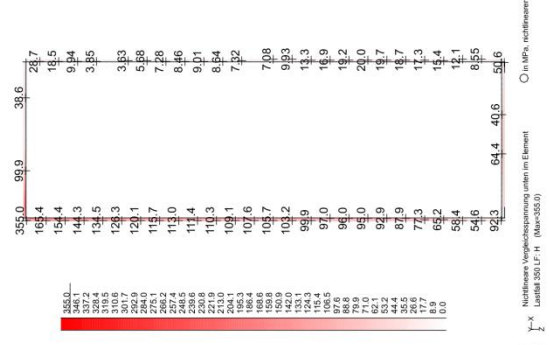
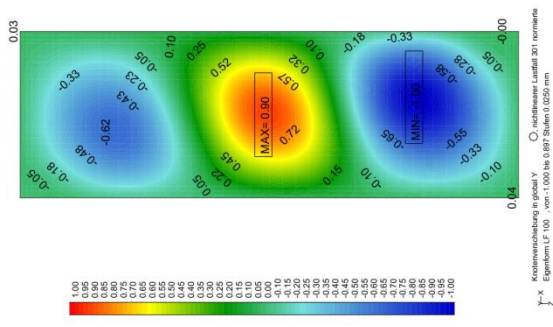
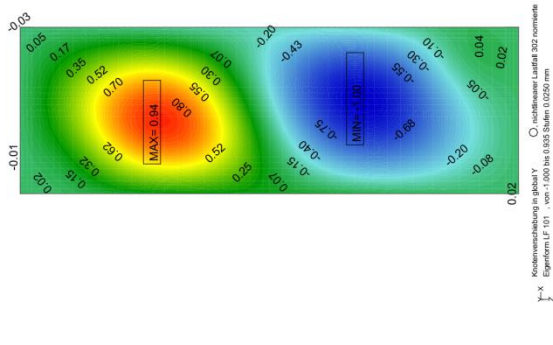
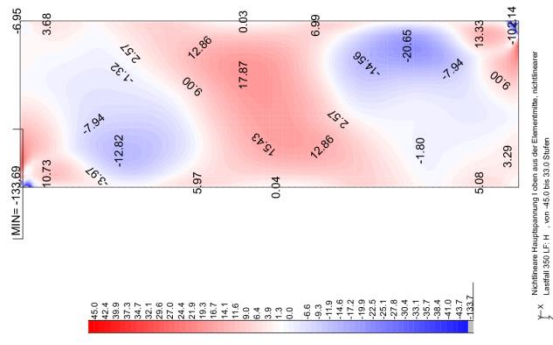
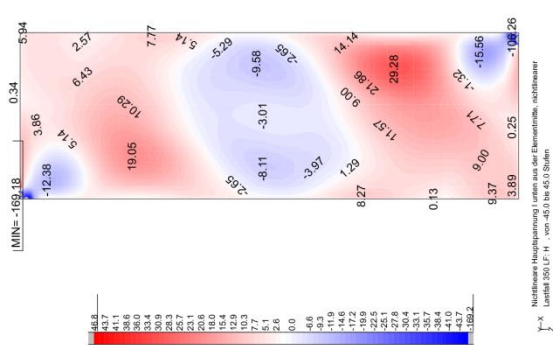
14.1.5.2 Scheibenhöhe 2500 mm:



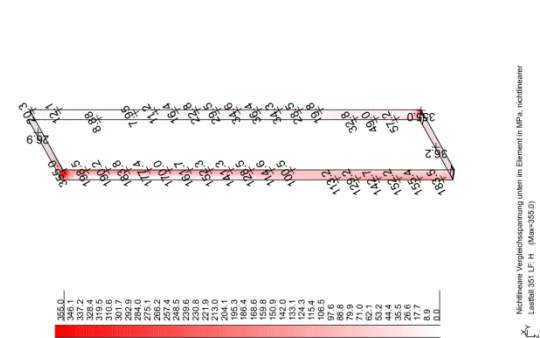
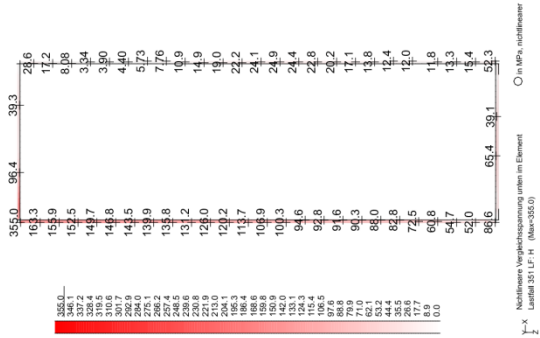
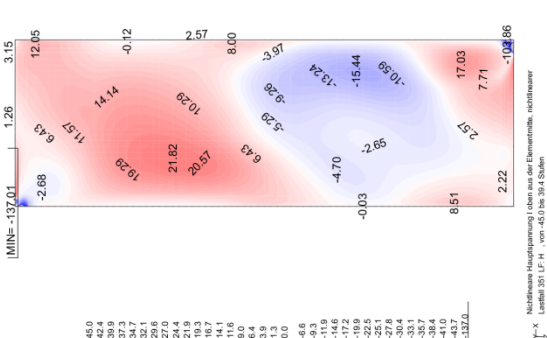
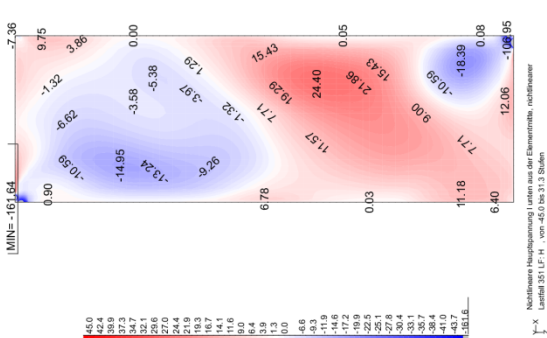
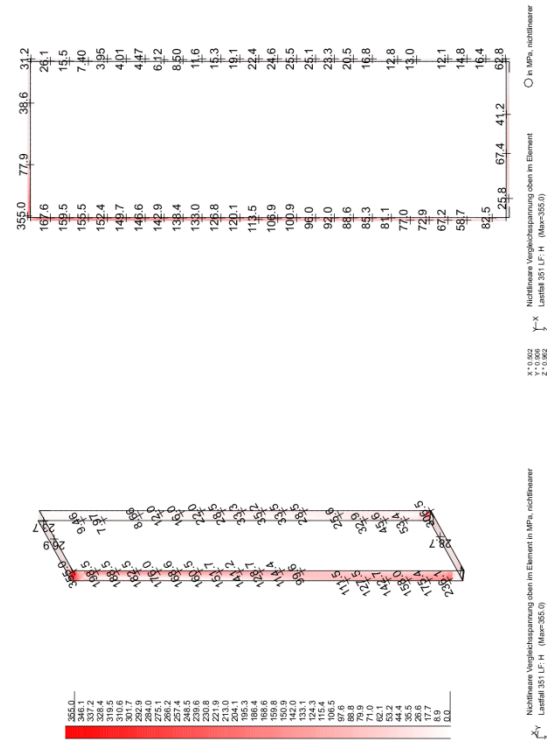
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



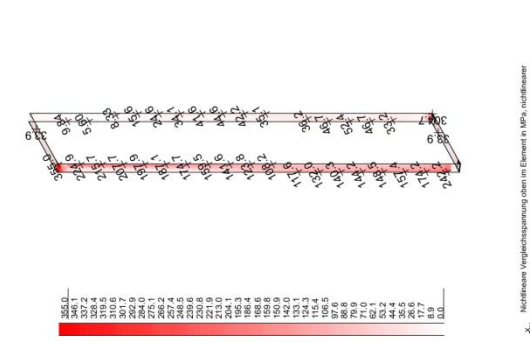
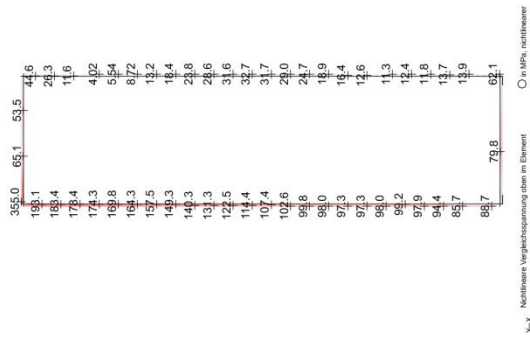
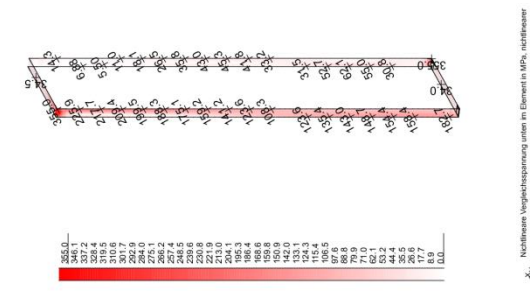
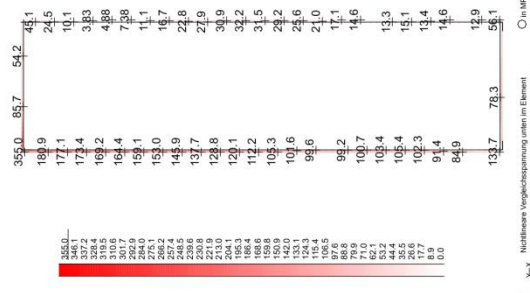
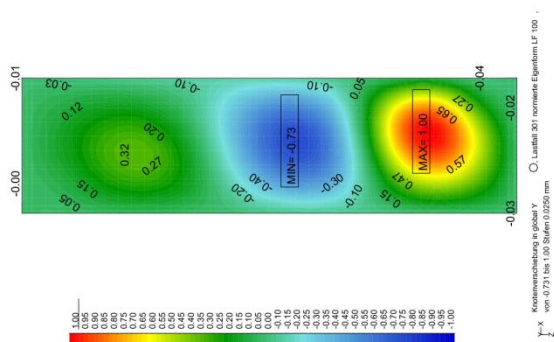
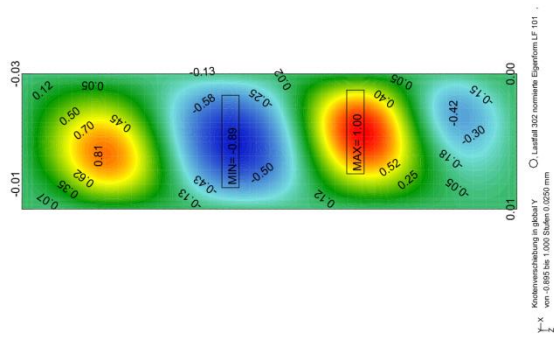
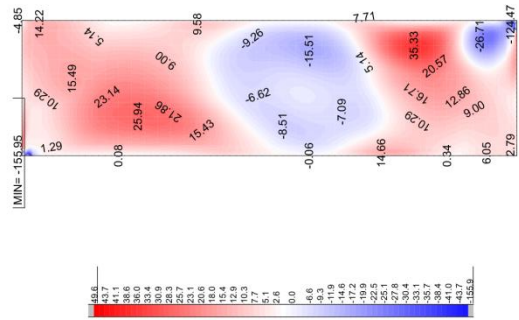
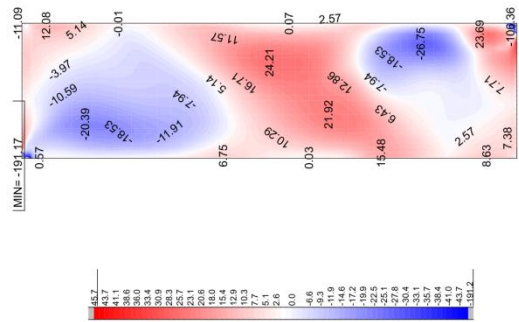
14.1.5.3 Scheibenhöhe 4500 mm:



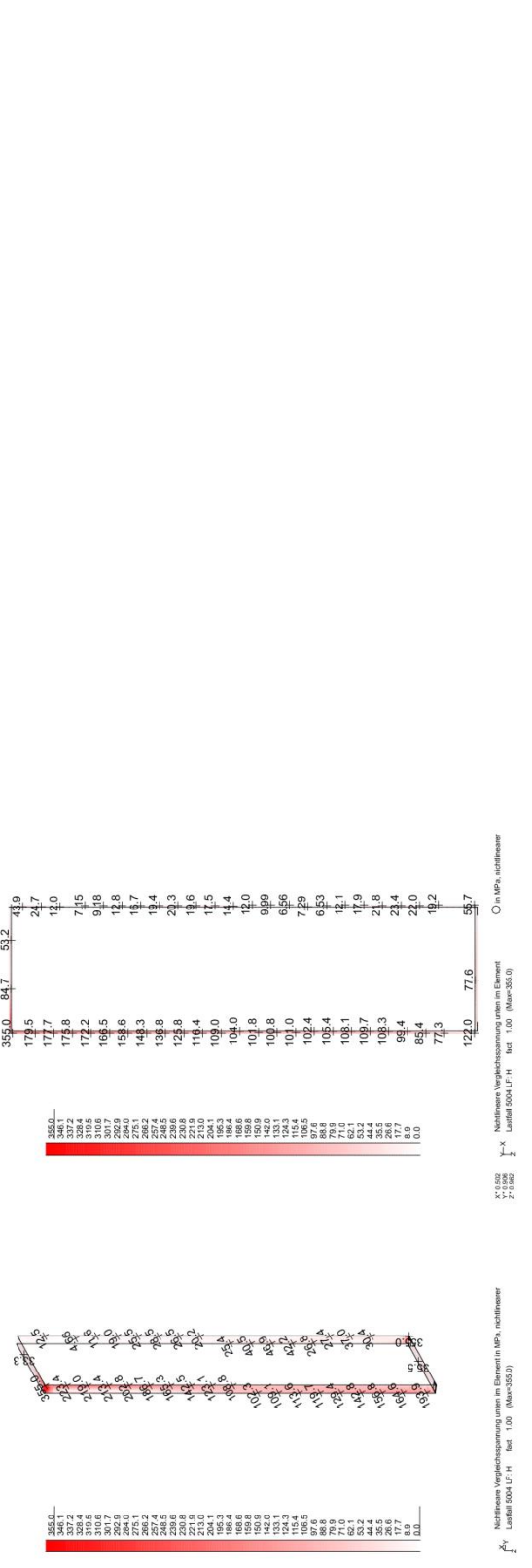
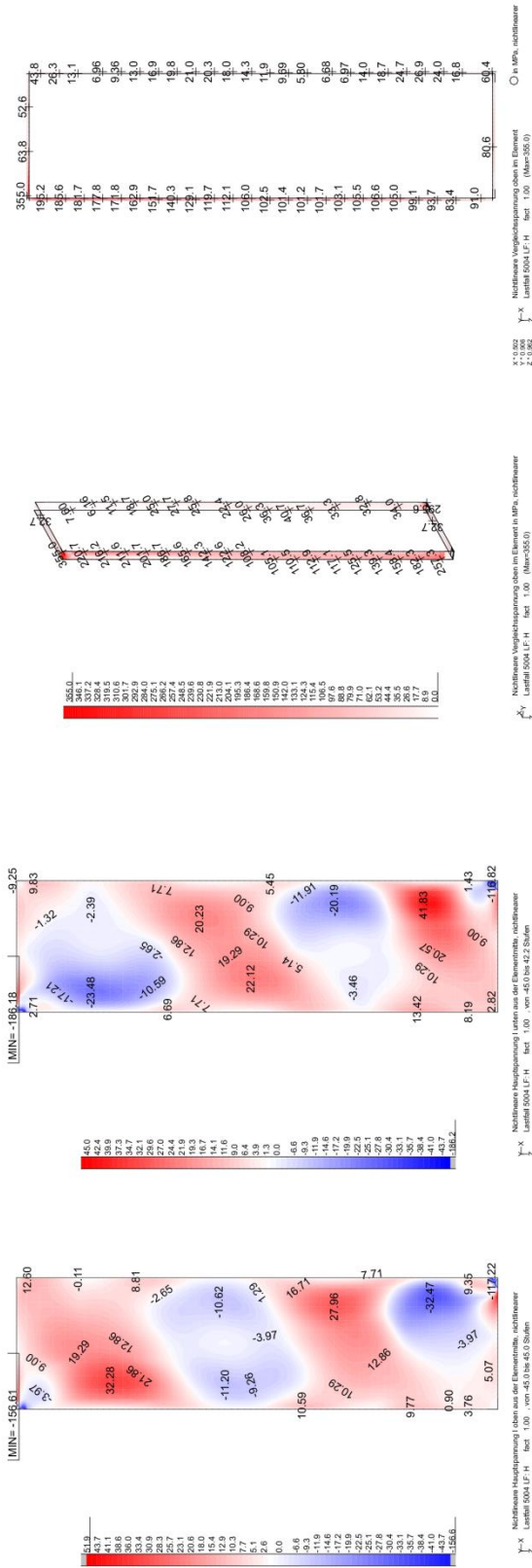
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.5.4 Scheibenhöhe 5500 mm:

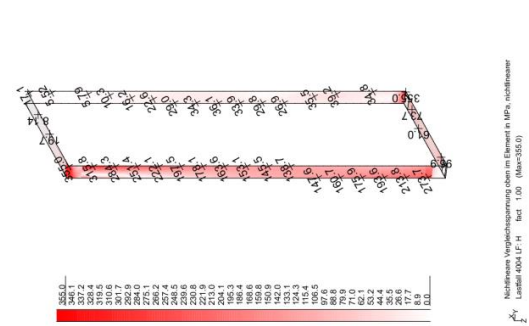
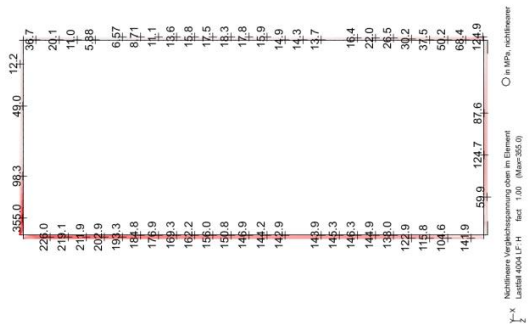
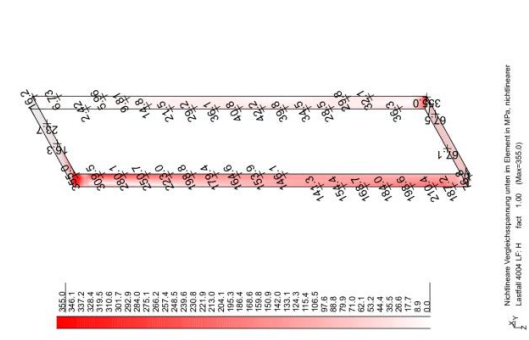
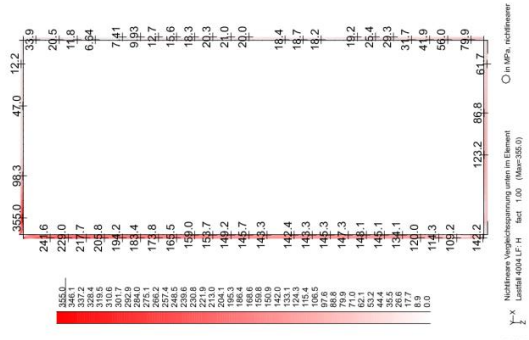
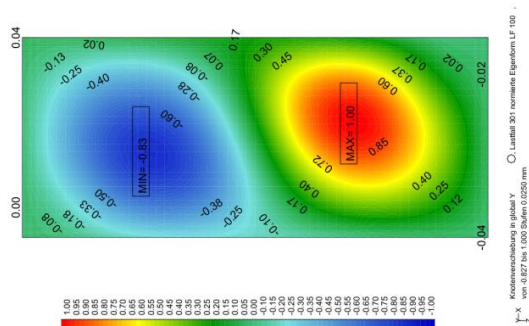
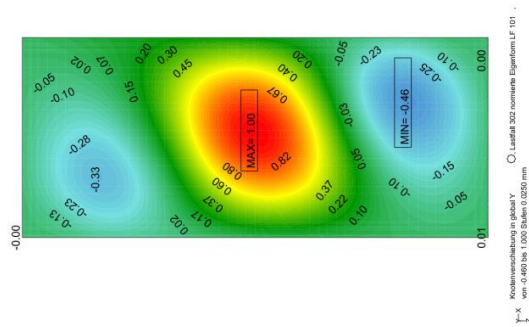
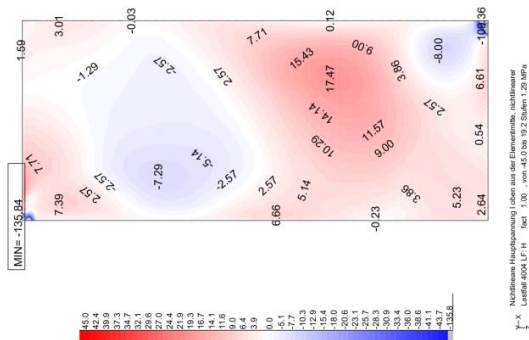
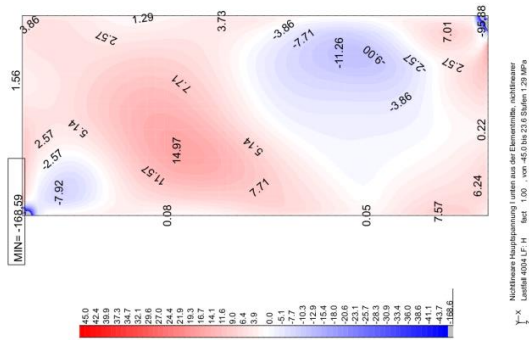


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

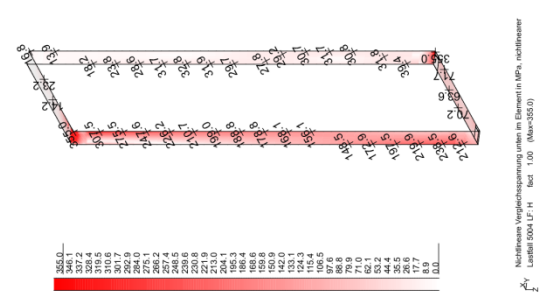
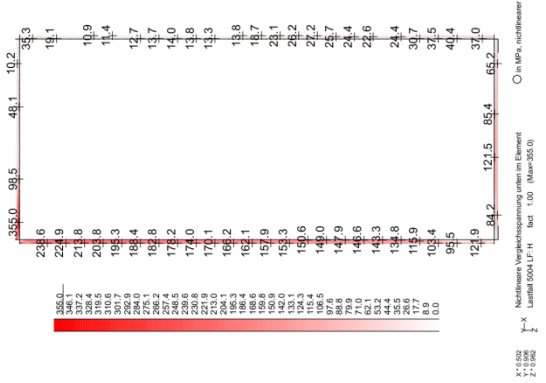
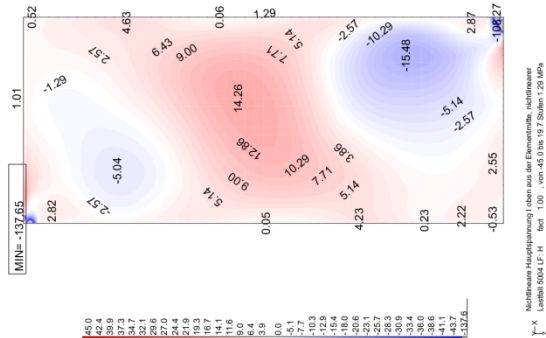
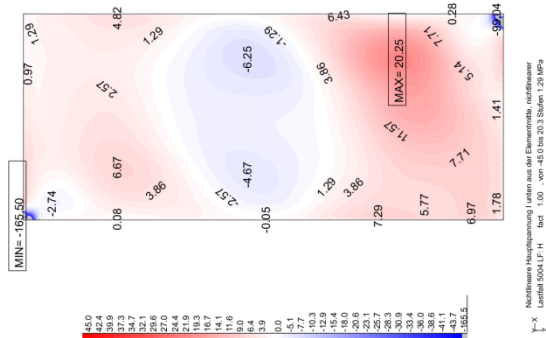
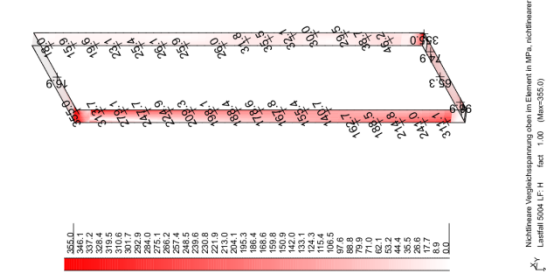
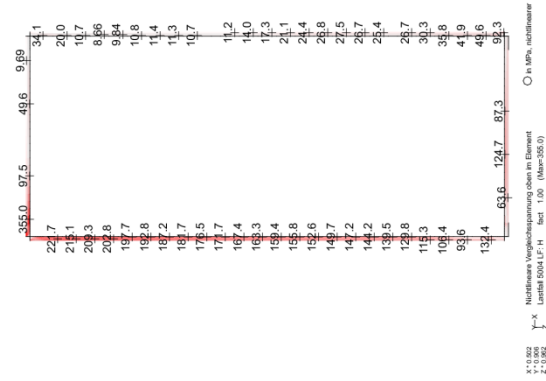


14.1.6 Rahmendicke

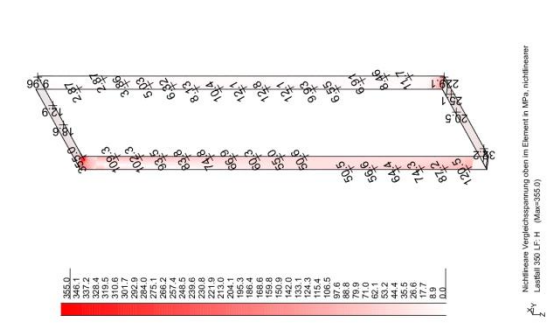
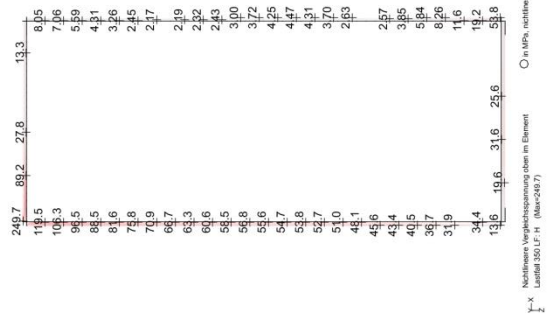
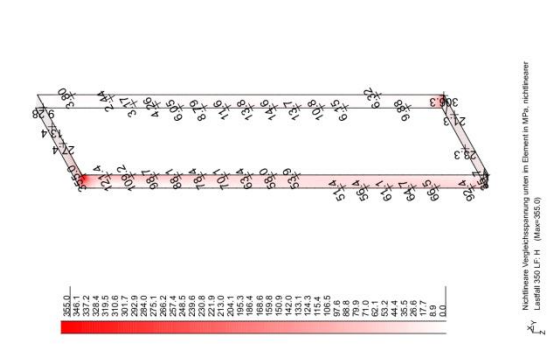
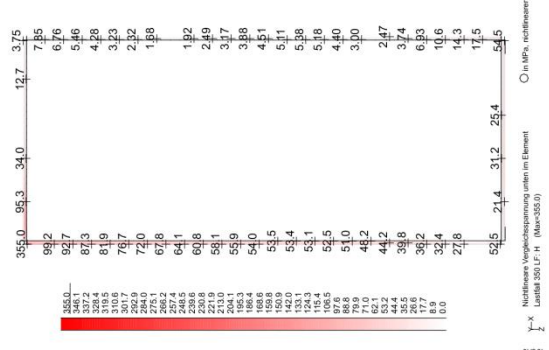
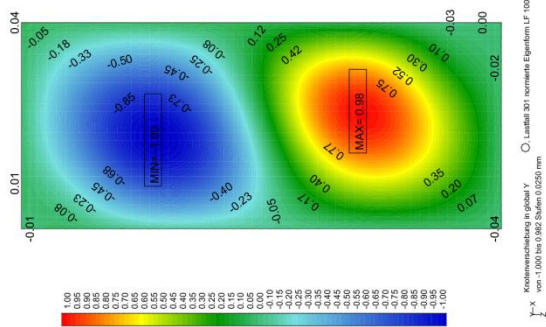
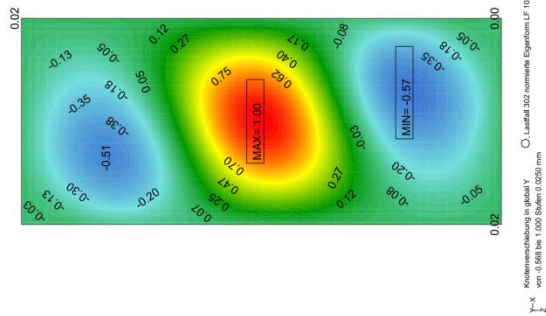
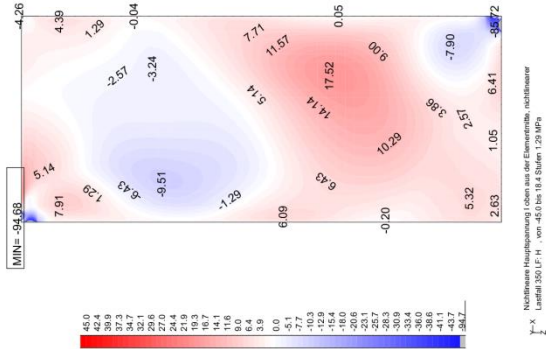
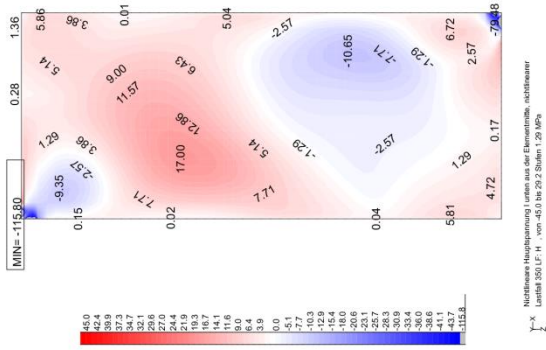
14.1.6.1 Rahmendicke 5 mm:



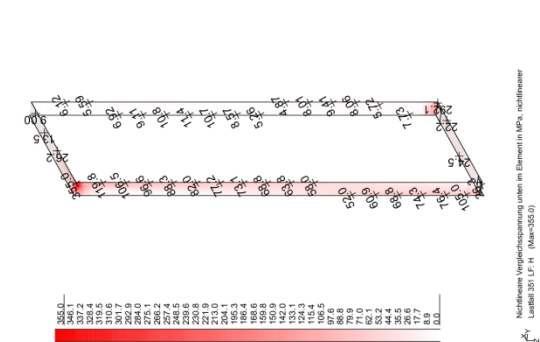
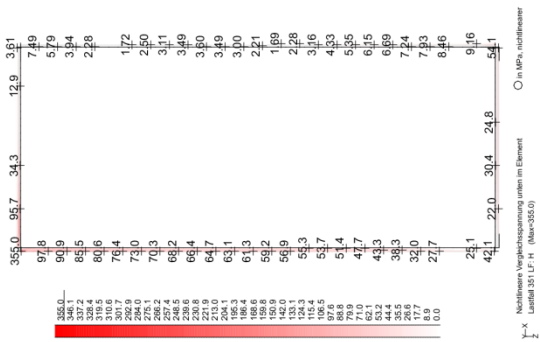
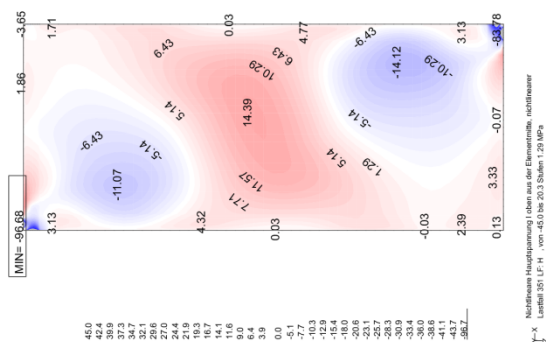
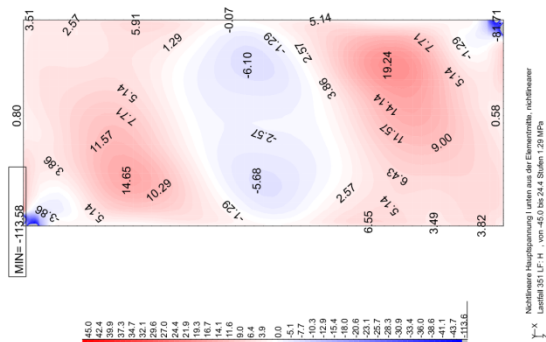
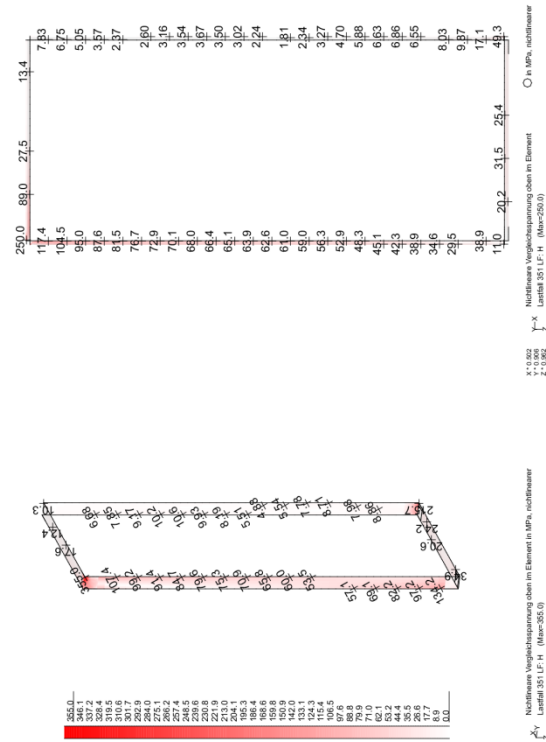
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



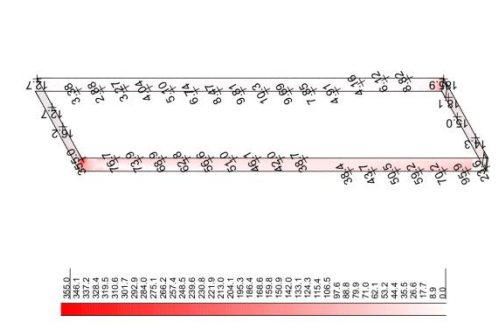
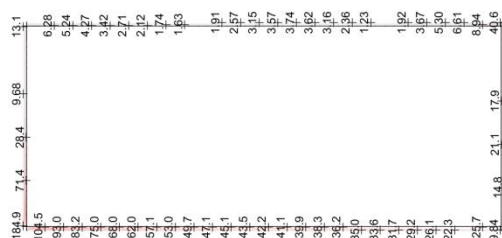
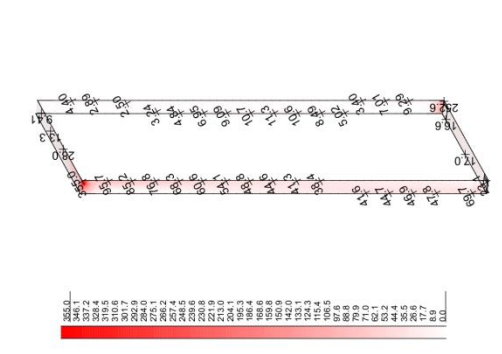
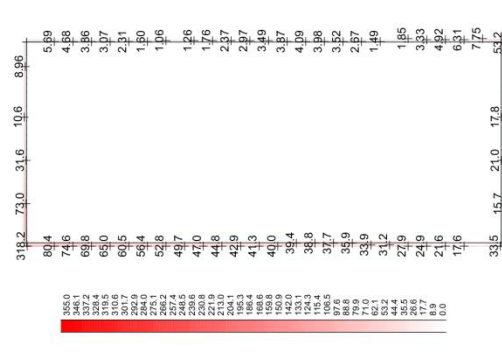
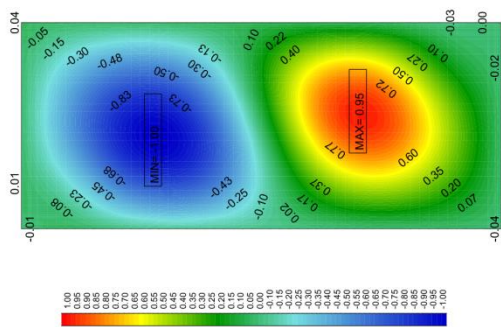
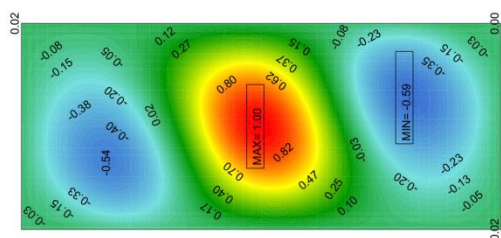
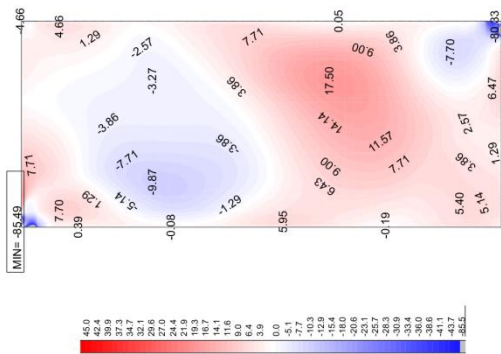
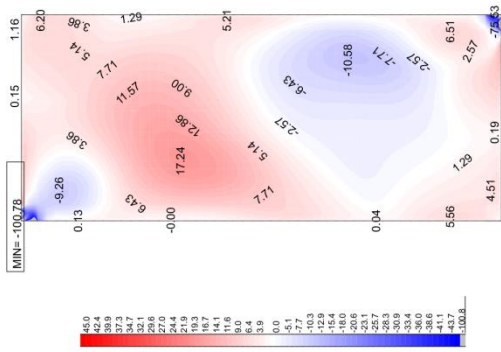
14.1.6.2 Rahmendicke 15 mm:



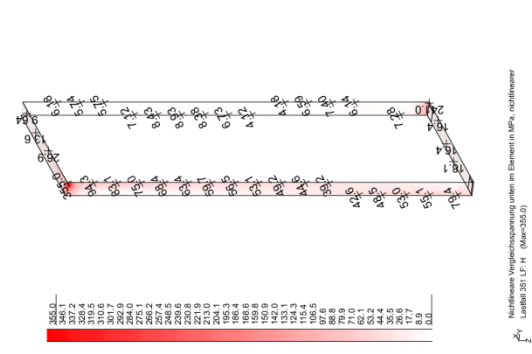
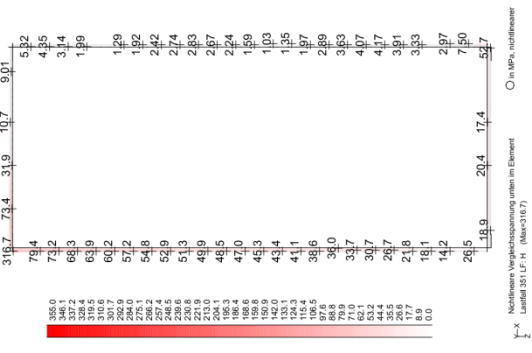
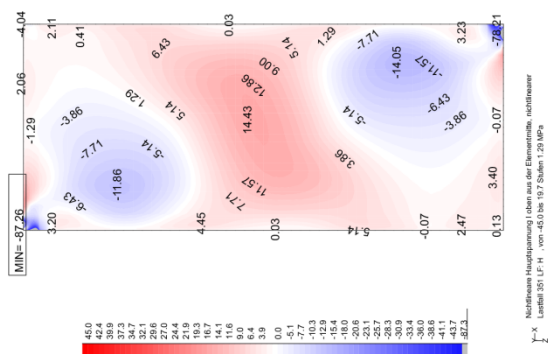
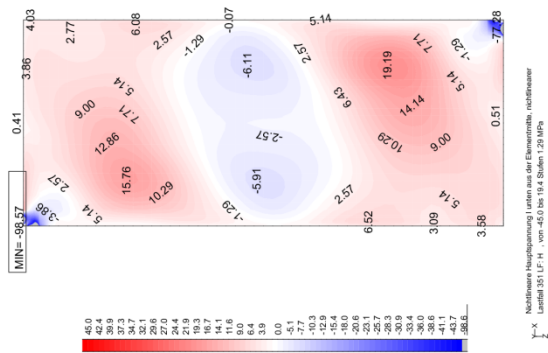
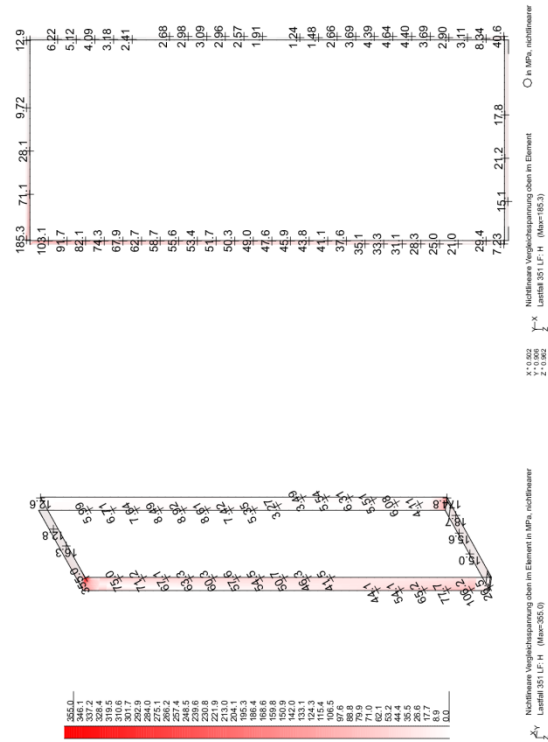
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



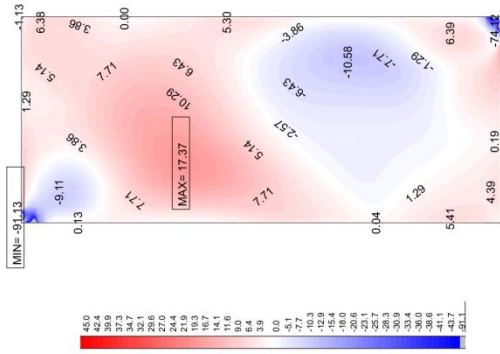
14.1.6.3 Rahmendicke 20 mm:



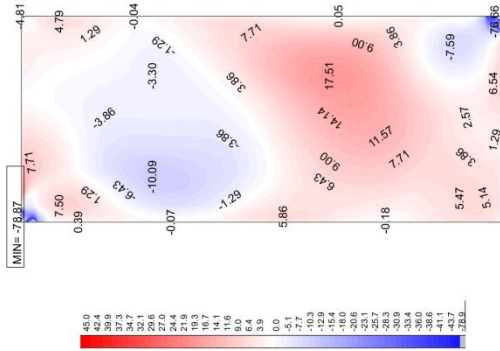
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



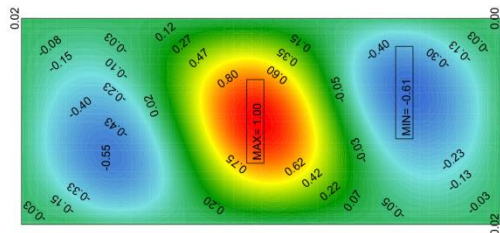
14.1.6.4 Rahmendicke 25 mm:



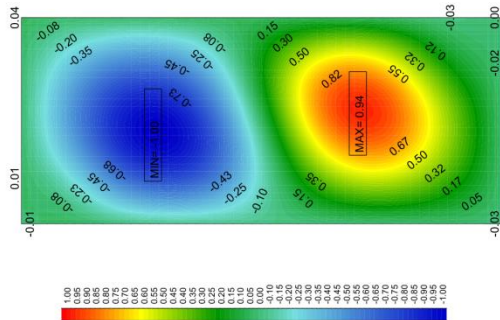
Nichtlineare Hauptspannung unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lauffal 302 LF-H von -45.0 bis 17.4 Stufen 129 MPa



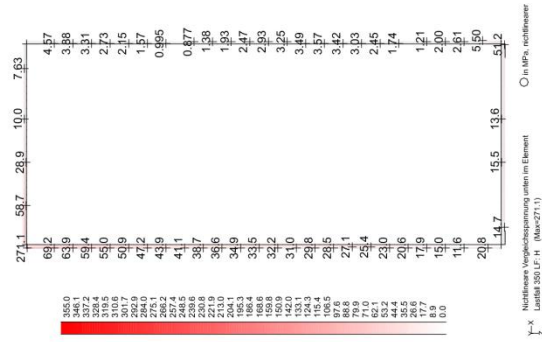
Nichtlineare Hauptspannung oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lauffal 302 LF-H von -45.0 bis 17.9 Stufen 129 MPa



