



Technische Universität Graz
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Numerische und versuchstechnische Untersuchung von hängenden Glasschwertern

MASTERARBEIT

von

Vlad Silvestru

Eingereicht am
Institut für Hochbau

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
der Studienrichtung Konstruktiver Ingenieurbau - Bauingenieurwissenschaften

Begutachter und Betreuer:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt

Graz, im März 2012

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit bisher weder im In- noch im Ausland einer Beurteilerin oder einem Beurteiler in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Ich versichere, dass diese Masterarbeit bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht wurde.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich beim Verfassen dieser Masterarbeit unterstützt haben, wie auch denen die mir während meiner Studienzeit jederzeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Besonderer Dank, Respekt und Liebe gebührt meiner Familie, vor allem meinen Eltern Anca und Cristian, die mir das Studium an der TU Graz ermöglicht und auch während Tiefphasen Selbstvertrauen und Rat gegeben haben. Besonders danke ich auch meinem Bruder Claudiu, der immer Zeit für ein Gespräch mit mir gefunden hat und auf den ich mich immer verlassen kann.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt vom Institut für Hochbau der Technischen Universität Graz für die ausgezeichnete Betreuung bei der Erstellung dieser Masterarbeit und für die zur Verfügungstellung eines Arbeitsplatzes bedanken. Aus fachlicher und auch aus menschlicher Sicht gebührt ihm als Professor mein größter Respekt. Den Mitarbeitern des Institutes für Hochbau danke ich für das angenehme Arbeitsklima und die fachlichen Gespräche, vor allem Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Zellinger und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Architekt Michael Grobbauer.

Ein besonderer Dank gilt auch dem Unternehmen Waagner-Biro Stahlbau AG, welches die Arbeit in wissenschaftlicher und finanzieller Hinsicht unterstützt hat und speziell dem Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Tobias Mähr für die persönliche Betreuung, dem Herrn Dr. Ing. Rene Ziegler und dem Herrn M.Sc Eng Thomas Henriksen. Außerdem möchte ich mich bei dem Herrn Dipl.-Ing. Herbert Pardatscher vom Prüflabor des Institutes für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien bedanken, für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Bei Angelika und Martin Sattlegger bedanke ich mich für Ihre Freundlichkeit und Unterstützung und ich möchte erwähnen, dass ich ohne Ihre Bekanntschaft mein Studium wahrscheinlich nicht an der TU Graz angetreten hätte. Besonderer Dank gebührt Herrn Dipl.-Ing. Jörg Nahold, der mir in den letzten vier Jahren als sein Mitarbeiter die Möglichkeit gegeben hat, mein Studium selbst zu finanzieren und auch außerhalb des Büros oft seine Hilfe angeboten hat.

Ein spezieller Dank gilt meinen Freunden, die mir während der Studienzeit die nötige Abwechslung zum Studien- und Arbeitsleben gegeben haben. Namentlich erwähnen möchte ich an dieser Stelle Diana Biltog, Ioana Cosgarea, Ivona Dumitrescu, Diana Silvestru und Horea Hundorfean, die immer Zeit für ein Gespräch oder eine gemeinsame Beschäftigung geopfert haben.

Allen anderen Freunden, Kollegen, Verwandten und Bekannten, die sich an dieser Stelle angesprochen fühlen, ich sie aber zu erwähnen vergessen habe richte ich ein aufrechtes Danke aus.

KURZFASSUNG

Zeitgenössische Architekturentwürfe sehen zunehmend transparente Gebäudehüllen mit einer maximalen Reduzierung der sichtbaren Konstruktion vor. Um diese Offenheit zu realisieren wird Glas auch lastabtragend eingesetzt, zum Beispiel in der Form von Glasschwertern. Beim Entwurf dieser Konstruktionselemente gebührt der Entwicklung der Verbindung zwischen Glasfinne und Unterkonstruktion (in der Regel aus Stahl) eine große Bedeutung. In der Regel kommen Lochleibungsverbindungen in Kombination mit Mörtel, Harz oder thermoplastische Klotzungen zur Anwendung.

Das Ziel der Masterarbeit ist die Untersuchung und Optimierung von hängenden Glasschwertern, mit Schwerpunkt auf der Lasteinleitung von der Glasfinne in die Stahlunterkonstruktion (Stahlschuhe). Als Erstes wird Glas als Werkstoff und die in der Regel bei Glaskonstruktionen verwendeten Verbindungsarten behandelt. Anschliessend wird der Stand der Forschung (state of the art) für die Themen, die für die Entwicklung von hängenden lastabtragenden Glasschwertern eine wichtige Rolle spielen, zusammengefasst. Dem theoretischen Teil folgt die Vorstellung einiger ausgewählter Projekte, bei denen Glasschwerter als Tragwerkselemente in der Fassade eingesetzt wurden.

In den weiteren Kapiteln der Arbeit werden zwei Typen von hängenden Glasschwertern vorgestellt und untersucht. Beim ersten Glasschwertyp wird das Eigengewicht über eine Lochleibungsverbindung mit einem Bolzen übertragen. Das Biegemoment, welches aus dem Hebelsarm zwischen der Lasteinleitung von der Fassade in die Finne und der Lasteinleitung von der Finne in den Stahlschuh resultiert, wird auf Kontakt übertragen. Als Kontaktmaterialien werden sowohl Mörtel (Hilti HIT-HY70), als auch Klotzungen aus Thermoplasten (POM) analysiert und miteinander verglichen. Die zweite Lösung für die Lastübertragung von der Finne auf den Stahlschuh erfordert keine Bohrungen und keine Lochleibungsverbindungen. Sowohl horizontale als auch vertikale Lasten werden mit Hilfe der ausgewählten Geometrie nur auf Kontakt übertragen. Dieses ergibt einen wirtschaftlichen Vorteil in der Herstellung. Der Einfluß verschiedener Parameter (zum Beispiel die Länge der Klotzungen oder der Abstand zwischen Klotzungen und Glasscheibenecke) wird durch numerische Berechnungen untersucht.

Um die Ergebnisse aus den numerischen Simulationen zu überprüfen werden Laborversuche durchgeführt. Für die Messung der Dehnungen im Einspannbereich der Glasfinne wird ein photogrammetrisches System verwendet. Da es in der Anwendung solcher Messsysteme auf Prüfkörper mit Glasoberflächen noch sehr wenig Erfahrung gibt, ist der Einsatz von Dehnungsmessstreifen ebenfalls erforderlich, um die photogrammetrischen Messergebnisse zu überprüfen. Abschliessend werden die versuchstechnischen Messwerte mit den numerischen Ergebnissen verglichen, die Erkenntnisse aus der Arbeit zusammengefasst und weitere Forschungsthemen formuliert.

ABSTRACT

Transparent Building skins with a maximal reduction of the visible structure are more and more often an important part of contemporary architectural designs. To realise this transparency, glass is also used as load-bearing elements, for example as glass fins. Of capital importance in the design of such structural elements is the development of the joint between the glass part and the supporting (steel) structure. Generally, bolted connections in combination with grout, resin or thermoplastic contact materials are used.

The objective of the Master Thesis is the analysis and the optimisation of suspended glass fins, focusing on the load application from the glass part into the steel supporting structure. First, glass as a material and the connection types, used for glass structures, are discussed. Then the state of the art, concerning the main topics, which are necessary for the development of suspended load-bearing glass fins, is summarised. After the necessary literature search and theoretical part, a few projects are presented, where glass fins are used for structural purposes in the facade.

In the next chapters of the thesis two types of suspended glass fins are presented and analysed. In the first case the dead load is transferred by a bolted connection with one bolt. The moment, which results because of the arm between the load application from the facade into the fin and the load application from the fin into the supporting steel structure, is transferred by contact. As contact materials both grout (Hilti HIT-HY70) and thermoplastic blocks (POM) are analysed and compared. The second solution for the load application from the glass fin to the supporting steel structure needs no boreholes and no bolts. Due to the designed geometry, both horizontal and vertical loads are transferred by contact. This brings a cost-effective advantage. The influence of different parameters (for example the length of the thermoplastic blocks or the distance between the block and the corner of the glass pane/fin) is analysed by numerical calculations.

Experimental tests are performed to check the results of the numerical simulations. For the measurement of the strain in the connection area a photogrammetric system is used. Because there is not much experience with the use of such measurement systems on elements with glass surfaces so far, strain measuring strips are also necessary to check the photogrammetric results. Finally the results of the experimental tests are compared with the numerical results, the findings are summarised and topics for further research are formulated.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Aufbau der Masterarbeit	1
1.2	Motivation	4
1.3	Aufgabenstellung	6
1.4	Vorgehensweise	6
2	Glas als Werkstoff	7
2.1	Geschichtliche Entwicklung	7
2.2	Floatglas	10
2.3	Mechanische Bearbeitung	13
2.4	Glasprodukte	14
2.4.1	Thermische Vorspannung	14
2.4.2	Flächiges Fügen	16
2.4.3	Isolierglas	18
3	Konstruieren mit Glas	19
3.1	Tragwerkstypen	19
3.1.1	Glas als Sekundärtragwerk	21
3.1.2	Glas als Primärtragwerk	21
3.2	Verbindungsarten	24
3.2.1	Reibverbindungen	24
3.2.2	Lochleibungsverbindungen	25
3.2.3	Klebeverbindungen	27
4	State of the Art	29
4.1	Aktueller Stand der Normen und Richtlinien	30
4.1.1	Rechnerische Nachweise	33
4.1.2	Versuchstechnische Nachweise	34
4.2	Einleitung von Drucklasten an den Glaskanten	35
4.2.1	Vergussmörtel Hilti HIT-HY 70	37
4.2.2	Polyoxymethylen (POM)	40
4.2.3	Polyamid (PA)	41
4.2.4	Untersuchungen an Verklotzungsmaterialien auf Druck	42
4.2.5	Verteilung der thermischen Vorspannung	46
4.2.6	SL-Verbindungen im konstruktiven Glasbau	48
4.3	Glasträger	52
4.3.1	Untersuchungen an der ETH Zürich	52
4.3.2	Stabilität von Glasträger und Glasschwerter	53
4.3.3	Entwurf und Analyse eines 18 m langen Glasschwertes	58
5	Ausgeführte Beispiele	61
5.1	Willis Faber & Dumas Bürohaus	61

5.2	Sainsbury Center for Visual Arts	64
5.3	Glaspavillon Aachen	66
5.4	Museum für Stadtgeschichte, Luxemburg	68
5.5	ADNEC Capital Gate - Main Entrance Canopy	70
6	Rechteckiges Glasschwert - Analyse	73
6.1	Allgemeines	73
6.2	Mörtel als Zwischenschicht	75
6.2.1	Numerisches Modell	75
6.3	Klotzungen als Zwischenschicht	78
6.3.1	Numerisches Modell	79
6.3.2	Abstand der Klotzung zum oberen Rand	80
6.3.3	Länge der Klotzung	82
6.3.4	Abstand zwischen den Klotzungen	84
6.3.5	Glasstärke	87
6.4	Überlegungen zum Bohrloch	89
7	Gevoutetes Glasschwert - Analyse	93
7.1	Allgemeines	93
7.1.1	Verfahren nach Culmann	95
7.1.2	Numerisches Modell	96
7.2	Gevoutetes Glasschwert ohne Knick	97
7.2.1	Vergleich zwischen Mörtel und Klotzung	99
7.3	Gevoutetes Glasschwert mit Knick	101
8	Versuchsaufbau und Prüfkörper	105
8.1	Vorgehensweise	105
8.2	Randbedingungen	107
8.3	Messtechnik	109
8.3.1	Wegaufnehmer	110
8.3.2	Dehnungsmessstreifen (DMS)	110
8.3.3	Photogrammetrische Messung	112
8.3.4	Ausgewählte Messtechnik	113
8.4	Optimierung der Prüfkörper	114
8.4.1	Bemessung	114
8.4.2	Prüfkörpergeometrie	115
8.5	Sonstiges	118
9	Numerische Analyse der Versuche	119
9.1	Annahmen	119
9.2	Rechteckiges Glasschwert mit Mörtel	122
9.3	Rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen	124
9.4	Gevoutetes Glasschwert mit Mörtel	126
9.5	Gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen	128
9.6	Druckspannungen	130

10 Versuchsdurchführung	131
10.1 Vorgehensweise und Vorbereitungen	131
10.2 Stabilitätsproblem und Maßnahmen	133
10.3 Durchführung und Dokumentation der Versuchsreihen	136
10.3.1 Versuchsreihe gevoutetes Glasschwert mit Mörtel	137
10.3.2 Versuchsreihe gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen	146
10.3.3 Versuchsreihe rechteckiges Glasschwert mit Mörtel	154
10.3.4 Versuchsreihe rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen	162
10.4 Vergleich der Messergebnisse	170
10.4.1 Gevoutetes Glasschwert mit Mörtel	171
10.4.2 Gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen	172
10.4.3 Rechteckiges Glasschwert mit Mörtel	174
10.4.4 Rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen	175
11 Zusammenfassung und Ausblick	177
11.1 Zusammenfassung	177
11.2 Ausblick	180

1 Einleitung

Aufbau der Masterarbeit
Motivation
Aufgabenstellung
Vorgehensweise

1.1 Aufbau der Masterarbeit

Kapitel 1: Einleitung

Im ersten Kapitel werden stichwortartig die in den weiteren Kapiteln ausgearbeiteten Punkte angedeutet. Zusätzlich wird in wenigen Sätzen der Inhalt jedes Kapitels wiedergegeben. Weiters wird die Motivation für das im Rahmen dieser Arbeit behandelte Thema geschildert und anschließend die Aufgabenstellung und die Vorgehensweise zur Untersuchung der Probleme erklärt.

Kapitel 2: Glas als Werkstoff

Der Werkstoff Glas hat viele Anwendungsbereiche, sobald er aber als tragender Bauteil eingesetzt werden soll, wird seine Tauglichkeit in Frage gestellt. Eine kurze Wiedergabe der geschichtlichen Entwicklung von Glas, sowie die Aufzählung der wichtigsten mechanischen Eigenschaften und der verwendeten Hauptprodukte sollen als Grundlage für das Konstruieren mit Glas dienen.

Kapitel 3: Konstruieren mit Glas

Um Glaselemente in Konstruktionen einzusetzen muss einerseits bekannt sein an welcher Stelle diese in einem Tragwerk vorkommen können und andererseits wie diese mit anderen Elementen verbunden werden können. Diese Themen werden im Rahmen dieses Kapitels zusammengefasst. Bei den Verbindungen werden Reib-, Lochleibungs- und Klebeverbindungen behandelt.

Kapitel 4: State of the Art

Damit Konstruktionen auch verwirklicht werden können sind Nachweise erforderlich. Die europäischen und vor allem die im deutschsprachigen Raum verwendeten Normen und Richtlinien für Konstruktionen aus Glas werden aufgezählt und verglichen. Außerdem wird der für das Thema dieser Arbeit wichtige Stand der Wissenschaft erfasst, indem man Forschungsergebnisse betreffend Lasteinleitung an Glasanten, Scher-Lochleibungsverbindungen im konstruktiven Glasbau, Eigenschaften von Zwischen-

schichtmaterialien zur Lasteinleitung (Mörtel, Thermoplaste) und Untersuchungen an Glasträger vorstellt.

Kapitel 5: Ausgeführte Beispiele

Um ein Bild über die Verwendung von Glas als tragender Bauteil zu schaffen, werden einige ausgeführte Projekte vorgestellt, bei denen im Tragsystem Glasschwerter (Glasfinnen) oder Glasstützen vorkommen. Beim letzten vorgestellten Bauwerk wird auf die verwendeten Glasschwerter etwas genauer eingegangen, da diese der Ausgangspunkt für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Untersuchungen sind.

Kapitel 6: Rechteckiges Glasschwert - Analyse

Nachdem in den bisherigen Kapiteln die theoretischen Grundlagen aufbereitet wurden, werden in diesem die ersten Untersuchungen beschrieben. Dabei wird die Geometrie des Glasschwertes beibehalten und nur die Lasteinleitung abhängig von verschiedenen Zwischenschichtmaterialien betrachtet. Es werden der Mörtel Hilti HIT-HY 70 und Polyoxymethylen (POM) verwendet. Zusätzlich wird bei POM der Einfluss von Größe und Anordnung der Klotzungen untersucht. Als Letztes werden in diesem Kapitel noch einige Erkenntnisse zum Bohrloch diskutiert.

Kapitel 7: Gevoutetes Glasschwert - Analyse

In diesem Kapitel wird eine Ausführungsvariante von Glasschwertern mit Geometrieänderung untersucht. Durch Ausbildung einer gevouteten Kante können auch die vertikalen Lasten über Kontaktdruck an den Glaskanten übertragen werden, so dass auf das Bohrloch und den Bolzen vom rechteckigen Glasschwert verzichtet werden kann.

Kapitel 8: Versuchsaufbau und Prüfkörper

Um die in den letzten zwei Kapiteln beschriebenen numerischen Untersuchungen zu überprüfen werden Versuche durchgeführt. Dazu wird in diesem Kapitel auf die Konzipierung des Versuchsaufbaus eingegangen. Es werden die Randbedingungen erklärt, die Vereinfachung und Optimierung der Prüfkörper dokumentiert und die in Frage kommenden Messtechniken vorgestellt. Im Anhang sind Pläne der verschiedenen für die Versuche erforderlichen Glas- und Stahlteile beigelegt.

Kapitel 9: Numerische Analyse der Versuche

In diesem Kapitel werden die geplanten Versuche mit der Software Sofistik numerisch untersucht. Dabei werden die im Kapitel 8 ausgearbeiteten Geometrien angenommen. Die Ergebnisse werden in Form von Tabellen, Diagrammen und farbige Hauptspannungsbilder dargestellt.

Kapitel 10: Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel wird die Versuchsdurchführung beschrieben und anhand von Fotos dokumentiert. Es werden Erkenntnisse zur Resttragfähigkeit, zu den Bruchbildern, Bruchlasten und Dehnungen erfasst. Anschließend werden die Versuche ausgewertet und die erhaltenen Messwerte mit den Ergebnissen der numerischen Berechnung verglichen.

Kapitel 11: Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden im letzten Kapitel die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen. Zusätzlich wird ein Ausblick über die Bereiche, in denen noch Forschungsbedarf liegt gegeben und weiterführende Themen formuliert.

Anhang:

Im Anhang liegen die Pläne für die Glasfinnen und die Stahlschuhe, sowie Pläne für die Zusammenstellung der Prüfkörper im Format A3 vor. Zusätzlich ist die Massenermittlung für die Bestellung der Prüfkörper beigelegt.

1.2 Motivation

Glas ist ein einzigartiges, faszinierendes Material, welches in zeitgenössischen Architektur- und Ingenieurentwürfen von Hochbauten zunehmend für die Erfüllung einer breiten Palette von Anforderungen eingesetzt wird. Es besitzt das Gewicht von Beton, die Festigkeit von Stahl und eine der Luft nahe kommende Transparenz.

Als transparentes, raumabschließendes Element in Form von Fenster wurde Glas schon zur Römerzeit verwendet, doch erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hat man durch die Glashäuser angefangen dem Material mehr zuzutrauen, als die für den Lichteinlass in Gebäuden erforderlichen Öffnungen zu schliessen.



Abb. 1.1 Palmenhaus beim Schloss Schönbrunn in Wien [48];

Das Ende des 20. Jahrhunderts und der Beginn des 21. Jahrhunderts bringen zunehmend durchsichtige Großfassaden und als Freiformflächen ausgebildete Gebäudehüllen in den Architekturentwürfen. Als tragende und aussteifende Konstruktionen der Fassade werden anstelle von Stahlträgern Seilnetze, Seilbinder oder Glasschwerter eingesetzt, um die Transparenz zu erhöhen.



Abb. 1.2 Links: Seilnetzfassade beim Hotel Kempinski in München [17];
Rechts: Fassade mit Glasschwerter beim Museum für Stadtgeschichte in
Luxemburg [7]

Bei den frei geformten Gebäudehüllen werden entweder planare Dreiecks- und Vierecksnetze oder einfach gekrümmte Glasscheiben eingesetzt.



Abb. 1.3 Links: Marina Hotel in Abu Dhabi [49]; Rechts: Złote Tarasy in Warschau [50]

Durch seine mechanischen Eigenschaften bietet sich der Werkstoff Glas durchaus für den Einsatz als tragendes Element an. Leider ist diese Verwendung von Glas, aufgrund des Fehlens von einheitlichen Regelwerken, wie es sie im Betonbau, Stahlbau oder Holzbau in der Form von Eurocodes gibt, auch heute noch schwer durchzusetzen. Bei den meisten Projekten besteht der Bedarf von Genehmigungen für den Einzelfall.

Vor allem die Scheibentragwirkung von Glas kann zur Realisierung effizienter und architektonisch beeindruckender Konstruktionen beitragen. Bei Flächentragwerken wie Freiformflächen könnte die Aktivierung der Scheibentragwirkung der Glaspaneel zu neuen hybriden Tragstrukturen führen. Durch Glasschwerter, bei denen die Lastabtragung ebenfalls in Scheibenebene erfolgt, kann die Transparenz von Fassaden erhöht werden. Wichtige Aspekte zum Scheibentragverhalten von Glas sind die Stabilität und die Lasteinleitung in den Glasscheiben.

Einzig durch intensive Forschung in diesem Bereich, Entwicklung einfacher und gleichzeitig effizienter Tragkonstruktionen und Ausarbeitung geeigneter Bemessungskonzepte wird das Vertrauen zum Material Glas steigen und die Verwirklichung der Vorstellungen von Offenheit und Leichtigkeit weiter angetrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Beitrag dazu gebracht, indem man anhand von Glasschwertern die Lasteinleitung an den Glaskanten untersucht und die bekannten Glasschwerttypen weiterentwickelt.

1.3 Aufgabenstellung

Thema dieser Arbeit sind auskragende Tragstrukturen aus Glas, sogenannte Glasschwerter, welche vor allem wegen der Anbindung an andere Bauteile (in der Regel aus Stahl) schwer konstruktiv umsetzbar sind. Ziele der im Folgenden durchzuführenden Untersuchungen sind:

- ◆ das bestehende Wissen zur Konstruktion und Berechnung von Glasschwertern zu erweitern
- ◆ bekannte Lösungen weiterentwickeln und verbessern (es soll insbesondere eine Verbesserung der Tragfähigkeit erreicht werden)
- ◆ Die Reduzierung des Materialaufwandes (vor allem für Vergussmörtel und Glas)
- ◆ die Untersuchung der Lastübertragung von den Glasschwertern auf die Stahlkonstruktionen mittels verschiedener weicherer Materialien
- ◆ die Untersuchung der zur Lastübertragung eingesetzten Kontaktmaterialien

1.4 Vorgehensweise

Um den im Kapitel 1.3 genannten Aufgabenstellungen nachzugehen wird nach folgenden Schritten vorgegangen:

- ◆ Aufbereitung der theoretischen Grundlagen über Glas als Werkstoff, Konstruktionen aus Glas und deren Verbindungen, sowie auch Zusammenfassung des Standes der Technik und der Forschung in den für das Thema dieser Arbeit interessanten Bereichen
- ◆ Vorstellung einiger Bauobjekte, in deren Konstruktion Glasschwerter vorkommen
- ◆ Analyse der von Waagner-Biro gebauten Glasschwerter (Referenzprojekt ADNEC Capital Gate - siehe Kapitel 5.5) anhand von FE-Berechnungen
- ◆ Durchführung von Parameterstudien und Analyse möglicher vorteilhafter Ersatzlösungen, ausgehend von den unter dem letzten Punkt genannten Glasschwerter
- ◆ Entwicklung von Lösungen für die Lasteinleitung in der Einspannstelle auf Grundlage von FE-Berechnungen
- ◆ anschließend an den Parameterstudien und Analysen erfolgt die Prüfung ausgewählter Glasschwerter im Labor, um deren Tragfähigkeit und Steifigkeit zu ermitteln
- ◆ Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse und Formulierung weiterführender Forschungsthemen (z.B. Überlegungen zur Dauerhaftigkeit und zum Langzeitverhalten)

2

Glas als Werkstoff

**Geschichtliche Entwicklung
Floatglas - Herstellung und Eigenschaften
Mechanische Bearbeitung
Glasprodukte**

2.1 Geschichtliche Entwicklung

Die erste nachgewiesene Verwendung von Glas findet in der Steinzeit, etwa 20.000 v. Chr. statt. Es handelt sich dabei aber nur um ein Ausbruchbestandteil von Vulkanen, der aufgrund seiner Härte und Schärfe zum Schneiden verwendet wird. Die Ägypter, 5000 v. Chr., verwenden das Glas als Schmuck und in Mesopotamien / Syrien werden 200 v. Chr. zum ersten Mal durchsichtige, mundgeblasene Glasgefäße hergestellt.

In Rom findet Glas (als Gußglas) erstmals als Raumabschluss Verwendung durch die sogenannten „fenestra“ (lat. für mache sichtbar), doch zusammen mit dem Römischen Reich verschwinden auch diese Kenntnisse. Erst ab 1000 n. Chr. kann man erneut die Verwendung von Glas zu Bauzwecken in der Form von Kirchenfenster feststellen. Durch die gotischen Kathedralen, bei denen die Baumeister Ausdruckswille, Konstruktion und Glastechnik vereinen, kann man diese Epoche als erstes Zeitalter der Glasarchitektur bezeichnen. Es kommen das Walzverfahren, sowie ab 1330 das Mondglasverfahren, eine wirtschaftlichere Herstellungsmethode für kleinformatige Scheiben, zur Anwendung. In der Renaissance und im Barock werden die Erkenntnisse der Gotik über die Auflösung der massiven Wand fortgesetzt [8].



Abb. 2.1 Gotische Kathedralen - Links: Lichteinfall im Kölner Dom [38];
Rechts: Kathedrale von Amiens (1220-1288) [39]

Die Entwicklung der Industrialisierung und der Wissenschaft ermöglichen die im 19. Jahrhundert folgenden Eisen-Glas-Konstruktionen. Obwohl Karl Culman 1851 mit der Fachwerktheorie das Dimensionieren der Konstruktionsglieder ermöglicht, kann das Zusammenwirken von Eisen und Glas nur aufgrund von ingenieurmäßigen Erfahrungen erfasst werden. Das bekannteste zu dieser Zeit erstellte Bauwerk ist der Kristallpalast in London von Sir Joseph Paxton um 1851, welches durch die aus konstruktiven und funktionalen Prinzipien entwickelte gläserne Haut die Raumauffassung revolutioniert [8].

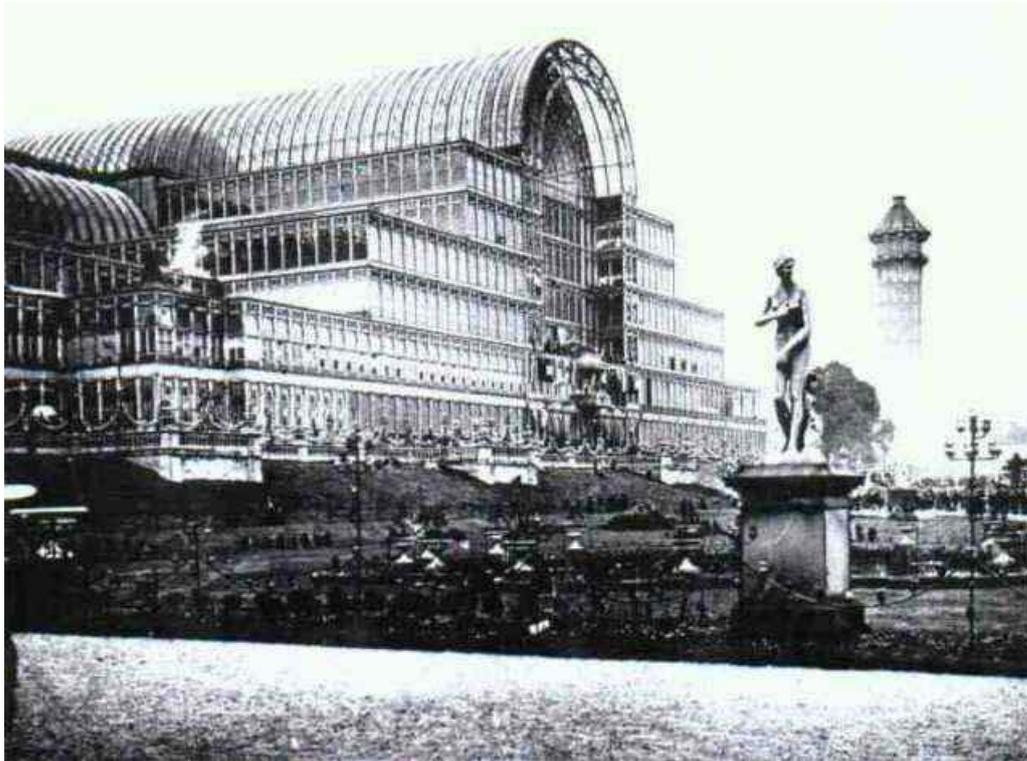


Abb. 2.2 *Der Kristallpalast in London [40]*

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wird Glas durch den architektonischen Willen nach Offenheit zum Werkstoff der Moderne. Die Glasproduktion wird durch die Entwicklung des Ziehglasverfahrens (1914 - Fourcault-Verfahren) deutlich verbessert; Tafeln mit reiner Glasoberfläche werden direkt aus der Glasmasse gezogen. Auch Verbundsicherheitsgläser (1928) und Isoliergläser (1938) kommen erstmals auf den Markt. Mies van der Rohe bringt erstmals (1919 - Glashochhaus in Berlin) das Konzept der Trennung von Haut und Tragwerk.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ermöglicht ein großer Fortschritt in Herstellung und Veredelung von Glas die Realisierung vieler architektonischen Visionen. 1959 patentiert Pilkington das Floatglasverfahren, eine vollautomatische Herstellungsmethode, die gleichmäßige Glasoberflächen zu einem viel geringeren Preis als Spiegelglas (Tafelglas) ermöglicht. Diese zunehmende Wirtschaftlichkeit bewirkt auch eine Folgeentwicklung verschiedener Veredelungstechniken, wie Beschichtungen oder das thermische Vorspannen zu Einscheibensicherheitsglas (ESG) und später teilvorgespanntes Glas (TVG).

1951 baut die Firma Glasbau Hahn in Frankfurt einen experimentellen Ganzglas-Ausstellungspavillon. Dieses ist das erste Bauwerk, bei dem alle tragenden Bauteile aus Glas bestehen: gläserne Dachscheiben, gläserne I-Träger und gläserne Wandscheiben.



Abb. 2.3 Ganzglas-Ausstellungspavillon der Firma Glasbau Hahn [41]

Das Bestreben nach Filigranität und Transparenz hat die Verwendung von Glasschwertern zur Aussteifung von Fassaden gegen Windlasten als Folge. Ein erstes Beispiel hierfür ist die 1975 vom Büro Foster realisierte Fassade des Verwaltungsgebäudes Willis Faber & Dumas in Ipswich. Weiters werden neue Verbindungsmethoden von Fassaden- und Verglasungssysteme entwickelt, wie auch neue Berechnungsmethoden mit Hilfe computerunterstützter Datenverarbeitung, mit denen man die auftretenden Kräfte in Glasbauteilen bestimmen kann [8].



Abb. 2.4 Verwaltungsgebäude Willis Faber & Dumas in Ipswich - Links: Außenansicht [42]; Rechts: Innenansicht [43]

2.2 Floatglas

Im Glasbau kommen als Glasarten Kalk-Natronsilicatglas und Borosilicatglas zur Anwendung. Die Unterschiede zwischen den beiden sind, dass das Borosilicatglas wegen seiner Zusammensetzung eine geringere Dichte, eine höhere Temperaturwechselbeständigkeit und eine sehr hohe hydrolytische Beständigkeit und Säurebeständigkeit besitzt. Das häufiger verwendete Kalk-Natronsilicatglas weist folgende Zusammensetzung auf [23]:

Siliziumdioxid	SiO ₂	69% - 74%
Kalziumoxid	CaO	5% - 14%
Natriumoxid	Na ₂ O	10% - 16%
Magnesiumoxid	MgO	0% - 6%
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	0% - 3%

Die zwei Eigenschaften, welche den Werkstoff Glas prägen sind seine Transparenz und seine Zerbrechlichkeit. Die erste ist auf die Nichtkristallinität und den besonderen Bindungen im Inneren des Materials, welche das Durchtreten des sichtbaren Lichtes ermöglichen, zurückzuführen. Glas hat eine maximale Bruchdehnung von ungefähr 0,1% und versagt bei minimaler Überschreitung dieser elastischen Verformbarkeit schlagartig. Dieses Verhalten führt dazu, dass man Glas als sprödes Material bezeichnet, welches unter mechanischer Beanspruchung eine linear-elastische Arbeitslinie aufweist [23].

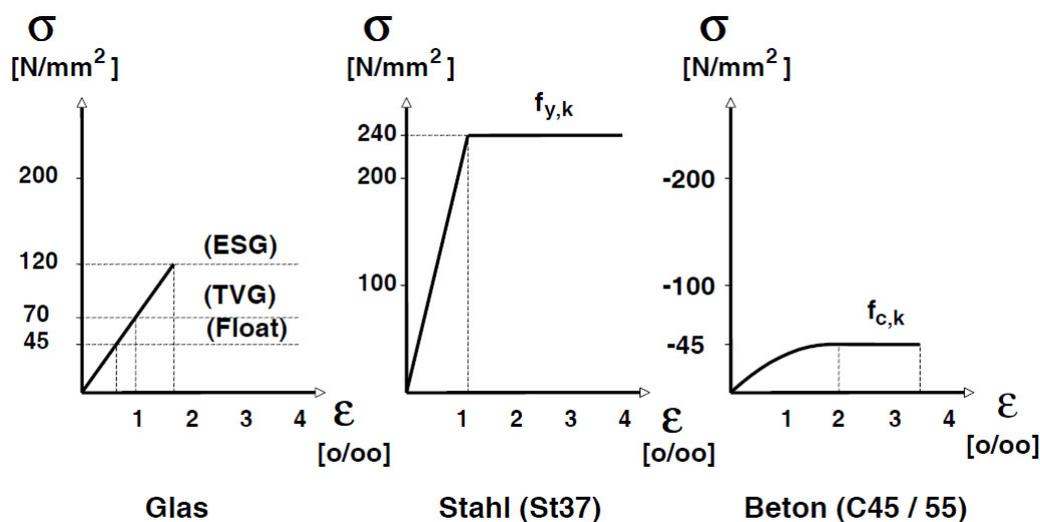


Abb. 2.5 Spannungsdehnungslinien von Glas, Stahl und Beton [17]

Das heute dominante Verfahren in der Glasherstellung ist das zwischen 1952 und 1959 von der Firma Pilkington entwickelte Floatverfahren. Im Vergleich zu den vorher verwendeten Walz- und Ziehglasverfahren erhält man durch den Floatprozess eine hohe Oberflächenqualität, ohne dass zusätzliche Nachbearbeitungen wie Schleif- und Polierprozesse erforderlich sind. Heute werden etwa 95% aller Glaserzeugnisse im Floatglasverfahren hergestellt. Laut einer Statistik aus dem Jahr 2007 werden zwei Drittel der Weltproduktion an Floatglas von folgenden vier Unternehmen hergestellt: *Nipon Sheet Glass* (erwarb im Jahr 2006 die Firma Pilkington), *Asahi*, *Saint-Gobain* und *Guardian*. Im November 2007

wurden den letzten drei allerdings Geldstrafen von der Europäischen Union, wegen illegaler Preisabsprachen verordnet.

Das Floatglasverfahren wird in der Abb. 2.6 dargestellt. Bei ungefähr 1050 °C wird das Glas von der Schmelzwanne in die Floatkammer überführt. Hier fließt es auf flüssigem Zinn und kühlt bis auf etwa 600 °C ab, Temperatur bei welcher das Glas eine genügende Eigensteifigkeit erreicht, um vom Zinnbad abgehoben und in den Kühlkanal transportiert zu werden. Während dieser Phase kühlt das Glas bis auf etwa 100 °C, dann wird es nochmals optisch überprüft und anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Das Führen über dem Zinnbad hat planparallele, ebene Oberflächen und eine verzerrungsfreie Durchsicht als Folgen [23].

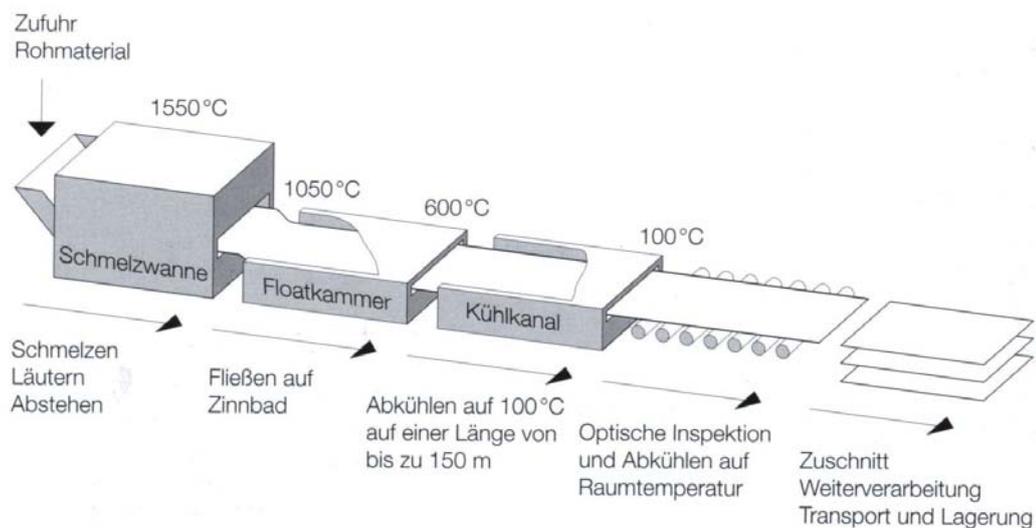


Abb. 2.6 Skizze - Herstellung von Floatglas [23]

Pro Tag können mit dem Floatglasverfahren an einem einzigen Produktionsstandort bis zu 750 Tonnen oder 50.000 m² Glas hergestellt werden. Die Dicken der Glasscheiben betragen zwischen 2 und 19 mm. Nach dem Kühlvorgang werden Scheiben von 3,21 m x 6 m geschnitten. Für Sonderanwendungen sind auch Überlängen möglich [31].

Weitere Basisprodukte sind Gussglas und gezogenes Flachglas. Auf die Herstellung dieser wird an dieser Stelle nicht eingegangen, sondern auf [23] und [31] verwiesen.

Nicht vorgespannte Basisgläser weisen theoretisch eine hohe Druck- und Zugfestigkeit auf. Infolge Herstellung, Gebrauch, mechanischer Witterungs- und Alterungseinflüssen werden aber die Glasoberflächen durch Mikro- und Makrorisse erheblich geschädigt. Werden diese Oberflächen durch Zugspannungen (z.B. infolge Biegung) beansprucht, entstehen wegen den Defekten Spannungskonzentrationen an den Rissspitzen, welche ein Wachsen der Risse und spontane Sprödbrüche bewirken. Aufgrund dieser Verhältnisse darf in der Praxis die hohe theoretische Zugfestigkeit des Glases nicht angesetzt werden. Es ist jedoch zwischen Kurzzeit- und Dauerbelastungen zu unterscheiden. Wirken die Beanspruchungen nur kurz, so dass dazwischen spannungsfreie Zeitintervalle entstehen, kommt es zur Rißheilung an der Glasoberfläche.

Weitere Eigenschaften des Werkstoffes Glas sind in Tab. 2.1 mit den entsprechenden Werten aufgezählt.

Dichte	ρ	2500 kg/m ³
Elastizitätsmodul	E	70000 N/mm ²
Schubmodul	G	28000 - 30000 N/mm ²
Querdehnzahl	μ	0,23
Wärmeausdehnungskoeffizient	α_T	$9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Temperaturwechselbeständigkeit	ΔT	30 °C bis 40 °C
Bruchdehnung	-	0,06 %
Druckfestigkeit	f_c	300 bis 600 N/mm ²
Prüfbiegezugfestigkeit	f_t	45 N/mm ²
zulässige Spannung	σ	30 N/mm ²
Ritzhärte nach Mohs	-	5 bis 6
Schneidbar	-	ja
Bruchbild	-	radiale Anrisse große Stücke

Tab. 2.1 Eigenschaften von Floatglas aus Kalk-Natronsilicatglas [17], [22]

In der Abb. 2.7 sind die Bruchbilder von verschiedenen Glasprodukten dargestellt. Aufgrund der großen und spitzen Splitter ist die Verletzungsgefahr bei einem Floatglasbruch hoch. Daher darf Floatglas z.B. für Glastrennwände, wo ein Hineinfallen von Personen vorkommen kann, nicht verwendet werden.



Abb. 2.7 Bruchbilder verschiedener Glasprodukte: von li. nach re.:
Floatglas, ESG, TVG [17]

2.3 Mechanische Bearbeitung

Die meisten mechanischen Bearbeitungsprozesse erfolgen im Falle des Werkstoffes Glas vor jeder Art von Veredelung. Ein Grund dafür ist, dass bei vorgespannten Gläsern nach dem Veredelungsprozess nur noch die Oberflächen bearbeitbar sind. Man unterscheidet Schneiden, Trennen, Kanten- und Flächenschleifen und Bohren. Zur mechanischen Bearbeitung werden Vielkorn-Werkzeuge benutzt (Diamantkorn oder Korundkorn).

Für Schneiden, Bohren und Kantenschleifen werden heutzutage CNC - gesteuerte Anlagen (Computerized Numerical Control) verwendet, die mehrere Bearbeitungsschritte durchführen können. Als Erstes wird die Rechtwinkligkeit der Scheiben hergestellt, indem von allen Kanten zwischen 5 und 10 cm geschnitten werden (zero-cut). Dieses erfolgt durch einen Schneidarm mit Diamanten, der eine Schnittgenauigkeit von bis zu 0,1 mm aufweist. Werden Formschnitte mit schrägen oder runden Kanten gefordert, ist aufgrund der geringeren Arbeitsgeschwindigkeit und der größeren Menge an Materialverschleiß mit Preisaufschlägen von bis zu 100% zu rechnen. Bei spitzen Winkeln sind entsprechende Rückschnitte auszuführen. Ein alternatives Verfahren ist das Abrasivwasserstrahlschneiden, bei dem ein Hochdruck-Wasserstrahl (bis zu 4000 bar) mit zugesetztem, losen Schleifkorn verwendet wird. Dieses kommt aber nur für besondere Anwendungen in Betracht [22], [31].

Nachdem die Glaskanten geschnitten wurden folgen in der Regel Schleif- und Polierprozesse. Dazu werden Metallwerkzeuge mit darauf gebundenem Korund- oder Diamantkorn verwendet. Als Schritte können das Anfasen, das Justieren und das Feinjustieren aufgezählt werden. Die Transparenz der Kanten wird aber erst durch das anschließende Polieren erzielt. Gehrungskanten, Flachfacetten, runde Kanten oder Nuten werden auch ausgeführt, wobei immer darauf zu achten ist, dass insbesondere das Polieren einen hohen Kostenaufwand verursacht.

Ein weiterer wichtiger mechanischer Bearbeitungsprozess stellen die Bohrungen dar. Diese werden im nicht vorgespannten Glas in der Regel durch das Diamantbohrverfahren hergestellt, bei dem ein lokales Schleifen erfolgt. Dabei wird von beiden Seiten des Glases gebohrt, um ein Ausbrechen des Bohrers zu vermeiden. Der Bohrungsversatz bei zylindrischen Löchern darf 0,5 mm nicht überschreiten. Bohrlochdurchmesser bis 70 mm sind mit dem Großteil der Anlagen möglich, in einzelnen Fällen sogar bis 150 mm. Es ist aber auch auf Mindestdurchmesser und Mindestabstände zu achten. Der Bohrlochdurchmesser darf nicht kleiner als die Glasdicke sein und es sind minimale Abstände zu den Kanten und zwischen Bohrungen einzuhalten. Im konstruktiven Glasbau kommen Bohrungen in zylindrischer Form für Bolzenverbindungen und in konischer Form für flächenbündige Punkthalter vor [22], [31].

An dieser Stelle wird der Vollständigkeit halber noch die Mattierung als mechanischer Bearbeitungsprozess erwähnt, aber nicht darauf tiefer eingegangen. Diese kann als Strahlmattierung, Flächenschliff oder chemisch durch Ätzung erzielt werden.

Die mechanischen Bearbeitungsprozesse haben eine Reduzierung der Tragfähigkeit als Folge, welcher durch eine anschließende Vorspannung der Glasscheibe entgegengewirkt wird. Um Spannungskonzentrationen zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren sind Glaskanten anzufasen und rückspringende Ecken von Aussparungen abzurunden.

2.4 Glasprodukte

Die Festigkeitsgrößen, die bauphysikalischen Eigenschaften und das Bruchbild von Floatglas sind nicht für alle Anwendungen zufriedenstellend. Um die Festigkeit zu erhöhen, die bauphysikalischen Aspekte zu verbessern und das Bruchbild für verschiedene Anforderungen anzupassen, werden weitere Verarbeitungsschritte durchgeführt. Die wichtigsten davon sind das thermische Vorspannen (ESG und TVG), das flächige Fügen (VSG) und das Fügen zu Mehrscheiben-Isolierglas (MIG).

2.4.1 Thermische Vorspannung

Um die Prüfbiegezugfestigkeit von Floatglas zu erhöhen werden die Scheiben thermisch vorgespannt. Man unterscheidet voll vorgespanntes Einscheibensicherheitsglas (ESG) und teilvorgespanntes Glas (TVG).

Einscheibensicherheitsglas - ESG

Beim ESG werden die Glasscheiben auf eine höhere Temperatur erhitzt und mit einer hohen Geschwindigkeit wieder abgekühlt. Zuerst erfolgt ein Erhitzen der Glasscheiben bis etwa 650 °C (ca. 100 °C über die Transformationstemperatur von etwa 540 °C) und anschliessend werden sie schnell von beiden Seiten mit anströmender Luft abgekühlt (siehe Abb. 2.8).

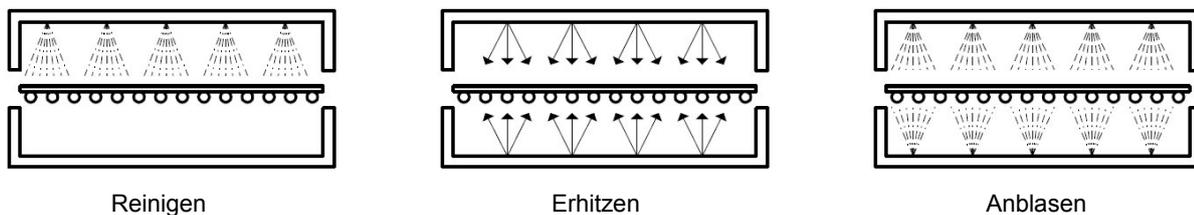


Abb. 2.8 Herstellung von ESG [17]

Aufgrund des früheren Abkühlens der Glasoberflächen im Vergleich zum Kern und dem damit verbundenen Widerstand der Oberflächen beim Zusammenziehen des Kerns entstehen Druckspannungen an den Glasoberflächen und Zugspannungen im Kern. Es handelt sich dabei um einen Eigenspannungszustand. Durch diesen Prozess erreicht man eine Erhöhung der Prüfbiegezugfestigkeit gegenüber Floatglas um den Wert der Druckvorspannung, da die für Risse kritischen Zugspannungen an den Kerben der Glasoberflächen erst nach Abbau der Druckspannungen entstehen. Erhöhte Druckspannungen an den Glasoberflächen oder Zugspannungen im Glasinneren führen in der Regel zu keinem Risswachstum [17], [31].

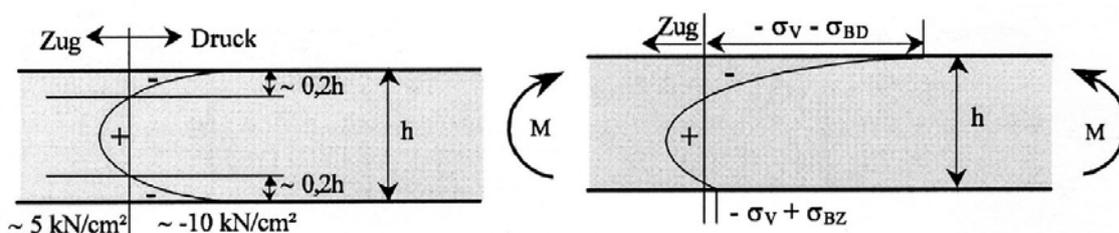


Abb. 2.9 Eigenspannungszustand von ESG und Spannungsverlauf bei einer Biegebeanspruchung [17]

Die Prüfbiegezugfestigkeit wird beim ESG im Vergleich zum Floatglas von 45 N/mm^2 auf 120 N/mm^2 und die Temperaturwechselbeständigkeit von etwa $40 \text{ }^\circ\text{C}$ auf etwa $150 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöht. Aufgrund des hohen Spannungszustandes wird auch das Bruchbild von ESG beeinflusst. Im Bruchfall kann eine Ausbreitung über die ganze Glasfläche festgestellt werden und es entstehen kleine Krümmel, die eine geringe Verletzungsgefahr darstellen.

Einscheibensicherheitsglas wird bis zu Dicken von 19 mm hergestellt. Die üblichen Größen betragen $2,5 \text{ m} \times 5,0 \text{ m}$.

Ein Nachteil von ESG aus Floatglas (Kalknatronglas) ist die Neigung zum Spontanbruch. Diese kann ohne äußere Lasteinwirkungen durch Nickelsulfid-Einschlüsse (NiS) erfolgen. Durch eine zerstörende Prüfung, den Heißlagerungstest (Heat-Soak-Test), bei der das Glas mehrere Stunden bei etwa $290 \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert wird, kann die Spontanbruchgefahr durch Ausschluß der gebrochenen Scheiben, reduziert werden [17], [31].

Teilvorgespanntes Glas - TVG

Teilvorgespanntes Glas kann sowohl anhand der Biegezugfestigkeit, als auch nach dem Bruchbild zwischen Floatglas und Einscheibensicherheitsglas eingestuft werden. Durch ein langsames Abkühlen als beim ESG wird eine geringere Vorspannung erreicht. Die Prüfbiegezugfestigkeit von TVG beträgt 70 N/mm^2 und die Temperaturwechselbeständigkeit etwa $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Beim Bruch von TVG entstehen große, aber nicht so spitze Splitter wie beim Floatglas. Das Bruchbild liegt aber näher dem des Floatglases als dem des Einscheibensicherheitsglases. Wegen der nicht mehr kontrollierbaren Produktionsqualität, wird TVG nur bis zu einer Dicke von 12 mm hergestellt.

Wie schon im Kapitel 2.3 erwähnt müssen die mechanischen Bearbeitungsprozesse vor der thermischen Vorspannung erfolgen. Nachträgliches Schneiden und Bohren würde durch Störung des Eigenspannungszustandes zum Glasbruch führen.

In den europäischen Produktnormen EN 12150 und EN 1863 werden die Bruchbilder von Einscheibensicherheitsglas und teilvorgespanntem Glas genau geregelt [17], [31].

Chemisches Vorspannen

Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle auch das chemische Vorspannen kurz erklärt. Es handelt sich dabei um eine Erzeugung von Oberflächendruckspannungen bei Gläser mit hohem Natriumgehalt durch Elektrolyse im Tauchbad. Da nur eine geringe Eindringtiefe erreicht wird, eignet sich dieses Verfahren eher für dünne Scheiben bis 4 mm . Die Vorteile sind eine bedingte Schneidfähigkeit und eine hohe Oberflächenplanität [31].

2.4.2 Flächiges Fügen

Durch den Wunsch die mechanischen und optischen Eigenschaften von Glas modifizieren zu können wurde das Verbundsicherheitsglas (VSG) entwickelt. Dieses wird durch flächiges Fügen von mindestens zwei Glasscheiben, verbunden durch Zwischenschichten aus Polyvinylbutyral (PVB), Gießharz (GH), Äthylvinylacetat (EVA) oder SentryGlas Plus (SGP) von Dupont, hergestellt. Die zwei Glasscheiben können aus Floatglas, ESG oder TVG bestehen. Die Dicke der Zwischenschichten beträgt ein Vielfaches von 0,38 mm.

Die Abb. 2.10 zeigt die Herstellungsschritte von Verbundsicherheitsglas mit PVB-Folien. Zuerst werden die Glasscheiben und die Folien miteinander verpresst und anschließend wird im Autoklaven unter Temperatur- (etwa 140 °C) und Druckbehandlung eine hochqualitative Verklebung hergestellt. In der Regel werden VSG-Scheiben mit PVB-Folien bis zum Bandmaß von 3,21 m x 6 m und bis zu einem Gewicht von einer Tonne hergestellt, Sonderlängen sind aber bedingt möglich .

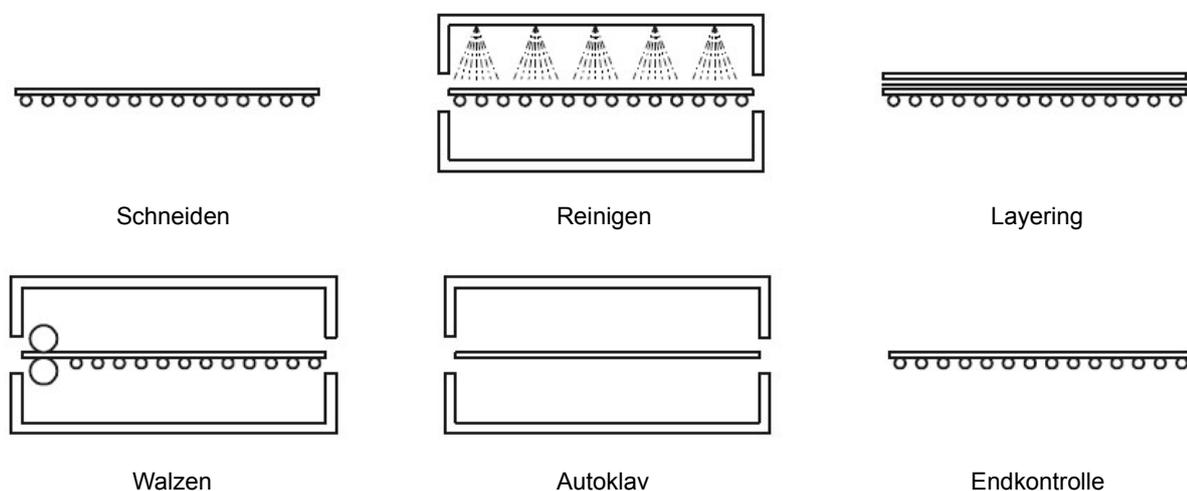


Abb. 2.10 Herstellung von VSG [17]

SGP ist wesentlich steifer als PVB-Folien und wird als Plattenmaterial (nicht als Rollen wie PVB-Folien) mit Dicken von 1,52 oder 2,28 mm geliefert. Die Herstellung von VSG mit Zwischenschichten aus SGP erfolgt ähnlich dem Verfahren mit PVB-Folien, einzig die standardmäßigen Abmessungen sind kleiner: 2,5 m x 3,0 m.

Zwischenschichten aus Gießharz bieten als Vorteile größere Dickentoleranzen wie auch Abmessungen von bis zu 3 m x 8 m. Die Herstellung erfolgt nicht voll automatisiert, der Harz wird in einem abgedichteten Scheibenzwischenraum (1 bis 2 mm) eingegossen [31].

Verbundwirkung

Ausschlaggebend für die Tragfähigkeit, die Resttragfähigkeit und die Splitterbindung ist neben der Festigkeit der verwendeten Glasscheiben, die Verbundwirkung der Zwischenschicht. Liegt diese mittig (bei symmetrischem Aufbau), so wird sie bei intakten Glasscheiben nur durch Schubkräfte beansprucht. Mit steigender Steifigkeit der Zwischenschicht wächst die Verbundwirkung und die Verformungen nehmen ab.