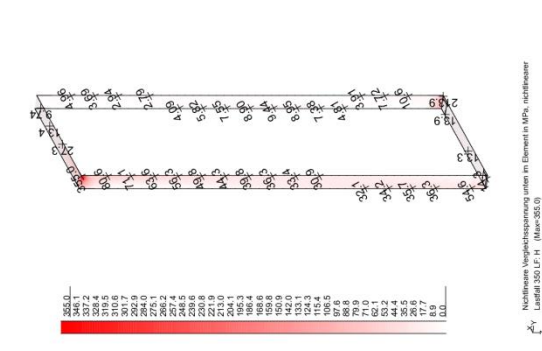
Koordinatenumgebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.020 mm
Lauffal 302 normierte Eigenform LF 01



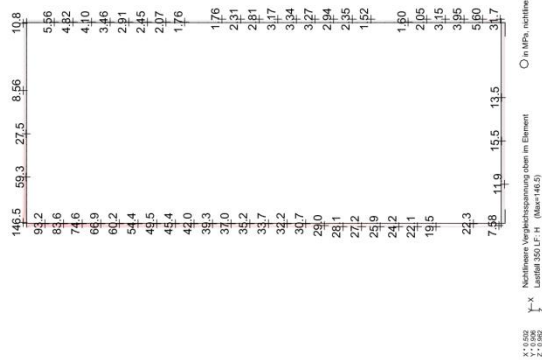
Koordinatenumgebung in global Y
von -1.000 bis 0.341 Stufen 0.250 mm
Lauffal 301 normierte Eigenform LF 100



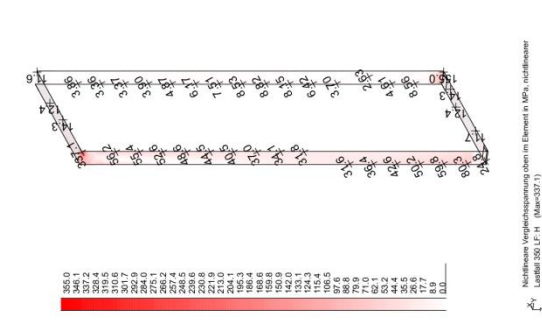
Nichtlineare Vergleichsspannung unten in Element
Lauffal 302 LF-H (Max=271.1)
X: 1.020
Z: 1.982



Nichtlineare Vergleichsspannung oben in Element
Lauffal 302 LF-H (Max=305.0)
X: 1.020
Z: 1.982

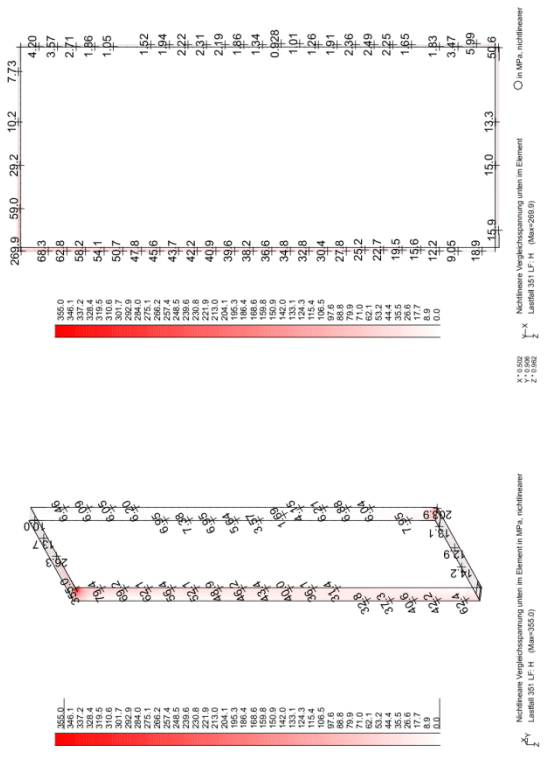
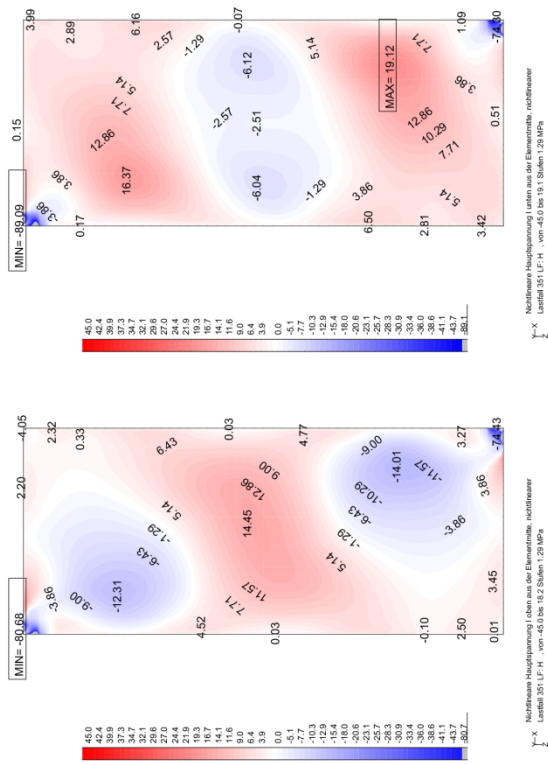
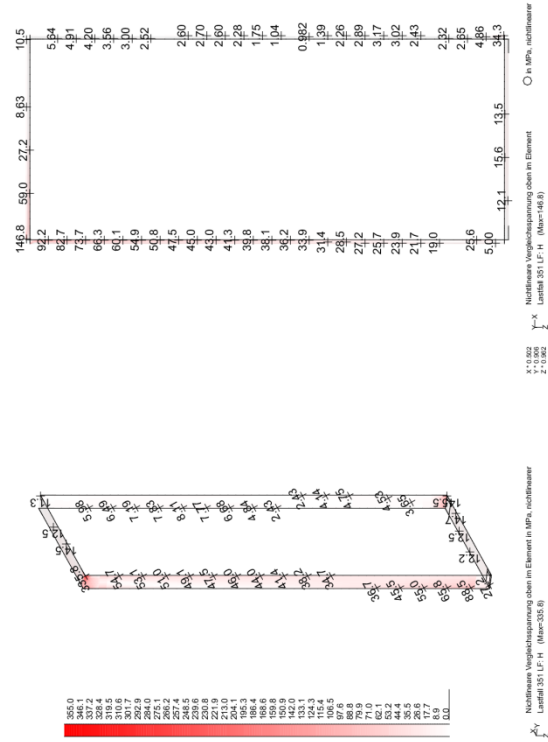


Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element
Lauffal 302 LF-H (Max=146.5)
X: 1.020
Z: 1.982



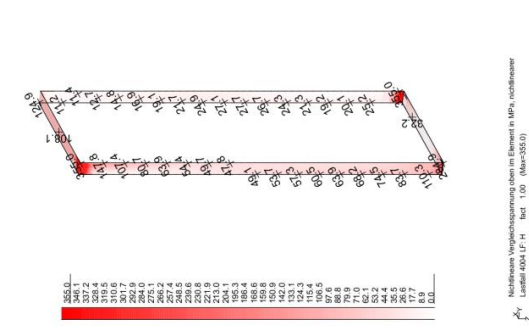
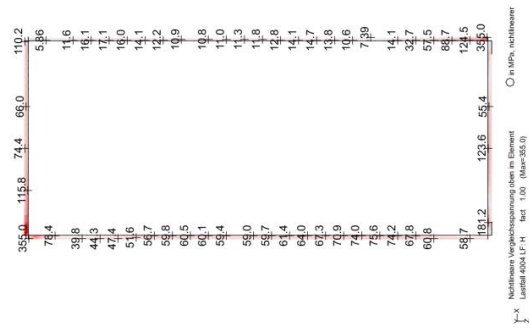
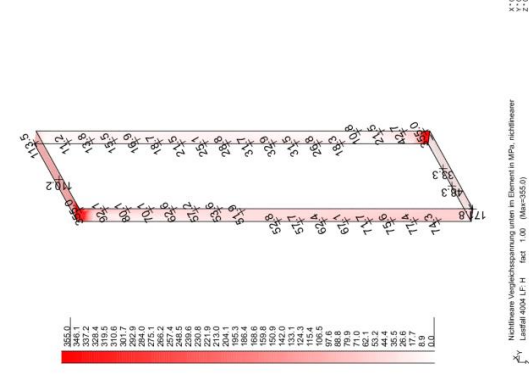
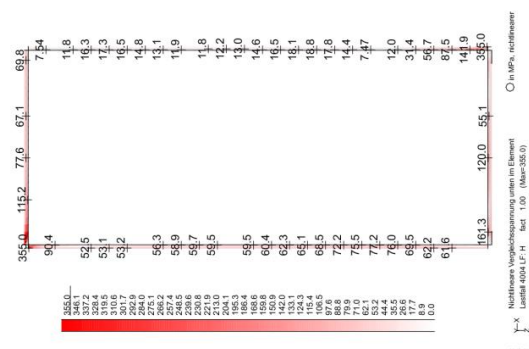
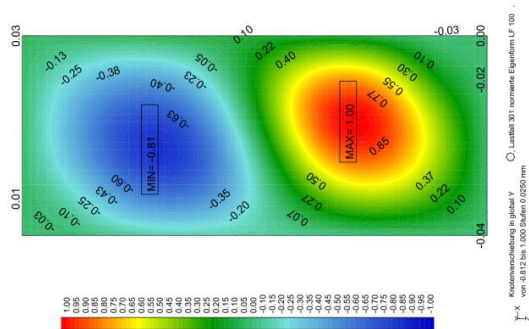
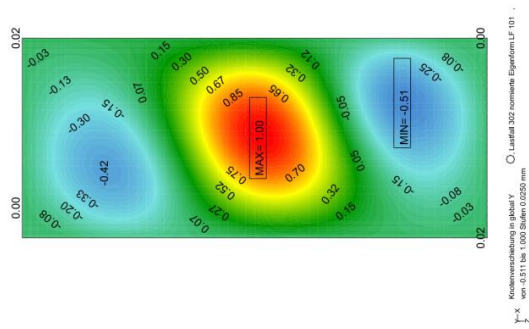
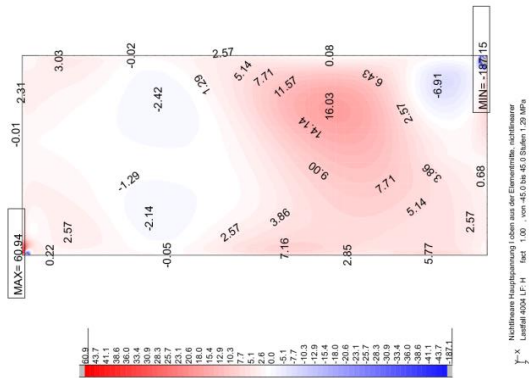
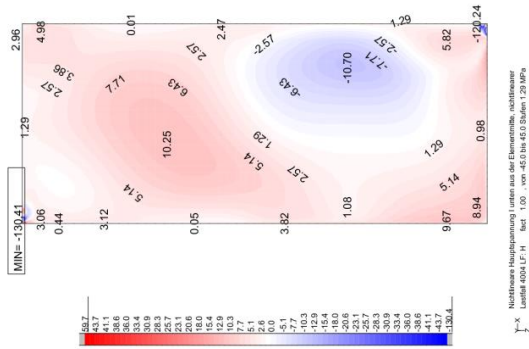
Nichtlineare Vergleichsspannung unten in Element
Lauffal 302 LF-H (Max=337.1)
X: 1.020
Z: 1.982

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

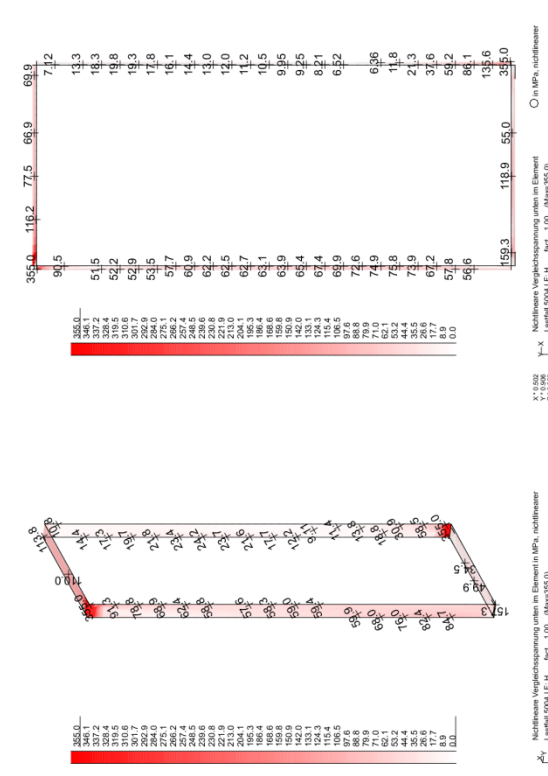
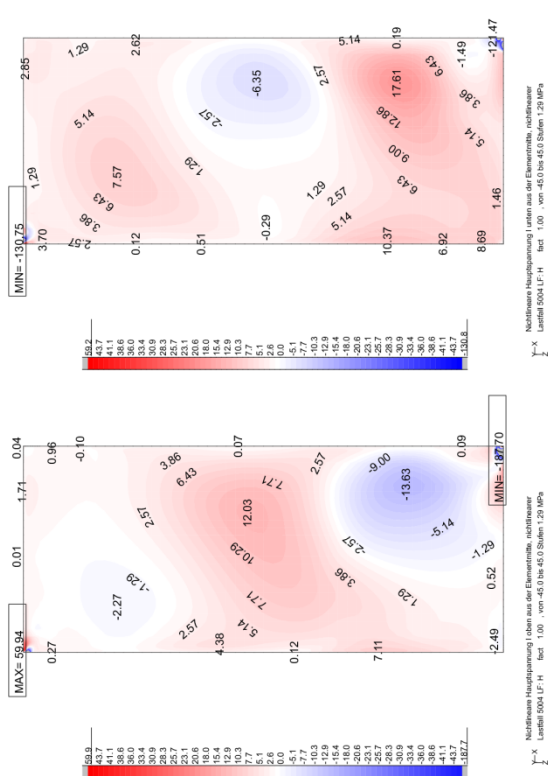
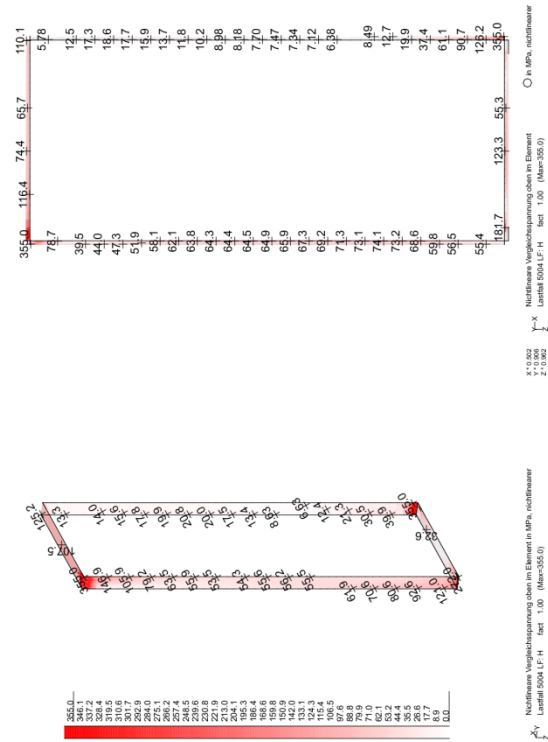


14.1.7 Rahmeneckprofildicke

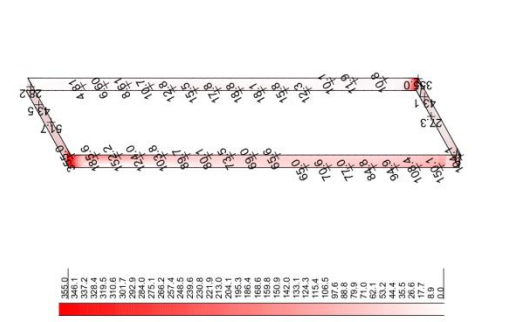
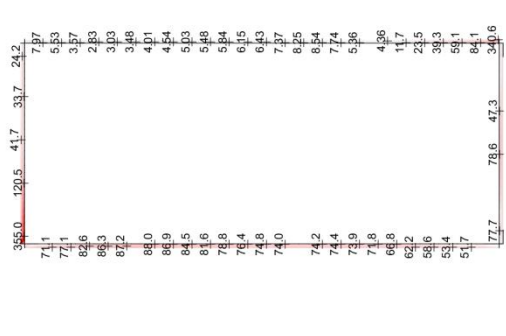
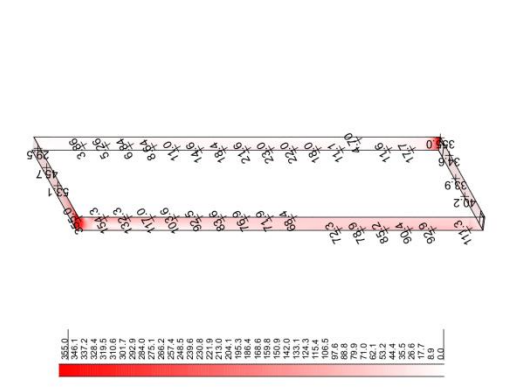
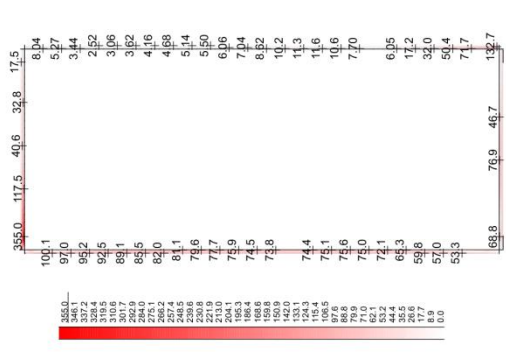
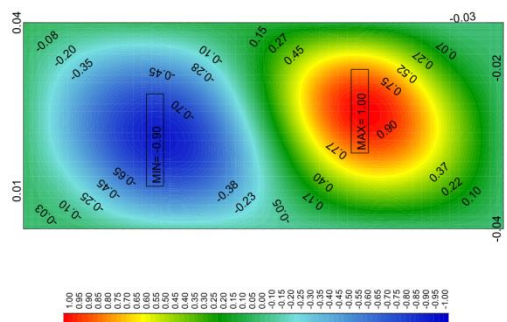
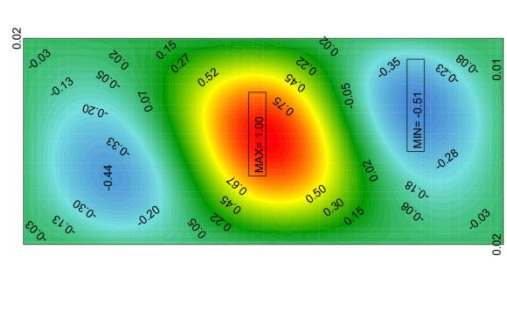
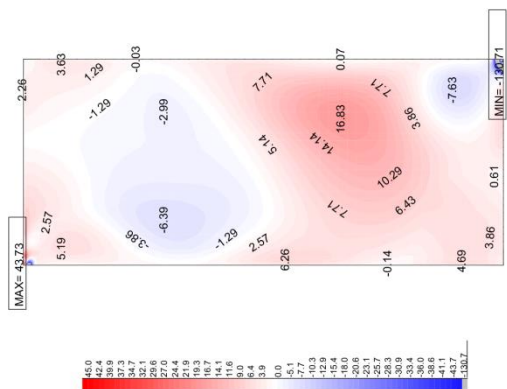
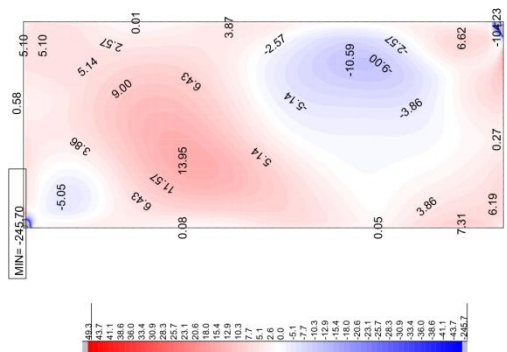
14.1.7.1 Rahmeneckprofildicke 0 mm:



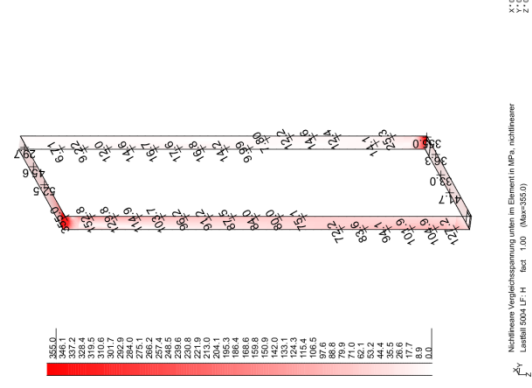
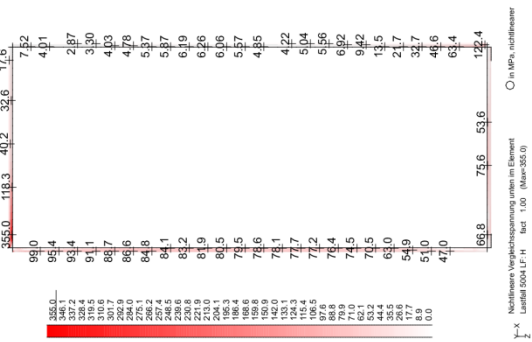
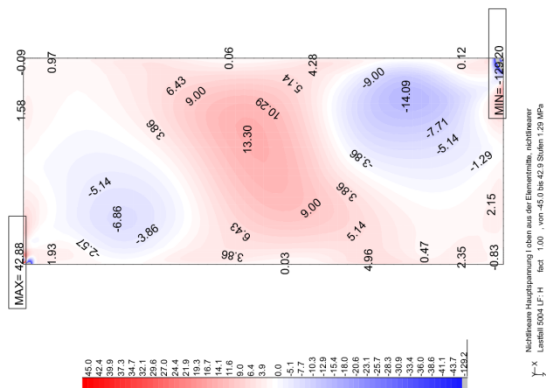
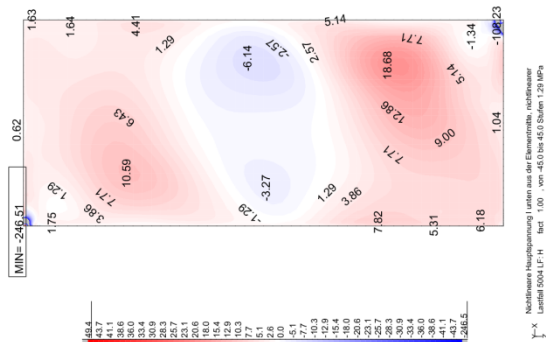
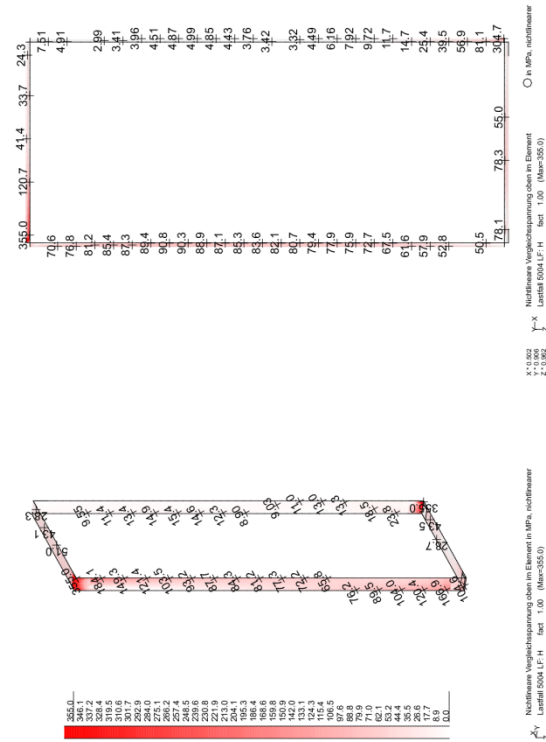
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



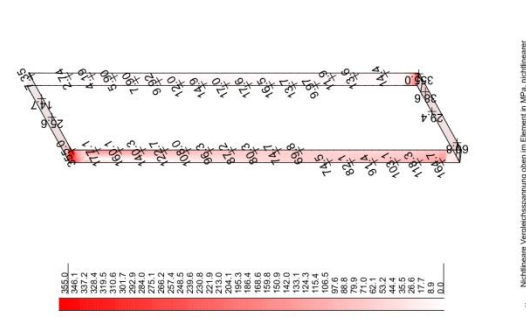
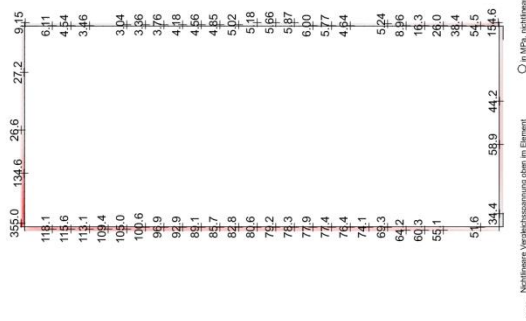
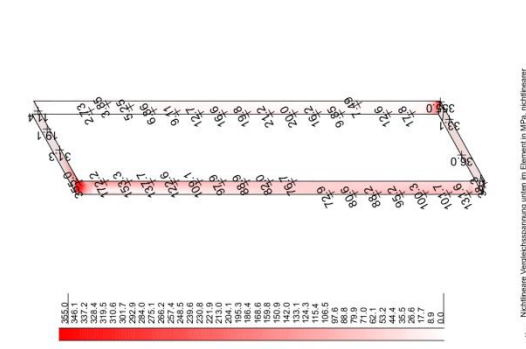
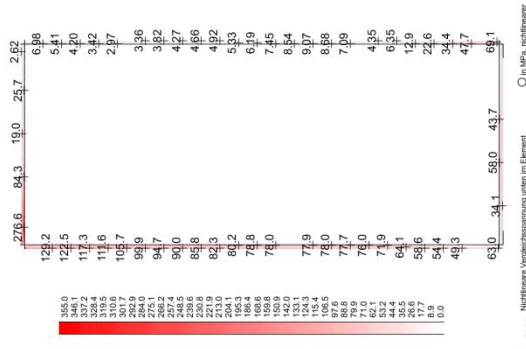
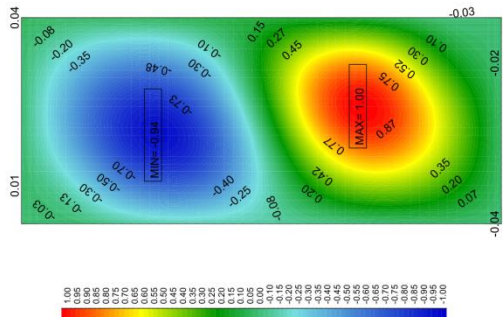
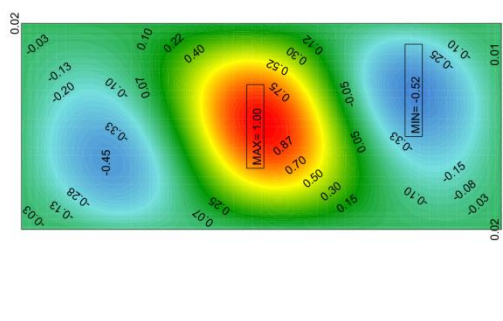
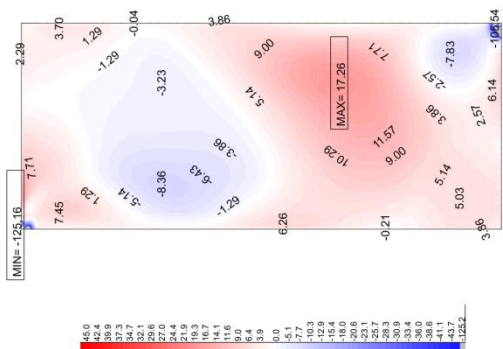
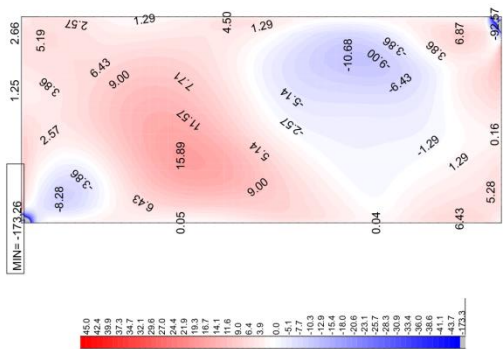
14.1.7.2 Rahmeneckprofildicke 5 mm:



Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.7.3 Rahmeneckprofildicke 10 mm:



Y-X
Lastfall 302 LF-H, von -45.0 bis 26.6 Stufen 1.29 MPa

Y-X
Lastfall 302 LF-H, von -45.0 bis 17.3 Stufen 1.29 MPa

Y-X
Knotenverchiebung in global Y, von -0.519 bis 1.000 Stufen 0.020 mm

Y-X
Knotenverchiebung in global Y, von 0.958 bis 1.000 Stufen 0.020 mm

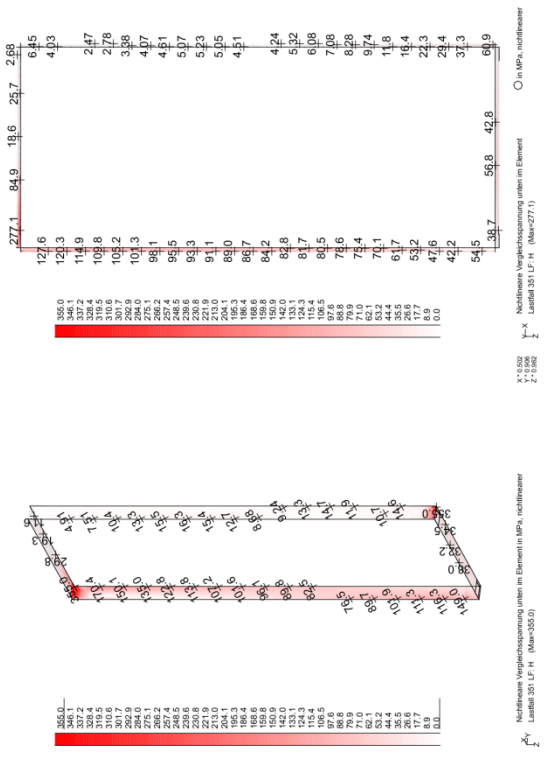
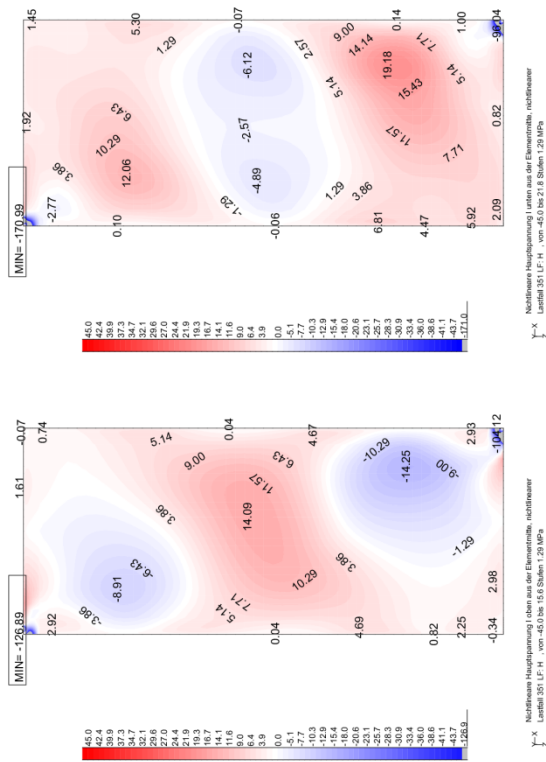
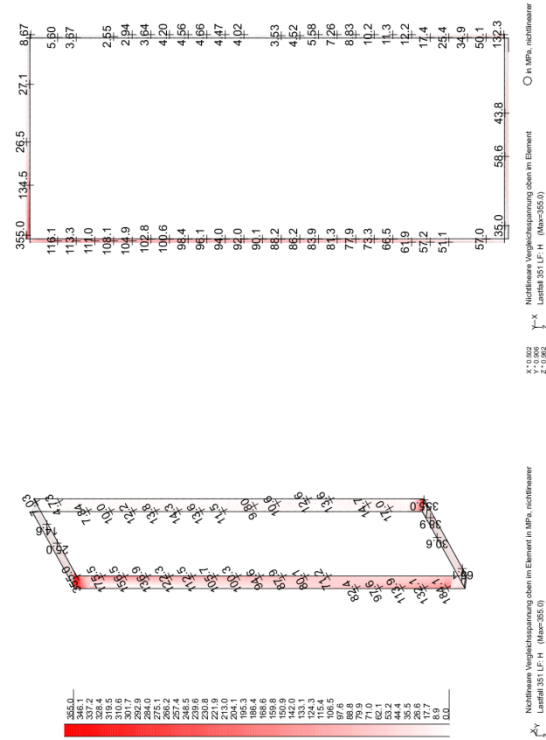
Y-X
Lastfall 302 LF-H, von -45.0 bis 26.6 Stufen 1.29 MPa

Y-X
Lastfall 302 LF-H, von -45.0 bis 17.3 Stufen 1.29 MPa

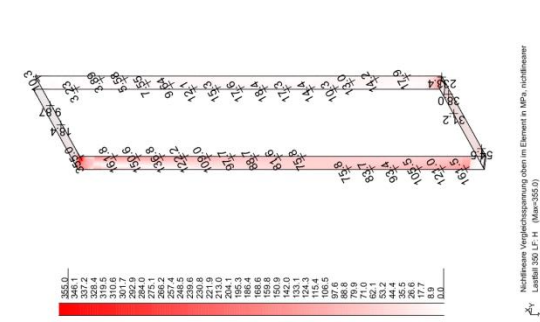
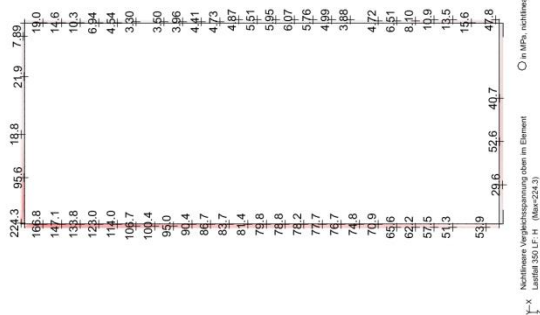
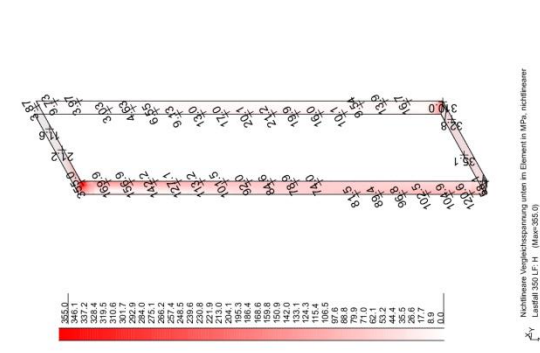
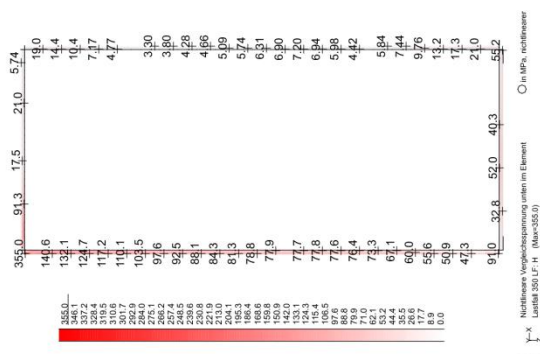
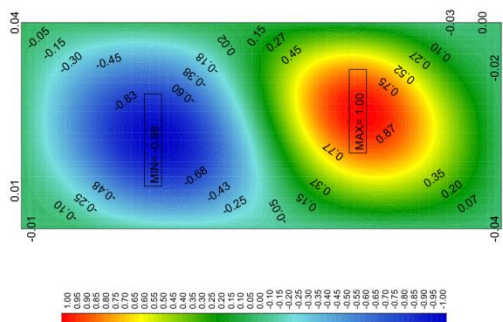
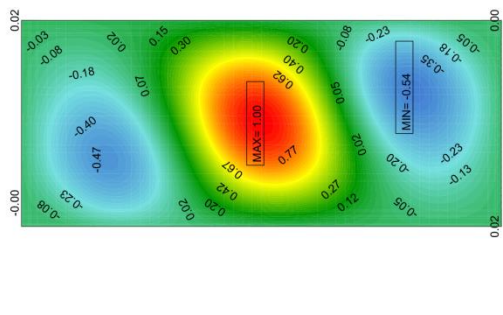
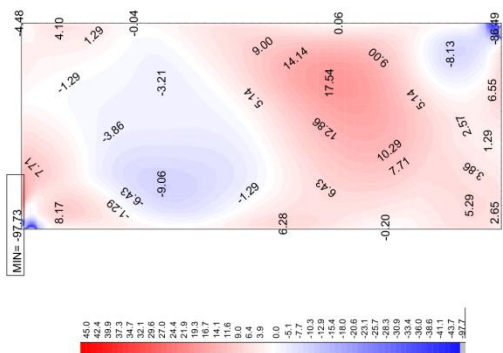
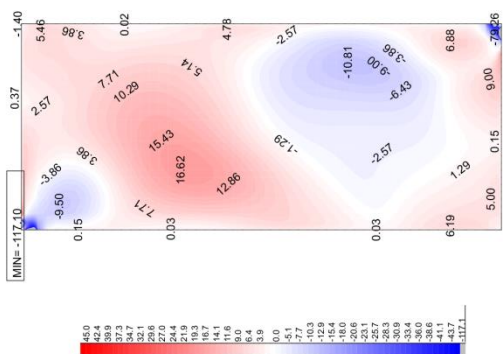
Y-X
Knotenverchiebung in global Y, von -0.519 bis 1.000 Stufen 0.020 mm

Y-X
Knotenverchiebung in global Y, von 0.958 bis 1.000 Stufen 0.020 mm

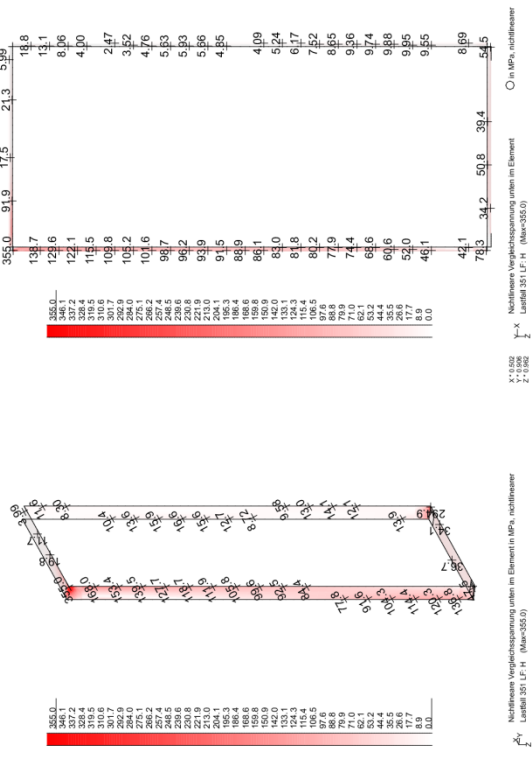
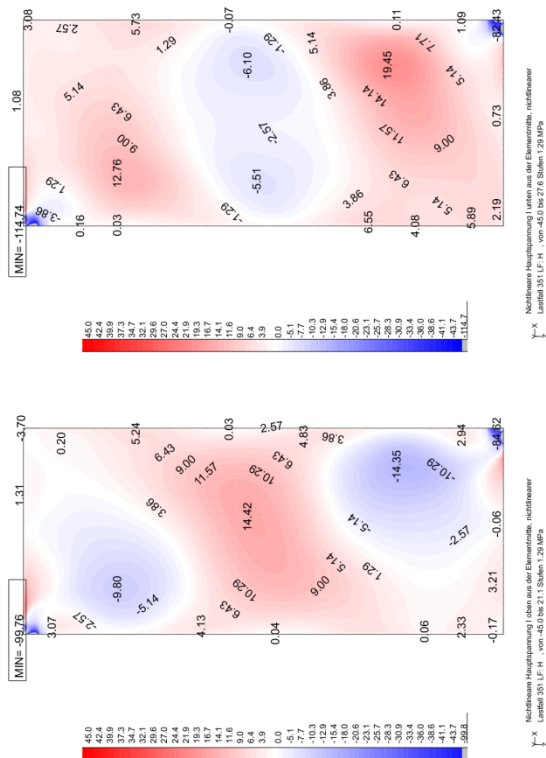
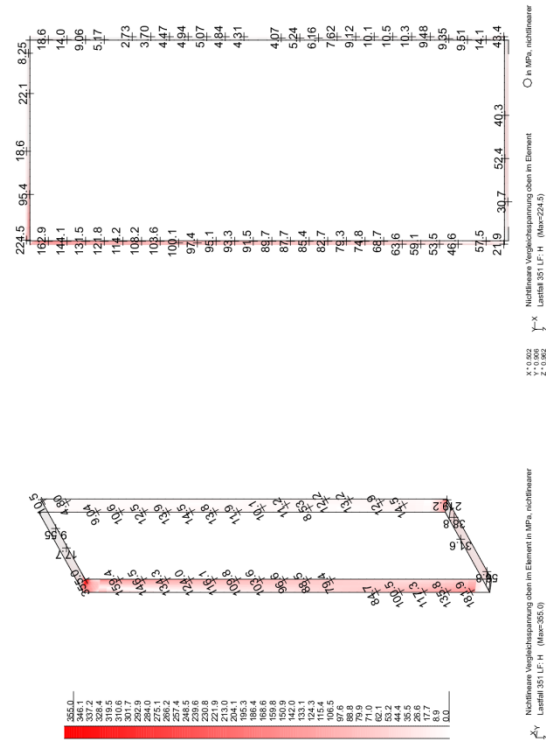
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.7.4 Rahmeneckprofildicke 20 mm:

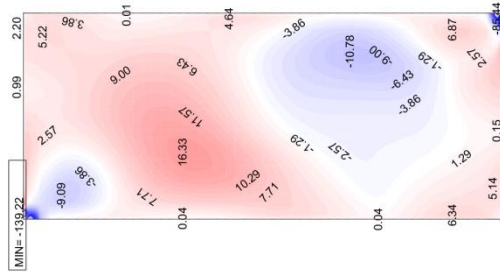


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

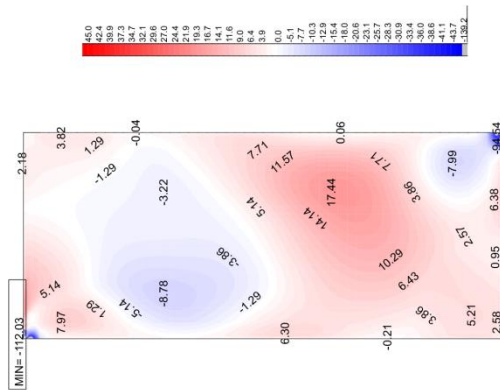


14.1.8 Rahmenstegdick

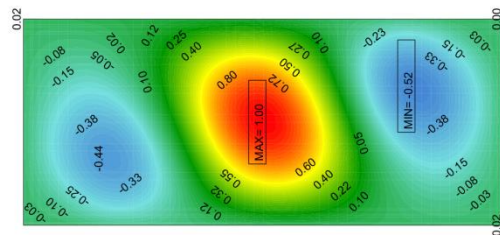
14.1.8.1 Rahmenstegdick 5 mm :



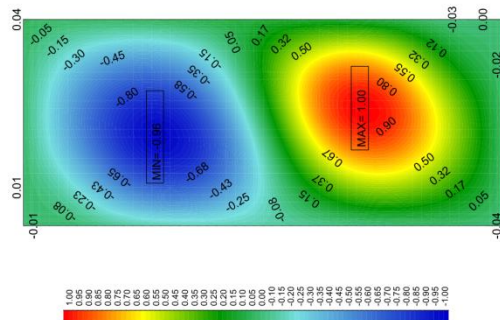
Nächste Hauptspannung Unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 350 L-F-H von -45.0 bis 31.3 Stufen 1.25 MPa



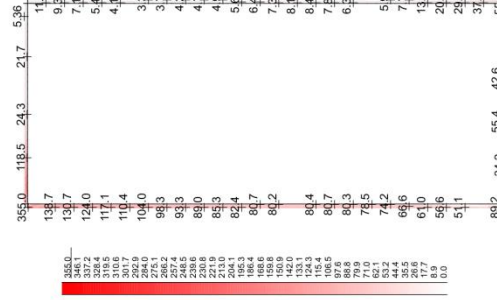
Nächste Hauptspannung Oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 350 L-F-H von -45.0 bis 18.4 Stufen 1.25 MPa



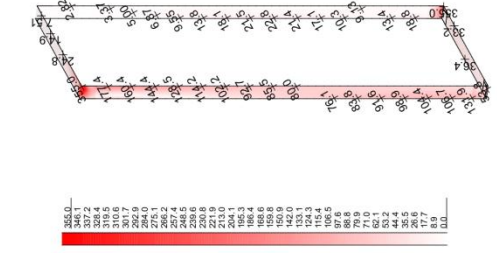
Knotenverschiebung in global Y
Eigenform L-F 101 von -0.518 bis 1.003 Stufen 0.0250 mm