Im Falle von PVB-Folien wurden im Normenentwurf EN 13474 Fallunterscheidungen vorgeschlagen, da diese als visko-elastische Thermoplasten einen von Temperatur und Dauer der Einwirkung abhängigen Schubmodul haben. Bei höheren Temperaturen sinkt die Steifigkeit der Folie und es kommt zur so genannten Delamination. Treten Lasten mit längerer Einwirkungsdauer auf, so können Kriechverformungen festgestellt werden. Es wurden folgende Fälle unterschieden [31]:

- ♦ kurzzeitige Lasten (z.B. Windböen, Anprall) - voller Schubverbund darf berücksichtigt werden
- ♦ dauerhaft wirkende Lasten (z.B. Eigengewicht) - es darf nur die Steifigkeit der Scheiben angesetzt werden

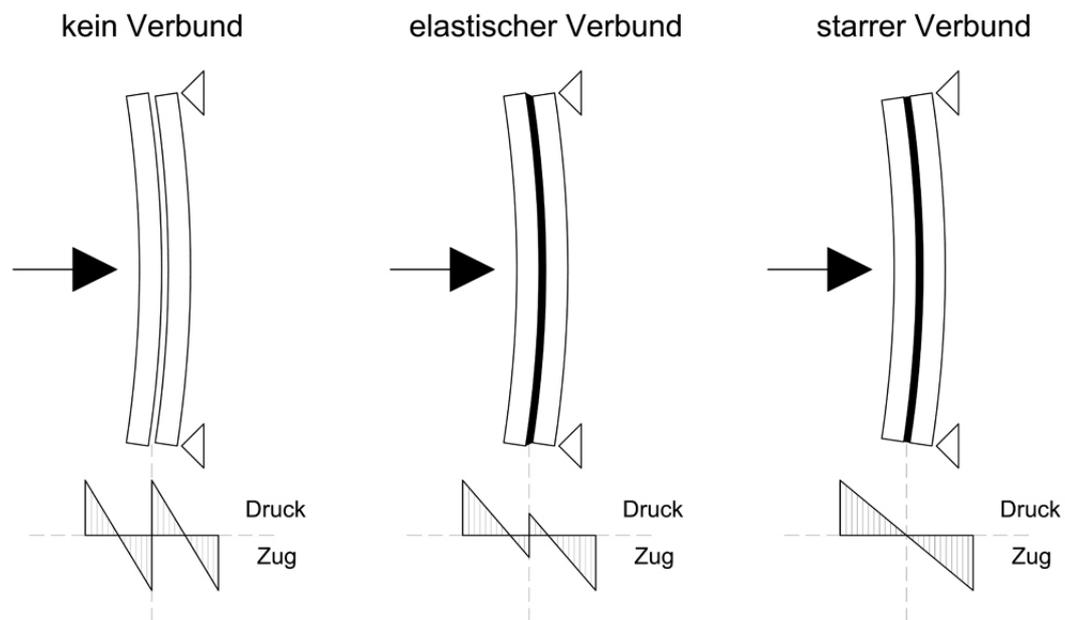


Abb. 2.11 Spannungsverteilung im Querschnitt bei VSG

In den verschiedenen nationalen Normen und Richtlinien wird die Berücksichtigung der Verbundwirkung unterschiedlich geregelt. Nach den deutschen Regeln des DIBt und laut Entwurf der DIN 18008 darf keine Verbundwirkung berücksichtigt werden. In der ÖNORM B 3716-1 wird dagegen bei Vertikalverglasungen unter Windbelastung ein Schubmodul von $G_{PVB} = 0,4 \text{ N/mm}^2$ (elastischer Verbund) für die Berechnung von Verformungen und Spannungen erlaubt. Dabei muss die Folie eine gleich hohe Steifigkeit wie eine Referenzfolie aufweisen. Im Falle von Stoßbelastungen darf sogar voller Verbund angenommen werden [17].

Zwischenschichten aus EVA und GH haben bei Raumtemperatur eine zweimal kleinere Steifigkeit als PVB, doch bei etwa 60 °C liegt die übriggebliebene Steifigkeit im Vergleich deutlich höher.

Das seit dem Jahr 2002 für die Herstellung von VSG verwendete SentryGlas Plus (SGP) bietet in dieser Hinsicht wesentliche Vorteile. Es weist eine bis zu 100 Mal höhere Steifigkeit auf, die auch bei Dauertemperaturen von bis zu 70 °C erhalten bleibt. Außerdem können bei Verwendung von Zwischenschichten aus SGP die Scheibendicken und somit die Gewichte reduziert werden. Der Nachteil ist der viel höhere Wärmeausdehnungskoeffizient im Vergleich zu Glas, welcher langfristig zu zusätzlichen Spannungen führt [17], [31].

Resttragfähigkeit

Ein weiterer Vorteil von Verbundsicherheitsglas ist die Bindung der Splitter bei Glasbruch und somit eine erhöhte Resttragfähigkeit. Die Anforderungen an VSG werden in der EN ISO 12543 bezogen auf Zwischenschichten aus PVB geregelt, da ca. 95 % der Verbundsicherheitsgläser mit solchen Folien hergestellt werden. VSG mit SGP weisen eine höhere Qualität auf. Einflußfaktoren für die Resttragfähigkeit sind Art und Dicke der Folien, sowie auch das Bruchbild der verwendeten Glasart. Im Falle eines Glasbruches (eine oder mehrerer Scheiben) entstehen Zugspannungen in der Zwischenschicht. Je höher die Reißfestigkeit und die Reißdehnung dieser sind, desto länger bleibt die Verglasung stehen. Bei VSG mit PVB kann eine Verbesserung durch Erhöhung der Foliendicke erreicht werden. VSG mit SGP weisen aufgrund der höheren Steifigkeit deutlich geringere Verformungen nach Bruch. Zusätzlich können Faser und Gewebe in dem VSG-Aufbau eingelegt werden.

Das Bruchbild spielt für die Sicherstellung der Resttragfähigkeit auch eine wesentliche Rolle. Während sich bei VSG aus Floatglas oder aus TVG bei Bruch aller Scheiben die entstehenden Splitter gegeneinander stützen, hängt VSG aus ESG fast wie eine Membran durch [17], [31].

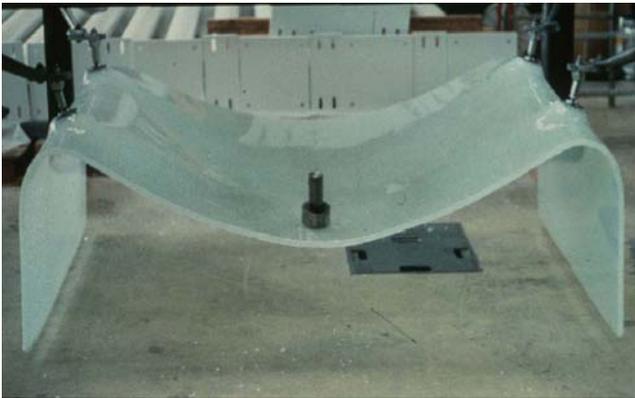


Abb. 2.12 Links: VSG aus ESG mit Punkthalterung; Rechts: VSG aus TVG nach Kugelfallversuch [17]

2.4.3 Isolierglas

Isoliergläser entstehen durch Fügen von mindestens zwei Einfach- oder Verbundscheiben, die durch linienförmige Verbindung ihrer Kanten, einen luft- oder gasgefüllten Scheibenzwischenraum bilden. Die Hauptfunktion von Isoliergläsern ist die Verbesserung des Wärmeschutzes, sie können aber durch verschiedene Beschichtungen oder Ausbildungen auch Anforderungen an den Sonnenschutz, Blendenschutz oder Schallschutz erfüllen. Für die Eigenschaften eines Isolierglases sind folgende Einflußfaktoren verantwortlich [31]:

- ◆ die verwendeten Glasarten
- ◆ die Art und Position der Beschichtung(en)
- ◆ die Größe und die Füllung des Scheibenzwischenraumes
- ◆ die Art des Randverbundes

Da für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten hängenden Glasschwerter die Isoliergläser keine Bedeutung haben, werden diese nicht eingehender behandelt.

3

Konstruieren mit Glas

Tragwerkstypen Verbindungsarten

In diesem Kapitel wird auf die verschiedenen Typen von Glastragwerken, sowie auch auf die im Glasbau vorkommenden Verbindungsarten eingegangen. Beim Planen und Bauen mit Glas sind einige Grundsätze zu befolgen [23]:

- ◆ der Kontakt von Glas mit härteren Materialien ist zu verhindern
- ◆ Zwangsbeanspruchungen durch unplanmäßige Beanspruchungen sind zu vermeiden
- ◆ eine geeignete Geometrie der Glaselemente ist auszuwählen
- ◆ eine geeignete Verbindungstechnik ist festzulegen
- ◆ eine ausreichende hohe Robustheit der Glaskonstruktion ist sicherzustellen
- ◆ die Gebrauchstauglichkeit ist zu gewährleisten
- ◆ die Dauerhaftigkeit und die Witterungsbeständigkeit sind sicherzustellen

3.1 Tragwerkstypen

In der EN 1990 wird ein *Tragwerk* als eine planmäßige Anordnung miteinander verbundener Bauteile definiert, die so entworfen sind, dass sie ein bestimmtes Maß an Tragfähigkeit und Steifigkeit aufweisen. Ein physisch unterscheidbarer Teil des Tragwerks, wie z.B. eine Stütze, ein Träger oder eine Deckenplatte, wird als *Bauteil* bezeichnet. Unter *Tragsystem* versteht man die tragenden Teile eines Bauwerks und die Art und Weise, in der diese zusammenwirken.

Tragwerke im Allgemeinen und Konstruktionen aus Glas im Besonderen können nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt werden. Die meisten in der Literatur verwendeten Differenzierungen von Tragwerken erfolgen nach der Geometrie (linienförmig oder flächenförmig) und nach der Beanspruchung (Biegung, Normalkraft oder zusammengesetzte Belastung). Eine übersichtliche Darstellung der Einteilung ist der Tragwerkssystematik nach Ackermann zu entnehmen.

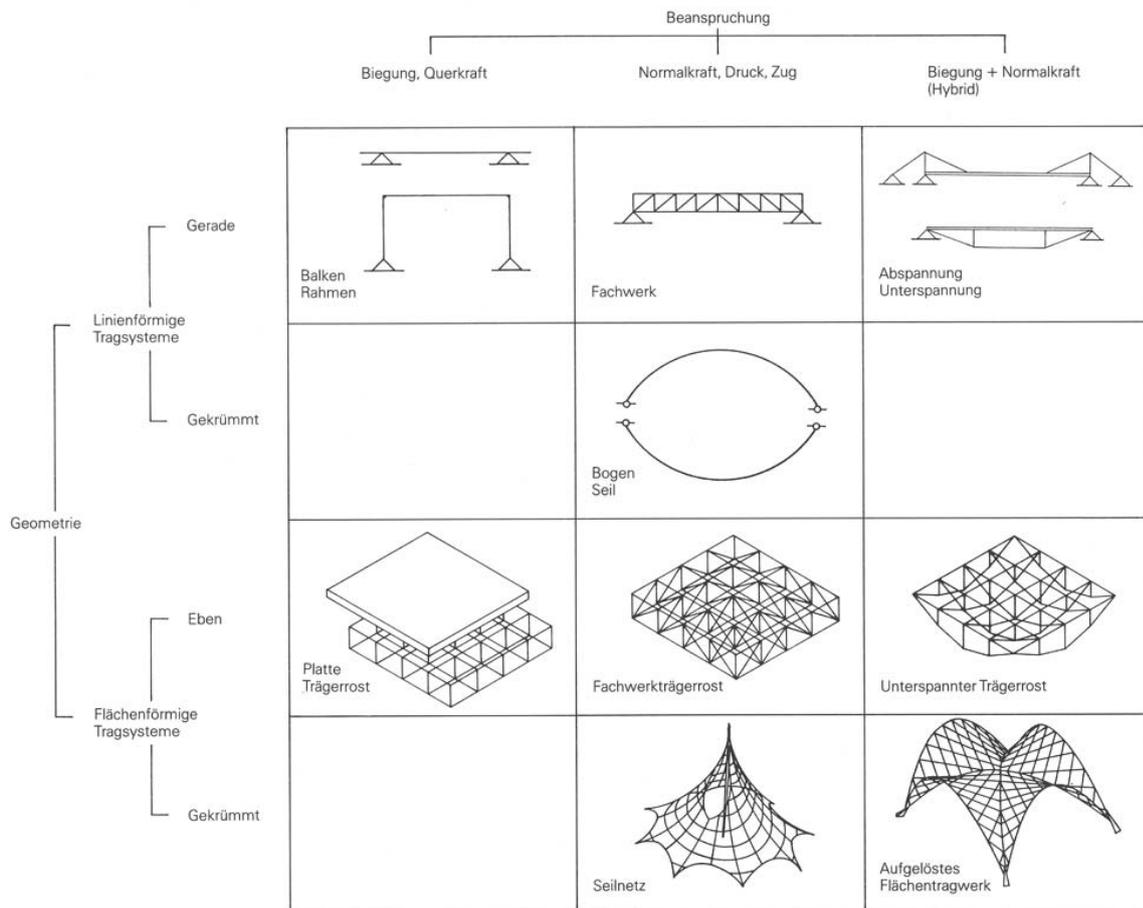


Abb. 3.1 Tragwerkssystematik nach Ackermann [7]

Glaskonstruktionen können nach geschichtlichen Abschnitten in historische und zeitgenössische Projekte eingeteilt werden. Zu den ersten gehören die seit Verwendung von Glas im Bauwesen bis Mitte des 20. Jahrhunderts realisierten Projekte. Besonders sind dabei die Bahnhofshallen, die Gewächshäuser und die Ausstellungshallen des 19. Jahrhunderts zu erwähnen. Die Trennung zu den zeitgenössischen Projekten erfolgt einerseits durch die Einführung des Floatglasverfahrens im Jahre 1959, andererseits durch den konstruktiven Einsatz von Glas in neuen Maßstäben wie bei dem Ausstellungspavillon der Firma Glasbau Hahn (siehe Abb. 2.3 im Kapitel 2.1). Bei diesem bestehen alle tragenden Elemente aus Glas (gläserne Wandscheiben, gläserne I-Träger und Glaseindeckung [7]).

Eine weitere Einteilung erfolgt je nachdem, ob das Glas Systemlasten planmäßig abträgt oder nicht, in Primär- und Sekundärtragwerke.

3.1.1 Glas als Sekundärtragwerk

Bei dieser Art von Tragwerken erfahren die Glaselemente keine Beanspruchungen aus dem primären Tragsystem. Sie nehmen nur Lasten aus Eigengewicht und Wind auf und tragen diese über Biegung und/oder Normalkraft in das primäre Tragsystem ab. Handelt es sich um horizontale Elemente können auch Schneelasten abgetragen werden. Als Beispiele für Glas als Sekundärtragwerk können Glaseindeckungen oder Raumabschlüsse aus Glas genannt werden [7].

3.1.2 Glas als Primärtragwerk

Werden Glaselemente als Teile des Primärtragwerkes verwendet, so müssen diese in der Lage sein, alle Arten von anfallenden Einwirkungen aufzunehmen und abzutragen. Diese schließen Eigengewicht und Windlasten, aber auch Schneelasten, Verkehrslasten und aus dem statischen System resultierende Lasten mit ein. Die Verwendung von Glas als tragendes Element kann folgenderweise unterteilt werden [7]:

- ◆ aussteifende Elemente
- ◆ selbsttragende Elemente
- ◆ Last abtragende Elemente

Wenn Glas die Funktion der Aussteifung übernimmt, trägt es die Lasten entweder über seine Scheibenwirkung oder über Biegung. Für den ersten Fall können als Beispiele die Stabilisierung schlanker Stützen in der Fassade oder der Einsatz als aussteifende Glaseindeckung bei Gitternetztragwerken erwähnt werden. Ein Beispiel für auf Biegung tragende, aussteifende Glaselemente sind Glasschwerter, welche zum Aussteifen hoher stehender oder hängender Verglasungen verwendet werden. Diese Art von Galsbauteile sind auch die im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Elemente, so dass auf diese genauer eingegangen wird.

Im Kapitel 5 werden einzelne Projekte kurz vorgestellt. An dieser Stelle werden nur beispielhafte Darstellungen für die verschiedenen Einsatzarten von Glas in Primärtragwerken gezeigt.

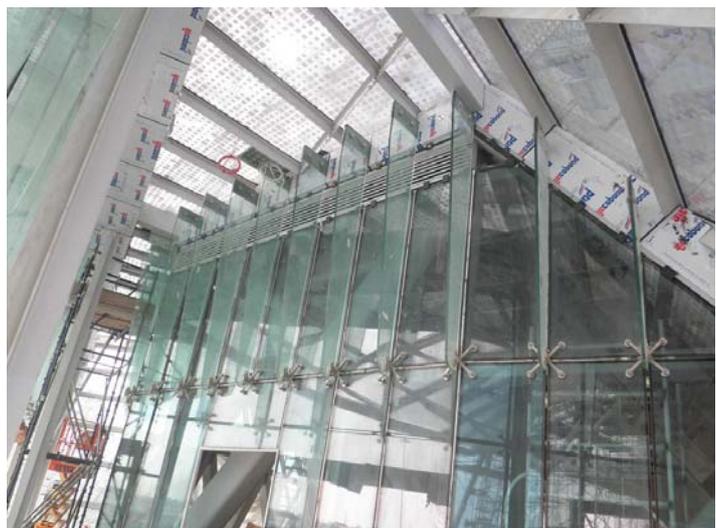


Abb. 3.2 Links: Glasschwerter beim Foyer des stadthistorischen Museums Luxembourg [7]; Rechts: hängende Glasschwerter beim Main Canopy des ADNEC Capital Gate in Abu Dhabi

Selbsttragende Elemente aus Glas sind hohe, stehende oder hängende Verglasungen und werden durch Normalkräfte beansprucht. Beide müssen durch geeignete Maßnahmen gegen horizontale Einwirkungen (Wind) gesichert werden, bei stehenden Verglasungen ist auch die Knickgefahr zu berücksichtigen. Bei stehenden Verglasungen erfolgt das Stabilisieren durch höhere Glasdicken oder Schwerter, bei hängenden ebenfalls durch Schwerter oder durch Verspannungen.

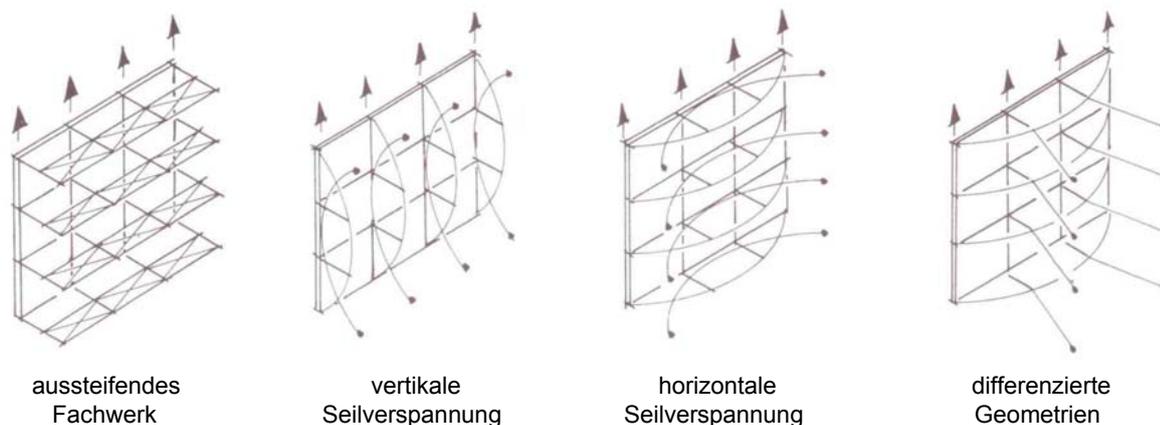


Abb. 3.3 Scheiben mit aussteifenden Systemen: Fachwerk und Verspannungen [7]

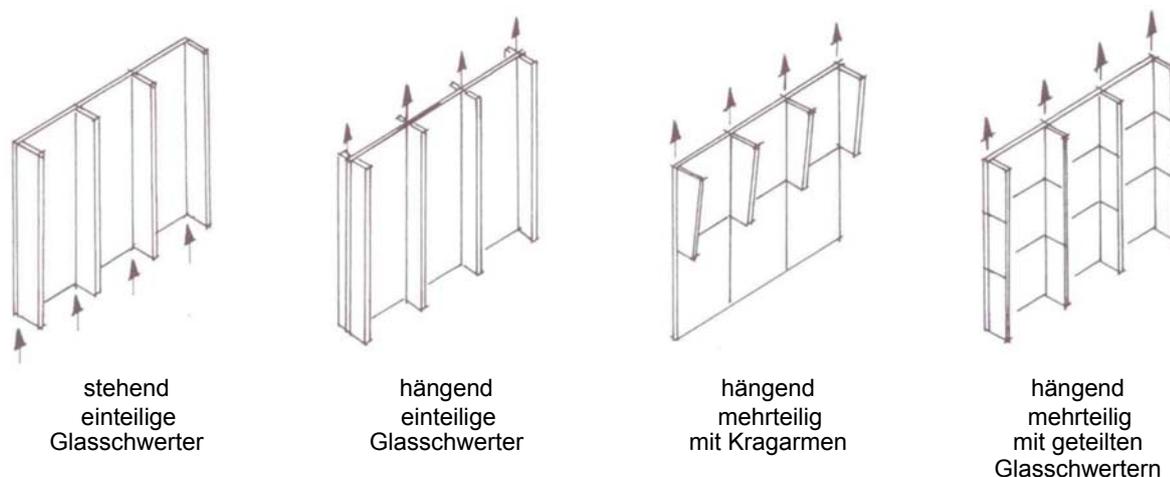


Abb. 3.4 Scheiben mit aussteifenden Systemen: Glasschwerter [7]

Als planmäßig tragende Elemente wird Glas als Balken und Stützen oder als Teil von zusammengesetzten Stabtragwerken (zum Beispiel Druckgurt von Fachwerken) oder Raumtragwerken (siehe Tensegrity-Strukturen) eingesetzt. Es ist aber zu erwähnen, dass Strukturen mit tragenden Bauteilen aus Glas noch vielen Untersuchungen und Optimierungen bedürfen. Außerdem gibt es noch keine europäischen Bemessungsnormen, wie im Falle anderer Werkstoffe (Beton, Stahl oder Holz).



Abb. 3.5 Links: Glasbrücke in Rotterdam - Träger aus Glas [7]; Rechts: Tensegrity-Skulptur - glasstec 1996 [2]

Redundanz

Ein wichtiger Begriff in Zusammenhang mit Tragwerken aus Glas ist die Redundanz. Um diese zu erklären ist es wichtig den Unterschied zwischen hierarchischen und nicht hierarchischen Tragwerken zu erläutern. Bei den hierarchischen Systemen kann man zwischen Primär-, Sekundär- und eventuell Tertiärtragwerk unterscheiden. Beim Versagen des Primärtragwerkes, welches alle an einem Gebäude anfallenden Lasten abträgt, kommt es zum Einsturz des gesamten Bauwerkes. Versagt ein Sekundärtragwerk, welches seine Last an dem Haupttragwerk weitergibt, kommt es nur zu einem lokalen Schaden. Ein Versagen von tertiären Tragwerksteilen (z.B. Gebäudeverkleidungen und raumschließende Verglasungen) bleibt in der Regel folgenlos. Ein Beispiel für ein hierarchisches System ist ein Bogen- oder Balkentragwerk mit Hauptträger aus Glas über die gesamte Spannweite, dazwischen liegende Nebenträger und Glasscheiben als Raumabschluss.

Da Glas ein sprödes Bruchverhalten, streuende Festigkeiten und eine hohe Stoßempfindlichkeit aufweist ist die Versagenssicherheit schwer zu bestimmen und daher eine solche Gliederung in der Regel problematisch. Im Falle von nicht hierarchischen Systemen werden die Lasten auf eine hohe Anzahl gleicher Tragelemente aufgeteilt, die mehrachsig gespannt sind. Somit kriegen diese eine geringere Beanspruchung und werden so dimensioniert, dass bei Ausfall einzelner Elemente, die benachbarten genug Tragreserven haben, um dessen Tragfunktion zu übernehmen. Diese Eigenschaft nennt man Redundanz und führt dazu, dass ein Versagen des gesamten Bauwerkes vermieden wird. Statisch gesehen sind diese Systeme mehrfach unbestimmt. Beispiele für solche Systeme sind zweiachsig gespannte Platten und Trägerroste oder Tonnen- und Kuppelschalen [31].

3.2 Verbindungsarten

Beim Konstruieren mit Glas ist bei der Auswahl der Verbindungen auf die speziellen Eigenschaften des Baustoffes zu achten. Um die Bildung von Spannungsspitzen auszuschließen, muss ein Kontakt zwischen Glas und Glas oder Glas und Metall verhindert werden. Es kommen im Glasbau drei verschiedene Verbindungsarten zur Anwendung:

- ◆ Reibverbindungen
- ◆ Lochleibungsverbindungen
- ◆ Klebeverbindungen

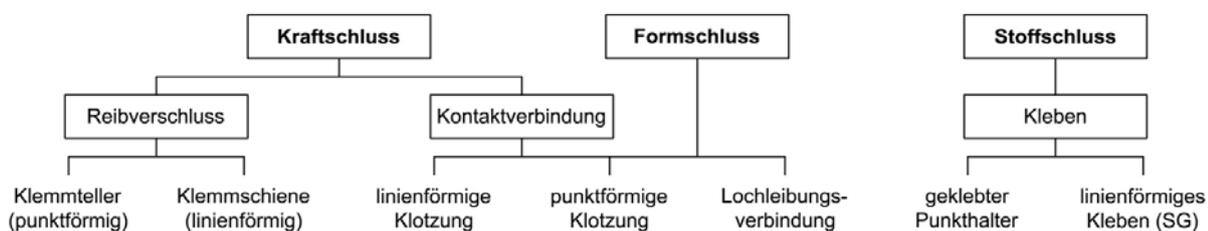


Abb. 3.6 Übersicht der Fügearten [31]

3.2.1 Reibverbindungen

Bei Reibverbindungen erfolgt die Kraftübertragung über beidseitig reibfest an die Verglasung angepreßte Laschen, in der Regel aus Metall. Dafür werden vorgespannte Bolzen oder Schrauben durch im Glas vorgesehene Bohrlöcher kontaktfrei geführt. Als Einflussfaktoren für die mit einer solchen Verbindung übertragbaren Kräfte sind der Reibungskoeffizient und die Abmessungen der Reibfläche und die Vorspannkraft der Schraube zu berücksichtigen. Um den Kontakt zwischen Metalllaschen und Glas zu unterbinden und somit die Ausbildung von Spannungsspitzen zu vermeiden werden Kunststoffschichten verwendet, welche mehrere Eigenschaften erfüllen müssen [17], [24]:

- ◆ ausreichende Elastizität vorweisen, um Spannungsspitzen im Glas zu vermeiden
- ◆ die Übertragung der Druckkräfte aus der Schraubenvorspannung zu gewährleisten
- ◆ einen minimalen Relaxationskoeffizient (geringe Stauchung) vorweisen, damit die Vorspannkraft der Schraube nicht abgebaut wird

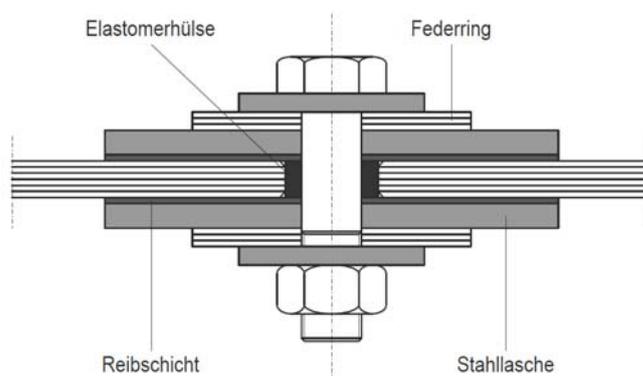


Abb. 3.7 Reibverbindung schematisch [17]

In der Regel ist bei Reibverbindungen eine höhere Beanspruchbarkeit als bei Lochleibungsverbindungen zu erwarten. Charakteristisch für Reibverbindungen sind Bolzensgruppen und Mehrbolzenverbindungen (siehe Abb. 3.8). Sind bei mehrteiligen Balken Biegedruck- und Biegezugkräfte aufzunehmen, sollten die Bolzen in Kantennähe reihenförmig angeordnet werden. Vorteile gegenüber Lochleibungsverbindungen sind auch die Möglichkeiten Toleranzen durch größere Lochdurchmesser aufzunehmen und die Spannungskonzentration im Randbereich durch die Form der Laschen zu kontrollieren. [31]

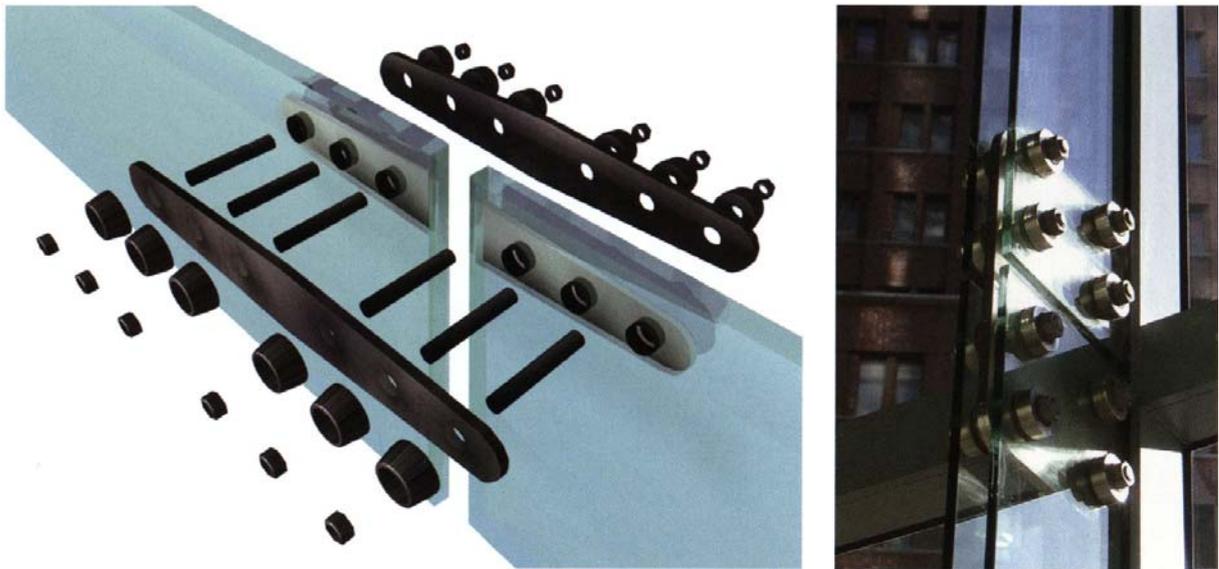


Abb. 3.8 Links: Modell einer Reibverbindung für VSG; Rechts: Zangenartige Ausführung einer Reibverbindung, Sony Center Berlin [31]

Eine Reibverbindung versagt, wenn es zum Gleiten zwischen Metalllasche und Zwischenschicht oder Zwischenschicht und Glas kommt. Für Verbundsicherheitsglas (VSG) mit Polyvinylbutyral-Folien (PVB-Folien) und auch mit SentryGlas[®]Plus (SGP) eignen sich Reibverbindungen nicht, da diese Folien zum Kriechen neigen. Es ist aber möglich im Bereich der Kräfteinleitung die zähelastische Zwischenschicht durch druckfeste Einlagen (steifere Kunststoffschichten oder Aluminium-Zwischenschichten) zu ersetzen [31]. Dieses verlangt aber einen großen technischen Aufwand. In der Regel werden Reibverbindungen nur bei Einscheibensicherheitsglas (ESG) eingesetzt. Mit der Entwicklung neuartiger hochtransparenter Folien für VSG kann der Einsatz solcher Verbindungen in Zukunft zunehmen.

3.2.2 Lochleibungsverbindungen

Bei Lochleibungsverbindungen erfolgt die Kraftübertragung über den Schraubenschaft, welcher senkrecht zur Schraubenschraube Kräfte über Lochleibungsdruck im Bereich des Bohrloches an die Glasbauteile weiterleitet. Diese konzentrierten Kräfte breiten sich in den Glasscheiben unter einem Winkel von etwa 120° aus. Während im Holz- und Stahlbau diese Verbindungen problemlos angewendet werden, ist beim Glas das Fehlen eines Plastizierungsvermögens als Hindernis zu betrachten [31].

Der Schwachpunkt bei solchen Verbindungen ist die Bildung hoher lokaler Spannungsspitzen an der Kontaktfläche zwischen Schraubenschaft und Glas, etwa dreimal höher als beim duktilen Werkstoff

Stahl. Dieser Effekt kann bei Verwendung von Verbundsicherheitsglas noch durch einen Versatz der Bohrlöcher in den verschiedenen Scheiben verstärkt werden. Um den Lochleibungsdruck gleichmäßig auf das Glas zu übertragen und somit das Bilden von Spannungsspitzen zu verhindern, werden zwischen Schraubenschaft und Bohrlochwand entweder vorgefertigte und paßgenaue Hülsen aus Kunststoff oder Aluminium oder Gießhülsen aus Epoxidharzmörtel, Polyester oder PUR eingebaut [24].

Während vorgefertigte Hülsen eine einfache Montage bei kleinen Maßtoleranzen ermöglichen, müssen bei Gießhülsen bis zum Erhärten des Harzes die Glasplatten in der richtigen Position gehalten werden [17]. Diese eignen sich aber besser für vorgespannte VSG-Scheiben, bei denen der Kantenversatz bis zu 3 mm betragen kann.

Der Vorteil solcher Verbindungen sind die einfache und unempfindliche Endmontage auf der Baustelle und die Lösbarkeit der Verbindung. Als Nachteile kann man die hohen Anforderungen an die Paßgenauigkeit und den Aufwand des Vergießens aufzählen.

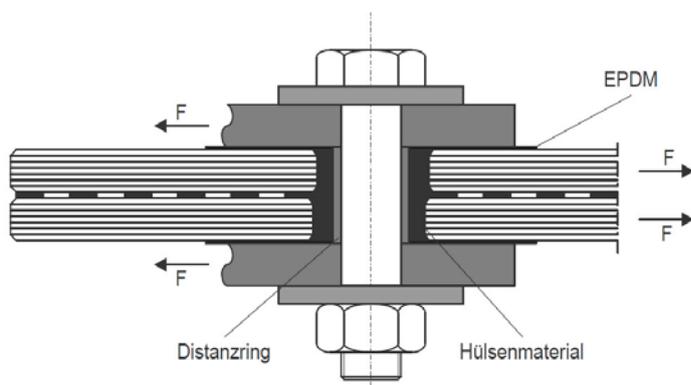


Abb. 3.9 Links: Lochleibungsverbindung schematisch[17]; Rechts: Lochleibungsverbindung - Sony Center Berlin [31]

Die Wirksamkeit und die mit einer Lochleibungsverbindung übertragbaren Kräfte hängen von folgenden Einflussfaktoren ab:

- ◆ verwendetes Material für die Zwischenschicht
- ◆ Schlupf zwischen Bolzen und Loch
- ◆ Exzentrizität der Lasteinleitung
- ◆ Durchmesser des Bohrloches
- ◆ Abstand zwischen Bohrloch und Scheibenrand

Pro Bolzen lassen sich Kräfte von mehr als 30 kN übertragen, wobei zur Vermeidung von Zwängungen weniger Bolzen mit größerem Durchmesser besser geeignet sind als mehrere Bolzen mit kleinen Durchmesser. Der Lochdurchmesser sollte für ein gleichmäßiges Vorspannen mindestens gleich der Scheibendicke sein.

3.2.3 Klebeverbindungen

Unter Kleben wird das Fügen mit einem haftenden, nicht metallischen Prozesswerkstoff verstanden. Die Bestandteile einer Klebeverbindung sind die Fügeteile, die Grenzschichten und die Klebeschicht, wobei für den Tragmechanismus sowohl Adhäsionskräfte im Grenzschichtbereich, als auch Kohäsionskräfte in der Klebschicht wichtig sind.

Der große Vorteil von Klebeverbindungen ist die nahezu gleichmäßige Kraffteinleitung und das durch die Dicke und die Eigenschaften des Klebstoffes regulierbare Verhalten. Während dicke Klebschichten sich stark verformen, sind Verbindungen mit dünnen Klebschichten steifer, weisen aber höhere Spannungen an den Klebschichtenden. Weitere Vorteile sind die Möglichkeit mit Klebeverbindungen unterschiedliche Werkstoffe zusammenzufügen und dass die Klebefuge technische Funktionen, wie zum Beispiel die Fugenabdichtung übernehmen kann [17], [31].

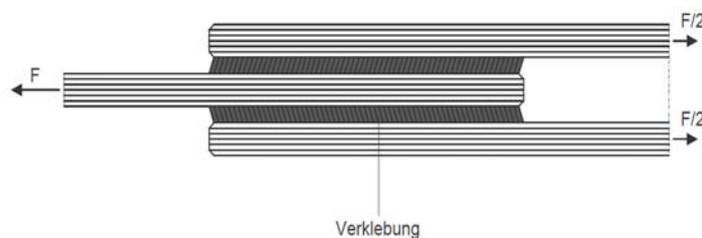


Abb. 3.10 Klebeverbindung [17]

Im Unterschied zu Verbindungen durch Kraft- oder Formschluss, gibt es bei stoffschlüssigen Verbindungen eine hohe Anzahl von Einflussfaktoren für deren Festigkeit im Gebrauchszustand [31]:

- ◆ die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffsystems
- ◆ die Art und die Dauer der Beanspruchungen
- ◆ die geometrische Gestaltung und die Ausführungsqualität der Klebefuge
- ◆ die Umwelteinflüsse: UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Temperatur
- ◆ die Oberflächenbehandlung der Fügeteile
- ◆ der Festigkeitsaufbau während der Aushärtung
- ◆ der Festigkeitsabbau unter Gebrauchsbedingungen zufolge Umwelteinflüssen, Alterungs- und Schrumpfprozessen, Kriechen bei Dauerbelastungen und Ermüdungserscheinungen bei hoher Lastwechselrate nach der Aushärtung

Anhand verschiedener Testversuche werden Abminderungsfaktoren festgelegt mit deren Hilfe Nachweise der Dauerhaftigkeit von Klebstoffsystemen erfolgen können.

Klebstoffsysteme können nach dem Elastizitäts- und Schubmodul in flexible, zähelastische und harte Systeme eingeteilt werden. Zu den ersten gehören Silikone, MS-Polymere (Modified Silicones) und Polyurethane (PUR), welche für dynamische Belastungen geeignet sind und die Funktion der Abdichtung übernehmen können. In der Regel weisen diese eine Festigkeit von über 1 N/mm^2 und eine Bruchdehnung von über 150% auf und wirken bei einer Dicke von 5 mm spannungsausgleichend. Weiters zeigen flexible Klebstoffsysteme ein gutmütiges Versagensbild, bieten eine leichtere Reparatur und Demontage und besitzen aufgrund des ausgeprägten Kriechverhalten eine deutlich höhere Kurzzeitfestigkeit als Langzeitfestigkeit.

Als harte Klebstoffsysteme können Epoxidharze und Acrylate eingestuft werden, welche sich hauptsächlich für punktförmige Verbindungen eignen. Sie weisen zwar bei Dicken von ca. 0,1 bis 0,5 mm hohe Festigkeiten, wirken aber nicht spannungs- und toleranzausgleichend. Außerdem versagen solche Systeme ohne Vorankündigung durch sogenannte Sprödbrüche [31].

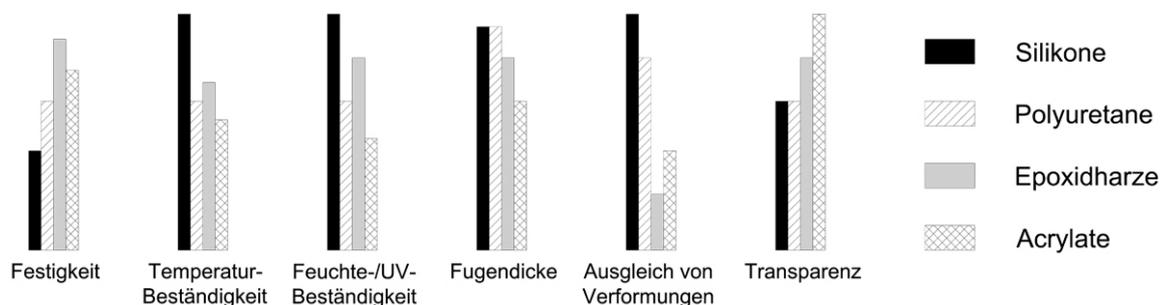


Abb. 3.11 Qualitativer Vergleich verschiedener Klebstoffsysteme [31]

Klebeverbindungen können auch nach der Geometrie in flächenförmige, linienförmige und punktuelle Fügungen eingeteilt werden. Flächige Klebungen werden bei der Herstellung von Verbundglas oder Verbund-Sicherheitsglas mit PVB-Folien, SentryGlas®Plus, EVA-Folien, Schallschutzfolien oder Gießharzen ausgeführt und als Laminieren bezeichnet. Dieser Herstellungsprozess wurde schon im Kapitel 2.4.2 betrachtet. Wegen dem Kriechverhalten und dem temperatur- und belastungsabhängigen Schubspannungsgleitungsverhalten solcher Klebungen wird die rechnerische Berücksichtigung der Verbundwirkung in Frage gestellt. Für kurzzeitige Einwirkungen, wie zum Beispiel Wind wird die Berücksichtigung der günstig wirkenden Verbundwirkung von VSG auf nationaler Ebene geregelt.

Das beste Beispiel für linienförmige Verklebungen ist das Structural Sealant Glazing System (SSGS), welches für Fassadenkonstruktionen schon länger verwendet wird und auf europäischer Ebene über die ETAG Nr. 002/Teil 1: Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen zugelassen wird. Zu verwenden sind ein- und zweikomponentige Silikonklebstoffe, weil sie eine Beständigkeit gegen Witterung und UV-Strahlung und sehr gute Haftungseigenschaften aufweisen. Weitere Regelungen erfolgen auf nationaler Ebene. In Deutschland zum Beispiel darf bei Fassadenkonstruktionen dieser Art das Eigengewicht der Verglasungen nicht durch die Klebung abgetragen werden und ab einer Höhe von mehr als 8 m muss eine zusätzliche mechanische Sicherung vorgesehen werden.

Punktuelle Klebeverbindungen sollen eine Alternative zu Lochleibungsverbindungen bieten. Aufgrund experimenteller und numerischer Studien an der Technischen Universität Dresden sollte bei Zugbelastung der geklebte Punkthalter desto kompakter ausgeführt werden, je steifer die Klebstoffuge ist. Unter Querbelastung aber sollte der Durchmesser des Punkthalters größer und die Dicke der Klebstoffuge geringer ausgewählt werden [24].

Bei scheiben- und stabförmigen Verwendungen von Glas in Tragwerken kann man Mischverklebungen und Ganzglasverklebungen unterscheiden. Bei den ersten werden nur punkt- oder linienförmige Beschläge werkseitig auf die Glasoberfläche oder Glaskante geklebt. Im Falle von Ganzglasverklebungen erfolgt eine Verklebung von angrenzenden Glasflächen oder Glaskanten. Sowohl für Mischverklebungen, als auch zur Übertragung von geringen Schub-, Zug- und Momentenbeanspruchungen kommen elastsische, flexible Verklebungen in Betracht.

4

State of the Art

Aktueller Stand der Normen und Richtlinien Einleitung von Drucklasten an den Glaskanten Kontaktmaterialien zur Lasteinleitung Untersuchungen an Glasträger

Als Erstes wird in diesem Kapitel der aktuelle Stand der Normen und Richtlinien für die Bemessung von Glaskonstruktionen im deutschsprachigen Raum zusammengefasst. Anschließend wird auf bisherige Forschungsarbeiten eingegangen, die mit den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Glasschwerter Zusammenhänge aufweisen. Diese sind vor allem Arbeiten, welche die Verbindung des Glasschwerter mit dem Tragwerk betreffen. Es werden folgende Themen betrachtet:

- ◆ Einleitung von Drucklasten im Glas bei Scheibenbeanspruchung
- ◆ Kontaktmaterialien - Eigenschaften des Vergussmörtels Hilti HIT
- ◆ Kontaktmaterialien - Eigenschaften von Thermoplasten mit Schwerpunkt auf Polyacetal (POM)
- ◆ Verteilung der thermischen Vorspannung über die Glasscheibe
- ◆ Untersuchungen zu Scher-Lochleibungsverbindungen im konstruktiven Glasbau
- ◆ Untersuchungen an Glasträger
- ◆ Stabilität von Glasträger und Glasschwerter

Die letzten zwei behandelten Themen weisen keinen direkten Bezug auf die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Glasschwerter, sie werden aber kurz diskutiert, um zu zeigen zu welchen Problemen schon Untersuchungen durchgeführt worden sind.

Zum Thema Kragträger aus Glas gibt es leider nur einzelne Versuche für Zulassungen im Einzelfall bei Sonderprojekten. Ein Beispiel wird im Kapitel 4.3.3 vorgestellt. Obwohl die Glasschwerter hängend eingebaut sind, sind Versuche in horizontaler Lage durchgeführt worden. Dieses ist auf den weniger aufwändigen Versuchsaufbau zurückzuführen, hat aber den Nachteil, dass keine Aussagen zur Resttragfähigkeit möglich sind.

4.1 Aktueller Stand der Normen und Richtlinien

In dem 2007 erschienenen Buch *Glas als Tragwerk* [31] von Jan Wurm wird die baurechtliche Situation in Europa betreffend Konstruktionen aus Glas zusammengefasst. Da es sich beim Glas um ein sprödes Material handelt, welches viele sicherheitsrelevante Probleme aufbringt, liegt die Normungsarbeit hinter den schon erforschten Möglichkeiten des Baustoffes. Für Planung und Genehmigung sind die baurechtliche Situation des Landes, wo gebaut wird und die dort gültigen Produkt-, Ausführungs- und Bemessungsnormen zu verwenden. Ein weiteres Hindernis beim Planen und Konstruieren von Glasbauten ist die Unstimmigkeit zwischen kontinentalen und nationalen Normen.

Für Basisglasprodukte und veredelte Flachglaserzeugnisse werden Herstellungsverfahren, Maße, Toleranzen und Eigenschaften in Produktnormen auf europäischer Ebene geregelt. Durch eine Herstellererklärung oder eine Zertifizierung einer anerkannten Prüfstelle wird nachgewiesen, dass Bauprodukte die Anforderungen der Normen erfüllen. In Europa werden diese mit dem CE-Zeichen kennzeichnet. Beispiele für Produktnormen sind:

- ◆ EN 572 für Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas
- ◆ EN 12150 für vorgespanntes Glas (ESG und ESG-H)
- ◆ EN 1863 für teilvorgespanntes Glas (TVG)
- ◆ EN ISO 12543 für Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas

ÖNORM B 3716

Für Glaskonstruktionen gibt es derzeit auf europäischer Ebene noch keine Ausführungsnorm, wie sie in der Form von Eurocodes aus dem Betonbau, Stahlbau oder Holzbau bekannt sind. Es wird aber an einer Bemessungsnorm von Glasbauteilen gearbeitet, was sich bis jetzt als Normungsentwurf prEN 13474 konkretisiert hat. Aufgrund mangelnder Akzeptanz der Fachwelt wurde dieser aber wieder zurückgezogen. Auf nationaler Ebene gibt es einige Normen und technische Regeln, die aber teilweise nicht einstimmig sind [31]. In Österreich wird die *ÖNORM B 3716 - Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau* verwendet, welche folgende Teile beinhaltet:

- ◆ Teil 1: Grundlagen (für den Nachweis der Tragfähigkeit und den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, sowie auch für das Berechnungsverfahren der Klimlast) [32]
- ◆ Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen [33]
- ◆ Teil 3: Absturzsichernde Verglasungen [34]
- ◆ Teil 4: Betretbare, begehbare und befahrbare Verglasungen [35]
- ◆ Teil 5: Punktförmig gelagerte Verglasungen und Sonderkonstruktionen [36]
- ◆ Beiblatt 1: Beispiele für Glasanwendungen [37]

Die Bemessung basiert auf das Teilsicherheitskonzept. Der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird folgender Weise erbracht:

$$\frac{\sigma_{Sd}}{\sigma_{Rd}} \leq 1$$

Der Bemessungswert der Einwirkung σ_{Sd} wird nach den einschlägigen Belastungsnormen unter Berücksichtigung von Zwängungen und Spannungsspitzen infolge Punkthalter bestimmt. Für die Bestimmung des Bemessungswertes des Widerstandes σ_{Rd} wird folgende Formel verwendet:

$$\sigma_{Rd} = \frac{k_{mod} \times k_b \times f_k}{\gamma_M}$$

- mit: k_b Abminderungsfaktor für die Art der Beanspruchung: für Plattenbeanspruchung $k_b = 1,0$, für Scheibenbeanspruchung $k_b = 0,8$
- k_{mod} Abminderungsfaktor für die Einwirkungsdauer: für Floatglas ist bei mittel- und langzeitlicher Einwirkungsdauer $k_{mod} = 0,6$ einzusetzen, für thermisch vorgespannte Gläser ist unabhängig von der Einwirkungsdauer $k_{mod} = 1,0$ einzusetzen
- γ_M Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandsseite: für alle Gläser $\gamma_M = 1,5$
- f_k charakteristische Biegezugfestigkeit entsprechend Tab. 4.1

Glaserzeugnis	charakteristische Prüfbiegezugfestigkeit f_k [N / mm ²]
Floatglas	45
TVG	70
TVG emailliert	40
ESG	120
ESG emailliert	70
Drahtglas	25
Gussglas	25

Tab. 4.1 charakteristische Biegezugfestigkeit f_k verschiedener Glaserzeugnisse [32]

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Konstruktionen aus Glas wird durch Einhaltung der Durchbiegungsgrenzen aus Tab. 4.2 erbracht.

Lagerung	Horizontalverglasung	Vertikalverglasung
vierseitig	1/100 der Scheibenstützweite in Haupttragrichtung	keine Anforderungen ^a
zwei- und dreiseitig	Einfachverglasung: 1/100 der Stützweite in Haupttragrichtung	1/50 der freien Kante ^b
	Isolierverglasung: 1/200 der freien Kante	1/70 der freien Kante ^a

^a Durchbiegungsbegrenzungen des Isolierglasherstellers sind zu beachten.
^b Auf die Einhaltung dieser Durchbiegungsbegrenzung kann verzichtet werden, sofern nachgewiesen wird, dass unter Last ein Glaseinstand von 5 mm nicht unterschritten wird.

Tab. 4.2 Durchbiegungsbegrenzungen [32]

DIN 18008

In Deutschland wird die *DIN 18008, Glas im Bauwesen, Bemessungs- und Konstruktionsregeln*, vom Dezember 2010 angewendet. Diese besteht aus folgenden Teilen:

- ◆ Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen
- ◆ Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen
- ◆ Teil 3: Punktförmig gelagerte Verglasungen
- ◆ Teil 4: Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen
- ◆ Teil 5: Zusatzanforderungen an begehbare Verglasungen
- ◆ Teil 6: Zusatzanforderungen an zu Instandhaltungsmaßnahmen betretbare Verglasungen
- ◆ Teil 7: Sonderkonstruktionen

Die Teile 3 bis 7 waren zum oben angeführten Datum noch in Vorbereitung.

Auch diese Norm setzt das Teilsicherheitskonzept zugrunde. Die Tragfähigkeit wird nachgewiesen, indem der Bemessungswert der Einwirkung σ_{Sd} kleiner oder gleich dem Bemessungswert der Beanspruchbarkeit σ_{Rd} bleibt. Dieser wird für thermisch vorgespanntes Glas und für Floatglas unterschiedlich ermittelt:

für Floatglas:

$$\sigma_{Rd} = \frac{k_c \times k_{mod} \times f_k}{\gamma_M}$$

für thermisch vorgespanntes Glas:

$$\sigma_{Rd} = \frac{k_c \times f_k}{\gamma_M}$$

mit: k_c berücksichtigt die Art der Konstruktion: in der Regel $k_c = 1,0$; maximal $k_c = 1,8$
 k_{mod} berücksichtigt die Einwirkungsdauer: für ständige Einwirkungsdauer (Eigengewicht) $k_{mod} = 0,25$; für mittlere Einwirkungsdauer (Schnee) $k_{mod} = 0,40$; für kurzzeitige Einwirkungsdauer $k_{mod} = 0,70$
 γ_M Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandsseite: für thermisch vorgespannte Gläser $\gamma_M = 1,5$; für Floatglas $\gamma_M = 1,8$

Die Werte für die charakteristische Biegezugfestigkeit f_k sind die gleichen wie in der ÖNORM B 3716. Bei Verwendung von Verbundsicherheitsglas (VSG) ist eine Erhöhung der Festigkeiten um 10 % zulässig.

Technische Richtlinien des DIBt

Bis zum Erscheinen der DIN 18008 in Deutschland und der ÖNORM B 3716 in Österreich kamen folgende Richtlinien vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) zur Anwendung [31]:

- ◆ Regeln für die Verwendung von hinterlüfteten Außenwandbekleidungen
- ◆ Technische Regeln für linienförmig gelagerte Verglasungen (TRLV)
- ◆ Technische Regeln für absturzsichernde Verglasungen (TRAV)
- ◆ Technische Regeln für punktförmig gelagerte Verglasungen (TRPV)

Zum Unterschied zu den neuen Normen bauen diese Richtlinien auf ein globales Sicherheitskonzept auf. Bei den statischen Nachweisen muss sichergestellt werden, dass die maximale Hauptzugspannung im Glas infolge Gebrauchslast (σ_{vorh}) kleiner als die zulässige Spannung (σ_{zul}) entsprechend der Glasart und dem Anwendungsbereich ist. Die angegebenen zulässigen Spannungen enthalten einen globalen Sicherheitsfaktor von etwa 2,5.

$$\sigma_{\text{vorh}} \leq \sigma_{\text{zul}}$$

Es ist ersichtlich, dass die verschiedenen nationalen Normen und Regelwerke eine ähnliche Aufteilung nach der Lagerungsart der Verglasungen und nach den an die Glasbauteile gestellten Anforderungen aufweisen.

Wenn durch gültige technische Baubestimmungen nicht nachgewiesen werden kann, dass gewisse Glasprodukte oder Glastragwerke zur Anwendung kommen können, muss für diese eine Zulassung erteilt werden. Auch diese können auf europäischer Ebene (Europäische technische Zulassung ETA) oder auf nationaler Ebene gültig sein und werden nach Beurteilung auf Grund von Zulassungsleitlinien (ETAGs) ausgestellt. Auf europäischer Ebene werden Zulassungen von der Europäischen Organisation für technische Zulassungen (EOTA) in Abstimmung mit der betreffenden Länderbehörde erteilt.

Leider fallen die meisten Konstruktionen in denen Glas tragende Funktionen übernimmt in eine Kategorie ein, wo weder technische Regeln, noch Zulassungen die Ausführung ermöglichen. Für solche Sonderkonstruktionen müssen Nachweise im Einzelfall erfolgen, die von einer sachkundigen und anerkannten Prüfstelle zu erbringen sind. Erforderlich sind Standsicherheits-, Gebrauchstauglichkeits-, sowie Nachweise der Stoßsicherheit und der Resttragfähigkeit. Diese werden teilweise rechnerisch und teilweise versuchstechnisch durchgeführt [31].

4.1.1 Rechnerische Nachweise

Der Mangel an Bemessungsnormen bewirkt Unklarheiten in der wirklichkeitsnahen Modellierung mittels der Finite-Elemente-Methode, wie auch bei den verschiedenen zu treffenden Ansätzen. In den verschiedenen Normen auf den verschiedenen Kontinenten kommen sowohl deterministische, als auch probabilistische Sicherheitskonzepte zur Anwendung. Beim ersten werden mit einem globalen Sicherheitsbeiwert, sowohl Streuungen auf der Beanspruchungs-, als auch auf der Widerstandsseite berücksichtigt. Dieses Verfahren wird in den technischen Richtlinien in Deutschland verwendet.

In der EN 13474 wird ein probabilistisches Sicherheitskonzept verfolgt, welches differenzierte Teilsicherheitsbeiwerte für Beanspruchung und Material vorsieht. Somit ist auf Seite des Materials eine Berücksichtigung von Art und Dauer der Einwirkung oder Größe und Zustand der Scheibe, sowie auch eine Bewertung der temperatur- und zeitabhängigen Verbundwirkung bei VSG und der unterschiedlichen Verteilung von Vorspannkräften über die Scheibenfläche möglich.

Der Vorteil des deterministischen Sicherheitskonzeptes ist ein auf der sicheren Seite liegendes, anwenderfreundliches und praxisnahes Vorgehen, das aber die Optimierung des Querschnittes vernachlässigt und daher nur für einfache Plattenbemessungen geeignet ist. Im Gegensatz dazu berücksichtigt das aufwendigere probabilistische Sicherheitskonzept das Materialverhalten von Glas deutlich besser und eignet sich daher für Nachweise von komplexeren plattenförmigen und strukturbildenden, scheibenförmigen Tragwerken [31].

4.1.2 Versuchstechnische Nachweise

Um bei vielen Bauprodukten und Bauarten nicht ausreichende Erkenntnisse über Tragfähigkeit und Resttragfähigkeit auszugleichen, aber auch das Verhalten unter dynamischen Einwirkungen zu erfassen werden versuchstechnische Nachweise durchgeführt. Diese sind in der Regel zerstörend und untersuchen die Stoßsicherheit, die Tragfähigkeit, die Resttragfähigkeit, aber auch die Qualität (Heißlagerungstest zum Ausschließen von Gläser mit NiS-Einschlüssen).

Im Falle der Stoßsicherheitsnachweise unterscheidet man zwischen weichen und harten Stoß. Die Sicherheit gegen weiche Stöße wird bei absturzsichernden Verglasungen gefordert und durch einen Pendelschlagversuch nach EN 12600 nachgewiesen. Bei Überkopfverglasungen und begehbaren Verglasungen ist die Sicherheit gegen harte Stöße durch Kugelfallversuche sicherzustellen. Wird die Scheibe nicht durchschlagen, rutscht diese nicht von den Lagern und fallen keine gefährdenden Bruchstücke herab, gelten die Nachweise als erfüllt.

Man kann anhand von Belastungsversuchen an Originalbauteilen die Tragfähigkeit feststellen und bei Belastung bis zum Bruch das tatsächliche Sicherheitsniveau ermitteln. Ziel ist es an Forschungszentren durch Versuchsreihen geeignete rechnerische Verfahren zu entwickeln, die in Zukunft die Möglichkeit bieten auf kostenintensive Versuche zu verzichten.

Bei Glasragwerken wird zusätzlich gefordert, dass die Konstruktion auch nach Bruch für eine gewisse Zeit standsicher bleibt [31].



Abb. 4.1 Links: Pendelschlagversuch [17]; Rechts: Kugelfallversuch [17]

4.2 Einleitung von Drucklasten an den Glaskanten

Bauteile aus Glas werden im konstruktiven Glasbau immer mehr als Elemente des Primärtragwerkes eingesetzt. Während Glasteile, die als Sekundärtragwerkselemente wirken (Glaseindeckungen, Fassadenverglasungen) nur eine Plattenbeanspruchung erfahren, kommt bei Primärtragwerkselementen zusätzlich oder sogar vorwiegend eine Scheibenbeanspruchung vor. Dabei werden hohe Drucklasten entweder über Bohrungen mit Bolzen und Hülsen, oder über Kontaktmaterialien direkt an der Glaskante eingeleitet. Diese Lasteinleitungsbereiche und vor allem die verwendeten Kontaktmaterialien haben eine große Bedeutung für solche Konstruktionen, so dass Versuche zur Ableitung der mechanischen Eigenschaften erforderlich sind, um eine Bemessung zu ermöglichen. Untersuchungen zu solchen Materialien laufen an der Technischen Universität Dresden am Institut für Baukonstruktion. Auf diese wird nach Behandeln der bedeutendsten Kontaktmaterialien im Kapitel 4.2.4 eingegangen [26], [27], [28].

Für die Lasteinleitung an den Glaskanten kommen entweder Mörtel (Hilti HIT-HY 70) oder Klotzungen zur Anwendung. Für die letzteren werden folgende Materialien verwendet:

- ◆ Polyamid (PA)
- ◆ Polyoxymethylen (POM, auch Polyacetal)
- ◆ Polypropylen (PP)
- ◆ Polyethylen (PE)
- ◆ Polyvinylchlorid (PVC)
- ◆ Chloropren-Kautschuk (Neopren)
- ◆ Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)

Auch für die Hülsen von Punkthaltern oder SL-Verbindungen können Mörtel, aber auch folgende Materialien verwendet werden:

- ◆ Polyoxymethylen (POM)
- ◆ Polyamid (PA)
- ◆ Polyetheretherketon (PEEK)
- ◆ Polysulfon (PSU)
- ◆ Aluminium

Der Drei-Komponenten-Hybridmörtel Hilti HIT-HY 70 wird oft für die Drucklasteinleitung an Glaskanten oder bei Lochleibungsverbindungen verwendet, vor allem wenn es sich um Verbundsicherheitsglas (VSG) handelt, da er sich an den Scheibenversatz der einzelnen Scheiben vor dem Aushärten anpassen kann und so eine ausreichend gleichmässige Lasteinleitung ermöglicht. Der Nachteil ist, dass er nur eine maximale Druckfestigkeit von 65 N/mm^2 aufweist.

Sind höhere Drucklasten zu übertragen, kommen thermoplastische Polymere zur Anwendung. Diese haben den großen Nachteil, dass sie im Falle von VSG für den Scheibenversatz nicht genügend Toleranzen aufweisen, so dass entweder dieser begrenzt werden muss oder die Einleitung der Lasten bei

der Berechnung auf eine einzige Scheibe angesetzt wird. Zusätzlich werden an diese Kunststoffe einige teilweise widersprüchliche Anforderungen gestellt [28]:

- ◆ hohe Druckfestigkeit
- ◆ geringere Oberflächenhärte als Glas
- ◆ geringe Kriechneigung
- ◆ geringe plastische Verformbarkeit
- ◆ ausreichende Temperaturbeständigkeit bei den im Bauwesen relevanten Temperaturen (-20°C bis +80°C)
- ◆ Beständigkeit gegen UV-Strahlung, Chemikalien und Feuchtigkeit
- ◆ keine Wechselwirkungen mit anderen verwendeten Kunststoffen aus dem Glasbau (z.B. PVB-Folie)
- ◆ gute mechanische Bearbeitbarkeit

In den nächsten drei Unterkapiteln werden die mechanischen Eigenschaften des Mörtels Hilti HIT-HY 70 und der Thermoplaste Polyacetal (PA) und Polyoxymethylen (POM) besprochen. Anschließend werden im Kapitel 4.2.4 verschiedene Untersuchungen an der TU Dresden zum Verhalten von Verklottungsmaterialien vorgestellt. Im Kapitel 4.2.5 wird auf die Dissertation von Dr. Wilfried Laufs über die Festigkeit von thermisch vorgespannten Gläser eingegangen und im Kapitel 4.2.6 die Dissertation von Dr. Mascha Baitinger - „Zur Bemessung von SL-belasteten Anschlüssen im konstruktiven Glasbau“ zusammengefasst.

4.2.1 Vergussmörtel Hilti HIT-HY 70

Weil sowohl für Lochleibungsverbindungen (in der Dissertation der Frau Dr. Baitinger - siehe Kapitel 4.2.6), als auch für die Zwischenschicht des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Glasschwertes als Vergussmörtel das Produkt Hilti HIT-HY verwendet wird, wird in diesem Kapitel auf die Eigenschaften dieses Materials eingegangen. Es handelt sich um einen Verbundmörtel, zusammengesetzt aus einem organischen und einem anorganischen Bindemittelsystem im Verhältnis 3 zu 1. Das organische Bindemittel besteht aus Urethanmethacrylatharz und Reaktivverdünner und ist für die Tragfähigkeit des Mörtels nach dem Aushärten bestimmend. Das anorganische Bindemittel besteht aus Zement und Wasser und führt zur Ausbildung einer Zementphase. Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften sind in Tab. 4.3 ersichtlich (aus [1] und dem technischen Datenblatt von Hilti HIT-HY 70 entnommen).

Eigenschaft	Hilti HIT-HY 50	Hilti HIT-HY 70
UV-Einwirkung (Sonnenlicht)	beständig	
Temperaturbeständigkeit	-40 °C ... 120°C	
Feuchtigkeitseinwirkung	beständig	
Druckfestigkeit (Mittelwert) nach 1 Tag 28 Tage	53,6 MPa 49,3 MPa	65,5 MPa 58,6 MPa
empfohlene Druckfestigkeit (unter Dauerbelastung)	40,0 MPa	-
E-Modul Mittelwert bei Normklima ohne Querdehnungsbehinderung mit Querdehnungsbehinderung	2477 MPa 3245 MPa	1757 MPa 3245 MPa
Querdehnzahl μ	0,2 bis 0,25	
Dichte	1,5 g/cm ³	
Aushärtezeit / Nachverfestigungszeit	60 Minuten / 28 Tage	

Tab. 4.3 Mechanische Eigenschaften von Hilti HIT-HY 50 und Hilti HIT-HY 70 [1]

Zwischen dem Mörtel Hilti HIT-HY 70 und seinem Vorgängerprodukt Hilti HIT-HY 50 gibt es folgende wesentlichen Unterschiede:

Eigenschaft	Hilti HIT-HY 50	Hilti HIT-HY 70
Druckfestigkeit [N/mm ²]	59	65
E-Modul [N/mm ²]	2480	1750
thermischer Ausdehnungskoeffizient α [1/K]	38 x 10 ⁻⁶	34 x 10 ⁻⁶

Tab. 4.4 Vergleich zwischen Hilti HIT-HY 50 und Hilti HIT-HY 70 [1]

Die angegebenen Werte der Druckfestigkeit sind Kurzzeitfestigkeiten. Um die Langzeitfestigkeit des Hilti HIT-HY 70 zu bestimmen muss folgende Formel zur Abminderung angewendet werden:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{0,05}}{A} = \frac{58,7}{1,7 \times 1,0 \times 1,1 \times 1,0} = 31 \text{ N/mm}^2$$

mit: $\sigma_{0,05} = 58,7 \text{ N/mm}^2$ (Mittelwert der 5% - Fraktile)

$$A = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4$$

$A_1 = 1,7$ (Abminderung der Kurzzeitfestigkeit um 60%)

$A_2 = 1,0$ (Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung angreifender Medien, wobei Wasser nicht zu einer Abminderung der Traglast führt)

$A_3 = 1,1$ (Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung zeitweise erhöhter Temperatur bis maximal 60°C)

$A_4 = 1,0$ (Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung festigkeitsreduzierender Einflüsse, die durch die Prüfung nicht erfasst wurden)

Die Kurzzeit-Zugfestigkeit des Mörtels Hilti HIT-HY 70 beträgt $6,6 \text{ N/mm}^2$, es ist aber in der Regel von einem Druckversagen auszugehen.

Unter Normklima werden 23°C und 50% Luftfeuchtigkeit verstanden. Bei unterschiedlichen Prüftemperaturen sind folgende Änderungen der Druckfestigkeit und des E-Moduls festzustellen:

- ◆ bei -20°C - sowohl die Druckfestigkeit, als auch der E-Modul nehmen deutlich zu
- ◆ bei 60°C - die Druckfestigkeit bleibt nahezu konstant, während der E-Modul geringfügig abnimmt
- ◆ bei 80°C - sowohl die Druckfestigkeit, als auch der E-Modul nehmen deutlich ab

In [1] sind rechnerische Untersuchungen des Vergussmörtels bei Lochleibungsverbindungen gezeigt und die Einflüsse einzelner Parameter (wie zum Beispiel Zwischenschichtstärke b_{Spalt} , Scheibendicke t , Bohrlochdurchmesser d_0 oder Schlupf Δs des Bolzens im Zwischenmaterial) auf das Tragverhalten der Zwischenschicht analysiert. Aufgrund der kreisringförmigen Ausbildung der Zwischenschicht weist diese ein komplexes Tragverhalten auf. Das genaue Versagensverhalten der Zwischenschicht bedarf daher einer eingehenden Untersuchung, welche auch ein mögliches Zugversagen analysiert.

In [1] wird unter der Voraussetzung eines Druckversagens und ohne eine Querdehnungsbehinderung der Zwischenschicht (auf der sicheren Seite liegend) zu berücksichtigen folgende Bemessungsformel zum Nachweis der Zwischenschicht aus Vergussmörtel Hilti HIT-HY 70 vorgeschlagen:

$$\sigma_{Zw, \min, d} = a_1 \times a_2 \times a_3 \times f_{\sigma, \min} \times \frac{P_d}{a \times t_{Zw}} \leq \frac{31 \text{ N/mm}^2}{\gamma_M}$$

mit: P_d resultierende Bemessungslast an dem maßgebenden Bohrloch

a Bohrlochradius = $d_0 / 2$

d_0 Bohrlochdurchmesser

t_{Zw} Dicke der Zwischenschicht, bei VSG die Gesamtglasdicke

a_1 Beiwert zur Berücksichtigung der Spaltbreite b_{Spalt}

a_2 Beiwert zur Berücksichtigung des Schlupfes Δs

a_3	Beiwert zur Berücksichtigung unsymmetrischer Druckverteilung über t_{zw}
$f_{\sigma,min}$	minimaler Spannungsfaktor = 0,82 für Hilti HIT-HY 70
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert (empfohlen $\gamma_M = 1,1$)

In der Abb. 4.2 sind zwei mögliche Anwendungen des Mörtels Hilti HIT-HY 70 aus dem technischen Datenblatt des Herstellers dargestellt.

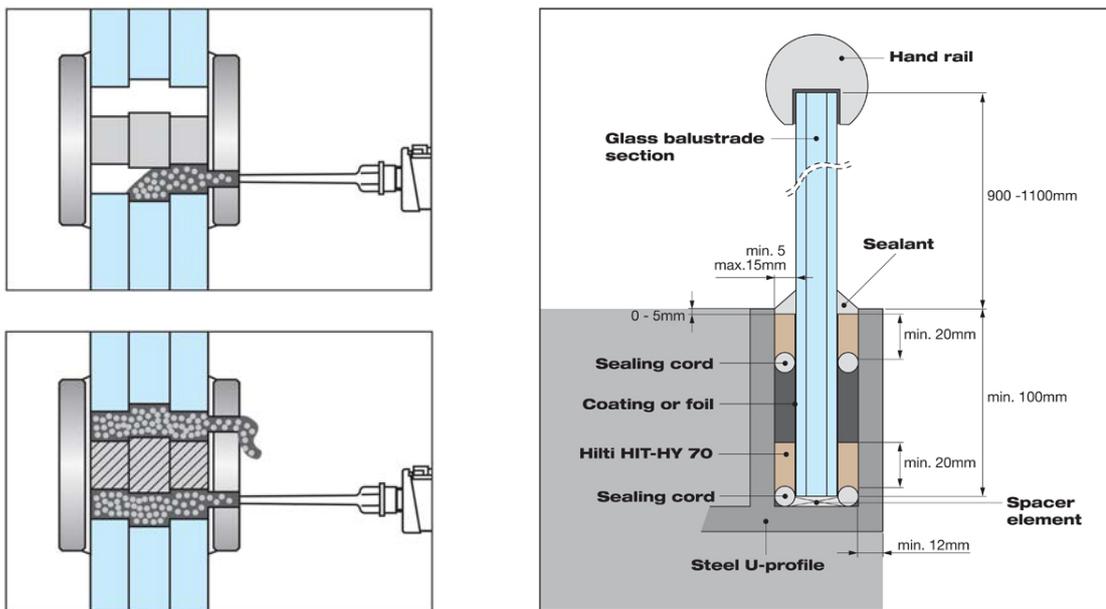


Abb. 4.2 Anwendungen des Mörtels Hilti HIT-HY 70 - Links: Punkthalter (Bohrloch); Rechts: Einspannung einer Glasbrüstung [Datenblatt Hilti HIT-HY 70]

4.2.2 Polyoxymethylen (POM)

Von der Struktur her haben Polyoxymethylen (Polyacetal) und Acetal-Copolymere einen linearen Aufbau und einen hohen Kristallinitätsgrad. POM weist folgende günstige Eigenschaften auf:

- ◆ hohe Härte und Steifheit
- ◆ hohe Wärmebeständigkeit
- ◆ geringe Wasseraufnahme - Quellverhalten
- ◆ hohe Beständigkeit gegen Lösungsmittel
- ◆ Beständigkeit gegen die Bildung von Spannungsrissen
- ◆ günstiges Gleit- und Verschleißverhalten

Weiters können bestimmte Eigenschaften durch Zugabe verschiedener Stoffe verbessert werden - PTFE verbessert das Gleitverhalten, Glasfasern erhöhen die Formstabilität und Aktivruß verzögert die Schädigung durch UV-Strahlung. Die Versprödungsgrenze bei Schlagbeanspruchung liegt bei -60 °C.

In der Tab. 4.5 werden die wichtigsten mechanischen Größen für Polyacetal (POM), Acetal-Copolymere (POM-C) und 30 % Glasfaser verstärkten Polyacetal (POM GF30) zusammengestellt:

Eigenschaft		POM	POM-C	POM GF30
Rohdichte		1,42 g/cm ³	1,41 g/cm ³	1,56 g/cm ³
Zugfestigkeit nach [DIN EN ISO 527-1,-2]		65 bis 70 MPa	67 bis 72 MPa	140 MPa
Reißdehnung nach DIN EN ISO 527-1		25 bis 70 %	25 bis 70 %	3 %
E-Modul E (Zug) nach DIN EN ISO 527-1		ca. 1600 bis 2800 MPa	ca. 1600 bis 3200 MPa	ca. 9000 bis 10000 MPa
Gebrauchstemperatur	maximal kurzzeitig	110 bis 140 °C	110 bis 140 °C	110 bis 150 °C
	maximal dauernd	0 bis 110 °C	0 bis 110 °C	90 bis 110 °C
	minimal dauernd	-60 °C	-60 °C	-60 °C
Schmelzbereich		175 °C	164 bis 167 °C	164 bis 167 °C
Wärmeausdehnungskoeffizient α_t		$90 \times 10^{-6} / K$	$110 \times 10^{-6} / K$	$30 \times 10^{-6} / K$
Wasseraufnahme Sättigung bei 23°C		0,22 bis 0,25 %		

Tab. 4.5 Mechanische Eigenschaften von POM, POM-C und POM GF30 [4]

4.2.3 Polyamid (PA)

Die Polyamide gehören zu der Gruppe der thermoplastischen Polykondensate und weisen folgende günstige Eigenschaften auf:

- ◆ hohe Festigkeit, Steifheit und Härte
- ◆ hohe Wärmebeständigkeit
- ◆ hohe Beständigkeit gegen Lösungsmittel
- ◆ günstiges Gleit- und Verschleißverhalten

In der Tab. 4.6 werden die wichtigsten mechanischen Größen für Polyamid 6 (PA 6), 30 % Glasfaser verstärkten Polyamid 6 (PA 6 GF30) und Polyamid 66 (PA 66) zusammengestellt:

Eigenschaft		PA 6	PA 6 GF30	PA 66
Rohdichte		1,13 g/cm ³	1,36 g/cm ³	1,14 g/cm ³
Zugfestigkeit nach [DIN EN ISO 527-1,-2]		70 bis 85 MPa	100 MPa	77 bis 84 MPa
Reißdehnung nach DIN EN ISO 527-1		200 %	-	150 %
E-Modul E (Zug) nach DIN EN ISO 527-1		ca. 1400 bis 3000 MPa	ca. 5000 bis 8500 MPa	ca. 2000 bis 3100 MPa
Gebrauchstemperatur	maximal kurzzeitig	140 bis 180 °C	140 bis 180 °C	170 bis 200 °C
	maximal dauernd	80 bis 100 °C	80 bis 100 °C	90 bis 120 °C
	minimal dauernd	-30 °C	-30 °C	-30 °C
Schmelztemperatur		220 °C	220 °C	255 °C
Wärmeausdehnungskoeffizient α_t		$80 \times 10^{-6} / K$	$30 \times 10^{-6} / K$	$80 \times 10^{-6} / K$
Wasseraufnahme Sättigung bei 23°C		2,5 bis 3,5 %	1,6 bis 2,2 %	2,5 bis 3,1 %

Tab. 4.6 Mechanische Eigenschaften von PA 6, PA 6 GF30 und PA 66 [4]

Der Nachteil von Polyamiden ist, dass sich ihre mechanischen Eigenschaften mit dem Feuchtegehalt des Bauteils verändern und somit die reversible Wasseraufnahme eine Volumenveränderung mit sich bringt.

Gleich wie bei Polyacetal können auch bei Polyamiden bestimmte Eigenschaften durch Zugabe verschiedener Stoffe beeinflusst werden - Glasfasern verbessern die mechanischen Eigenschaften und verringern die Wasseraufnahme, Ruß erhöht die Lebensdauer bei freier Bewitterung [4].

4.2.4 Untersuchungen an Verklotzungsmaterialien auf Druck

Erste Untersuchungen zur Lasteinleitung über Klotzungen an Scheibenecken sind in der Dissertation von Oliver Enghardt [3] enthalten. Dabei wird das Tragverhalten und die Stabilität von Glaselementen unter Scheibenbeanspruchung betrachtet. Der Einfluss der Geometrie und der Lage der Klotzungen auf das Tragverhalten wird analysiert. Als Klotzungsmaterial wird Polyoxymethylen (POM) verwendet.

An der Technischen Universität Dresden sind in den letzten Jahren Kurz- und Langzeituntersuchungen von verschiedenen Verklotzungsmaterialien auf Druck durchgeführt worden, um deren Eignung zu analysieren.

Als Voruntersuchung wurden Druckversuche an keilförmigen Probekörpern aus Aluminium, POM-C und Zinkdruckguss mit den Abmessungen von 80 mm x 10 mm x 5-8 mm durchgeführt. Über diese wurden mittig an Ober- und Unterkante von 200 mm x 200 mm x 12 mm großen Floatglasscheiben Lasten von bis zu 250 kN mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 kN/s eingeleitet. Gemessen wurde die Gesamtverformung, bestehend aus den Stauchungen der zwei Klotzungen, aus der Stauchung der Glasscheibe und möglichem Schlupf. Die metallischen Prüfkörper weisen eine linear-elastische Arbeitslinie, während im Falle von POM-C diese bis zu einer Last von 80 kN (96 N/mm² Druckspannungen in der Klotzung) linear ist, bei höheren Lasten aber die Verformungen plastisch zunehmen [28].

Im Falle der Verklotzungen aus Zinkdruckguss, kam es bei allen Versuchen bei Lasten unter 100 kN (120 N/mm² Druckspannung in der Klotzung) zum Glasbruch, obwohl die Querzugspannungen im Glas nahe der Lasteinleitung nur ca. 34 N/mm² betragen (charakteristische Prüfbiegezugfestigkeit von Floatglas beträgt 45 N/mm²). Dieses Versagen ist auf lokalen Einflüssen aus dem Kontakt zwischen Glas und Zink zurückzuführen.

Bei den Versuchen mit Aluminiumklotzungen konnten die Drucklasten bis zu 200 kN gesteigert werden bis es bei Hauptquerzugspannungen von 65 N/mm² zum Glasbruch kam.

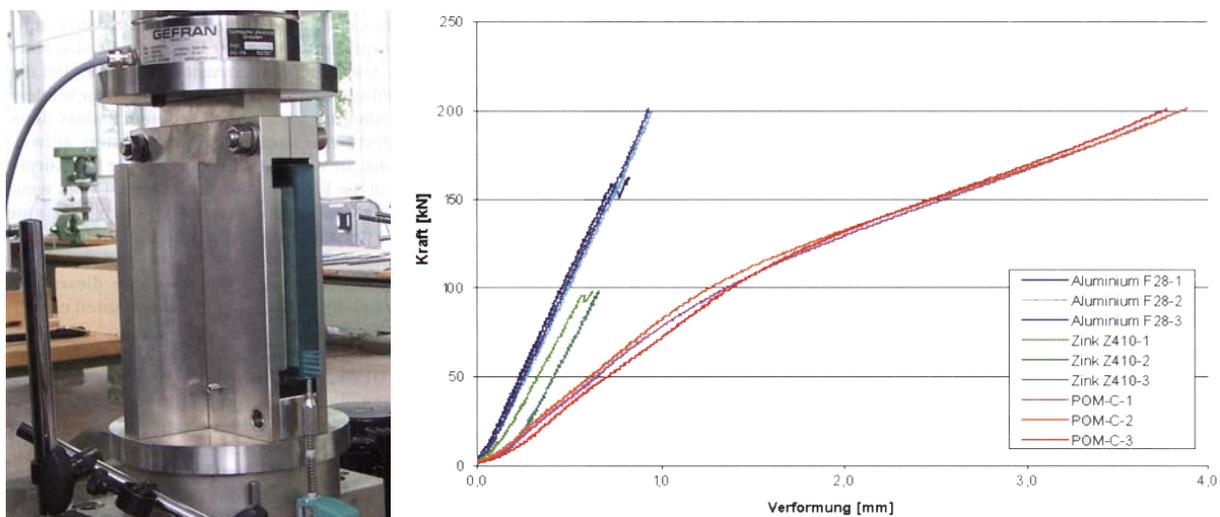


Abb. 4.3 Links: Druck-Versuchsstand [28]; Rechts: Last-Verformungs-Kurven unter Drucklast bei einer Klotzfläche von 800 mm² [28]

Die weiteren Versuche erfolgten aus konstruktiven Gründen an dreiteiligen Prüfkörper, die in der Abb. 4.4 dargestellt sind. Die Belastungskonfiguration wurde beibehalten und die Gesamtverformung wurde mit einem Wegaufnehmer gemessen. Die Kontaktdruckfläche betrug in diesem Fall 80 mm x 16 mm, so dass 19 mm dicke Floatglasscheiben verwendet wurden. Für den am Glas anliegenden Klotz wurden Aluminium F28, POM-C und POM-C GF25 von zwei verschiedenen Herstellern mit jeweils 10 Versuchen getestet und als Mittelwertkurven ausgewertet (siehe Abb. 4.5).

Es zeigte sich heraus, dass bei den Prüfkörpern aus POM-C ab einer Kraft von 120 kN (94 N/mm² Druckspannung im Klotz) große plastische Verformungen auftreten, während bei den mit Glasfasern verstärkten POM-C GF25 Prüfkörpern sich erst ab 200 kN eine Zunahme der Verformungen ausbildet. Ausserdem wurde festgestellt, dass nicht alle POM-C GF25 Prüfkörper das gleiche Verformungsverhalten aufwiesen. Dieses wurde auf die verschiedenen Anteile und Verteilungen der Glasfasern zurückgeführt. Diese können optisch aufgrund von Muster und Färbung erfasst werden, wobei ein grauer Farbton das Vorhandensein von Glasfasern und ein uniformes Muster eine gleichmässige Verteilung andeuten [27], [28].

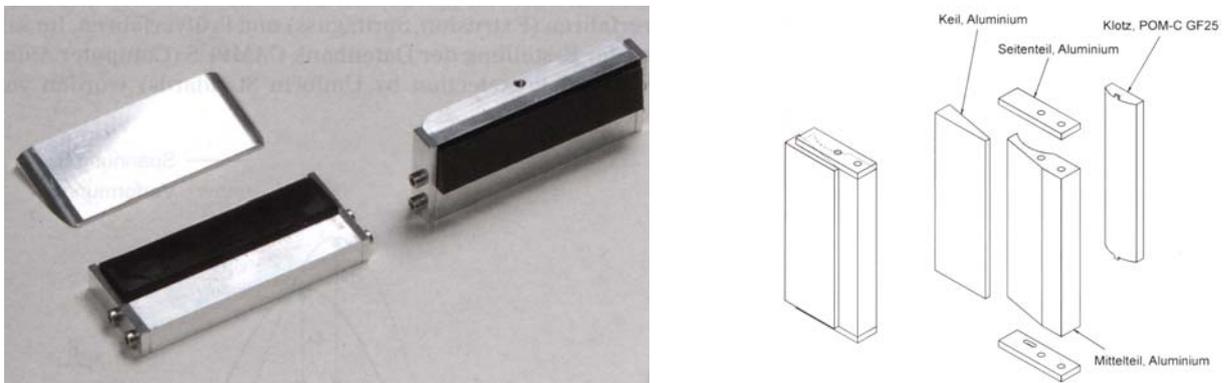


Abb. 4.4 Dreiteilige Prüfkörper für die Lasteinleitung von Drucklasten an Glaskanten

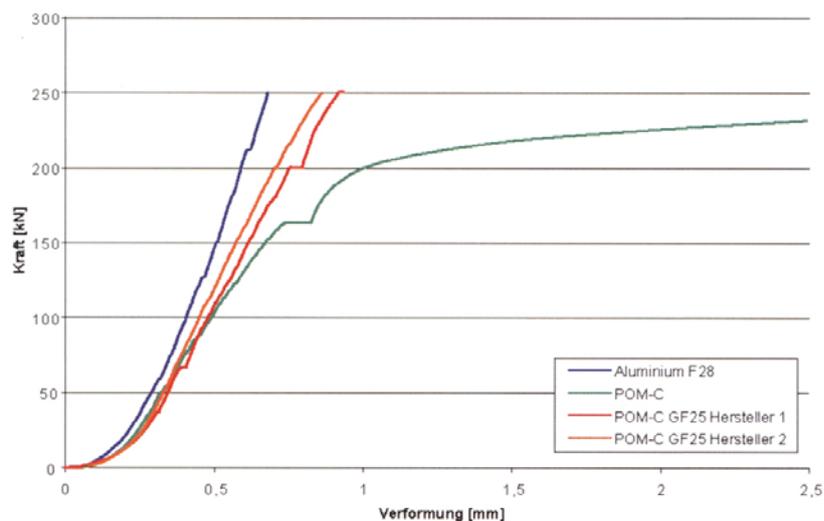


Abb. 4.5 Last-Verformungs-Mittelwertkurven unter Drucklast bei einer Klotzfläche von 1280 mm² [28]

Aus den Versuchen stellte sich heraus, dass POM-C GF25 für Verklotzungen geeignet ist, da es durch die weiche Oberfläche die Verglasung nicht beschädigt und mechanische Kurzzeit-Eigenschaften nahe denen von Metallen aufweist.

Bei den hier betrachteten Thermoplasten handelt es sich um Kunststoffe, die bei Temperaturen unter der Glasübergangstemperatur einen festen Zustand haben (können konstruktiv eingesetzt werden) und oberhalb dieser Temperatur schmelzen. Außer der Temperatur hängt ihr Verhalten von der Zeit, der Art, Höhe und Dauer der Belastung und von UV- und Chemikalieneinwirkungen. Unter Gebrauchslasten mechanischer Art weisen diese Polymere grundsätzlich ein viskoelastisches Verformungsverhalten auf, es können aber abhängig von den aufgezählten Parameter und laut dem schematischen Diagramm in Abb. 4.6 auch andere Bereiche auftreten.

Die mechanischen Kennwerte, die in Datenbanken oder Produktdatenblätter zu finden sind wurden durch Zugversuche ermittelt. Grundsätzlich kann man aber annehmen, dass die Druckfestigkeit von Kunststoffen immer höher als die Zugfestigkeit liegt, weil infolge einer Druckbelastung Risse und Kerben geschlossen werden und eine Einschnürung der Probekörper verhindert wird [28].

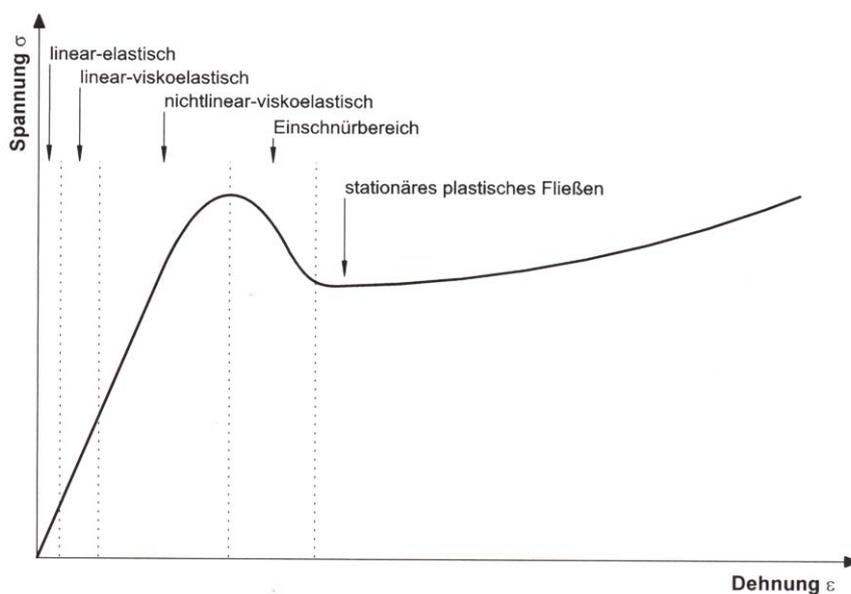


Abb. 4.6 Schematische Arbeitslinie von Thermoplasten [28]

Um Thermoplaste als Verklotzungen anzuwenden zu können muss das Verformungsverhalten über die im Hochbau anzusetzende Lebensdauer von 50 Jahren bekannt sein. Durch den Aufbau der Kunststoffe aus langen verflochtenen Molekülketten entstehen bei aufgebrachten Spannungen zeitabhängige Dehnungen, die als Dehnungsrelaxation oder Kriechen bezeichnet werden.

In der Literatur gibt es zwei verschiedene Materialgesetze, die das Verformungsverhalten von Thermoplasten abbilden und die Bestimmung eines Kriechmoduls ermöglichen. Das erste Gesetz (*Kelvin-Voigt-Gruppe*) wird als Burger-Modell durch Reihenschaltung von Federn und Dämpfer gebildet und in Abb. 4.7 dargestellt.

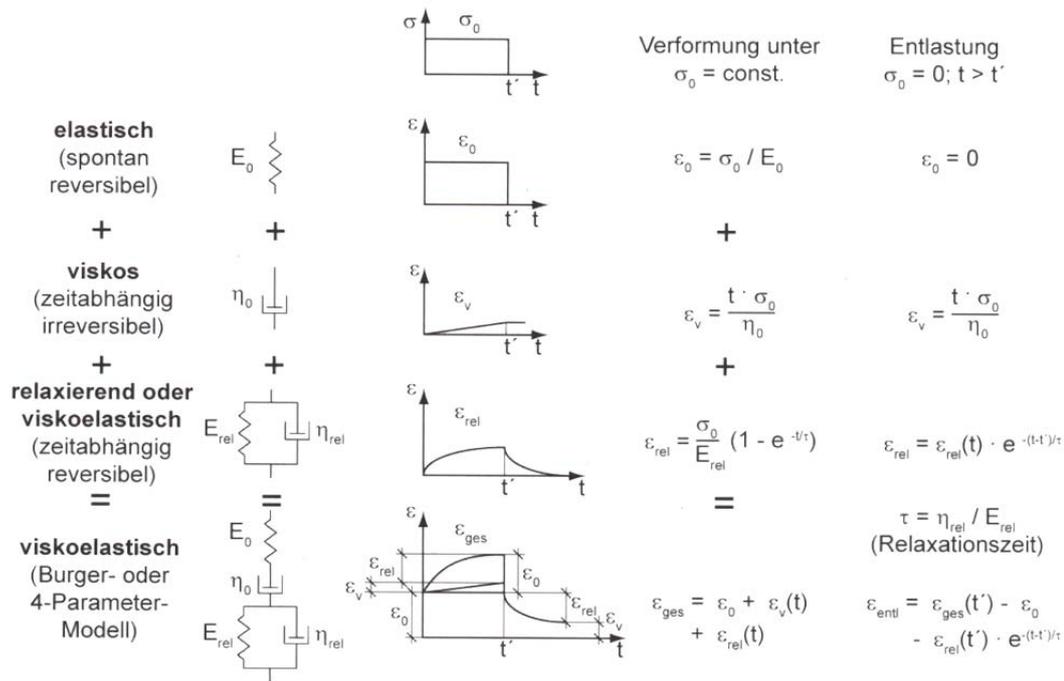


Abb. 4.7 Verformungsverhalten von viskoelastischen Kunststoffen als Burger-Modell [28]

Der Kriechmodul kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$E_C(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{\eta_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_{rel,i}} \times (1 - e^{-t/\tau_i})$$

Das zweite Materialgesetz wurde von *Kunz* ausgearbeitet und weist eine ausreichende Genauigkeit in einem Bereich bis zu 10000 Stunden. Da laut den Untersuchungen an der TU Dresden dieses Modell für das Langzeitverhalten nicht geeignet ist wird auf diesem nicht weiter eingegangen, sondern auf [28] verwiesen.

Es wurden 1000 Stunden-Langzeitversuche an 5 Kunststoffringen aus POM-C GF25 mit einem Außendurchmesser von 11,1 mm, einem Innendurchmesser von 5,1 mm und einer Höhe von 6 mm durchgeführt. Die Temperatur betrug 45 °C und die Prüfkörper wurden mit einer konstanten Drucklast von 27,5 N/mm² belastet. Bei der Auswertung der Messergebnisse und beim Vergleichen mit den zwei Materialgesetzen zeigte sich, dass während das viskoelastische Materialmodell der *Kelvin-Voigt-Gruppe* auch bei einer Extrapolation auf 50000 Stunden noch eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Kriechkurve zeigt, das *Kunz'sche* Modell nur bis 4000 Stunden bedingt geeignet ist [28], [29].

Ein weiteres Erkenntnis der Untersuchungen war, dass bei faserverstärkten Kunststoffen die Richtung der Glasfasern die mechanischen Eigenschaften und das Kriechen beeinflussen. Bei Belastung in Richtung der Fasern sind die Verformungen zweimal geringer. Somit sollten die Herstell- und Einbau- richtung für die Bestimmung des Langzeitverhaltens bekannt sein.

4.2.5 Verteilung der thermischen Vorspannung

Bei der thermischen Vorspannung handelt es sich um einen Prozess, durch welchem die Scheibenoberflächen Druckspannungen und das Scheibeninnere Zugspannungen eingepreßt bekommen. Der Vorteil dieser Bearbeitung ist, dass Kerben und Mikrorisse auf der Oberfläche bei einer Biegebeanspruchung erst nach dem die vorhandene Druckspannung abgebaut wird, wirksam werden. Der Nachteil besteht in der Tatsache, dass bei vorgespannten Gläser alle Kantenbearbeitungen und Bohrungen vor dem Vorspannprozess erfolgen müssen.

In der Dissertation von Wilfried Laufs wird mit Hilfe von spannungsoptischen Messverfahren die Verteilung der thermisch eingepreßten Vorspannung über die Glasscheibe untersucht. Dazu wird die Glasscheibe in folgende vier Zonen unterteilt [11]:

- ◆ Zone 1: die Fläche
- ◆ Zone 2: die Kante
- ◆ Zone 3: die Ecken
- ◆ Zone 4: die Bohrlochränder

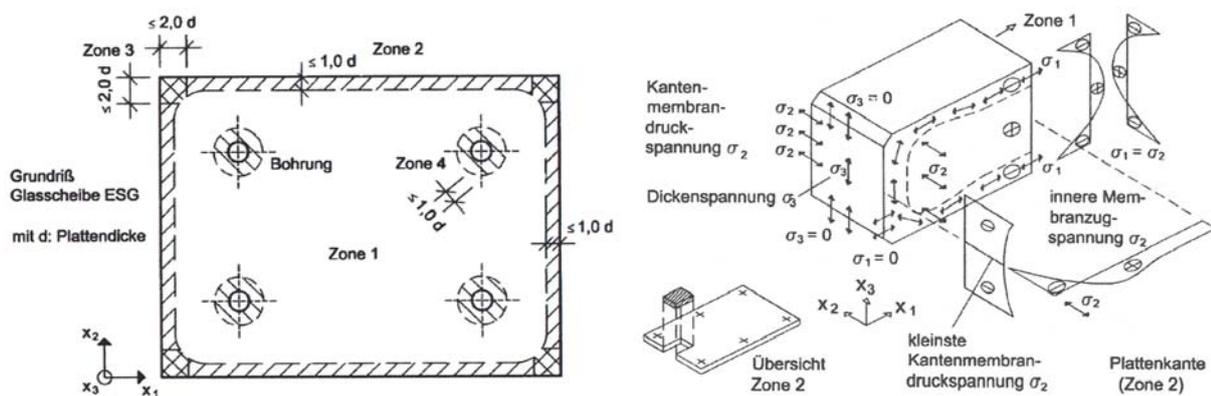


Abb. 4.8 Links: Einflusstiefen der vier Zonen für ESG; Rechts: qualitative Verteilung der thermisch eingepreßten Vorspannung für Zone 2 [11]

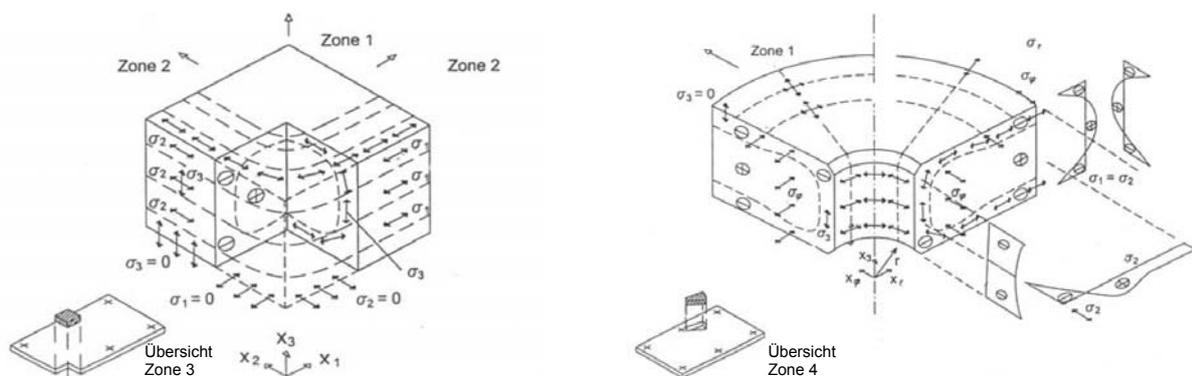


Abb. 4.9 qualitative Verteilung der thermisch eingepreßten Vorspannung für Zone 3 (links) und Zone 4 (rechts) [11]

Während in der Fläche ein homogener, über den Querschnitt parabelförmiger Verlauf der Vorspannung festgestellt wird, ist der Verlauf im Kanten- und Eckbereich nicht gleichmäßig. Im Kantenbereich entstehen parallel zur Kante Membrandruckspannungen. Diese verschwinden aus Gleichgewichtsgründen an der freien Eckkante. Um eine Interaktion der Vorspannungszustände der Zonen 2 (Kante) und 4 (Bohrloch) zu vermeiden werden in der Dissertation von Herrn Laufs einzuhaltende Mindestabstände angegeben.

Bei der Messung der Vorspannungen von Scheiben mit einer Dicke von 10 mm und 15 mm mit einem Streulichtmessverfahren konnte für die Vorspannungen an der Kante eine große Streuung zwischen verschiedenen Herstellern festgestellt werden. Die minimale Druckspannung beträgt bei einer Dicke von 10 mm 63 N/mm^2 .

Die Gesamtfestigkeit vorgespannter Gläser setzt sich aus der Eigenfestigkeit und aus der Vorspannung zusammen und wird abhängig von einer vorhandenen Platten- oder Scheibenbeanspruchung unterschieden. Aus Bruchversuchen und aus den Ergebnissen der spannungsoptischen Messungen werden in [11] folgende 5% - Fraktilwerte an der Glaskante bei Scheibenbeanspruchung ermittelt:

- ◆ $22,7 \text{ N/mm}^2$ für die Glaseigenfestigkeit
- ◆ $65,4 \text{ N/mm}^2$ für die Vorspannung und $104,5 \text{ N/mm}^2$ für die Bruchfestigkeit von ESG
- ◆ $45,6 \text{ N/mm}^2$ für die Vorspannung und $97,2 \text{ N/mm}^2$ für die Bruchfestigkeit von TVG

4.2.6 SL-Verbindungen im konstruktiven Glasbau

Im Falle von punktförmigen Anschlusskonstruktionen von Glasbauteilen verursachen die lokalen Lasteinleitungen Spannungskonzentrationen im Glas. Bei den aussteifenden Glasschwertern folgen diese aus einer Scheibenbeanspruchung, bei der Kräfte in Ebene der Scheibenmittelfläche abzuleiten sind. In der Regel kommen als Anschlüsse Scher-Lochleibungsverbindungen (SL-Verbindungen) zur Anwendung. Im Gegensatz zum Stahlbau, wo durch das duktile Materialverhalten Spannungsspitzen umgelagert werden können und somit einfache Ingenieurmodelle für die Bemessung möglich sind, gibt es im Glasbau noch keine genormten Bemessungsregeln für SL-Verbindungen.

Eine wichtige Arbeit zur Bemessung von Scher-Lochleibungsverbindungen im konstruktiven Glasbau ist die Dissertation von Dr. Mascha Baitinger - „Zur Bemessung von SL-belasteten Anschlüssen im konstruktiven Glasbau“ - [1], welche die Entwicklung eines Bemessungsmodells von der analytischen Ermittlung der Spannungszustände komplexer Anschlüsse bis zur versuchstechnischen Absicherung bietet. Bei den Untersuchungen wird thermisch vorgespanntes Glas (ESG und TVG) vorausgesetzt. Eine SL-Lastung findet bei einem Anschluss statt, wenn bei Scherbelastung einer Schraubenverbindung der Schraubenschaft Lochleibungsdruck auf die Bohrlochwand ausübt, nachdem ein eventuell vorhandener Schlupf überwunden wird [1].

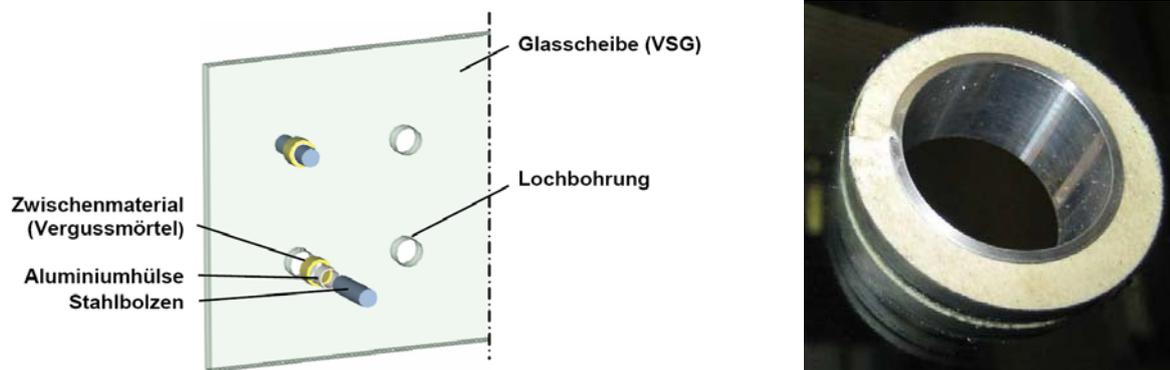


Abb. 4.10 Links: Komponenten einer SL-Verbindung mit Vergussmörtel als Zwischenschicht; Rechts: Bohrloch mit Vergussmörtel und zusätzlicher Aluminiumhülse [1]

Aus dem Stahlbau sind folgende Versagensarten von SL-Verbindungen bekannt:

- ◆ Abscheren der Schraube oder des Bolzen
- ◆ Stauchung und lokale Verformung des Grundmaterials an den Lochleibungen
- ◆ Bruchversagen im Grundmaterial infolge Zugbeanspruchungen

Die in [1] aufgestellten Bemessungsregeln für SL-Verbindungen bauen auf die AIRY'sche Spannungsfunktion auf. Es werden ein Lochleibungs-Spannungszustand der lochgebohrten Scheibe und ein Grundspannungszustand im Nettoquerschnitt überlagert (superponiert) und für beide analytische Lösungen gefunden, welche beliebige Randbedingungen zulassen und für alle elastisch isotropen Querschnitte, bei denen die Bohrlochwand Drucklasten erfährt, gültig sind.

Bei den betrachteten Lochleibungsverbindungen wird die Hülse zwischen Bolzen und Bohrlochwand aus Vergussmörtel ausgeführt, da die Passgenauigkeit der Hülse für die Tragfähigkeit eine hohe

Bedeutung hat. Es wird daher zusätzlich zu den Nachweisen der Glasbauteile auf die Bemessung der Zwischenschicht hingewiesen. Als Vergussmörtel werden Hilti HIT-HY 50 und Hilti HIT-HY 70 verwendet. Auf die Eigenschaften dieser ist im Kapitel 4.2.1 eingegangen worden. Die Bemessung des Mörtels erfolgt abhängig von der Bolzenlast, dem Bohrlochdurchmesser und der Scheibendicke.

Anschließend an den theoretischen Untersuchungen werden Versuche an Normalkraft-Anschlüssen und Momenten-Querkraft-Anschlüssen unter statischen Lasten und unter Gebrauchslastzyklen durchgeführt, um die rechnerischen Ergebnisse zu überprüfen.

Als Abschluss werden aus den analytischen Ergebnissen einfache Bemessungsregeln abgeleitet, welche die Ermittlung der maßgebenden Spannungen des Glasbauteiles im Bereich des Bohrloches, abhängig von der Bemessungsbolzenlast des jeweiligen Loches, des Bohrlochdurchmessers und der Scheibendicke, ermöglichen. Zusätzlich werden in der entwickelten Bemessungsformel Herstell-, Montage- und Entwurfseinflüsse, nach Untersuchungen mithilfe FEM-Berechnungen, in Form von Beiwerten berücksichtigt.

Ein Vorschlag für eine normative Regelung wird basierend auf dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten zusammengestellt. Dabei darf die maximale Bemessungsspannung $\sigma_{\varphi,d}$ die mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagte charakteristische Biegezugfestigkeit des Glases im Bohrlochbereich nicht überschreiten. Als maximale Bemessungszugspannung im Glas wird die maximale Tangentialspannung am Bohrlochrand infolge Bolzendruck eingesetzt. Auf die analytische Herleitung der maximalen Tangentialspannung als Summe des Lochleibungs-Spannungszustandes und des K_m -fachen Grund-Spannungszustandes (der Faktor K_m ist ein Parameter zur Vervielfachung des Grundspannungszustandes, der von den zu modellierenden Randbedingungen abhängig ist) wird nicht eingegangen, sondern auf [1] verwiesen. SL-Verbindungen im Glasbau können laut [1] nach folgender Gleichung bemessen werden:

Bemessungsgleichung für SL-belastete Anschlüsse im konstruktiven Glasbau
$\sigma_{\varphi, \max, d} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot \left(1,2 + 2,2 \frac{K_m}{b_m} \right) \cdot \frac{P_d}{d_o \cdot t} \leq \sigma_{zul}$
<p>Darin sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> P_d: Resultierende Bemessungslast an der maßgebenden Bohrung d_o: Bohrungsdurchmesser t: Glasdicke (einer Glasschicht bei VSG) k_i: Beiwerte zur Berücksichtigung von Fertigungs- und Entwurfsparametern gemäß Tabelle 9.3 bis Tabelle 9.7 b_m: maßgebende Breite in $[d_o]$ gemäß Bild 9.2 K_m: Beiwert zur Berücksichtigung des Gleichgewichtssystems des Anschlusses gemäß Tabelle 9.8 und Tabelle 9.9 σ_{zul}: Bemessungswert des Glasbauteils, z.B. $R_{d,4}$ gemäß (2.5) und (2.6) des Abschnitts 2.2.4

Abb. 4.11 Bemessungsgleichung für SL-Verbindungen im Glasbau [1]

Die in Abb. 4.11 genannten Tabellen und Abbildungen beziehen sich auf [1] und werden an dieser Stelle nicht wiedergegeben. Für die Berechnung der am Einzelloch angreifenden Bemessungsbolzenlast P_d müssen zuerst die Schnittkräfte M , N und V am Gesamtanschluss bestimmt werden und dann, unter Berücksichtigung des polaren Trägheitsmomentes I_p und der Längskraftverteilung über die Verbindungslänge, auf die einzelnen Bolzen verteilt werden. Die maßgebende Breite b_m ist von den

Randabständen der Bohrlöcher und von den Abständen der Bohrlöcher untereinander senkrecht zur Richtung der Normalkraft abhängig. Die Beiwerte k_i und der Beiwert K_m können aus vorbereiteten Tabellen entnommen werden.

Diese Bemessungsformel ist für beliebige Anordnung der Bolzen und Lagerbedingungen gültig, solange die üblichen Randbedingungen des konstruktiven Glasbaues berücksichtigt werden (z.B. Vermeidung des Kontaktes zwischen Glas und Glas oder Glas und Stahl). Außerdem müssen die Bedingungen aus folgender Tabelle erfüllt werden:

Parameter	Bedingung
Glasart	Monoscheiben und 2-schichtiges VSG aus TVG oder ESG
Gesamtscheibendicke	$6 \text{ mm} \leq t \leq 45 \text{ mm}$
Scheibenversatz d bei VSG	$d / b_{\text{Spalt}} \leq 0,5$
Bohrlochdurchmesser	$22 \text{ mm} \leq d_0 \leq 60 \text{ mm}$
maßgebende Breite	$b_m \geq 3 \times d_0$
Bohrlochabstände in Lastrichtung	$p_1 \geq 3 \times d_0$
Schlupf Δs	$\Delta s / d_{\text{Bolzen}} \leq 0,02$
außermittige Position des Bolzens im Bohrloch	$u / b_{\text{Spalt}} \leq 0,4$
Bolzendurchmesser	$0,5 \leq d_{\text{Bolzen}} / d_0 \leq 0,77$
Vergussmörtel als Zwischenschicht mit	$1000 \leq E \leq 5000 \text{ N/mm}^2$
Spaltbreite	$0,07 \leq b_{\text{Spalt}} / d_0 \leq 0,2$
Aluminiumhülse zwischen Bolzen und Zwischenschicht	muss vorhanden sein

Tab. 4.7 Gültigkeitsbedingungen für die Bemessungsformel aus Abb. 4.11

Bei den Untersuchungen aus dieser Arbeit wird die Reibung zwischen Zwischenschicht und Bohrlochwand nicht berücksichtigt, so dass die Bolzenlast als Normalspannung senkrecht zur Bohrlochwand übertragen wird.

Schlussendlich werden in [1], durch Vergleich der Sicherheit der entwickelten Bemessungsformel mit den experimentell ermittelten Tragfähigkeiten, Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für ESG und TVG nach dem semiprobabilistischen Verfahren ermittelt. Mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,3$ ergeben sich folgende zulässige Spannungen:

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{f_{\text{ut}}}{\gamma_M} = \frac{80}{1,3} = 61 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für ESG}$$

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{f_{\text{ut}}}{\gamma_M} = \frac{70}{1,3} = 53 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für TVG}$$

Eine weitere Arbeit zur Spannungsverteilung von Scher-Lochleibungsverbindungen im konstruktiven Glasbau unter Scheibenbeanspruchung ist die Dissertation von Iris Maniatis [16]. In den ersten Kapiteln werden die Eigenschaften von Glas und Punkthalter im konstruktiven Glasbau mit den dabei verwendeten Materialien behandelt. Dabei wird auch auf die Verteilung der durch thermische Vorspannung an den Scheibenoberflächen eingepprägten Druckspannungen eingegangen. Es werden die Erkenntnisse aus der Dissertation von Herrn Laufs [11] zusammengefasst.

Im Anschluss wird, ausgehend von schon bekannten analytischen Lösungen für Scheiben mit Bohrlöcher und unter Berücksichtigung der Kontaktmechanik (*Hertz'sche* Pressung), eine analytische Lösung für Scheibenbohrlöcher mit Bolzen formuliert. Die Theorie von *Hertz* geht von einer geringen Kontaktberfläche im Vergleich zu den beteiligten Körpern aus. Dieses ist bei ungefähr gleichen Oberflächengeometrien, wie das im Falle eines Bolzen in einem Bohrloch vorkommt, nicht der Fall, sodass diese Theorie nicht zutrifft. Die beste analytische Näherung wird für eine linear-elastische Verbindung in einer unendlichen Scheibe, bei der Bolzen und Scheibe aus dem gleichen Material bestehen und der Kontakt reibungslos erfolgt, erreicht.

Im nächsten Schritt wird ein numerisches Modell aufgestellt und mit der analytischen Lösung verglichen. Der Einfluss verschiedener Parameter auf die Spannungsverteilung im Bereich des Bohrloches wird sowohl mit diesem als auch durch Versuche untersucht. Folgende Parameter werden betrachtet [16]:

- ◆ verschiedene Materialien für Bolzen und Hülsen - bei nicht vorhandenen Schlupf zeigen sich zwischen den Kombinationen Glas-Aluminium und Glas-POM-C nur geringe Unterschiede bei den maximalen Hauptzugspannungen
- ◆ Schlupf zwischen Bolzen und Bohrloch - bei Erhöhung des Schlupfes verlagert sich der Ort der maximalen Hauptzugspannungen in Richtung der Lasteinleitung; die Höhe der Hauptzugspannungen wächst bei einer Kombination mit Aluminium schneller als bei Verwendung von POM-C
- ◆ Reibung - es werden verschiedene Reibungskoeffizienten angenommen, ohne dass diese genau bestimmt wurden; bei Erhöhung des Reibungskoeffizienten nehmen die tangentialen Spannungen zu, während die radialen abnehmen
- ◆ exzentrische Lasteinleitung - die Spannungskonzentration liegt nicht mehr im Scheibeninneren, sondern an der Scheibenoberfläche; außerdem nehmen die maximalen Hauptspannungen bei vorhandenem Schlupf schnell zu
- ◆ Bohrl Lochdurchmesser, Scheibenbreite und Abstand zwischen Bohrloch und Scheibenkante - die Scheibenbreite hat einen Einfluss nur auf die maximalen tangentialen Spannungen, nicht aber auf die radialen; wird der Abstand zwischen Bohrloch und Scheibenkante verringert, nehmen die Hauptspannungen zu

Da die im Rahmen der Arbeit untersuchten Parameter in der Regel einen wesentlichen Einfluss auf die Spannungsverteilung im Bohrlochbereich haben, müssen sie bei einer numerischen Modellierung nahe der Realität erfasst werden.

4.3 Glasträger

Untersuchungen an Glasträger wurden in den letzten 10-15 Jahren an mehreren Universitäten durchgeführt, in der Regel handelte es sich aber um statisch bestimmt gelagerte Einfeldträger oder um Stabilitätsuntersuchungen. Kragträger aus Glas, wie sie im Falle der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Glasschwerter vorkommen, wurden bislang nur für Einzelprojekte betrachtet und analysiert.