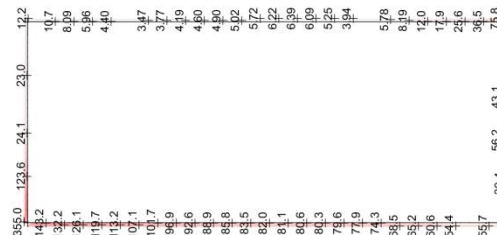
Knotenverschiebung in global Y
Eigenform L-F 100 von 0.962 bis 1.003 Stufen 0.0250 mm



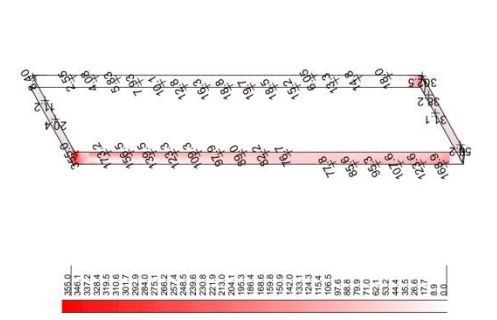
Nächste Vergleichsspannung unten im Element
Lastfall 350 L-F-H (Max=355.0)



Nächste Vergleichsspannung unten im Element
Lastfall 350 L-F-H (Max=355.0)

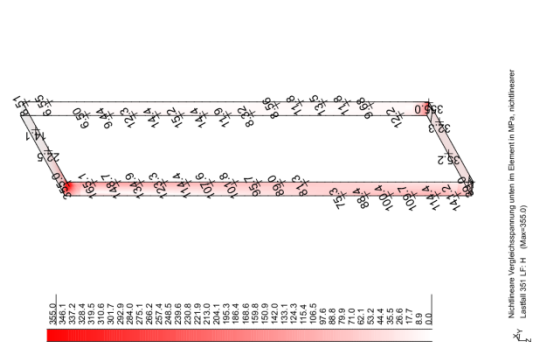
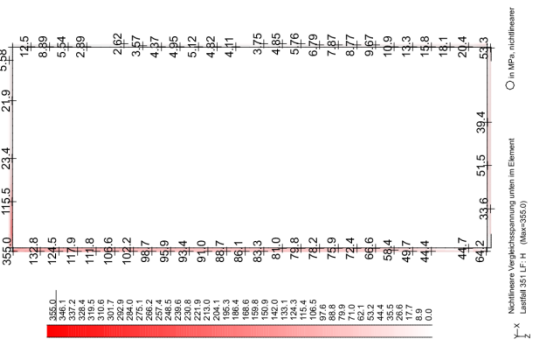
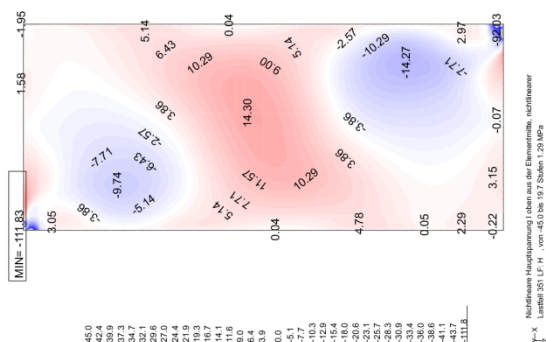
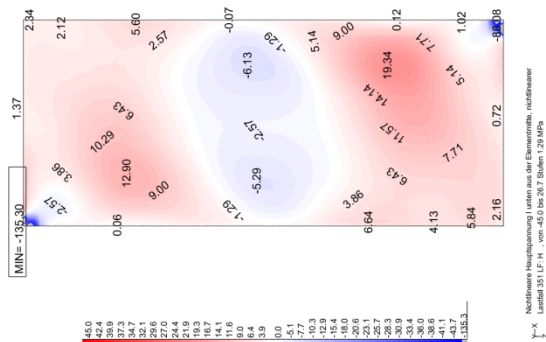
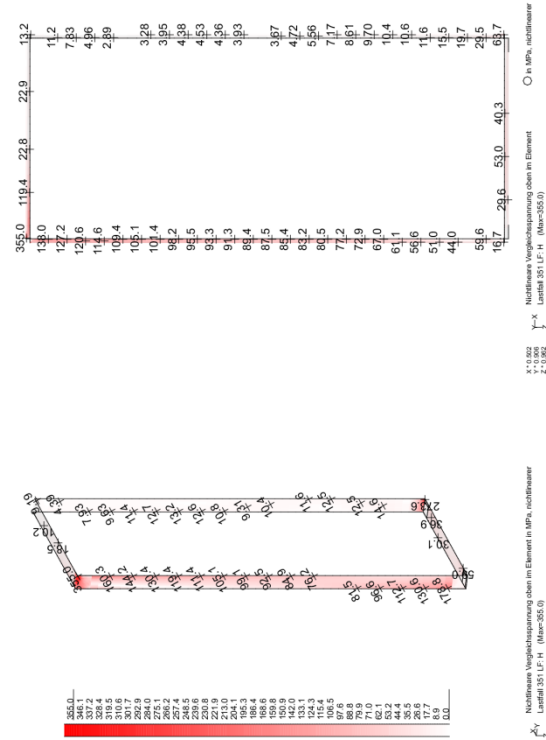


Nächste Vergleichsspannung oben im Element
Lastfall 350 L-F-H (Max=355.0)

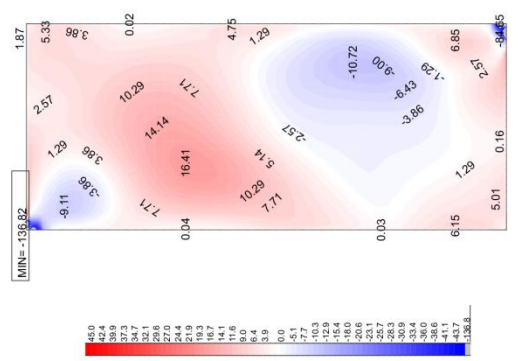


Nächste Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 350 L-F-H (Max=355.0)

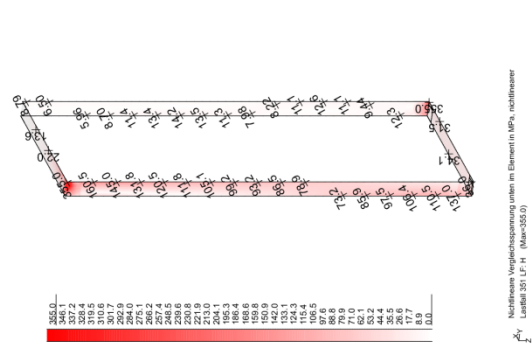
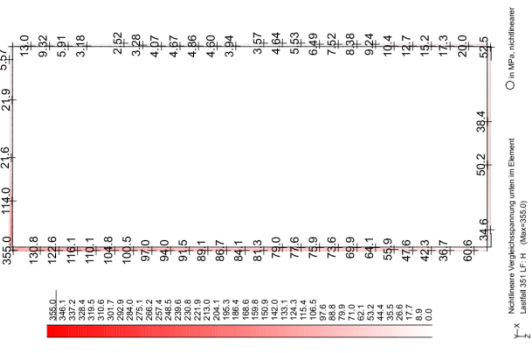
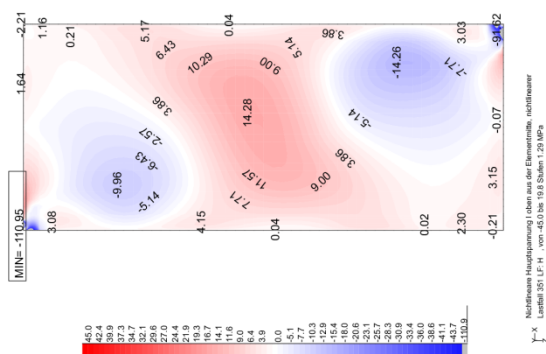
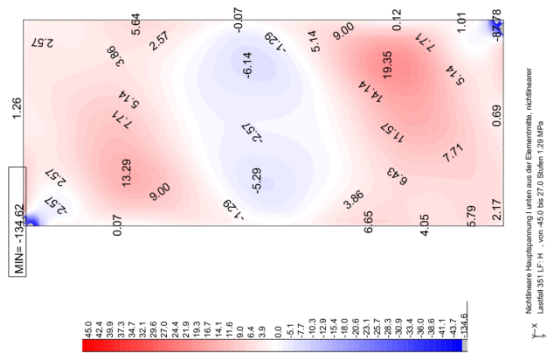
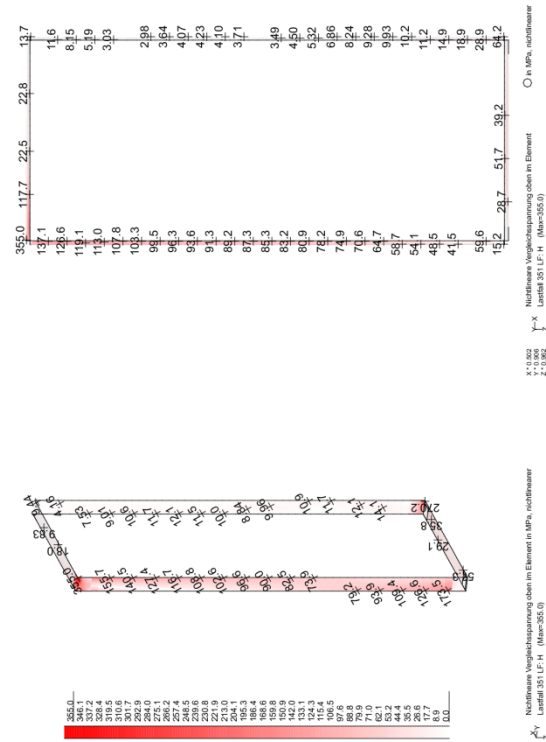
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



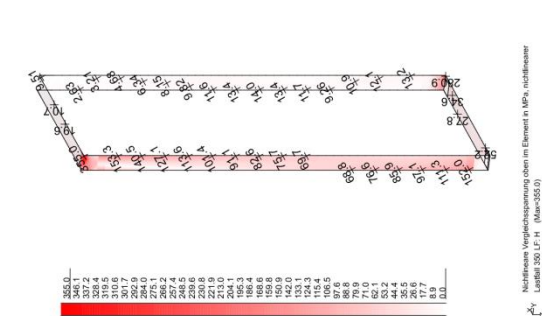
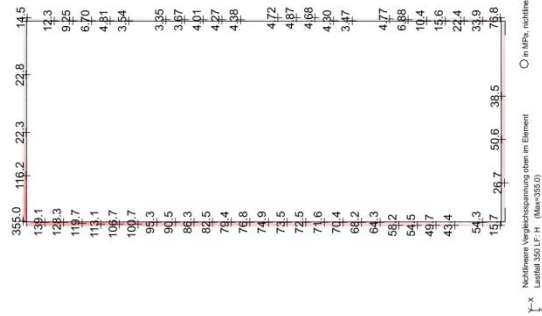
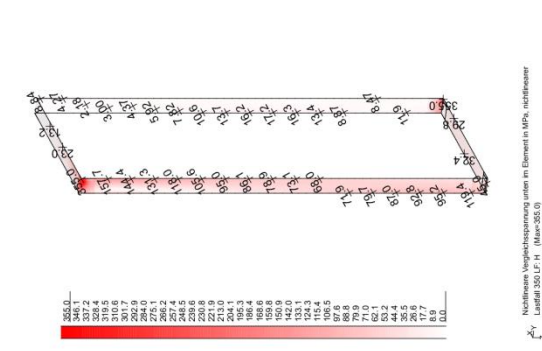
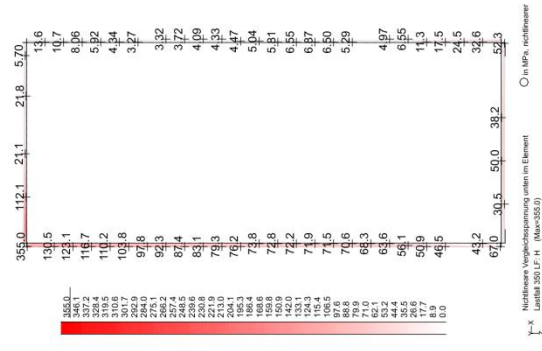
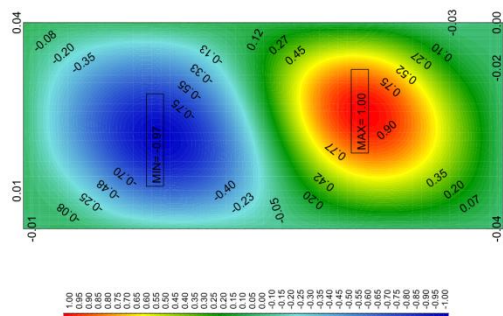
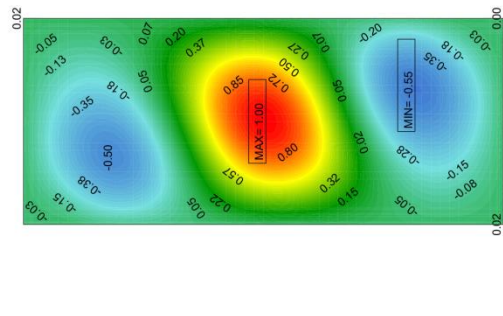
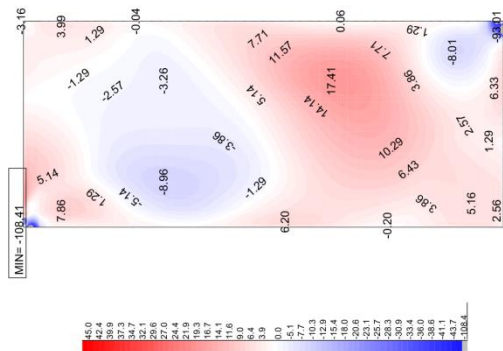
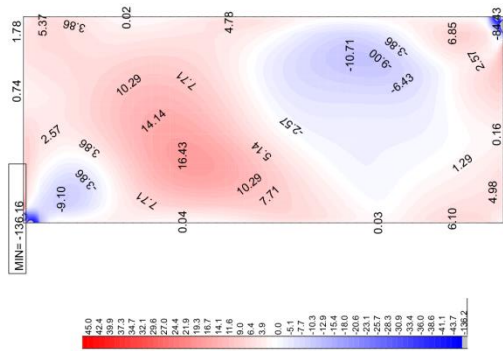
14.1.8.3 Rahmenstegdicke 20 mm :



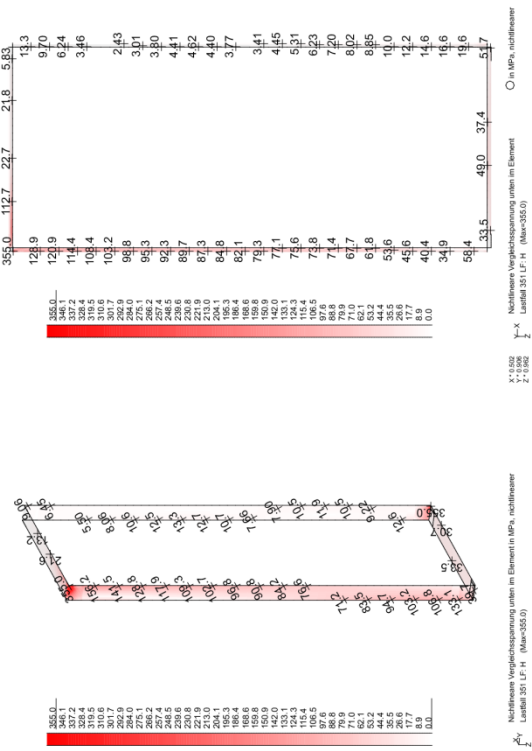
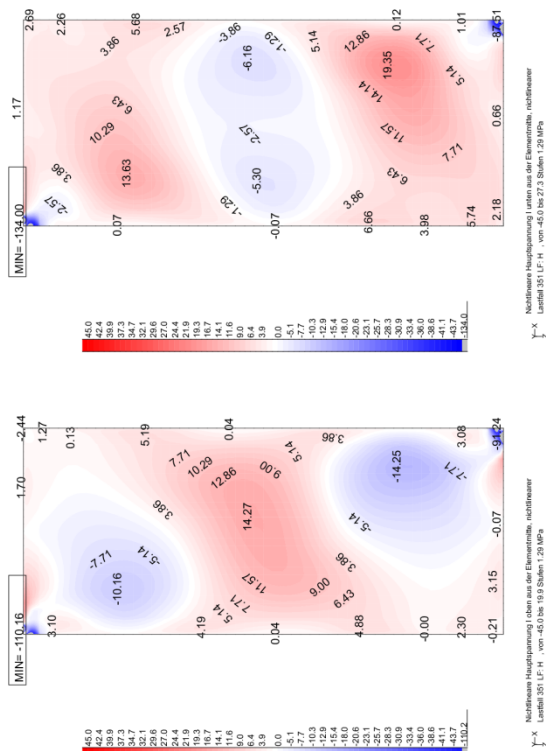
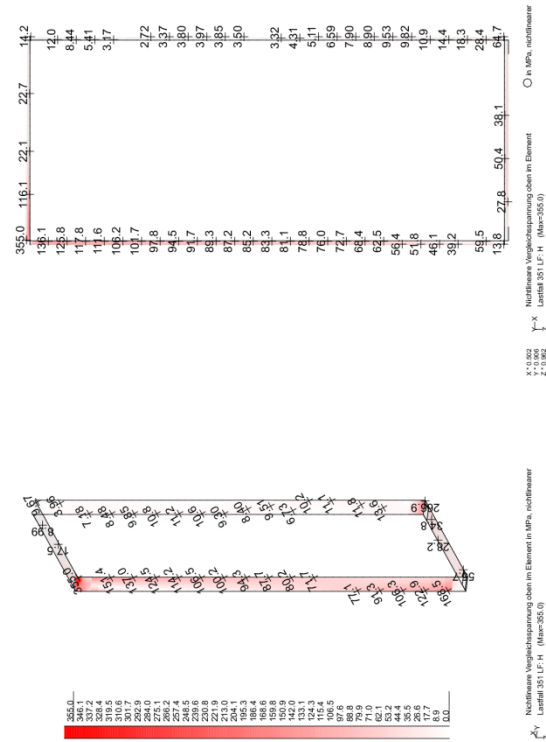
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.8.4 Rahmenstegdicke 25 mm :

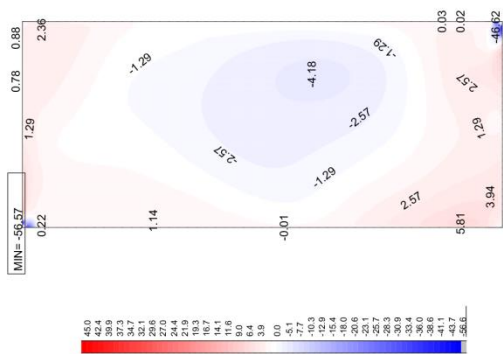


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

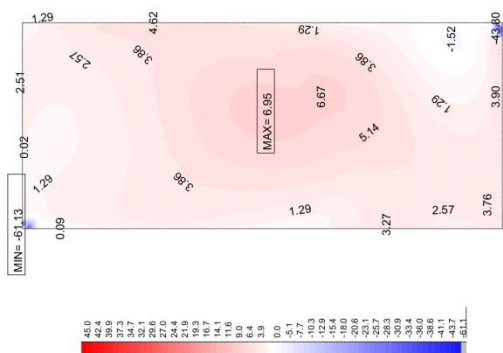


14.1.9 Rahmentiefe

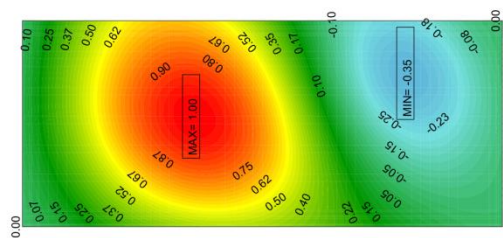
14.1.9.1 Rahmentiefe 0 mm:



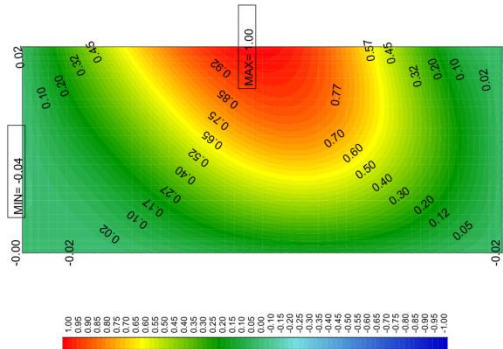
Knotenverschiebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 301: normierte Eigenform LF 100



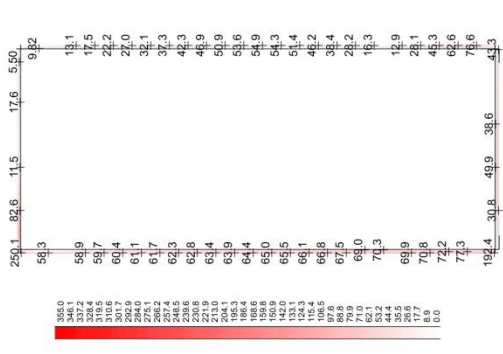
Knotenverschiebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 302: normierte Eigenform LF 101



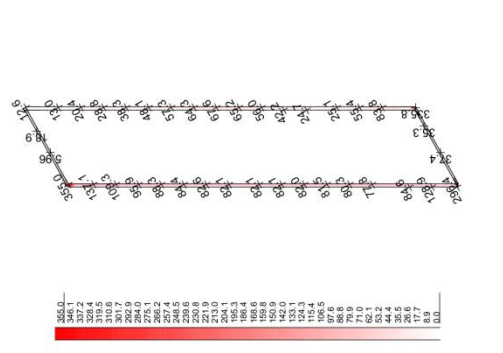
Knotenverschiebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 402: LF-H



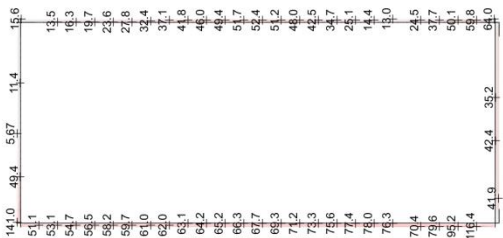
Knotenverschiebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 402: LF-H



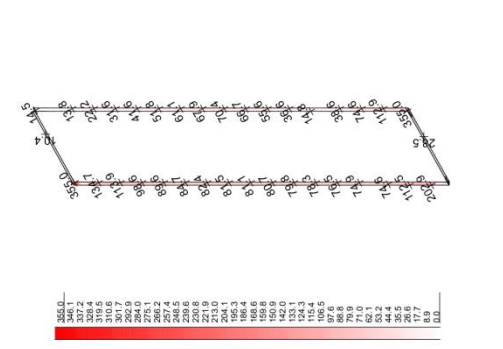
Knotenverschiebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 402: LF-H



Knotenverschiebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 402: LF-H

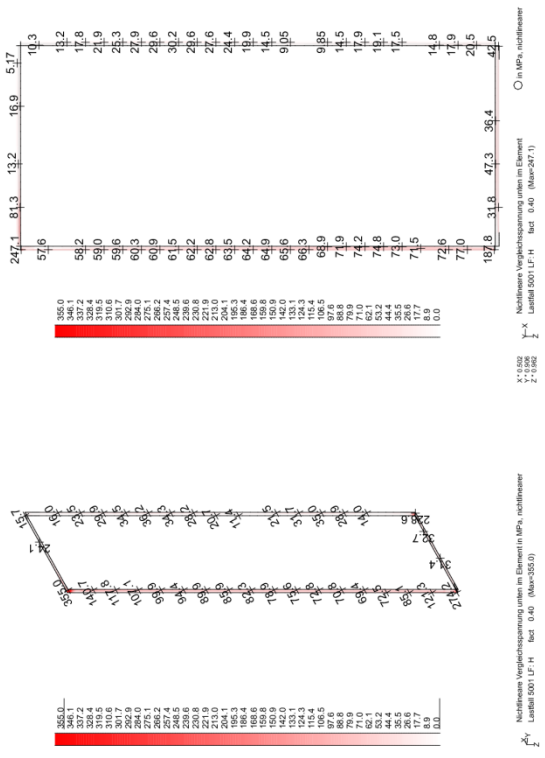
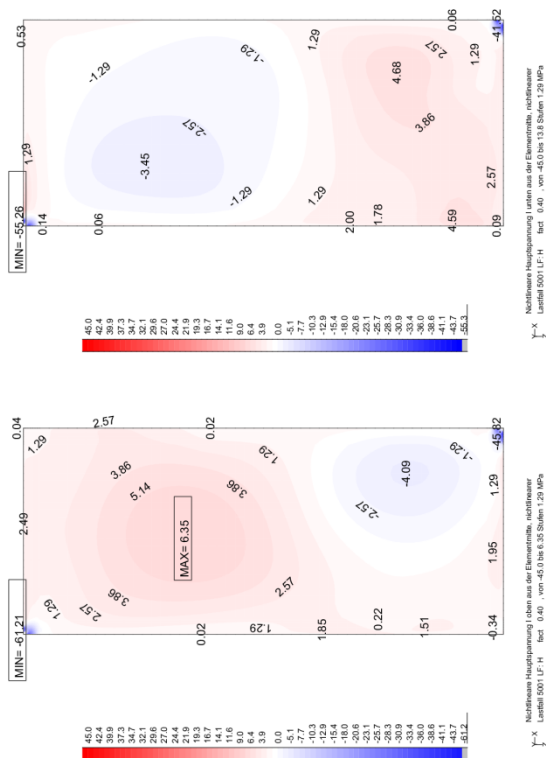
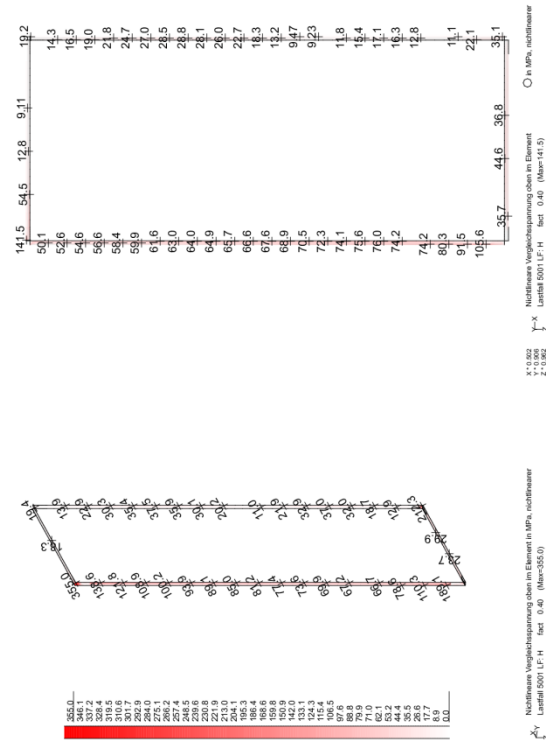


Knotenverschiebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 402: LF-H

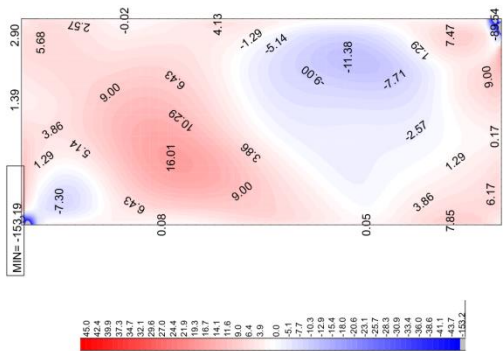


Knotenverschiebung in global Y
von -0.005 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 402: LF-H

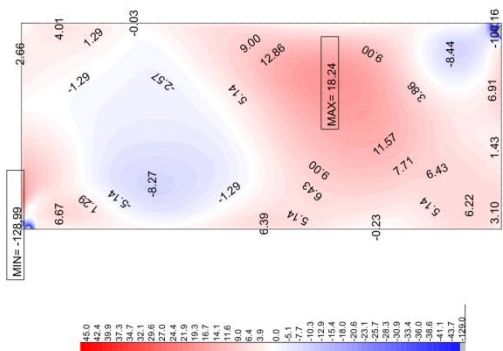
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



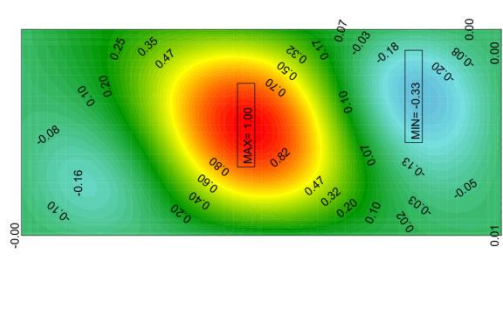
14.1.9.2 Rahmentiefe 45 mm:



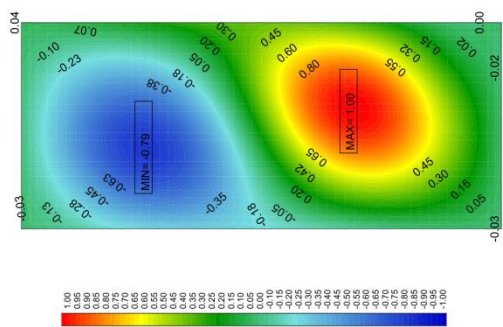
Y-X Nichtlineare Hauptspannung unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lasteil 4004.LF.H fact. 1.00 von -43.3 bis 27.7 Stufen 128 MPa



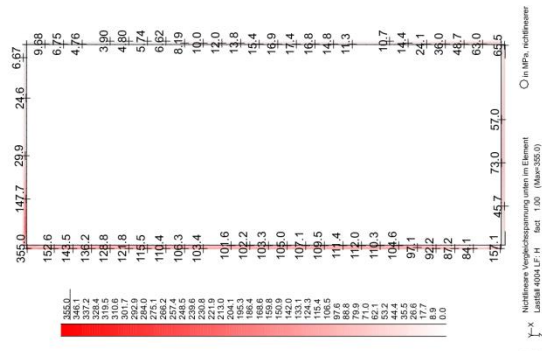
Y-X Nichtlineare Hauptspannung oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lasteil 4004.LF.H fact. 1.00 von -45.0 bis 18.2 Stufen 128 MPa



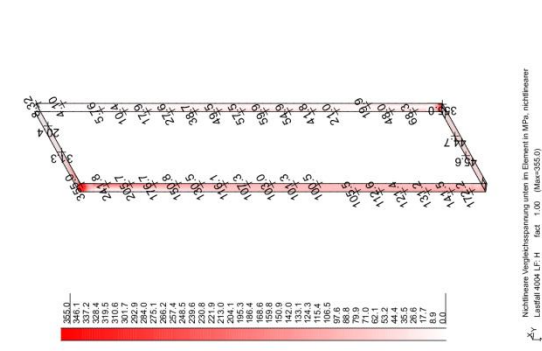
Y-X Knotenverchiebung in global Y von -3.38 bis 1.00 Stufen 0.020 mm
Lasteil 302 normierte Eigenform LF 01



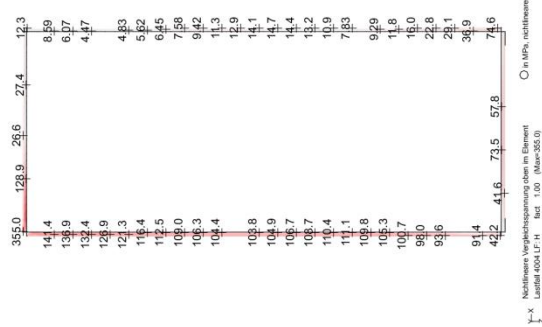
Y-X Knotenverchiebung in global Y von 0.792 bis 1.00 Stufen 0.020 mm
Lasteil 301 normierte Eigenform LF 100



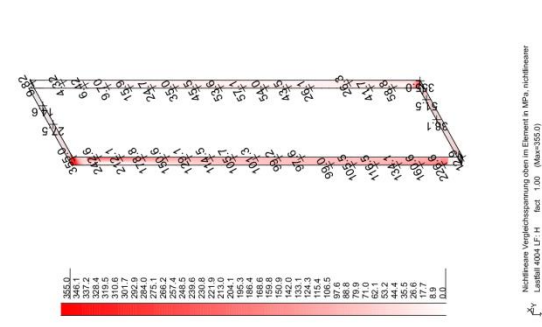
Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element
Lasteil 4004.LF.H fact. 1.00 (Max=355.0)



Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element
Lasteil 4004.LF.H fact. 1.00 (Max=355.0)

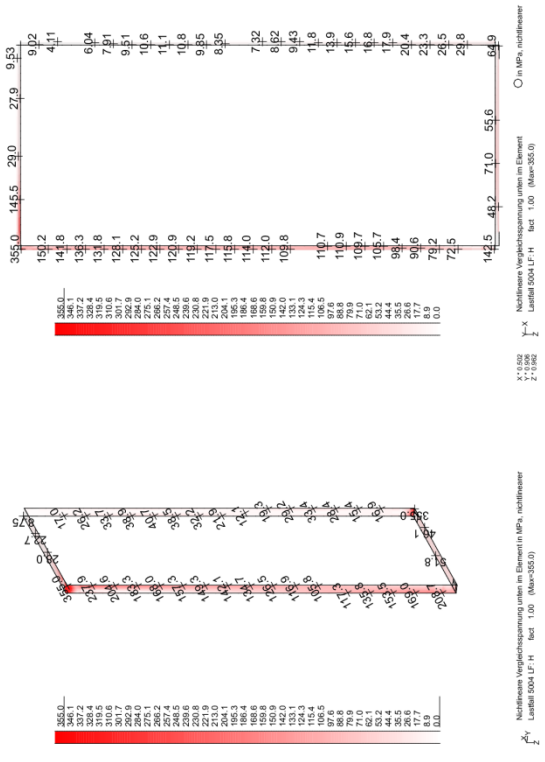
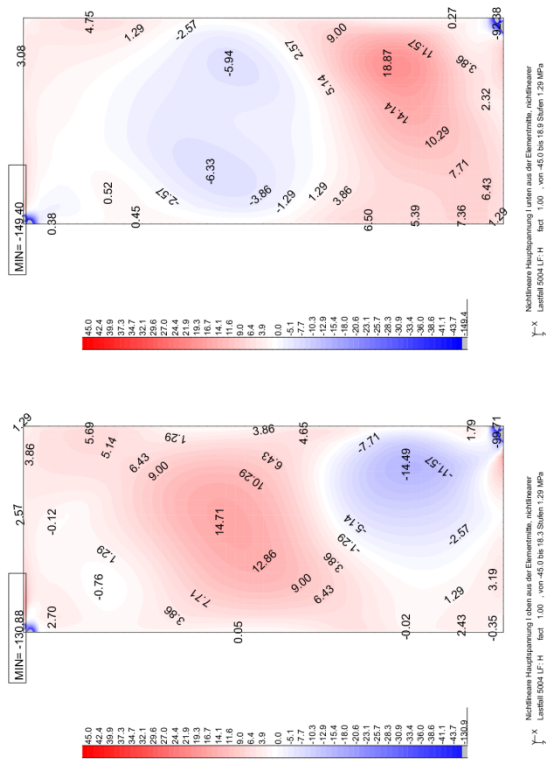
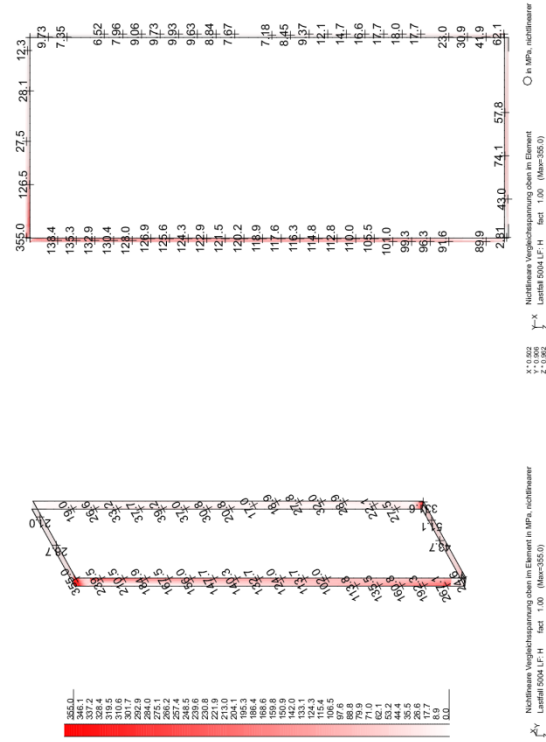


Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element
Lasteil 4004.LF.H fact. 1.00 (Max=355.0)

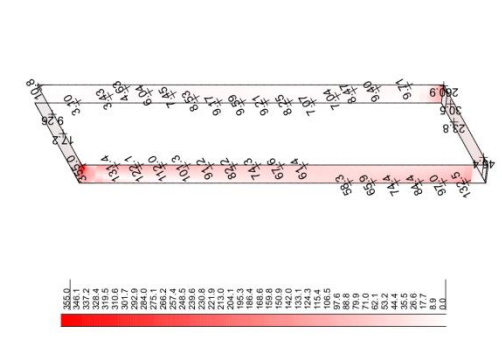
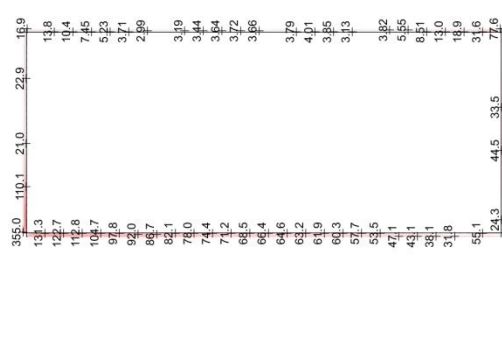
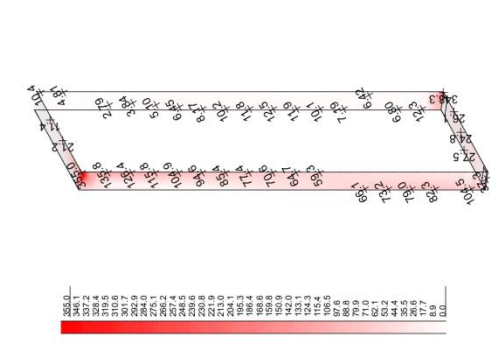
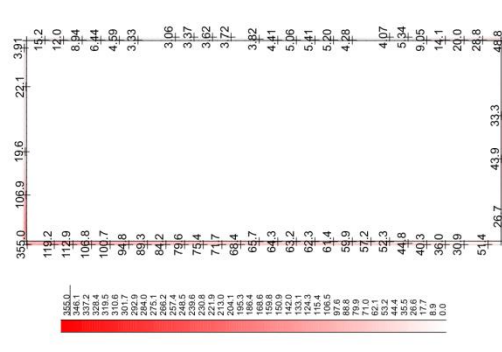
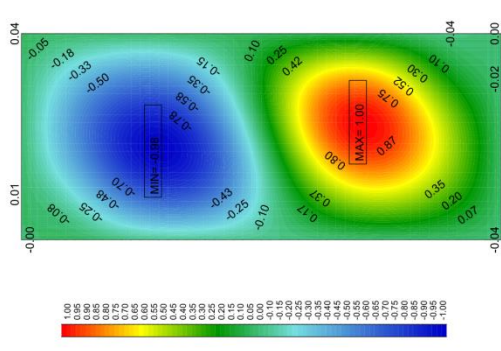
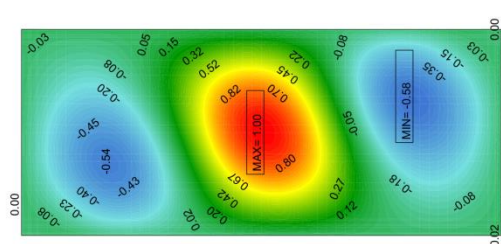
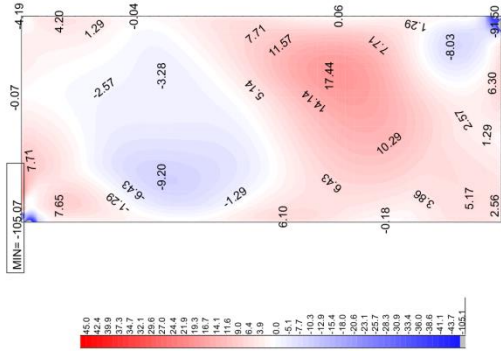
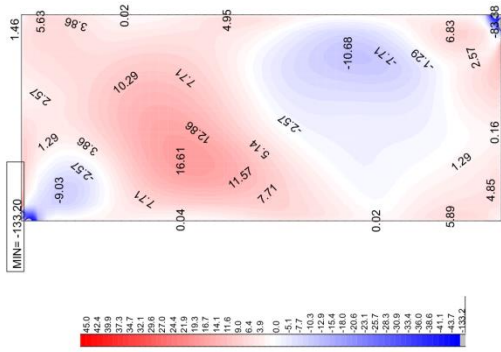


Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lasteil 4004.LF.H fact. 1.00 (Max=355.0)

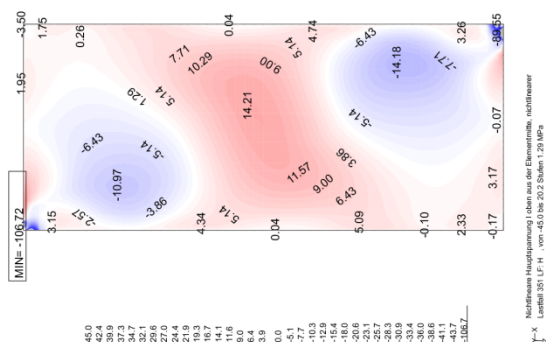
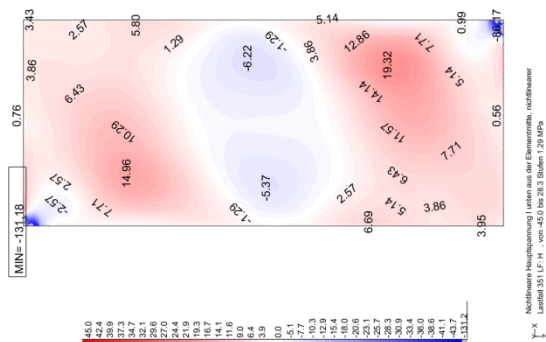
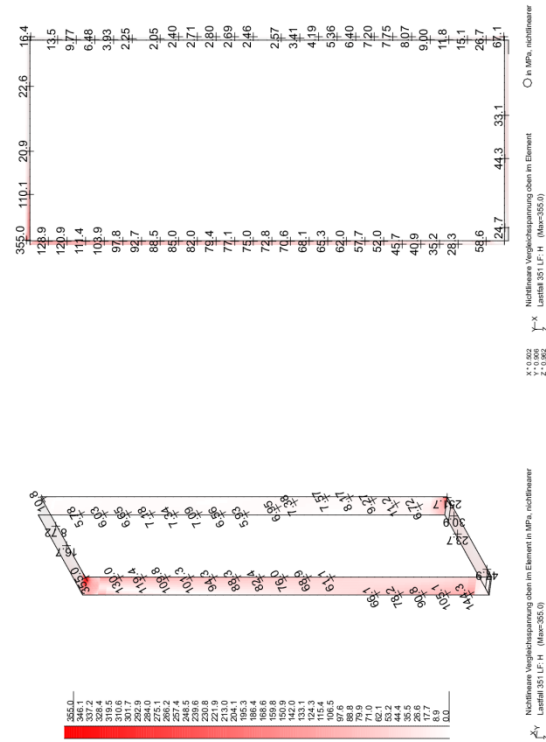
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