4.3.1 Untersuchungen an der ETH Zürich

Im Jahre 2000 ist ein Forschungsbericht über Versuchsreihen an Glasträger an der ETH Zürich erschienen. Es wurde das Tragverhalten von Biegeträgern, die aus senkrecht gestellten Glasscheiben (VSG und verschiedene Einzelgläser) bestehen, untersucht. Um sämtliche damalige Glaslieferanten aus der Schweiz berücksichtigen zu können wurden für die Versuchsträger eine Länge von 4,5 m und eine Höhe von 400 mm festgelegt. Die Tragfähigkeit wurde nach dem Vierpunktbiegebalkenversuch gemessen, da bei diesem grosse Bereiche mit konstantem Biegemoment und verschwindend kleiner Querkraft erfasst werden können. Die Auflagerbedingungen entsprachen einem statisch bestimmten Einfeldträger mit einem festen und einem horizontal verschieblichen Auflager. Es wurden die Durchbiegungen jeweils 200 mm neben den Auflagern und in Trägermitte gemessen. Obwohl die Träger im Auflagerbereich gegen Kippen gesichert waren, wurde im Verlauf der Versuche festgestellt, dass auch die seitlichen Verformungen für die Kontrolle eines möglichen Kippens gemessen werden müssen [6].

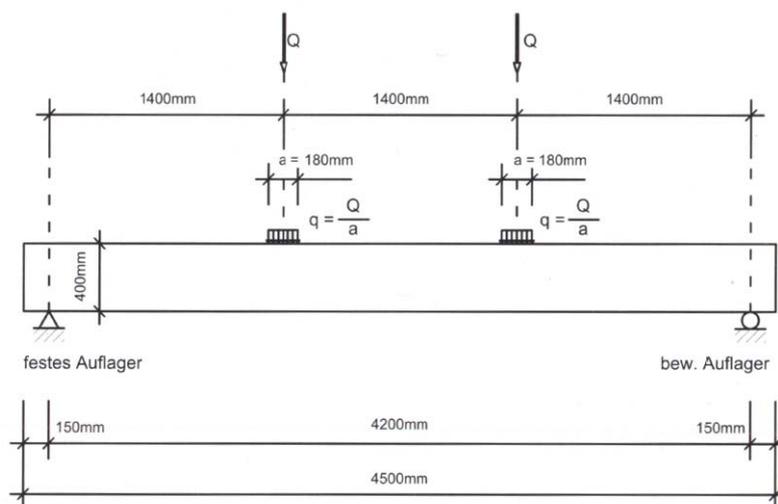


Abb. 4.12 Versuchsanordnung - Tragverhalten von Glasträger - ETH Zürich [6]

Da die Biegefestigkeiten von der Kantenbearbeitung abhängig sind, wurden diese bei allen Versuchskörpern rodiert ausgeführt. Entgegengesetzt den Erwartungen wurde bei den Versuchen festgestellt, dass Glasträger aus VSG (unabhängig von der Art der verwendeten Glasscheiben) bei Bruch sämtlicher Scheiben, keine Resttragfähigkeit aufweisen. Bei horizontalen Verglasungen aus VSG dagegen ist bei Verwendung von Floatglas auch bei Bruch aller Scheiben eine gewisse Resttragfähigkeit gegeben. Aus diesen Erkenntnissen wird empfohlen für Träger und Stützen aus Glas, wegen der höheren Biege- und Schlagfestigkeit, ESG oder TVG zu verwenden.

Infolge einer Versuchsserie (3 Versuche) mit Dauerlasten wurde festgestellt, dass die Langzeit-Biegefestigkeit im Vergleich zur Kurzzeit-Biegefestigkeit stark abnimmt. Ein weiteres Erkenntnis aus einer Versuchsserie an stehenden und liegenden Plattenstreifen ist die geringere Biegefestigkeit bei stehenden Scheiben im Vergleich zu liegenden (bei Floatglas 25%).

Anschliessend an die Versuche wurden drei Bemessungsvorschläge ausgearbeitet, letzterer nach der Europäischen Norm auf Basis eines Vergleiches von effektiven Spannungen mit aufnehmbaren Spannungen. Auf diese wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, sondern auf [6] verwiesen. Als Schlussbemerkung wurde die Eignung des spröden Baustoffes Glas als Haupttragelement bei entsprechender Berücksichtigung in der Bemessung geäußert.

4.3.2 Stabilität von Glasträger und Glasschwerter

Zu diesem Thema gibt es in den letzten Jahren mehrere Untersuchungen. Die Dissertation von Johannes Liess [12] befasst sich mit der Bemessung druckbelasteter Bauteile aus Glas und hat als Ziel die Entwicklung eines Knicksicherheitsnachweises. Eine wichtige Arbeit ist die Dissertation von Andreas Luible [14], welche die Stabilität (Knicken, Kippen, Beulen) von schlanken Tragelementen aus Glas betrachtet. Als Zielsetzungen hat die Arbeit folgende zwei Punkte:

- ♦ das Tragverhalten von stabilitätsgefährdeten Elementen aus Glas soll anhand von Stabilitätsversuchen und Berechnungsmodellen untersucht werden und die einflussnehmenden Parameter sollen bestimmt und quantifiziert werden
- ♦ mögliche Berechnungsverfahren zur Bemessung stabilitätsgefährdeter Tragelemente aus Glas sollen für die drei elementaren Stabilitätsfälle diskutiert werden

Als Erstes werden die Parameter (Größe der Glasabmessungen, Vorverformung, Glasfestigkeit, Höhe der thermischen Vorspannung, Verbundwirkung durch die Zwischenschicht bei VSG), die das Tragverhalten von stabilitätsgefährdeten Glaselementen beeinflussen, untersucht und vor allem die Streuung von Glasdicke und Vorverformung erstmals statistisch ausgewertet. Die Glasdicke ist bei allen Prüfkörpern kleiner als der angegebene Nennwert. Im Falle der Vorverformung wird festgestellt, dass diese durch den Vorspannprozess verursacht wird und vom Hersteller und von der Gedrungenheit der Glasformate abhängt, nicht aber von Glasart und Glasaufbau. Im Falle der Biegezugfestigkeit wird darauf hingewiesen, dass sich diese aus der Eigenzugfestigkeit von Glas (hängt von der Oberflächenbeschaffenheit ab) und aus den Eigenspannungen infolge thermischer Vorspannung, welche im Bereich von Kanten, Ecken und Bohrlöchern stark variieren können, zusammensetzt. Dieses sollte auch bei der Ermittlung des Bemessungswertes der effektiven Biegezugfestigkeit berücksichtigt werden.

Für Verbundsicherheitsglas, dessen viskoelastisches Tragverhalten von dem zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten der PVB-Zwischenschicht abhängt, werden Vorschläge für die Berücksichtigung der Verbundtragwirkung bei der Erstellung eines analytischen (Formulierung als Sandwichquerschnitt) und eines numerischen Modells (schichtartige Modellierung mit schubelastischen Zwischenschichten) angegeben. Außerdem wird die Lasteinleitung von hohen Druckkräften an Glaskanten untersucht und festgestellt, dass diese unter Berücksichtigung einiger konstruktiver Regeln und bei Auswahl einer nicht zu steifen Zwischenschicht möglich ist [14].

Anschließend wird für jedes der drei Stabilitätsfälle Knicken, Kippen und Beulen das Tragverhalten von Einfach- und Verbundsicherheitsglas experimentell und rechnerisch untersucht und miteinander

verglichen. Zum Schluss werden anhand der entwickelten Berechnungsmodelle Hinweise für eine mögliche Bemessung erarbeitet. Der Stabilitätsfall Beulen wird in der Dissertation von Oliver Englhardt [3] umfangreich untersucht. Allseitig gelagerte, in Scheibenebene beanspruchte Glaselemente werden numerisch und experimentell analysiert.

Knicken

Im Rahmen der Dissertation von Johannes Liess wird ein Knicknachweis ausgearbeitet, bei dem sowohl Zug- und Druckspannungen, als auch Verformungen berücksichtigt werden. Nach einer ausführlichen Zusammenstellung des Standes der Forschung für das betrachtete Thema (Stabilitätstheorie und Knicksicherheitsnachweise für verschiedene Baustoffe) werden anhand von Versuchsreihen Knickspannungskurven ausgewertet. Es stellt sich heraus, dass nur bei wenig schlanken Querschnitten die Druckspannungen maßgebend sind, ansonsten aber die Elemente auf Zug versagen. Übergrosse Verformungen treten erst nachdem die Grenzwerte der Spannungen erreicht werden, sodass diese für den Knicknachweis nicht ausschlaggebend sind. Der erarbeitete Knicknachweis hat die Form der in den Eurocodes eingeführten Bemessungsverfahren und stellt das Einhalten der maximal aufnehmbaren Druckkraft sicher [12].

Als Nächstes werden die Erkenntnisse und die Bemessungsvorschläge aus der Dissertation von Andreas Luible betreffend Knicken zusammengefasst. Im Rahmen der durchgeführten Knickversuche für Einfachgläser wird festgestellt, dass die Bruchlast bei ESG höher als bei TVG ist (höhere Biegezugfestigkeit), jedoch alle Knicklasten kleiner als die eulersche Knicklast $N_{cr,k}$ sind. Die Lage des Initialbruches stimmt mit dem Bereich, wo die Vorspannung auf der Glasoberfläche minimal ist, überein. Bei den Knickversuchen für VSG kann eine Erhöhung der Knicklast infolge der Verbundwirkung durch die PVB-Folie festgestellt werden. Dieser Einfluss ist aber von Temperatur, Belastungsdauer, Belastungsgeschwindigkeit und Glasgeometrie abhängig. Die Streuung der Glasdicke kann unter Einhaltung des zulässigen Toleranzbereiches eine Verringerung der Knicklast von bis zu 11,7% gegenüber der Nenndicke verursachen. Maßgebend für den Knickwiderstand im baupraktischen Bereich ($L_k < 300$ mm) ist immer die effektive Biegezugfestigkeit von Glas und nicht die Druckfestigkeit [14].

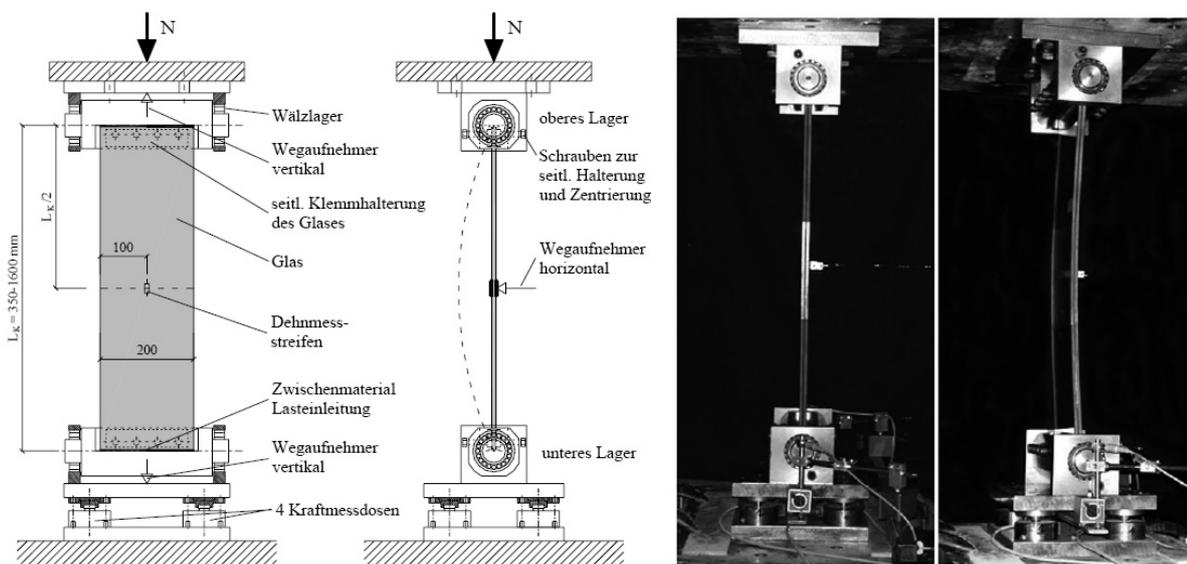


Abb. 4.13 Versuchsstand für die Knickversuche [14]

Für die Bemessung von druckbelasteten Tragelementen aus Glas werden zwei Varianten vorgeschlagen:

- ♦ **Bemessung mit Hilfe von Knickspannungskurven:** im Unterschied zum Stahlbau müssen die Knickspannungsdiagramme im Glasbau abhängig von der geometrischen Schlankheit und von der Materialfestigkeit erstellt werden.
- ♦ **Bemessung mit Hilfe einer Berechnung der Biegezugspannungen nach Theorie II. Ordnung:** bei der Berechnung der Biegezugspannungen sollen die Streuung der Glasdicke und der Vorverformung durch vorgeschlagene charakteristische Werte berücksichtigt werden - $t = 0,976 \times t_{nenn}$ für die Glasdicke und $w_0 = L/400$ für die Vorverformung; im Falle von VSG soll bei einer Berechnung der Biegezugspannungen nach Theorie II. Ordnung ein monolithischer Querschnitt mit einer äquivalenten Dicke t_{eff} angenommen werden.

Kippen

Für diesen Stabilitätsfall werden die Untersuchungen aus der Dissertation von Andreas Luible zusammengefasst. Im Unterschied zum Knicken wird bei den Kippversuchen für Einfachgläser festgestellt, dass der Initialbruch an drei verschiedenen Stellen auftreten kann: an der Glaskante unten an der Fase, auf der Glaskante in Glaskantenmitte oder auf der seitlichen Glasoberfläche in einem bestimmten Abstand zur unteren bzw. zur oberen Glaskante. Bei schmalen Querschnitten und großen Kipplängen kann festgestellt werden, dass die ideale Kipplast $F_{cr,D}$ überschritten wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bedingung formtreuer Querschnitte nicht mehr zutrifft und sich ein membranartiges Tragverhalten einstellt.

Den größten Einfluss auf das Kippverhalten haben folgende Parameter: die Glasdicke, die Vorverformung, die Schubsteifigkeit der PVB-Folie und die effektive Glasfestigkeit. Im Falle von VSG kann die Verbundwirkung durch die Zwischenschicht anhand eines elastischen Modells mit einem äquivalenten elastischen Schubmodul erfasst werden. Auch für den Kippwiderstand ist nicht die Druckfestigkeit, sondern die Biegezugfestigkeit maßgebend. Die Biegezugspannungen weisen in bestimmten Fällen, aufgrund der Schlankheit der Querschnitte, nicht mehr einen über die Trägerhöhe linearen Verlauf, was bei zunehmender Laststeigerung dazu führt, dass sich die maximalen Werte entweder an der unteren oder an der oberen Glaskante befinden [14].

Als Vorschlag für die Bemessung von kippgefährdeten Glasträger wird ein Vorgehen mit Hilfe von Kippspannungskurven wie im Stahlbau erarbeitet. Dabei wird der Kippwiderstand erreicht wenn entweder an der unteren oder an der oberen Glaskante die effektive Biegezugfestigkeit überschritten wird. Es wird vorgeschlagen verschiedene Kippspannungskurven abhängig vom Glasaufbau (Einfachglas, VSG), von der Art der Belastung und von der Vorverformung zu erstellen. Es kann festgestellt werden, dass sich bei kleinen Schlankheiten die Abminderungsfaktoren nicht wie im Stahlbau einem Wert von $\chi_D = 1$ nähern, sondern einem geringeren, so dass ein reiner Biegebruch nicht möglich ist. Es wird außerdem auf weitere erforderliche Untersuchungen von Belastungs- und Lagerungsarten, wie auch von VSG mit mehr als zwei Glasschichten hingewiesen.

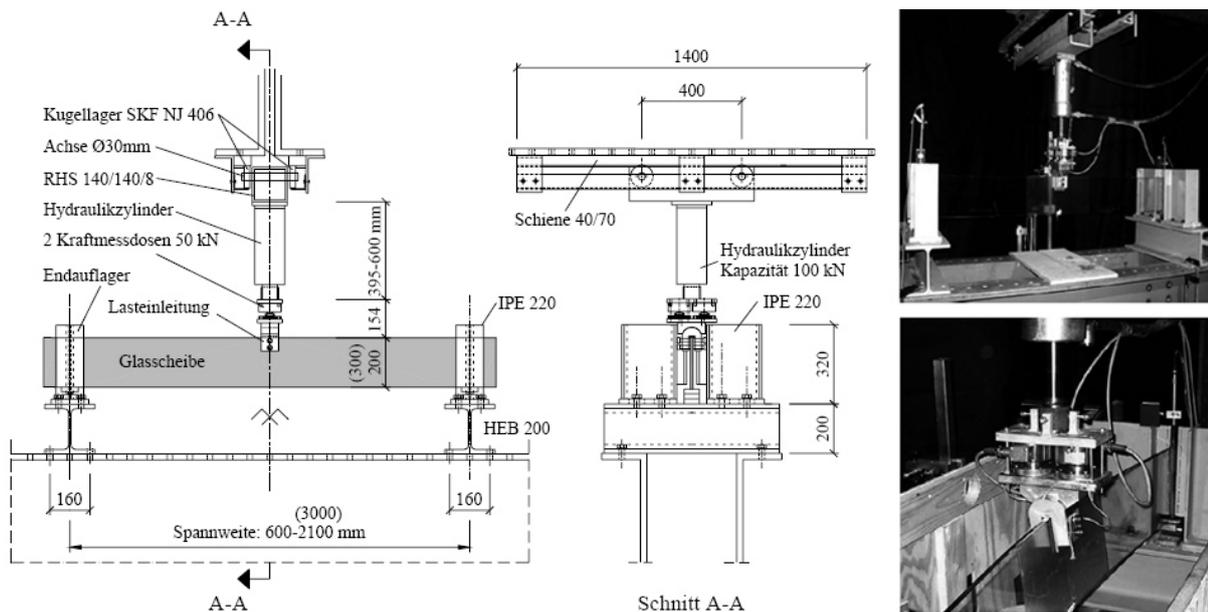


Abb. 4.14 Versuchsstand für die Kippversuche [14]

Beulen

Durch die Beulversuche im Rahmen der Dissertation von Andreas Luible wird festgestellt, dass sich ein überkritisches Tragverhalten ausbildet, so dass die ideale Beulspannung durch die aufgebaute Membrantragwirkung überschritten wird. Die Tragreserve steigt mit der Abnahme der Glasdicke. Der Initialbruch entsteht an der Glasoberfläche im Eckbereich. Bei den Versuchen an Verbundsicherheitsglas wird festgestellt, dass die Verbundwirkung durch die PVB-Folie einerseits den Beulwiderstand erhöht, andererseits aber nimmt die Membrantragwirkung aufgrund der höheren Plattensteifigkeit ab. Da aber die Zwischenschicht aus PVB keine sehr hohe Schubsteifigkeit hat, fällt die Laststeigerung nur gering aus. Einen Einfluss auf das Beulverhalten haben folgende Parameter: die Glasdicke, die Art und Größe der Vorverformung, die Schubsteifigkeit der PVB-Folie und die effektive Glasfestigkeit. Auch beim Beulen, wie auch bei den anderen zwei Stabilitätsfällen, ist für den baupraktischen Anwendungsbereich nicht die Druckfestigkeit, sondern die effektive Biegezugfestigkeit maßgebend. Bei Erhöhung der Belastung von $N = 1,4$ bis $1,7 \times N_{cr,P}$ verlagert sich der Ort der maximalen Hauptzugspannungen von der Plattenmitte zu den Eckbereichen [14].

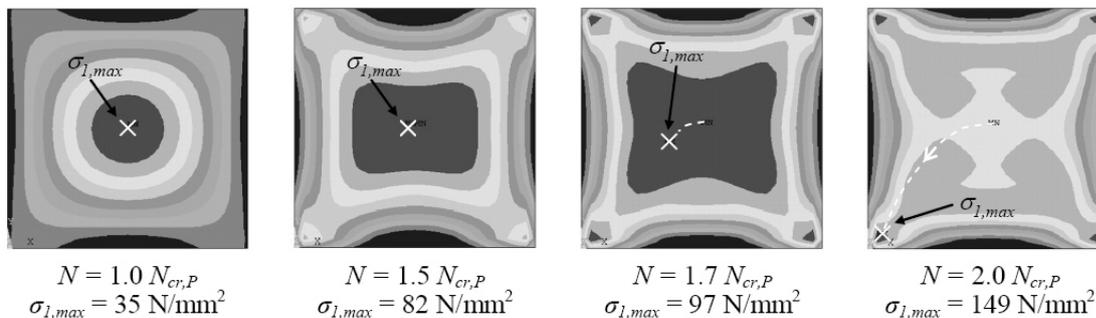


Abb. 4.15 Verteilung der Hauptzugspannungen auf der Glasoberfläche abhängig von der Höhe der Belastung [14]

Für die Bemessung von beulgefährdeten Tragelementen aus Glas werden in [14] zwei Varianten vorgeschlagen:

- ♦ mit Hilfe eines numerischen Modells werden die Hauptzugspannungen ermittelt und anschließend wird ein Spannungsnachweis durchgeführt
- ♦ Bemessung mit Hilfe von Beulkurven, bezogen auf die effektive Biegezugfestigkeit

Ausführliche Untersuchungen zum Tragverhalten und zur Stabilität von Flächentragwerken aus Glas wurden in der Dissertation von Oliver Englhardt [3] durchgeführt. Für allseitig gelagerte, in Scheibenebene beanspruchte Glaselemente, stellt sich nach Überschreiten der ideellen Beullast ein Nachbeulverhalten ein. Bei einaxialer Belastung kann ein Ausbeulen in Form eines ‚Kissens‘ festgestellt werden, die Hauptzugspannungen verlagern sich zu den Scheibenecken und die Druckspannungen, nach Überschreiten der ideellen Beullast, zu den stieferen Längsrändern.

Folgende Systeme werden im Rahmen der Arbeit untersucht:

- ♦ Lasteinleitung über die gesamte Kantenlänge ohne Zwischenschicht - kann in der Praxis nicht ausgeführt werden, ermöglicht aber einen Vergleich mit analytischen und numerischen Modellen
- ♦ Lasteinleitung über eine Zwischenschicht (Klotzung) über die gesamte Kantenlänge - das Tragverhalten im überkritischen Bereich ist aufgrund der Zwischenschicht weicher
- ♦ Lasteinleitung über Klotzungen an den Scheibenecken - die Druckkräfte werden schon am Beginn der Beanspruchung an den Längsrändern geführt; die ideelle Beullast nimmt einen höheren Wert als bei einer Lasteinleitung über die gesamte Kantenlänge.
- ♦ Lastabtragung über die Diagonale - kommt bei einer Anwendung in der Praxis vor, zum Beispiel Glas-Stahl-Träger.

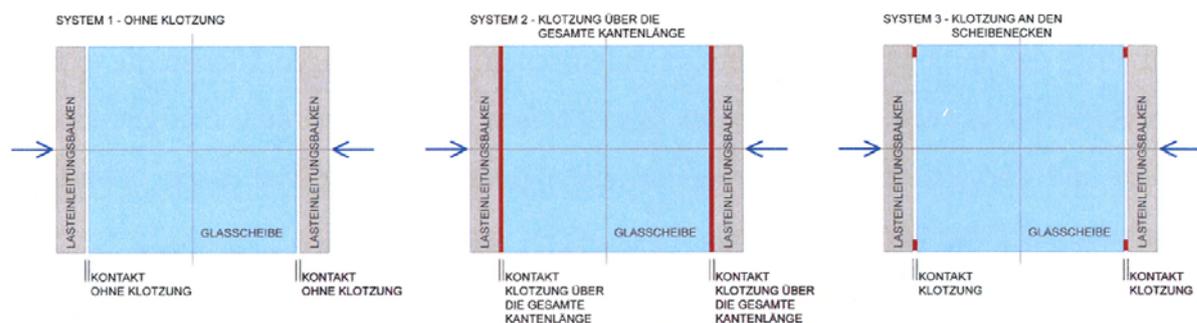


Abb. 4.16 Systeme der in [3] durchgeführten Beulversuche

Für diese Systeme wurden im Rahmen der Dissertation die zur Bestimmung der ideellen Beullast erforderlichen Beulwerte und Beulkurven zur Bestimmung der Traglast ausgearbeitet.

Da der Stabilitätsfall Beulen bei den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Glasschwerter keine Rolle spielt wird auf dieses Thema nicht weiter eingegangen. Trotzdem ist die Dissertation von Herrn Englhardt eine wichtige Literaturquelle betreffend Lasteinleitung an der Scheibenkante.

4.3.3 Entwurf und Analyse eines 18 m langen Glasschwertes

Bei der Challenging Glass Konferenz an der Technischen Universität Delft ist von John Kooymans, Jens Schneider und Holger Tegen ein Konzept für die Erstellung von 18 m hohen konstruktiven Glasschwertern vorgestellt worden. Die Schwerter bestehen aus je drei Glasteilen und haben eine Breite von 50 cm. Am oberen und am unteren Ende des gesamten Schwertes sind diese mit Kragarmverbindungen befestigt. Das Ziel ist, dass der obere und der untere Teil so stabil sind, dass der mittlere Teil von diesen bei minimalen Materialaufwand für Verbindungen getragen werden kann. Der mittlere Teil wird an dem oberen abgehängt und mit dem unteren Teil durch eine Verbindung, die vertikale Verschiebungen aufnehmen kann, befestigt. Der obere Teil wird durch eine SL-Verbindung mit einem Bolzen befestigt. Horizontal wird das Glasschwert nur von der senkrecht darauf liegenden Fassade gestützt [9].

Ein Übersichtsmodell mit Schalenelemente wird mit dem FE-Programm RFEM erstellt. Der obere und der untere Teil sind als 4-schichtiges VSG aus 15 mm dicken vorgespannten Glas (ESG) mit PVB Zwischenfolien und der mittlere Teil aus 3-schichtigem VSG aus 8 mm dicken vorgespannten Glas (ESG) modelliert. Es werden maximale Verformungen von 23 mm bei Windlast und von 33 mm bei Überlagerung mit einer Imperfektion aus der Ebene erhalten, Werte welche die Grenzwerte für ein 18 m langes Element erfüllen.

Die maximalen Spannungen ergeben sich an den oberen und unteren Auflagerpunkten. Die Werte sind insofern nicht relevant, da diese sich auf einen Knoten beziehen. In Wirklichkeit ist die Einflussfläche 100 mm lang und die Spannungen werden durch einen zwischen Glas und Stahlschuh verwendeten Mörtel stark reduziert.

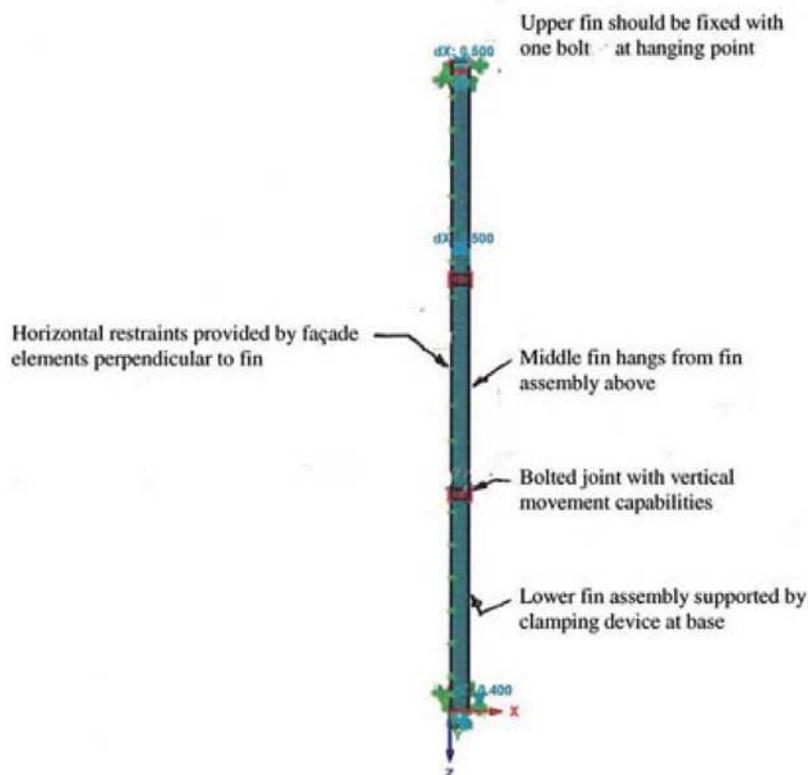


Abb. 4.17 Übersicht des FE-Modells [9]

Um das FE-Modell zu überprüfen sind Versuche durchgeführt worden. Diese sind aber nicht an Versuchskörper in voller Größe oder an verkleinerten Versuchskörper erfolgt, sondern an 3 m langen Kragträger mit erhöhter Belastung um das gleiche Biegemoment an der Einspannstelle zu erhalten. Die Gründe dafür sind der kleinere Versuchsaufbau und die geringeren Materialkosten gewesen.

Dieses vereinfachte Modell wird mit MEPLA mit Schalenelementen, die große Verformungen ermöglichen, modelliert. Um die Steifigkeit der Lagerpunkte (Mörtel Hilti HIT HY-70 zwischen Glas und Stahl) zu modellieren werden Federn eingefügt. Es werden abhängig von der Steifigkeit des Mörtels Hauptzugspannungen von 35 N/mm^2 bis 45 N/mm^2 und Hauptdruckspannungen von 70 N/mm^2 bis 90 N/mm^2 erhalten [9].



Abb. 4.18 Unten: Verteilung der Hauptzugspannungen [9]



Abb. 4.19 Versuchsaufbau [9]

Zum Zeitpunkt der Konferenz waren noch nicht alle Versuche abgeschlossen. Es wurde festgestellt, dass die Kragarmstruktur die erforderliche Festigkeit hat und dass der VSG-Aufbau die erforderliche Redundanz bei Bruch von einer oder Zwei Scheiben erfüllt. Die Steifigkeit der Einspannstelle ist aber geringer als der angenommene Wert und die Verformungen der Versuchskörper größer als erwartet. Daher sind weitere Untersuchungen und eine Anpassung der Modellierung des Mörtels erforderlich.

5

Ausgeführte Beispiele

Willis Faber & Dumas Bürohaus
Sainsbury Center for Visual Arts
Glaspavillon Aachen
Museum für Stadtgeschichte, Luxemburg
ADNEC Capital Gate - Main Entrance Canopy

Im Rahmen dieses Kapitels werden einige Bauobjekte kurz vorgestellt, in deren Konstruktion tragende Elemente aus Glas in der Form von Glasschwertern vorkommen.

5.1 Willis Faber & Dumas Bürohaus

Standort: *Ipswich, Großbritannien*
Architekten: *Norman Foster Associates*
Ingenieur: *Anthony Hunt Associates*
Jahr: *1975*

Bei diesem Bauwerk handelt es sich um ein viergeschossiges Objekt, mit offenen Büroräumen, einer zur Stadt gerichteten Glasfassade, ein zentrales Atrium und einen Dachgarten. Das Bürohaus weist eine der Nachbarbebauung angepasste Höhe und ein Stützenraster von 14 x 14 m.



Abb. 5.1 Gesamtansicht aus der Luft [44]

Die 320 m lange Fassade, als hängende Verglasung mit aussteifenden Glasschwertern ausgeführt, stellt als Tragwerk eine Premiere in dieser Größe dar. Die halbgeshoßhohen, abgehängten Glasschwerter nehmen durch die Verbindung mit den Fassadenscheiben nur horizontale Lasten (z.B. Wind) auf. Die vertikale Verformung wird nicht behindert. Im Jahr 1987 wurde während einem Orkan eine Fassadendurchbiegung von 10 cm festgestellt [7], [30].

Die Fassade besteht über die Höhe von drei Geschoßen aus jeweils sechs Glasscheiben, die an einem mittig in die Betonattika verankerten Bolzen hängen. Die Scheiben sind untereinander durch Patch Fittings (verschraubte Stahlplatten) verbunden (siehe Abb. 5.2 rechts).

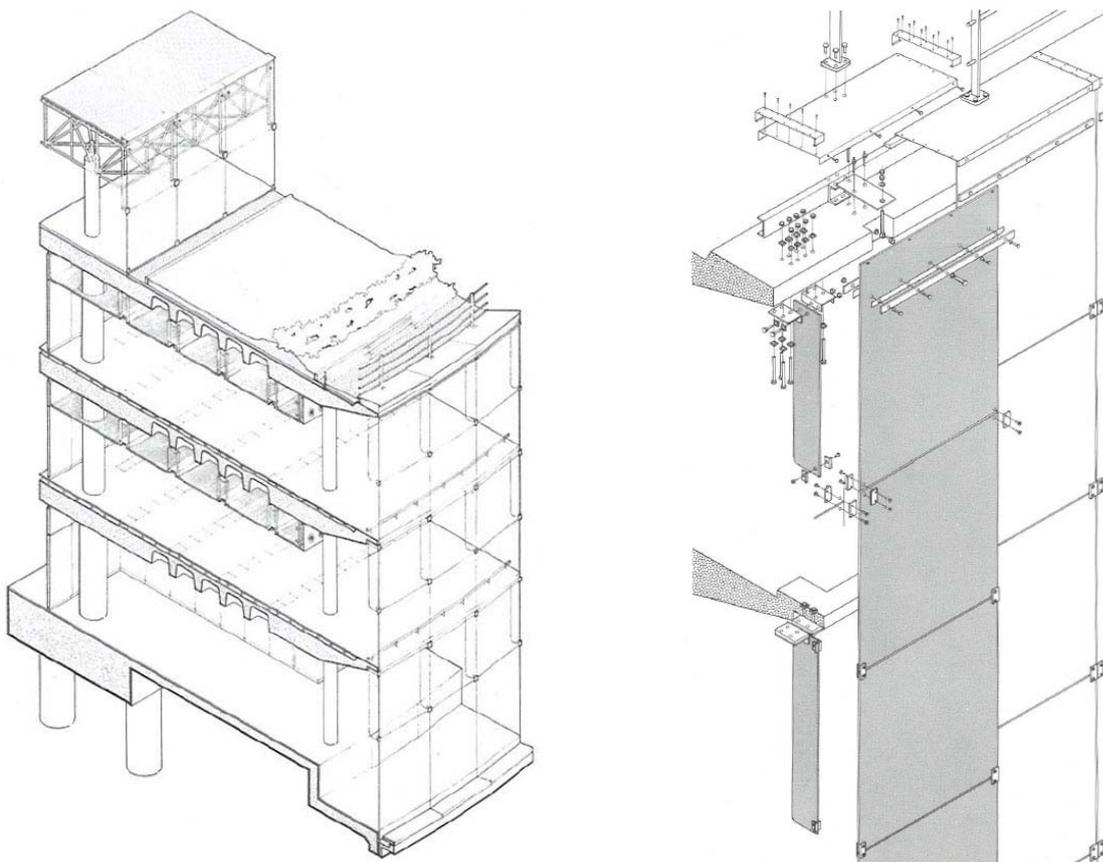


Abb. 5.2 Links: Isometrie des Gebäudes; Rechts: Isometrie der Glaswand [30]

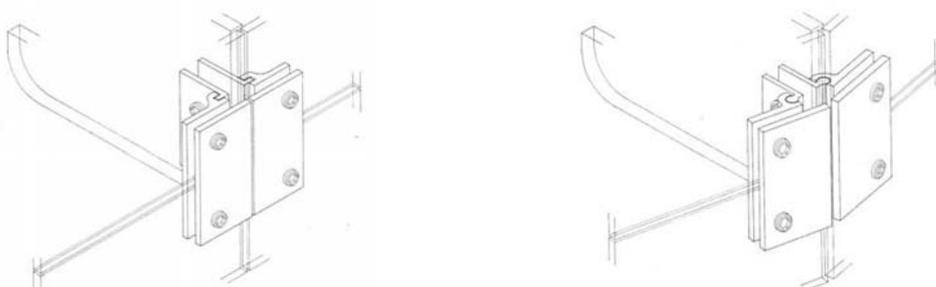


Abb. 5.3 Nutverbindungen für ebene (li.) und geschwungene (re.) Fassadenflächen [30]

Die Fassadenscheiben weisen eine Größe von 2,00 x 2,50 m und sind als 12 mm ESG ausgeführt. Um die Jahrtausendwende sind die Scheiben mit einer Folie versehen worden, um die Resttragfähigkeit zu erhöhen, sowie das Herausfallen von Splittern zu verhindern [7], [30].



Abb. 5.4 Innenansichten mit den Glasschwertern [30]



Abb. 5.5 Aussenansicht [45]

5.2 Sainsbury Center for Visual Arts

Standort: *Norwich, Großbritannien*
Architekten: *Norman Foster Associates*
Ingenieur: *Anthony Hunt Associates*
Jahr: *1978*

Das Bauwerk besteht aus einer Halle mit den Abmessungen von 150 x 35 m und wird von einer etwa 2,4 m breiten Hülle umschlossen. In dieser werden das Tragwerk, die Installationsleitungen und verschiedene Nebenräume untergebracht. Das Tragwerk wird durch Dreieckstrahler (Stützen und Träger) gebildet, die eine Höhe von 2,4 m haben und einen stützenfreien Hallenraum ermöglichen. Stirnseitig wird die Konstruktion durch raumhohe Verglasungen geschlossen.

Das Haupttragwerk der Halle bilden die fachwerkartigen Dreiecksträger und -stützen. Die stirnseitigen Ganzglasfassaden sind als stehende Verglasungen ausgeführt und werden durch hängende Glasschwerter gegen Windlasten ausgesteift. Am oberen Ende erfolgt der Anschluss der Glasscheiben an den Fachwerkträger elastisch, so dass nur horizontale Lasten übertragen werden.

Die stirnseitigen Verglasungsscheiben haben Abmessungen von 2,40 x 7,50 m und bestehen aus 15 mm ESG. Die Glasschwerter weisen eine Breite von 0,60 m und sind als 25 mm ESG ausgeführt. Die Glasschwerter werden an die stehende Verglasung durch eine Klebeverbindung angeschlossen, welche auch die Fugen zwischen den Scheiben schließt.

Ingenieurtechnisch bemerkenswert bei dieser Konstruktion ist die Höhe der stehenden Verglasung und der Glasschwerter von 7,5 m [7].

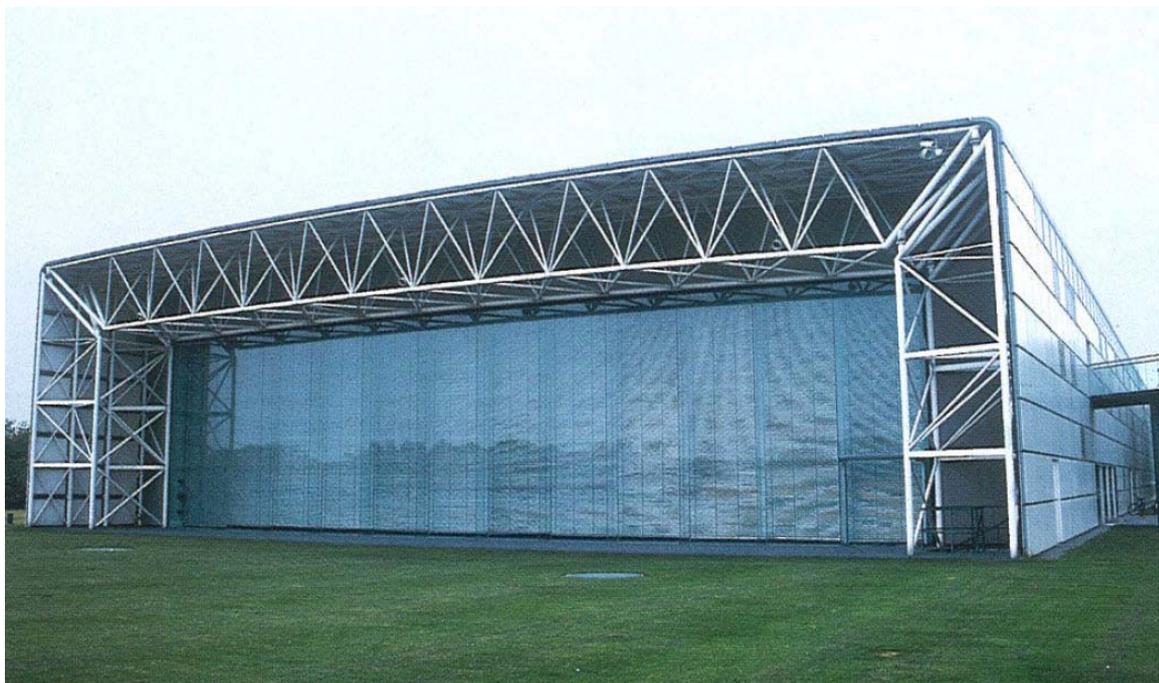


Abb. 5.6 Ansicht Süd-Ost [7]



Abb. 5.7 Innenansicht [7]

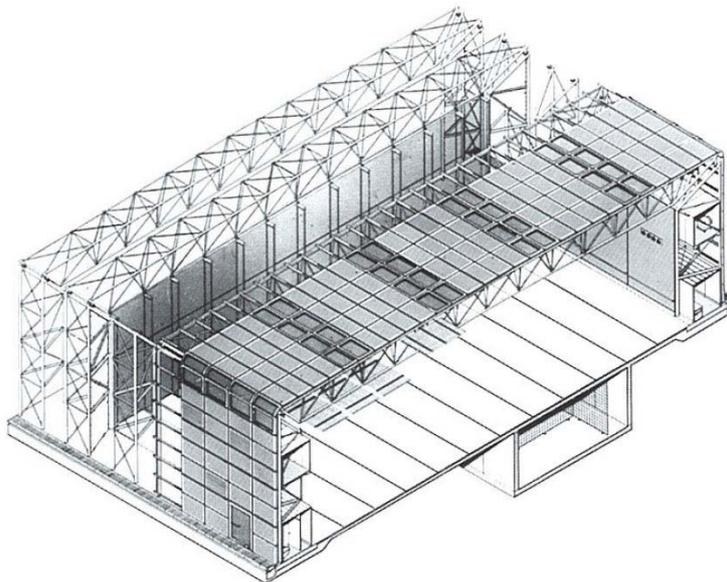


Abb. 5.8 Links: Isometrie des Systems; Rechts: Fassade mit Dreigurtfachwerkträger und Glasschwerter [7]

5.3 Glaspavillon Aachen

Standort: *Aachen - Templergraben, Deutschland*
Architekten: *Lehrstuhl für Baukonstruktion (Tragwerkslehre), RWTH Aachen*
Ingenieur: *Lehrstuhl für Baukonstruktion (Tragwerkslehre), RWTH Aachen*
Jahr: *1995*

Diese Konstruktion wurde als temporäres Bauwerk für die 125-Jahr-Feier der RWTH Aachen gebaut. Es besteht aus vorgefertigten Elementen aus Glas, die mit Stahlverbindungsmitel zusammengefügt sind. Um eine einfache Demontierbarkeit zu erreichen wurde auf Klebeverbindungen verzichtet. Die Abmessungen betragen 6,25 m Länge, 2,50 m Breite und 2,50 m Höhe.

Das Tragwerk besteht aus Glasstützen, die zwischen je zwei U-Profilen eingespannt sind und Glasträger, die auf die Stützen als Zangenkonstruktion liegen. Die Raumschließung erfolgt über auf die Träger liegende Dachscheiben und auf den U-Profilen liegenden Wandscheiben, die auch die Längsaussteifung übernehmen. Die fixierenden Verbindungsmittel bestehen aus Stahlwinkeln mit Langlochbohrungen, die durch 10-mm-Bolzen in Senkbohrungen mit den Scheiben verbunden sind. Die Glasstützen werden mit 20-mm-Bolzen zwischen je zwei U-Profilen eingespannt und leiten die Vertikallasten über Flachstahlaufleger an den Profilen weiter. Das Gelenk der zwei Eingangsschwingtüren wurde durch eine Silikonfuge ausgebildet.

Die Stützen wurden aus VSG aus 3 x 12 mm ESG und die Träger aus VSG aus 2 x 6 mm TVG hergestellt. Die Dach- und die Wandelemente haben Abmessungen von 1,25 x 2,50 m und wurden aus ESG hergestellt. Bei einer Ausführung, die den Aufenthalt von Menschen vorsieht, müssten die Dachscheiben wegen der Resttragfähigkeit aus VSG bestehen. Um die Bildung von Spannungsspitzen bei Glas-Glas-Kontakt zu vermeiden wurden 3 mm dicke Einlagen aus transparentem PVC verwendet [7].



Abb. 5.9 Gesamtansicht [7]

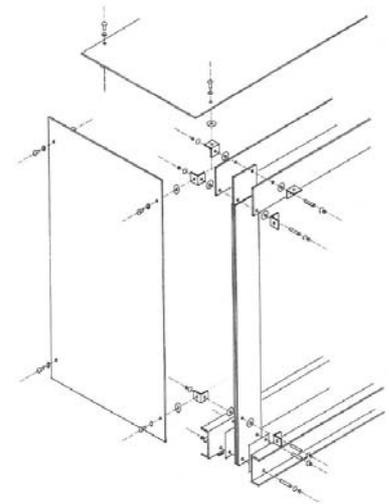


Abb. 5.10 Links: Gesamtansicht; Rechts: Isometrie des Tragwerkes [7]

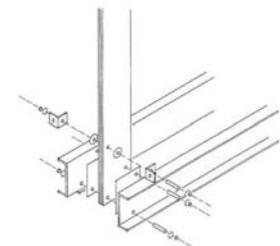
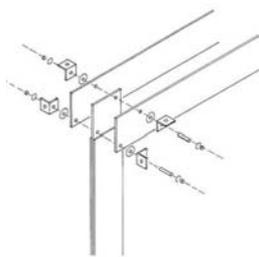


Abb. 5.11 Detailpunkte - Links: Kopfpunkt; Rechts: Fußpunkt [7]

5.4 Museum für Stadtgeschichte, Luxemburg

Standort: *Luxemburg*
Architekten: *Conny Lentz und Reperages Architekten*
Ingenieur: *Gehl, Jacoby & Associates*
Jahr: *1996*

Bei der hier betrachteten Konstruktion handelt es sich um die Schliessung eines U-förmigen Hofes durch eine Glasfassade. Dieser Hof dient als zweiter Eingang des Museums für Stadtgeschichte in Luxemburg. Die Fassade hat eine Höhe von 12 m und eine Breite von 14 m.

Das geschlossene Dach des Innenhofes liegt auf einer Stahlstruktur aus I-Profilen. An dieser sind dreiteilige Glasschwerter, die einerseits zur Stabilisierung der Fassade gegen Wind und andererseits zur Einleitung der Lasten in die Dachkonstruktion herangezogen werden, befestigt. Die Glaswand besteht in horizontaler Richtung aus elf Feldern und in vertikaler Richtung aus je drei Glastafeln, die über Punktbohrungen an den Glasschwertern befestigt sind.

Die Glastafeln werden mit Senkkopfschrauben über Winkel in je 6 Punkten pro Scheibe an die Glasschwerter befestigt. Die Verbindungen der Glasschwertteile untereinander sowie der Anschluss an die Dachträger erfolgt über verschraubte Edelstahlplatten. An den Fußpunkten werden die Glasschwerter mit L-Winkel gehalten. Die Fassadenscheiben sind aus 12 mm ESG und die Glasschwerter mit einer Teillänge von 3,76 m und einer Breite von etwa 75 cm aus 19 mm ESG hergestellt [7], [10].



Abb. 5.12 Aussenansicht des Museums für Stadtgeschichte in Luxemburg
[10]



Abb. 5.13 Links: Blick von aussen durch die Glaswand [7]; Detailansicht der Verbindung der Glasschwerter untereinander [10]

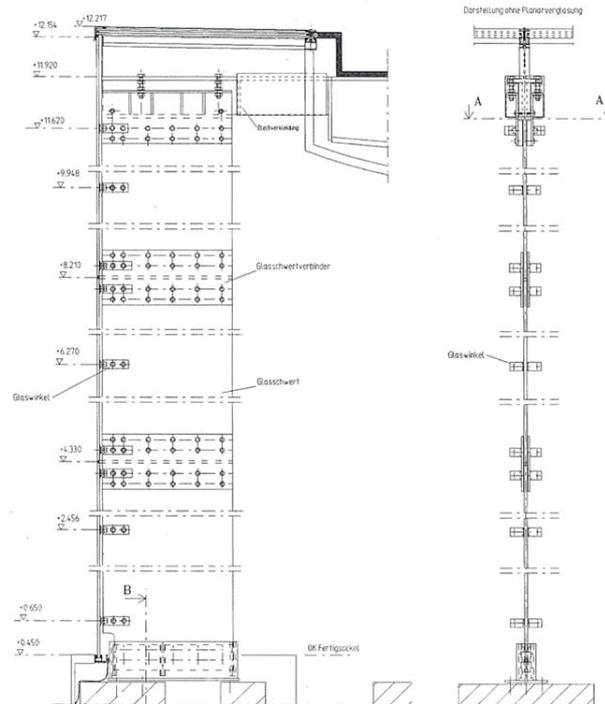


Abb. 5.14 Detailschnitt / -ansicht der Glasschwerter [7]

5.5 ADNEC Capital Gate - Main Entrance Canopy

Standort: *Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate (VAE)*
Architekten: *RMJM, Dubai*
Ingenieur: *Waagner-Biro AG - Stahl-Glas-Konstruktion*
Jahr: *2009*

In den letzten Jahren wurden im Mittleren Osten mehrere außergewöhnliche Projekte realisiert, die sich außer dem eindrucksvollen Design auch durch eine extrem schnelle Ausführung auszeichnen. Auch das international tätige Unternehmen Waagner-Biro Stahlbau AG, Mitbetreuer dieser Diplomarbeit, war an einige dieser Projekte, als ausführender Subcontractor für die Stahl- und Glasbauarbeiten an der Fassade, beteiligt. Eines dieser Projekte ist das 160 Meter hohe Hochhaus beim Messezentrum in Abu Dhabi - ADNEC / Capital Gate - welches durch seine Form den Rekord für das schiefste Gebäude der Welt hält.

Das Tragwerk besteht aus einem vertikalen Stahlbetonkern (um den 34 Geschoße, die von unten nach oben verlaufend die Auskragungsseite wechseln, angeordnet sind), Verbunddecken und einer Stahlkonstruktion, die entlang der Deckenränder und der Hauptlinien der freiformflächigen Fassade verläuft. Die komplett verglaste Fassade ist auf eine vorgelagerte Sekundärkonstruktion befestigt. Um die Vorgabe aus der funktionalen Ausschreibung, ein Geschoß pro Woche fertigzustellen zu erfüllen, hat Waagner-Biro eine Variante mit hohem Vorfertigungsgrad angeboten. Rautenförmige, sich über zwei Geschoße erstreckende Elemente wurden eingehoben und an die Stahlkonstruktion statisch bestimmt gelagert. Aufgrund der Geometrie ergeben sich insgesamt 734 solche Elemente, die alle verschieden sind und aus je 18 dreiecksförmigen Glasscheiben bestehen.



Abb. 5.15 ADNEC Capital Gate - Gesamtansicht [21]

Dieses Bauwerk zeichnet sich außer der architektonischen Kreativität durch den hohen Vorfertigungsgrad aus. Anstatt, dass Stahlleitern auf der Baustelle zusammenschweißt und verglast wurden, sind fertige verglaste Elemente geliefert und lediglich eingehoben worden [21].

Die Glasschwerter, welche Thema dieser Diplomarbeit sind, wurden bei dem Haupteingang (main canopy, siehe Abb. 5.16 links) dieses Hochhauses eingebaut. Dabei wurden zwei Systeme angewendet. Beim ersten werden die Schwerter mit zwei Bolzen befestigt und tragen alle angreifenden Lasten als Lochleibungsverbinding ab. Bei dem zweiten System wird das Eigengewicht hauptsächlich durch einen Bolzen auf Lochleibung abgetragen, während horizontale Lasten wie zum Beispiel Wind über Druckspannungen in einem zwischen Balkenschuh und Glas injiziertem Mörtel aufgenommen werden (siehe Abb. 5.17 rechts). Dieses zweite System wird in weiterer Folge im Rahmen dieser Arbeit untersucht.



Abb. 5.16 Links: Gesamtansicht der Main Canopy; Rechts: Glasschwerter im Bauzustand

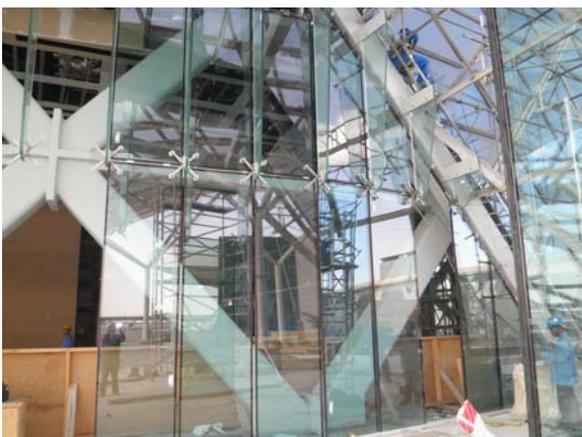


Abb. 5.17 Links: Glasschwerter im Bauzustand; Rechts: Injizieren des Mörtels zwischen Glasschwerter und Stahlschuh

6

Rechteckiges Glasschwert - Analyse

**Allgemeines
Mörtel als Zwischenschicht
Klotzungen als Zwischenschicht
Überlegungen zum Bohrloch**

6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird als Erstes das Glasschwert, von dem die Untersuchungen ausgehen vorgestellt und analysiert. Anschließend werden Verbesserungsmaßnahmen und Alternativen vorgeschlagen und untersucht. Diese Maßnahmen sehen eine Beibehaltung der ursprünglichen Geometrie des Schwertes vor. Es werden nur Menge/Größe und die Art der Zwischenmaterialien anhand von Parameterstudien untersucht. Die Bezeichnung „rechteckiges Glasschwert“ bezieht sich auf die Geometrie des Glasschwertes im Einspannbereich, nicht auf die Gesamtgeometrie.

In der Abb. 6.1 wird der Glasschwerttyp von der Main Canopy des Capital Gate (siehe Kapitel 5.5) gezeigt, von dem ausgegangen wird. Es handelt sich dabei um ein 3,825 m langes Glasschwert aus VSG (3 x 10 mm ESG), welches hängend eingebaut ist. Am oberen Ende ist es mittels einer Verbindung mit Stahlschuh eingespannt. Folgende Lasten wirken planmäßig auf das Glasschwert:

- ◆ das Eigengewicht des Glasschwertes
- ◆ ein Teil des Eigengewichtes der Fassade, entsprechend der Einflussfläche
- ◆ Windlast

Die letzten beiden Lasten werden in den zwei unteren Bohrlöchern durch ein Spider-element (siehe Abb. 6.2) von der Fassade in das Glasschwert eingeleitet. Die vertikal wirkenden Eigengewichte des Glasschwertes und der Fassade werden durch eine M30 Schraube der Festigkeit 10.9 auf den Stahlschuh übertragen. Dabei wird diese auf Scher-Lochleibung beansprucht. Die horizontalen Einwirkungen (Wind und Momentenanteil des Fassadengewichtes) werden über eine Mörtelzwischenschicht aus Hilti HIT-HY 70 von den Glasschwertkanten im Einspannbereich auf den Stahlschuh übertragen. Dieser ist seinerseits durch zwei Schrauben (M20 10.9) an einem Anschlußträger befestigt. Es ist zu erwähnen, dass bei dem eingebauten Element der Mörtel nicht nur im Kantenbereich, sondern vollflächig zwischen Glasschwert und Stahlschuh injiziert ist.

Das Bohrloch zur Übertragung der vertikalen Einwirkungen vom Glasschwert auf den Stahlschuh ist folgendermaßen ausgebildet: damit die Schraube nicht mit der Glaskante in Kontakt kommt und somit zu hohen Spannungsspitzen führt, wird diese zuerst durch eine Aluminiumhülse durchgeführt, die ihrerseits durch eine Zwischenschicht aus Hilti HIT-HY 70 von der Bohrlochwand getrennt wird. Diese weicheren Materialien führen im Bohrlochbereich zu geringeren Hauptzugspannungen im Glas.

Obwohl das Bohrloch nicht direkt Thema dieser Arbeit ist, wird im Kapitel 6.4 noch einmal darauf eingegangen.