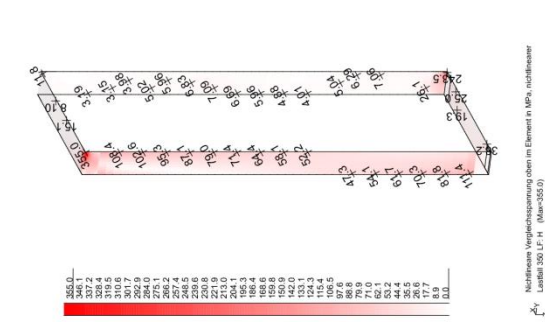
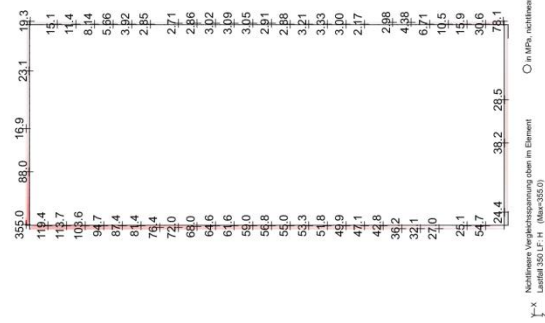
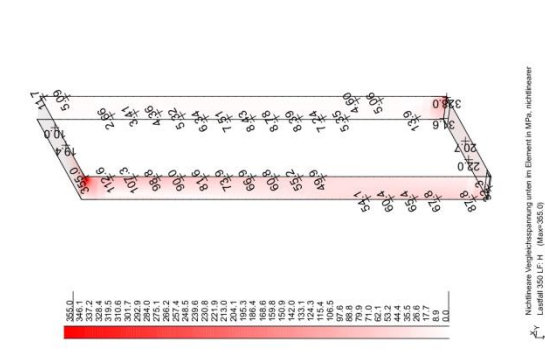
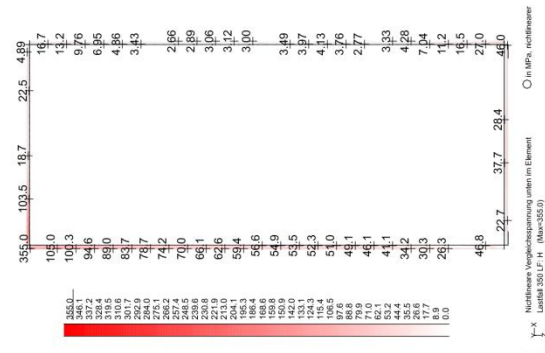
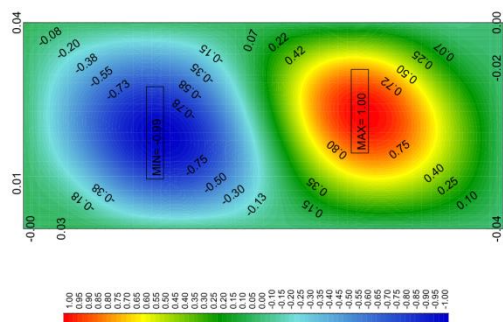
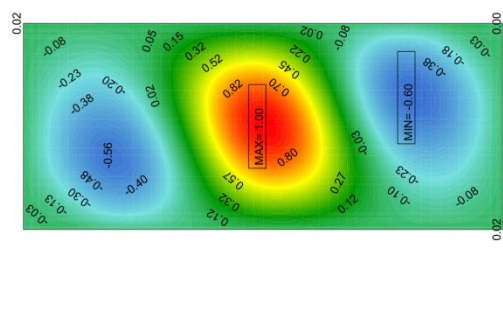
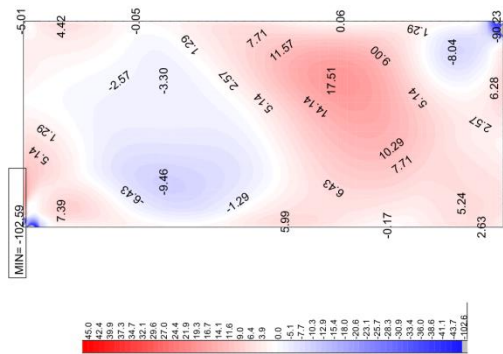
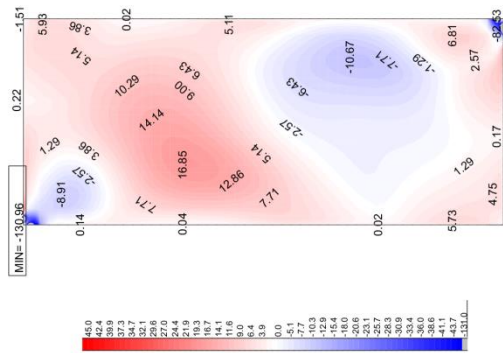
14.1.9.3 Rahmentiefe 135 mm:



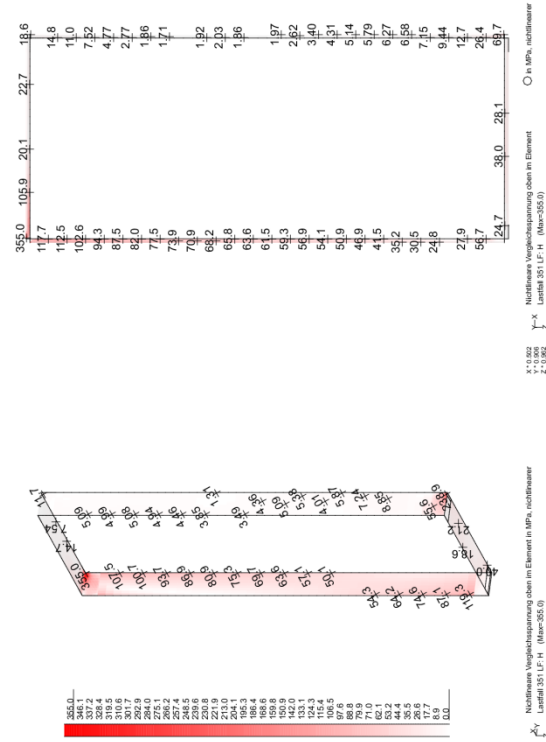
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



14.1.9.4 Rahmentiefe 180 mm:

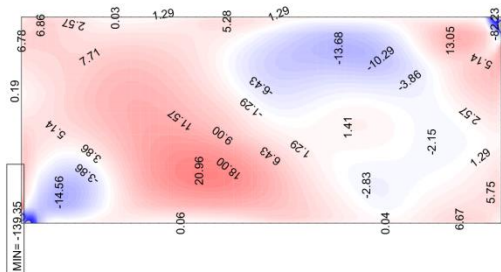


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

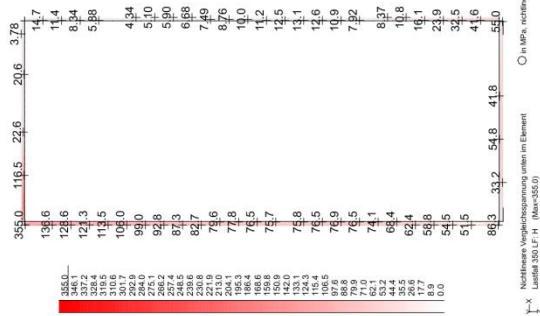


14.1.10 Vorverformung

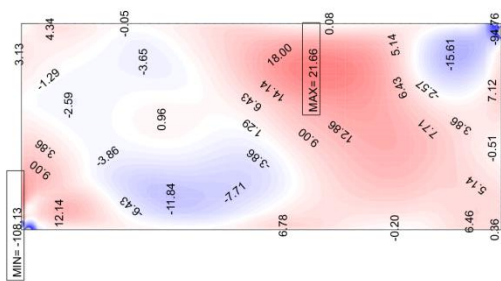
14.1.10.1 Faktor 250:



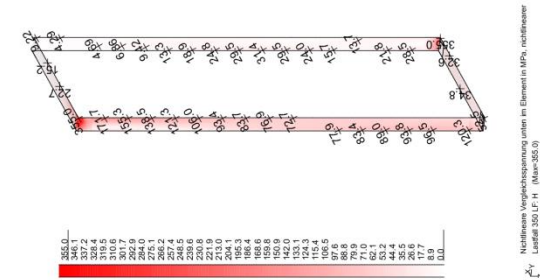
Y-X Nichtlineare Hauptspannung Unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 350.LF-H, von -45.0 bis 367.2 kN/m, 1.25 MPa



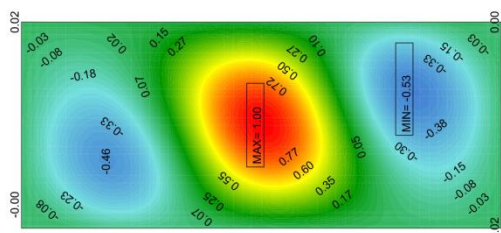
Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element
Lastfall 350.LF-H (Max=355.0)



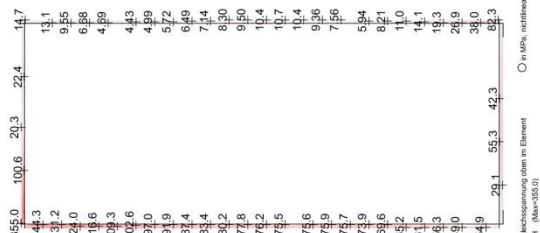
Y-X Nichtlineare Hauptspannung Oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 350.LF-H, von -45.0 bis 217.1 kN/m, 1.25 MPa



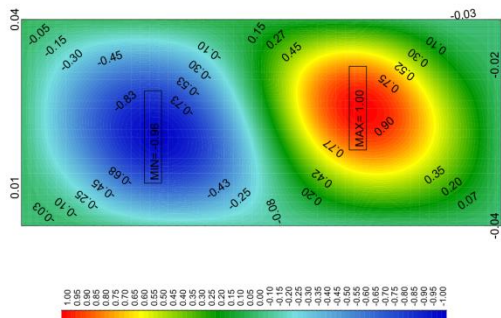
Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element
Lastfall 350.LF-H (Max=355.0)



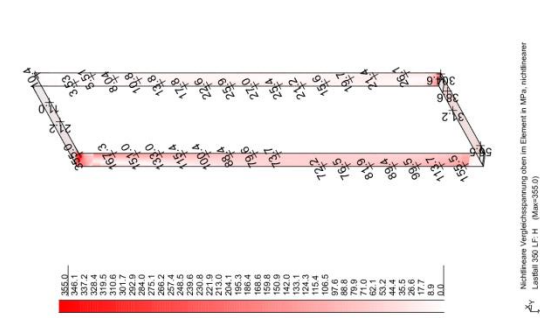
Y-X Knotenverschiebung in global Y
Eigenform LF 101, von -0.530 bis 1.000 kN/m, 0.0250 mm



Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element
Lastfall 350.LF-H (Max=355.0)

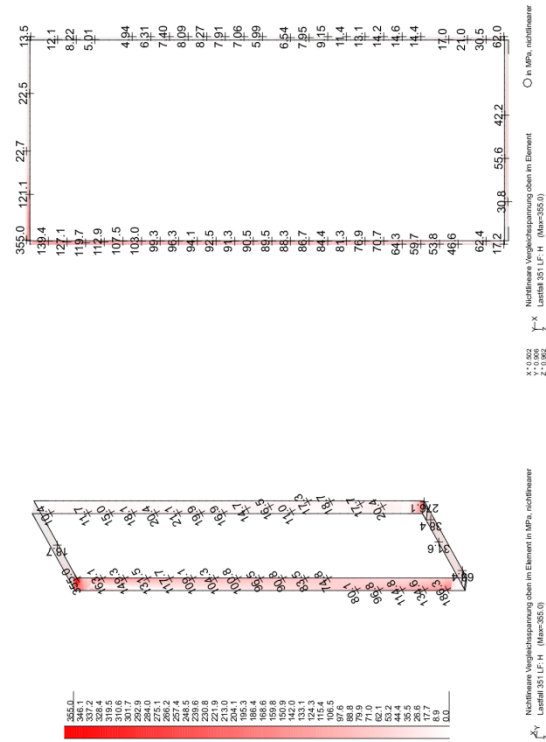


Y-X Knotenverschiebung in global Y
Eigenform LF 100, von -0.982 bis 1.000 kN/m, 0.0250 mm

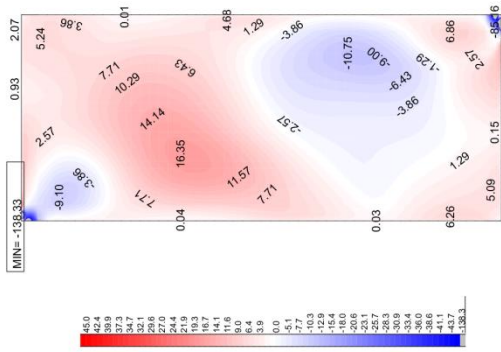


Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element
Lastfall 350.LF-H (Max=355.0)

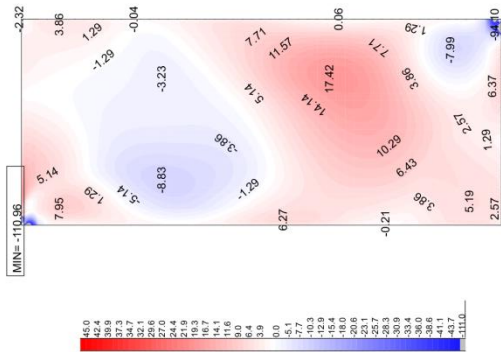
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



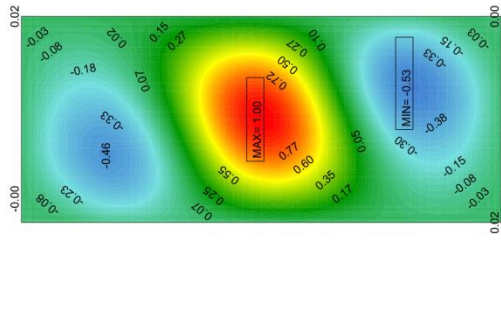
14.1.10.2 Faktor 500:



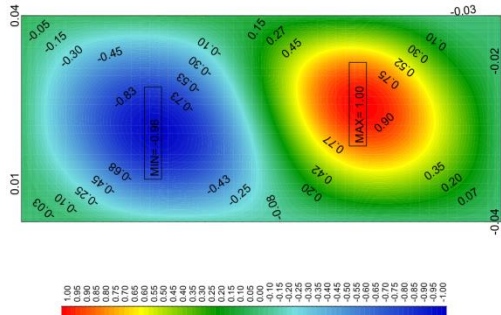
Y-X Nichtlineare Hauptspannung unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 350 (F-H) von -45.0 bis 31.6 Stufen 129 MPa



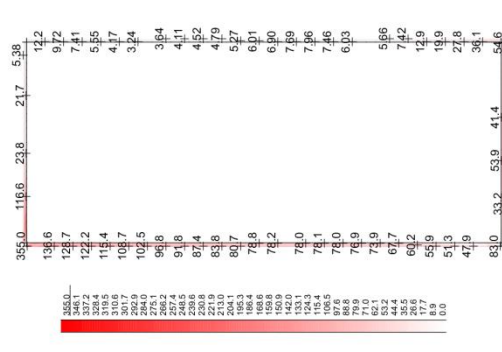
Y-X Nichtlineare Hauptspannung oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 350 (F-H) von -45.0 bis 14.8 Stufen 129 MPa



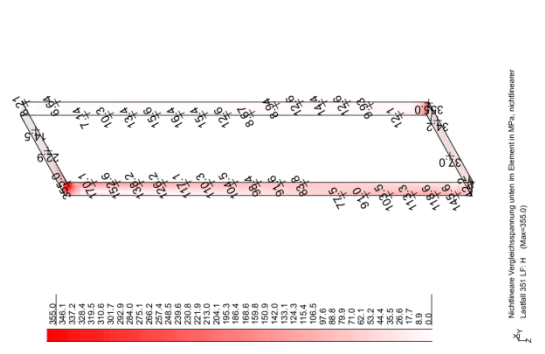
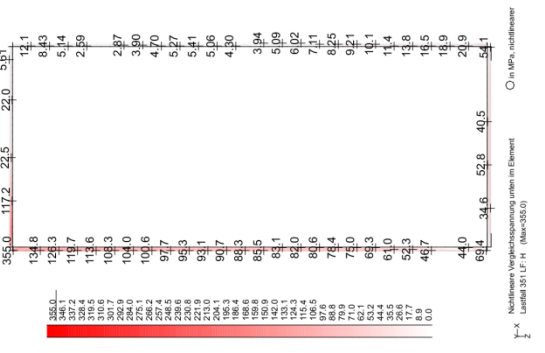
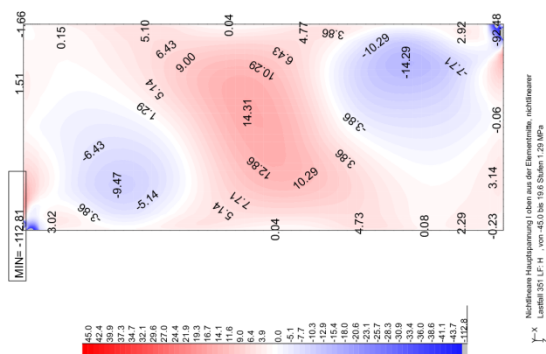
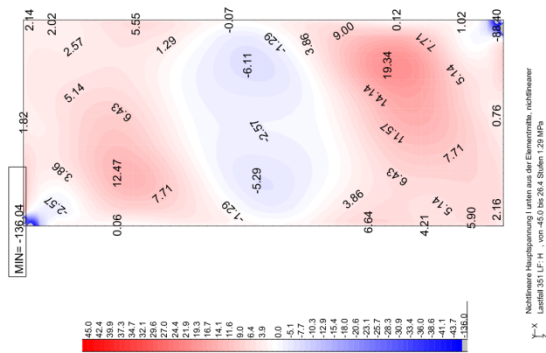
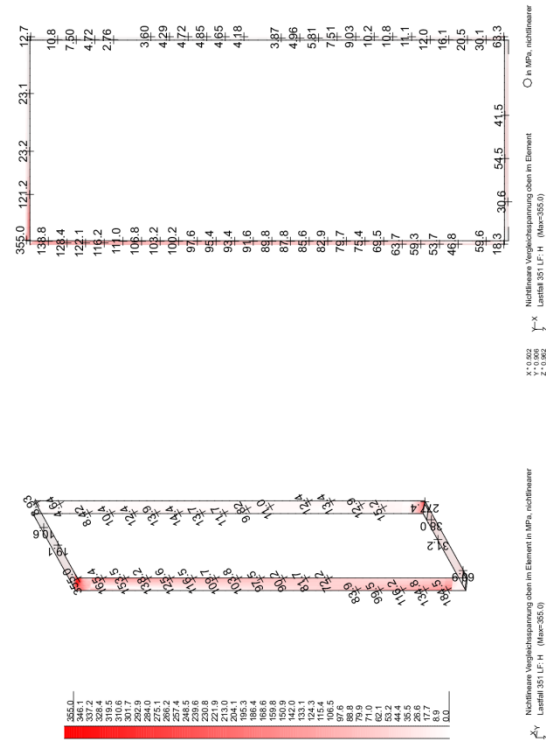
Y-X Knotenverschiebung in global Y
Eigenform LF 101 von 0.000 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 302 (normierte)



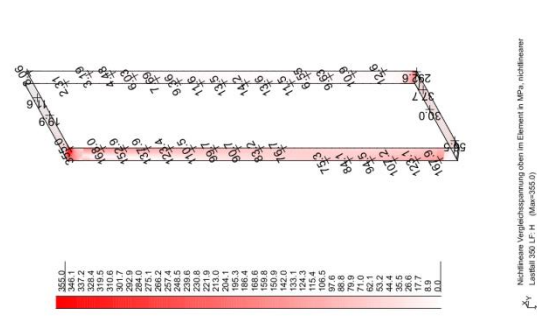
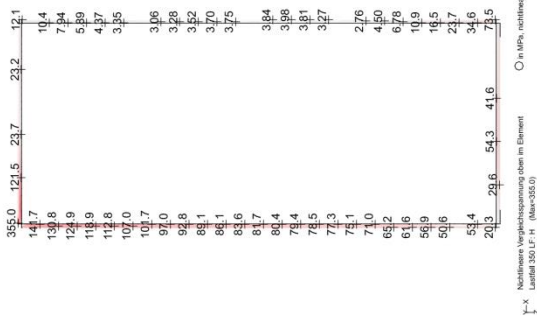
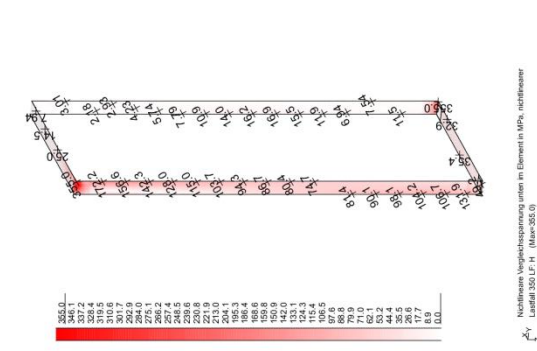
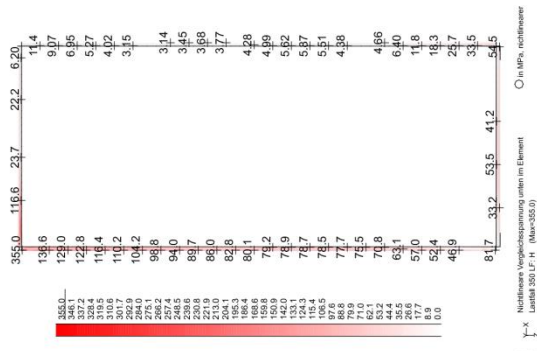
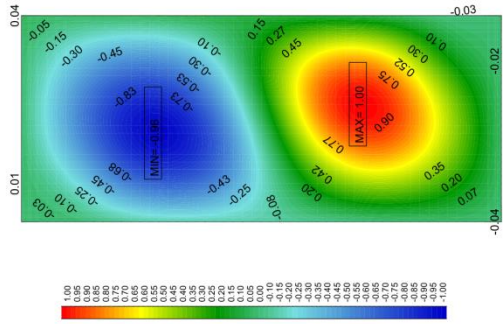
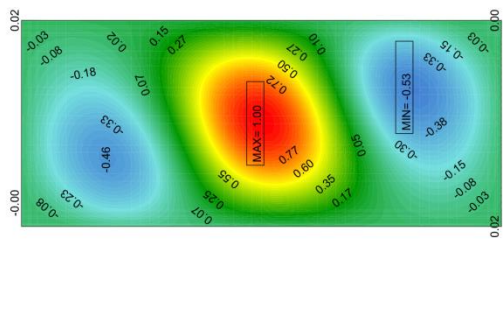
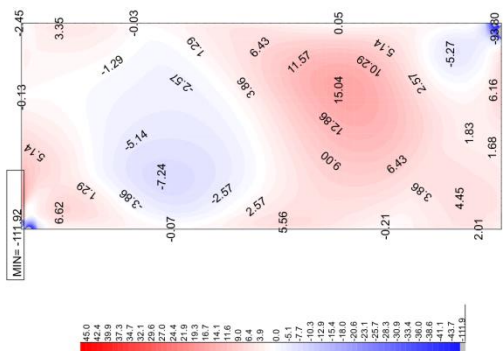
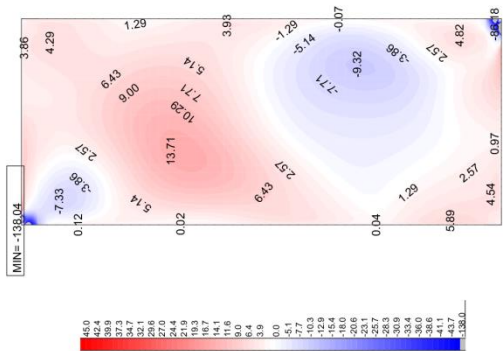
Y-X Knotenverschiebung in global Y
Eigenform LF 100 von 0.000 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm
Lastfall 301 (normierte)



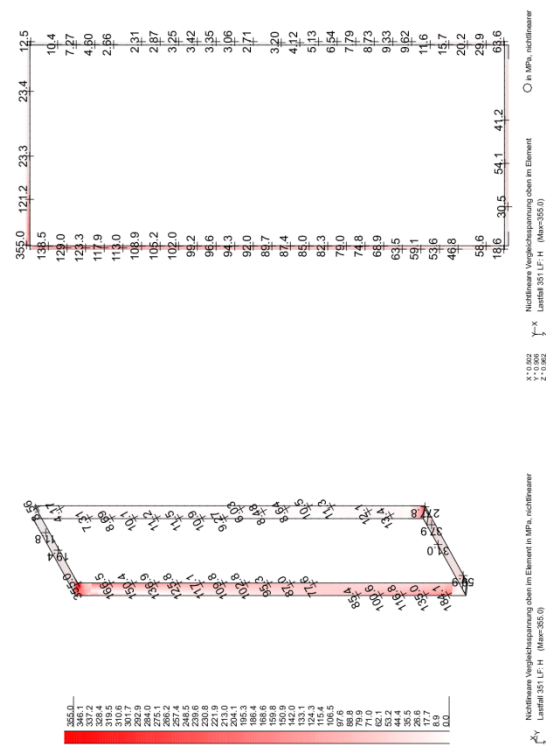
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



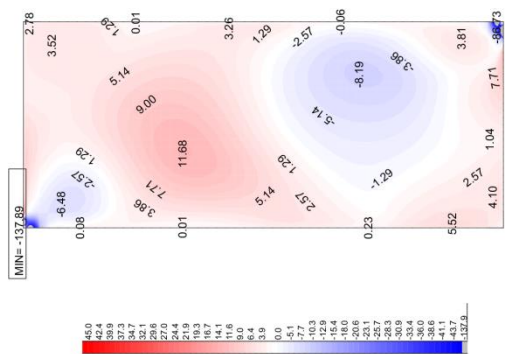
14.1.10.3 Faktor 750:



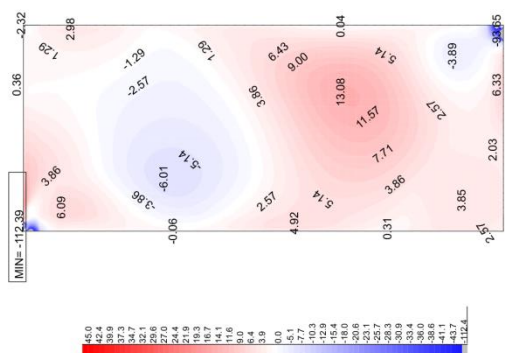
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



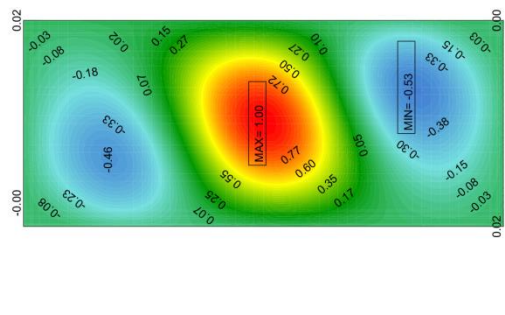
14.1.10.4 Faktor 1000:



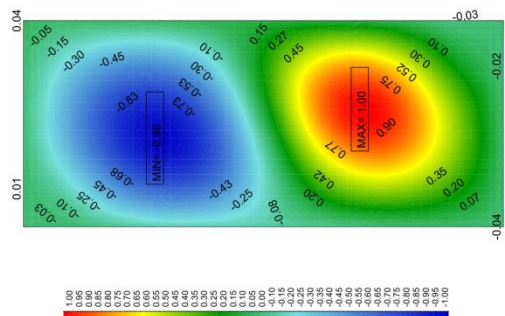
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlineare Lastfall 350 (F-H) von -45,0 bis 26,6 Stufen 129 MPa



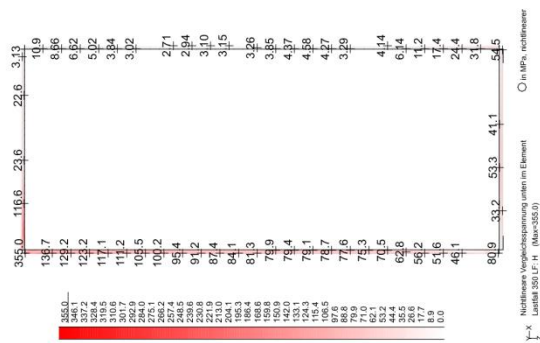
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlineare Lastfall 350 (F-H) von -45,0 bis 14,4 Stufen 129 MPa



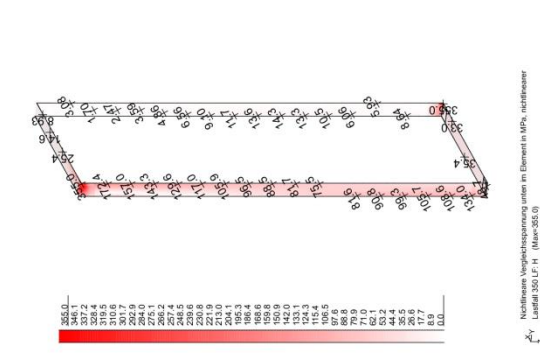
Y-X Knotenverschiebung in global Y Eigenform LP 101 von 0,030 bis 1,000 Stufen 0,0250 mm nichtlineare Lastfall 302 normierte



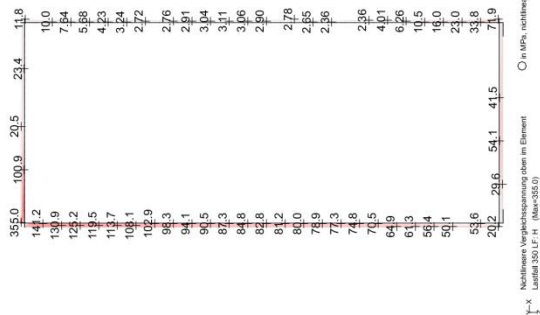
Y-X Knotenverschiebung in global Y Eigenform LP 100 von 0,005 bis 1,000 Stufen 0,0250 mm nichtlineare Lastfall 301 normierte



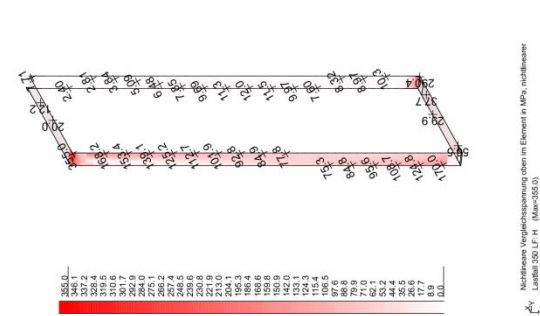
Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element Lastfall 350 (F-H) (Max=355,0)



Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element Lastfall 350 (F-H) (Max=355,0)

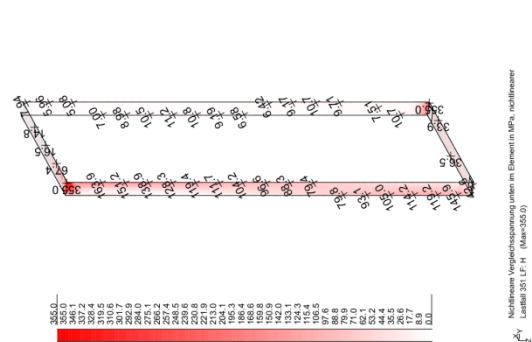
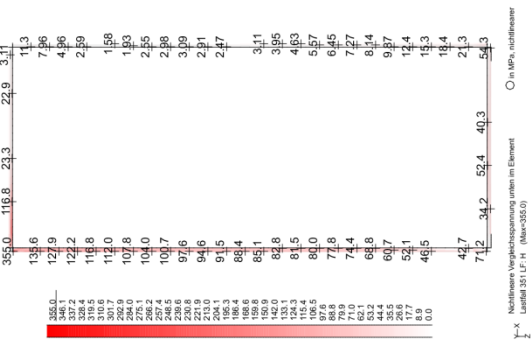
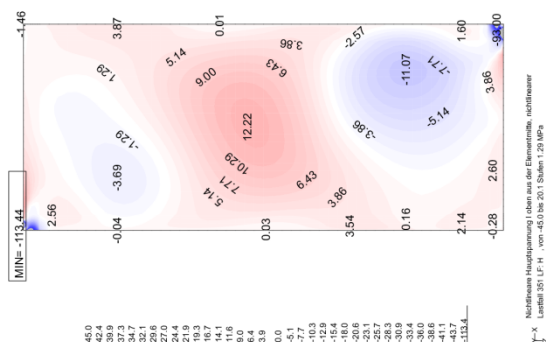
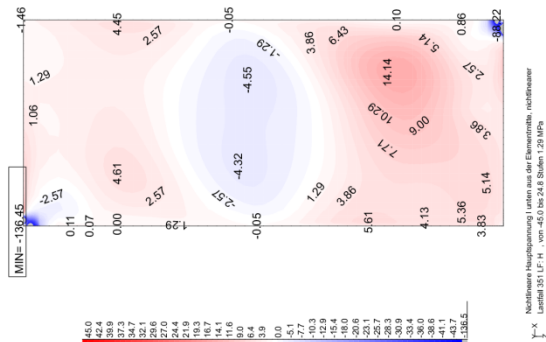
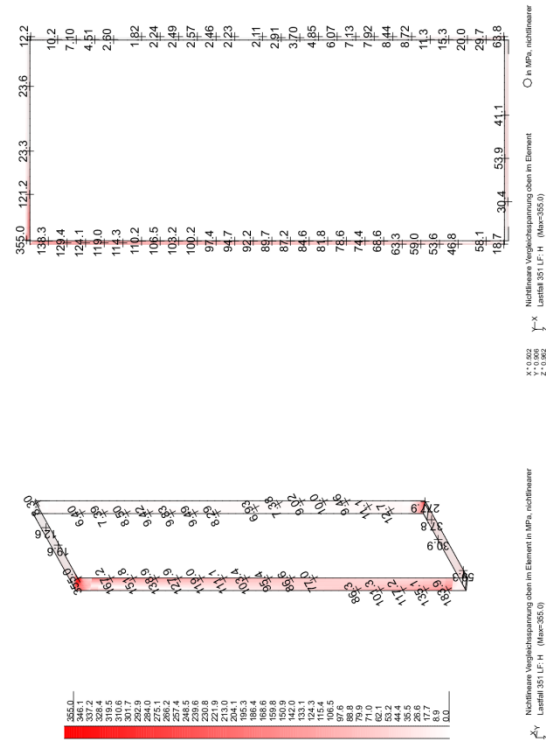


Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element Lastfall 350 (F-H) (Max=355,0)

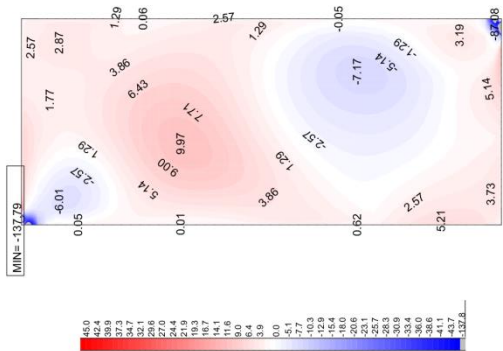


Y-X Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element Lastfall 350 (F-H) (Max=355,0)

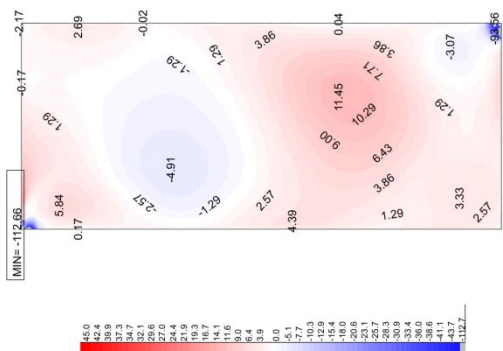
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



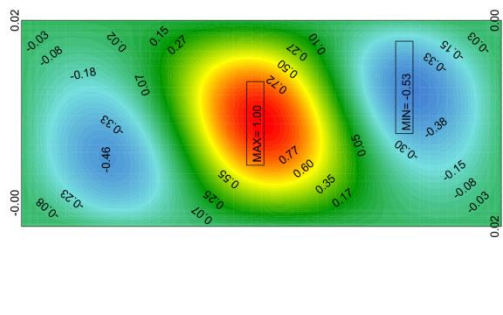
14.1.10.5 Faktor 1250:



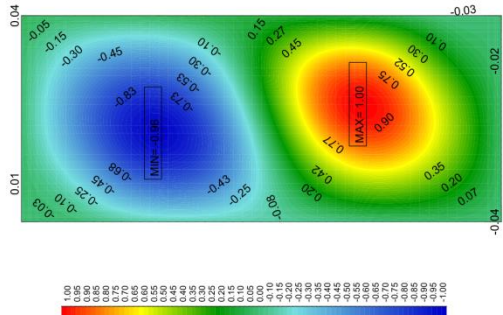
Nichtlineare Hauptspannung unten aus der Elementmitte, nichtlineare Lastfall 350 (F-H) von -45.0 bis 27.8 Stufen 129 MPa



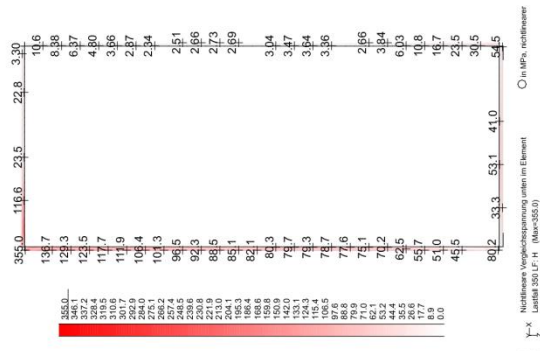
Nichtlineare Hauptspannung oben aus der Elementmitte, nichtlineare Lastfall 350 (F-H) von -45.0 bis 19.8 Stufen 129 MPa



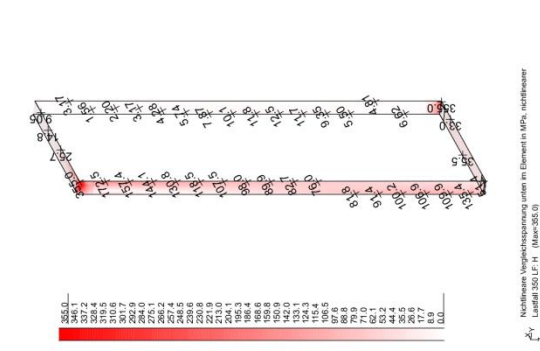
Knotenverschiebung in global Y, Eigenform LF 101 von 0.030 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm, nichtlineare Lastfall 352 (normierte)



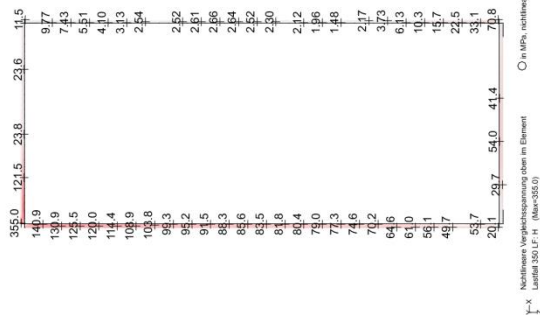
Knotenverschiebung in global Y, Eigenform LF 100 von 0.065 bis 1.000 Stufen 0.0250 mm, nichtlineare Lastfall 351 (normierte)



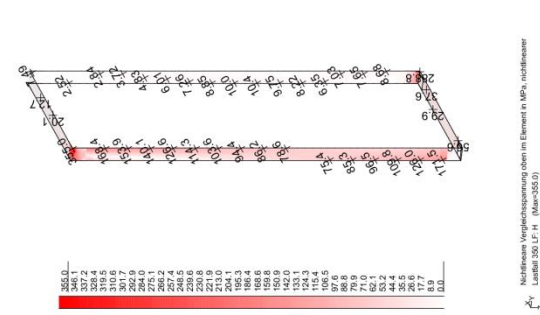
Nichtlineare Vergleichsspannung unten in Element, Lastfall 350 (F-H) (Max=355.0)



Nichtlineare Vergleichsspannung oben in Element, nichtlineare Lastfall 350 (F-H) (Max=355.0)

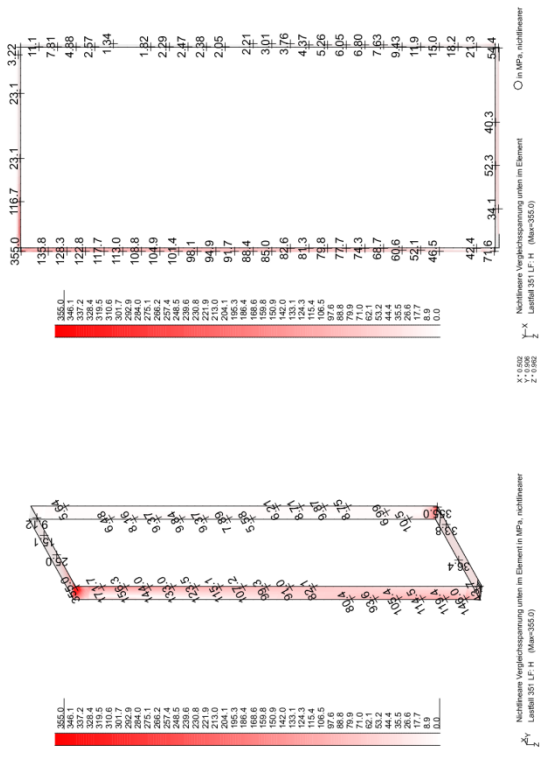
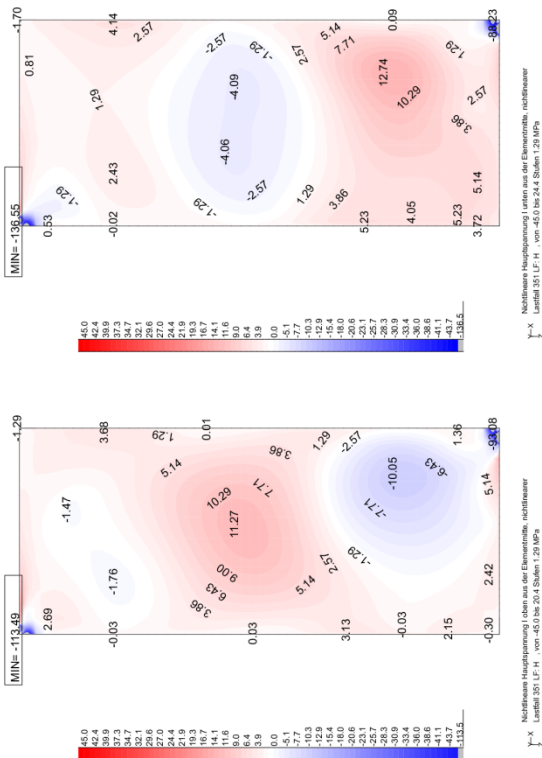
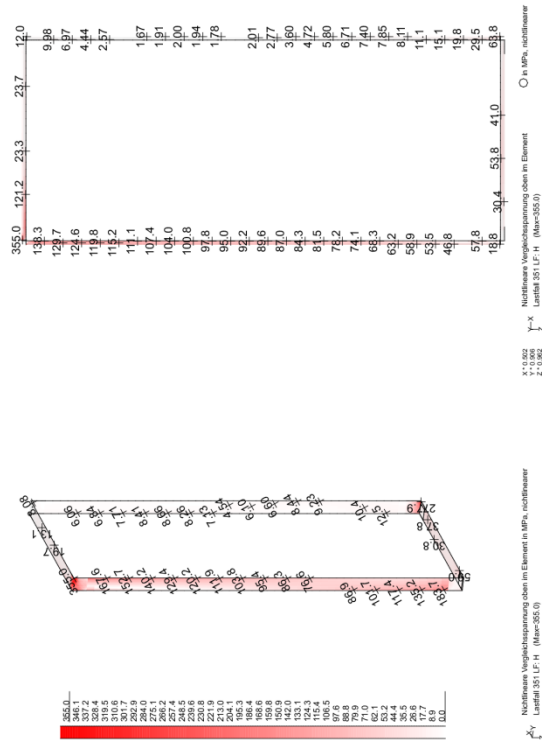


Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element, Lastfall 350 (F-H) (Max=140.9)



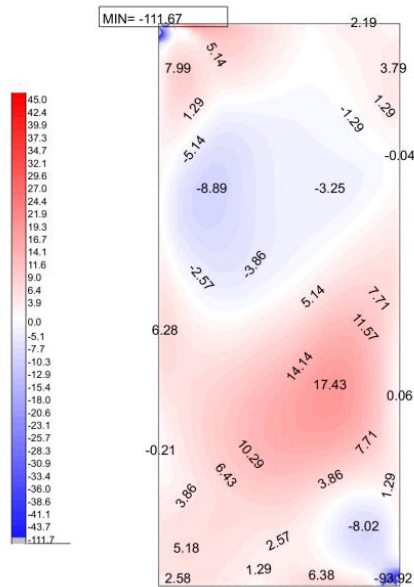
Nichtlineare Vergleichsspannung oben in Element, nichtlineare Lastfall 350 (F-H) (Max=140.9)

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

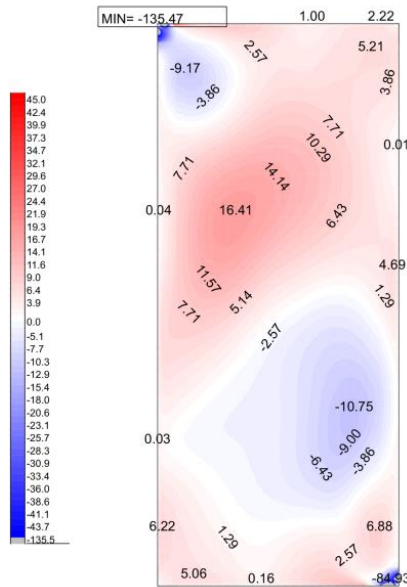


14.1.11 Lastfallkombinationen

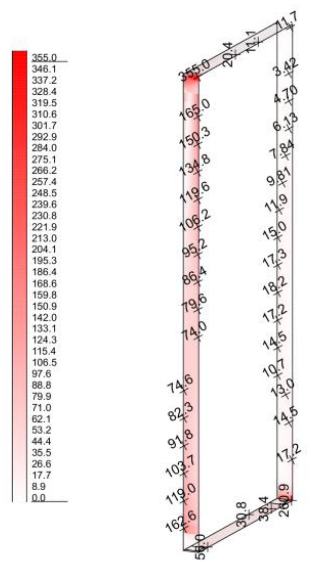
14.1.11.1 LF H+V_K:



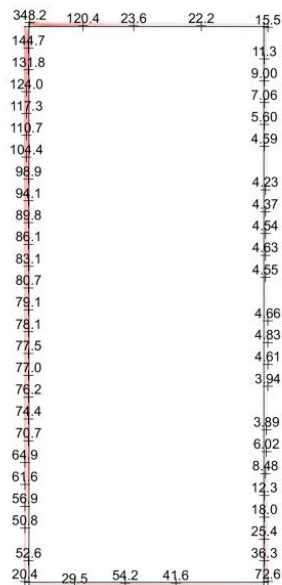
Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinearer Lastfall 352 LF: H+V , von -45.0 bis 18.7 Stufen 1.29 MPa



Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinearer Lastfall 352 LF: H+V , von -45.0 bis 32.1 Stufen 1.29 MPa

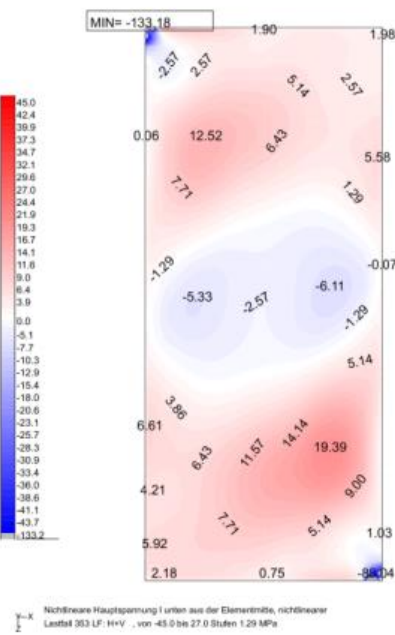
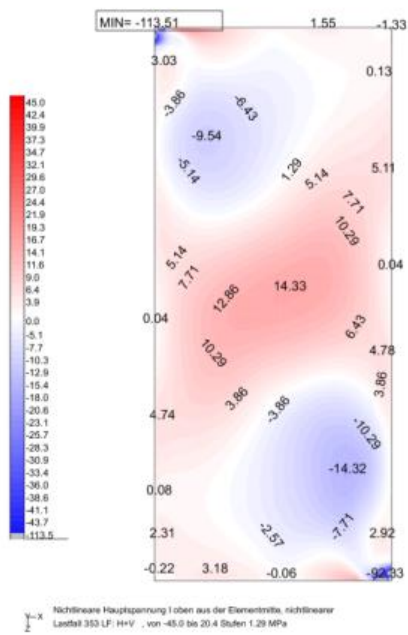
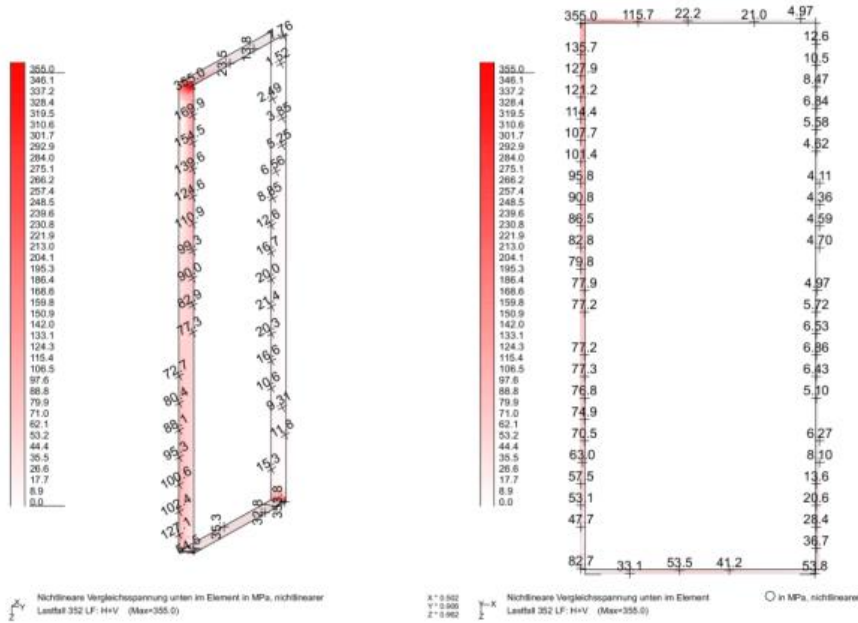


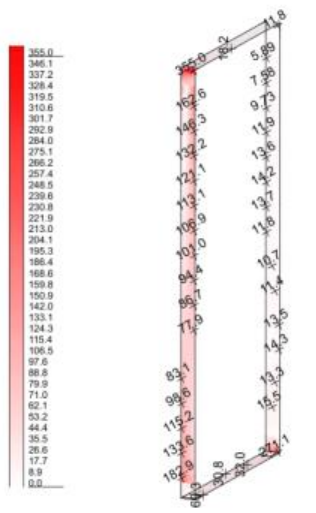
Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 352 LF: H+V (Max=355.0)



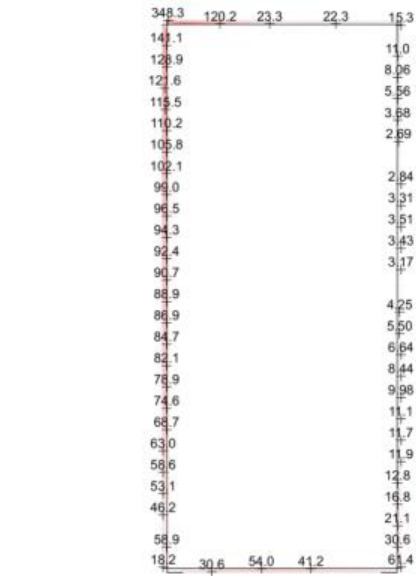
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 352 LF: H+V (Max=348.2)

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

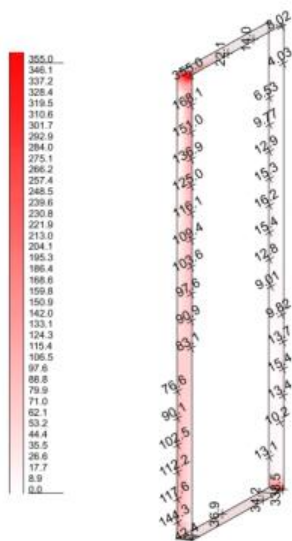




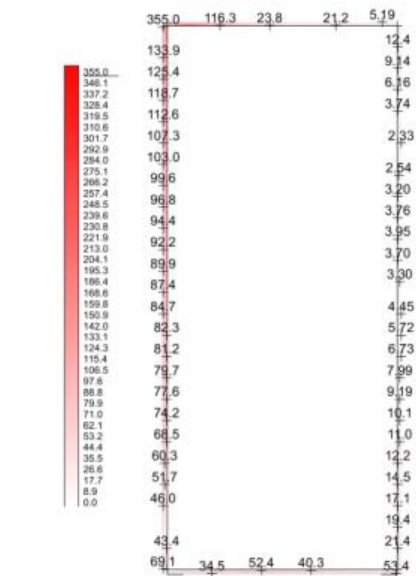
Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 353 LF: H+V (Max=355.0)



Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 353 LF: H+V (Max=348.3)



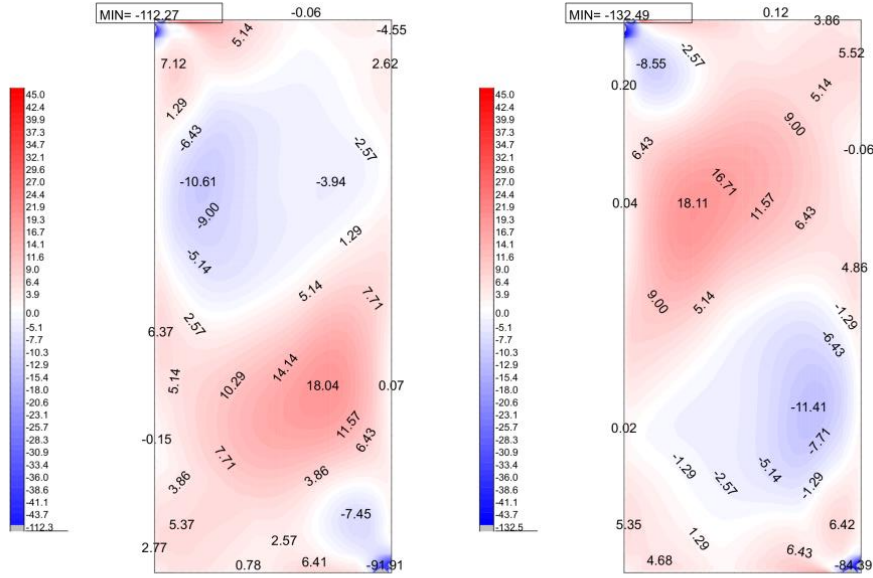
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 353 LF: H+V (Max=355.0)



Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 353 LF: H+V (Max=355.0)

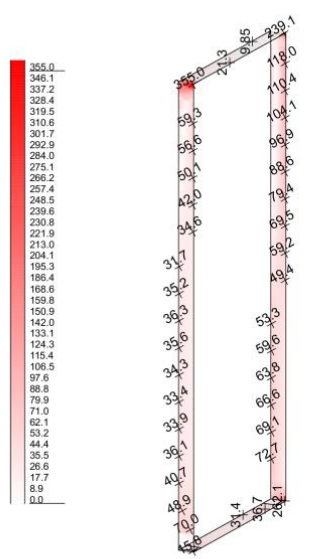
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

14.1.11.2 LF H+V_G:

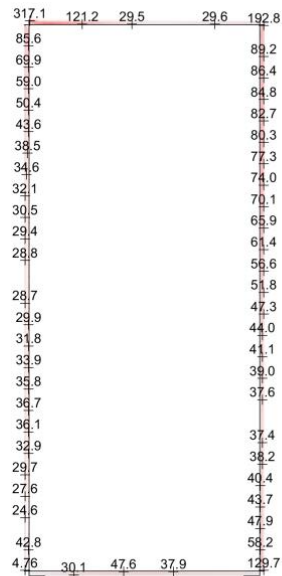


Nichtlineare Hauptspannung oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 358 LF: H+Vg , von -45.0 bis 22.0 Stufen 1.29 MPa

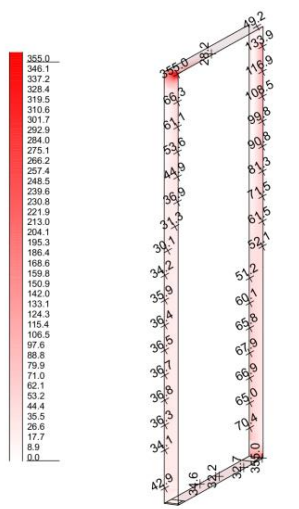
Nichtlineare Hauptspannung unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 358 LF: H+Vg , von -45.0 bis 34.9 Stufen 1.29 MPa



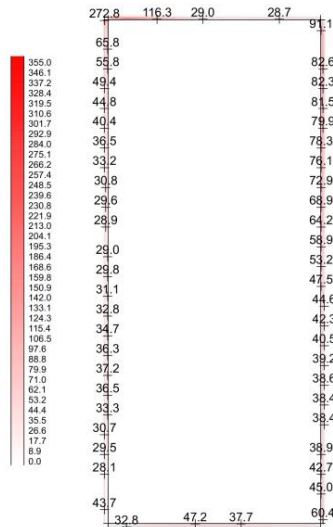
Nichtlineare Vergleichspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 358 LF: H+Vg (Max=355.0)



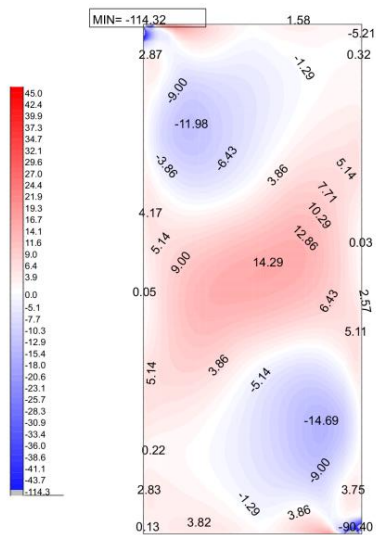
Nichtlineare Vergleichspannung oben im Element
Lastfall 358 LF: H+Vg (Max=317.1)



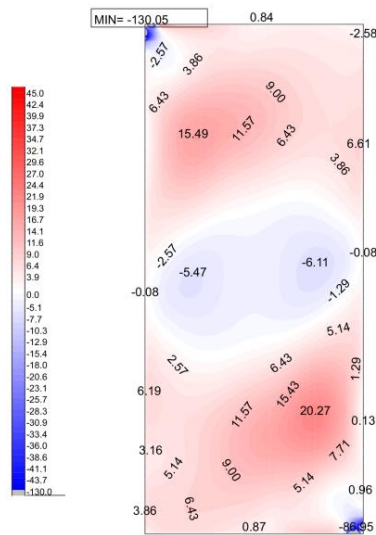
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinearer
Lastfall 358 LF: H+Vg (Max=355.0)



Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinearer
Lastfall 358 LF: H+Vg (Max=272.8)

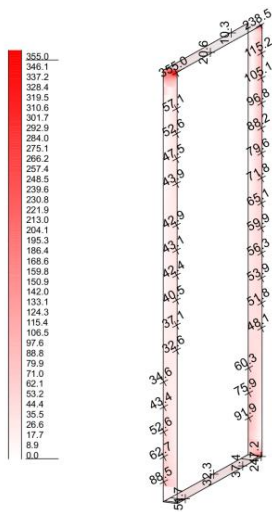


Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinearer
Lastfall 359 LF: H+Vg , von -45.0 bis 24.4 Stufen 1.29 MPa



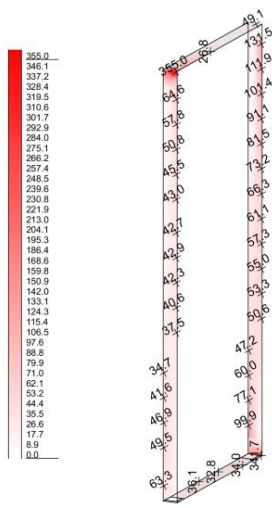
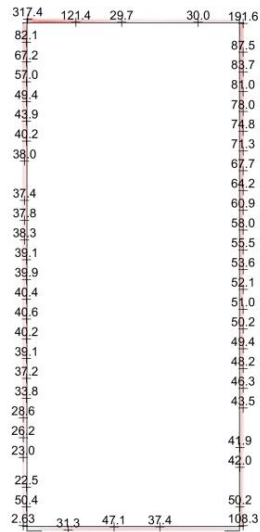
Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinearer
Lastfall 358 LF: H+Vg , von -45.0 bis 29.7 Stufen 1.29 MPa

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



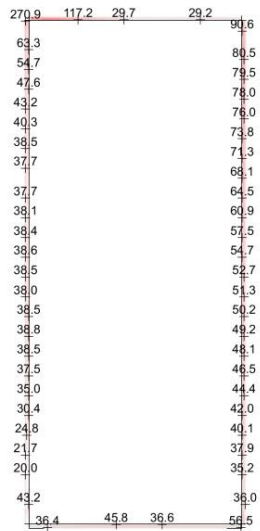
Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 359 LF: H+Vg (Max=355.0)

X 1 0.602 Y 0.606 Z 0.962 Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 359 LF: H+Vg (Max=317.4)

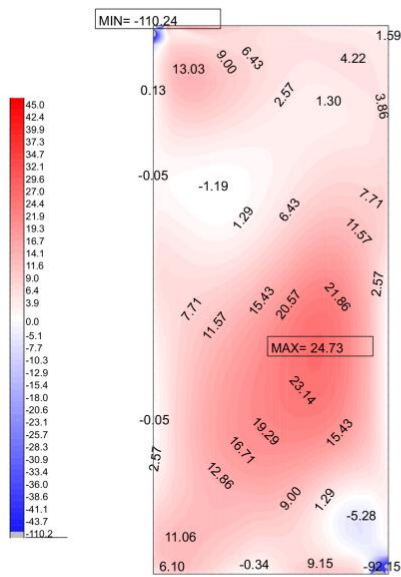


Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 359 LF: H+Vg (Max=355.0)

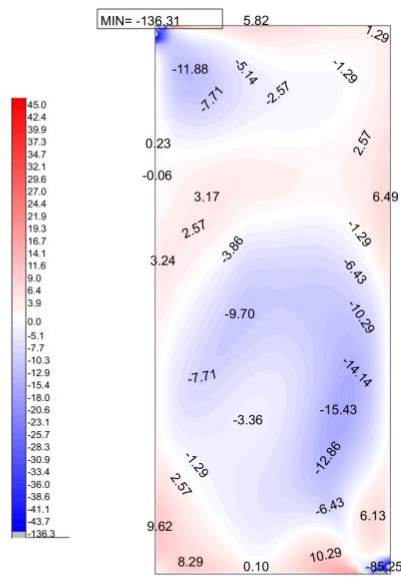
X 1 0.602 Y 0.606 Z 0.962 Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 359 LF: H+Vg (Max=270.9)



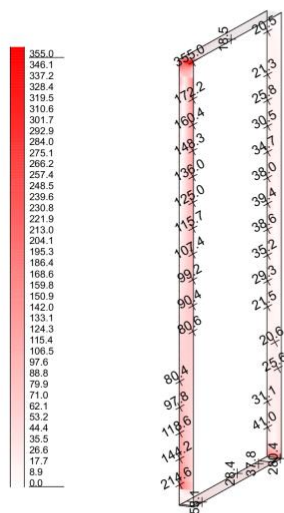
14.1.11.3 LF H+W:



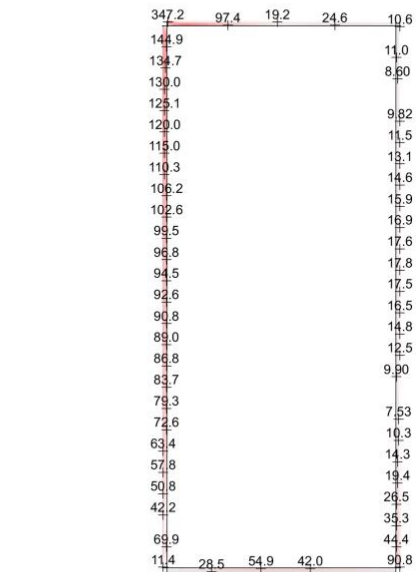
Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinearer Lastfall 354 LF: H+W , von -45.0 bis 24.7 Stufen 1.29 MPa



Nichtlineare Hauptspannung II unten aus der Elementmitte, nichtlinearer Lastfall 354 LF: H+W , von -45.0 bis 32.7 Stufen 1.29 MPa

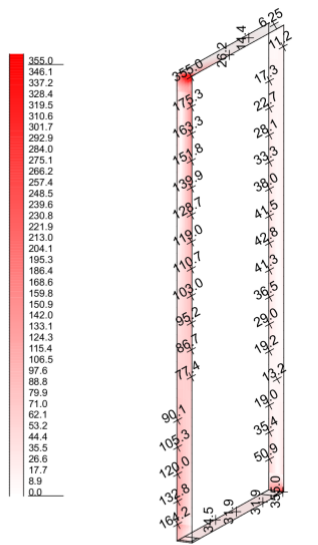


Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 354 LF: H+W (Max=355.0)

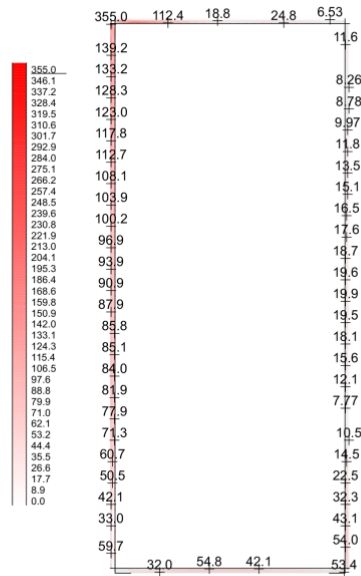


Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 354 LF: H+W (Max=347.2)

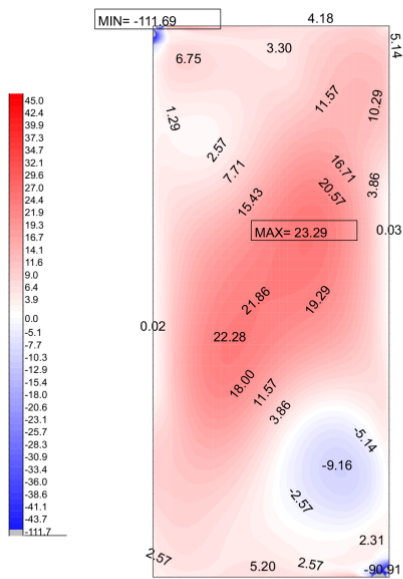
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



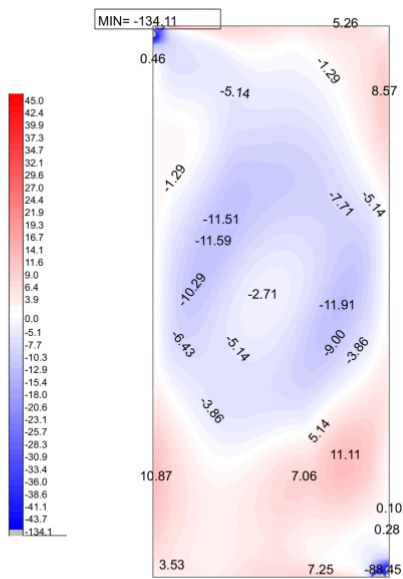
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 354 LF: H+W (Max=355.0)



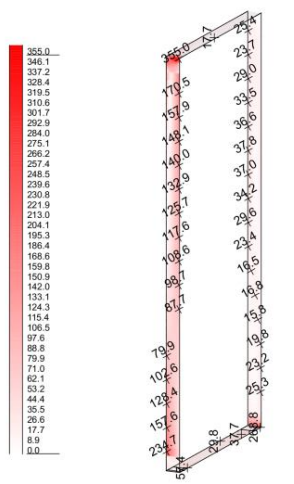
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 354 LF: H+W (Max=355.0)



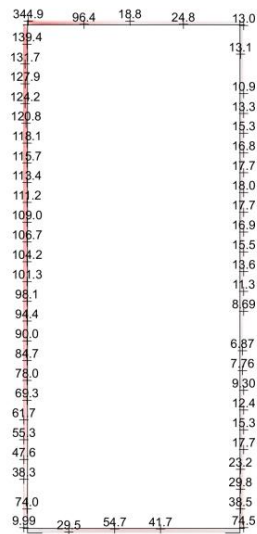
Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 355 LF: H+W , von -45.0 bis 23.3 Stufen 1.29 MPa



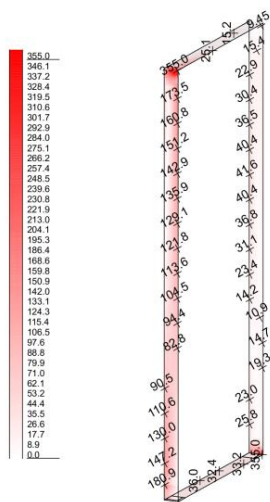
Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 355 LF: H+W , von -45.0 bis 25.8 Stufen 1.29 MPa



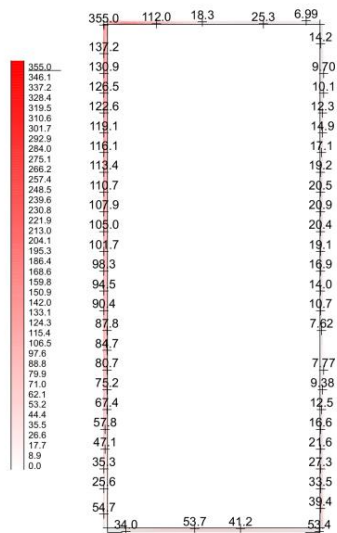
Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 355 LF: H+W (Max=355.0)



Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 355 LF: H+W (Max=344.9)



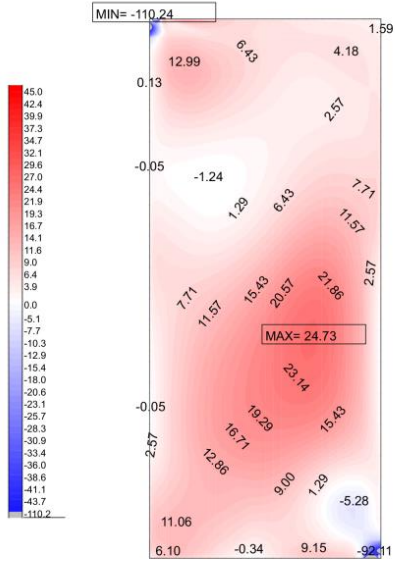
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 355 LF: H+W (Max=355.0)



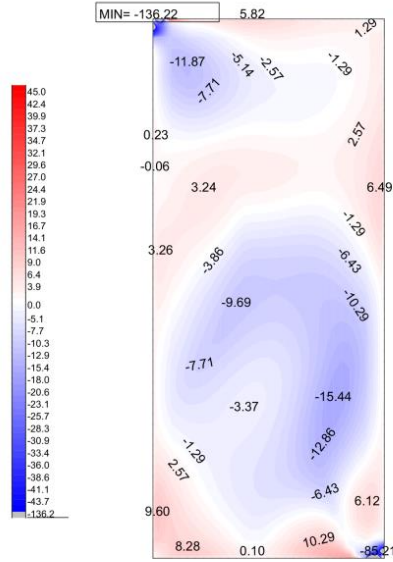
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 355 LF: H+W (Max=355.0)

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

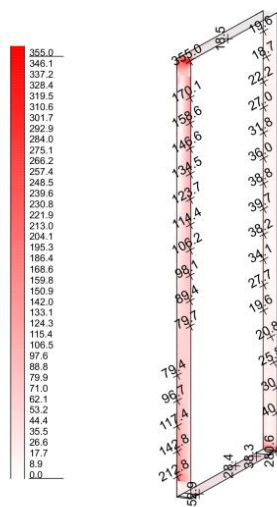
14.1.11.4 LF H+V_K+W:



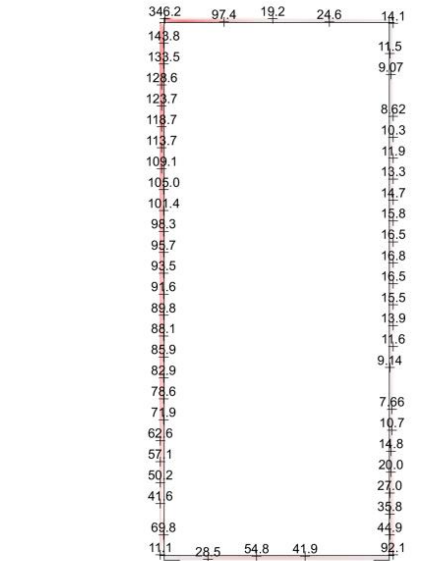
Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinearer Lastfall 356 LF: H+V+W , von -45.0 bis 24.7 Stufen 1.29 MPa



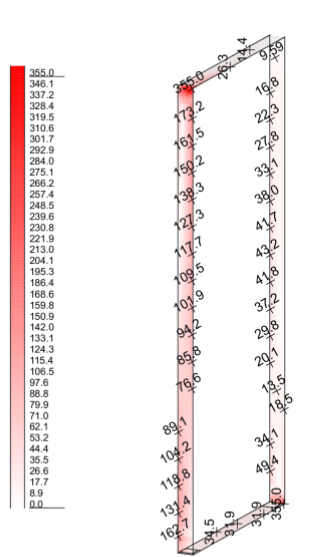
Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinearer Lastfall 356 LF: H+V+W , von -45.0 bis 32.7 Stufen 1.29 MPa



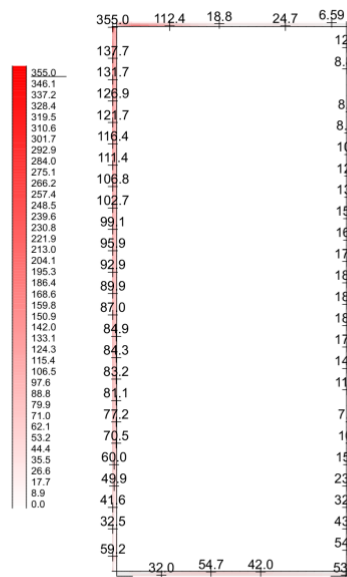
Nichtlineare Vergleichspannung oben im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 356 LF: H+V+W (Max=355.0)



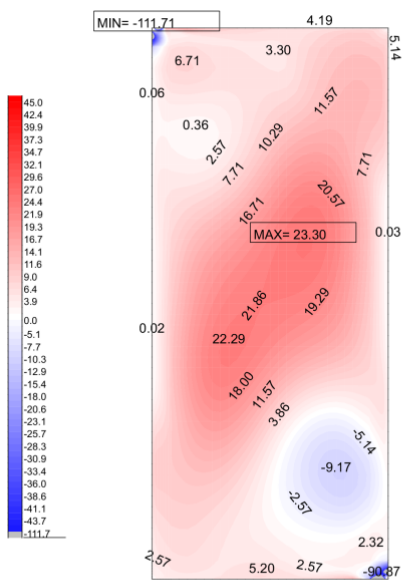
Nichtlineare Vergleichspannung unten im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 356 LF: H+V+W (Max=346.2)



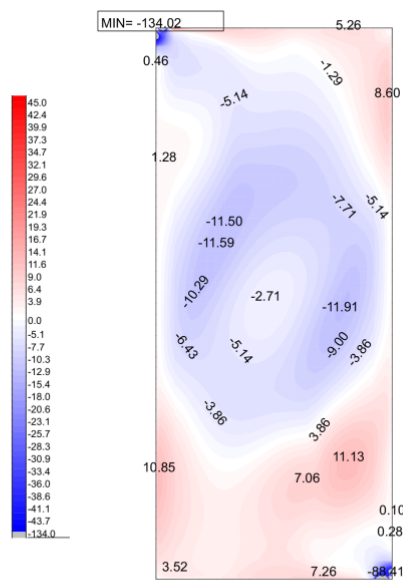
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 356 LF: H+V+W (Max=355.0)



Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 356 LF: H+V+W (Max=355.0)

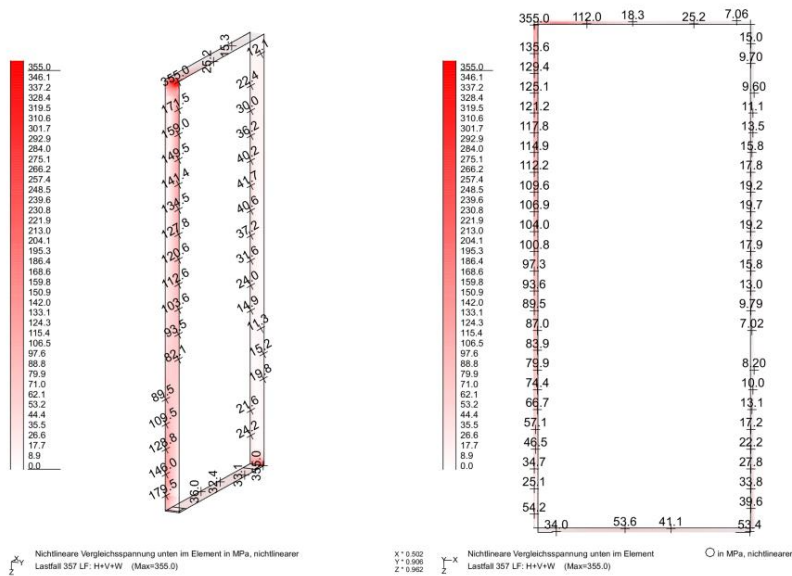
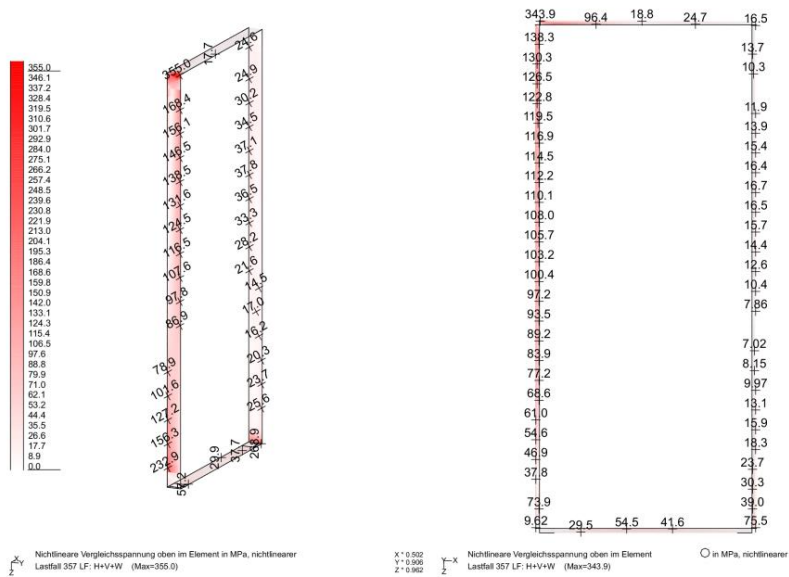


Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 357 LF: H+V+W , von -45.0 bis 23.3 Stufen 1.29 MPa

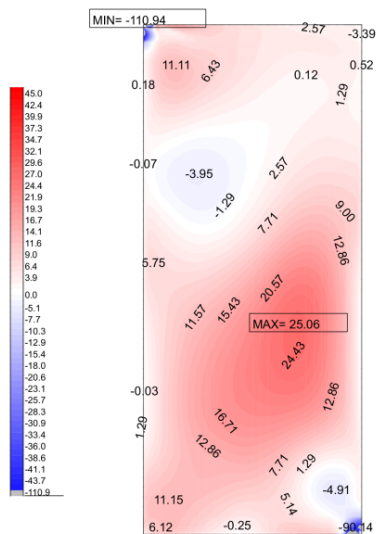


Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 357 LF: H+V+W , von -45.0 bis 25.9 Stufen 1.29 MPa

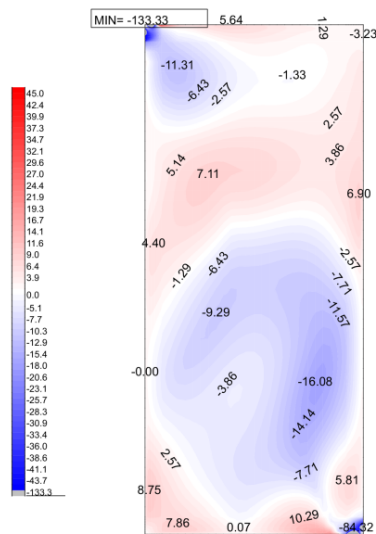
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



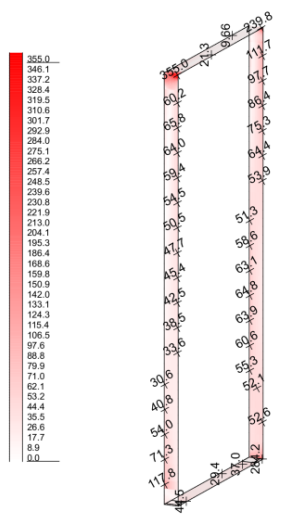
14.1.11.5 LF H+V_G+W:



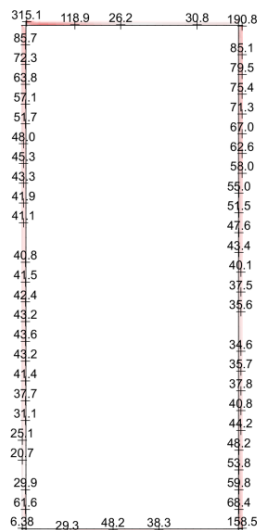
Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 360 LF: H+V_G+W , von -45.0 bis 25.1 Stufen 1.29 MPa



Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 360 LF: H+V_G+W , von -45.0 bis 35.9 Stufen 1.29 MPa

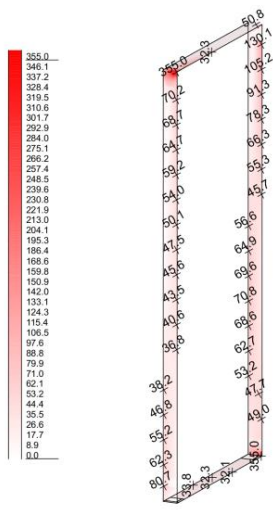


Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 360 LF: H+V_G+W (Max=355.0)

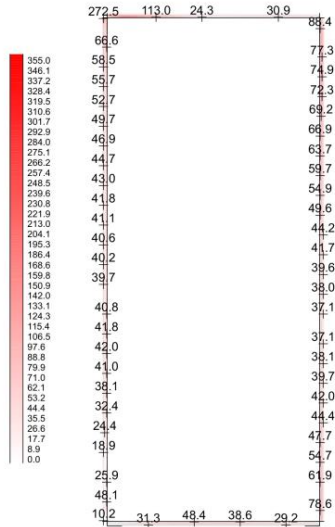


Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
Lastfall 360 LF: H+V_G+W (Max=315.1)

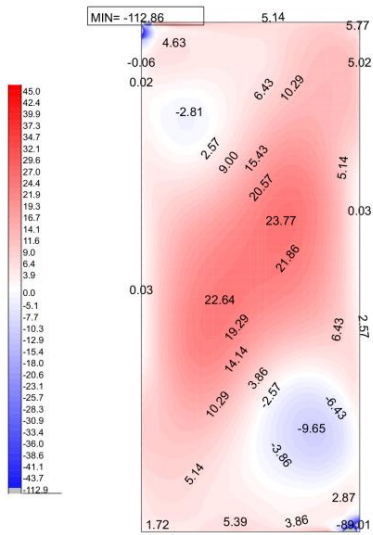
Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden



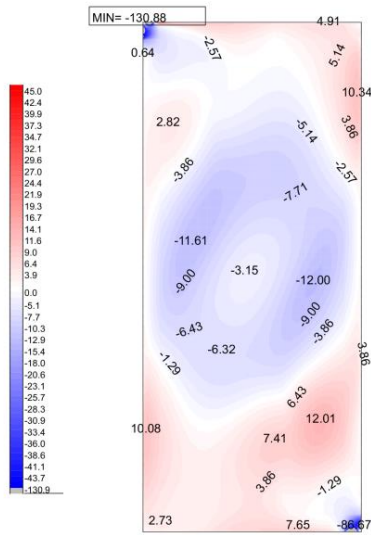
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 360 LF: H+Vg+W (Max=355.0)



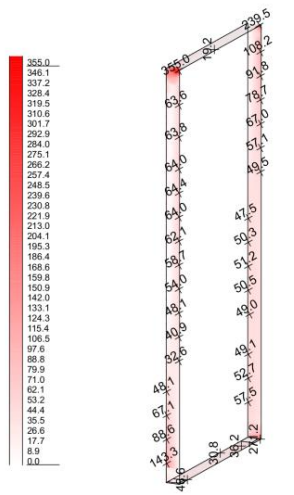
Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinearer Lastfall 360 LF: H+Vg+W (Max=272.5)



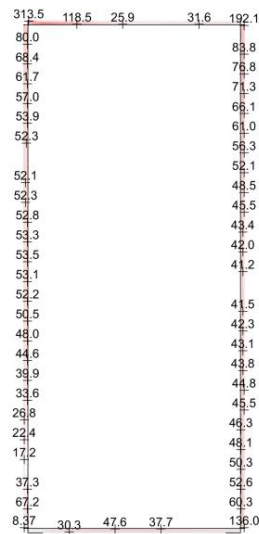
Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinearer Lastfall 361 LF: H+Vg+W , von -45.0 bis 25.2 Stufen 1.29 MPa



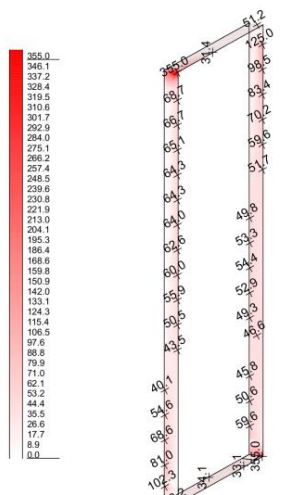
Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinearer Lastfall 361 LF: H+Vg+W , von -45.0 bis 28.1 Stufen 1.29 MPa



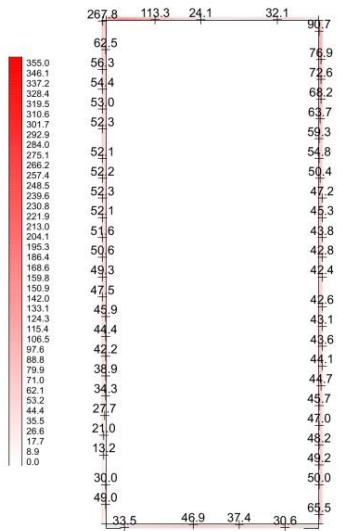
Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
 Lastfall 361 LF: H+Vg+W (Max=355.0)



Nichtlineare Vergleichsspannung oben im Element in MPa, nichtlinear
 Lastfall 361 LF: H+Vg+W (Max=313.5)



Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
 Lastfall 361 LF: H+Vg+W (Max=355.0)

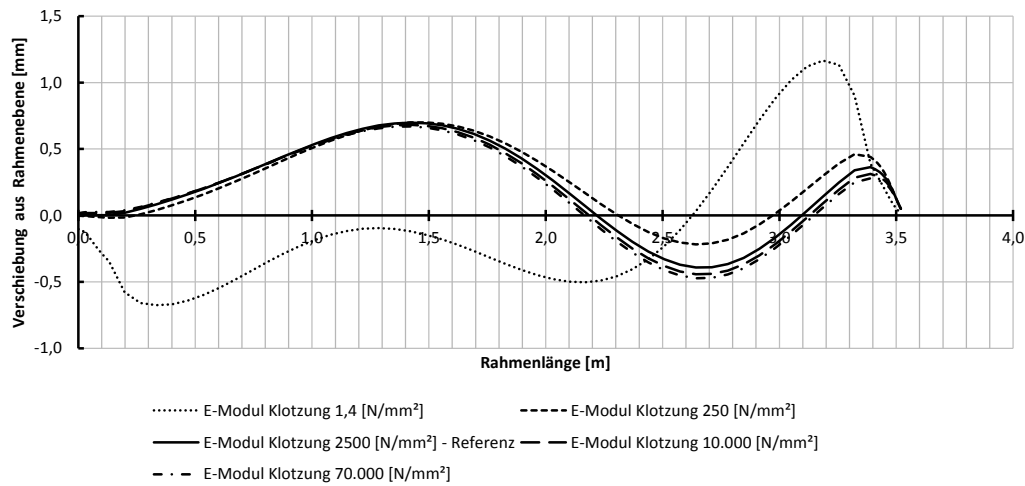


Nichtlineare Vergleichsspannung unten im Element in MPa, nichtlinear
 Lastfall 361 LF: H+Vg+W (Max=267.8)

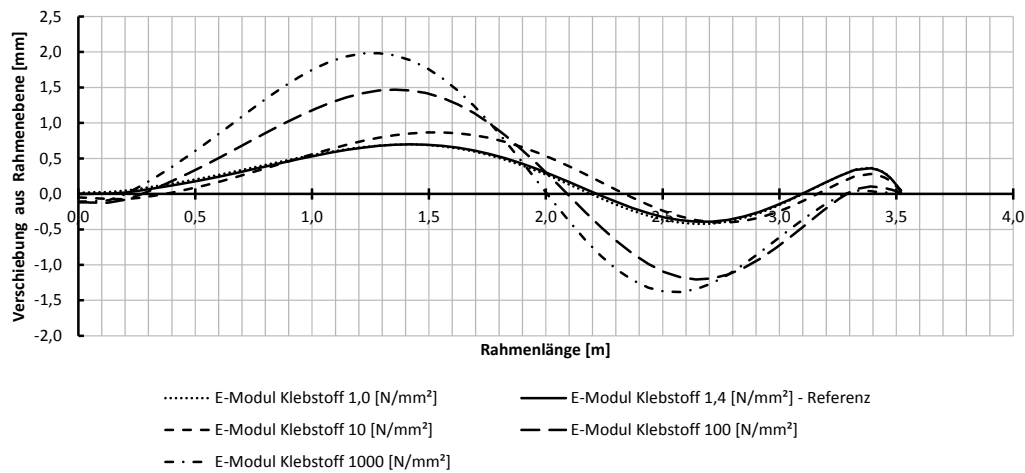
14.2 Verschiebung aus der Ebene – Rahmen

Es werden nur jene Verschiebungsgrafiken dargestellt, welche nicht bereits in der Arbeit enthalten sind.