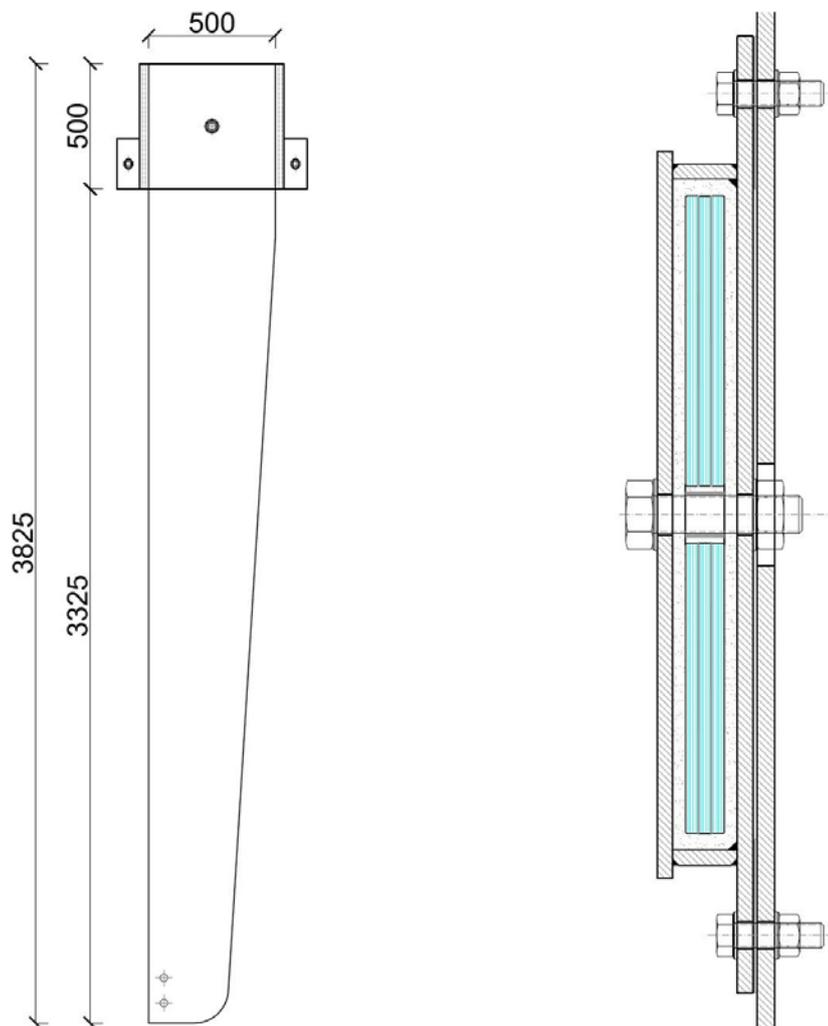


Abb. 6.1 Glasschwert von dem bei den Untersuchungen ausgegangen wird
Links: Ansicht; Rechts: Schnitt durch den Stahlschuh

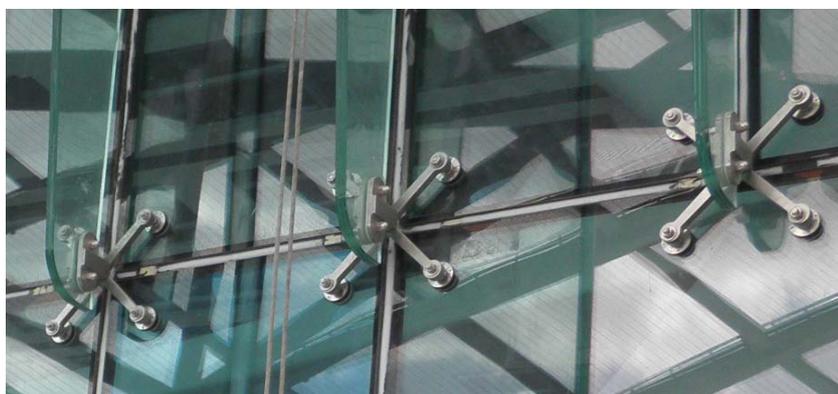


Abb. 6.2 Spider-elemente zur Einleitung der Lasten von der Fassade auf die Glasschwerter

6.2 Mörtel als Zwischenschicht

Der als Zwischenschicht verwendete Mörtel Hilti HIT-HY 70 geht keine Verbindung mit dem Glas ein und kann Kräfte nur auf Druck übertragen (bei einer Zugbelastung fällt er aus). Somit werden die Lasten aus den horizontalen Einwirkungen nur an den Glaskanten auf Druck über den Mörtel auf den Stahlschuh übertragen. Der erste Verbesserungsvorschlag ist eine Abkapselung des Mörtels nur in den Kantenbereichen. Diese kann durch Dichtbänder, die zwischen Glas und Stahlschuh geklebt werden, erfolgen und bewirkt als Vorteil eine Materialeinsparung. Diese Maßnahme wird in der Abb. 6.3 im Schnitt dargestellt.

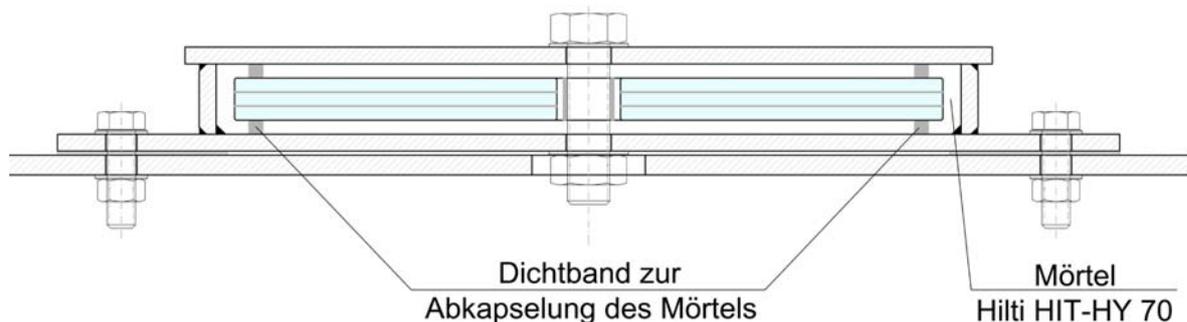


Abb. 6.3 Variante mit im Kantenbereich abgekapselter Mörtel

Da die maximal aufnehmbare Druckfestigkeit des Mörtels 65 N/mm^2 (Hilti Datenblatt) beträgt, ist eine Abkapselung des Mörtels in vertikaler Richtung (entsprechend der Verwendung von Klotzungen) nicht möglich.

6.2.1 Numerisches Modell

Zur numerischen Modellierung wird die Software SOFISTIK verwendet. Das Glasschwert wird als Einscheibensicherheitsglas (ESG) mit einer Dicke von 30 mm als Schalenelemente (QUADs) eingegeben. Die Verbundwirkung der 3 Scheiben durch die PVB-Folie spielt bei den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Untersuchungen keine Rolle, da die Beanspruchung nur in Scheibenebene erfolgt. Der Mörtel wird als auf Zug ausfallende Federn modelliert. In vertikaler Richtung erfolgt die Lagerung im Bohrloch durch eine steife Feder (Federkonstante 1000000 kN/m). Die Aluminiumhülse und die Mörtelzwischenschicht im Bohrloch werden nicht modelliert, da nicht die Spannungen in diesem Bereich das Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind.

Das Eigengewicht des Glasschwertes wird vom Programm automatisch berücksichtigt. Das Eigengewicht der Fassade wird konstant mit 5 kN angenommen und als 2,5 kN je Bohrloch angesetzt. Aus der Exzentrizität der Fassade zur Achse, in der sich die unteren Bohrlöcher befinden, ergibt sich ein zusätzliches Moment. Dieses wird in den Bohröchern als Kräftepaar angebracht. Die Windlast wird ebenfalls in den Bohröchern angesetzt und bei den durchgeführten Untersuchungen von 0 kN bis 60 kN gesteigert. Die einwirkenden Lasten sind in der Abb. 6.4 ersichtlich.

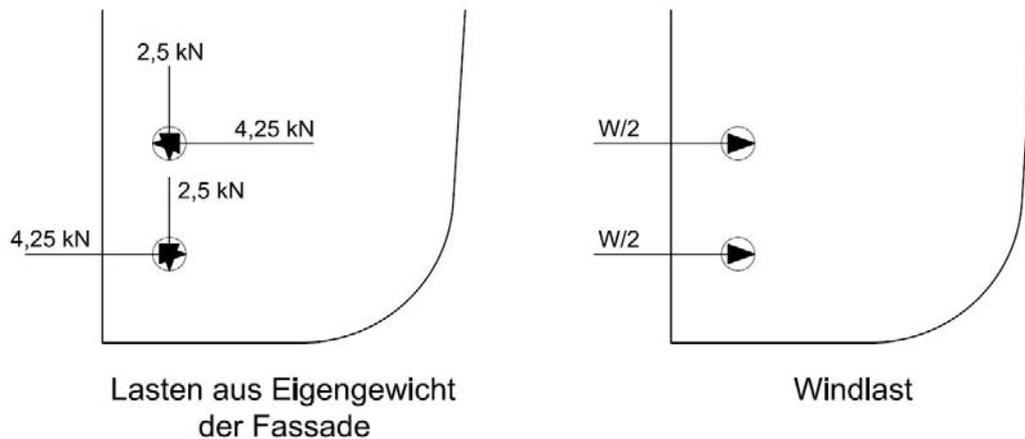


Abb. 6.4 Einwirkende Lasten

Die Abmessungen des Glasschwertes sind in der Abb. 6.1 ersichtlich. Für die Netzfeinheit wird im oberen Bereich der Einspannung ein dichteres Netz, ansonsten ein gröberes Netz ausgewählt. Die Netzfeinheit ist durch eine Konvergenzanalyse optimiert worden.

Die Federsteifigkeit der Federn zur Modellierung des Mörtels werden nach folgender Formel berechnet:

$$C_P = \frac{E \times A}{l} = \frac{3245 \times 150}{10} = 48675 \text{ N/mm}$$

mit:	C_P	Federsteifigkeit
	E	Elastizitätsmodul des Mörtels Hilti HIT-HY 70
		$E = 3245 \text{ N/mm}^2$ mit Querdehnungsbehinderung
	A	Einflussfläche einer Feder
		$A = \text{Glasdicke} \times \text{Einflusslänge} = 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} = 150 \text{ mm}^2$
	l	Dicke der Mörtelschicht - l = 10 mm

In Abb. 6.5 sind die Auflagerkräfte in den Federn bei einer Windlast von 20 kN dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in dem Bereich wo Zugkräfte auftreten würden, die Federn ausfallen. Mit den Kräften kann man durch Dividieren durch die jeweilige Einflussfläche die Druckspannung im Mörtel berechnen. Nimmt man dafür die maximale Auflagerkraft, wird die Druckfestigkeit des Mörtels bei einer Windlast von ca. 16 kN erreicht. Es ist aber zu erwarten, dass im Mörtel eine Umlagerung der Spannungen passiert.

In der Abb. 6.6 werden die Hauptspannungen im Einspannbereich des Glasschwertes bei einer Windlast von 20 kN dargestellt. Laut Farbskala sind die Hauptzugspannungen desto höher, je dunkler der Rotton ist. Man kann feststellen, dass die höchsten Hauptzugspannungen im Bereich des Bohrloches und unter dem Einspannbereich auftreten. Auf die Hintergründe für die hohen Hauptzugspannungen im Bereich des Bohrloches wird im Kapitel 6.4 eingegangen. Da sich aufgrund der Vorspannung der Glasscheiben an den Kanten und Ecken geringere Festigkeiten als in der Fläche der Glasscheibe bilden, sollten die Hauptzugspannungen in diesen Bereichen gering gehalten werden.

Daher ist es zu empfehlen nicht bis zum oberen Rand den Raum zwischen Glaskante und Stahlschuh mit Mörtel zu verfüllen, sondern einen Abstand von ca. 2 cm von diesem freizulassen. Somit können Spannungsspitzen im Bereich der Ecken vermieden werden.

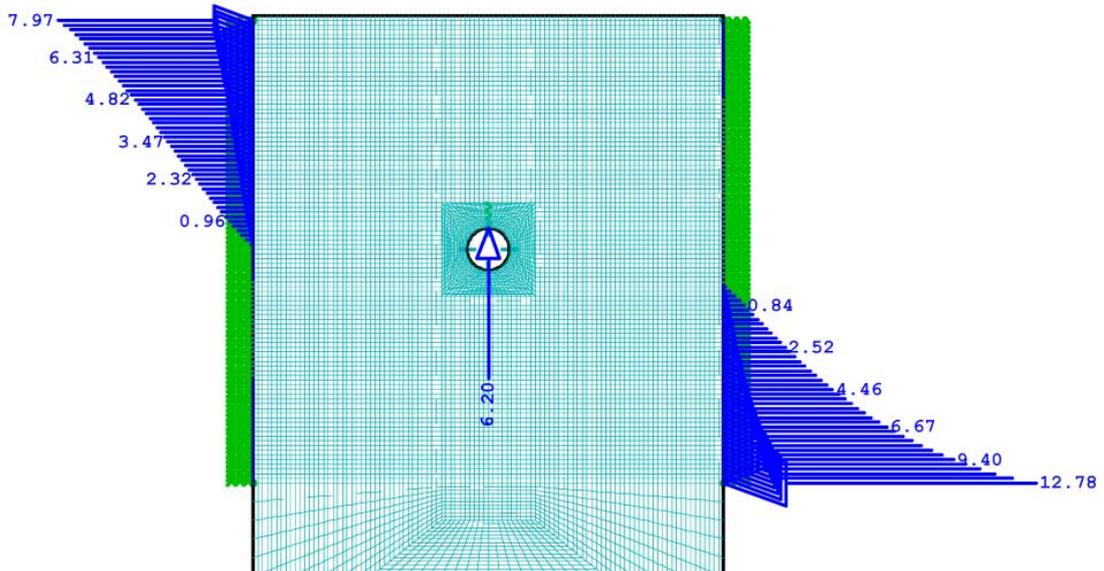


Abb. 6.5 Auflagerkräfte [kN] in den Druckfedern bei einer Windlast von 20 kN

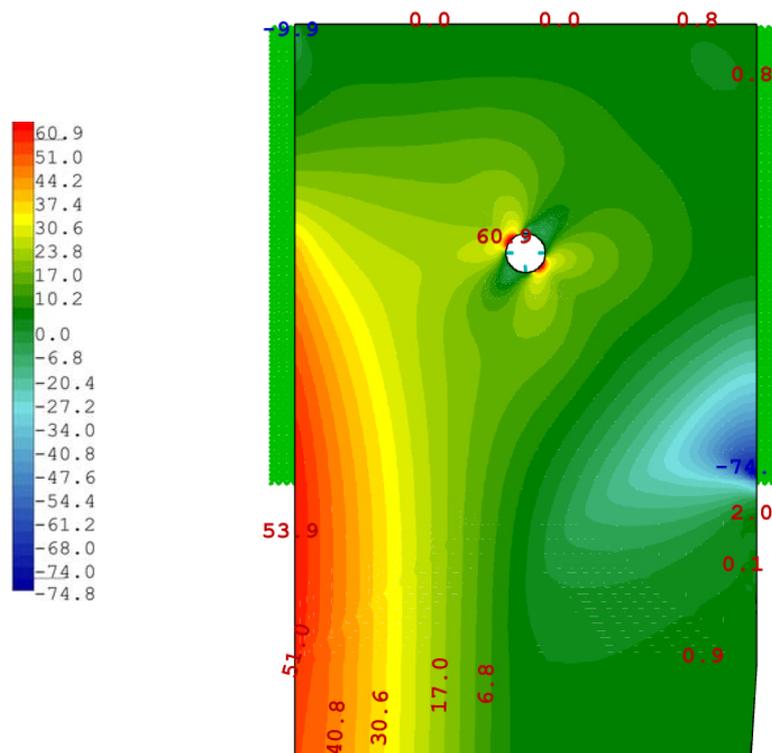


Abb. 6.6 Hauptspannungen [N/mm²] im Einspannbereich des Glasschwertes bei einer Windlast von 20 kN

6.3 Klotzungen als Zwischenschicht

Eine Alternative zum Mörtel ist die Verwendung von Klotzungen zur Lasteinleitung von den Glaskanten in den Stahlschuh. Die Materialien die hierzu in Frage kommen und auch in der Praxis verwendet werden wurden schon im Kapitel 4 besprochen. Diese sind hauptsächlich Polyoxymethylen (POM, auch Polyacetal) und der Polyamid PA 6. Der Vorteil den diese Materialien im Vergleich zum Mörtel haben ist die wesentlich höhere Druckfestigkeit. Nachteilig ist die Toleranz, die sie gegenüber Imperfektionen der Glaskanten bieten und das passgenaue Einbringen. Der wesentliche Unterschied zwischen POM und PA 6 ist die höhere Wasseraufnahmefähigkeit des zweiten Materials, die für die hier behandelte Verwendung nachteilig ist. Daher wird in den Untersuchungen von POM ausgegangen und auch in den Versuchen dieses Material verwendet.

Obwohl bekannt ist, dass die Druckfestigkeit dieser Thermoplaste höher ist als die des Mörtels, gibt es sowohl von den Herstellern, als auch in der Fachliteratur keine genauen Materialkennwerte für Druckbeanspruchung. Alle bekannten Werte (Festigkeit, E-Modul, etc.) sind im Rahmen von Zugversuchen bestimmt worden. Man kann aber davon ausgehen, dass die Größen mindestens denen für Zugbeanspruchung gleichwertig sind. Für die Untersuchungen wird ein E-Modul von 2000 N/mm^2 angenommen.

Da die Klotzungen höhere Druckfestigkeiten als der Mörtel aufweisen, ist es möglich die Lasten konzentrierter vom Glasschwert in den Stahlschuh einzuleiten. Daher ist es nicht erforderlich über die gesamte Einspannlänge eine Klotzung vorzusehen, sondern nur lokal, je zwei Klotzungen pro Seite. Aus diesen Überlegungen ergeben sich mehrere Parameter, die einen Einfluss auf den Hauptzugspannungen im Glas im Lasteinleitungsbereich haben:

- ◆ der Abstand der Klotzung vom oberen Rand des Glasschwertes - mit **a** bezeichnet
- ◆ die Länge der Klotzung - mit **b** bezeichnet
- ◆ der Abstand zwischen den Klotzungen - mit **d** bezeichnet

Die Anordnung der Klotzungen und die drei aufgezählten Parameter sind in der Abb. 6.7 dargestellt.

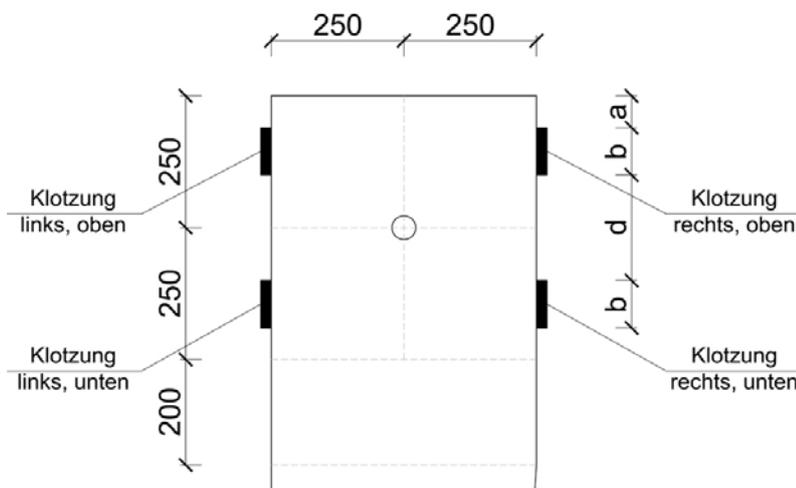


Abb. 6.7 Parameter - Klotzungen

Im Zuge der Parameteranalyse werden diese drei Parameter der Reihe nach variiert. Es wird dabei untersucht wie sich die Hauptzugspannungen in direkter Nähe der Lasteinleitung verhalten.

Zuerst wird der Abstand der Klotzungen zum oberen Eck des Glasschwertes untersucht. Für diese Variation werden Klotzungen mit 100 mm Länge und ein Abstand zwischen den Klotzungen von 200 mm gewählt. Der Wert, ab dem bei dieser Untersuchung die Hauptzugspannungen im Glas in direkter Nähe der Klotzung keine Schwankungen mehr zeigen, wird für die Variation der Länge der Klotzung verwendet. Hier wird untersucht ab welcher Klotzungslänge die Hauptzugspannungen neben den Klotzungen nur geringe Änderungen aufweisen. Mit diesem Wert wird anschließend der Einfluss des Abstandes zwischen den Klotzungen auf die Hauptzugspannungen untersucht.

Zusätzlich wird noch für diese Variante des rechteckigen Glasschwertes mit Klotzungen der Einfluss der Dicke der Finne (des Glasschwertes) auf die Hauptzugspannungen untersucht.

6.3.1 Numerisches Modell

Für das numerische Modell werden bezüglich der Geometrie, der Netzfeinheit und der einwirkenden Lasten die gleichen Annahmen wie im Falle der Variante mit Mörtel getroffen. Auch die Klotzungen werden gleich wie der Mörtel durch Druckfedern modelliert, welche auf Zug ausfallen. Somit sind bei der im Rahmen der Untersuchungen betrachteten Winddruckbelastung nur die linke, obere Klotzung und die rechte, untere Klotzung bei der Lasteinleitung wirksam. Im Bereich der anderen zwei Klotzungen entstehen Zugspannungen, so dass diese keine Lasten übertragen können.

Die Federsteifigkeit der Federn zur Modellierung der Klotzungen wird nach folgender Formel berechnet:

$$C_P = \frac{E \times A}{l} = \frac{2000 \times 150}{10} = 30000 \text{ N/mm}$$

mit:	C_P	Federsteifigkeit
	E	angenommener Elastizitätsmodul der Klotzungen (POM) $E = 2000 \text{ N/mm}^2$
	A	Einflussfläche einer Feder $A = \text{Glasdicke} \times \text{Einflusslänge} = 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} = 150 \text{ mm}^2$
	l	Dicke der Klotzungen - $l = 10 \text{ mm}$

6.3.2 Abstand der Klotzung zum oberen Rand

Der Abstand der Klotzungen vom oberen Rand wird, angefangen von 0 mm, in Schritten von 20 mm bis 100 mm erhöht. Dabei werden die Länge der Klotzungen (100 mm) und der Abstand zwischen den Klotzungen (200 mm) konstant gehalten. Die Verschiebung der Klotzungen weg vom oberen Rand des Glasschwertes nach unten bewirkt somit eine Erhöhung der Einspannlänge. Daher ist mit der Erhöhung des Abstandes auch eine lineare Abnahme sowohl der Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, als auch der maximalen Verschiebung zu erwarten. Ziel ist aber zu untersuchen, wie sich die Hauptzugspannungen im Bereich der linken, oberen Klotzung verhalten.

In der Abb. 6.8 ist das Verhalten der Hauptzugspannungen infolge der globalen Biegung als Diagramm wiedergegeben. Man kann aus den dargestellten Kurven (linear) erkennen, dass sich die Hauptzugspannungen in diesem Bereich nur wenig mit größer werdenden Abstand verändern. Bei ca. 43 kN Windlast wird die Prüfbiegezugfestigkeit von ESG (120 N/mm²) erreicht.

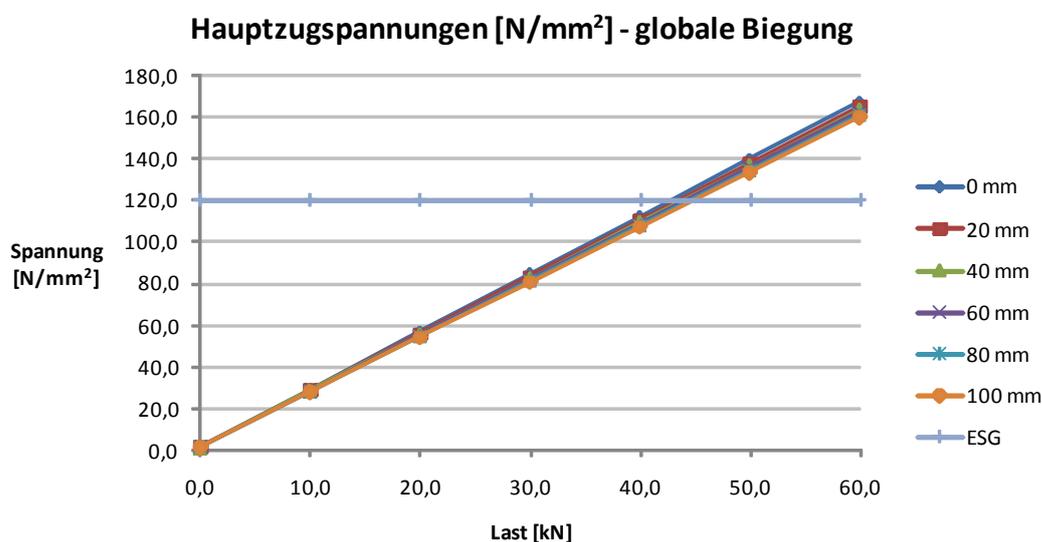


Abb. 6.8 Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Größe der Windlast und vom Abstand der Klotzungen vom oberen Rand des Glasschwertes

In der Abb. 6.9 ist das Verhalten der Hauptzugspannungen im Bereich der Klotzung links, oben dargestellt. Man kann erkennen, dass bei einem Abstand von 0 mm (Klotzung befindet sich direkt am oberen Rand) Spannungsspitzen im Eckbereich entstehen. Sobald man sich mit der Klotzung geringfügig vom Eck entfernt (nächster Wert beträgt 20 mm) entsteht ein Zugspannungsmindestwert und die Hauptzugspannungen betragen nur noch etwa die Hälfte. Erhöht man den Abstand weiter (40 mm), steigen die Hauptzugspannungen wieder geringfügig, bleiben aber in weiterer Folge in direkter Nähe der Klotzung und im Eckbereich konstant.

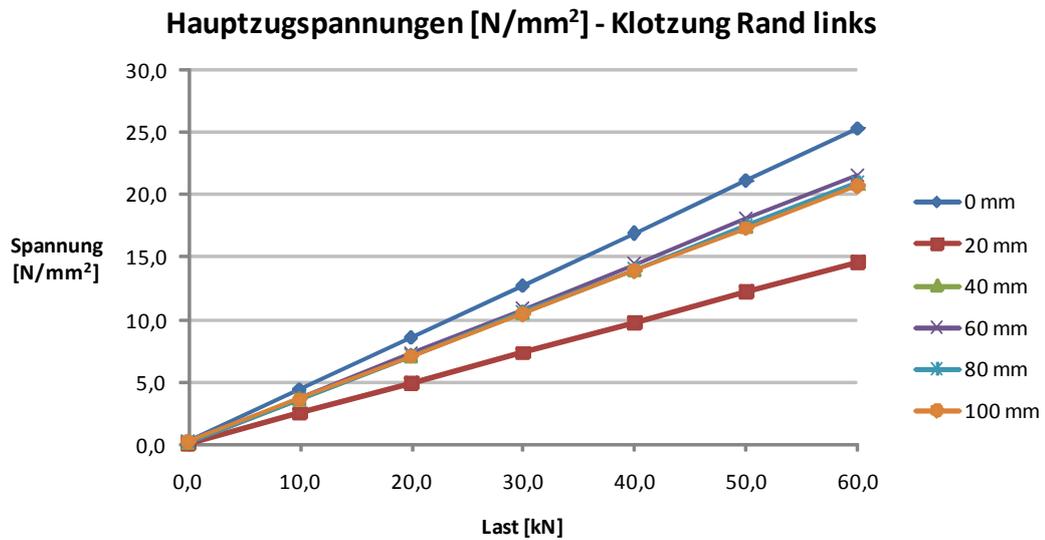


Abb. 6.9 Hauptzugspannungen im Bereich der linken, oberen Klotzung, abhängig von der Größe der Windlast und vom Abstand der Klotzungen vom oberen Rand des Glasschwertes

Für eine Windlast von 40 kN wird in Abb. 6.10 ein Diagramm gezeigt, in welchem abhängig vom Abstand der Klotzungen zum oberen Rand, die Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, die Hauptzugspannungen im Bereich des Bohrloches und die Hauptzugspannungen im Bereich der Klotzungen links, oben dargestellt werden. Aus diesem ist ersichtlich, dass die Hauptzugspannungen im Bereich der Klotzung viel kleiner, als die aus der globalen Biegung und die im Bereich des Bohrloches sind.

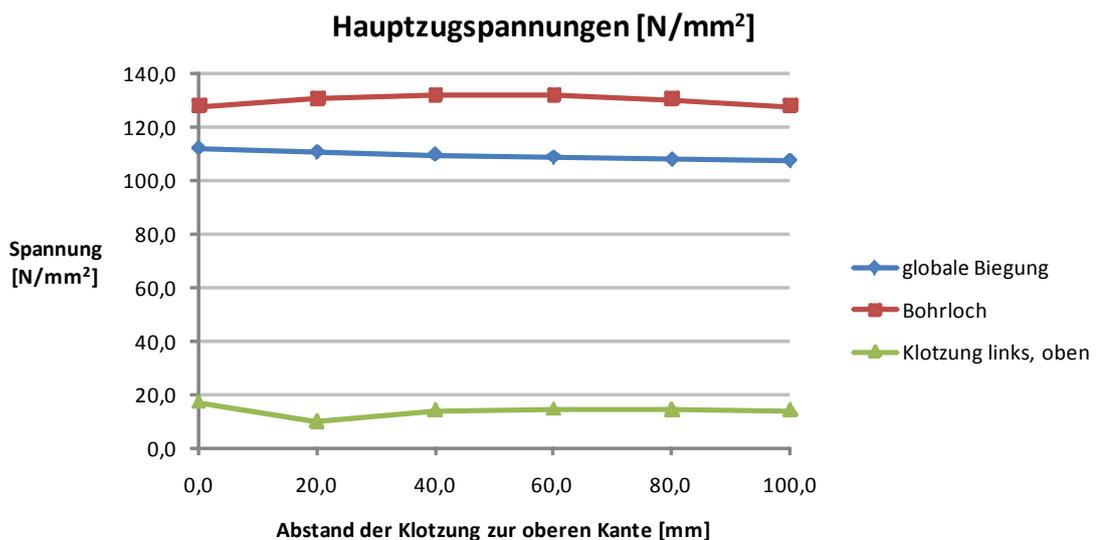


Abb. 6.10 Hauptzugspannungen im Glas an verschiedenen Stellen des Einspannbereiches bei einer Windlast von 40 kN und abhängig vom Abstand der Klotzungen vom oberen Rand

Für die weiteren Untersuchungen wird ein Abstand der Klotzungen vom oberen Rand von 40 mm gewählt. In Abb. 6.11 werden für diesen Abstand die Hauptspannungen im Glas bei einer Windlast von 40 kN als Höhenflächen im Bereich der linken, oberen Klotzung gezeigt.

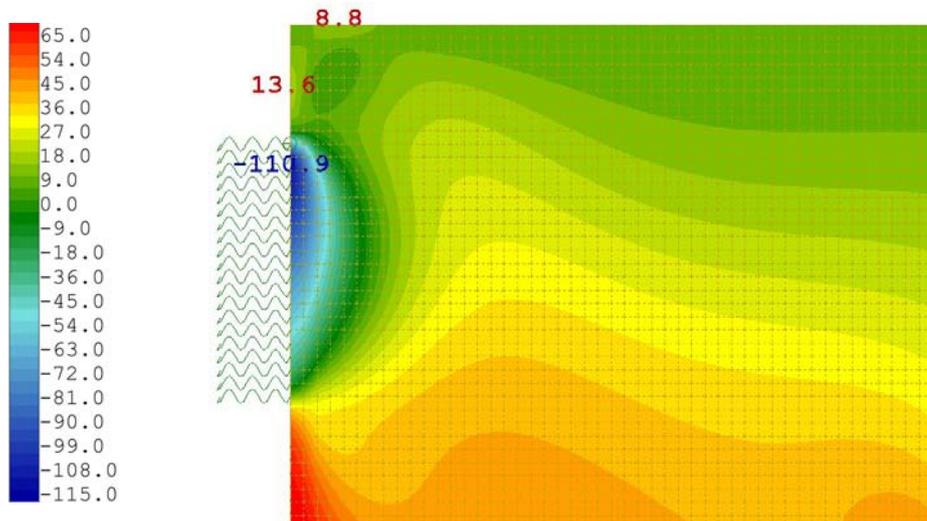


Abb. 6.11 Hauptspannungen $[N/mm^2]$ infolge einer Windlast von 40 kN im Bereich der Klotzung links, oben für einen Abstand zum oberen Rand von 40 mm

6.3.3 Länge der Klotzung

Als zweiter Parameter wird die Länge der Klotzungen variiert. Dabei wird von einer Mindestlänge der Klotzung von 20 mm ausgegangen und in Schritten von 20 mm diese bis 120 mm erhöht. Der Abstand zur oberen Kante wird dabei mit 40 mm und der Abstand zwischen den Klotzungen mit 200 mm konstant gehalten. Auch bei dieser Parametervariation wird durch Erhöhung der Länge der Klotzung die Einspannlänge des Glasschwertes im Stahlschuh erhöht.

Ziel ist es bei dieser Parametervariation die Hauptzugspannungen in direkter Nähe der Klotzungen zu untersuchen. Es kann festgestellt werden, dass bei der Klotzung rechts, unten die Querspannungen von den Druckspannungen aus der globalen Biegung überdruckt werden. Somit ist auch bei dieser Untersuchung bezüglich Zugspannungen nur eine Betrachtung der Klotzung links, oben interessant.

In der Abb. 6.12 werden Hauptspannungsbilder für verschiedene Klotzungslängen bei einer Windlast von 40 kN dargestellt. Es ist ersichtlich, dass im Bereich der Klotzung rechts, unten keine Hauptzugspannungen entstehen, dafür aber hohe Hauptdruckspannungen. Im Bereich der Klotzung links, oben bildet sich bei geringen Klotzungslängen (20 mm, 40 mm) eine Art Hochpunkt mit hohen Hauptzugspannungen. Dieser verschwindet ab einer Länge von 80 mm.

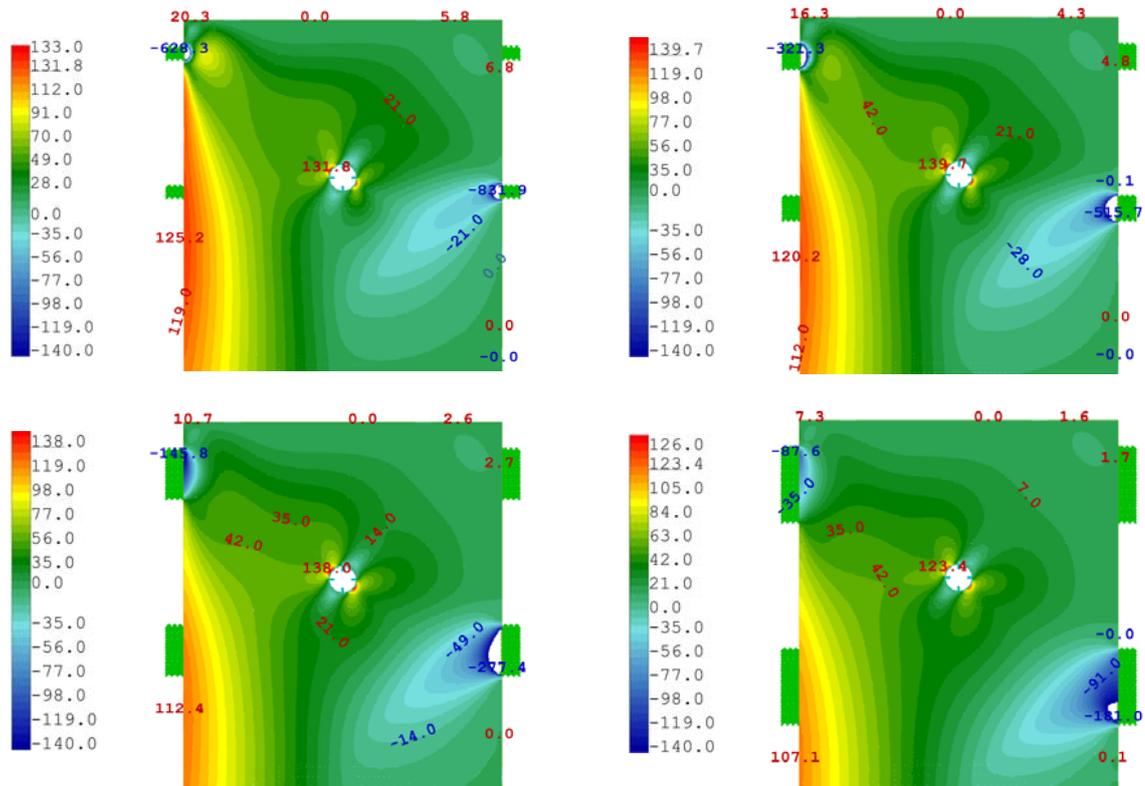


Abb. 6.12 Hauptspannungen [N/mm²] infolge einer Windlast von 40 kN für verschiedene Klotzungslängen - li, o: 20 mm; re, o: 40 mm; li, u: 80 mm; re, u: 120 mm

In der Abb. 6.13 ist die Höhe der Hauptzugspannungen in der Nähe der linken, oberen Klotzung abhängig von der Windlast und von der Länge der Klotzung dargestellt. Man kann feststellen, dass je länger die Klotzung wird, desto geringer der Einfluss auf die Hauptzugspannungen ist.

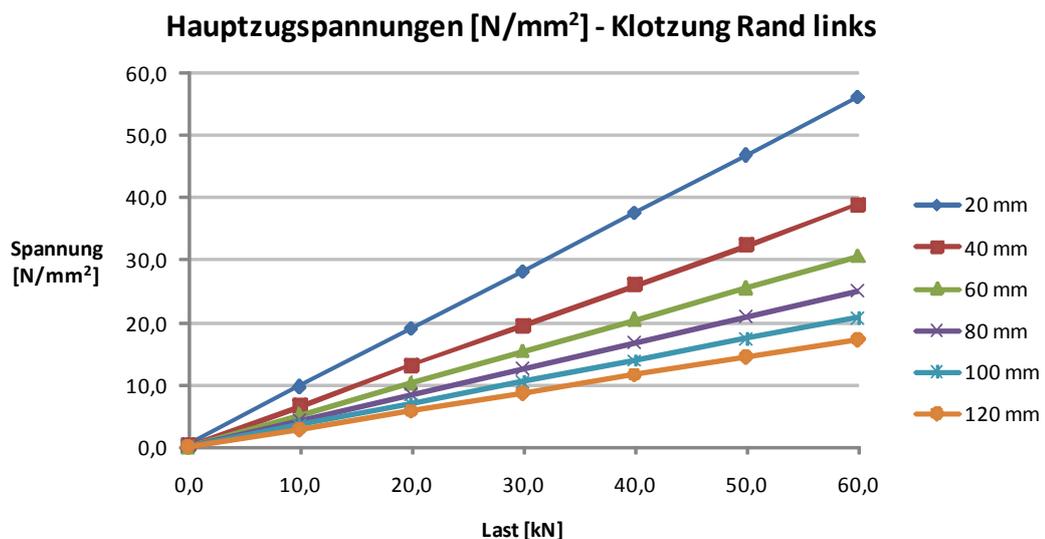


Abb. 6.13 Hauptzugspannungen im Bereich der linken, oberen Klotzung, abhängig von der Größe der Windlast und von der Länge der Klotzungen

Identisch zu den Untersuchungen des Abstandes der Klotzungen zum oberen Rand, wird in Abb. 6.14 für eine Windlast von 40 kN ein Diagramm gezeigt, in welchem abhängig von der Länge der Klotzungen, die Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, die Hauptzugspannungen im Bereich des Bohrloches und die Hauptzugspannungen im Bereich der Klotzungen links, oben dargestellt werden. Aus diesem ist ersichtlich, dass die Spannungen im Bereich der Klotzungen nicht maßgebend sind. Je länger diese aber ausgebildet werden, desto kleiner ist der Einfluss auf die Hauptzugspannungen.

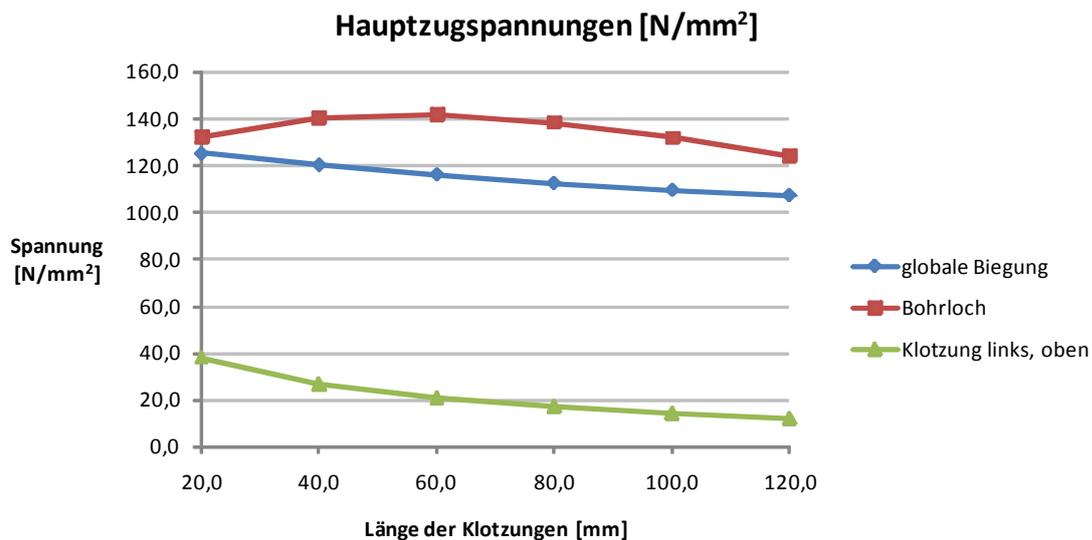


Abb. 6.14 Hauptzugspannungen im Glas an verschiedenen Stellen des Einspannbereiches bei einer Windlast von 40 kN und abhängig von der Länge der Klotzungen

Für diesen Vergleich wird die Last von 40 kN gewählt, da bei dieser Last die Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung etwa den Wert von 120 N/mm² (Prüfbiegezugfestigkeit von ESG) erreichen. Für die weiteren Untersuchungen wird eine Klotzungslänge von 80 mm gewählt.

6.3.4 Abstand zwischen den Klotzungen

Als dritter Parameter wird der Abstand zwischen den Klotzungen variiert. Dabei wird von einem Anfangswert von 100 mm ausgegangen und in Schritten von 20 mm dieser bis auf 200 mm erhöht. Obwohl auch bei den vorigen Parameterstudien die Einspannlänge variiert, ist dieser Einfluss auf die Hauptzugspannungen in diesem Fall massiver. Sowohl die maximale Verschiebung und die Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, als auch die Hauptzugspannungen im Bereich der Klotzungen verringern sich konstant mit zunehmendem Abstand.

In der Abb. 6.15 werden Hauptspannungsbilder für verschiedene Abstände zwischen den Klotzungen bei einer Windlast von 40 kN dargestellt.

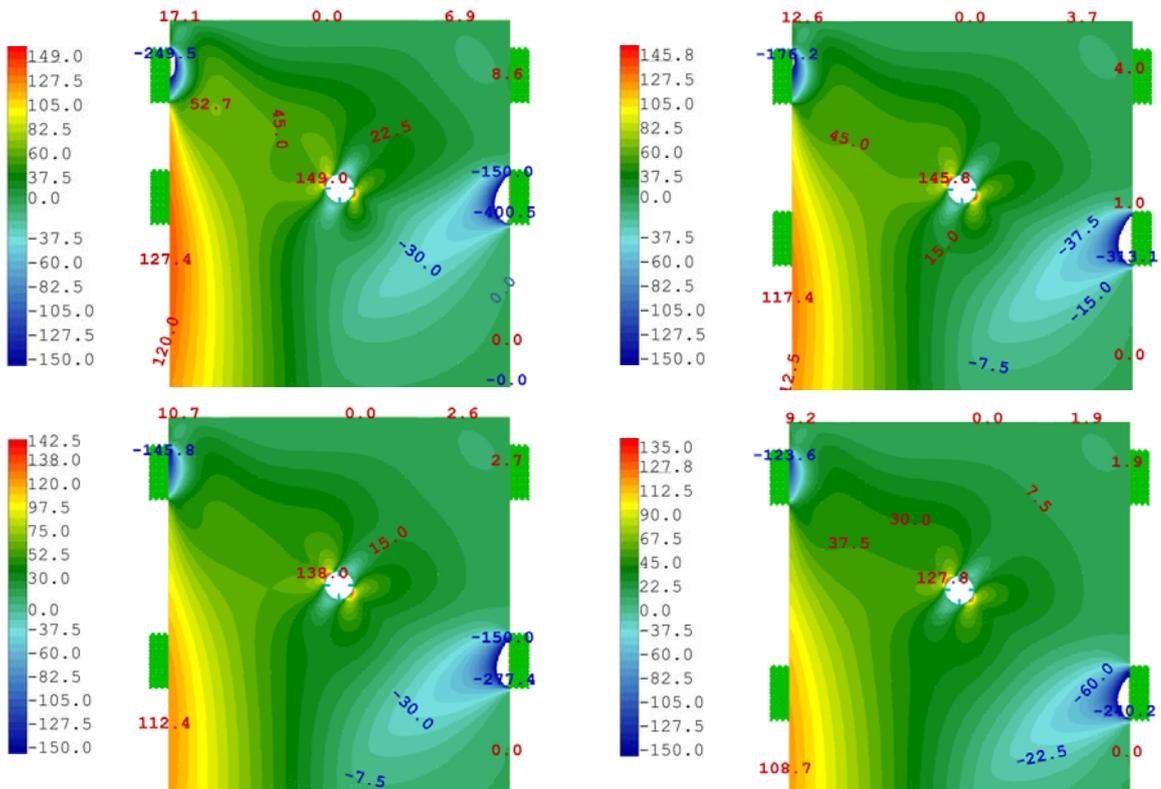


Abb. 6.15 Hauptspannungen [N/mm^2] infolge einer Windlast von 40 kN für verschiedene Abstände zwischen den Klotzungen - li, o: 100 mm; re, o: 160 mm; li, u: 200 mm; re, u: 240 mm

In den Abb. 6.16 - Abb. 6.18 sind die maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende und die Hauptzugspannungen aus globaler Biegung und in dem Bereich der lastübertragenden Klotzung links, oben abhängig von der Windlast und von dem Abstand zwischen den Klotzungen dargestellt.

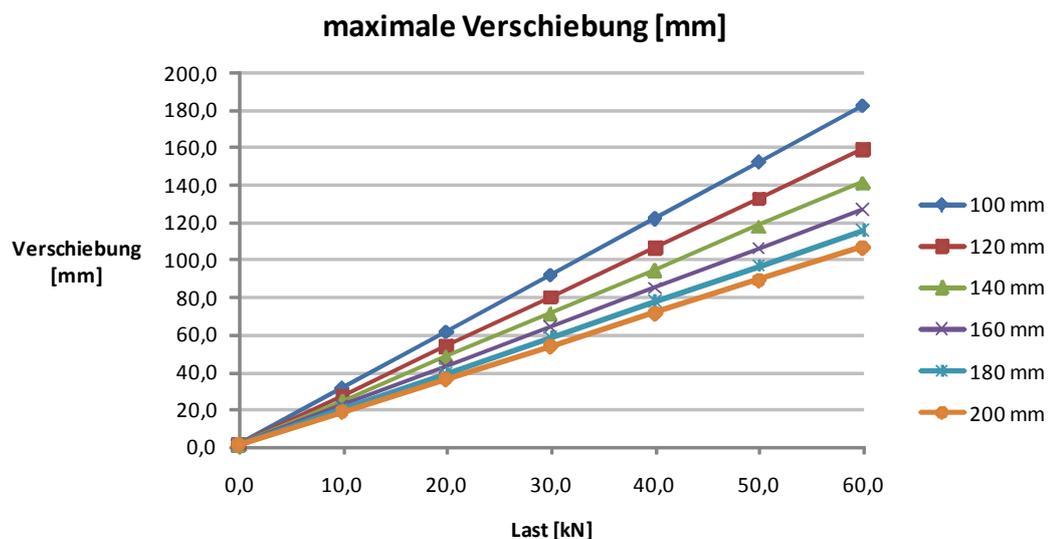


Abb. 6.16 maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende, abhängig von der Windlast und vom Abstand zwischen den Klotzungen

Bei den Werten für die hier dargestellten Verformungen ist auf der einen Seite zu sagen, dass die Lasten deutlich höher als eventuelle Bemessungslasten liegen und auf der anderen Seite, dass diese von den Materialeigenschaften der verwendeten Klotzungen abhängen. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde ein E-Modul von 2000 N/mm^2 angenommen. Dieser kann aber Produkt-abhängig variieren und muß durch die Versuche geprüft werden.

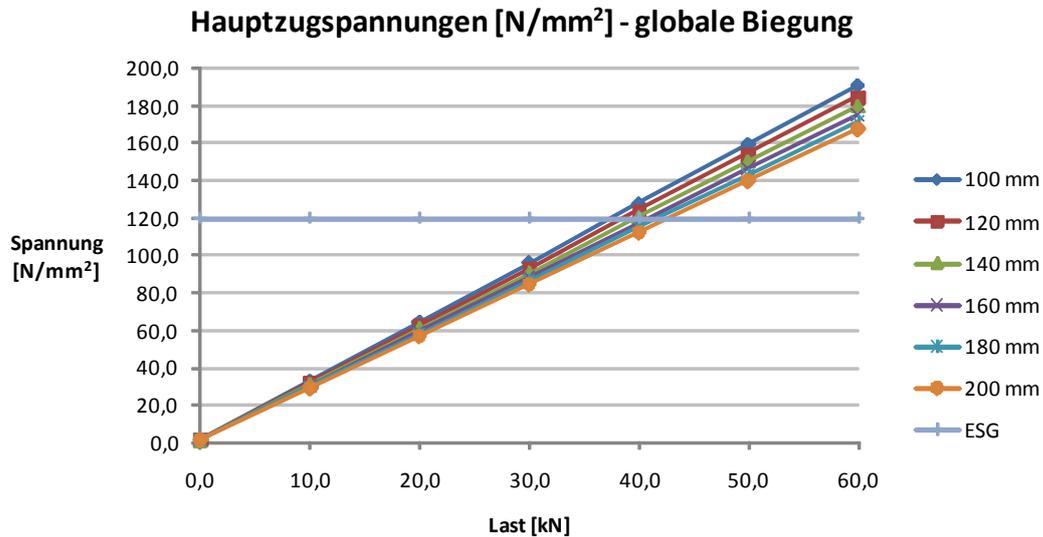


Abb. 6.17 Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Windlast und vom Abstand zwischen den Klotzungen

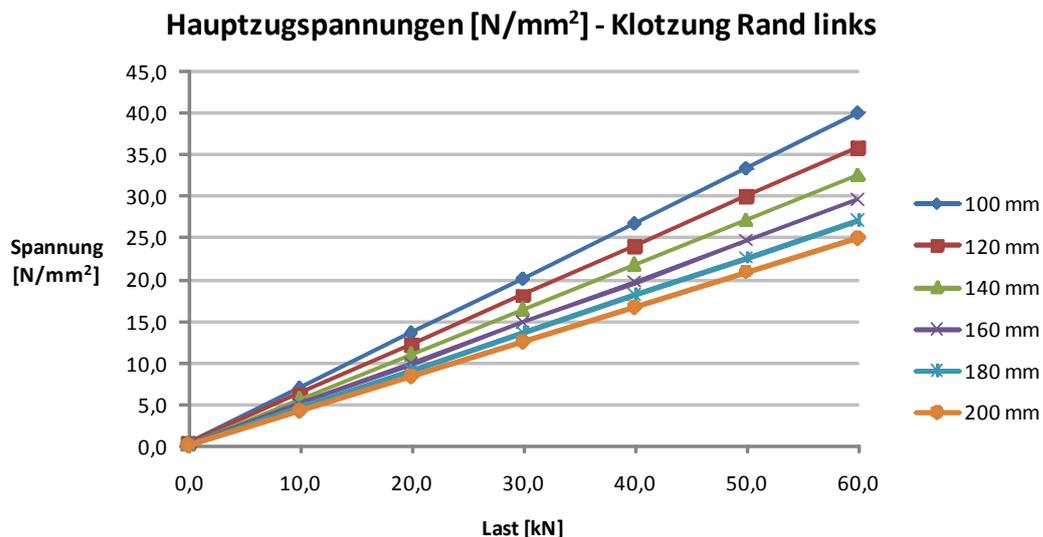


Abb. 6.18 Hauptzugspannungen im Bereich der linken, oberen Klotzung, abhängig von der Windlast und von dem Abstand zwischen den Klotzungen

Auch für diese Parameteranalyse wird in Abb. 6.19 für eine Windlast von 40 kN ein Diagramm gezeigt, in welchem abhängig von dem Abstand zwischen den Klotzungen, die Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, die Hauptzugspannungen im Bereich des Bohrloches und die Hauptzugspannungen im Bereich der Klotzungen links, oben dargestellt sind. Aus diesem ist ersichtlich, dass abhängig vom Abstand zwischen den Klotzungen, die Spannungen im Bereich der Klotzungen und die aus der globalen Biegung ungefähr mit der gleichen Neigung abnehmen.

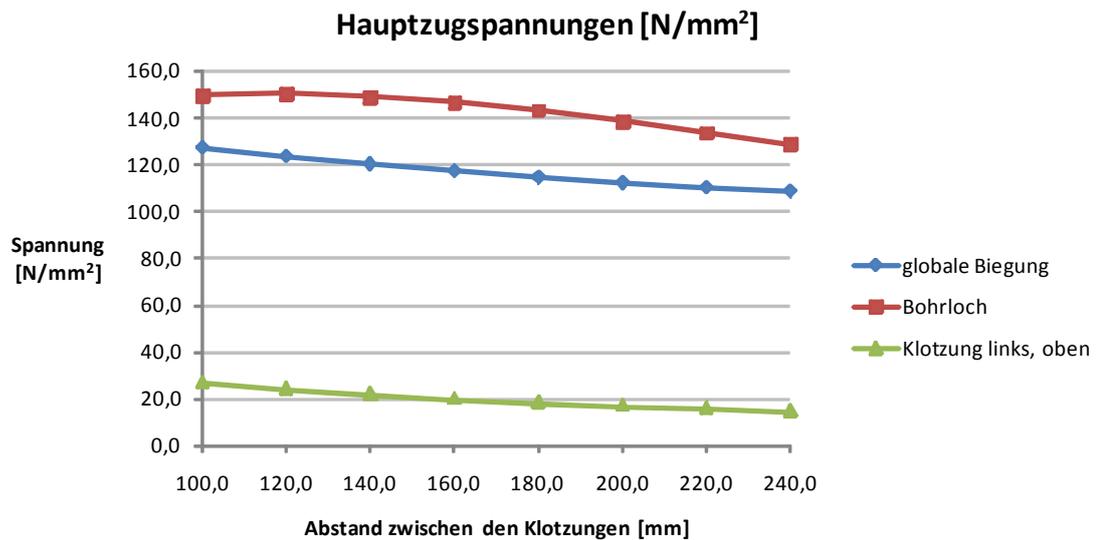


Abb. 6.19 Hauptzugspannungen im Glas an verschiedenen Stellen des Einspannbereiches bei einer Windlast von 40 kN und abhängig von dem Abstand zwischen den Klotzungen

Für die Wahl des Abstandes zwischen den Klotzungen sind die Verformungen und die maximalen Biegezugspannungen zu betrachten. Vor allem um die Verformungen in Grenzen zu halten ist ein Abstand von 200 mm erforderlich.

6.3.5 Glasstärke

In diesem Kapitel wird mit den zuvor festgelegten Parametern untersucht, wie sich die maximale Verformung am unteren Glasschwertende und die Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung bei verschiedenen Glasstärken verhalten. Es werden folgende Glasstärken gerechnet:

- ◆ 15 mm VSG aus 3 x 5 mm ESG
- ◆ 18 mm VSG aus 3 x 6 mm ESG
- ◆ 24 mm VSG aus 3 x 8 mm ESG
- ◆ 30 mm VSG aus 3 x 10 mm ESG

Bei der numerischen Berechnung hat der Glasaufbau als VSG keine Bedeutung, da die Beanspruchung nur in Scheibenebene erfolgt. Es werden daher einzelne Scheiben aus ESG mit der Gesamtstärke modelliert.

Aus den Abb. 6.20 und Abb. 6.21 kann man herauslesen bis zu welchen Lasten mit den verschiedenen Glasstärken bestimmte Verschiebungen und Hauptzugspannungen eingehalten werden.