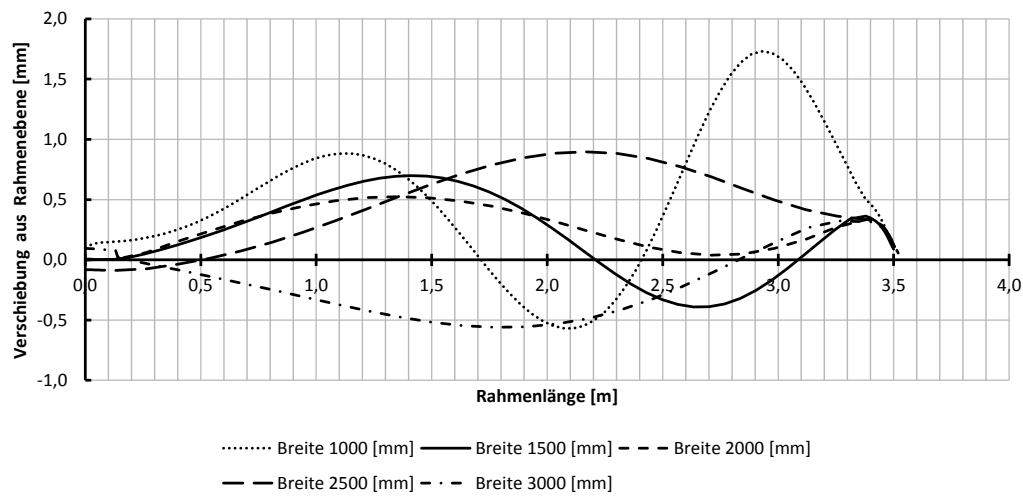
14.2.1 E-Modul Klotzung – System mit 2. Vorverformung



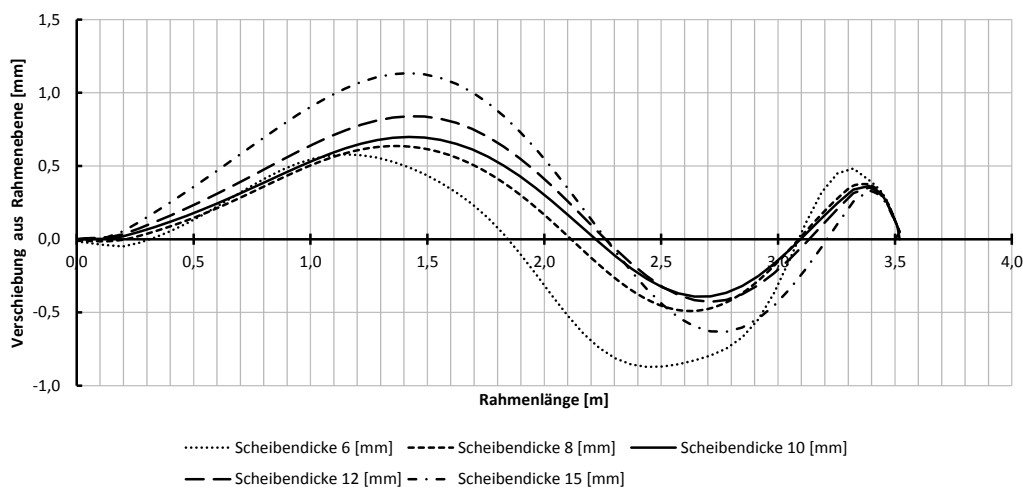
14.2.2 E-Modul Klebstoff – System mit 2. Vorverformung



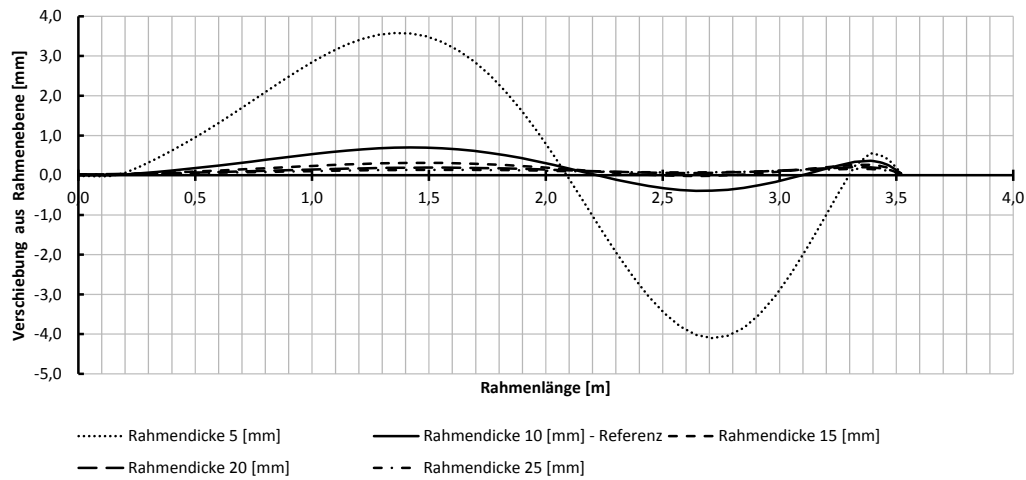
14.2.3 Scheibenbreite – System mit 2. Vorverformung



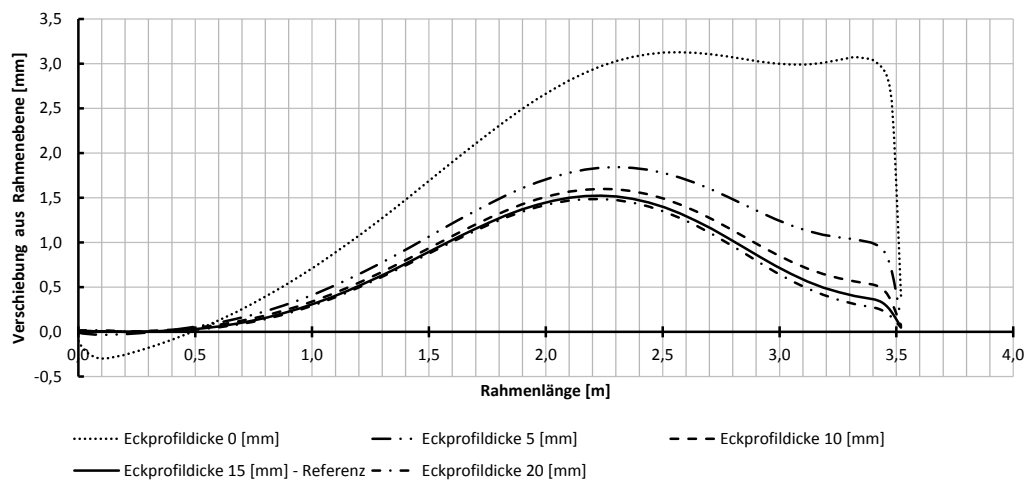
14.2.4 Scheibendicke – System mit 2. Vorverformung



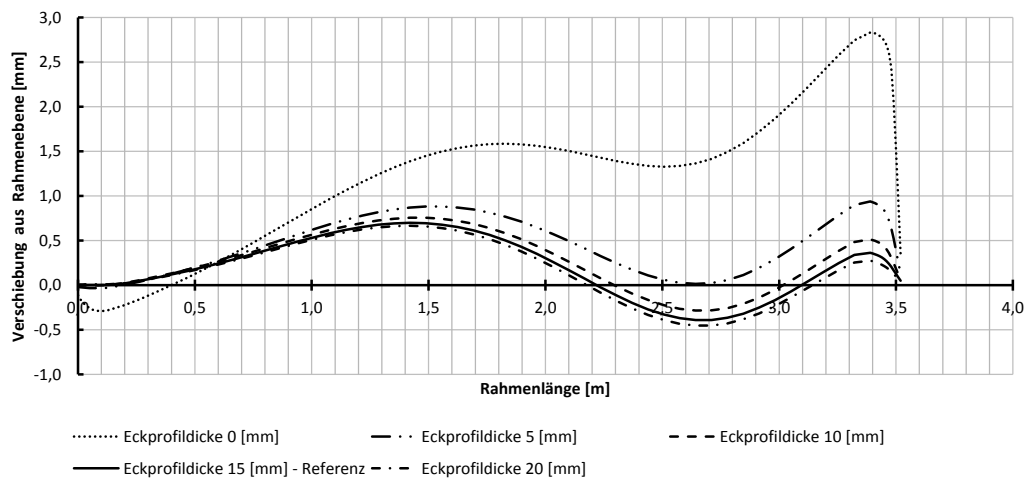
14.2.5 Rahmendicke – System mit 2. Vorverformung



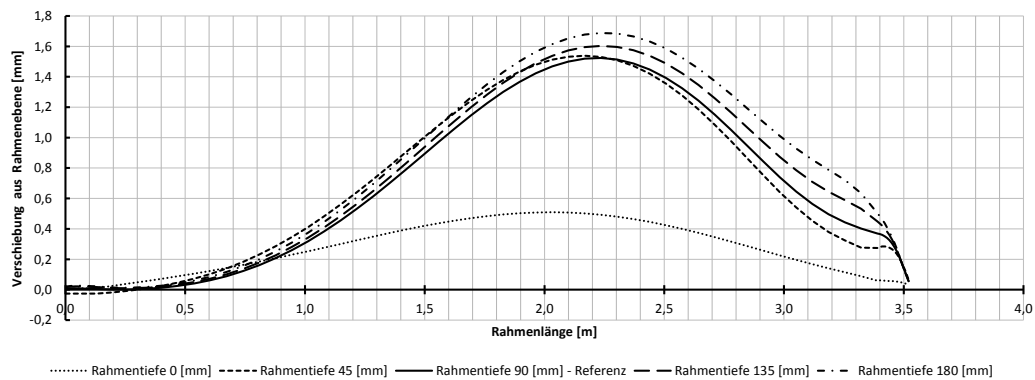
14.2.6 Rahmeneckprofildicke – System mit 1. Vorverformung



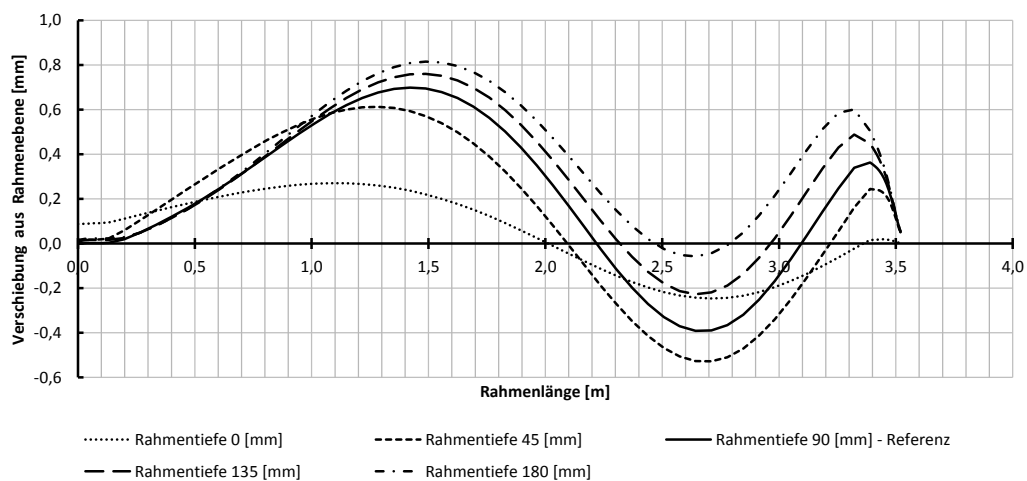
14.2.7 Rahmeneckprofildicke – System mit 2. Vorverformung



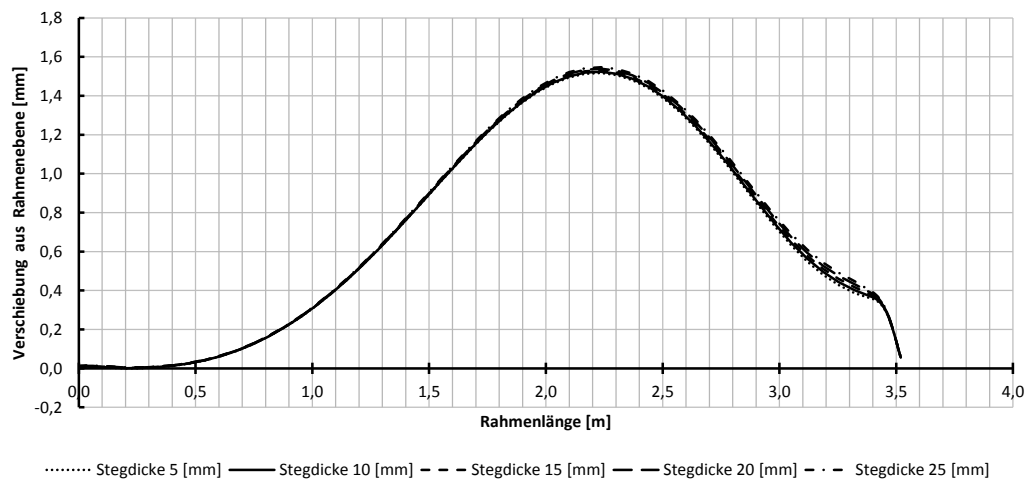
14.2.8 Rahmentiefe – System mit 1. Vorverformung



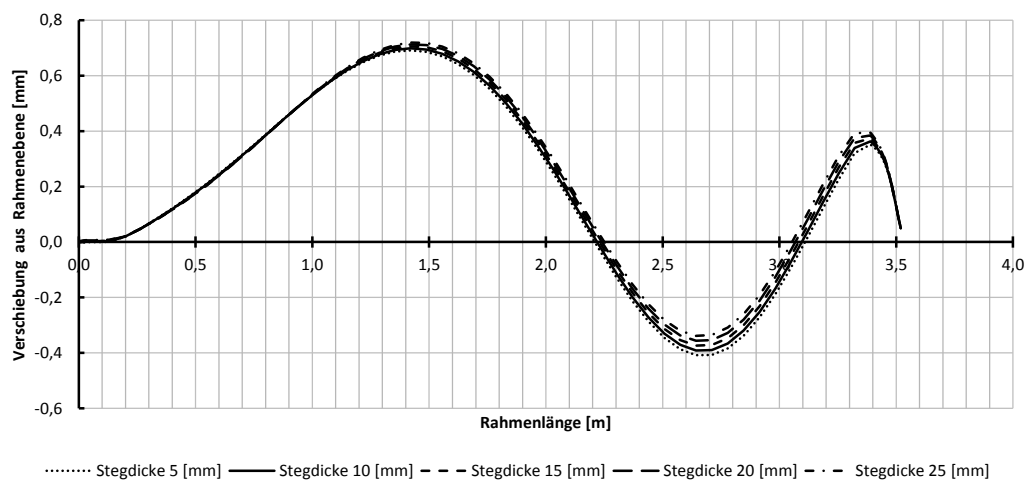
14.2.9 Rahmentiefe – System mit 2. Vorverformung



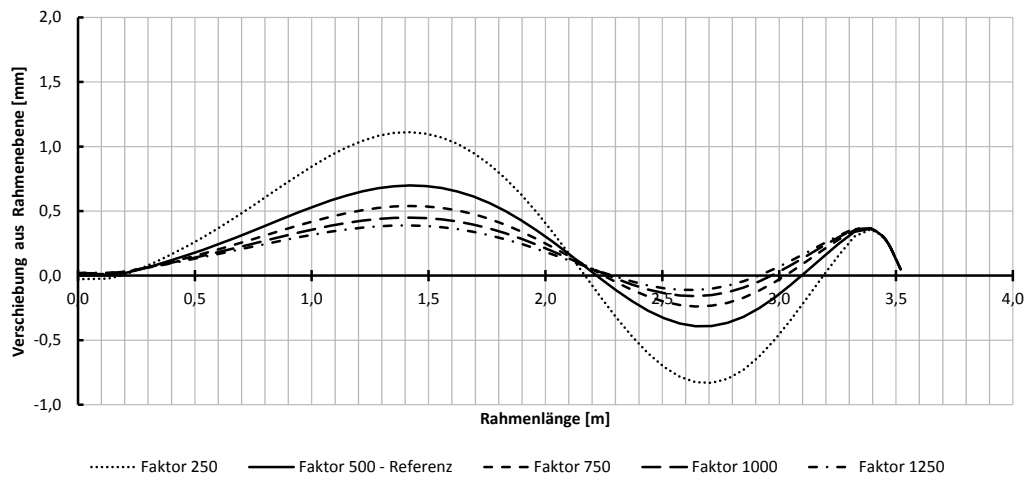
14.2.10 Rahmenstegdicke – System mit 1. Vorverformung



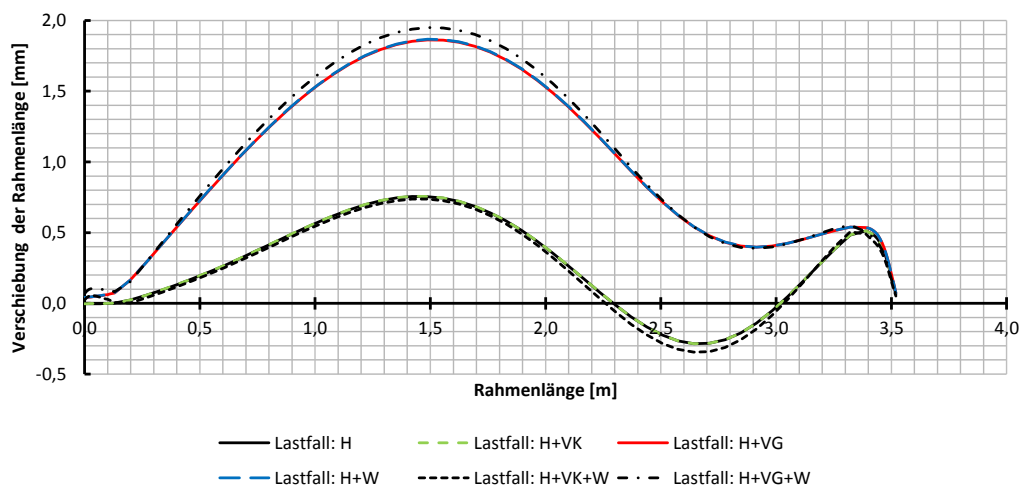
14.2.11 Rahmenstegdicke – System mit 2. Vorverformung



14.2.12 Vorverformungsfaktor – System mit 2. Vorverformung



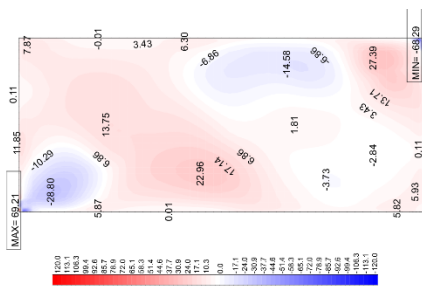
14.2.13 Lastfallkombination – System mit 2. Vorverformung



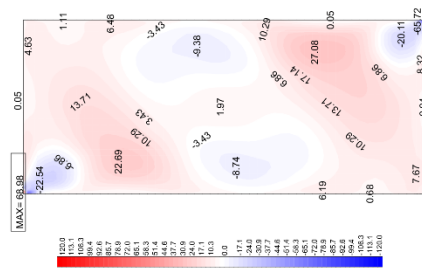
14.3 Hauptspannungsbilder für das System mit der VSG-Scheibe

Die folgenden Seiten bis zur Dokumentation der Eingabe sind als Querformat zu lesen. Die ersten beiden Bilder zeigen die Hauptspannungen an der Oberseite und Unterseite der hinteren Scheibe (links unten im Eck beginnend). Die beiden Bilder daneben zeigen die Hauptspannungen der vorderen Scheibe. Die Grafiken darunter zeigen die Hauptspannungen für das System mit der 2. Vorverformung.

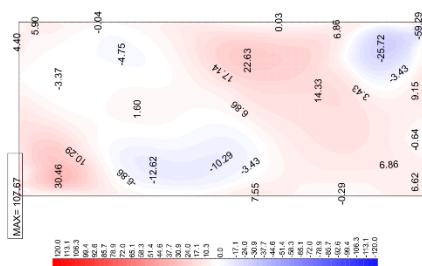
14.3.1.1 2 x 6 mm mit G-Modul von 0,004 N/mm²



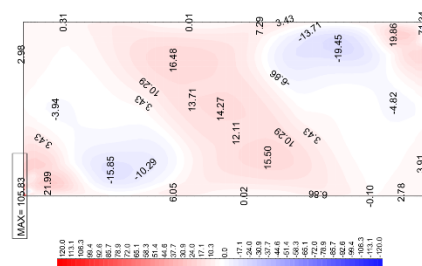
Hauptspannungsbild (oben) aus der Ebene z=0, nach vorne



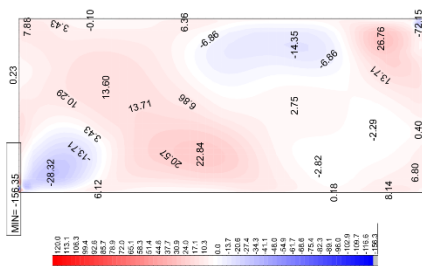
Hauptspannungsbild (unten) aus der Ebene z=0, nach hinten



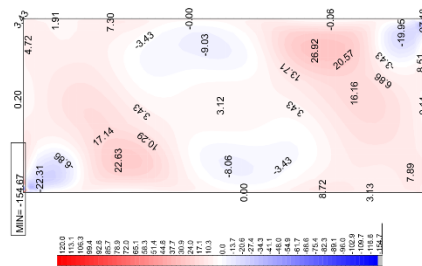
Hauptspannungsbild (oben) aus der Ebene z=1, nach vorne



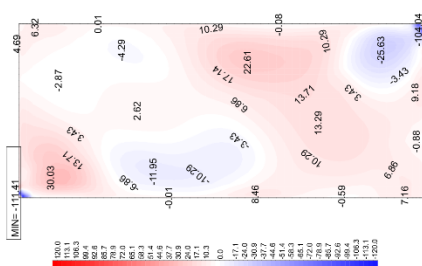
Hauptspannungsbild (unten) aus der Ebene z=1, nach hinten



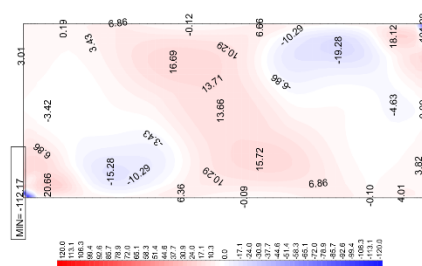
Hauptspannungsbild (oben) aus der Ebene z=0, nach vorne



Hauptspannungsbild (unten) aus der Ebene z=0, nach hinten

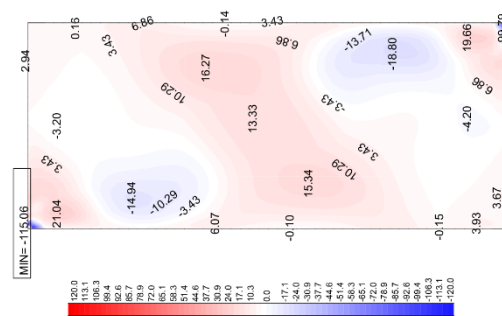
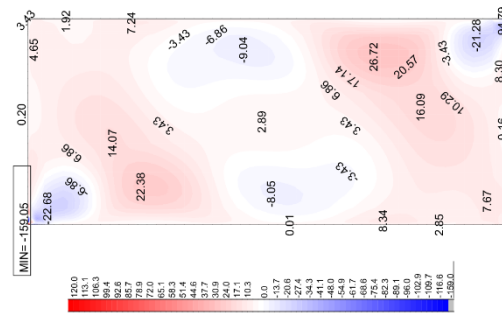
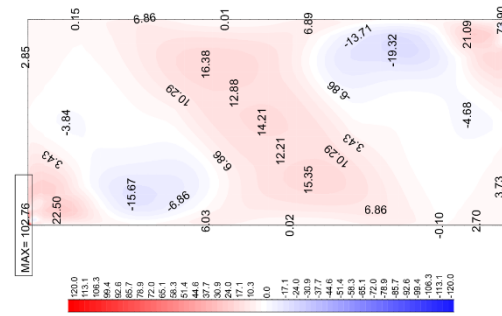
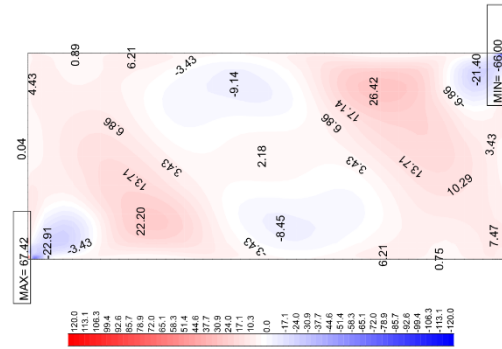
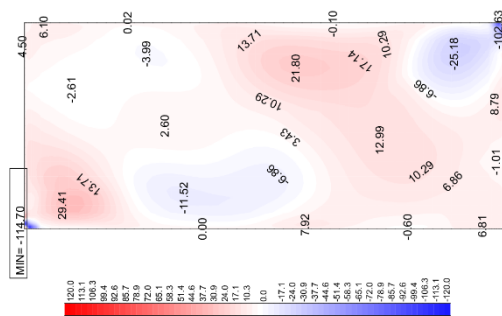
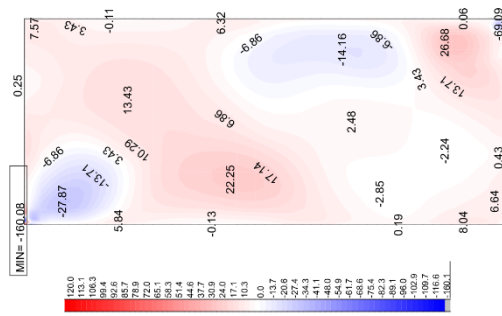
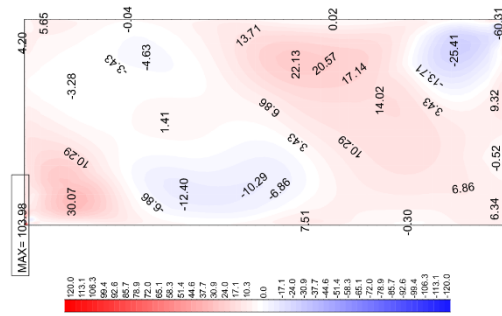
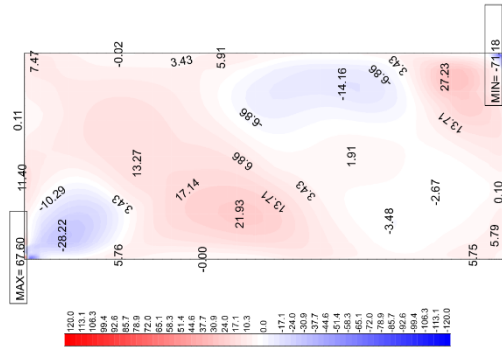


Hauptspannungsbild (oben) aus der Ebene z=1, nach vorne



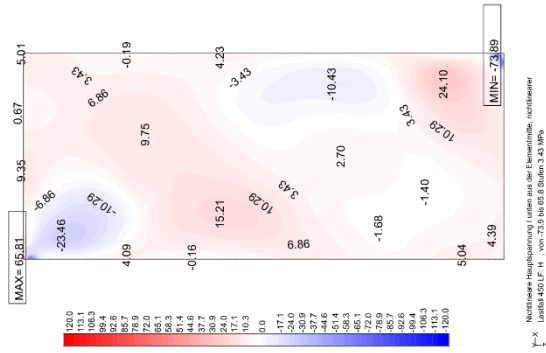
Hauptspannungsbild (unten) aus der Ebene z=1, nach hinten

14.3.1.2 2 x 6 mm mit G-Modul von 0,04 N/mm²

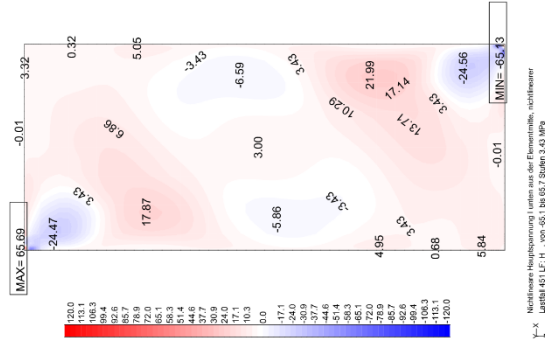


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

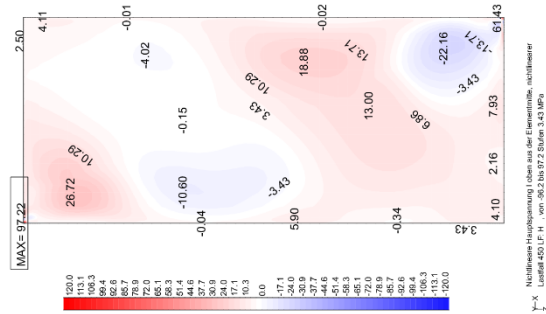
14.3.1.3 2 x 6 mm mit G-Modul von 0,4 N/mm²



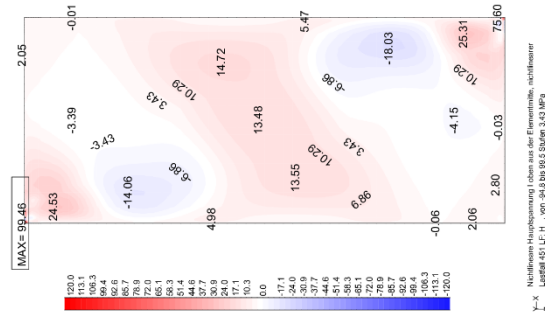
Nichtlineare Hauptspannung (oben) aus der Elementmitte, nichtlinear



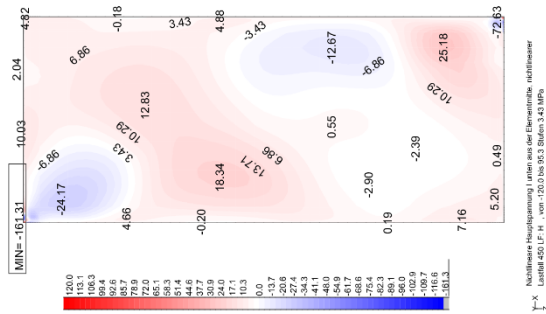
Nichtlineare Hauptspannung (oben) aus der Elementmitte, nichtlinear



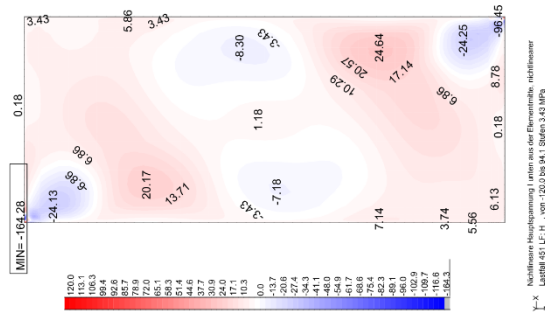
Nichtlineare Hauptspannung (oben) aus der Elementmitte, nichtlinear



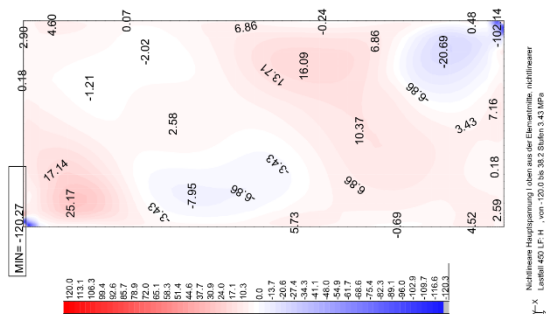
Nichtlineare Hauptspannung (oben) aus der Elementmitte, nichtlinear



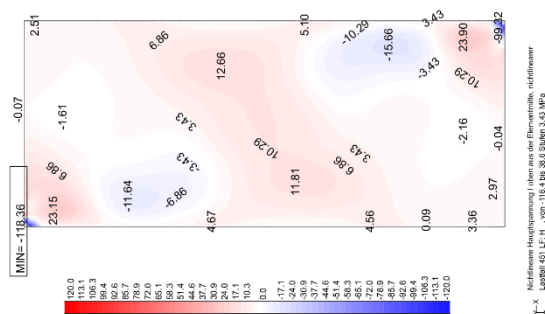
Nichtlineare Hauptspannung (unten) aus der Elementmitte, nichtlinear



Nichtlineare Hauptspannung (unten) aus der Elementmitte, nichtlinear

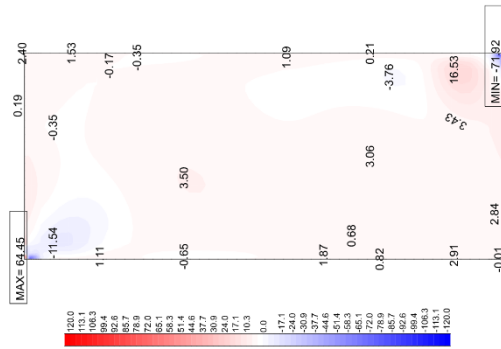


Nichtlineare Hauptspannung (unten) aus der Elementmitte, nichtlinear

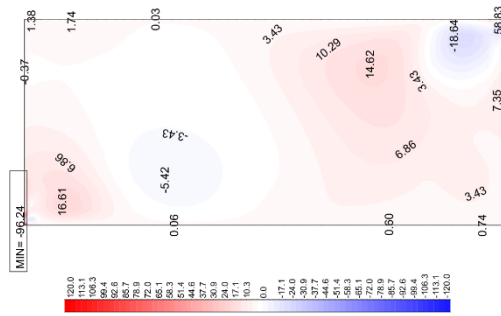


Nichtlineare Hauptspannung (unten) aus der Elementmitte, nichtlinear

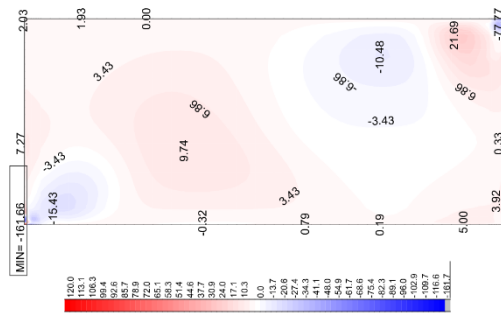
14.3.1.4 2 x 6 mm mit G-Modul von 4 N/mm²



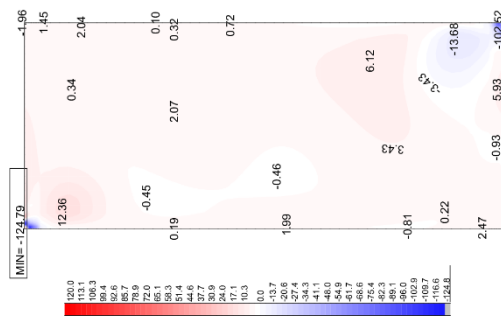
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 451 LP-H von -71.1 bis 64.4 Stufen 3.43 MPa



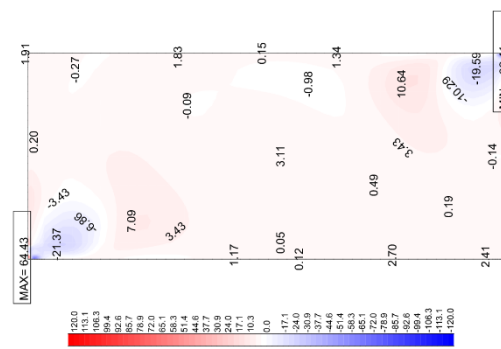
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 451 LP-H von -95.2 bis 95.2 Stufen 3.43 MPa



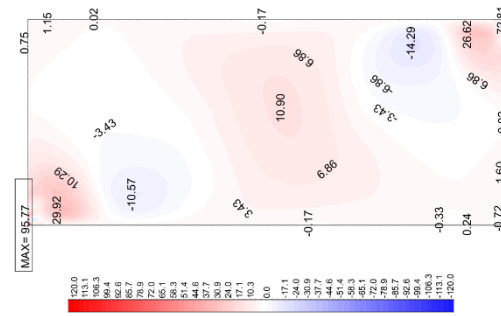
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 451 LP-H von -120.0 bis 164.7 Stufen 3.43 MPa



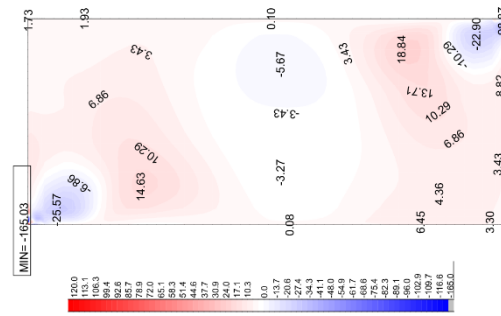
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 451 LP-H von -120.0 bis 38.1 Stufen 3.43 MPa



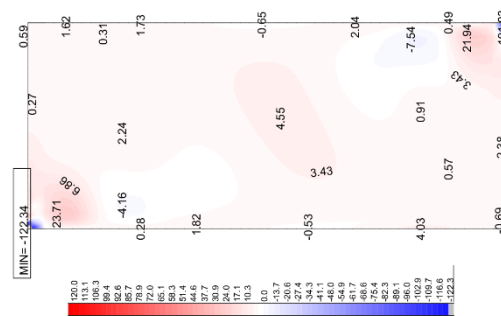
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 451 LP-H von -62.4 bis 64.4 Stufen 3.43 MPa



Y-X Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 451 LP-H von -95.4 bis 95.6 Stufen 3.43 MPa



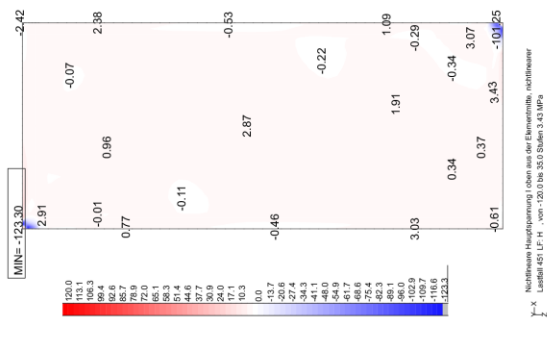
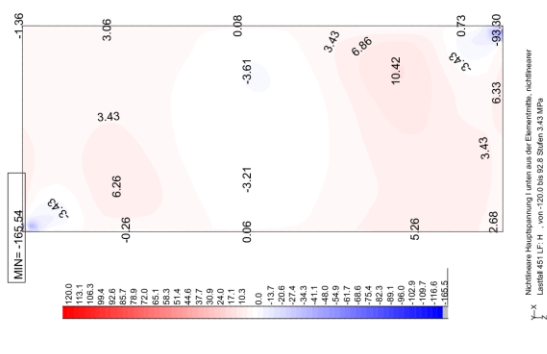
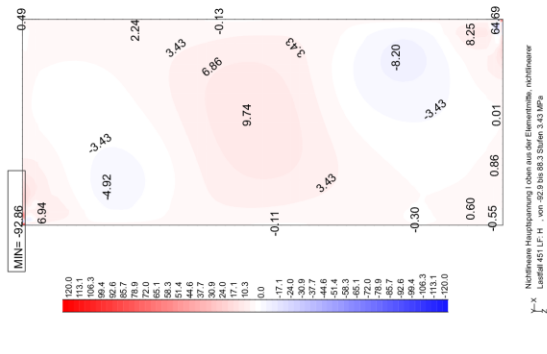
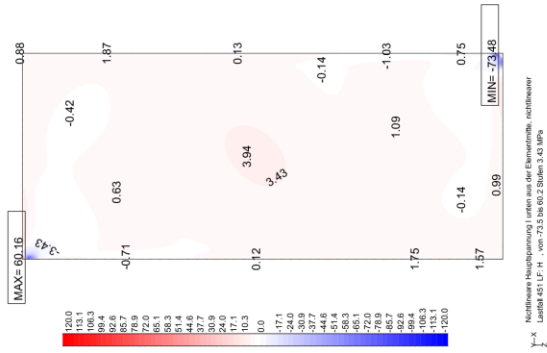
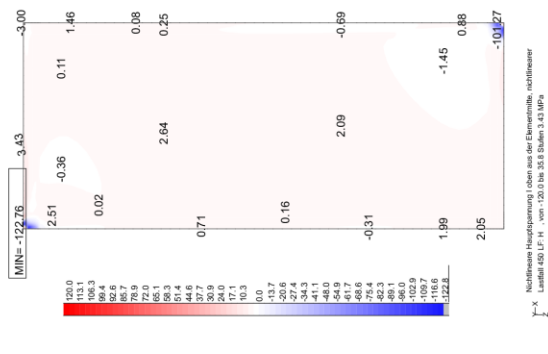
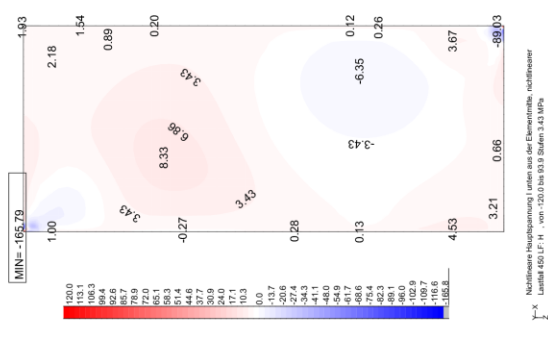
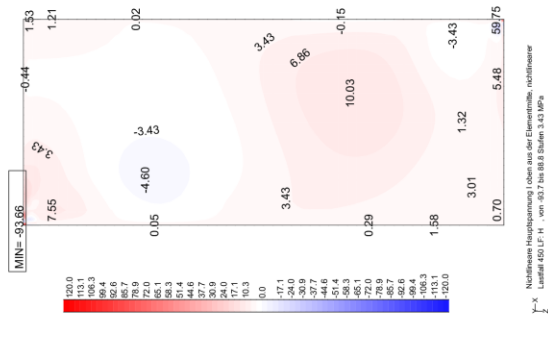
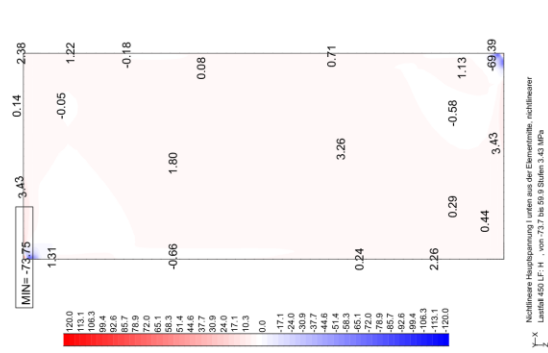
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I unten aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 451 LP-H von -120.0 bis 94.7 Stufen 3.43 MPa



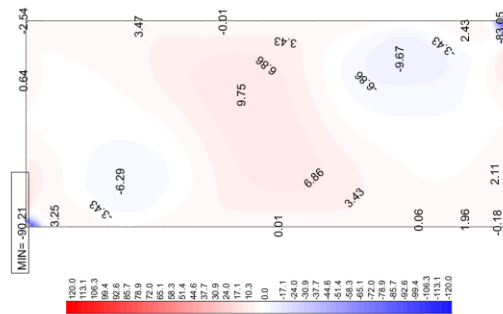
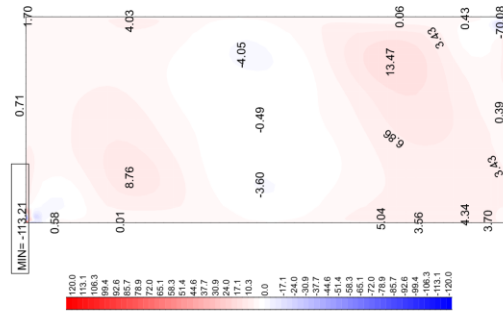
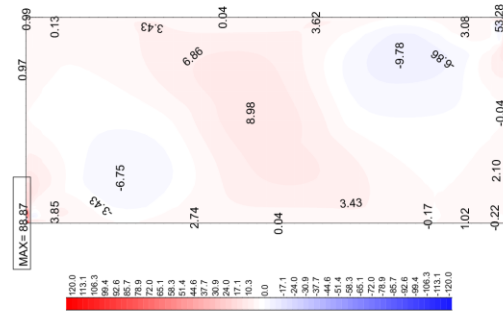
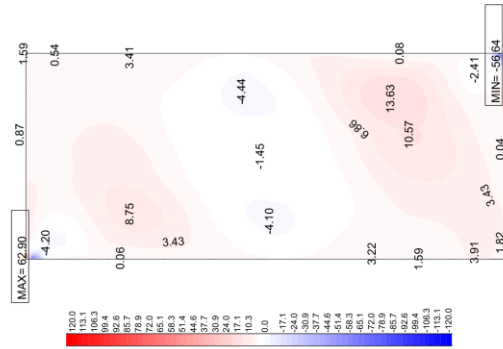
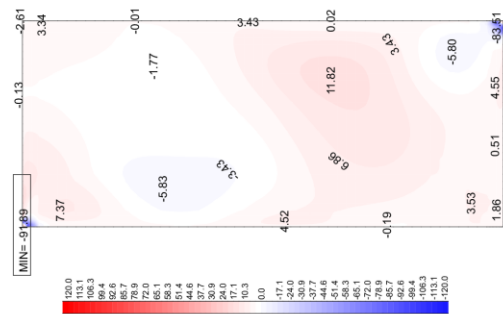
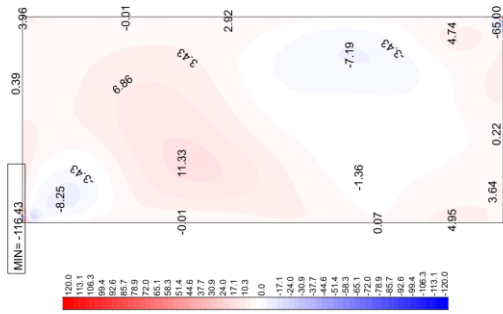
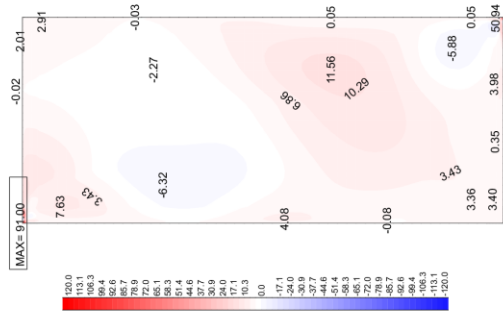
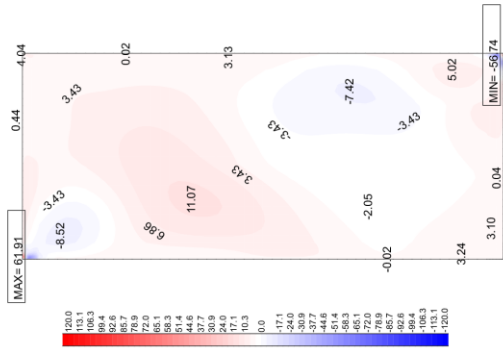
Y-X Nichtlineare Hauptspannung I oben aus der Elementmitte, nichtlinear
Lastfall 451 LP-H von -120.0 bis 38.1 Stufen 3.43 MPa

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

14.3.1.5 2 x 6 mm mit G-Modul von 40 N/mm²

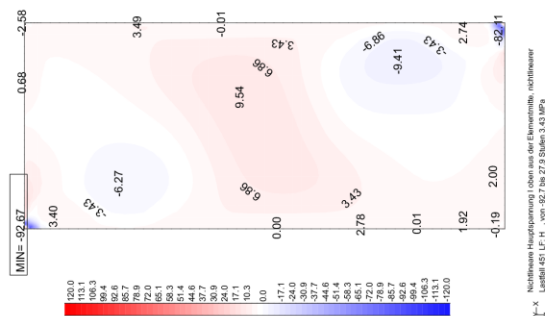
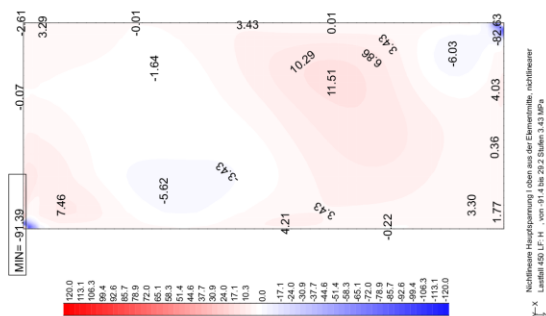
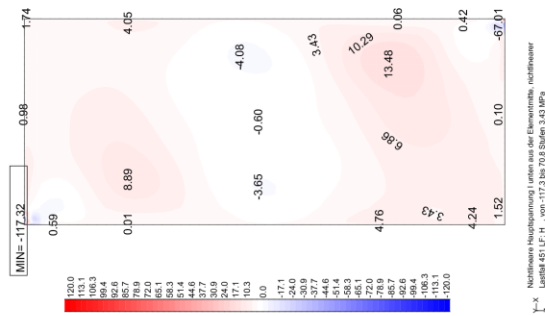
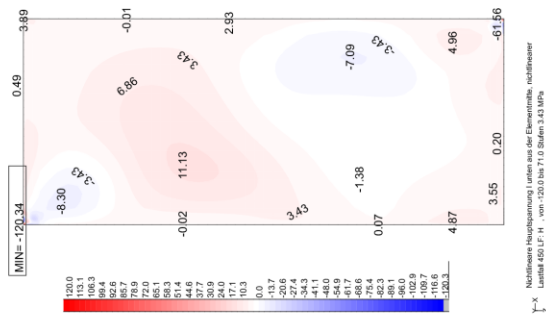
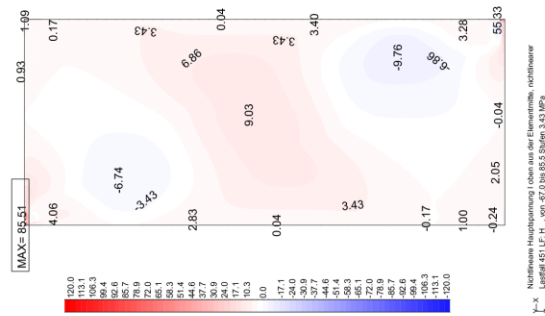
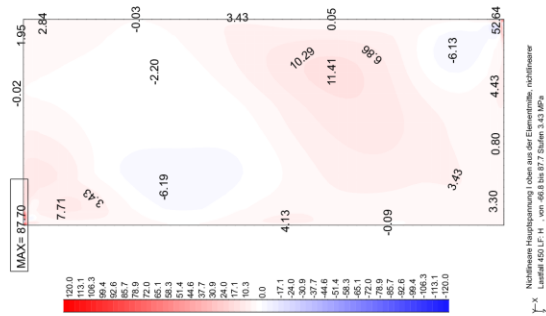
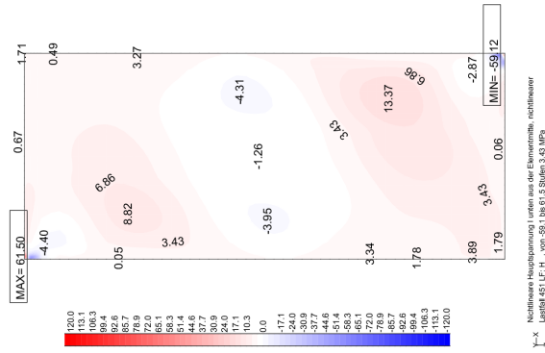
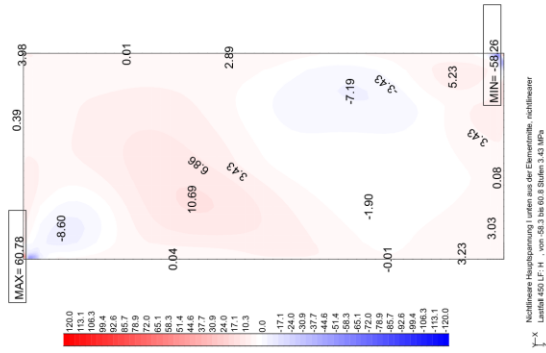


14.3.1.6 2 x 8 mm mit G-Modul von 0,004 N/mm²

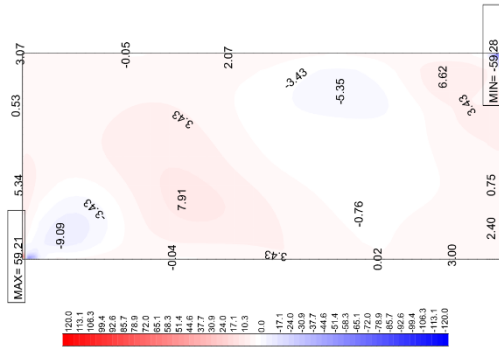


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

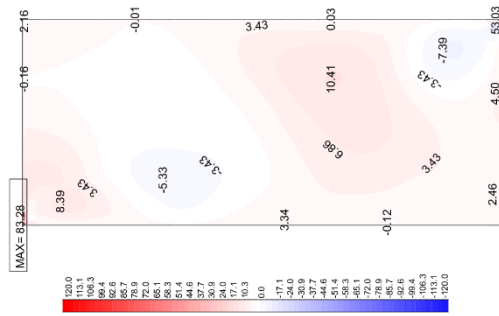
14.3.1.7 2 x 8 mm mit G-Modul von 0,04 N/mm²



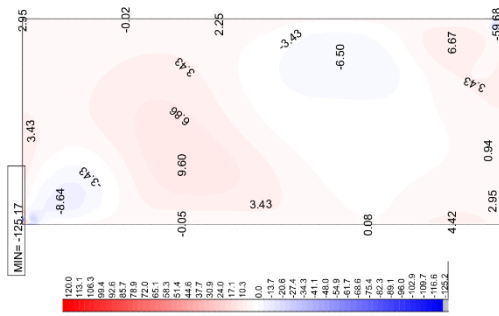
14.3.1.8 2 x 8 mm mit G-Modul von 0,4 N/mm²



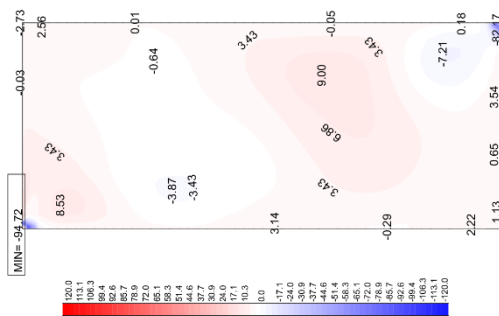
Y-X Nichtlineare Hauptspannung (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)
Lastfall 450 LP-H von -59.3 bis 59.2 Stufen 3.43 MPa



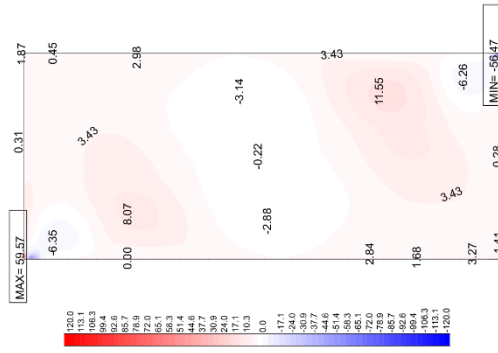
Y-X Nichtlineare Hauptspannung (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)
Lastfall 450 LP-H von -68.8 bis 83.3 Stufen 3.43 MPa



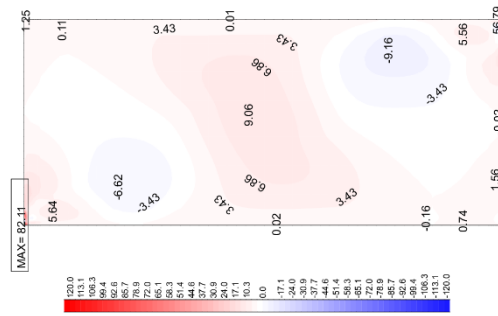
Y-X Nichtlineare Hauptspannung (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)
Lastfall 450 LP-H von -120.0 bis 86.0 Stufen 3.43 MPa



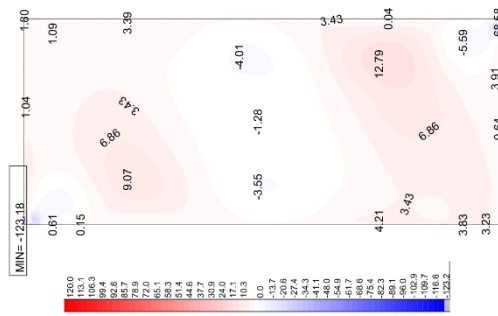
Y-X Nichtlineare Hauptspannung (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)
Lastfall 450 LP-H von -84.7 bis 28.6 Stufen 3.43 MPa



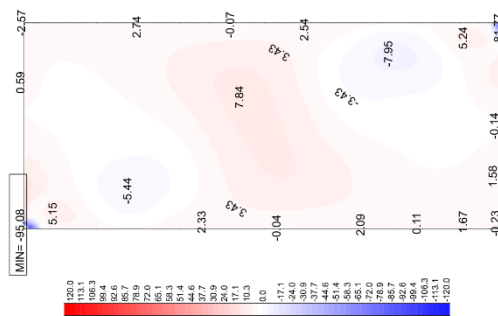
Y-X Nichtlineare Hauptspannung (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)
Lastfall 451 LP-H von -56.6 bis 59.6 Stufen 3.43 MPa



Y-X Nichtlineare Hauptspannung (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)
Lastfall 451 LP-H von -64.7 bis 82.1 Stufen 3.43 MPa



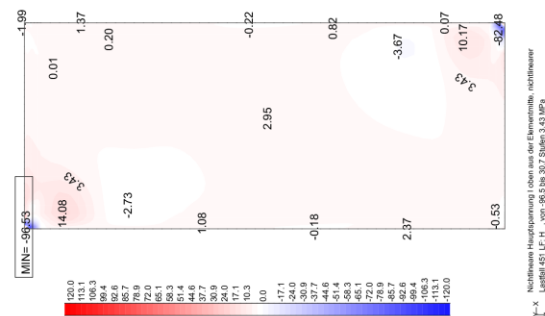
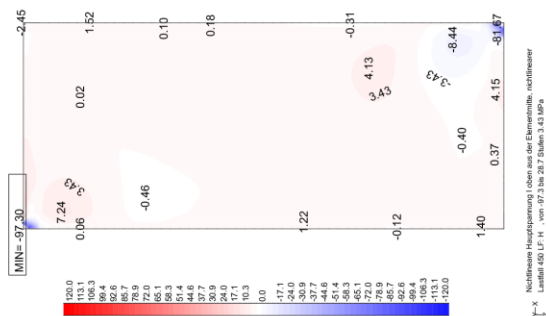
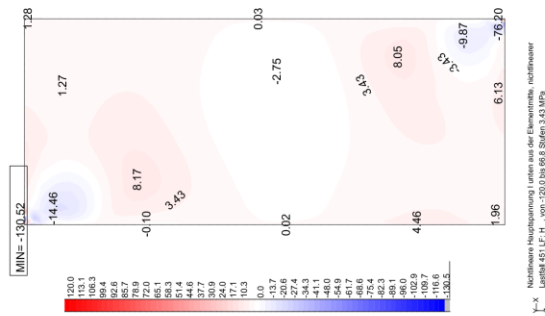
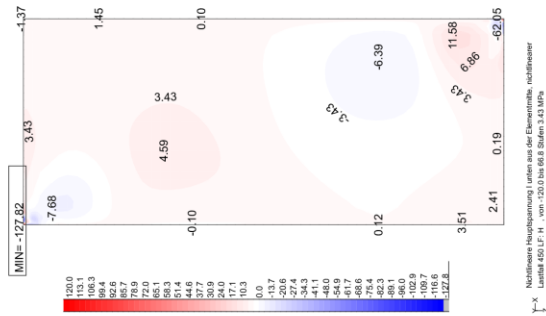
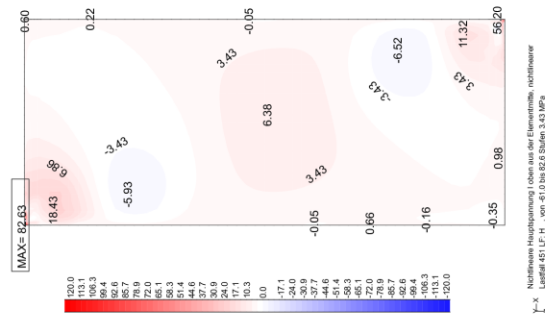
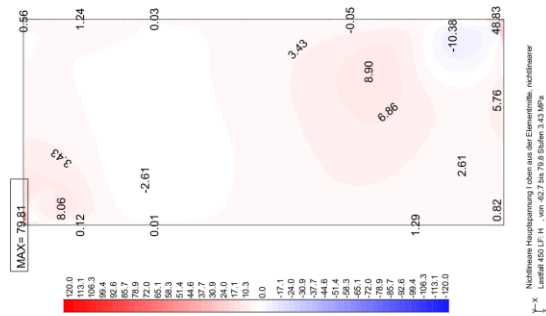
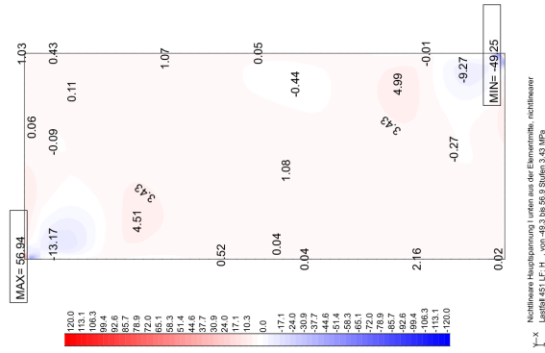
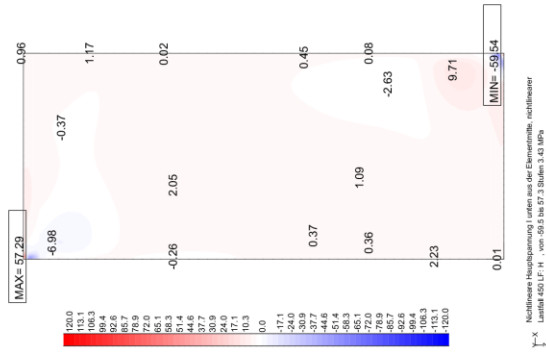
Y-X Nichtlineare Hauptspannung (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)
Lastfall 451 LP-H von -120.0 bis 67.9 Stufen 3.43 MPa



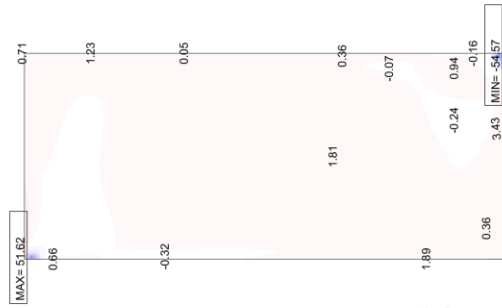
Y-X Nichtlineare Hauptspannung (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)
Lastfall 451 LP-H von -85.1 bis 28.6 Stufen 3.43 MPa

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

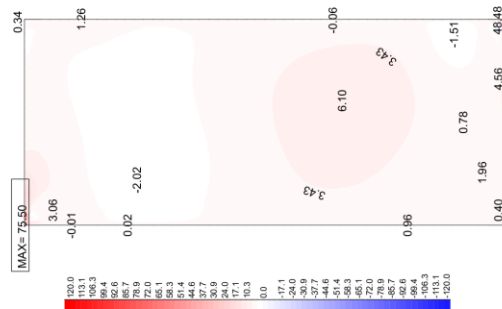
14.3.1.9 2 x 8 mm mit G-Modul von 4 N/mm²



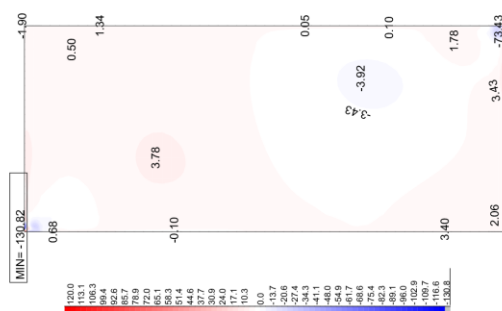
14.3.1.10 2 x 8 mm mit G-Modul von 40 N/mm²



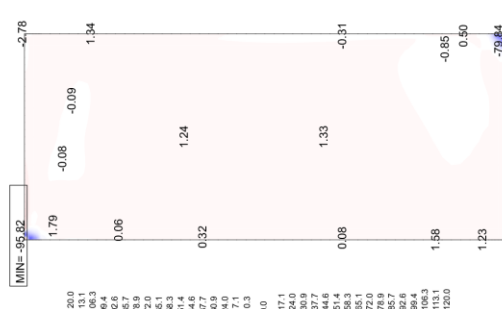
Y-X Lastfall 450 LF-H, von -54.6 bis 51.6 Stufen 3.43 MPa
Nichtlineare Hauptspannung I (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)



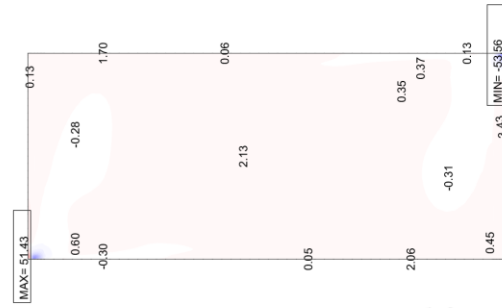
Y-X Lastfall 451 LF-H, von -0.9 bis 75.5 Stufen 3.43 MPa
Nichtlineare Hauptspannung I (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)



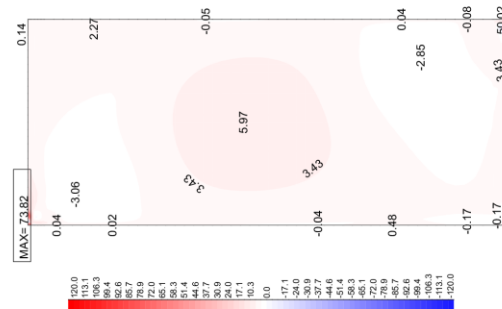
Y-X Lastfall 452 LF-H, von -120.0 bis 0.1 Stufen 3.43 MPa
Nichtlineare Hauptspannung I (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)



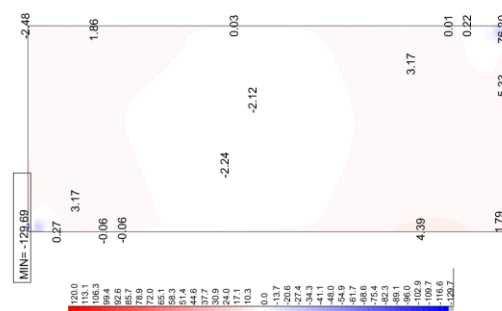
Y-X Lastfall 453 LF-H, von -95.8 bis 2.5 Stufen 3.43 MPa
Nichtlineare Hauptspannung I (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)



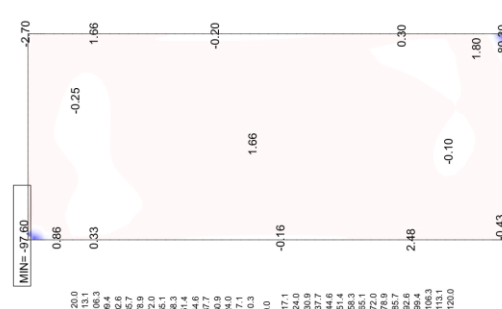
Y-X Lastfall 454 LF-H, von -53.6 bis 51.4 Stufen 3.43 MPa
Nichtlineare Hauptspannung I (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)



Y-X Lastfall 455 LF-H, von -0.1 bis 73.8 Stufen 3.43 MPa
Nichtlineare Hauptspannung I (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)



Y-X Lastfall 456 LF-H, von -120.0 bis 0.2 Stufen 3.43 MPa
Nichtlineare Hauptspannung I (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)



Y-X Lastfall 457 LF-H, von -97.6 bis 2.5 Stufen 3.43 MPa
Nichtlineare Hauptspannung I (oben aus der Elementmitte, nichtlinear)

14.4 Dokumentation der Eingabe in Teddy für das Referenzmodell:

```
$ Löschen der alten Datenbank
+sys del $(projekt).cdb

!#Kapitel Eingangsgrößen
$#####
$ Definition der Variablen
$#####

!*!Label Variablendefinition

$ Eingabe der Geometrie + erf. Steifigkeiten

$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$ (Standard SI-Einheit kN,m)
$!!! Einheit [m] und [kN] !!!$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$

$ Scheibenabmessungen [m]
#define hs= 3.5 $ Scheibenhöhe
#define bs= 1.5 $ Scheibenbreite
#define ds= 0.010 $ Scheibenstärke

$ Verformungsfaktor f. Eigenform
#define fakt= 500 $ z.B.: H/500 für spannungslose Vorverformung

$ Faktor Anzahl Elemente für vert.Last
#define ells= 2.6 $ [kN] ein Element hat 0,263 tonnen = ca. 2,6 kN (aus Rep.Browser)
#define anel= 1 $ Anzahl der einwirkenden Elemente

$ Klotzung [m]
#define lk= 0.1 $ Klotzungslänge [m] in x-Richtung
#define bk= 0.022 $ Klotzungsbreite [m] in y-Richtung (nur für Steifigkeitsermittlung,
$ --> keine Auswirkung auf Geometrie)
#define hk= 0.01 $ Klotzungsstärke [m] in z-Richtung
#define ak= 0.02 $ Klotzungsabstand vom Scheibenrand
#define Eklo= 2500e3 $ POM [kN/m²]

$#define faktor= 1
$#define mue= 0.2

$ Netzgenerierung/Teilung
$ Scheibe:
#define teil_f= 10 $ Netzfeinheit Randbereich (Klotzungsbereich)
#define teil_g= 12 $ Netzfeinheit 1/2 Kernbereich der Scheibe

$ Rahmenprofil:
#define teil_rahmen_vorne= 1 $ vorderer Teil des Flansch
#define teil_rahmen_hinten= 8 $ hinterer Teil des Flansch
#define teil_steg= 3 $ Stegteilung

#define k_anz= 7 $ Knotenanzahl Scheibe
#define gdiv= 10000 $ Gruppendivisor

$ Klebung [m]
#define hkle= 0.02 $ Breite der Verklebung zRichtung --> max. Klotzungsbreite!
#define tkle= 0.006 $ Dicke der Verklebung yRichtung
#define nue= 0.5 $ Querdehnzahl der Klebung (nur für die Berechnung des Schubmoduls!)
#define Ekle= 1.4e3 $ E-Modul Klotzung [kN/m²] (1 N/mm² = 1000 kN/m²)

$ Rahmendefinition
$Steg [m]
#define rts= 0.01 $ Stärke Steg

$Flansch [m]
#define ue_glas= 0.006 $ Überstand vor Glas
#define breiteFL= 0.09 $ Breite Flansch hinten
#define rtf= 0.01 $ Stärke Flansch
```

```

$ Flansch Rahmeneckprofil [m]
#define e_tf= 0.01                                $ Rahmeneckprofilstärke (Rahmeneck = Rahmeneckprofil+ Flanschdicke)

$ Lasten
#define p1= 1.0                                  $ Windsog [kN/m2]
#define p2= 50                                   $ Knotenlast horizontal [kN]
#define p3= -1.0                                  $ Winddruck [kN/m2]
#define p4= ($(ellast)*$(anzel))                 $ Knotenlast vertikal [kN]
#define p5= 1                                     $ Beullast [kN] - horizontale Knotenlast
#define p6 = 2                                    $ Verformung in [mm]
#define steps = 30                               $ Anzahl Schritte für Iteration

!$Label Berechnung der erf. Werte
$#####
$Berechnung der erforderlichen Werte:
$#####

$Klotzung [m]
#define cpklo= (($Ekle)*$(bk))/$(hk)             $ Federsteifigkeit Klotzung [kN/m2]

$Klebung [m]
#define Gkle= (($Ekle)/(2*(1+$nue)))             $ [kN/m²] G-Modul Klotzung

$Federeigenschaften
#define cpkleE= (($Ekle))/$(tkle)               $ Federsteifigkeit Klebung in Federrichtung [kN/m3]
#define cpkleG= (($Gkle))/$(tkle)              $ Federsteifigkeit Klebung quer zur Federrichtung [kN/m3]

$Flansch [m]
#define rbf1= ($(ds)/2+$(ue_glas))              $ Breite-Flansch vor Glasscheibe
#define rbf2= ($(ds)/2+$(tkle))                $ Breite-Flansch von Steg zu Flansch
#define rbf3= ($(rts)+$(breiteFL))

$Flansch Rahmeneck [m]
#define e_bf= ($(rbf2)+$(rbf1)+$(rbf3))

$Eckprofil
#define t_eck= ($(rtf)+$(e_tf))                 $ Dicke Eckprofil + Flanschdicke

$#####
$ Material
$#####

!$Kapitel System
+prog aqua urs:1
KOPF Material- & Querschnittsdefinition
NORM OEN EN1993-2005 Cat A                       $ Stahlbaunorm CAT A = Hochbau,
                                                $ Unit 0 Standard SI-Einheiten
                                                $ (Abmessungen in m und Lasten in kN)
                                                $ Zur Ausgabe der Materialeigenschaften

echo mat voll
stah 1 S 355

!$Label Arbeitslinie

$Arbeitslinie für linear elastisch - ideal plastisch
$Materialwerte:
$ S355

sto#Es 210000 $[MPa]
sto#ft 490 $[MPa]
sto#fy 355 $[MPa]
sto#Eplast (#Es/100) $[o/oo]
sto#dehnEl (#fy/#ES*1000) $[o/oo]

arbl BRUC typ ext
-1000 -#fy
-#dehnEl -#fy

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
0          0
#dehnEl    #fy
1000       #fy

arbl GEBR typ ext
-1000      -#fy
-#dehnEl   -#fy
0          0
#dehnEl    #fy
1000       #fy

$$Arbeitslinie mit Wiederverfestigung
$arbl BRUC
$  -(#dehnEl+(#ft-#fy)/#Eplast*1000) -#ft
$  -#dehnEl                          -#fy
$  0                                  0
$  #dehnEl                            #fy
$  (#dehnEl+(#ft-#fy)/#Eplast*1000) #ft
$arbl GEBR
$  -(#dehnEl+(#ft-#fy)/#Eplast*1000) -#ft
$  -#dehnEl                          -#fy
$  0                                  0
$  #dehnEl                            #fy
$  (#dehnEl+(#ft-#fy)/#Eplast*1000) #ft

$Materialdefintion:
MATE 11 TYP ESG fy 120 ft 120 BEZ 'ESG'

$Auswahl:
sto#mat 11

$Teilung Profil:
sto#t_vorne $(teil_rahmen_vorne)
sto#t_hinten $(teil_rahmen_hinten)
sto#t_prof_steg $(teil_steg)
ENDE

#####
$ Struktur
#####

+prog sofimsha urs:2
kopf Glasscheibe
syst 3D gdiv $(gdiv)
echo voll ja

#####
$ Knoten - Scheibendefinition
#####

$Symmetrie in Scheibenmitte

let#x ($(bs)/2)*(-1), ($(bs)/2-$ak)*(-1), ($(bs)/2-$ak)-$(lk))*(-1), 0, $(bs)/2-$ak)-$(lk), $(bs)/2-$ak), $(bs)/2
let#z ($(hs)/2)*(-1), ($(hs)/2-$ak)*(-1), ($(hs)/2-$ak)-$(lk))*(-1), 0, $(hs)/2-$ak)-$(lk), $(hs)/2-$ak), $(hs)/2
let#y 0 $Könnte Dicke der Scheibe eingegeben werden

$Teilung
let#te_x 1,$(teil_steg),$(teil_f),$(teil_g),$(teil_g),$(teil_f),$(teil_steg),1
let#te_z 1,$(teil_steg),$(teil_f),$(teil_g)*div($(hs)/$(bs)), $(teil_g)*div($(hs)/$(bs)), $(teil_f),$(teil_steg),1

!#!Label Knoten
```

```

#####
$ Knoten - Rahmendefinition
#####

$ Rahmen horizontal 5 Knoten in x
let#xrh $(bs)/2-$(ak))*(-1),$(bs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$(bs)/2-$(ak)-$(lk)),$(bs)/2-$(ak))
let#zrh $(hs)/2+$(hk))*(-1),$(hs)/2+$(hk))
let#yrh $(rbf1),0,$(-$(rbf2)),(-$(rbf2)-$(rbf3))

$ Rahmen vertikal 9 Knoten in z
let#xrv $(bs)/2+$(hk),$(bs)/2+$(hk))*(-1)
let#zrv $(hs)/2+$(hk)+$(t_eck))*(-1),$(hs)/2+$(hk))*(-1),$(hs)/2-$(ak))*(-1),$(hs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,
$(hs)/2-$(ak)-$(lk)),$(hs)/2-$(ak)),$(hs)/2+$(hk)),$(hs)/2+$(hk)+$(t_eck))
let#yrv $(rbf1),0,$(-$(rbf2)),(-$(rbf2)-$(rbf3))

$ Steg horizontal
let#xsh $(bs)/2-$(ak))*(-1),$(bs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$(bs)/2-$(ak)-$(lk)),$(bs)/2-$(ak))
let#zsh $(hs)/2-$(hk1e))*(-1),$(hs)/2*(-1)),$(hs)/2),$(hs)/2-$(hk1e))
let#ysh -$(rbf2)

$ Steg vertikal
let#xsv $(bs)/2-$(hk1e))*(-1),$(bs)/2*(-1)),$(bs)/2),$(bs)/2-$(hk1e))
let#zsv $(hs)/2-$(ak))*(-1),$(hs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$(hs)/2-$(ak)-$(lk)),$(hs)/2-$(ak))
let#ysv -$(rbf2)

$ Länge für Knotenteilung des Rahmeneckelements
sto#lh (#xrv(0)-#xrh(4))
sto#lv (#zrv(7)-#zrv(6))
prt#lv $ Ausgabe im Report Browser zur Kontrolle
prt#lh

$-----
$ Knoten - Scheibe
sto#knot 1

let#k 0
loop $(k_anz)
  let#i 0
  loop $(k_anz)

    knot #knot*(#k+1)+#i*10 x #x(#k) y #y z #z(#i)
    $ let#k_prt #knot*(#k+1)+#i*10; prt#k_prt $ Ausgabe im Report Browser zur Kontrolle

  let#i #i+1
  endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Knoten - Rahmen hor.
sto#knotrh $(k_anz)*10+10
let#k 0
loop 5
  let#i 0
  loop 2
    let#j 0
    loop 4

      knot #knotrh*(#k+1)+#i*10+#j x #xrh(#k) y #yrh(#j) z #zrh(#i)
      let#j #j+1
      endloop
    let#i #i+1
    endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Knoten - Rahmen vert.
sto#knotrv #knotrh*5+100

```


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
let#k 0
loop 9
  let#i 0
  loop 2
    let#j 0
    loop 4

      knot #knotrv*(#k+1)+#i*10+#j x #xrv(#i) y #yrv(#j) z #zrv(#k)

    let#j #j+1
    endloop
  let#i #i+1
  endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Knoten - Steg
sto#knotsh #knotrv*9+100
sto#knotsv #knotsh*5+100
let#k 0
loop 5
  let#i 0
  loop 1
    let#j 0
    loop 4

      knot #knotsh*(#k+1)+#i*10+#j x #xsh(#k) y #ysh(#i) z #zsh(#j)
      knot #knotsv*(#k+1)+#i*10+#j x #xsv(#j) y #ysv(#i) z #zsv(#k)

    let#j #j+1
    endloop
  let#i #i+1
  endloop
let#k #k+1
endloop

!Label Quadelemente
$#####
$ Quadelemente
$#####
$-----
$ Scheibe mit Quadelementen

let#k 0
loop $(k_anz)-1)
  let#i 0
  loop $(k_anz)-1)
    grup 10 bez 'Scheibe'
    quad k1 #knot*(#k+1)+#i*10 k2 #knot*(#k+1)+(#i+1)*10 k3 #knot*(#k+2)+(#i+1)*10
    k4 #knot*(#k+2)+(#i)*10 lage mitt mnr #mat t $(ds)[m] m #te_z(#i+1) n #te_x(#k+1)

    let#i #i+1
    endloop
  let#k #k+1
  endloop

$-----
$ Flansch vorne mit Quadelementen horizontal

let#k 0
loop 4
  let#i 0
  loop 3
    let#go 1

      if #k==1
      let#go 0
```

```

elseif #k==2
  let#go 0
else
  let#go 1
endif
if #go==1
  if #i==2
    let#t_prof (#t_hinten)
  else
    let#t_prof (#t_vorne)
  endif
  grup 20 bez 'Rahmen'
  quad k1 #knotrh*(#k+1)+(#i) k2 #knotrh*(#k+1)+(#i+1)
  k3 #knotrh*(#k+2)+(#i+1) k4 #knotrh*(#k+2)+(#i)
  lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_x(#k+2) m #t_prof

  quad k1 #knotrh*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrh*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrh*(#k+2)+(#i+1)+10
  k4 #knotrh*(#k+2)+(#i)+10
  lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_x(#k+2) m #t_prof

endif

let#i #i+1
endloop
let#k #k+1
endloop
$-----
$ Rahmeneck horizontal

let#i 0
loop 3
  if #i==2
    let#t_prof (#t_hinten)
  else
    let#t_prof (#t_vorne)
  endif

  quad k1 #knotrh*(1)+#i k2 #knotrh*(1)+#i+1 k3 #knotrv*(2)+10+#i+1
  k4 #knotrv*(2)+10+#i lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] m #t_prof n div($(teil_f)*(#1h/$(lk)))
  quad k1 #knotrh*(5)+#i k2 #knotrh*(5)+#i+1 k3 #knotrv*(2)+#i+1
  k4 #knotrv*(2)+#i lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] m #t_prof n div($(teil_f)*(#1h/$(lk)))

  quad k1 #knotrh*(1)+10+#i k2 #knotrh*(1)+(10)+#i+1 k3 #knotrv*(8)+10+#i+1
  k4 #knotrv*(8)+10+#i lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] m #t_prof n div($(teil_f)*(#1h/$(lk)))
  quad k1 #knotrh*(5)+10+#i k2 #knotrh*(5)+(10)+#i+1 k3 #knotrv*(8)+#i+1
  k4 #knotrv*(8)+#i lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] m #t_prof n div($(teil_f)*(#1h/$(lk)))
let#i #i+1
endloop
$-----
$ Flansch vorne mit Quadelementen vertikal

let#k 0
loop 8
  let#i 0
  loop 3
    let#go 1

    if #k==3
      let#go 0
    elseif #k==4
      let#go 0
    else
      let#go 1
    endif

    if #go==1
      if #i==2
        let#t_prof (#t_hinten)
      else

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```

let#t_prof (#t_vorne)
endif

if #k==1
grup 20
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)    k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)    k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)    lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m]    n div($(teil_f)*(#lv/$(lk))) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10    lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m]    n div($(teil_f)*(#lv/$(lk))) m #t_prof

elseif #k==6
grup 20
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)    k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)    k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)    lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m]    n div($(teil_f)*(#lv/$(lk))) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10    lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m]    n div($(teil_f)*(#lv/$(lk))) m #t_prof

elseif #k==0
grup 25 Bez 'Rahmen-Eckelement'
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)    k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)    k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)    lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m]    n #te_z(#k) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10    lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m]    n #te_z(#k) m #t_prof
elseif #k==7
grup 25
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)    k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)    k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)    lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m]    n #te_z(#k) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10    lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m]    n #te_z(#k) m #t_prof

else
grup 20
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)    k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)    k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)    lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m]    n #te_z(#k) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10    lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m]    n #te_z(#k) m #t_prof

endif
endif

let#i #i+1
endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Flansch Mittelteil mit Quadelementen

let#k 0
loop 2
let#i 0
loop 3
grup 20
let#go 1
$ if #i>2 $Flansch nur hinten
$ let#go 0
$ endif
if #go==1
if #i==2
let#t_prof (#t_hinten)
else
let#t_prof (#t_vorne)
endif
quad k1 #knotrh*(#k+2)+(#i) k2 #knotrh*(#k+2)+(#i+1) k3 #knotrh*(#k+3)+(#i+1)
k4 #knotrh*(#k+3)+(#i)    lage unte mnr 1 t $(rtf)[m]    n #te_x(#k+3) m #t_prof
quad k1 #knotrh*(#k+2)+(#i)+10 k2 #knotrh*(#k+2)+(#i+1)+10 k3 #knotrh*(#k+3)+(#i+1)+10
k4 #knotrh*(#k+3)+(#i)+10    lage oben mnr 1 t $(rtf)[m]    n #te_x(#k+3) m #t_prof

```

```

quad k1 #knotrv*(#k+4)+(#i) k2 #knotrv*(#k+4)+(#i+1) k3 #knotrv*(#k+5)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+5)+(#i) lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_z(#k+3) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+4)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+4)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+5)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+5)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_z(#k+3) m #t_prof

endif
let#i #i+1
endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Steg mit Quadelementen

let#k 0
loop 4
  let#i 0
  loop 1

    grup 40 bez 'Rahmen-Steg hor.'
    quad k1 #knotrh*(#k+1)+(#i+2) k2 #knotsh*(#k+1)+(#i+1) k3 #knotsh*(#k+2)+(#i+1)
    k4 #knotrh*(#k+2)+(#i+2) lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+2) m div(#t_prof_steg/2)
    quad k1 #knotsh*(#k+1)+(#i) k2 #knotsh*(#k+1)+(#i+1) k3 #knotsh*(#k+2)+(#i+1)
    k4 #knotsh*(#k+2)+(#i) lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+2) m #t_prof_steg

    quad k1 #knotrh*(#k+1)+(#i+2)+10 k2 #knotsh*(#k+1)+2 k3 #knotsh*(#k+2)+2
    k4 #knotrh*(#k+2)+(#i+2)+10 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+2) m div(#t_prof_steg/2)
    quad k1 #knotsh*(#k+1)+2 k2 #knotsh*(#k+1)+3 k3 #knotsh*(#k+2)+3
    k4 #knotsh*(#k+2)+2 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+2) m #t_prof_steg
    grup 41 bez 'Rahmen-Steg vert.'
    quad k1 #knotrv*(#k+3)+2+10 k2 #knotsv*(#k+1)+(#i+1) k3 #knotsv*(#k+2)+(#i+1)
    k4 #knotrv*(#k+4)+2+10 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_z(#k+2) m div(#t_prof_steg/2)
    quad k1 #knotsv*(#k+1)+1 k2 #knotsv*(#k+2)+1 k3 #knotsv*(#k+2)
    k4 #knotsv*(#k+1) lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] m #te_z(#k+2) n #t_prof_steg

    quad k1 #knotrv*(#k+3)+2 k2 #knotsv*(#k+1)+(#i+2) k3 #knotsv*(#k+2)+(#i+2)
    k4 #knotrv*(#k+4)+2 lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_z(#k+2) m div(#t_prof_steg/2)
    quad k1 #knotsv*(#k+1)+2 k2 #knotsv*(#k+2)+2 k3 #knotsv*(#k+2)+3
    k4 #knotsv*(#k+1)+3 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] m #te_z(#k+2) n #t_prof_steg

  let#i #i+1
  endloop
let#k #k+1
endloop

!#!Label Federn
$#####
$ Koppelung mit Federn
$#####

$Scheibe
$hor.
grup 1
quad fit k1 56 k2 66 k3 62 k4 52 nra 0 t 0
quad fit k1 6 k2 16 k3 12 k4 2 nra 0 t 0
$vert.
quad fit k1 16 k2 17 k3 57 k4 56 nra 0 t 0
quad fit k1 11 k2 12 k3 52 k4 51 nra 0 t 0

$Steg
$hor.
grup 2
quad fit k1 23003 k2 23002 k3 4602 k4 4603 nra 0 t 0
quad fit k1 23001 k2 23000 k3 4600 k4 4601 nra 0 t 0
$vert.
quad fit k1 23103 k2 23102 k3 115502 k4 115503 nra 0 t 0
quad fit k1 23101 k2 23100 k3 115500 k4 115501 nra 0 t 0

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
$Klebung -- Federn
grup 50 bez 'Klebung'
$hor.
fede qgrp ka 1 ke 2 cp $(cpkleE) cq $(cpkleG)

$Löschen der erzeugten Quadelemente für die Koppelung mit Federn
del typ quad delt grp von 1 bis 2

grup 60 bez 'Klotzung'
$Klotzung -- Federn
$oben + unten
fede fit ka 66 ke 65 cp $(cpklo) kare 411 kere 331 riss 0
fede fit ka 63 ke 62 cp $(cpklo) kare 171 kere 91 riss 0

fede fit ka 6 ke 5 cp $(cpklo) kare 401 kere 321 riss 0
fede fit ka 3 ke 2 cp $(cpklo) kare 161 kere 81 riss 0

$links + rechts
fede fit ka 17 ke 27 cp $(cpklo) kare 1501 kere 2001 riss 0
fede fit ka 11 ke 21 cp $(cpklo) kare 1511 kere 2011 riss 0

fede fit ka 47 ke 57 cp $(cpklo) kare 3001 kere 3501 riss 0
fede fit ka 41 ke 51 cp $(cpklo) kare 3011 kere 3511 riss 0

$ soll die Quersteifigkeit der Klotzung widerspiegeln,
$ welche durch das Hineindrücken hervorgerufen wird.
grup 61 bez 'Klotzung-Quersteifigkeit'

fede fit ka 11 ke 21 cp $(cpklo) kare 23101 kere 46201
fede fit ka 3 ke 2 cp $(cpklo) kare 9201 kere 4601

fede fit ka 65 ke 66 cp $(cpklo) kare 18402 kere 23002
fede fit ka 57 ke 47 cp $(cpklo) kare 115502 kere 92402

#####
$ Auflagerdefinition -Gesamtmodell
#####

!Label Auflager
grup 70 Bez 'Auflager'

mod knot 1003 fix py $hinten
mod knot 1013 fix py

$Festes Auflager
sbox a1x gpt 4010 b1x gpt 170 a2x gpt 170 b2x gpt 173 t 0.00001
knot sbox fix pp
$Verschiebliches Auflager in x-Richtung
sbox a1x gpt 330 b1x gpt 4000 a2x gpt 4000 b2x gpt 4003 t 0.00001
knot sbox fix xp

!Label Knotenauswertung

getn x -($bs)/2-$ak-$lk)/2 y 0 z -($hs)/2-$ak-$lk)/2 var k1 $Viertelpunkt
getn x -($bs)/2-$ak-$lk))*div($teil_g)*0.8)/$teil_g)
y 0 z -($hs)/2-$ak-$lk))*div($teil_g)*0.8)/$teil_g) var k3

getn x 0 y 0 z 0 var k5 $Mitte

getn x ($bs)/2-$ak-$lk)/2 y 0 z ($hs)/2-$ak-$lk)/2 var k2 $Viertelpunkt
getn x ($bs)/2-$ak-$lk))*div($teil_g)*0.8)/$teil_g)
y 0 z ($hs)/2-$ak-$lk))*div($teil_g)*0.8)/$teil_g) var k4

prt#k1
```

```

prt#k2
prt#k3
prt#k4
prt#k5

sto#k1
sto#k2
sto#k3
sto#k4
sto#k5

ENDE

$#####
$ Belastung
$#####

!+Kapitel Belastung
+prog sofiload urs:529
$Einwirkungsdefinition
kopf Belastung generieren

$-----
$ Eigengewicht - LF 1
$-----
let#lf 1
ACT G bez 'Eigengewicht'
lf #lf egz 1.0

sto#n_lf #lf

$-----
$ Flächenlast - LF 2
$-----
let#lf #lf+1
ACT Q bez 'Windsog'
lf #lf

area ref qgrp 10 typ pyy p1 $(p1) x1 gpt 1 x2 gpt 7 x3 gpt 67 x4 gpt 61

sto#n_lf #lf

$-----
$ Flächenlast - LF 3
$-----
let#lf #lf+1
ACT Q bez 'Winddruck'
lf #lf

area ref qgrp 10 typ pyy p1 $(p3) x1 gpt 1 x2 gpt 7 x3 gpt 67 x4 gpt 61

sto#n_lf #lf

$-----
$ Knotenlast hor. - LF 4
$-----
let#lf #lf+1
ACT Q bez 'Knotenlast horizontal'
lf #lf
knot 1011 typ pxx p1 $(p2)

sto#n_lf #lf

$-----
$ Knotenlast vert. - LF 5
$-----
let#lf #lf+1

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
ACT Q bez 'Knotenlast vertikal beid.'
lf #lf

    knot 1011 typ pzz p1 ($(p4)/2)
    knot 1001 typ pzz p1 ($(p4)/2)

sto#n_lf #lf

$-----
$ Beullast - LF 6 (affin zu LF 4)
$-----
let#lf #lf+1
ACT Q bez 'Beullast'
lf #lf
    knot 1011 typ pxx p1 $(p5)
sto#n_lf #lf
ENDE

$-----
$ Knotenverschiebung - LF 7
$-----

let#lf #lf+1
ACT Q bez 'Knotenverschiebung'
lf #lf

    knot 1011 typ wxx p1 $(p6)
sto#n_lf #lf
ENDE

$#####
$ Lastfälle
$#####

!+!Kapitel Lastfälle
+prog ase urs:5
kopf Lastfälle

$Lastfallgenerierung
let#lf 1
loop #n_lf
Syst prob nonl
lf #lf
ende
let#lf #lf+1
endloop

ENDE

$#####
$ Verformte Struktur
$#####

!+!Kapitel Verformte Struktur
$ Seite 2-90 dynamische Eigenwerte

!+!Label Beuleigenformen: horizontale Einzelkraft
+PROG ASE URS:3
KOPF Zustandslastfall für Beuleigenwertermittlung
SYST prob nonl tol -0.05 iter 240
LF (#n_lf+10) BEZ PLF_Einzellast
    LC 6 $ Beullast
ENDE

+PROG ASE urs:6
KOPF Beuleigenwerte für Spannungen - Knotenlast
SYST PLF (#n_lf+10) Fakv 0.0

$ Nichtlineare Berechnung des Lastfalls,
$ um den Zugausfall der Klotzung zu berücksichtigen

$ oder FAKV 1.0 falls Vorverformung des PLF
$ mit berücksichtigt werden soll!
```

```

EIGE 4 beul LF 100 Lmin Auto          $ Speichert die Beuleigenwerte in LF 100-103
ENDE

#####
$ für Ekle= >1.4e3
#####

+PROG ASE URS:22
KOPF Normierte Beuleigenformen LF 100
Steu Warn 398
Steu Warn 399
SCHI LF 100 Vmax 0.001                $ Verformung auf max. 1mm normiert
LF 201 Bez 'normierte Eigenform LF 100'
Ende

+PROG ASE URS:10
KOPF Normierte Beuleigenformen LF 101
Steu Warn 398
Steu Warn 399
SCHI LF 101 Vmax 0.001                $ Verformung auf max. 1mm normiert
LF 202 Bez 'normierte Eigenform LF 101'
Ende

#####
$ Überlagerung
#####

!+Kapitel Überlagerung

$Berechnungsparameter
#define berB1
Steu Warn (541)
STEU WARN (350 353 1)                 $ Verwendung der Bruchdehnungszustandslinie
dehn ksv ul                           $ Größer Dehnungsbereich des Stahls wird abgefahren!
                                        $ Kontrolle erf.!