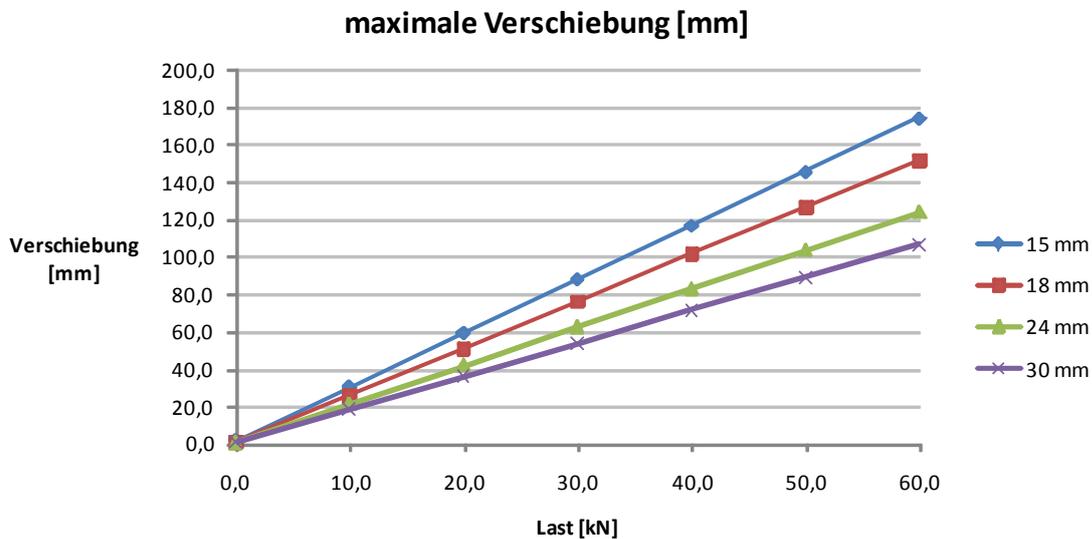


Abb. 6.20 maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende, abhängig von der Windlast und von der Glasstärke

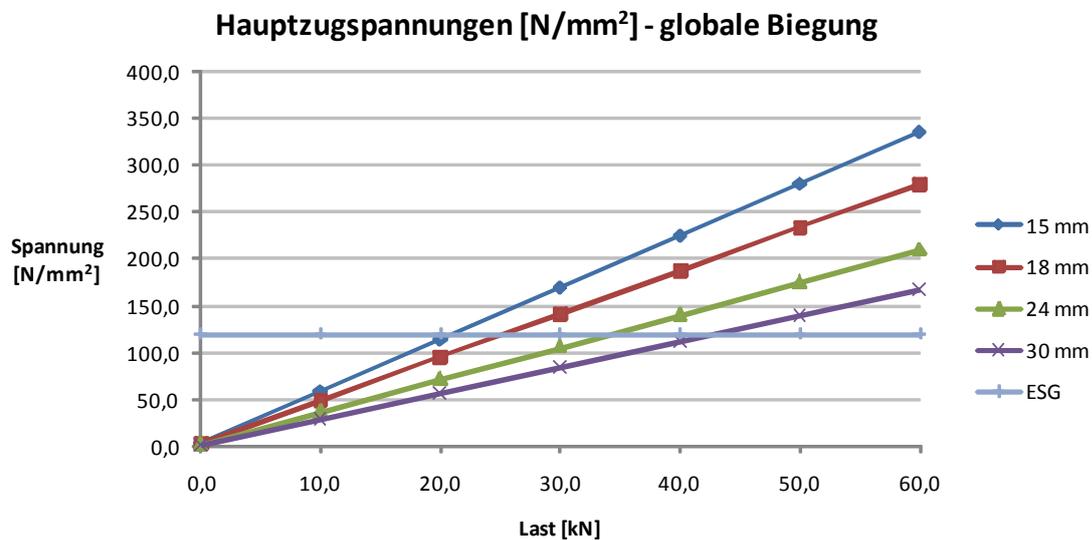


Abb. 6.21 Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Windlast und von der Glasstärke

6.4 Überlegungen zum Bohrloch

Obwohl die Untersuchung der Hauptzugspannungen im Bereich des Bohrloches nicht direkt Thema dieser Arbeit ist, werden in diesem Kapitel Erklärungen für die hohen, hier auftretenden Werte gegeben. Die erste Begründung ist, dass beim numerischen Modell auf die Aluminiumhülse und auf die Mörtelschicht verzichtet wurde und die steife Feder zur Lagerung in vertikaler Richtung direkt an der Glaskante angebracht wurde.

Um den positiven Effekt der Mörtelschicht und der Aluminiumhülse zwischen der M30 Schraube und der Bohrlochwand zu untersuchen werden diese, für das rechteckige Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht an den Kanten im Einspannbereich, modelliert. Sowohl der Mörtel im Bohrlochbereich, als auch die Aluminiumhülse werden mit den entsprechenden Materialeigenschaften (Mörtel $E = 3245 \text{ N/mm}^2$, Aluminium $E = 70000 \text{ N/mm}^2$) als Schalenelemente in das Programm Sofistik eingegeben.

In der Abb. 6.22 sind die Hauptspannungen im Bohrlochbereich ohne (links) und mit (rechts) Hülse bei einer horizontalen Windlast von 20 kN dargestellt. Man stellt fest, dass die Hauptzugspannungen im Glas im Bereich des Bohrloches durch die Wirkung der Aluminiumhülse und der Mörtelschicht von 60,9 N/mm^2 auf 53,3 N/mm^2 abnehmen.

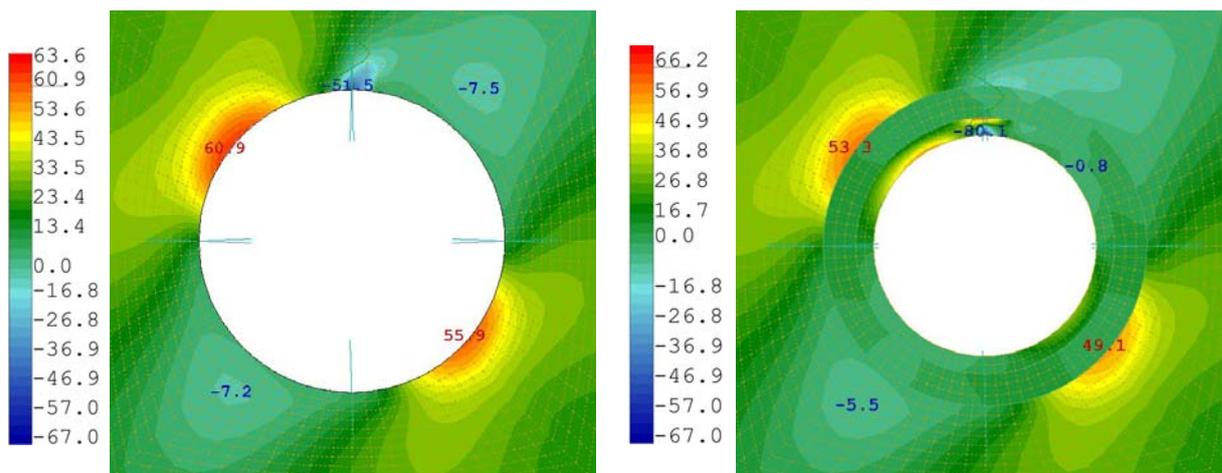


Abb. 6.22 Hauptspannungen [N/mm^2] im Bereich des Bohrloches bei einer Windlast von 20 kN - Links: Modell ohne Hülse; Rechts: Modell mit Hülse

Die zweite Begründung für die hohen Hauptzugspannungen im Bereich des Bohrloches liegt in dessen Lage. Obwohl aus architektonischen Gründen und nach dem ersten Verdacht die Situierung in der Mitte des Einspannbereiches als selbstverständlich erscheint, kann durch ein einfaches Modell gezeigt werden, dass diese Lage für die Hauptzugspannungen an den Bohrlochkanten ungünstig ist. Dazu bedient man sich der vor allem im Stahlbetonbau oft verwendeten Fachwerkmodelle.

Man betrachtet bei dieser Untersuchung nur die horizontale Windlast, die durch das entstehende Moment in der Einspannstelle den größten Anteil an den Hauptzugspannungen hat. Anhand der Spannungsverteilungen im Mörtel kann man sich für die linke und die rechte Seite die Lage der resultierenden Auflagerkräfte bestimmen. Durch diese drei Punkte (einwirkende Windlast und zwei Auflagerkräfte) kann ein Gleichgewicht gebildet werden. In der Abb. 6.23 mitte und rechts sieht man, dass sich zwischen den zwei Auflagerpunkten eine Druckdiagonale bildet, die genau durch das Bohr-

loch läuft. Ähnlich wie im Falle einer Aussparung in einer Betonscheibe, muss das Loch durch Druck- und Zugstäben umgangen werden. Das Fachwerkmodell für diesen Fall ist in der Mitte unten in der Abb. 6.23 dargestellt. Vergleicht man die Druck- (blau) und Zugstäbe (rot) mit dem Einspannbereich im Spannungsbild rechts kann man die Übereinstimmung feststellen.

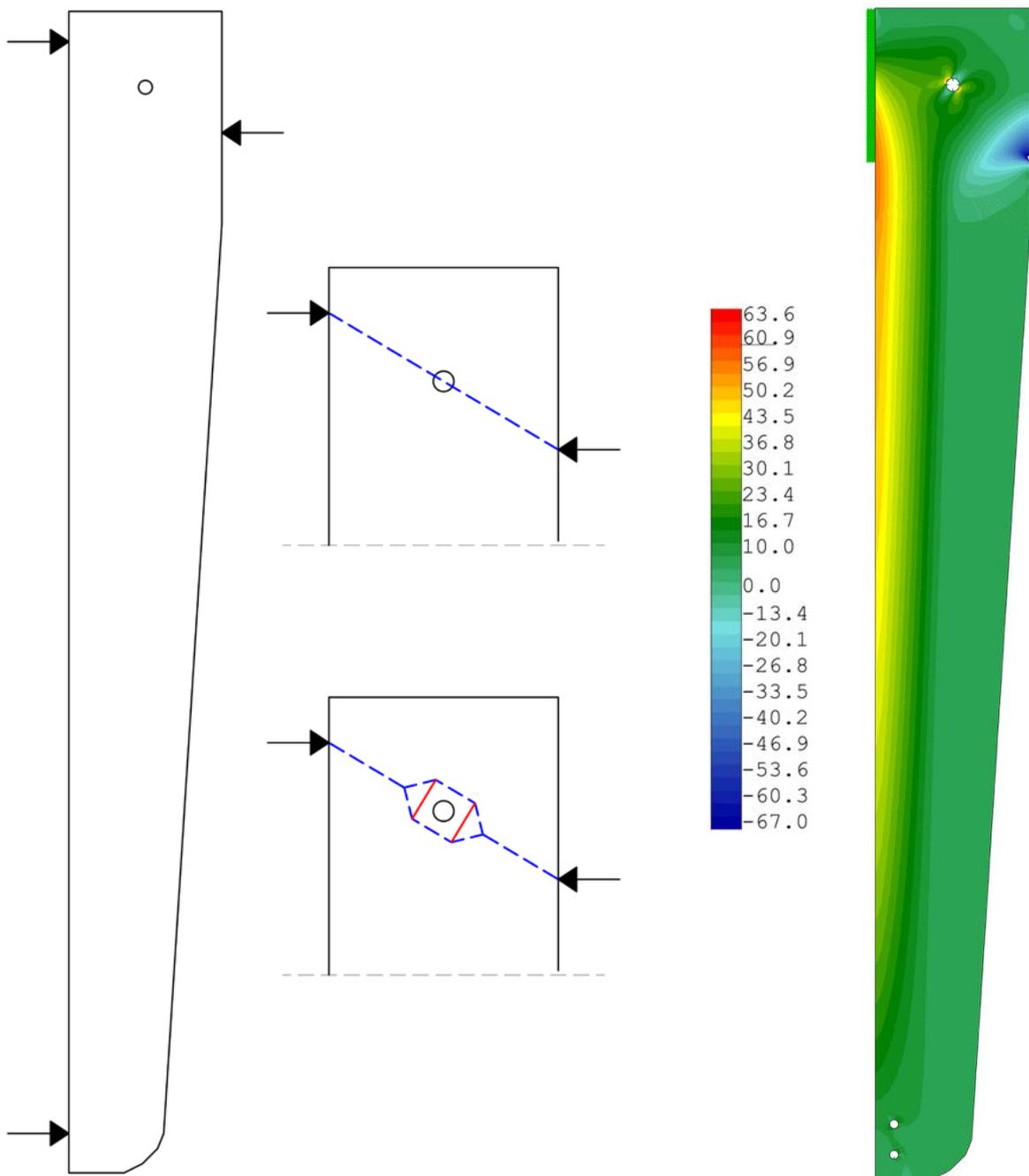


Abb. 6.23 Links: Belastung und Auflagerkräfte; Mitte: Ausbildung der Druckdiagonale; Rechts: Hauptspannungen $[N/mm^2]$ als Isoflächen für eine Windlast von 20 kN

Aus diesen Untersuchungen erfolgt, dass für die Hauptzugspannungen im Glas im Bereich der Bohrlochwand die mittige Lage des Bohrloches ungünstig ist. Eine Verschiebung des Bohrloches nach

unten oder nach oben bringt eine Verringerung der Hauptzugspannungen in diesem Bereich. Der günstigere Einfluss wird durch eine Verschiebung nach oben erreicht, da eine Verschiebung nach unten eine Überlagerung mit den Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung mit sich bringt.

In den folgenden Abbildungen sind für Abstände von 250 mm, 150 mm und 350 mm vom oberen Rand bei einer Windlast von 20 kN die Lage der Bohrlöcher anhand von Hauptspannungsbildern auf der linken Seite gezeigt. Auf der rechten Seite ist das Bohrloch in Detail dargestellt und die Werte der Hauptspannungen angegeben. Man erkennt, dass die Hauptzugspannungen von 60,9 N/mm² auf 51,8 N/mm² (Verschiebung nach oben) oder auf 54,3 N/mm² (Verschiebung nach unten) fallen.

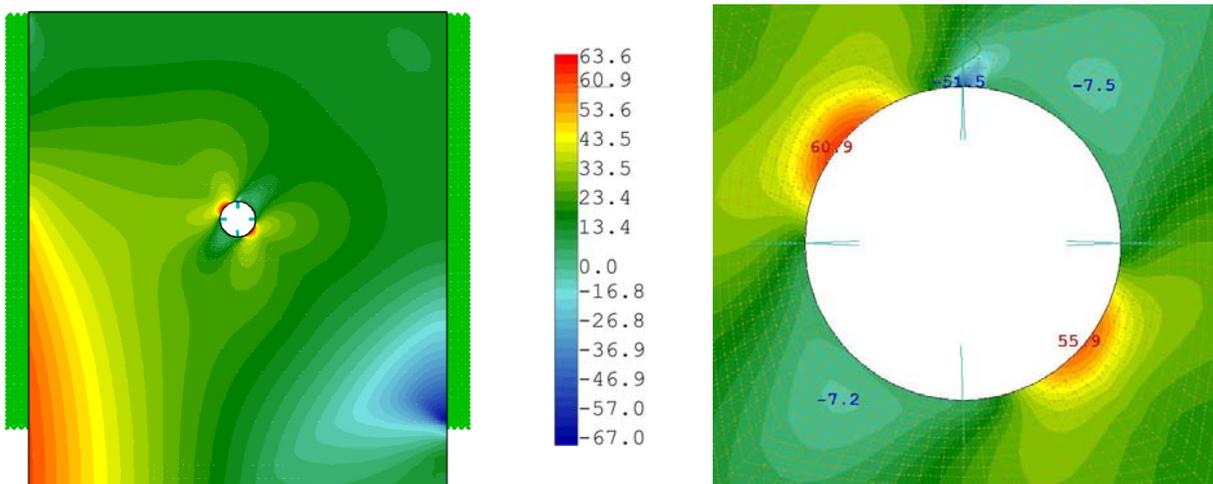


Abb. 6.24 Abstand des Bohrloches vom oberen Rand: 250 mm - Links: Lage des Bohrloches; Rechts: Hauptspannungen [N/mm²] im Bereich des Bohrloches

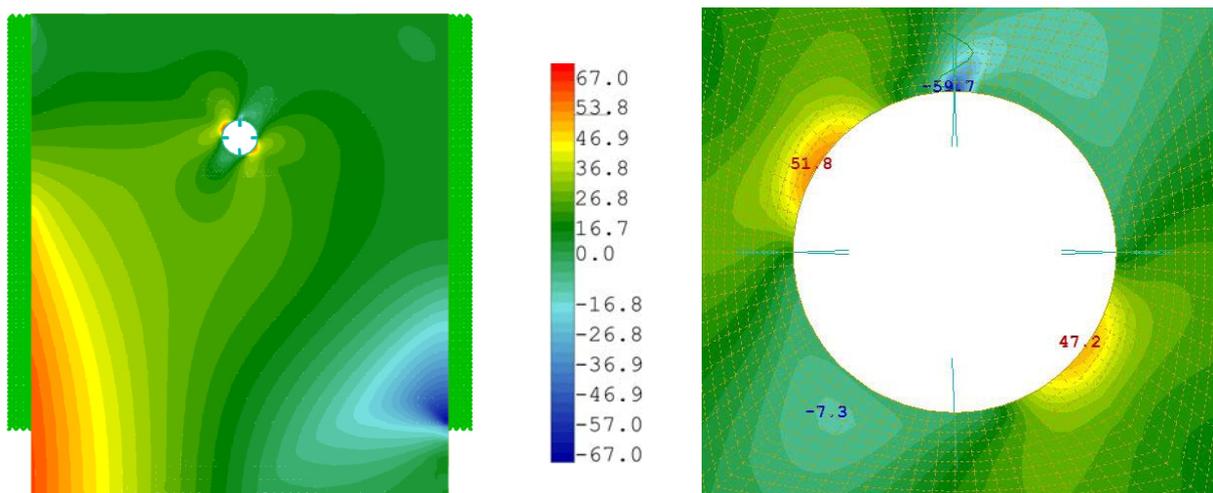


Abb. 6.25 Abstand des Bohrloches vom oberen Rand: 150 mm - Links: Lage des Bohrloches; Rechts: Hauptspannungen [N/mm²] im Bereich des Bohrloches

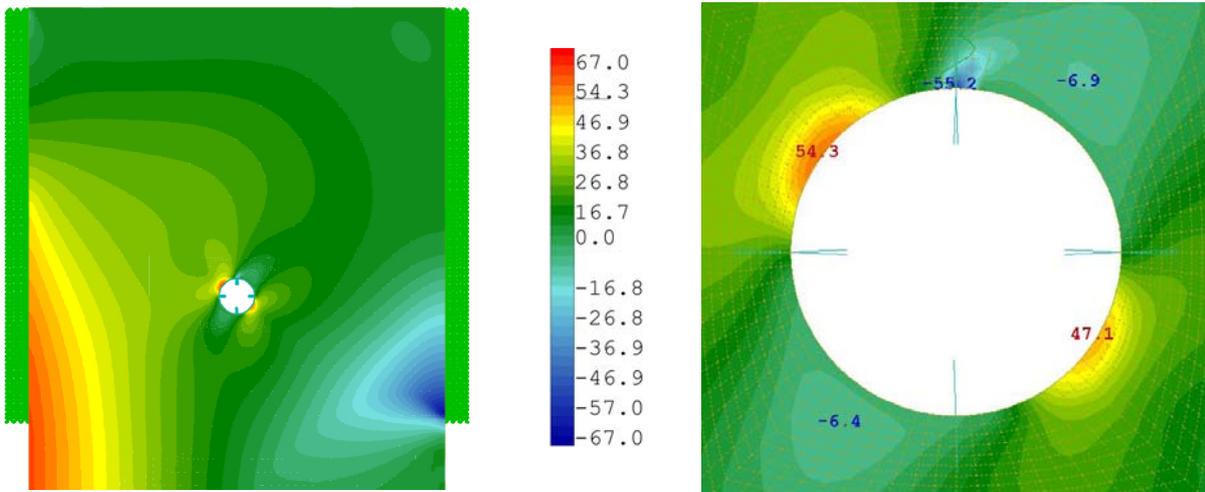


Abb. 6.26 Abstand des Bohrloches vom oberen Rand: 350 mm - Links: Lage des Bohrloches; Rechts: Hauptspannungen [N/mm²] im Bereich des Bohrloches

7

Gevoutetes Glasschwert - Analyse

**Allgemeines
Gevoutetes Glasschwert ohne Knick
Gevoutetes Glasschwert mit Knick**

7.1 Allgemeines

Nachdem im Kapitel 6 Maßnahmen vorgestellt und untersucht wurden, bei denen die rechteckige Geometrie des Einspannbereiches des Glasschwertes erhalten bleibt, beinhaltet dieses Kapitel Vorschläge mit geänderter Geometrie. Dabei wird der Einspannbereich gevoutet ausgebildet, um durch die geneigte Kante auch die vertikalen Lasten über Kontaktdruck in dem Stahlschuh einzuleiten. Diese Ausführung bringt den großen Vorteil, dass auf das Bohrloch mit der M30 Schraube im Einspannbereich verzichtet werden kann. Um aber ein Kräftegleichgewicht für alle einwirkenden Lasten zu erreichen ist es erforderlich an der oberen Glasschwertkante einen „Deckel“ auszubilden, um auch hier Lasten einleiten zu können.

Als Materialien für die Lastübertragung vom Glasschwert auf den Stahlschuh können auch in diesem Fall sowohl Mörtel (Hilti HIT-HY 70), als auch Klotzungen (POM) verwendet werden. Außer den Parametern, die schon bei dem rechteckigen Glasschwert untersucht wurden, muss bei dem gevouteten Glasschwert der Einfluss des Winkels der geneigten Kante auf die Spannungen und Verformungen analysiert werden. Für die Untersuchung dieses Parameters werden zwei Geometrievarianten betrachtet:

- ◆ gevoutetes Glasschwert ohne Knick - die gevoutete Kante weist über die ganze Höhe des Glasschwertes die gleiche Neigung
- ◆ gevoutetes Glasschwert mit Knick - die gevoutete Kante weist im unteren Bereich die gleiche Neigung wie beim rechteckigen Glasschwert und wird nur im Einspannbereich variiert (dadurch entsteht ein Knickpunkt)

Diese zwei Varianten werden in Abb. 7.1 für einen Winkel von 6 Grad dargestellt. Für die Parameterstudien wird auf die Ausrundung im unteren Bereich des Glasschwertes verzichtet, da diese außer architektonischen Gründen keine Bedeutung hat. Wie man in der Darstellung sieht, ist der Nachteil beim gevouteten Glasschwert ohne Knick, dass die Neigung nicht zu hoch werden kann, da entweder die untere Kante zu schmal oder die obere Kante zu breit wird. Bei der Variante mit Knick tritt dieses Problem nicht auf, nachteilig ist aber, dass um den Innenwinkel herzustellen ein Bohrloch erforderlich ist.

Der Einfluss des Winkels wird in den folgenden Kapiteln untersucht. Vor allem wenn die Lasten durch Klotzungen in den Stahlschuh eingeleitet werden, ist eine größere Neigung erwünscht, damit ein Ausrutschen des Glasschwertes verhindert wird.

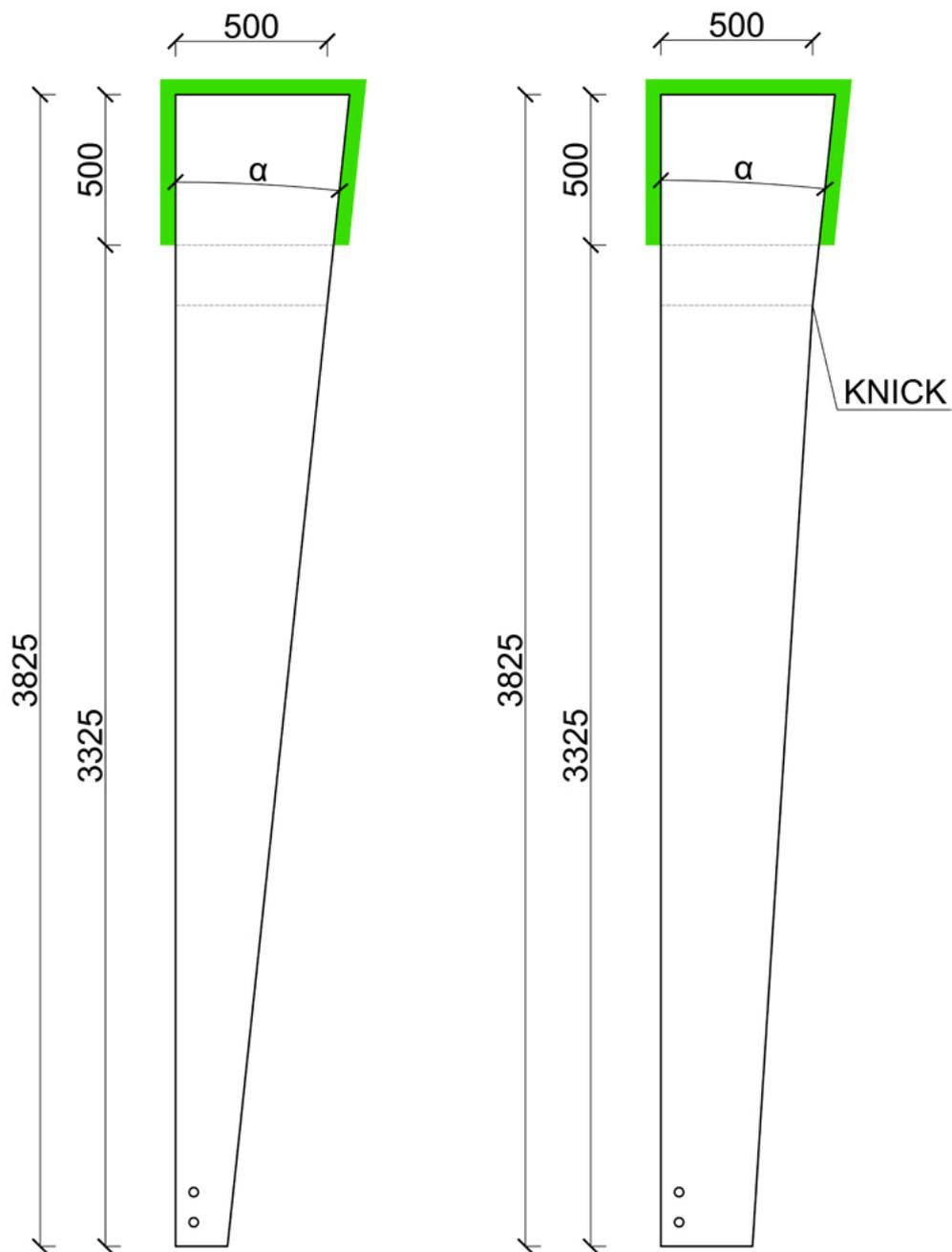


Abb. 7.1 Gevoutetes Glasschwert - Links: ohne Knick; Rechts: mit Knick

7.1.1 Verfahren nach Culmann

Damit drei Kräfte in Gleichgewicht sind, müssen sich ihre Wirkungslinien in einem Punkt schneiden. Betrachtet man die einwirkende horizontale Windlast und die resultierenden Auflagerkräfte an den zwei seitlichen Kanten, stellt man fest, dass sich die Wirkungslinien dieser drei Kräfte nicht in einem Punkt schneiden. Bei der im Kapitel 6 betrachteten Variante mit rechteckigem Einspannbereich, sind diese drei Kräfte in horizontaler Richtung gerichtet, so dass sich deren Wirkungslinien in einem Fernpunkt schneiden. Im Falle des gevouteten Glasschwertes bildet sich bei der Resultierenden an der rechten Glaskante ein vertikaler Anteil. Dieser muss durch den angesprochenen Deckel aufgenommen werden.

Dieses Problem kann graphisch mittels dem Verfahren nach Culmann gelöst werden und ist in Abb. 7.2 dargestellt. Um dieses Verfahren anwenden zu können, müssen vier Kräfte und deren Richtungen und mindestens die Größe einer dieser Kräfte bekannt sein. In unserem Fall sind die vier Kräfte die Windlast und die drei Auflagerkräfte (Angriffspunkt wird angenommen), wobei im Falle der Windlast auch die Größe als bekannt angenommen werden kann.

Als Erstes werden die Wirkungslinien der Windlast und der Auflagerkraft R3 miteinander geschnitten. Das Gleiche erfolgt zwischen den Auflagerkräften R1 und R2. Durch diese zwei Schnittpunkte wird eine Gerade gelegt, die man als Culmann'sche Gerade bezeichnet. Die Größe der Auflagerkraft R3 kann durch Parallelverschiebung und Verschneidung mit der Culmann'schen Geraden bestimmt werden. Bildet man die Resultierende zwischen der Windlast und der Auflagerkraft R3 und verschiebt man diese mit entgegengesetztem Richtungssinn in den Schnittpunkt zwischen R1 und R2, können durch Parallelverschiebung auch die Größen dieser Auflagerkräfte bestimmt werden. In der Abb. 7.2 ist zusätzlich auch das Kräftegleichgewicht graphisch dargestellt. Ohne die Auflagerkraft R3 (Deckel) kann das Kräftepolygon nicht geschlossen werden und somit kein Gleichgewicht erreicht werden.

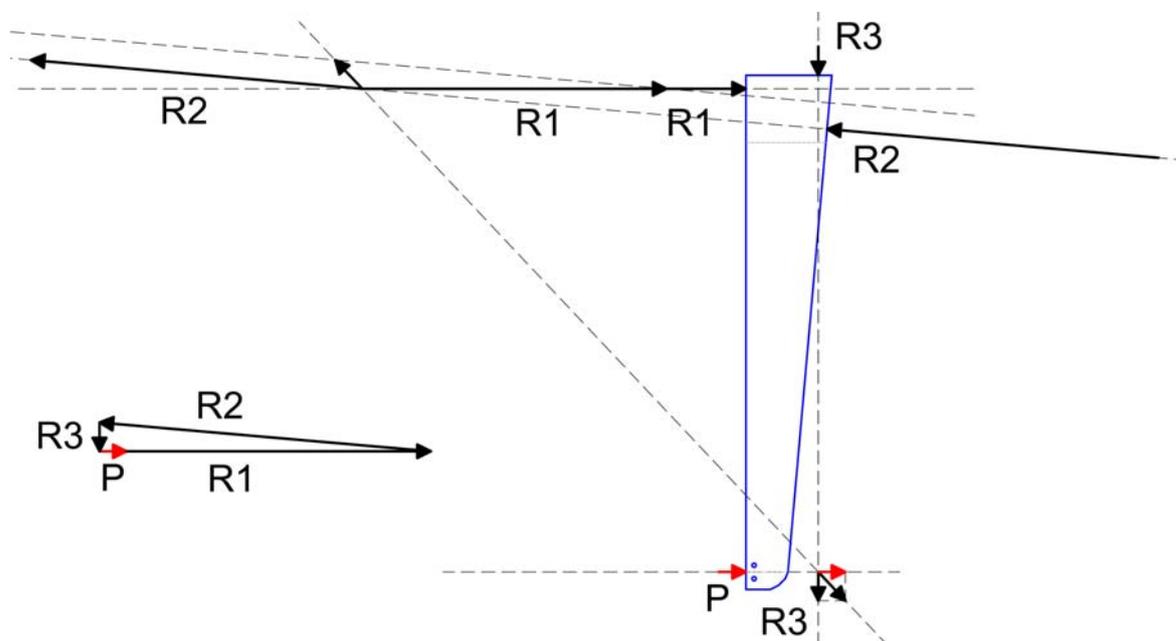


Abb. 7.2 Kräftegleichgewicht am gevouteten Glasschwert (Verfahren nach Culmann)

7.1.2 Numerisches Modell

Bei der numerischen Modellierung werden bei den einwirkenden Lasten die gleichen Annahmen, wie bei dem rechteckigen, im Kapitel 6 behandelten Glasschwert getroffen. Das Eigengewicht des Glasschwertes (ändert sich abhängig vom Winkel) wird vom Programm berücksichtigt. Das Eigengewicht der Fassadenscheiben (inklusive zusätzliches Moment aus der Exzentrizität als Kräftepaar) wird in den zwei unteren Bohrlöcher angesetzt. Die Windlast wird ebenfalls in den zwei unteren Bohrlöchern angesetzt und von 0 kN bis 60 kN gesteigert.

Es werden auch in diesem Fall Schalenelemente (QUADs) verwendet, die aufgrund der nur in Scheibenebene auftretenden Beanspruchung die Gesamtdicke der drei ESG-Scheiben bekommen. Das Ersparen des oberen Bohrloches reduziert auch die für die Modellierung erforderliche, einzugebende Knotenanzahl. Die Netzfeinheit wird um den Faktor zwei reduziert.

Die Zwischenschichten zur Lastübertragung vom Glasschwert auf den Stahlschuh werden sowohl für den Mörtel, als auch für die Klotzungen durch auf Zug ausfallende Federn modelliert. Abhängig vom Material werden die entsprechenden Materialeigenschaften eingegeben ($E_{\text{Mörtel}} = 3245 \text{ N/mm}^2$, $E_{\text{POM}} = 2000 \text{ N/mm}^2$). Für die Federn auf der geneigten Kante muss zusätzlich noch die entsprechende Wirkungsrichtung senkrecht zu der Kante eingegeben werden. Diese ändert sich für jeden analysierten Winkel.

Für die Federsteifigkeiten ergeben sich aufgrund der zweimal größeren Einflussflächen, doppelt so große Werte, wie die im Kapitel 6. Für die Zwischenschicht aus Mörtel wird ein Wert von $C_p = 97350 \text{ N/mm}$ errechnet.

7.2 Gevoutetes Glasschwert ohne Knick

In diesem Kapitel wird anhand des gevouteten Glasschwertes ohne Knick, mit Mörtel als Zwischenschicht, der Einfluss des Winkels auf die Hauptzugspannungen im Glas und auf die Druckspannungen im Mörtel untersucht. Dabei wird der Winkel von 2 bis 6 Grad variiert, indem man den Punkt wo beim rechteckigen Glasschwert der Knick liegt, fix hält. Dieser Punkt befindet sich 700 mm vom oberen Rand nach unten entfernt und weist einen Abstand von 500 mm zur geraden Kante (die Glasschwertbreite in diesem Punkt beträgt 500 mm). Ein Winkel, der mehr als 6 Grad beträgt würde bei dieser Vorgehensweise eine zu geringe Breite der unteren Glaskante ergeben. Wenn man einen weiter unten liegenden Drehpunkt auswählt (zum Beispiel eine fixe Breite der unteren Kante behalten), entsteht eine aus architektonischen Gründen nicht annehmbare, zu große Breite der oberen Kante. Bei kürzeren Glasschwertern ist aber dieses durchaus vorstellbar.

Zusätzlich werden für den als optimal gefundenen Winkel die Varianten mit Mörtel und mit Klotzungen als Zwischenschicht miteinander verglichen. Für die Auswahl der Abstände und Längen der Klotzungen richtet man sich an den im Kapitel 6 ermittelten optimalen Werte.

In der Abb. 7.3 sind die Glasschwertgeometrien für die verschiedenen Winkel dargestellt und ganz links das rechteckige Glasschwert. Man kann feststellen, dass durch den gewählten Drehpunkt für die geneigte Kante bei den Winkeln von 2 und 3 Grad die untere Kante des gevouteten Glasschwertes breiter als bei dem rechteckigen Glasschwert ist. Bei den restlichen Winkeln ist diese Kante schmaler. Dieser Zusammenhang spiegelt sich in den maximalen Verschiebungen am unteren Ende des Glasschwertes wider und kann in dem Diagramm in Abb. 7.4 beobachtet werden.

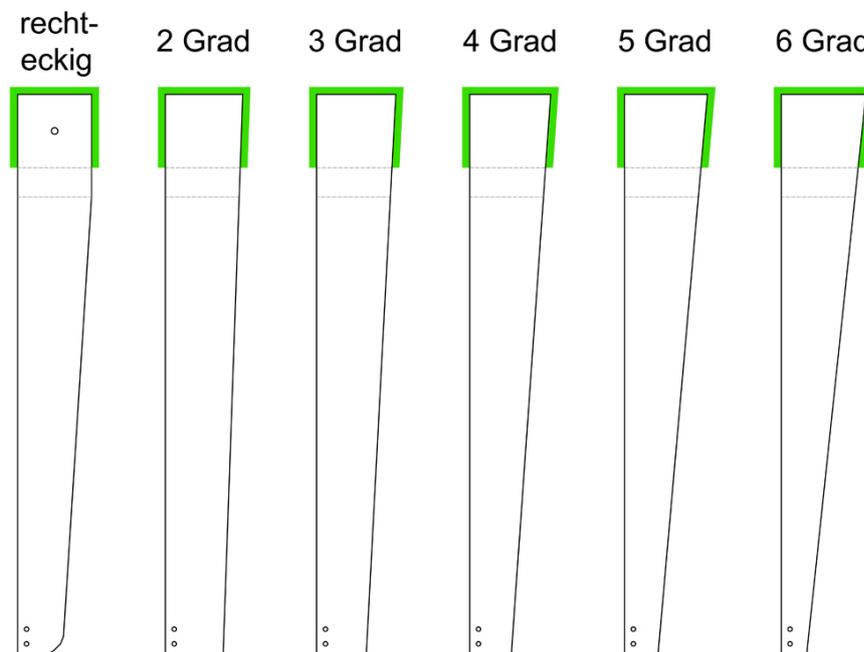


Abb. 7.3 Übersicht der Geometrien für die Variation des Winkels beim gevouteten Glasschwert ohne Knick

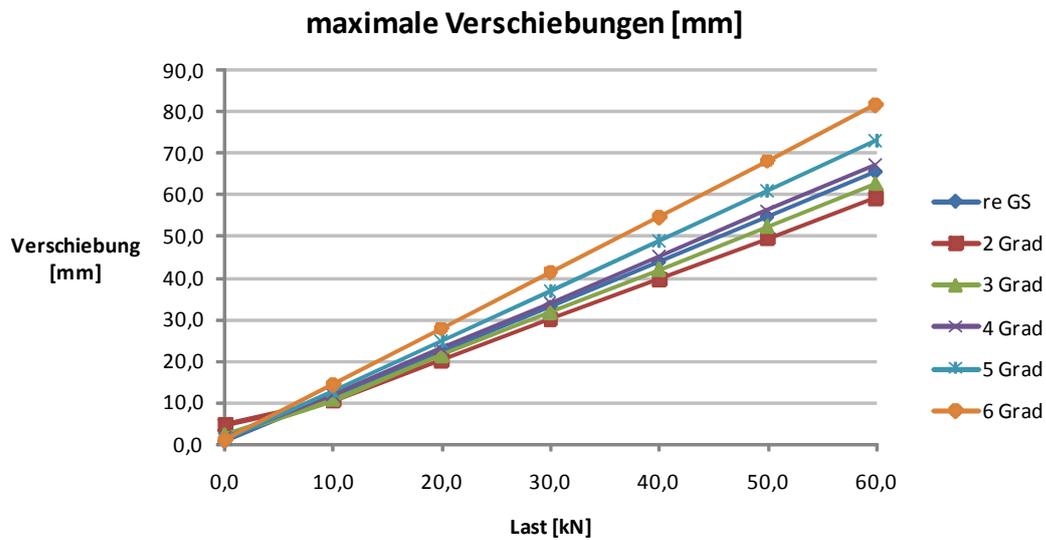


Abb. 7.4 Gevoutetes Glasschwert ohne Knick - maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende, abhängig von der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen

Im Unterschied dazu bleiben die Hauptzugspannungen im Glas (aus der globalen Biegung) bei den unterschiedlichen Winkeln fast konstant (siehe Abb. 7.5). Dieses ist darauf zurückzuführen, dass sich der Drehpunkt nahe dem Einspannbereich befindet, so dass sich das Widerstandsmoment des Glasschwertquerschnittes in diesem Bereich nur geringfügig ändert.

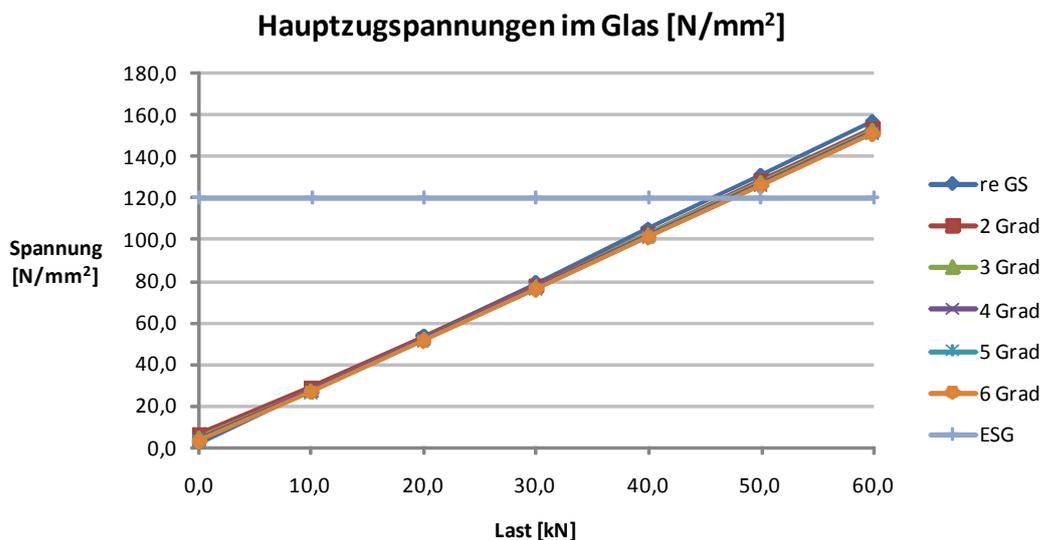


Abb. 7.5 Gevoutetes Glasschwert ohne Knick - Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Größe der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen

Auch die Spannungen im Mörtel bleiben bei den verschiedenen Winkeln fast konstant (siehe Diagramm in Abb. 7.6). Die maximalen Druckspannungen treten erwartungsgemäß im Bereich der geneigten Kante auf. Aus dem Diagramm kann man auch feststellen, dass die maximale Druckfestigkeit des Mörtels Hilti HIT-HY 70 bei einer Windlast von etwa 16 kN erreicht wird. Ohne die verschiedenen Sicherheitsbeiwerte für Mörtel und Glas zu berücksichtigen, kann vermutet werden, dass ein Versagen im Mörtel vor einem Glasbruch zu erwarten ist.

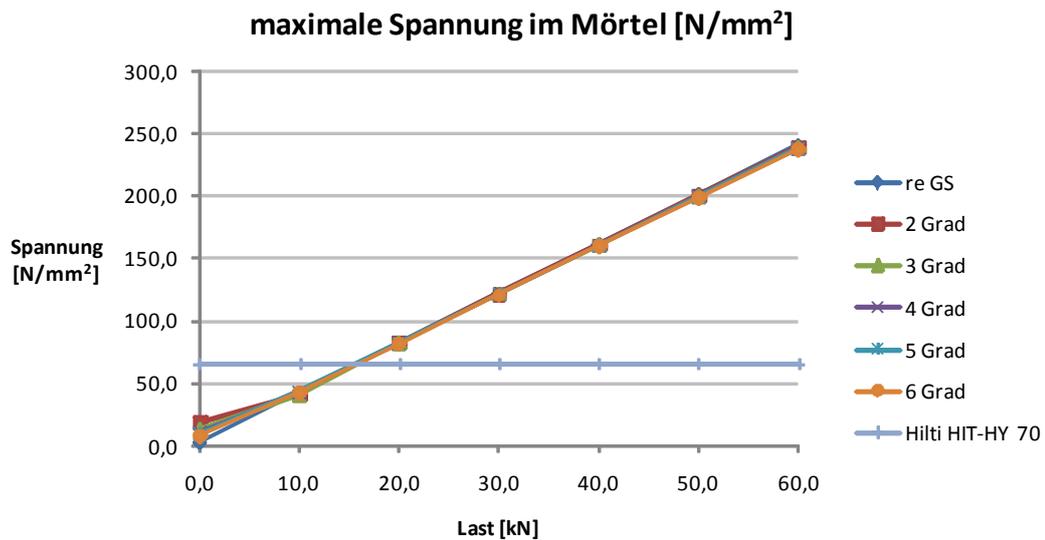


Abb. 7.6 *Gevoutetes Glasschwert ohne Knick - maximale Druckspannungen im Mörtel (Absolutwerte), abhängig von der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen*

7.2.1 Vergleich zwischen Mörtel und Klotzung

Für einen Winkel von 5 Grad wird das gevoutete Glasschwert ohne Knick mit Klotzungen als Zwischenschicht gerechnet. Dabei werden die Klotzungen in einem Abstand von 40 mm zu den Ecken modelliert. Die Länge der Klotzungen an den seitlichen Kanten betragen jeweils 80 mm, die der Klotzungen am oberen Rand nur je 50 mm. Um den Einspannbereich gleich lang wie bei der Variante mit Mörtel zu behalten wird der Abstand zwischen den Klotzungen an den seitlichen Kanten mit 260 mm gewählt. Dieser könnte aber auch kürzer ausgeführt werden (beim rechteckigen Glasschwert wurde ein Wert von 200 mm ermittelt).

Da der Einspannbereich und die Geometrie gleich bleiben, verändern sich die maximale Verformung und die Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung nur ganz geringfügig. Auf diese wird daher nicht näher eingegangen. Interessant ist es aber, welche Spannungen in den Zwischenschichten und in deren Nähe im Glas auftreten. Da aber diese direkt vom E-Modul der Materialien abhängig sind und dieser im Falle von POM nicht genau bekannt ist, muss die Genauigkeit der hier angeführten Ergebnisse durch Versuche abgesichert werden.

In Abb. 7.7 wird gezeigt, dass die Druckspannungen in den Klotzungen höher als im Mörtel ausfallen, obwohl der angenommene E-Modul der Klotzungen (POM) geringer als der des Mörtels (Hilti HIT-HY

70) mit Querdehnungsbehinderung ist. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass die gleichen Lasten über eine geringere Fläche eingeleitet werden.

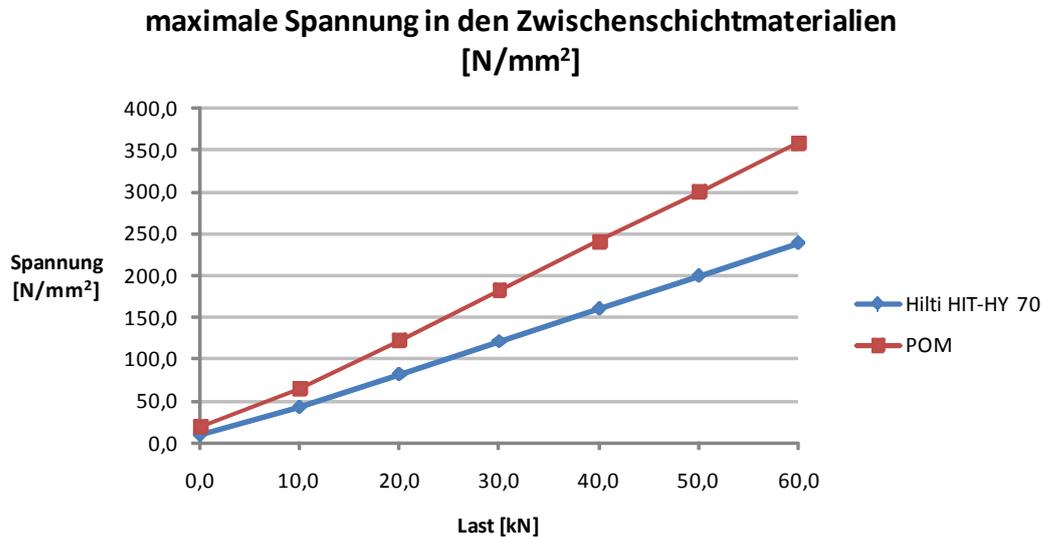


Abb. 7.7 Vergleich der Druckspannungen (Absolutwerte) in den Zwischenschichten (Mörtel und Klotzung) für das gevoutete Glasschwert ohne Knick mit einem Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen von 5 Grad

In der Abb. 7.8 ist ersichtlich wie sich die Hauptspannungen im Glas abhängig von der Art und Größe der Zwischenschichten verhalten. Links ist eine durchgehende Lagerung durch Mörtel und rechts eine lokale Lagerung durch Klotzungen modelliert. Man stellt fest, dass durch die konzentrierte Lasteinleitung durch Klotzungen in deren Nähe höhere Druckspannungen entstehen.

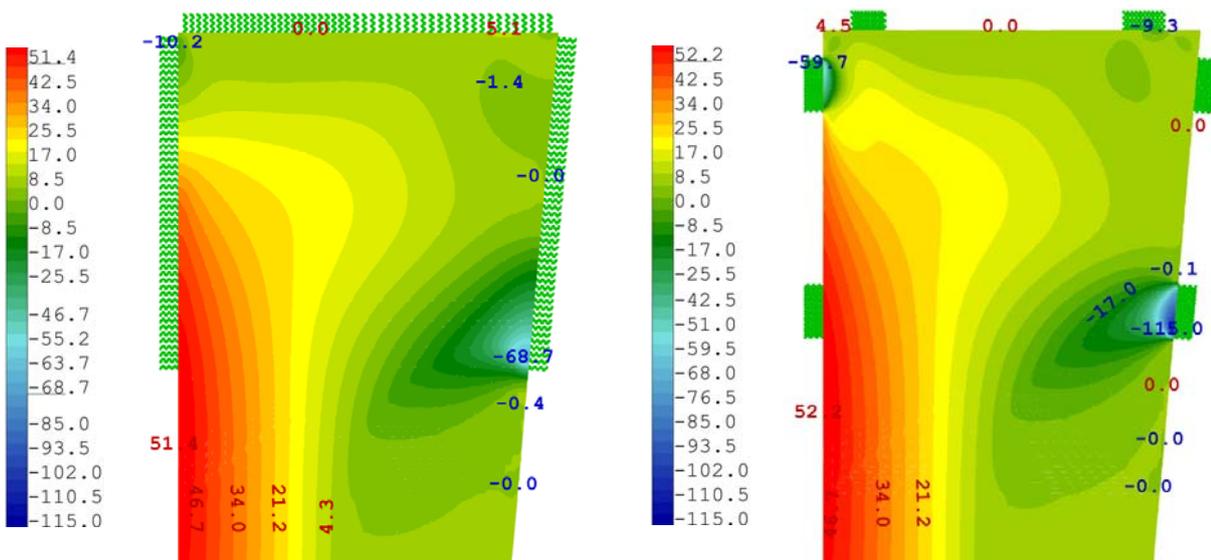


Abb. 7.8 Vergleich der Hauptspannungen [N/mm²] im Glas bei einem Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen von 5 Grad, einer Windlast von 20 kN und verschiedenen Zwischenschichtmaterialien - links mit Mörtel; rechts mit Klotzungen

7.3 Gevoutetes Glasschwert mit Knick

Obwohl diese Variante für die Herstellung einen Mehraufwand erfordert, wird der Einfluss des Winkels untersucht um einen Vergleich mit der Variante ohne Knick zu ermöglichen. Der Drehpunkt für die geneigte Kante bleibt in diesem Fall der gleiche (700 mm vom oberen Rand nach unten entfernt und weist einen Abstand von 500 mm zur geraden Kante), aber es wird nur für den Teil der Kante die über diesem Punkt liegt die Neigung geändert. Der Teil unter diesem Punkt bleibt gleich wie bei dem rechteckigen Glasschwert. Der Winkel wird hier zwischen 2 und 8 Grad variiert.

In der Abb. 7.9 wird eine Übersicht der verschiedenen Winkel gezeigt. Man kann feststellen, dass die untere Kante des Glasschwertes konstant bleibt und, dass bei den Winkeln von 2 und 3 Grad der Knick nach außen erfolgt. Ab einem Winkel von 4 Grad erfolgt der Knick aber nach innen, so dass in diesem Punkt ein Bohrloch erforderlich ist, um die Schnitte herzustellen. Vorteilhaft ist aber, dass ein höherer Winkel der geneigten Kante nur die Größe des Einspannbereiches verändert, nicht aber die Breite des unteren Glasschwertteiles.

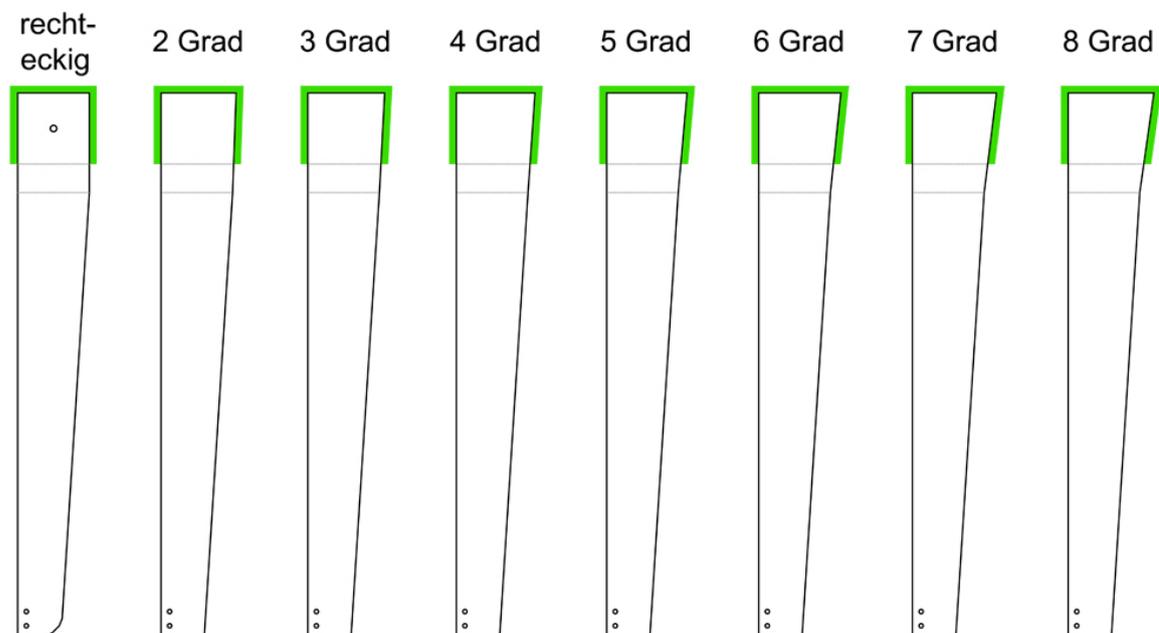


Abb. 7.9 Übersicht der Geometrien für die Variation des Winkels beim gevouteten Glasschwert mit Knick

Aus der Abb. 7.10 kann festgestellt werden, dass die maximalen Verschiebungen am unteren Glasschwertende bei den verschiedenen Winkeln konstant bleiben. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass im Unterschied zur Variante ohne Knick, bei dieser Variante der Querschnitt des Glasschwertes in diesem Bereich gleich gehalten wird.

Die Änderungen der Hauptzugspannungen im Glas sind in der Abb. 7.11 dargestellt und sehen ähnlich wie bei der Variante ohne Knick aus, da sich das Widerstandsmoment in diesem Bereich in gleicher Weise geringfügig verändert (der Drehpunkt für die unterschiedlichen Neigungen bleibt der gleiche).

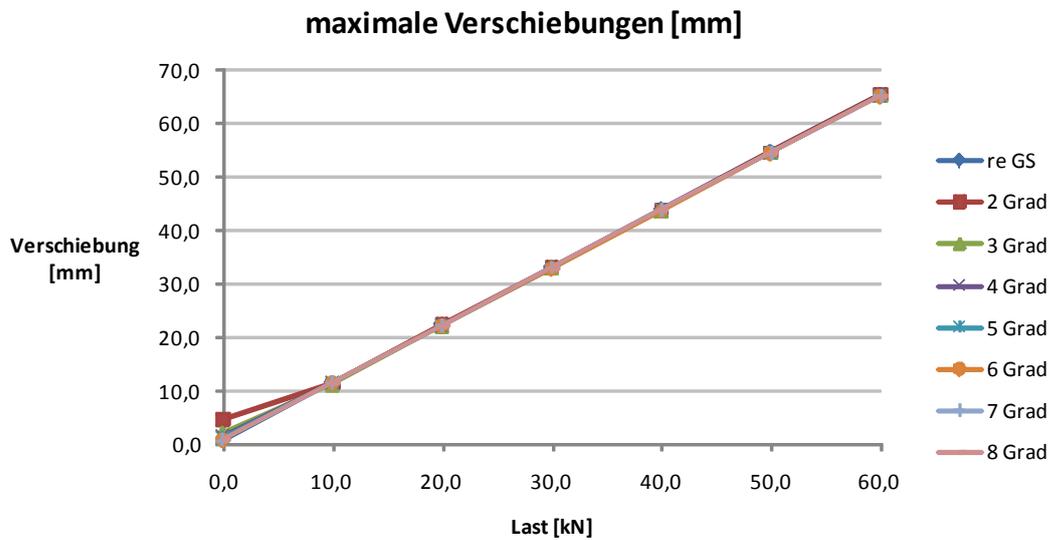


Abb. 7.10 Gevoutetes Glasschwert mit Knick - maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende, abhängig von der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen

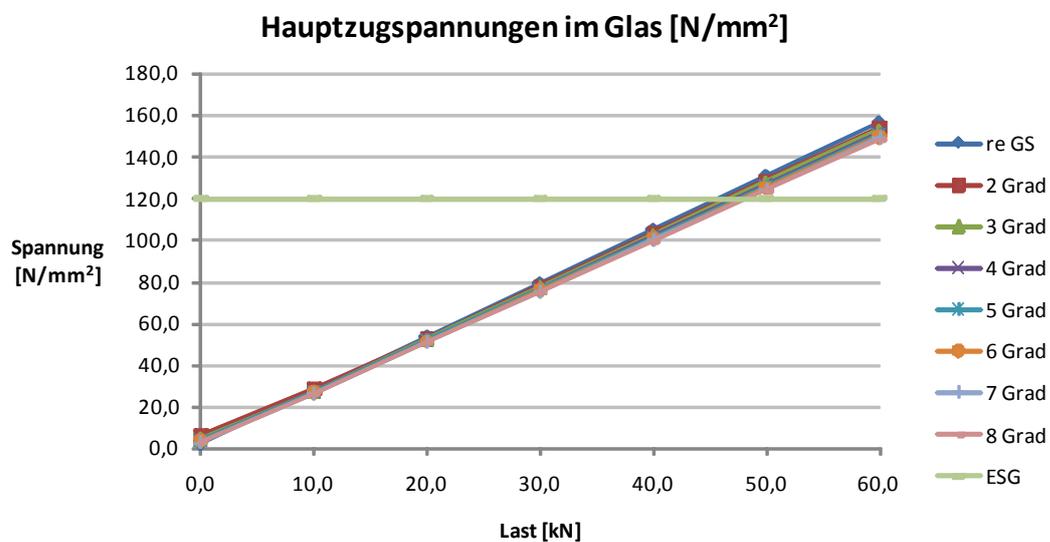


Abb. 7.11 Gevoutetes Glasschwert mit Knick - Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Größe der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen

In der Abb. 7.12 ist ersichtlich, dass sich die Druckspannungen im Mörtel gleich verhalten wie bei der Variante ohne Knick und über die verschiedenen Winkel konstant bleiben.

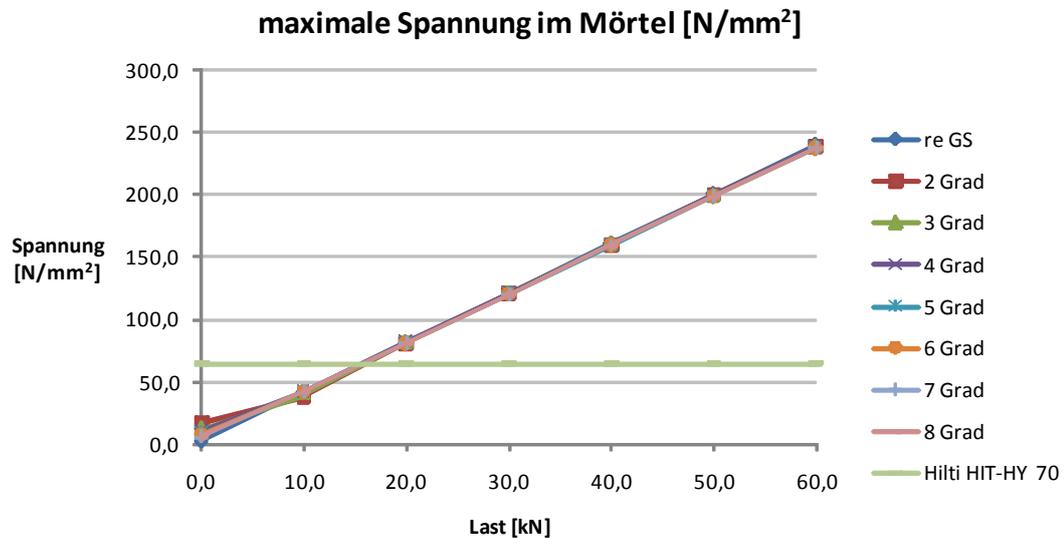


Abb. 7.12 *Gevoutetes Glasschwert mit Knick - maximale Druckspannungen im Mörtel (Absolutwerte), abhängig von der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen*

Für diese Variante wird auf einen Vergleich mit Klotzungen als Zwischenschicht verzichtet. Die Möglichkeit dieser Ausführung besteht aber gleichermaßen wie bei der Variante des gevouteten Glasschwertes ohne Knick.

Somit kann zusammengefasst werden, dass der einzige Vorteil des Knickes in der Möglichkeit höherer Neigungen liegt. Wird die Zwischenschicht aus Mörtel ausgebildet, kann dieser paßgenau injiziert werden, so dass auch kleine Winkel vorstellbar sind. Werden Klotzungen für die Lasteinleitung im Stahlschuh verwendet, muss anhand von Versuchen bestimmt werden, ob die kleinen Winkel von bis zu 6 Grad ausreichen, oder ob die Klotzungsmaterialien die Ungenauigkeiten des Glases und des Stahles nicht genügend ausgleichen können und das Glasschwert aus der vorgesehenen Lage ausrutschen kann.

8

Versuchsaufbau und Prüfkörper

Vorgehensweise
Randbedingungen
Messtechnik
Optimierung der Prüfkörper
Sonstiges

8.1 Vorgehensweise

Um die in den letzten zwei Kapiteln durchgeführten Untersuchungen abzu prüfen werden Versuche an hängenden Glasschwertern durchgeführt. Die hängende Anordnung ist vor allem zur Bewertung der Resttragfähigkeit nach dem Bruch einer oder mehrerer Scheiben erforderlich.

Um den Versuchsaufbau zu entwerfen sind verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen. Diese hängen einerseits von der Geometrie der Prüfkörper und andererseits von den Möglichkeiten, die das Labor bietet ab. Zusätzlich müssen noch die zu verwendenden Messtechniken in den Überlegungen miteinbezogen werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit geplanten Versuche wird folgender Weise vorgegangen:

- ◆ als Erstes wird die ungefähre Geometrie der Prüfkörper bestimmt - diese muss nicht mit der Geometrie aus den numerischen Untersuchungen vollkommen übereinstimmen; es können zum Beispiel kürzere Glasschwerter mit erhöhter Belastung verwendet werden
- ◆ zweitens werden mit der festgelegten Geometrie die Randbedingungen, die das Labor stellt untersucht
- ◆ drittens wird die erforderliche Messtechnik festgelegt
- ◆ als Nächstes werden die Stahlschuhe für die aufzubringenden Lasten bemessen
- ◆ anschliessend wird die Geometrie der Prüfkörper an den Laborbedingungen und an die zu verwendende Messtechnik angepasst
- ◆ zuletzt muss noch die Anzahl der Versuche festgelegt werden - um von einer Versuchsreihe sprechen zu können sind mindestens drei Versuche pro Versuchskörperart erforderlich

Bei der Ausgangsgeometrie für den Entwurf des Versuchsaufbaus wird überlegt den Einspannbereich in der ursprünglichen Größe beizubehalten und die Länge des Glasschwertes zu verkürzen, um Material und Platz (beim Transport und beim Versuchsaufbau) zu sparen. Gleichzeitig soll die Windlast erhöht werden, um das an der Einspannstelle entstehende Moment zu erhalten.

Es wird eine Länge des Glasschwertes von 2,8 m angenommen. Außerdem wird für die Versuche bei dem rechteckigen Glasschwert auf die Ausrundung unten verzichtet. Die Breite soll im Einspannbereich 0,5 m betragen. Um sich die Herstellung der zwei unteren Bohrlöcher zu ersparen wird die Einlei-

tung der Windlast an der Glaskante geplant. Außerdem wird auf das Aufbringen des Eigengewichtes der Fassadenscheiben verzichtet.

Obwohl ESG laut [32] eine Prüfbiegezugfestigkeit von 120 N/mm^2 aufweist wird die erforderliche einwirkende Windlast so berechnet, dass eine maximale Zugspannung von mindestens 180 N/mm^2 erreicht wird. Die Begründung dafür ist das Sicherstellen des Eintretens eines Glasbruches, unter Annahme einer Sicherheit von 1,5. Da die Breite unter dem Einspannbereich bei dem rechteckigen und bei dem gevouteten Glasschwert etwa gleich ist, wird die Dimensionierung der erforderlichen Lastaufbringung an dem rechteckigen Glasschwert durchgeführt.

Bei dieser Glasschwert-Geometrie mit $2,8 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ und gebildet aus $3 \times 10 \text{ mm}$ ESG ist für das Erreichen einer Hauptzugspannung von 180 N/mm^2 eine Winddrucklast von etwa 100 kN erforderlich.

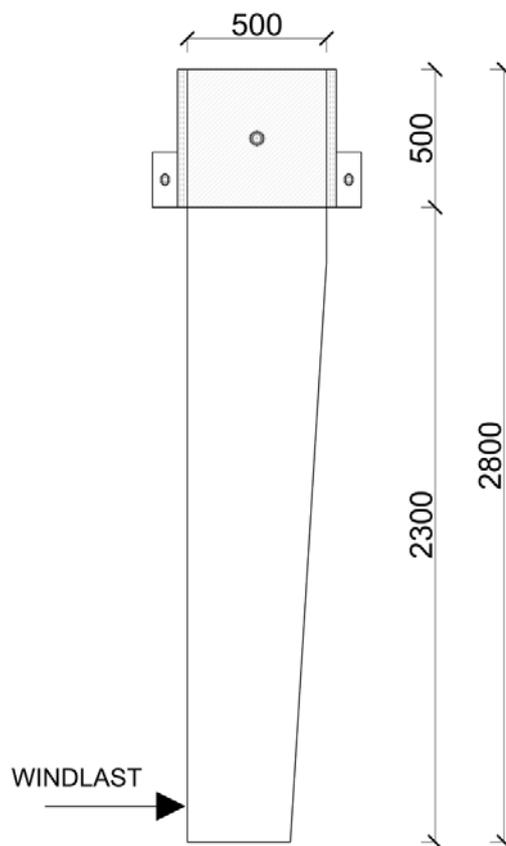


Abb. 8.1 Prüfkörpergeometrie - erster Entwurf

Mit dieser gewünschten Prüfkörpergeometrie erfolgen Untersuchungen der Laborrandbedingungen, der Messtechnik und eine Bemessung der Stahlschuhe, um zu klären ob die Versuche mit den vorhandenen Prüfeinrichtungen in dieser Form durchführbar sind oder ob die Prüfkörpergeometrie an verschiedene Randbedingungen angepasst werden muss.

8.2 Randbedingungen

In jedem Labor oder Prüfanstalt sind bestimmte Prüfeinrichtungen vorhanden, an denen die durchzuführenden Versuche angepasst werden müssen. Sind Abweichungen von diesen vorgegebenen Prüfeinrichtungen erforderlich entstehen in der Regel hohe zusätzliche Kosten. Für die im Rahmen dieser Arbeit geplanten Versuche haben folgende Randbedingungen eine große Bedeutung:

- ♦ die Größe des Prüfstandes und die Anschlussmöglichkeiten, die dieser für die Prüfkörper aufweist - bestimmt die mögliche Länge der Glasschwerter und den Anschluss am Prüfstand
- ♦ die maximal mögliche Drucklast, die mit den vorhandenen Hydraulikzylinder zu erreichen ist - kann auch die Länge der Glasschwerter bestimmen
- ♦ die Befestigung des Druckzylinders - bestimmt die Achse in der das Glasschwert liegen muss, die Lage des Hydraulikzylinders und teilweise den möglichen Hub des Hydraulikzylinders.

Nachdem diese Punkte aufgezählt wurden wird im Folgenden auf sie tiefer eingegangen und gezeigt wie sie die Prüfkörpergeometrie beeinflussen.

In der Abb. 8.2 wird eine Skizze des Prüfrahmens gezeigt, an dem die Versuche durchgeführt werden sollen. Um die Glasschwerter hängend anzuschliessen bietet sich nur die Möglichkeit, die Stahlschuhe durch Schraubenverbindungen unter Berücksichtigung des vorhandenen Lochbildes an dem Prüfstand zu befestigen, da weder Schweißverbindungen, noch die Bohrung neuer Löcher möglich ist.

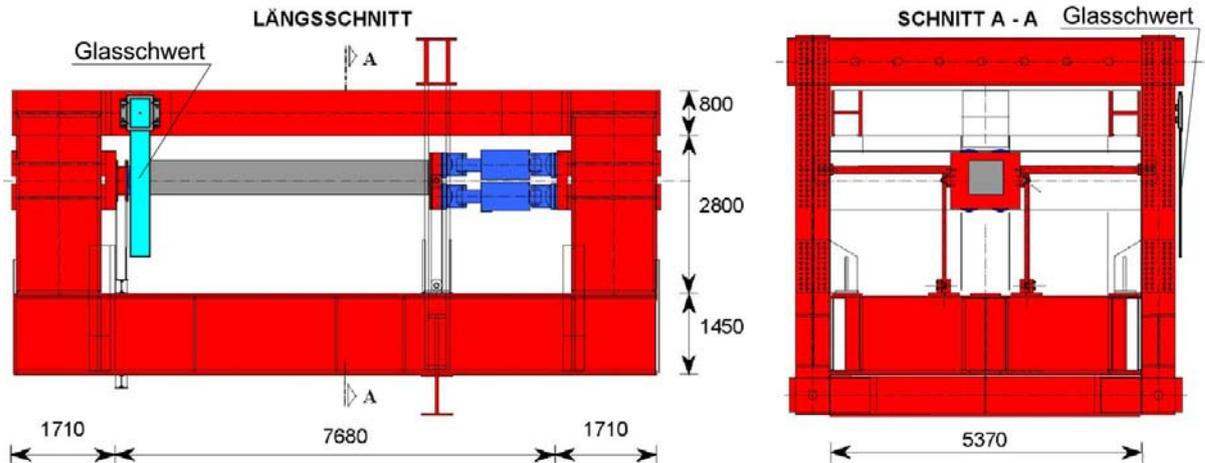


Abb. 8.2 Skizze des Prüfrahmens, an dem die Glasschwerter für die Versuche befestigt werden sollen [46]

Die Abb. 8.3 zeigt den Prüfrahm an dem die Glasschwerter angeschlossen werden. Der eingekreiste Laschenstoss bietet die Möglichkeit den Stahlschuh mit M27 Schrauben zu befestigen. Durch diese Befestigung ist die Lage der Glasschwerter senkrecht zum Laschenstoss festgelegt. Man kann diese nur mit Distanzringe geringfügig in einer Richtung ändern. Parallel zum Laschenstoss liegt für die Befestigung eine gewisse Flexibilität vor, da das Schraubenbild des Laschenstosses breiter als der Abstand zwischen den Schrauben des Stahlschuhes ist.



Abb. 8.3 Prüfraumen mit Laschenstoss, an dem die Glasschwerter befestigt werden

Die durch den verwendeten Hydraulikzylinder maximal aufbringbare Druckkraft (etwa 450 kN) beträgt ein Vielfaches der für die geplanten Versuche erforderliche Kraft. Daher ist dieses kein Kriterium für eine Anpassung der Geometrie. Da die Lage des Glasschwertes senkrecht zum Laschenstoss (und zum Prüfraumen) durch den Anschluss fix ist, muss der Hydraulikzylinder so eingerichtet werden, dass seine Wirkungsachse in der Mitte des Glasschwertes liegt.



Abb. 8.4 Links: Aufbau des Hydraulikzylinders; Rechts: Hydraulikzylinder

In Abb. 8.4 wird der für die Versuche zu verwendende Hydraulikzylinder und seine Lage gezeigt. Um eine kinematische Kette auszuschließen (aufgrund der Kalottenlager) werden zwei Kraftmessdosen verwendet. Quer zu seiner Wirkungsachse wird der Zylinder vor jedem Versuch justiert und dann durch den aufgebauten Druck gegen das Glasschwert gehalten. Der aufgebaute Druck wird über einen Stahlträger in die dahinter liegende Betonwand eingeleitet. Aufgrund des Aufbaues des Zylinders müssen

die Glasschwerter ganz rechts an dem Laschenstoss am Prüfrahmen befestigt werden. Die in der Abb. 8.4 rechts sichtbare Holzlatte über dem Hydraulikzylinder dient zur Befestigung eines induktiven Wegaufnehmers an dem Prüfrahmen.

8.3 Messtechnik

In der Mechanik können die experimentellen Untersuchungen in Werkstoffversuche und Versuche an Strukturen eingeteilt werden. Bei den ersten werden die mechanischen Eigenschaften von Materialien bestimmt, um nachträglich mit Hilfe der Numerik Materialmodelle zu erstellen. Strukturversuche können sowohl im Labor, als auch vor Ort stattfinden und kommen für folgende Aufgaben zur Anwendung [15]:

- ◆ Beanspruchungs- und Verformungsanalysen
- ◆ Überprüfung von analytischen und numerischen Berechnungen
- ◆ Bestimmung der vorhandenen Tragreserven von Bauteilen
- ◆ Optimierung von Konstruktionen

Sowohl im Falle von Werkstoffversuchen, als auch im Falle von Strukturversuchen ist die Auswahl einer geeigneten Messtechnik von großer Bedeutung. In der Regel sind bei allen in der Mechanik zur Anwendung kommenden Messverfahren, die erhaltenen Ergebnisse geometrische Größen, wie Verschiebungen und Verzerrungen. Die direkte Messung von Kräften und Spannungen setzt die Kenntnis der Materialeigenschaften des Prüfkörpers voraus.

Eine erste Einteilung der Messverfahren erfolgt nach dem physikalischen Messprinzip in [15]:

- ◆ elektrische Messverfahren - es handelt sich dabei um Punktmessverfahren (Wegaufnehmer, Dehnungsmessstreifen)
- ◆ optische Messverfahren - sind in der Regel Feldmessverfahren (Spannungsoptik, Speckle-Interferometrie, Photogrammetrie)

Bei den elektrischen Messverfahren wird die Änderung einer elektrischen Größe (OHM'sche Widerstand, Induktivität, Kapazität) infolge einer mechanischen Einwirkung gemessen. Die Bestandteile einer solchen Einrichtung sind in der Regel ein Messwertaufnehmer, ein Messwertverstärker und eine Messdatenverarbeitungseinheit. Diese Verfahren sind vorteilhaft, da elektrische Signale mit geringem Aufwand und hoher Genauigkeit gemessen werden können.

Im Unterschied zu den elektrischen Messverfahren liefern die optischen Messverfahren flächenhafte Messinformationen. Der Nachteil liegt in der geringeren Genauigkeit, welche für viele Anwendungen nur eine qualitative Erfassung der mechanischen Größen ermöglicht.

Im Folgenden wird kurz auf die Messverfahren eingegangen, die für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Versuche in Frage kommen.

8.3.1 Wegaufnehmer

Wegaufnehmer werden, wie auch der Name sagt, zur Messung von Wegen (Verschiebungen) eingesetzt. Abhängig von der gemessenen Größe werden hauptsächlich folgende Aufnehmertypen unterschieden [15]:

- ◆ Potentiometeraufnehmer - weisen eine hohe Messauflösung auf und sind für die Messung von großen Längen-(bis 1 m) und Winkeländerungen geeignet
- ◆ Induktive Aufnehmer - erreichen eine hohe Messgenauigkeit und sind leicht zu bedienen; es wird die Änderung der Induktivität einer Spule gemessen, die durch die Änderung der Eintauchtiefe eines Tauchankers infolge einer Verschiebung entsteht (siehe Abb. 8.5 links)
- ◆ Kapazitive Aufnehmer - sind einfach aufgebaut, können auch bei hohen Temperaturen bis etwa 600°C eingesetzt werden und können Abstände zwischen 0,1 und 10 mm berührungslos messen; Längen- und Neigungsänderungen werden als Kapazitätsänderungen gemessen.

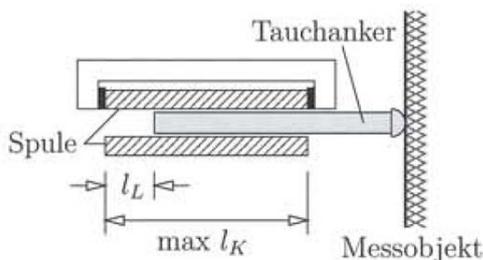


Abb. 8.5 Induktive Wegaufnehmer - Links: Wirkungsprinzip; Rechts: Beispiele [15]

8.3.2 Dehnungsmessstreifen (DMS)

Dieses Messverfahren wird für die Erfassung von Verzerrungen aufgrund ihrer Vielseitigkeit am meisten verwendet. Bei der Messung wird die relative Änderung des OHM'schen Widerstandes $\Delta R / R$ gemessen, welche direkt proportional zu der aufgetragenen Verzerrung ϵ ist ($\Delta R / R = k \times \epsilon$). Die Konstante k berücksichtigt den spezifischen Widerstand und den Durchmesser des Leiters und wird vom Hersteller angegeben. Diese Vorgehensweise beruht auf die Tatsache, dass sich mit der Änderung der Länge eines elektrischen Leiters auch dessen OHM'sche Widerstand verändert.

In der Abb. 8.6 sind die Bestandteile eines Folien-DMS ersichtlich. Die Trägerfolie wird in der Regel aus Kunststoff hergestellt. Darauf wird eine elektrisch leitende Metallfolie aufgebracht, die etwa 5 μm dick ist, aus Konstantan (Cu-Ni-Legierung) besteht und aus der, mittels Foto-Ätzverfahren, das Messgitter hergestellt wird. Die Richtung, in der die Verzerrungen gemessen werden, wird durch die mäanderförmig angeordneten Leiterbahnen (etwa 30-50 μm breit) angegeben. Diese sind an den Umkehrbögen verstärkt ausgeführt um die Widerstandsänderungen aus Querdehnungen zu verringern [15].

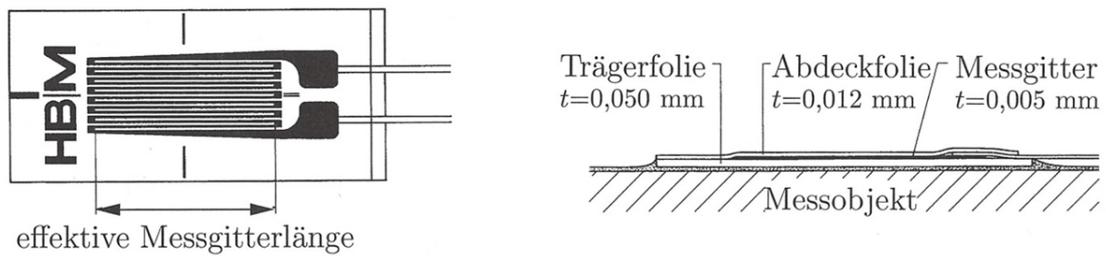


Abb. 8.6 Schema eines Folien-DMS [15]

In der Regel werden DMS mit Nennwiderständen von 120 und 350 Ohm hergestellt, deren Messgitterlänge zwischen 0,5 und 200 mm beträgt. Für Verzerrungen bis etwa $1500 \mu\text{m}/\text{m}$ ($1,5 \times 10^{-3}$) wird eine Genauigkeit von 0,1% des Messwertes erreicht, wobei sich die untere Messgrenze bei Verzerrungen von etwa $1 \mu\text{m}/\text{m}$ ($1,0 \times 10^{-6}$) befindet.

Verschiedene Ausführungsarten von linearen DMS und DMS-Rosetten werden in Abb. 8.7 dargestellt.

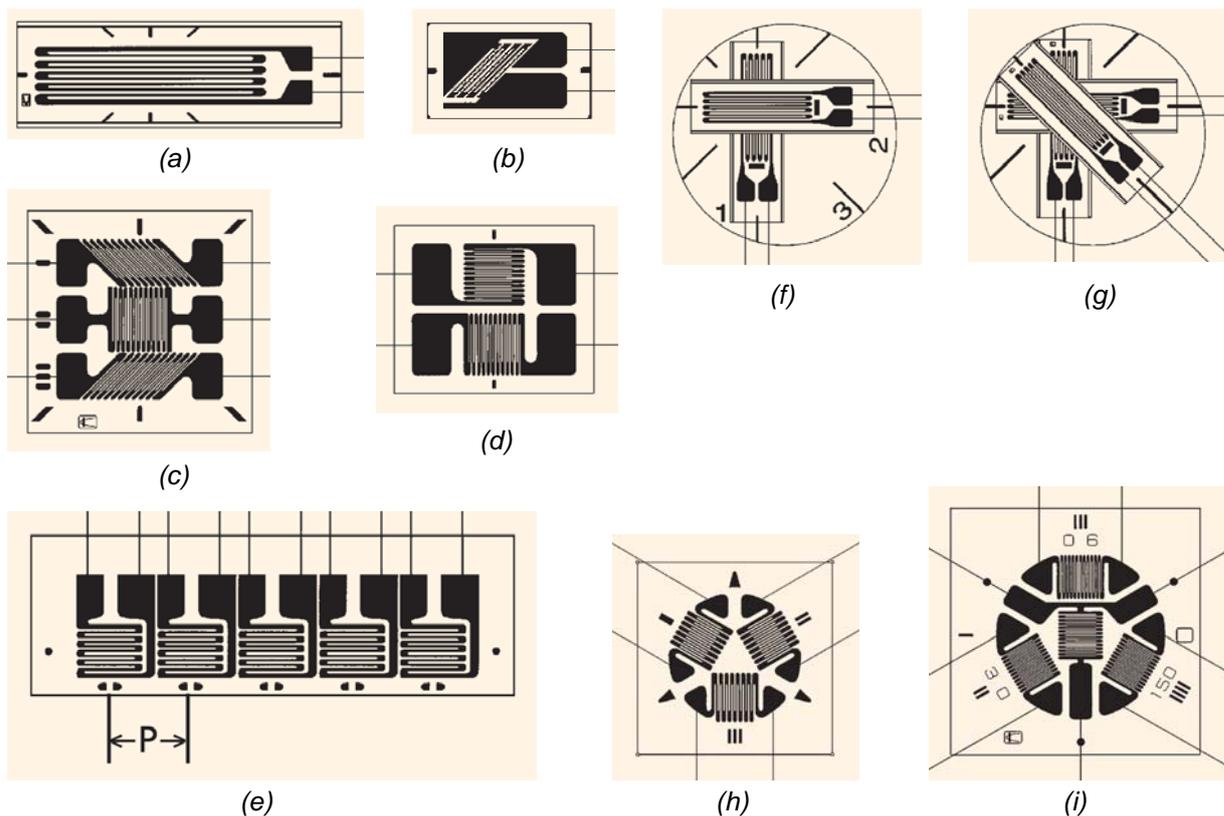


Abb. 8.7 Ausführungsarten von Folien-DMS [ZSE-DMS-Katalog]: (a) Linearstreifen; (b) 45°-Linearstreifen für Schubdehnung; (c) 0°/90°-Doppel-Messgitter-DMS; (d) 0°/45°/90°-Dreifach-Messgitter-DMS; (e) Messkette mit 5 Messgittern; (f) 0°/90°-Rosette mit zwei gestapelten Gittern; (g) 0°/45°/90°-Rosette mit drei gestapelten Gittern; (h) 0°/60°/120°-Dreifach-Messgitter-DMS; (i) 0°/30°/90°/150°-Vierfach-Messgitter-DMS

Bei der Auswahl der für eine bestimmte Aufgabe geeigneten DMS-Art sind die Messbedingungen, die gewünschten Messwerte und die gewünschte Genauigkeit zu berücksichtigen. Zusätzlich muss der qualitative Verzerrungszustand bekannt sein (gleichmässig oder ungleichmässig) und abhängig von der Kenntnis der Verzerrungsrichtung die Anzahl der Messrichtungen festgelegt werden.

8.3.3 Photogrammetrische Messung

Ein optisches Messverfahren, das sich in den letzten Jahren in Richtung einer höheren Genauigkeit entwickelt hat, bietet die „Gesellschaft für optische Messtechnik“ (GOM) aus Deutschland durch das System ARAMIS an, welches auf die digitale Bildverarbeitung beruht und für dreidimensionale Koordinatenmessungen und Deformationsmessungen von Bauteilen eingesetzt wird. Die Schrittfolge während einer Messung kann folgender Weise gegliedert werden [47]:

- ◆ als Erstes wird der mobile ARAMIS Sensor auf die erforderliche Probengröße eingestellt und vor der Probe aufgestellt
- ◆ während der Belastung von Prüfkörpern werden Bilder mit hoher Auflösung und Analogdaten erfasst
- ◆ in der Auswertung berechnet ARAMIS 3D-Koordinaten für alle Laststufen und ermittelt Kontur-, Verschiebungs- und Dehnungsergebnisse
- ◆ anschliessend können die Ergebnisse als 3D-Visualisierungen, Diagramme, Tabellen, Videos oder Bilder ausgegeben werden



Abb. 8.8 Links: Photogrammetrische Messung mit Aramis bei einem Zugversuch; Rechts: ARAMIS Messgerät (Kamera) [47]

Die wichtigsten Anwendungsgebiete von ARAMIS sind:

- ◆ die Bestimmung von Materialeigenschaften - Spannungs-Dehnungs-Auswertungen, E-Modul, Schubmodul, Querdehnungszahl, Eigenspannungen
- ◆ Bauteilprüfung und -analyse - die Messgrößen werden unter realen Einsatzbedingungen und unabhängig von Material, Größe und Geometrie ermittelt; Festigkeitsanalysen, Schwingungsanalysen, Dauerfestigkeitsuntersuchungen und Crash-Tests sind möglich
- ◆ Überprüfung von Finite-Elemente-Berechnungen
- ◆ Echtzeitmessung in 3D - wird bei der Steuerung von Prüfmaschinen, bei Schwingungsanalysen und bei Langzeitprüfungen mit geringem Speicherplatzbedarf eingesetzt

Das optische Messsystem ARAMIS bietet einige Vorteile gegenüber elektrischen Punktmessverfahren [47]:

- ◆ 3D-Kontur-, Verschiebungs- und Dehnungsergebnisse werden mit einem einzigen Messgerät ohne die Prüfkörper zu berühren geliefert
- ◆ durch die flächenhafte Messung sind lokale Effekte und das globale Bauteil- und Materialverhalten besser verständlich - dazu wäre eine hohe Anzahl an DMS und Wegaufnehmer erforderlich
- ◆ es sind Dehnungen von 0,01% bis größer als 100% erfassbar
- ◆ lässt sich leicht an verschiedene Messgeschwindigkeiten, Auflösungen und Messbereiche anpassen
- ◆ durch den Sensor Controller wird das Messsystem in die bestehende Prüfumgebung integriert und ein Austausch von analogen Daten mit der Prüfmaschine erfolgt automatisch
- ◆ der ARAMIS Sensor ermöglicht eine Kompensation von Umgebungseinflüssen, eine automatische Überwachung der Sensorkalibrierung und eine Kompensation von Starrkörperbewegungen

8.3.4 Ausgewählte Messtechnik

Bei den geplanten Versuchen kommen folgende Messsysteme zur Anwendung:

- ◆ induktive Wegaufnehmer in der Höhe der Lastaufbringung zur Messung der Verschiebungen zwischen Prüfraumen und Prüfkörper und zwischen Stahlschuh und Glasfinne in Wirkungsrichtung des Zylinders und zwischen Prüfraumen und Glasfinne senkrecht zur Wirkungsrichtung des Zylinders
- ◆ unter der Einspannstelle (ca. maximale Hauptzug- und Hauptdruckspannungen in der Glasfinne) werden Dehnmessstreifen auf den Stirnseiten der äußersten Glasscheiben geklebt
- ◆ der gesamte Einspannbereich des Glasschwertes (eine Höhe von 500 mm von oben gemessen) wird durch eine photogrammetrische Messung mit ARAMIS aufgenommen

Für die photogrammetrische Messung ist die direkte Sicht auf den aufzunehmenden Bereich sicherzustellen. Dazu wird das vordere Deckblech so ausgeführt, dass ein Fenster über diesen Bereich freigelassen wird (siehe Abb. 8.9). Details über die bei den Versuchen verwendete Messtechnik sind im Kapitel 10.1 enthalten.

8.4 Optimierung der Prüfkörper

Nachdem die Randbedingungen, die vom Labor gestellt werden, und die Messtechnik untersucht wurden, muss man vor der Festlegung der Prüfkörpergeometrie die Bestandteile - Stahlschuh und Verbindungsmittel - bemessen. Dabei soll die Ausführung der Stahlschuhe, soweit möglich, den beim Projekt Capital Gate in Abu Dhabi (siehe Kapitel 5.5) verwendeten Stahlschuhen entsprechen. Diese wurden auf Niveau der Bemessungslasten mit Sicherheiten sowohl auf Seite der Einwirkungen, als auch auf Seite des Materials dimensioniert. Bei den Versuchen wird die horizontale Last aber bis zum Glasbruch erhöht, so dass höhere Anforderungen entstehen.

8.4.1 Bemessung

Im Zuge der Bemessung werden die verschiedenen Blechteile des Stahlschuhs und die Verbindungsmittel bemessen. An dieser Stelle werden die einzelnen Schritte in der Bemessung erläutert, ohne aber auf die verwendeten Formeln und durchgeführten Rechnungen einzugehen. Die Sicherheitsbeiwerte werden sowohl auf der Seite der Belastung (eingreifende Lasten sind genau bekannt), als auch auf Seite des Materials mit 1,0 angenommen.

Da die bei den Versuchen eingreifende horizontale Drucklast viel höher als die bei den ausgeführten Stahlschuhen angesetzte Bemessungslast ist, kommt man bei den ersten Nachweisführungen zu der Erkenntnis, dass die Stirnbleche (Blechdicke 15 mm) und die Schweißnähte zwischen Stirnbleche und hinteres Deckblech (siehe Abb. 8.10) versagen. Eine massivere Ausführung dieser Elemente würde zu unwirtschaftlichen Blech- und Schweißnahtdicken führen.

Daher werden folgende zwei Maßnahmen für die Prüfkörper getroffen:

- ♦ die Geometrie wird folgender Weise verändert: die Länge des Glasschwertes wird mit 2,8 m und die Länge des Einspannbereiches mit 0,5 m beibehalten, die Breite wird auf 0,34 m verringert (siehe Abb. 8.9) und die Glasstärke wird auf 3 x 8 mm ESG verringert
- ♦ zur Übertragung der Drucklasten von den Stirnblechen auf das hintere Deckblech werden 8 Steifen (symmetrische Anordnung - siehe Abb. 8.10 und Abb. 8.11) ausgeführt

Laut Bemessung ergibt sich für die Steifen ein Ausnutzungsgrad von 0,95. Bei dieser Ausführung können die Schweißnähte zwischen Stirnbleche und hinteres Deckblech mit einer Dicke von 4 mm ausgeführt werden.

In das vordere Deckblech werden keine Lasten aus dem Eigengewicht der Glasfinne oder aus der Windbeanspruchung eingeleitet. Dieses dient nur als Abschluss für den injizierten Mörtel oder für die Klotzungen und wird mit 4 Sk-Schrauben M12 der Festigkeit 8.8 befestigt (siehe Abb. 8.10 oder Plan 02 und Plan 03 im Anhang). Auf den Nachweis für diese Verbindung wird nicht eingegangen.

Die Anzahl, die Größe und die Lage der Schrauben zur Befestigung der Stahlschuhe an den Prüfstand ist durch das vorhandene Lochbild im Laschenstoss des Prüfstandes vorgegeben. Einzig die Festigkeit der Schrauben kann frei gewählt werden. Es wird somit eine SL-Verbindung mit 4 Schrauben M27 der Festigkeit 10.9 auf Abscheren und auf Lochleibung bemessen. Die zu übertragenden Kräfte entstehen aus dem Eigengewicht des Glasschwertes und aus einer maximal eingreifenden Windlast von 50 kN. Es ergibt sich ein maximaler Ausnutzungsgrad von 0,71.

8.4.2 Prüfkörpergeometrie

In diesem Unterkapitel werden anhand von Abbildungen die in diesem Kapitel entworfenen und ausgearbeiteten Prüfkörper dargestellt. Für eine detailliertere Darstellung mit vollständigen Bemaßungen und Positionsbezeichnungen wird auf die Pläne im Anhang (aufgrund des A3-Formates maßstabslos) verwiesen.

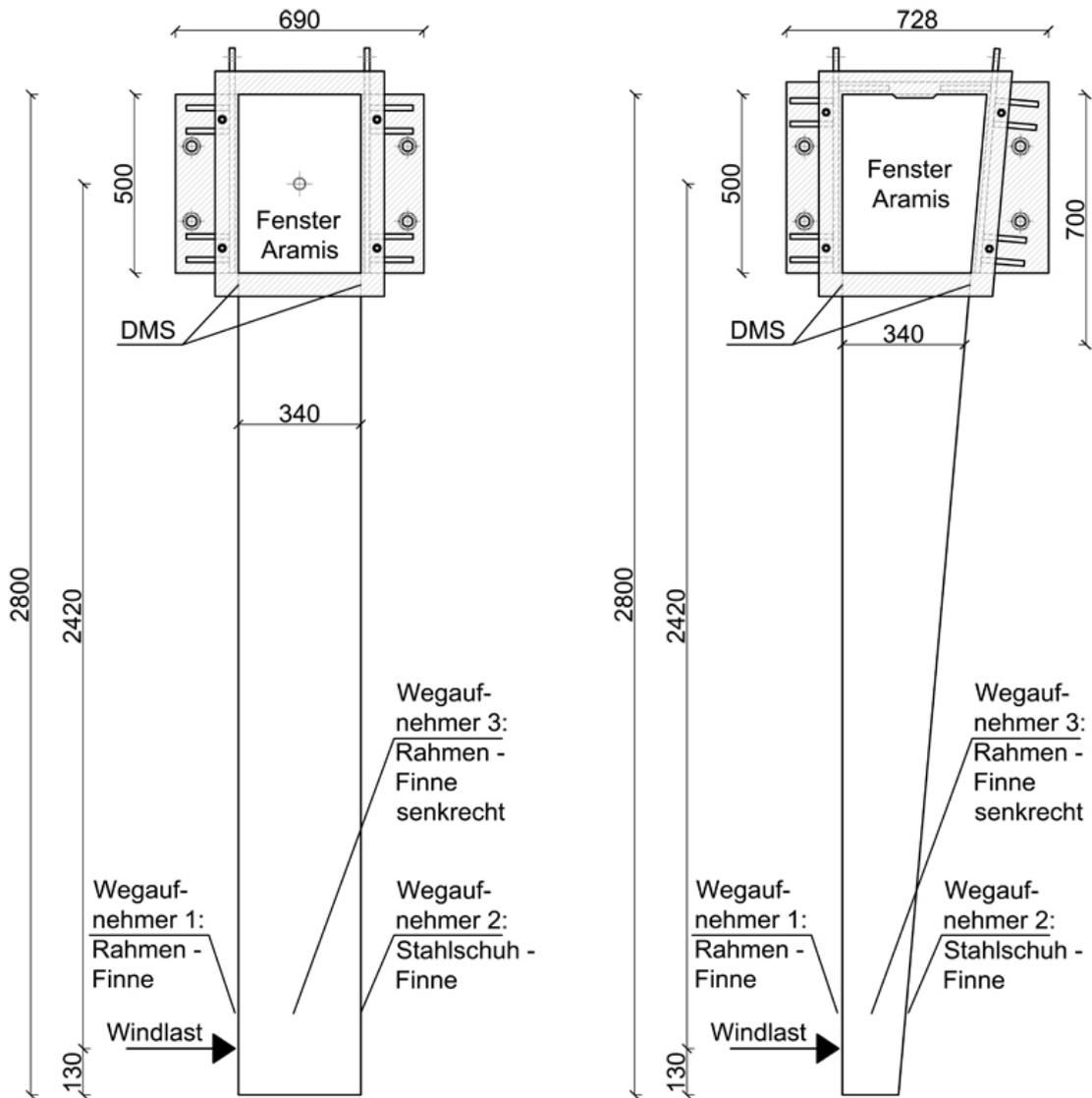


Abb. 8.9 Prüfkörpergeometrie nach Berücksichtigung aller Randbedingungen - Links: Rechteckiges Glasschwert (Glasfinne); Rechts: Gevoutetes Glasschwert (Glasfinne)

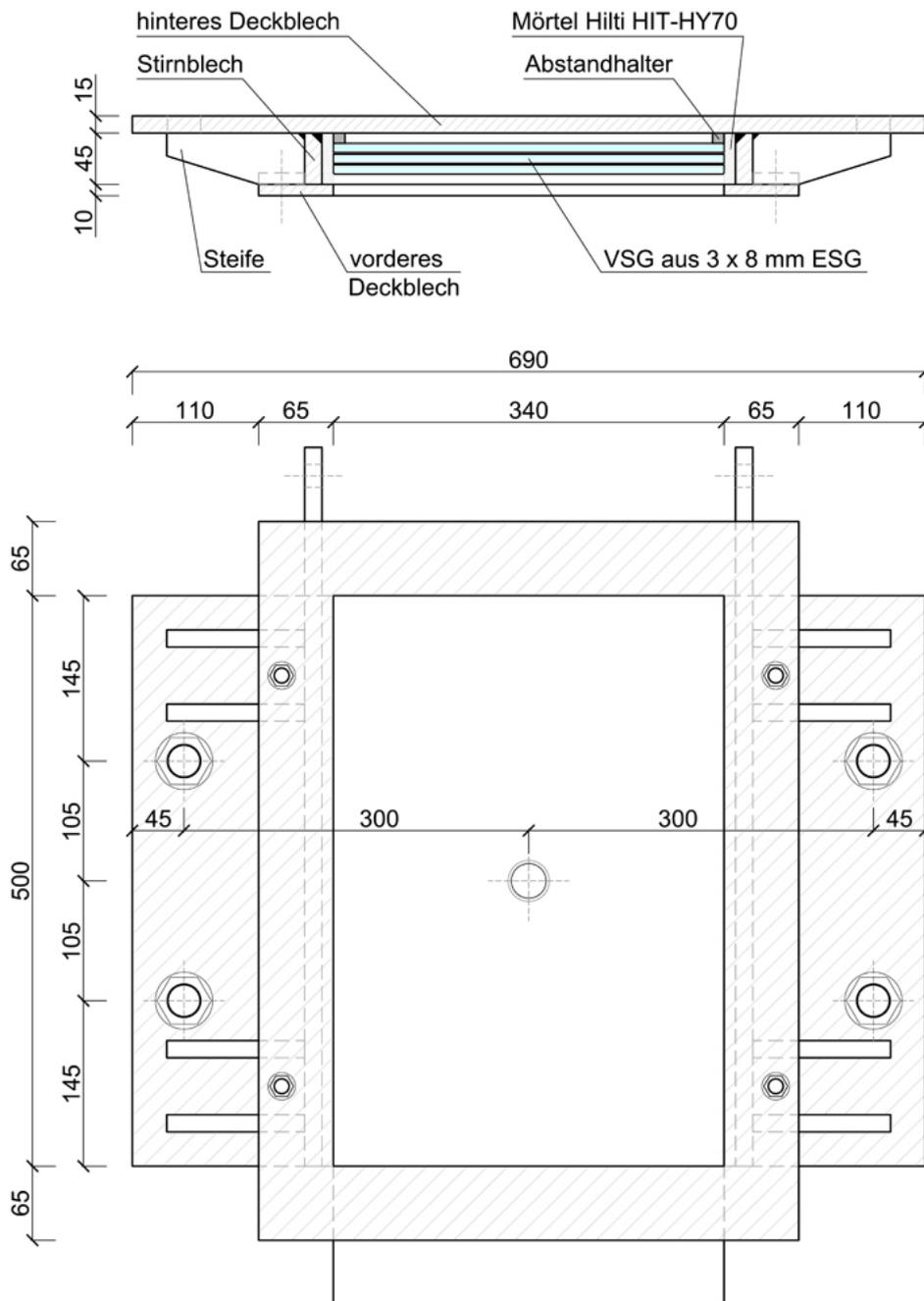


Abb. 8.10 Einspannbereich des rechteckigen Glasschwertes (von oben und von vorne) mit Bezeichnung der Bestandteile

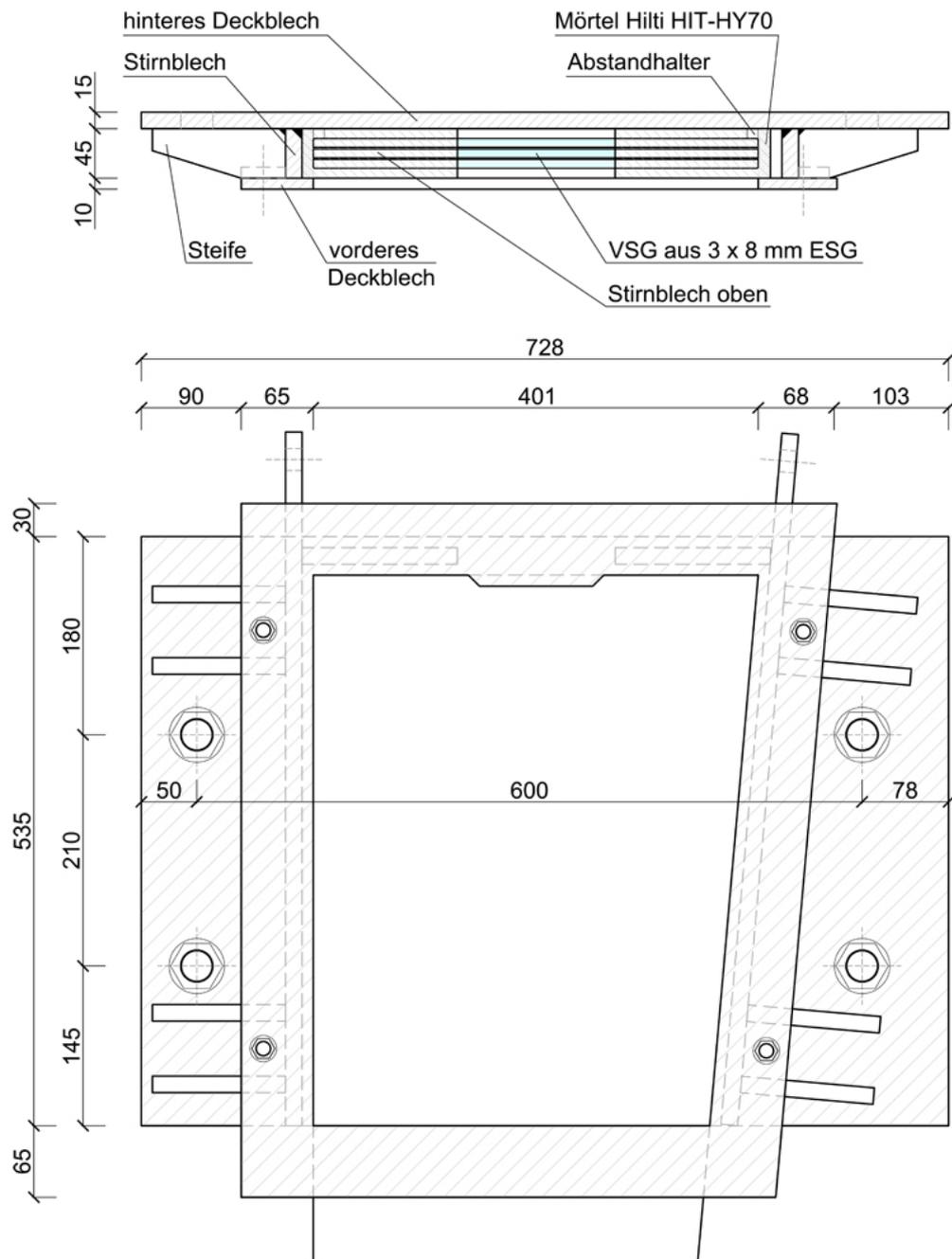


Abb. 8.11 Einspannbereich des gevouteten Glasschwertes (von oben und von vorne) mit Bezeichnung der Bestandteile

8.5 Sonstiges

In diesem Unterkapitel werden der Vollständigkeit halber, die weiteren Schritte bis zur Durchführung der Versuche aufgezählt. Um das Material für die Prüfkörper zu bestellen, muss festgelegt werden wieviele Versuche durchgeführt werden und abhängig von dieser Anzahl eine Massenermittlung und Werkpläne erstellt werden.

Es sind folgende Versuche geplant:

- ◆ 3 Versuche mit rechteckigem Glasschwert und Mörtel Hilti HIT-HY 70
- ◆ 3 Versuche mit rechteckigem Glasschwert und Klotzungen aus POM
- ◆ 3 Versuche mit gevoutetem Glasschwert und Mörtel Hilti HIT-HY 70
- ◆ 3 Versuche mit gevoutetem Glasschwert und Klotzungen aus POM

Es wäre möglich nur je einen rechteckigen und einen gevouteten Stahlschuh zu bestellen und diesen mehrmals zu verwenden. Um aber die erforderliche Zeit zur Inanspruchnahme des Prüfstandes zu verringern werden gleich viele Stahlschuhe wie die Anzahl der Glasfinnen bestellt, alle Prüfkörper zuerst zusammengebaut und anschließend die Versuche der Reihe nach gefahren.

Im Anhang werden die Pläne für Glasfinnen und Stahlschuhe, sowie auch Pläne für den Zusammenbau und die Massenermittlung angeführt.

9

Numerische Analyse der Versuche

Annahmen
Rechteckiges Glasschwert mit Mörtel
Rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen
Gevoutetes Glasschwert mit Mörtel
Gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen

9.1 Annahmen

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Geometrie der im letzten Kapitel entworfenen Prüfkörper von der Geometrie der in den Parameterstudien untersuchten Glasschwertern unterscheidet und auch die aufgebrachten Lasten unterschiedlich sind (Eigengewicht der Fassadenscheiben wird bei den Versuchen nicht aufgehängt), sind für einen Vergleich weitere numerische Berechnungen erforderlich. Die Annahmen und die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in diesem Kapitel zusammengefasst.

Es werden die vier unterschiedlichen Varianten gerechnet, welche auch in den Versuchen untersucht werden:

- ♦ rechteckiges Glasschwert mit Mörtel Hilti HIT-HY 70 als Zwischenschicht
- ♦ rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen aus POM als Zwischenschicht
- ♦ gevoutetes Glasschwert mit Mörtel Hilti HIT-HY 70 als Zwischenschicht
- ♦ gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen aus POM als Zwischenschicht

Als einwirkende Lasten wird das Eigengewicht der Schwerter und die horizontale Windlast angesetzt. Die Windlast wird von 0 kN bis auf 40 kN gesteigert, so dass die maximalen Hauptzugspannungen im Glas einen maximalen theoretischen Wert von etwa 180 N/mm² erreichen.

Für den Mörtel Hilti HIT-HY 70 wird ein E-Modul von 3245 N/mm² und für die Klotzungen aus POM ein E-Modul von 2000 N/mm² angenommen. Im Falle des Mörtels wird dieser Wert im Datenblatt, bei Vorhandensein einer Querdehnungsbehinderung, vom Hersteller angegeben. Bei den Klotzungen müsste dieser Wert im Zuge von Materialuntersuchungen und Versuchen an Kleinproben bestimmt werden. Die Annahme beruht auf der Tatsache, dass die mechanischen Werte bei Druckbelastung mindestens denen auf Zug entsprechen und auf in [3] durchgeführten Parameteruntersuchungen.

Sowohl der Mörtel als auch die Klotzungen werden durch auf Zug ausfallende Federn modelliert. Die Federsteifigkeit der Federn zur Modellierung des Mörtels wird nach folgender Formel berechnet:

$$C_{P,M} = \frac{E_M \times A}{l} = \frac{3245 \times 120}{10} = 38940 \text{ N/mm}$$

mit:	$C_{P,M}$	Federsteifigkeit
	E_M	Elastizitätsmodul des Mörtels Hilti HIT-HY 70
		$E_M = 3245 \text{ N/mm}^2$ mit Querdehnungsbehinderung
	A	Einflussfläche einer Feder
		$A = \text{Glasdicke} \times \text{Einflusslänge} = 24 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} = 120 \text{ mm}^2$
	l	Dicke der Mörtelschicht - l = 10 mm

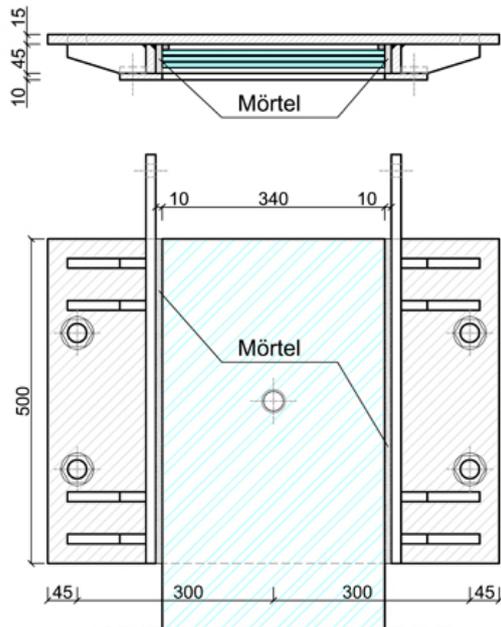
Die Federsteifigkeit der Federn zur Modellierung der Klotzungen wird nach folgender Formel berechnet:

$$C_{P,K} = \frac{E_K \times A}{l} = \frac{2000 \times 120}{10} = 24000 \text{ N/mm}$$

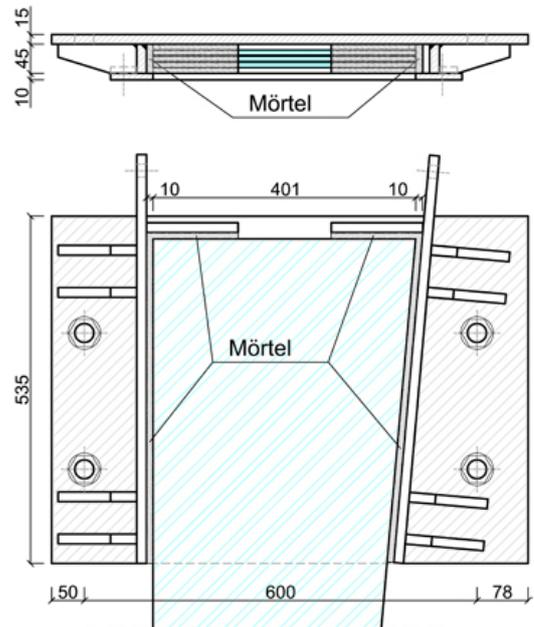
mit:	$C_{P,K}$	Federsteifigkeit
	E_K	angenommener Elastizitätsmodul der Klotzungen (POM)
		$E_K = 2000 \text{ N/mm}^2$
	A	Einflussfläche einer Feder
		$A = \text{Glasdicke} \times \text{Einflusslänge} = 24 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} = 120 \text{ mm}^2$
	l	Dicke der Klotzungen - l = 10 mm

In der Abb. 9.1 werden die Geometrien der vier numerisch berechneten Varianten mit den entsprechenden Abmessungen - Länge und Abstände der Klotzungen - dargestellt. Die Anordnung der unteren Klotzungen, 40 mm von der unteren Kante des Stahlschuhes entfernt, erklärt sich dadurch, dass auch die Resultierende der dreiecksförmigen Spannungsverteilung im Mörtel in diesem Bereich liegt. Somit ist diese Lage für einen Vergleich der unterschiedlichen Varianten günstig.

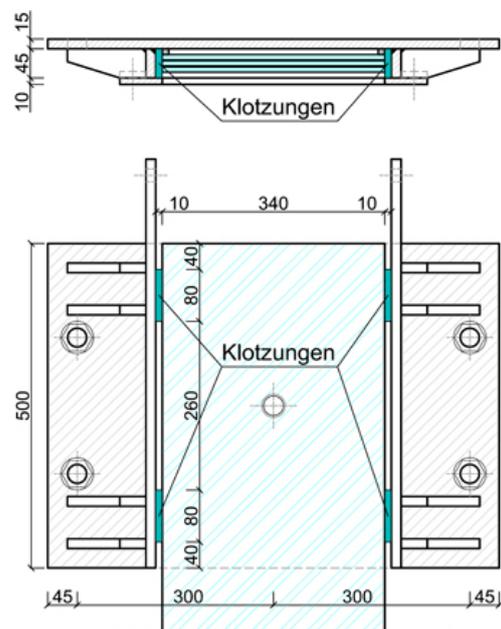
In den weiter folgenden Kapiteln (9.2 bis 9.5) werden für jedes der vier untersuchten Varianten Tabellen mit den wichtigsten mechanischen Werten bei verschiedenen Laststufen, ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das Glas, sowie auch Hauptspannungsbilder (Hauptspannung I aus Sofistik) bei verschiedenen Laststufen gezeigt. Für die Spannungsbilder wird für den Fall ohne horizontale Drucklast (Drucklast 0) eine Farbskala von -1,0 bis 0,6 N/mm² verwendet, da sonst aufgrund der kleinen Spannungen kein Farbverlauf sichtbar ist. Für die restlichen Laststufen wird die Farbskala von -210,0 bis 190,0 N/mm² festgelegt.