Steu opt solv 4
SCHI LF 301 FAKV ($(hs)*1000/$(fakt))  $ spannungslose Vorverformung H/500 mm
SYST PROB th3 tol -0.05 iter 240 nmat ja fmax 1.1 $ max. 240 Iterationen, !Überprüfen
                                                $ der Energiekonvergenz und Restkräfte im System!
                                                $ Theorie 3. Ordnung mit einer Toleranz
                                                $ bei der Iteration der Restkräfte an einem Knoten von max.0,05 k
                                                $ mit nichtlinearem Materialgesetz
                                                $ Anmerkung: -tol nicht bei Flächenlast
                                                $ (Da nicht gewiss, wie groß die Kräfte auf den Knoten sind!)
grup 10 wert lin                       $ Gruppe 10 wird linear gerechnet
grup (20,25,40,41,50,60) wert voll    $ die jeweiligen Gruppen werden nicht linear gerechnet
#endef

#define berB2
Steu Warn (541)
STEU WARN (350 353 1)
dehn ksv ul
Steu opt solv 4
SCHI LF 302 FAKV ($(hs)*1000/$(fakt))
SYST PROB th3 tol -0.05 iter 240 nmat ja fmax 1.1
grup 10 wert lin
grup (20,25,40,41,50,60) wert voll
#endef

+PROG ASE URS:43
KOPF Überlagerung (LF: H) 1.Beuleigenform
#include berB1
LF 450 egz 1.0 bez 'LF: H'
LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

Ende

```
-PROG ASE URS:12
KOPF Überlagerung (LF: H) 2.Beuleigenform
#include berB2
LF 451 egz 1.0 bez 'LF: H'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
Ende
```

```
-PROG ASE URS:14
KOPF Überlagerung (LF: H+V) 1.Beuleigenform
#include berB1
LF 452 egz 1.0 bez 'LF: H+V'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 5 fakt 1.0 $ vert. Last
Ende
```

```
-PROG ASE URS:15
KOPF Überlagerung (LF: H+V) 2.Beuleigenform
#include berB2
LF 453 egz 1.0 bez 'LF: H+V'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 5 fakt 1.0 $ vert. Last
Ende
```

```
-PROG ASE URS:16
KOPF Überlagerung (LF: H+W) 1.Beuleigenform
#include berB1
LF 454 egz 1.0 bez 'LF: H+W'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 2 fakt 1.0 $ Windsog
Ende
```

```
-PROG ASE URS:17
KOPF Überlagerung (LF: H+W) 2.Beuleigenform
#include berB2
LF 455 egz 1.0 bez 'LF: H+W'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 2 fakt 1.0 $ Windsog
Ende
```

```
-PROG ASE URS:18
KOPF Überlagerung (LF: H+V+W) 1.Beuleigenform
#include berB1
LF 456 egz 1.0 bez 'LF: H+V+W'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 2 fakt 1.0 $ Windsog
  LC 5 fakt 1.0 $ vert. Last
Ende
```

```
-PROG ASE URS:19
KOPF Überlagerung (LF: H+V+W) 2.Beuleigenform
#include berB2
LF 457 egz 1.0 bez 'LF: H+V+W'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 2 fakt 1.0 $ Windsog
  LC 5 fakt 1.0 $ vert. Last
Ende
```

```
-PROG ASE URS:8
KOPF Überlagerung (LF: H+V) 1.Beuleigenform
#include berB1
LF 458 egz 1.0 bez 'LF: H+Vg'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 5 fakt 50.0 $ vert. Last
Ende
```

```
-PROG ASE URS:11
```

```

KOPF Überlagerung (LF: H+V) 2.Beuleigenform
#include berB2
LF 459 egz 1.0 bez 'LF: H+Vg'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 5 fakt 50.0 $ vert. Last
Ende
-PROG ASE URS:24
KOPF Überlagerung (LF: H+V+W) 1.Beuleigenform
#include berB1
LF 460 egz 1.0 bez 'LF: H+Vg+W'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 2 fakt 1.0 $ Windsog
  LC 5 fakt 50.0 $ vert. Last
Ende

-PROG ASE URS:25
KOPF Überlagerung (LF: H+V+W) 2.Beuleigenform
#include berB2
LF 461 egz 1.0 bez 'LF: H+Vg+W'
  LC 4 fakt 1.0 $ horizontale Last
  LC 2 fakt 1.0 $ Windsog
  LC 5 fakt 50.0 $ vert. Last
Ende

#####
$ Iteration
#####

!+Kapitel Traglastiteration Weggesteuert ohne Eigengewicht und Vorverformung

-PROG ASE URS:30
KOPF Knotenverschiebung LF: H
let#ii 0
dehn ksv ul
Steu Warn (541)
STEU WARN (350 354 1)
loop $(steps)
  if #ii==0
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 500 tol 0.01 nmat ja
  else
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 500 tol 0.01 nmat ja plf 299+#ii fakv 1.0
  endif
  lf 300+#ii bez 'LF: Knotenverschiebung'
  lc nr 7 fakt 1*(#ii+1)
ENDE
let#ii #ii+1

endloop
ENDE

-PROG ASE URS:33
KOPF Knotenverschiebung LF: H+V
let#ii 0
dehn ksv ul
Steu Warn (541)
STEU WARN (350 354 1)
loop $(steps)
  if #ii==0
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja
  else
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja plf 599+#ii fakv 1.0

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
endif
  lf 600+#ii bez 'LF: Knotenverschiebung'
  lc nr 7 fakt 1*(#ii+1)
  lc nr 5
ENDE
let#ii #ii+1
endloop
ENDE

-PROG ASE URS:34
KOPF Knotenverschiebung LF: H+W
let#ii 0
dehn ksv ul
Steu Warn (541)
STEU WARN (350 354 1)
loop $(steps)
  if #ii==0
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja
  else
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja plf 899+#ii fakv 1.0
  endif
  lf 900+#ii bez 'LF: Knotenverschiebung'
  lc nr 7 fakt 1*(#ii+1)
  lc nr 2 $Windsog
ENDE
let#ii #ii+1
endloop

ENDE

-PROG ASE URS:35
KOPF Knotenverschiebung LF: H+V+W
let#ii 0
dehn ksv ul
Steu Warn (541)
STEU WARN (350 354 1)
loop $(steps)
  if #ii==0
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja
  else
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja plf 1199+#ii fakv 1.0
  endif
  lf 1200+#ii bez 'LF: Knotenverschiebung'
  lc nr 7 fakt 1*(#ii+1)
  lc nr 5 $vertikale Last
  lc nr 2 $Windsog
ENDE
let#ii #ii+1
endloop

ENDE

-PROG ASE URS:36
KOPF Knotenverschiebung LF: H+Vg
let#ii 0
dehn ksv ul
Steu Warn (541)
STEU WARN (350 354 1)
loop $(steps)
  if #ii==0
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja
  else
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja plf 1499+#ii fakv 1.0
  endif
endif
```

```

lf 1500+#ii bez 'LF: Knotenverschiebung'
lc nr 7 fakt 1*(#ii+1)
lc nr 5 fakt 50
ENDE
let#ii #ii+1
endloop
ENDE

-PROG ASE URS:37
KOPF Knotenverschiebung LF: H+Vg+W
let#ii 0
dehn ksv ul
Steu Warn (541)
STEU WARN (350 354 1)
loop $(steps)
  if #ii==0
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja
  else
    steu solv 4
    syst prob th3 iter 240 tol -0.05 nmat ja plf 1799+#ii fakov 1.0
  endif
  lf 1800+#ii bez 'LF: Knotenverschiebung'
  lc nr 7 fakt 1*(#ii+1)
  lc nr 5 fakt 50 $vertikale Last
  lc nr 2 $Windsog
ENDE
let#ii #ii+1
endloop

ENDE

$#####
$ Iteration
$#####

I+!Kapitel Kurvenplots

#define lf
LF NR (300 329 1)
LF NR (600 629 1)
LF NR (900 929 1)
LF NR (1200 1229 1)
LF NR (1500 1529 1)
LF NR (1800 1829 1)
#endef

-prog results urs:31
FILT NAME "n_disp.nr" VAL1 1011 $ Elementauswahl Knotenverschiebungen Knoten
#include lf
KNOT ax DARS DLST
ende

-prog results urs:32
FILT NAME "n_disp.nr" VAL1 (#k1) $ Elementauswahl Knotenverschiebungen Knoten
#include lf
KNOT uy DARS DLST
ende

-prog results urs:38
FILT NAME "n_disp.nr" VAL1 (#k2) $ Elementauswahl Knotenverschiebungen Knoten
#include lf
KNOT uy DARS DLST
ende

-prog results urs:39
FILT NAME "n_disp.nr" VAL1 (#k3) $ Elementauswahl Knotenverschiebungen Knoten
#include lf
KNOT uy DARS DLST
ende

-prog results urs:40
FILT NAME "n_disp.nr" VAL1 (#k4) $ Elementauswahl Knotenverschiebungen Knoten

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
#include lf
KNOT uy DARS DLST
ende
-prog results urs:41
FILT NAME "n_disp.nr" VAL1 (#k5) $ Elementauswahl Knotenverschiebungen Knoten
#include lf
KNOT uy DARS DLST
ende

-PROG ASE URS:27
KOPF Lastverformungskurven

let#trLF 300
loop 5
plot lf #trLF typ lfnr
plot lf #trLF rich y knr (#k1,#k2,#k3,#k4,#k5) typ fakt

let#trLF #trLF+300
endloop

ENDE
```

14.5 Eingabe in Teddy für das Referenzmodell mit einer VSG-Scheibe:

```

#####
$ Löschen der alten Dateien
+sys del $(projekt).cdb

#!Kapitel Eingangsgrößen

#####
$ Defintion der Variablen
#####
#!Label Variablendefintion

$ Eingabe der Geometrie + erf. Steifigkeiten

$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$ (Standard SI-Einheit kN,m)
$!!! Einheit [m] und [kN] !!!$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$

$#include eingangswerte.dat

$ Scheibenabmessungen [m]
#define hs= 3.5 $ Scheibenhöhe
#define bs= 1.5 $ Scheibenbreite
#define ds= 0.006 $ 1.Scheibenstärke
#define ds2= 0.006 $ 2.Scheibenstärke
$ Verbundfolie
#define folie= 0.00152 $Foliendicke 1.52 oder 0.76 mm
#define Gfolie= 0.4e3 $ kN/m²
#define nue_folie=0.5
#define Efolie= ($(Gfolie)*(2*(1+(nue_folie)))) $Emodul 1.5 G-Modul Folie 0.4 N/mm²
$1t. Norm--Rückrechnung auf Emodul mit nue 0.5

$ Verformungsfaktor f. Eigenform
#define fakt= 500 $ z.B.: L/500 für spannungslose Vorverformung

$ Faktor Anzahl Elemente für vert.Last
#define ellast= 2.6 $ [kN] ein Element hat 0.263 tonnen = ca. 2.6 kN (aus Rep.Browser)
#define anzel= 1 $ Anzahl der einwirkenden Elemente

$ Klotzung [m]
#define lk= 0.1 $ Klotzungslänge [m] in x-Richtung
#define bk= 0.022 $ Klotzungsbreite [m] in y-Richtung
#define hk= 0.01 $ Klotzungsstärke [m] in z-Richtung
#define ak= 0.02 $ Klotzungsabstand vom Scheibenrand
#define Eklo= 2500e3 $ Pom [kN/m²]

$#define faktor= 1
$#define mue= 0.2

$ Netzgenerierung/Teilung
$ Scheibe:
#define teil_f= 10 $ Netzfeinheit Randbereich (Klotzungsbereich)
#define teil_g= 12 $ Netzfeinheit 1/2 Kernbereich der Scheibe

$ Rahmenprofil:
#define teil_rahmen_vorne= 1 $ vorderer Teil des Flansch
#define teil_rahmen_hinten= 8 $ hinterer Teil des Flansch
#define teil_steg= 3 $ Stegteilung

#define k_anz= 7 $ Knotenanzahl Scheibe
#define gdiv= 10000 $ Gruppendifvisor

$ Klebung [m]
#define hkle= 0.02 $ Breite der Verklebung zRichtung --> max. Klotzungsbreite!
#define tkle= 0.006 $ Dicke der Verklebung yRichtung
#define nue= 0.5 $ Querdehnzahl der Klebung (nur für die Berechnung des Schubmoduls!)
#define Ekle= 1.4e3 $ E-Modul Klotzung [kN/m²] (1 N/mm² = 1000 kN/m²)

$ Rahmendefinition

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
$Steg [m]
#define rts= 0.01                $ Stärke Steg

$Flansch [m]
#define ue_glas= ($(ds)/2+$(ds2)/2+$(folie)) $ Abstand Scheiben
#define breiteFL= 0.09          $ Breite Flansch hinten
#define rtf= 0.01              $ Stärke Flansch

$ Flansch Rahmeneckprofil [m]
#define e_tf= 0.015             $ Stärke Rahmeneckprofil (Rahmeneck = Rahmeneckprofil+ Flanschdicke !)

$ Lasten
#define p1= 1.0                 $ Windsog [kN/m2]
#define p2= 50                 $ Knotenlast horizontal [kN]
#define p3= -1.0               $ Winddruck [kN/m2]
#define p4= ($(ellast)*$(anzel)) $ Knotenlast vertikal [kN]
#define p5= 1                  $ Beullast [kN] - horizontale Knotenlast
#define p6 = 2                 $ Verformung in [mm]
#define steps = 30             $ Anzahl Schritte für Iteration

!#!Label Berechnung der erf. Werte
#####
$Berechnung der erforderlichen Werte:
#####

$Klotzung [m]
#define cpklo= (($(Eklo)*$(bk))/$(hk))          $ Federsteifigkeit Klotzung [kN/m2]

$Klebung [m]
#define Gkle= ($(Ekle)/(2*(1+$(nue))))          $ [kN/m2] G-Modul Klotzung (1 N/mm2 = 1000 kN/m2)

$Folie
#define cpfolie= ($(Efolie)/$(folie))          $ Federsteifigkeit Klebung in Federrichtung [kN/m3]
#define cqfolie= ($(Gfolie)/$(folie))          $ [kN/m2] G-Modul Klotzung (1 N/mm2 = 1000 kN/m2)

$Federeigenschaften
#define cpkleE= (($(Ekle))/$(tkle))            $ Federsteifigkeit Klebung in Federrichtung [kN/m3]
#define cpkleG= (($(Gkle))/$(tkle))            $ Federsteifigkeit Klebung quer zur Federrichtung [kN/m3]

$Flansch [m]
#define rbf1= ($(ds)/2+$(ue_glas))             $ Breite-Flansch vor Glasscheibe
#define rbf2= ($(ds)/2+$(tkle))               $ Breite-Flansch von Steg zu Flansch
#define rbf3= ($(rts)+$(breiteFL))

$Flansch Rahmeneck [m]
#define e_bf= ($(rbf2)+$(rbf1)+$(rbf3))

$Eckprofil
#define t_eck= ($(rtf)+$(e_tf))                $ Dicke Eckprofil + Flanschdicke

#####
$ Material
#####

!#!Kapitel System
+prog aqua urs:1
KOPF Material- & Querschnittsdefinition
NORM OEN EN1993-2005 Cat A
echo mat voll
stah 1 S 355

!#!Label Arbeitslinie

$Arbeitslinie für linear elastisch - ideal plastisch
$Materialwerte:
$ S355
```

```

sto#Es 210000  $[MPa]
sto#ft 490    $[MPa]
sto#fy 355    $[MPa]
sto#Eplast (#Es/100)  $[o/oo]
sto#dehnEl (#fy/#ES*1000)  $[o/oo]

arbl BRUC typ ext
-1000          -#fy
-#dehnEl      -#fy
0              0
#dehnEl       #fy
1000          #fy

arbl GEBR typ ext
-1000          -#fy
-#dehnEl      -#fy
0              0
#dehnEl       #fy
1000          #fy

$$Arbeitslinie mit plastisch mit Wiederverfestigung
$arbl BRUC
$  -(#dehnEl+(#ft-#fy)/#Eplast*1000) -#ft
$  -#dehnEl                          -#fy
$  0                                  0
$  #dehnEl                            #fy
$  (#dehnEl+(#ft-#fy)/#Eplast*1000)  #ft
$arbl GEBR
$  -(#dehnEl+(#ft-#fy)/#Eplast*1000) -#ft
$  -#dehnEl                          -#fy
$  0                                  0
$  #dehnEl                            #fy
$  (#dehnEl+(#ft-#fy)/#Eplast*1000)  #ft

$Materialdefintion:
MATE 10 TYP Glas BEZ 'Floatglas'
MATE 11 TYP ESG fy 120 ft 120 BEZ 'ESG'

$MATE 12 TYP VSGv BEZ 'Verbundsicherheitsglas für vertikalen Einbau'
$MATE 13 TYP TVG BEZ 'Teilvorgespanntes Glas'

$Auswahl:
sto#mat 11

$Teilung Profil:
sto#t_vorne $(teil_rahmen_vorne)
sto#t_hinten $(teil_rahmen_hinten)
sto#t_prof_steg $(teil_steg)
ENDE

#####
$ Struktur
#####

+prog sofimsha urs:2
kopf Glasscheibe
syst 3D gdiv $(gdiv)
echo voll ja

#####
$ Knoten - Scheibendefinition
#####

$Symmetrie in Scheibenmitte

```


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
let#x (($bs)/2)*(-1),($bs)/2-$(ak))*(-1),($bs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$bs)/2-$(ak)-$(lk),($bs)/2-$(ak),($bs)/2
let#z (($hs)/2)*(-1),($hs)/2-$(ak))*(-1),($hs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$hs)/2-$(ak)-$(lk),($hs)/2-$(ak),($hs)/2
let#y 0 $Könnte Dicke der Scheibe eingegeben werden

$Symmetrie in Scheibenmitte

let#xg (($bs)/2)*(-1),($bs)/2-$(ak))*(-1),($bs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$bs)/2-$(ak)-$(lk),($bs)/2-$(ak),($bs)/2
let#zg (($hs)/2)*(-1),($hs)/2-$(ak))*(-1),($hs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$hs)/2-$(ak)-$(lk),($hs)/2-$(ak),($hs)/2
let#yg $(ue_glas)

$Teilung
let#te_x 1,$(teil_steg),$(teil_f),$(teil_g),$(teil_g),$(teil_f),$(teil_steg),1
let#te_z 1,$(teil_steg),$(teil_f),$(teil_g)*div($hs)/$bs),$(teil_g)*div($hs)/$bs),$(teil_f),$(teil_steg),1

!#!Label Knoten
#####
$ Knoten - Rahmendefinition
#####

$ Rahmen horizontal 5 Knoten in x
let#xrh (($bs)/2-$(ak))*(-1),($bs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$(bs)/2-$(ak)-$(lk),($bs)/2-$(ak)
let#zrh (($hs)/2+$(hk))*(-1),($hs)/2+$(hk)
let#yrh $(rbf1),0,(-$(rbf2)),(-$(rbf2)-$(rbf3))

$ Rahmen vertikal 9 Knoten in z
let#xrv $(bs)/2+$(hk),($bs)/2+$(hk))*(-1)
let#zrv (($hs)/2+$(hk)+$(t_eck))*(-1),($hs)/2+$(hk))*(-1),($hs)/2-$(ak))*(-1),($hs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,
($hs)/2-$(ak)-$(lk),($hs)/2-$(ak),($hs)/2+$(hk),($hs)/2+$(hk)+$(t_eck)
let#yrv $(rbf1),0,-$(rbf2),-$(rbf2)-$(rbf3)

$ Steg horizontal
let#xsh (($bs)/2-$(ak))*(-1),($bs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$(bs)/2-$(ak)-$(lk),($bs)/2-$(ak)
let#zsh (($hs)/2-$(hk1e))*(-1),($hs)/2*(-1),($hs)/2,($hs)/2-$(hk1e)
let#ysh -$(rbf2)

$ Steg vertikal
let#xsv (($bs)/2-$(hk1e))*(-1),($bs)/2*(-1),($bs)/2,($bs)/2-$(hk1e)
let#zsv (($hs)/2-$(ak))*(-1),($hs)/2-$(ak)-$(lk))*(-1),0,$(hs)/2-$(ak)-$(lk),($hs)/2-$(ak)
let#ysv -$(rbf2)

$ Länge für Knotenteilung des Rahmeneckelements
sto#lh (#xrv(0)-#xrh(4))
sto#lv (#zrv(7)-#zrv(6))
prt#lv
prt#lh
$-----
$ Knoten - 1 Scheibe
sto#knot 1

let#k 0
loop $(k_anz)
  let#i 0
  loop $(k_anz)

      knot #knot*(#k+1)+#i*10 x #x(#k) y #y z #z(#i)
      $ let#k_prt #knot*(#k+1)+#i*10; prt#k_prt $Ausgabe der Knoten in Ursula

  let#i #i+1
  endloop
let#k #k+1
endloop
$-----
$ Knoten - 2 Scheibe
sto#knotg $(k_anz)*10+10

let#k 0
loop $(k_anz)
  let#i 0
```

```

loop $(k_anz)

    knot #knotg*(#k+1)+#i*10 x #xg(#k)      y #yg      z #zg(#i)
    $ let#k_prt #knot*(#k+1)+#i*10; prt#k_prt $Ausgabe der Knoten in Ursula

    let#i #i+1
    endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Knoten - Rahmen hor.
sto#knotrh #knotg*10+10
let#k 0
loop 5
    let#i 0
    loop 2
        let#j 0
        loop 4

            knot #knotrh*(#k+1)+#i*10+#j x #xrh(#k) y #yrh(#j) z #zrh(#i)
            let#j #j+1
            endloop
        let#i #i+1
        endloop
    let#k #k+1
    endloop

$-----
$ Knoten - Rahmen vert.
sto#knotrv #knotrh*6+100

let#k 0
loop 9
    let#i 0
    loop 2
        let#j 0
        loop 4

            knot #knotrv*(#k+1)+#i*10+#j x #xrv(#i) y #yrv(#j) z #zrv(#k)

            let#j #j+1
            endloop
        let#i #i+1
        endloop
    let#k #k+1
    endloop

$-----
$ Knoten - Steg
sto#knotsh #knotrv*9+200
sto#knotsv #knotsh*5+200
let#k 0
loop 5
    let#i 0
    loop 1
        let#j 0
        loop 4

            knot #knotsh*(#k+1)+#i*10+#j x #xsh(#k) y #ysh(#i) z #zsh(#j)
            knot #knotsv*(#k+1)+#i*10+#j x #xsv(#j) y #ysv(#i) z #zsv(#k)

            let#j #j+1
            endloop
        let#i #i+1
        endloop
    let#k #k+1
    endloop

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
!*!Label Quadelemente
#####
$ Quadelemente
#####
$-----
$ Scheibe mit Quadelementen

let#k 0
loop ($(k_anz)-1)
  let#i 0
  loop ($(k_anz)-1)
    grup 10 bez 'Scheibe'
    quad k1 #knot*(#k+1)+#i*10 k2 #knot*(#k+1)+(#i+1)*10 k3 #knot*(#k+2)+(#i+1)*10 k4 #knot*(#k+2)+(#i)*10
    lage mitt mnr #mat t $(ds)[m] m #te_z(#i+1) n #te_x(#k+1)
    let#i #i+1
  endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Scheibe mit Quadelementen

let#k 0
loop ($(k_anz)-1)
  let#i 0
  loop ($(k_anz)-1)
    grup 11 bez 'Scheibe'
    quad k1 #knotg*(#k+1)+#i*10 k2 #knotg*(#k+1)+(#i+1)*10 k3 #knotg*(#k+2)+(#i+1)*10 k4 #knotg*(#k+2)+(#i)*10
    lage mitt mnr #mat t $(ds)[m] m #te_z(#i+1) n #te_x(#k+1)
    let#i #i+1
  endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Flansch vorne mit Quadelementen horizontal

let#k 0
loop 4
  let#i 0
  loop 3
    let#go 1

    if #k==1
      let#go 0
    elseif #k==2
      let#go 0
    else
      let#go 1
    endif
    if #go==1
      if #i==2
        let#t_prof (#t_hinten)
      else
        let#t_prof (#t_vorne)
      endif
    endif

    grup 20 bez 'Rahmen'
    quad k1 #knotrh*(#k+1)+(#i) k2 #knotrh*(#k+1)+(#i+1) k3 #knotrh*(#k+2)+(#i+1)
    k4 #knotrh*(#k+2)+(#i)lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_x(#k+2) m #t_prof

    quad k1 #knotrh*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrh*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrh*(#k+2)+(#i+1)+10
    k4 #knotrh*(#k+2)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_x(#k+2) m #t_prof

  endif

  let#i #i+1
endloop
let#k #k+1
endloop
$-----
```

```

$ Rahmeneck horizontal

let#i 0
loop 3
  if #i==2
    let#t_prof (#t_hinten)
  else
    let#t_prof (#t_vorne)
  endif

  quad k1 #knotrh*(1)+#i      k2 #knotrh*(1)+#i+1      k3 #knotrv*(2)+10+#i+1
  k4 #knotrv*(2)+10+#i lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] m #t_prof n div($(teil_f)*(#lh/$(lk)))
  quad k1 #knotrh*(5)+#i      k2 #knotrh*(5)+#i+1      k3 #knotrv*(2)+#i+1
  k4 #knotrv*(2)+#i lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] m #t_prof n div($(teil_f)*(#lh/$(lk)))

  quad k1 #knotrh*(1)+10+#i    k2 #knotrh*(1)+(10)+#i+1    k3 #knotrv*(8)+10+#i+1
  k4 #knotrv*(8)+10+#i lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] m #t_prof n div($(teil_f)*(#lh/$(lk)))
  quad k1 #knotrh*(5)+10+#i    k2 #knotrh*(5)+(10)+#i+1    k3 #knotrv*(8)+#i+1
  k4 #knotrv*(8)+#i lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] m #t_prof n div($(teil_f)*(#lh/$(lk)))
let#i #i+1
endloop
$-----
$ Flansch vorne mit Quadelementen vertikal

let#k 0
loop 8
  let#i 0
  loop 3
    let#go 1

    if #k==3
      let#go 0
    elseif #k==4
      let#go 0
    else
      let#go 1
    endif

    if #go==1
      if #i==2
        let#t_prof (#t_hinten)
      else
        let#t_prof (#t_vorne)
      endif

      if #k==1
        grup 20
        quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)      k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)      k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
        k4 #knotrv*(#k+2)+(#i) lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] n div($(teil_f)*(#lv/$(lk))) m #t_prof
        quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
        k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] n div($(teil_f)*(#lv/$(lk))) m #t_prof

      elseif #k==6
        grup 20
        quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)      k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)      k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
        k4 #knotrv*(#k+2)+(#i) lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] n div($(teil_f)*(#lv/$(lk))) m #t_prof
        quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
        k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] n div($(teil_f)*(#lv/$(lk))) m #t_prof

      elseif #k==0
        grup 25 Bez 'Rahmen-Eckelement'
        quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)      k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)      k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
        k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_z(#k) m #t_prof
        quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
        k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_z(#k) m #t_prof
      elseif #k==7
        grup 25
        quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)      k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)      k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
        k4 #knotrv*(#k+2)+(#i) lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_z(#k) m #t_prof

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_z(#k) m #t_prof

else
grup 20
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i) k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1) k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i) lage unte mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_z(#k) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+1)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+1)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+2)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+2)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(t_eck)[m] n #te_z(#k) m #t_prof

endif
endif

let#i #i+1
endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Flansch Mittelteil mit Quadelementen

let#k 0
loop 2
let#i 0
loop 3
grup 20
let#go 1
$ if #i<>2 $Flansch nur hinten
$ let#go 0
$ endif
if #go==1
if #i==2
let#t_prof (#t_hinten)
else
let#t_prof (#t_vorne)
endif
quad k1 #knotrh*(#k+2)+(#i) k2 #knotrh*(#k+2)+(#i+1) k3 #knotrh*(#k+3)+(#i+1)
k4 #knotrh*(#k+3)+(#i) lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+3) m #t_prof
quad k1 #knotrh*(#k+2)+(#i)+10 k2 #knotrh*(#k+2)+(#i+1)+10 k3 #knotrh*(#k+3)+(#i+1)+10
k4 #knotrh*(#k+3)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+3) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+4)+(#i) k2 #knotrv*(#k+4)+(#i+1) k3 #knotrv*(#k+5)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+5)+(#i) lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_z(#k+3) m #t_prof
quad k1 #knotrv*(#k+4)+(#i)+10 k2 #knotrv*(#k+4)+(#i+1)+10 k3 #knotrv*(#k+5)+(#i+1)+10
k4 #knotrv*(#k+5)+(#i)+10 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_z(#k+3) m #t_prof

endif
let#i #i+1
endloop
let#k #k+1
endloop

$-----
$ Steg mit Quadelementen

let#k 0
loop 4
let#i 0
loop 1

grup 40 bez 'Rahmen-Steg hor.'
quad k1 #knotrh*(#k+1)+(#i+2) k2 #knotsh*(#k+1)+(#i+1) k3 #knotsh*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotrh*(#k+2)+(#i+2) lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+2) m div(#t_prof_steg/2)
quad k1 #knotsh*(#k+1)+(#i) k2 #knotsh*(#k+1)+(#i+1) k3 #knotsh*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotsh*(#k+2)+(#i)lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+2) m #t_prof_steg

quad k1 #knotrh*(#k+1)+(#i+2)+10 k2 #knotsh*(#k+1)+2 k3 #knotsh*(#k+2)+2
k4 #knotrh*(#k+2)+(#i+2)+10 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+2) m div(#t_prof_steg/2)
```

```

quad k1 #knotsh*(#k+1)+2 k2 #knotsh*(#k+1)+3 k3 #knotsh*(#k+2)+3 k4 #knotsh*(#k+2)+2
lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_x(#k+2) m #t_prof_steg
grup 41 bez 'Rahmen-Steg vert.'
quad k1 #knotrv*(#k+3)+2+10 k2 #knotsv*(#k+1)+(#i+1) k3 #knotsv*(#k+2)+(#i+1)
k4 #knotrv*(#k+4)+2+10 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_z(#k+2) m div(#t_prof_steg/2)
quad k1 #knotsv*(#k+1)+1 k2 #knotsv*(#k+2)+1 k3 #knotsv*(#k+2)
k4 #knotsv*(#k+1) lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] m #te_z(#k+2) n #t_prof_steg

quad k1 #knotrv*(#k+3)+2 k2 #knotsv*(#k+1)+(#i+2) k3 #knotsv*(#k+2)+(#i+2)
k4 #knotrv*(#k+4)+2 lage unte mnr 1 t $(rtf)[m] n #te_z(#k+2) m div(#t_prof_steg/2)
quad k1 #knotsv*(#k+1)+2 k2 #knotsv*(#k+2)+2 k3 #knotsv*(#k+2)+3
k4 #knotsv*(#k+1)+3 lage oben mnr 1 t $(rtf)[m] m #te_z(#k+2) n #t_prof_steg
let#i #i+1
endloop
let#k #k+1
endloop

!!Label Federn
#####
$ Koppelung mit Federn
#####

$Scheibe
$hor.
grup 1
quad fit k1 56 k2 66 k3 62 k4 52 nra 0 t 0
quad fit k1 6 k2 16 k3 12 k4 2 nra 0 t 0
$vert.
quad fit k1 16 k2 17 k3 57 k4 56 nra 0 t 0
quad fit k1 11 k2 12 k3 52 k4 51 nra 0 t 0
knot

$Steg
$hor.
grup 2
quad fit k1 224203 k2 224202 k3 44842 k4 44843 nra 0 t 0
quad fit k1 224201 k2 224200 k3 44840 k4 44841 nra 0 t 0
$vert.
quad fit k1 224403 k2 224402 k3 1122002 k4 1122003 nra 0 t 0
quad fit k1 224401 k2 224400 k3 1122000 k4 1122001 nra 0 t 0

$Klebung -- Federn
grup 50 bez 'Klebung'
$hor.
fede qgrp ka 1 ke 2 cp $(cpkleE) cq $(cpkleG)

$Löschen der erzeugten Quadelemente für die Koppelung mit Federn
del typ quad delt grp von 1 bis 2

$Folie zw. Scheiben -- Federn
grup 50 bez 'Klebung'
$hor.
$fede qgrp ka 10 ke 11 cp $(cpfolie) cq $(cqfolie)
fede qgrp ka 10 ke 11 cp 7e7 cq $(cqfolie)

grup 60 bez 'Klotzung'
$Klotzung -- Federn
$oben + unten
fede fit ka 66 ke 65 cp $(cpklo) kare 4061 kere 3251 riss 0
fede fit ka 63 ke 62 cp $(cpklo) kare 1631 kere 821 riss 0 $unten links

fede fit ka 6 ke 5 cp $(cpklo) kare 4051 kere 3241 riss 0
fede fit ka 3 ke 2 cp $(cpklo) kare 1621 kere 811 riss 0 $oben links

$links + rechts
fede fit ka 11 ke 21 cp $(cpklo) kare 14891 kere 19851 riss 0 $links oben
fede fit ka 17 ke 27 cp $(cpklo) kare 14881 kere 19841 riss 0

```

Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
fede fit ka 47 ke 57 cp $(cpklo) kare 29761 kere 34721 riss 0 $rechts unten
fede fit ka 41 ke 51 cp $(cpklo) kare 29771 kere 34731 riss 0
```

```
grup 70 bez 'Klotzung'
```

```
$Klotzung -- Federn
```

```
$oben + unten
```

```
fede fit ka 160 ke 240 cp $(cpklo) kare 810 kere 1620 riss 0
```

```
fede fit ka 400 ke 480 cp $(cpklo) kare 3240 kere 4050 riss 0
```

```
fede fit ka 220 ke 300 cp $(cpklo) kare 820 kere 1630 riss 0
```

```
fede fit ka 460 ke 540 cp $(cpklo) kare 3250 kere 4060 riss 0
```

```
$links + rechts
```

```
fede fit ka 90 ke 100 cp $(cpklo) kare 14890 kere 19850 riss 0
```

```
fede fit ka 120 ke 130 cp $(cpklo) kare 29770 kere 34730 riss 0
```

```
fede fit ka 570 ke 580 cp $(cpklo) kare 14880 kere 19840 riss 0
```

```
fede fit ka 600 ke 610 cp $(cpklo) kare 29760 kere 34720 riss 0
```

```
$ soll die Quersteifigkeit der Klotzung widerspiegeln,
```

```
$ welche durch das hineindrücken hervorgerufen wird
```

```
grup 61 bez 'Klotzung-Quersteifigkeit'
```

```
fede fit ka 11 ke 21 cp $(cpklo) kare 224401 kere 448801
```

```
fede fit ka 3 ke 2 cp $(cpklo) kare 89681 kere 44841
```

```
fede fit ka 65 ke 66 cp $(cpklo) kare 179362 kere 224202
```

```
fede fit ka 57 ke 47 cp $(cpklo) kare 1122002 kere 897602
```

```
$$$$$
```

```
$$ Auflagerdefinition -Gesamtmodell
```

```
$$$$$
```

```
!*!Label Auflager
```

```
grup 80 Bez 'Auflager'
```

```
mod knot 9933 fix py $hinten
```

```
mod knot 9923 fix py
```

```
$Festes Auflager
```

```
sbox a1x gpt 39690 b1x gpt 39693 a2x gpt 39693 b2x gpt 1633 t 0.00001
```

```
knot sbox fix pp
```

```
$Verschiebliches Auflager in x-Richtung
```

```
sbox a1x gpt 3250 b1x gpt 3253 a2x gpt 3253 b2x gpt 39683 t 0.00001
```

```
knot sbox fix xp
```

```
ENDE
```

```
$$$$$
```

```
$ Belastung
```

```
$$$$$
```

```
!*!Kapitel Belastung
```

```
+prog sofildoad urs:529
```

```
##Einwirkungsdefinition#
```

```
kopf Belastung generieren
```

```
$-----
```

```
$ Eigengewicht
```

```
$-----
```

```
let#lf 1
```

```
ACT G bez 'Eigengewicht'
```

```
lf #lf egz 1.0
```

```

sto#n_lf #lf

$$-----
$$ Flächenlast
$$-----
$let#lf #lf+1
$ACT Q bez 'Windsog'
$lf #lf

$ area ref qgrp 11 typ pyy p1 $(p1) x1 gpt 80 x2 gpt 560 x3 gpt 620 x4 gpt 140

$sto#n_lf #lf

$$-----
$$ Flächenlast
$$-----
$let#lf #lf+1
$ACT Q bez 'Winddruck'
$lf #lf

$ area ref qgrp 11 typ pyy p1 $(p3) x1 gpt 80 x2 gpt 560 x3 gpt 620 x4 gpt 140

$sto#n_lf #lf

$-----
$ Knotenlast hor.
$-----
let#lf 4
ACT Q bez 'Knotenlast horizontal'
lf #lf
    knot 9931 typ pxx p1 $(p2)/2
    knot 9930 typ pxx p1 $(p2)/2

sto#n_lf #lf

$$-----
$$ Knotenlast vert.
$$-----
$let#lf #lf+1
$ACT Q bez 'Knotenlast vertikal beid.'
$lf #lf
$ knot 9931 typ pzz p1 ($(p4)/4) $links
$ knot 9930 typ pzz p1 ($(p4)/4)
$ knot 9921 typ pzz p1 ($(p4)/4) $rechts
$ knot 9920 typ pzz p1 ($(p4)/4)

$sto#n_lf #lf

$-----
$ Beullast - affin zu LF 4
$-----
let#lf 6
ACT Q bez 'Beullast'
lf #lf

    knot 9931 typ pxx p1 $(p5)/2
    knot 9930 typ pxx p1 $(p5)/2
sto#n_lf #lf
ENDE

$-----
$ Knotenverschiebung
$-----

let#lf #lf+1
ACT Q bez 'Knotenverschiebung'
lf #lf

```


Numerische Untersuchung einer hybriden Glas-Stahl-Konstruktion für Fassaden

```
knot 9931 typ wxx p1 $(p6)
knot 9930 typ wxx p1 $(p6)
sto#n_lf #lf
ENDE

#####
$ Lastfälle
#####

!+!Kapitel Lastfälle
+prog ase urs:5
kopf Lastfälle

$Lastfallgenerierung
let#lf 1
loop #n_lf
lf #lf
ende
let#lf #lf+1
endloop

ENDE

#####
$ Verformte Struktur
#####

!+!Kapitel Verformte Struktur
$ Seite 2-90 dynamische Eigenwerte

!*!Label Beuleigenformen: horizontale Einzelkraft
+PROG ASE URS:3
KOPF Zustandslastfall für Beuleigenwertermittlung
SYST prob nonl tol -0.05 iter 240
LF (#n_lf+10) BEZ PLF_Einzellast
LC 6 $ Beullast
ENDE

+PROG ASE urs:6
KOPF Beuleigenwerte für Spannungen - Knotenlast
SYST PLF (#n_lf+10) Fakv 0.0 $ oder FAKV 1.0 falls Vorverformung des PLF mit berücksichtigt werden soll!
EIGE 4 beul LF 100 Lmin Auto $ Speichert die Beuleigenwerte in LF 100-103
ENDE

#####
$ für Ekle= >1.4e3
#####

+PROG ASE URS:22
KOPF Normierte Beuleigenformen LF 100
Steu Warn 398
Steu Warn 399
SCHI LF 100 Vmax 0.001 $ Verformung auf max. 1mm normiert
LF 301 Bez 'normierte Eigenform LF 100'
Ende

+PROG ASE URS:10
KOPF Normierte Beuleigenformen LF 101
Steu Warn 398
Steu Warn 399
SCHI LF 101 Vmax 0.001 $ Verformung auf max. 1mm normiert
LF 302 Bez 'normierte Eigenform LF 101'
Ende
```

I+IKapitel Überlagerung**+PROG ASE** URS:43

KOPF Überlagerung (LF: H) 1.Beuleigenform

echo voll ja

Steu Warn (541)

STEU WARN (350 353 1)

\$Größer Dehnungsbereich vom Stahl
\$ wird abgefahren! Kontrollieren!!!

Steu opt solv 4

SCHI LF 301 FAKV $(\$(hs)*1000/\$(fakt))$

\$ spannungslose Vorverformung 1/500 mm

SYST PROB th3 tol -0.05 iter 240 nmat ja fmax 1.1

grup 10,11 wert lin

grup (20,25,40,41,50,60,61,70) wert voll

LF 450 egz 1.0 bez 'LF: H'

LC 4 fakt 1.0 \$ horizontale Last

Ende

+PROG ASE URS:12

KOPF Überlagerung (LF: H) 2.Beuleigenform

Steu Warn (541)

STEU WARN (350 353 1)

Steu opt solv 4

SCHI LF 302 FAKV $(\$(hs)*1000/\$(fakt))$

\$ spannungslose Vorverformung 1/500 mm

SYST PROB th3 tol -0.05 iter 240 nmat ja fmax 1.1

grup 10,11 wert lin

grup (20,25,40,41,50,60,61,70) wert voll

LF 451 egz 1.0 bez 'LF: H'

LC 4 fakt 1.0 \$ horizontale Last

Ende