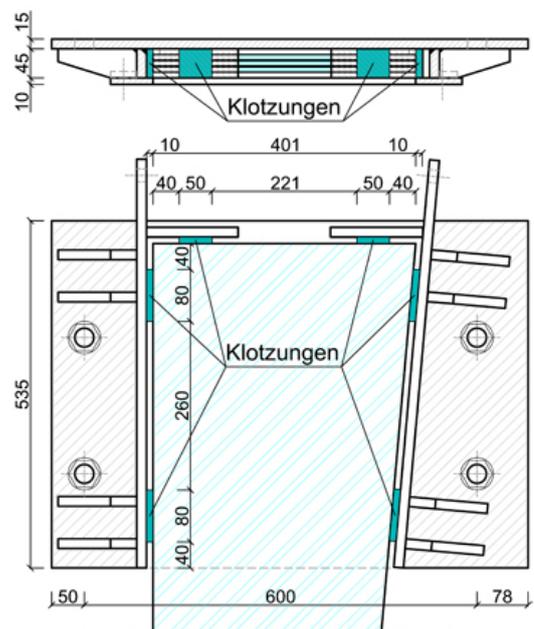
(1) rechteckiges Glasschwert
mit Mörtel als Zwischenschicht



(3) gevoutetes Glasschwert
mit Mörtel als Zwischenschicht



(2) rechteckiges Glasschwert
mit Klotzungen als Zwischenschicht



(4) gevoutetes Glasschwert
mit Klotzungen als Zwischenschicht

Abb. 9.1 Geometrien der numerisch untersuchten Glasschwerttypen

9.2 Rechteckiges Glasschwert mit Mörtel

Drucklast [kN]	maximale Verschiebung [mm]	maximale Hauptzugspannung [N/mm ²]	Hauptzugspannung am Bohrloch [N/mm ²]	maximale Dehnung im Glas [%]	maximale Spannung im Mörtel [N/mm ²]
0,0	0,0	0,6	0,6	0,001	0,0
5,0	5,1	23,4	19,5	0,033	22,2
10,0	10,2	46,7	38,4	0,067	44,3
15,0	15,4	70,0	57,2	0,100	66,6
20,0	20,5	93,3	76,1	0,133	88,8
25,0	25,6	116,7	95,0	0,167	110,9
30,0	30,7	140,0	113,9	0,200	133,1
35,0	35,8	163,3	132,8	0,233	155,3
40,0	41,0	186,6	151,7	0,266	177,5

Tab. 9.1 Ergebnisse der numerischen Berechnung für das rechteckige Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht

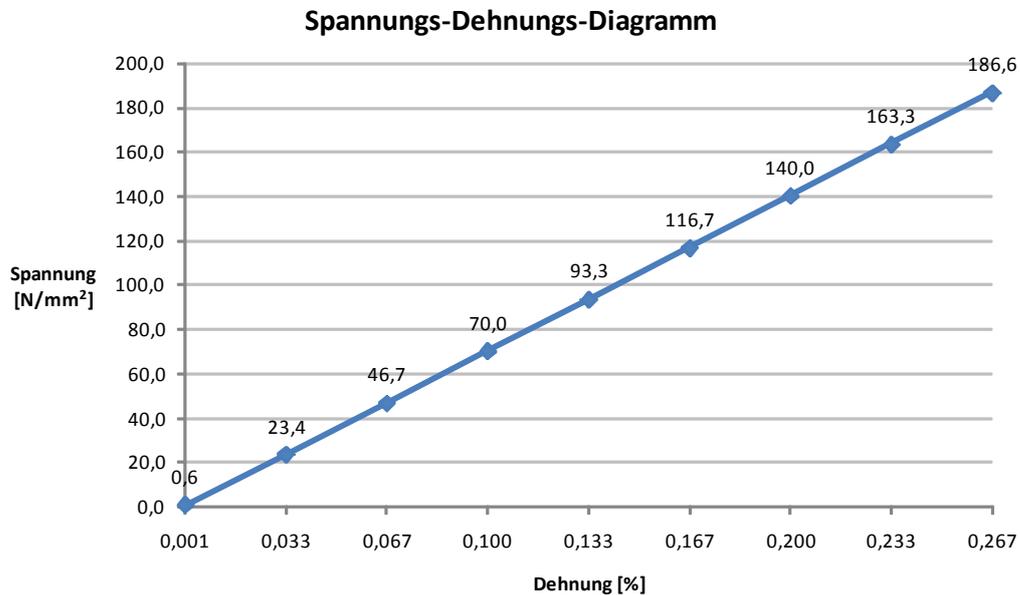


Abb. 9.2 Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das rechteckige Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht bei einer Druckbelastung von 0 bis 40 kN

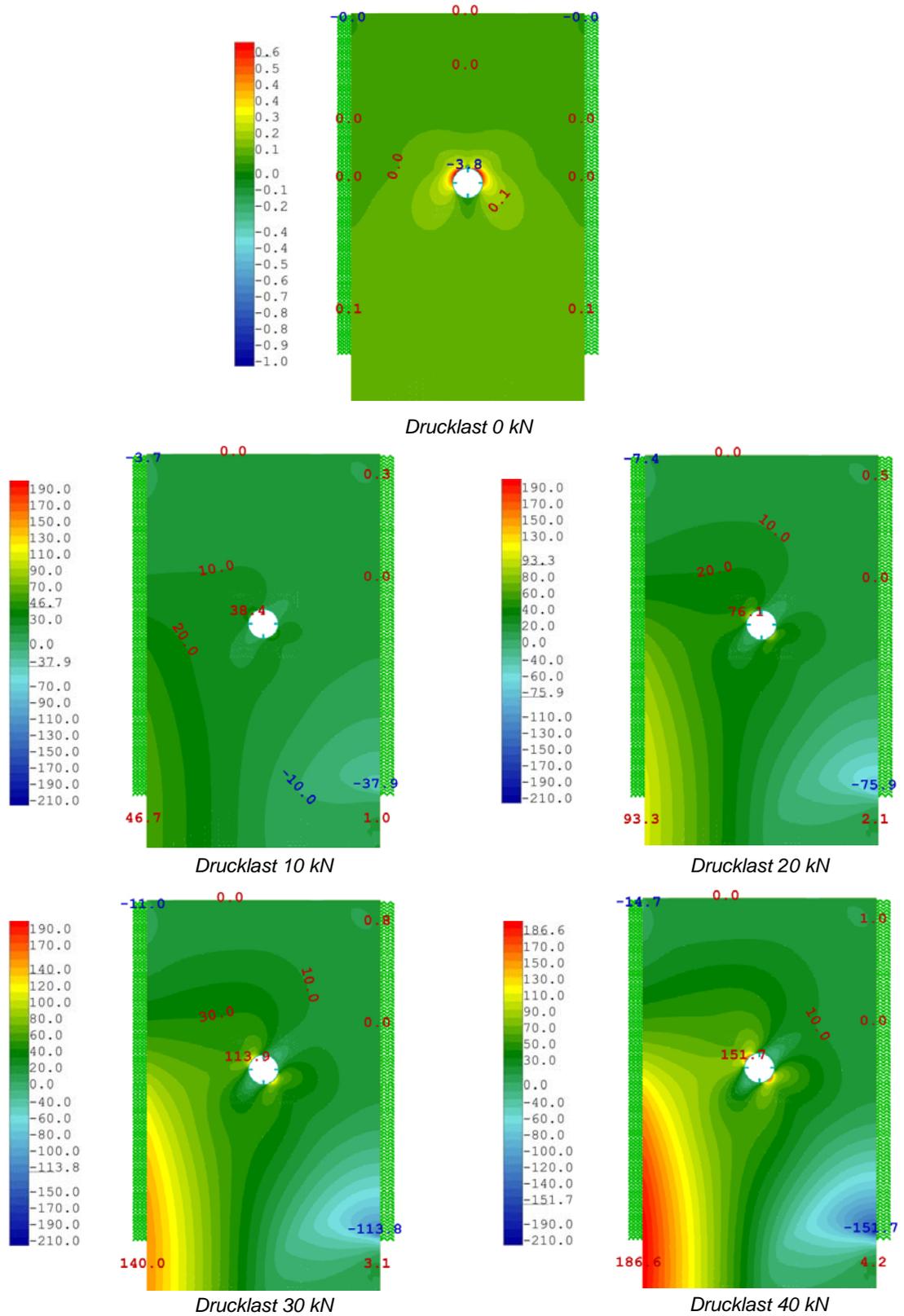


Abb. 9.3 Hauptspannungen $[N/mm^2]$ im Einspannbereich des rechteckigen Glasschwertes mit Mörtel als Zwischenschicht bei verschiedenen Laststufen

9.3 Rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen

Drucklast [kN]	maximale Verschiebung [mm]	maximale Hauptzugspannung [N/mm ²]	Hauptzugspannung am Bohrloch [N/mm ²]	maximale Dehnung im Glas [%]	maximale Spannung in der Klotzung [N/mm ²]
0,0	0,0	0,6	0,6	0,001	0,0
5,0	6,3	23,7	21,2	0,034	27,1
10,0	12,7	47,4	41,8	0,068	54,2
15,0	19,0	71,1	62,4	0,102	81,3
20,0	25,4	94,8	83,0	0,135	108,4
25,0	31,7	118,5	103,6	0,169	135,5
30,0	38,1	142,2	124,2	0,203	162,6
35,0	44,4	165,9	144,8	0,237	189,7
40,0	50,7	189,5	165,4	0,271	216,8

Tab. 9.2 Ergebnisse der numerischen Berechnung für das rechteckige Glasschwert mit Klotzungen als Zwischenschicht

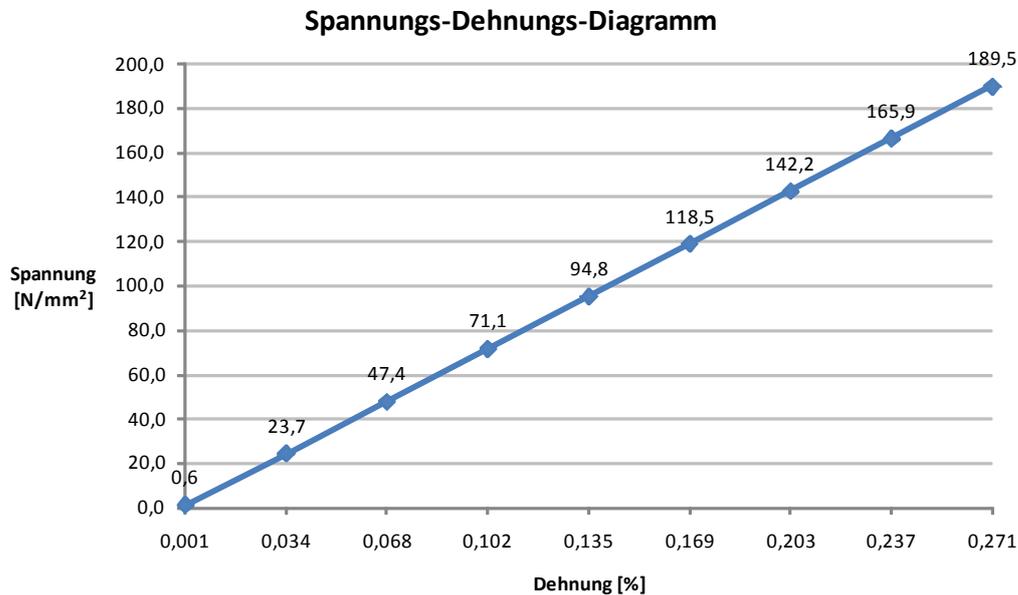


Abb. 9.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das rechteckige Glasschwert mit Klotzungen als Zwischenschicht bei einer Druckbelastung von 0 bis 40 kN

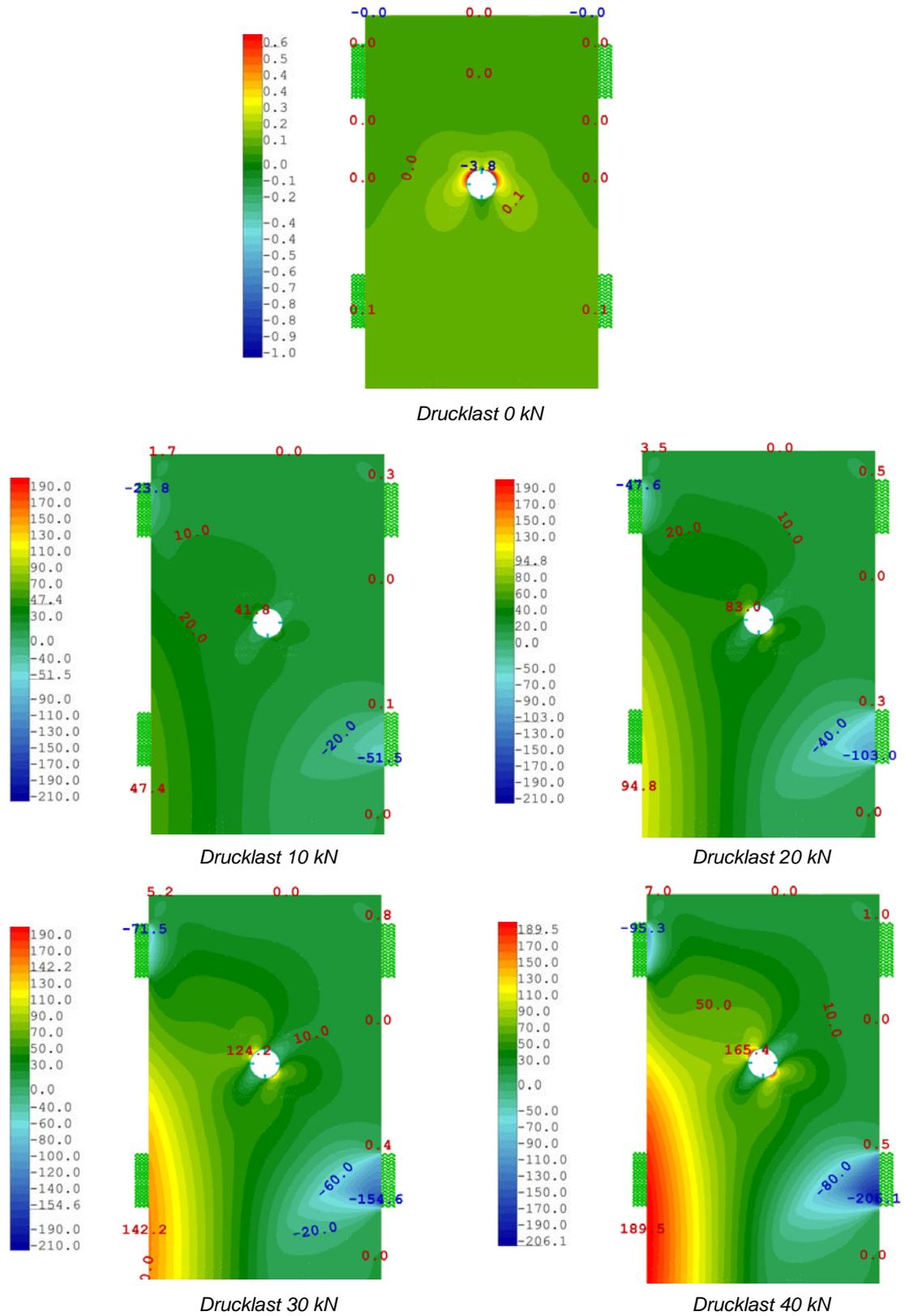


Abb. 9.5 Hauptspannungen $[N/mm^2]$ im Einspannbereich des rechteckigen Glasschwertes mit Klotzungen als Zwischenschicht bei verschiedenen Laststufen

9.4 Gevoutetes Glasschwert mit Mörtel

Drucklast [kN]	maximale Verschiebung [mm]	maximale Hauptzugspannung [N/mm ²]	Hauptzugspannung am Bohrloch [N/mm ²]	maximale Dehnung im Glas [%]	maximale Spannung im Mörtel [N/mm ²]
0,0	0,1	0,2	-	0,000	0,7
5,0	6,7	21,5	-	0,031	19,9
10,0	13,4	42,9	-	0,061	39,7
15,0	20,1	64,4	-	0,092	59,5
20,0	26,8	85,8	-	0,123	79,3
25,0	33,5	107,2	-	0,153	99,0
30,0	40,2	128,6	-	0,184	118,8
35,0	46,9	150,0	-	0,214	138,6
40,0	53,6	171,5	-	0,245	158,4

Tab. 9.3 Ergebnisse der numerischen Berechnung für das gevoutete Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht

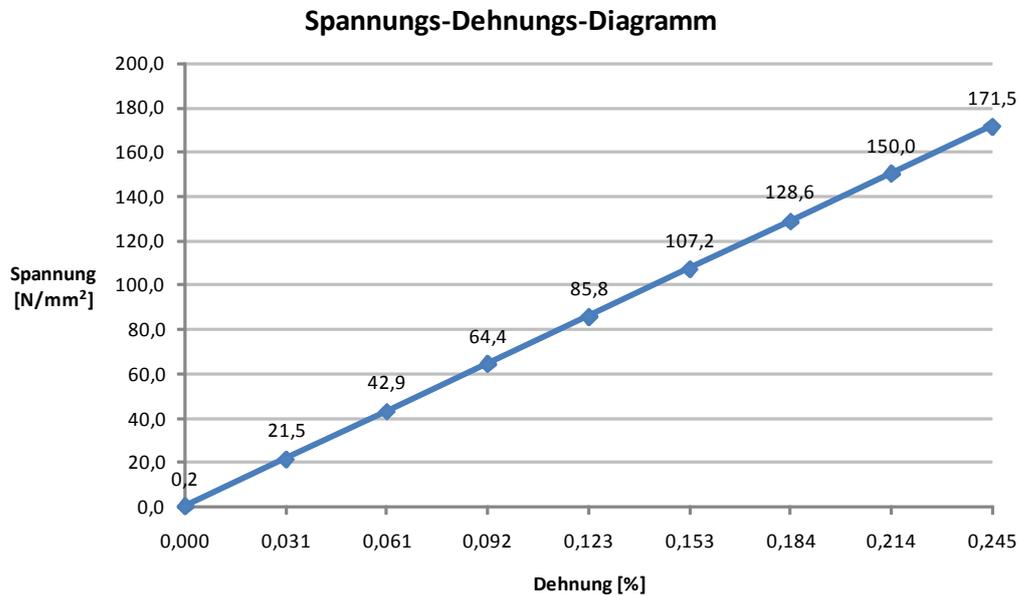


Abb. 9.6 Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das gevoutete Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht bei einer Druckbelastung von 0 bis 40 kN

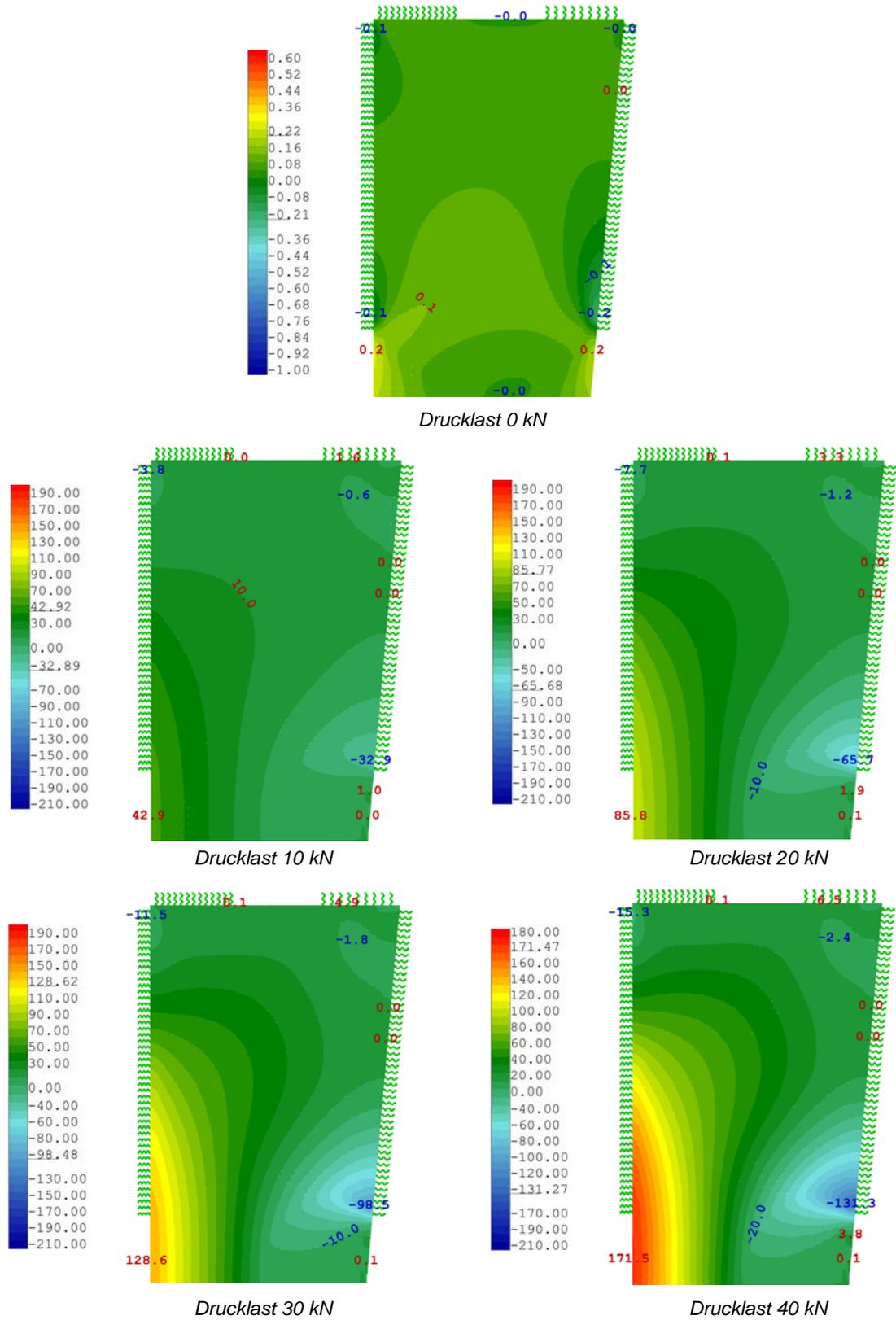


Abb. 9.7 Hauptspannungen $[N/mm^2]$ im Einspannbereich des gevouteten Glasschwertes mit Mörtel als Zwischenschicht bei verschiedenen Laststufen

9.5 Gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen

Drucklast [kN]	maximale Verschiebung [mm]	maximale Hauptzugspannung [N/mm ²]	Hauptzugspannung am Bohrloch [N/mm ²]	maximale Dehnung im Glas [%]	maximale Spannung in der Klotzung [N/mm ²]
0,0	0,2	0,4	-	0,001	1,6
5,0	8,0	21,9	-	0,031	27,1
10,0	15,9	43,7	-	0,062	54,0
15,0	23,9	65,6	-	0,094	80,9
20,0	31,8	87,4	-	0,125	107,8
25,0	39,8	109,2	-	0,156	134,8
30,0	47,7	131,1	-	0,187	161,7
35,0	55,7	152,9	-	0,218	188,7
40,0	63,7	174,7	-	0,250	215,6

Tab. 9.4 Ergebnisse der numerischen Berechnung für das gevoutete Glasschwert mit Klotzungen als Zwischenschicht

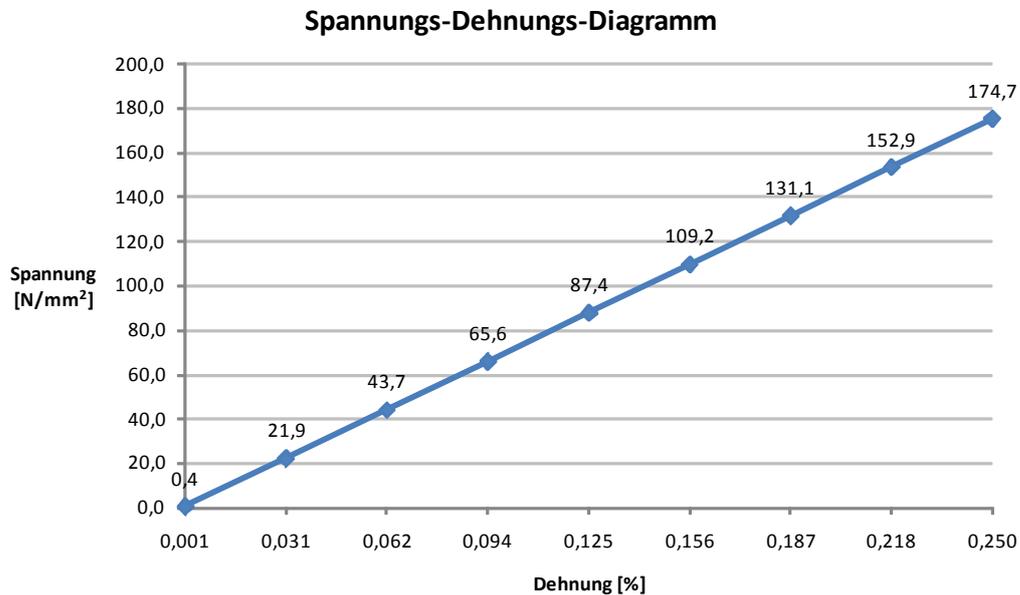


Abb. 9.8 Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das gevoutete Glasschwert mit Klotzungen als Zwischenschicht bei einer Druckbelastung von 0 bis 40 kN

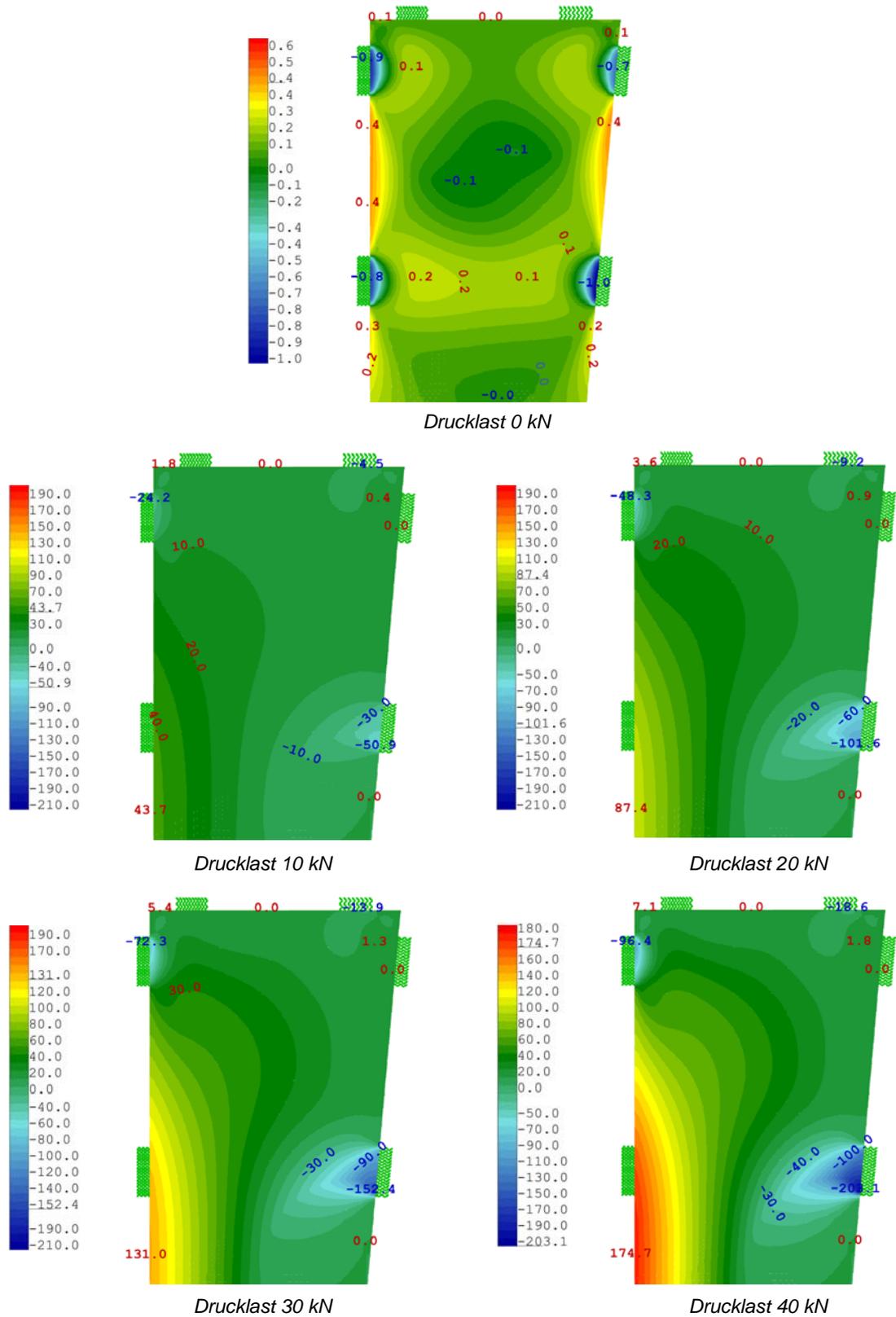


Abb. 9.9 Hauptspannungen $[N/mm^2]$ im Einspannbereich des gevouteten Glasschwertes mit Klotzungen als Zwischenschicht bei verschiedenen Laststufen

9.6 Druckspannungen

Obwohl ein Versagen von Glas aufgrund zu hoher Druckspannungen nicht zu erwarten ist, werden in diesem Kapitel für die vier verschiedenen untersuchten Varianten Nebenspannungsbilder (Hauptspannungen II aus Sofistik) bei einer horizontalen Drucklast von 30 kN gezeigt, weil im Lasteinleitungsbereich in dieser Hauptrichtung die Druckspannungen höher sind. An diesen Stellen kann es zu hohen Querkzugspannungen kommen. Die Farbskala wird für alle Bilder von $-235,0$ bis $190,0$ N/mm² festgelegt.

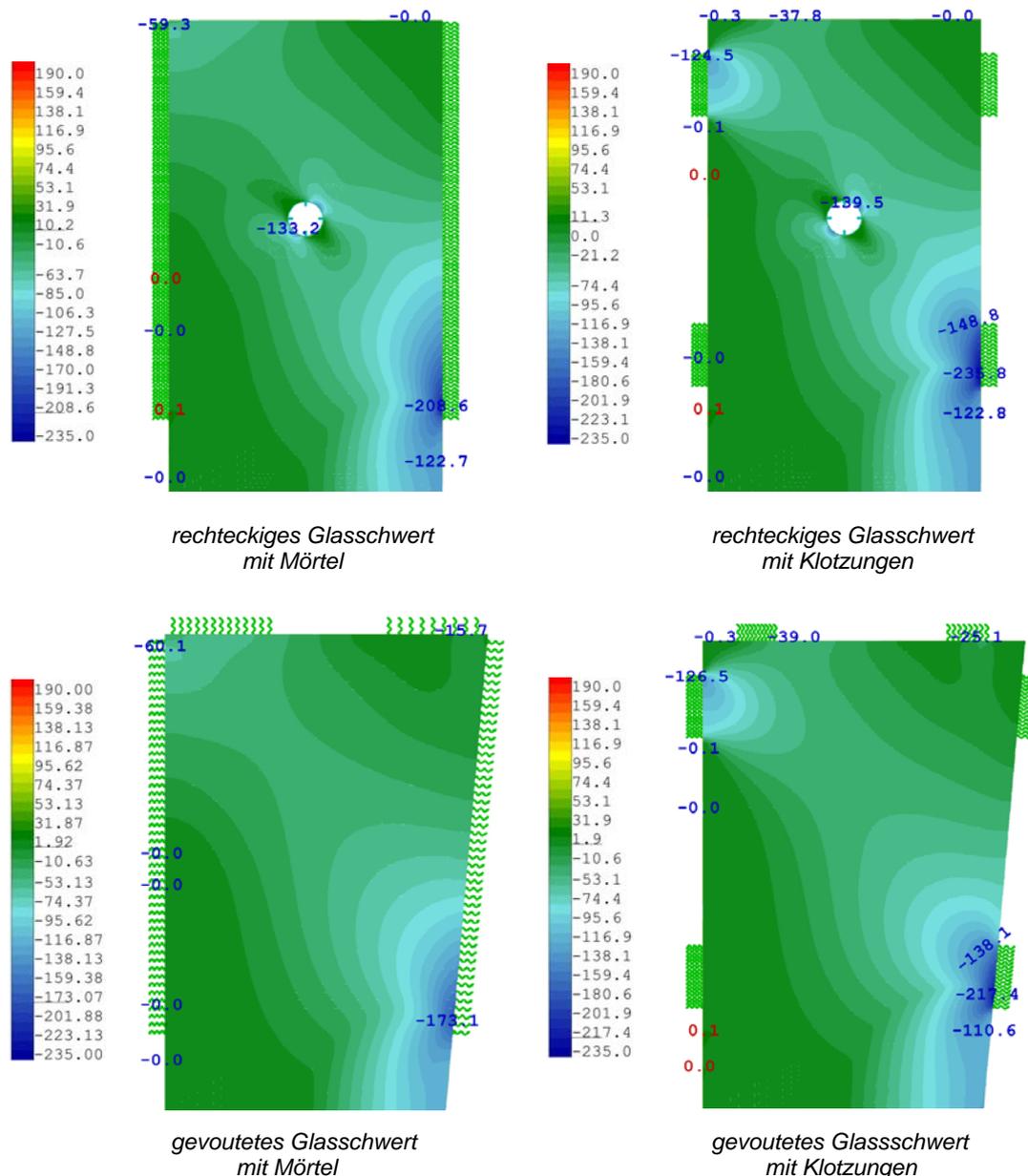


Abb. 9.10 Nebenspannungen [N/mm²] bei einer horizontalen Drucklast von 30 kN im Einspannbereich der vier untersuchten Glasschwertvarianten

10 Versuchsdurchführung

Vorgehensweise und Vorbereitungen Stabilitätsproblem und Maßnahmen Durchführung und Dokumentation der Versuchsreihen Vergleich der Messergebnisse

10.1 Vorgehensweise und Vorbereitungen

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Durchführung der Versuche vorgestellt und die für die Versuche erforderlichen Vorbereitungen besprochen. Anschließend werden im Kapitel 10.2 die bei der Durchführung des ersten Versuches aufgetretenen Probleme und die getroffenen Maßnahmen, um diese zu lösen, gezeigt.

Die Vorgehensweise bei der Durchführung der Versuche kann in folgenden Hauptschritten gegliedert werden:

- ◆ Zusammenbau der Versuchskörper aus den einzelnen Bestandteilen
- ◆ Einrichten des Versuchsstandes - Aufstellen des Hydraulikzylinders in der richtigen Position und Kalibrierung der verschiedenen Messgeräte
- ◆ Durchführung der Versuche inklusive Ein- und Ausbau der Versuchskörper
- ◆ Auswertung der Messergebnisse

Die aus verschiedenen Materialien bestehenden Teile der Versuchskörper werden getrennt geliefert und müssen im Labor zusammengebaut werden. Die Abb. 10.1 zeigt einen Teil der Bestandteile vor dem Zusammenbau. Der Zusammenbau, wie auch die fertigen Versuchskörper werden in den Kapiteln 10.3.1 bis 10.3.4 behandelt. Beim Betrachten der Glasfinnen kann bei allen Elementen an den Stirnflächen nur ein geringer Kantenversatz festgestellt werden. Bei einigen rechteckigen Finnen kann aber im Bereich des Bohrloches ein Versatz von 1 bis 2 Millimeter betrachtet werden.



Abb. 10.1 Gelieferte Bestandteile für die Versuchskörper

Die Lage des Hydraulikzylinders wurde schon im Kapitel 8 bei der Entwicklung des Versuchsaufbaus und der Versuchskörper gezeigt. Daher wird an dieser Stelle nicht mehr darauf eingegangen. Ebenfalls im Kapitel 8 wurde auch die für die Versuche geplante Messtechnik vorgestellt. Auf diese wird an dieser Stelle nochmals eingegangen, indem man die verschiedenen Messgeräte mit Fotos verdeutlicht. Für die photogrammetrische Messung muss das Aramis Gerät (in Abb. 10.2 dargestellt) auf die Größe des zu messenden Feldes kalibriert werden. Die Frequenz der Aufnahme wird auf zwei Bilder pro Sekunde festgelegt.

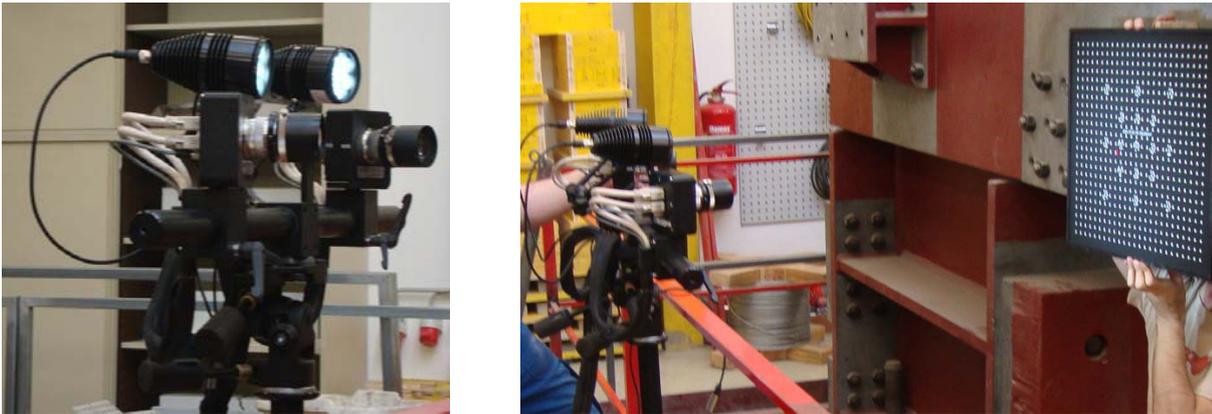


Abb. 10.2 Links: Aramis-Messgerät; Rechts: Kalibrierung des Messgerätes

Die Dehnungsmessstreifen werden vor dem Einbau jedes Versuchskörpers auf beide Stirnseiten (Zug und Druck) unter der Einspannstelle geklebt (siehe Abb. 10.3 links). Zusätzlich werden noch drei induktive Wegaufnehmer (Lage siehe Abb. 10.3 rechts) verwendet die folgende Wege messen:

- ◆ Wegaufnehmer 1: misst den Weg zwischen Prüfraumen und Versuchskörper in Wirkungsrichtung des Hydraulikzylinders direkt über der Lasteinleitung durch den Zylinder
- ◆ Wegaufnehmer 2: misst den Weg zwischen Stahlschuh und Glasfinne in gleicher Richtung und gleicher Höhe wie der Wegaufnehmer 1 (somit soll auch die Starrkörperverformung durch den Schraubenanschluss des Stahlschuhes erfasst werden)
- ◆ Wegaufnehmer 3: misst den Weg zwischen Prüfraumen und Versuchskörper senkrecht zur Wirkungsrichtung des Hydraulikzylinders - bei dem ersten getesteten Versuchskörper in gleicher Höhe wie der Wegaufnehmer 1 und 2, bei den restlichen in halber Höhe der Glasfinne

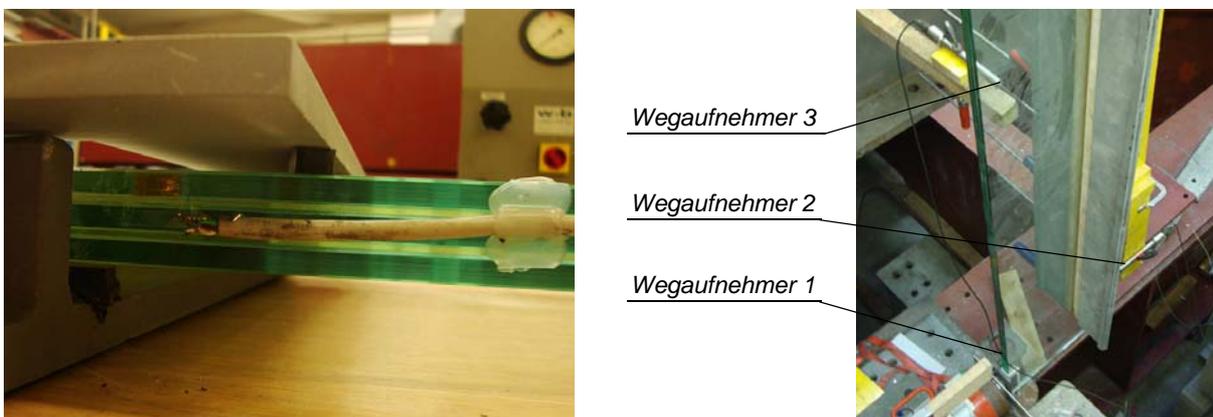


Abb. 10.3 Links: Dehnungsmessstreifen; Rechts: Lage der Wegaufnehmer

Der Ein- und Ausbau der Versuchskörper erfolgt mit Hilfe eines Kranes. Die Lasteinleitung durch den Zylinder in das Glasschwert erfolgt über einen POM-Streifen, der in einem angefertigten U-förmigen Stahlschuh eingelegt wird. Bei einigen Versuchen wird aufgrund eines geringeren Mindestabstandes zwischen Zylinder und Glasfinne auf den Stahlschuh verzichtet und nur ein Streifen POM eingelegt. Diese Änderung zeigt keinen Einfluss auf das Verhalten der Versuchskörper während der Belastung. Die zwei Lasteinleitungsarten werden in Abb. 10.4 dargestellt.

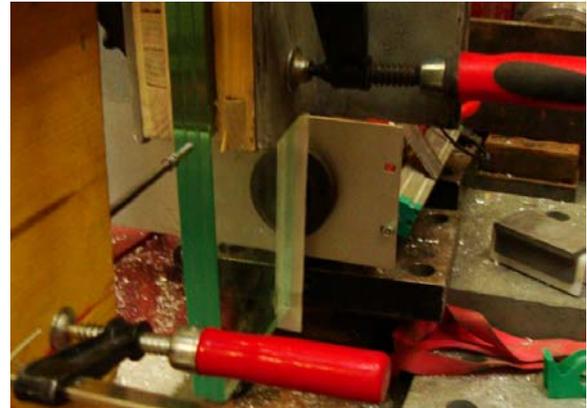


Abb. 10.4 Links: Lasteinleitung mit einem mit POM-Streifen verkleideten U-förmigen Stahlschuh; Lasteinleitung nur mit POM-Streifen

10.2 Stabilitätsproblem und Maßnahmen

Nachdem die Vorgehensweise und die verschiedenen Vorbereitungen für die Versuche erklärt wurden, werden in diesem Kapitel die bei der Durchführung des ersten Versuches aufgetauchten Probleme und die zu deren Behebung getroffenen Massnahmen geschildert. Laut numerischer Berechnung sollen bei allen untersuchten Varianten Bruchlasten von mindestens 25 kN erreicht werden. Bei dem ersten Versuch (siehe Abb. 10.5 a.) wird schon bei einer Last von ca. 10 kN ein Kippen des unteren Ende des Glasschwertes festgestellt. Der Versuch wird abgebrochen und der Zylinder wieder zurückgefahren.

Ein solches Verhalten wurde in den numerischen Untersuchungen nicht berücksichtigt. Bei den numerischen Untersuchungen wurde von einer Scheibenbeanspruchung der Glasschwerter ausgegangen. Für eine solche Beanspruchung wirkt die Glasfinne mit einem VSG-Aufbau aus 3 x 8 mm ESG wie eine Monoscheibe mit einer Dicke von 24 mm. Eine Glasscheibe dieser Dicke ist nicht stabilitätsgefährdet. Sobald es aber aufgrund von Imperfektionen (exzentrische Lasteinwirkung, Vorverformung) zu einem Kippen oder Knicken kommt, kann dieses wie eine Plattenbeanspruchung betrachtet werden. Bei dieser Art von Beanspruchung darf der volle Verbund der PVB-Folien nicht mehr angesetzt werden und es muss eine effektive Dicke des Glasaufbaus berücksichtigt werden. Bei Einsetzen dieser geringeren Dicke kommt es zu einer Stabilitätsgefährdung.

Im Rahmen der Versuche soll im weiteren dieses Stabilitätsversagen durch geeignete Maßnahmen verhindert oder zumindest entschärft werden, da das Ziel der Untersuchungen das Verhalten des Glases und der Kontaktmaterialien im Einspannbereich bei einer Beanspruchung in Scheibenebene bis zum Biegebruch um die starke Achse ist.

Als erste Maßnahme, um ein Stabilitätsversagen auszuschließen, werden beidseitig an die Glasfinne Doka-Schalttafeln mit Hilfe von Schraubzwingen befestigt. Bei einer Drucklast von ca. 17 kN kommt es zu einem Knicken über die ganze Glasschwertlänge (siehe Abb. 10.5 b., c. und d.) und der Versuch wird abgebrochen.

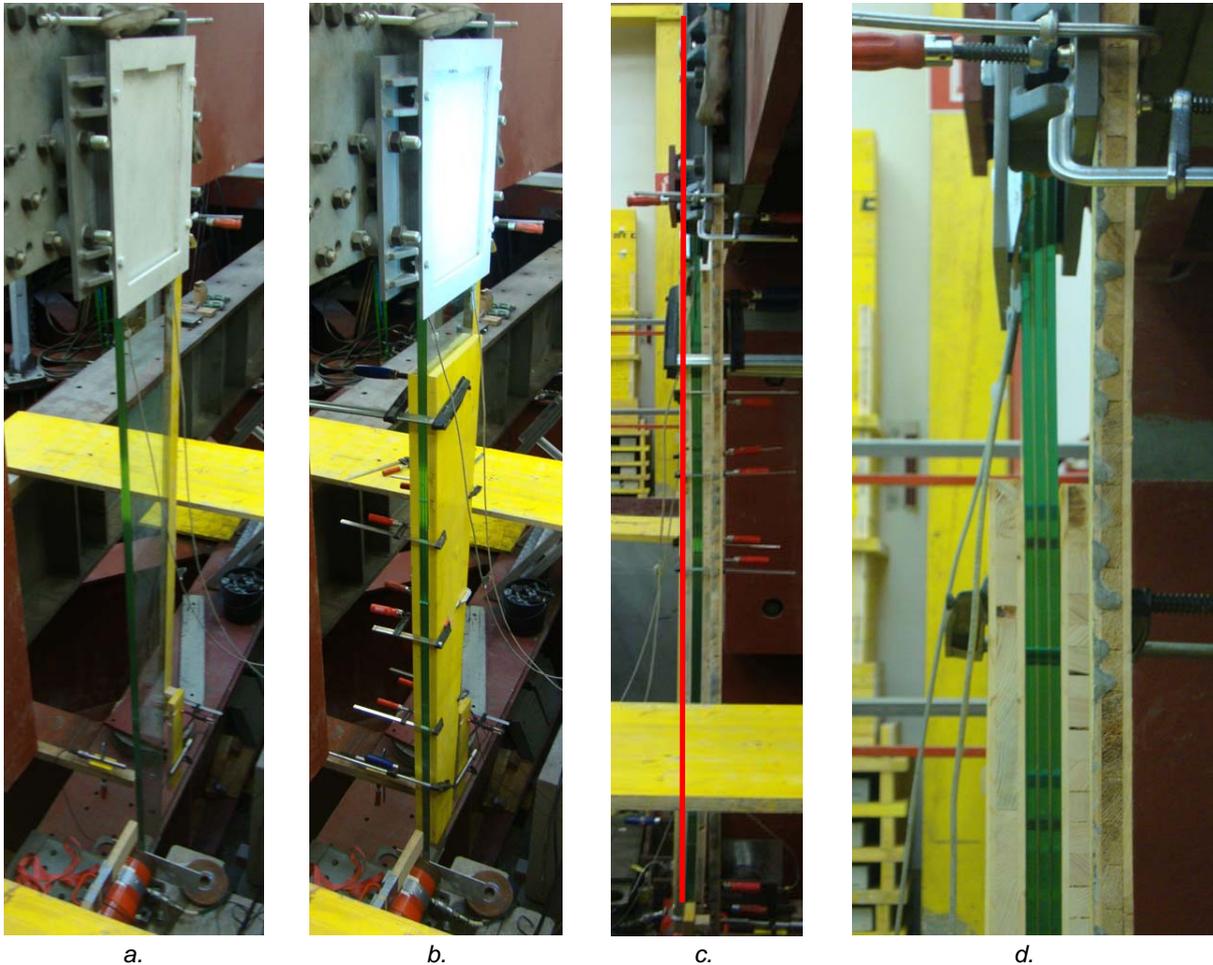


Abb. 10.5 a. erster Versuch mit Glasschwert alleine; b. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln - Aufbau; c. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln - globale Verformung; d. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln - lokale Verformung

Als zweite Maßnahme werden die Doka-Tafeln zusätzlich mit senkrecht darauf liegenden Latten aus Schalttafeln ausgesteift (siehe Abb. 10.6 a.). Auch mit dieser Maßnahme kommt es bei einer Last von ca. 25 kN zu einem lokalen Knicken im Bereich zwischen den Schalttafeln und der Einspannung (siehe Abb. 10.6 b.) und der Versuch wird erneut abgebrochen.

Als Nächstes werden anstelle der Schalttafeln beidseitig Stahlwinkel mit einer Trennlage aus Holz (passend geschnittene Schalttafeln) mit Schraubzwingen befestigt (siehe Abb. 10.6 c.). Mit dieser Lösung werden zufriedenstellend hohe Lasten erreicht und die Versuche bis zum Bruch gefahren. Es ist aber zu bemerken, dass bei einigen Versuchskörper auch so kurz vor dem Bruch ein seitliches Ausweichen mit dem Wegaufnehmer 3 gemessen wird. In den Bereichen wo Messungen stattfinden (DMS und ARAMIS) wird die Steifigkeit der Glasfinne durch diese Maßnahme nicht verändert.

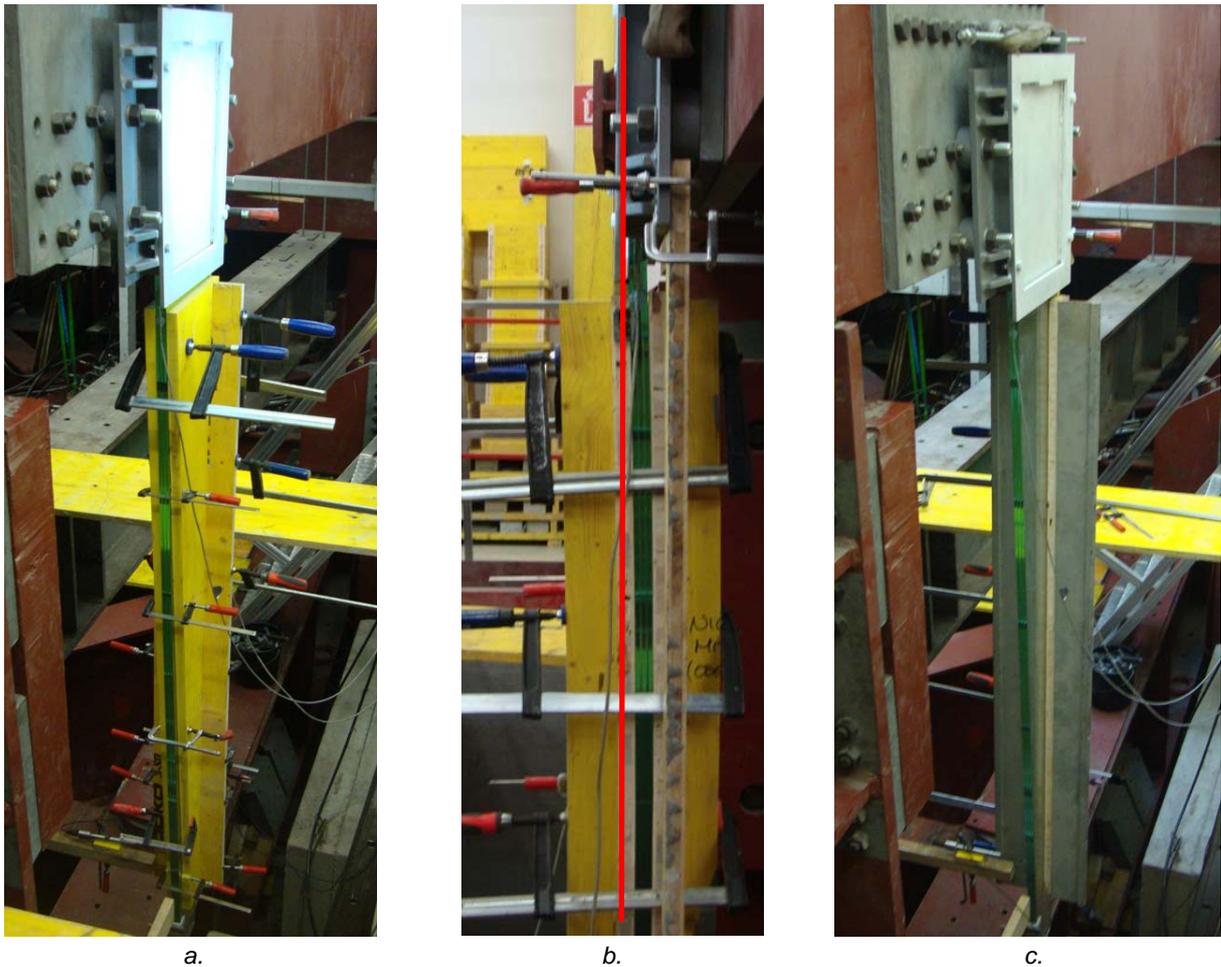


Abb. 10.6 a. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln mit aussteifenden Latten - Aufbau; b. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln mit aussteifenden Latten - Verformung; c. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Stahlträgern - Aufbau

Um das bei den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Ziel zu erreichen ist die hier getroffene Maßnahme annehmbar. Die Erkenntnis, dass sich bei der Belastung der Finne ohne Zusatzversteifungen ein Stabilitätsversagen ankündigt, muss aber durch weitere Untersuchungen analysiert werden. Bei einer Bemessung solcher Tragelemente muss ein Stabilitätsnachweis durchgeführt werden, da sich diese Versagensart als maßgebend ergibt.

10.3 Durchführung und Dokumentation der Versuchsreihen

In diesem Unterkapitel werden für jedes der vier untersuchten Glasschwertvarianten die Versuche vom Zusammenbau, über die Versuchsdurchführung bis zur Erfassung der Messergebnisse dokumentiert. Wie schon in den Kapiteln 8 und 9 erwähnt werden für jedes der vier Varianten je drei Versuchskörper getestet, damit eine Versuchsreihe gegeben ist. In Tab. 10.1 werden die Bezeichnungen der 12 Versuchskörper gezeigt. Dabei bedeutet **V** - gevoutet, **R** - rechteckig, **M** - mit Mörtel (Hilti HIT-HY 70) und **K** - mit Klotzungen (POM). Zusätzlich wird zur Übersicht auch die Bruchlast bei jedem Versuchskörper angegeben.

Versuchskörpernummer	Bezeichnung	Bruchlast [kN]
Versuchsreihe - gevoutetes Glasschwert mit Mörtel als Kontaktmaterial		
Versuchskörper 1	V1M	33,9 kN
Versuchskörper 2	V2M	35,3 kN
Versuchskörper 3	V3M	29,8 kN
Versuchsreihe - gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen als Kontaktmaterial		
Versuchskörper 4	V4K	29,5 kN
Versuchskörper 5	V5K	33,0 kN
Versuchskörper 6	V6K	25,4 kN
Versuchsreihe - rechteckiges Glasschwert mit Mörtel als Kontaktmaterial		
Versuchskörper 7	R7M	30,2 kN
Versuchskörper 8	R8M	30,4 kN
Versuchskörper 9	R9M	31,1 kN
Versuchsreihe - rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen als Kontaktmaterial		
Versuchskörper 10	R10K	24,2 kN
Versuchskörper 11	R11K	24,8 kN
Versuchskörper 12	R12K	23,4 kN

Tab. 10.1 Bezeichnung und Bruchlast der Versuchskörper

Im Folgenden wird jede Versuchsreihe getrennt behandelt. Es werden Fotos zum Zusammenbau und Versuchsdurchführung gezeigt und diese Schritte diskutiert. Außerdem werden die Bruchbilder analysiert und die durch die verschiedenen Messgeräte erfassten Messergebnisse zusammengefasst und besprochen.

10.3.1 Versuchsreihe gevoutetes Glasschwert mit Mörtel

Die erste im Rahmen der Versuche getestete Variante ist das gevoutete Glasschwert mit Mörtel Hilti HIT-HY 70 als Kontaktmaterial. Die Geometrie wurde im Kapitel 8 bei der Versuchskörperentwicklung behandelt. Da die verschiedenen Bestandteile getrennt geliefert wurden, müssen als Erstes die Versuchskörper zusammengebaut werden.

Zusammenbau

Im Folgenden wird der Zusammenbau der gevouteten Glasschwerter mit Mörtel stichwortartig erklärt und anhand von Fotos dokumentiert:

- ◆ in die Stahlschuhe wird im Abstand von 10 mm zu den Stirnblechen ein Silikon-Dichtband mit einer Höhe von 10 mm als Abstandhalter und zur Kammerung des Mörtels verklebt (siehe Abb. 10.7 links)
- ◆ die Glasfinne wird im Stahlschuh auf die geklebten Silikonstreifen eingelegt (siehe Abb. 10.7 rechts)



Abb. 10.7 Links: Verkleben der Silikon-Dichtbänder als Abstandhalter;
Rechts: Einlegen der Glasfinne im Stahlschuh

- ◆ in dem Raum zwischen Stirnblechen und Glasfinne wird eine erste Mörtelschicht Hilti HIT-HY 70 injiziert (siehe Abb. 10.8 links)
- ◆ das vordere Deckblech wird mit vier M12 Schrauben befestigt (siehe Abb. 10.8 rechts)
- ◆ der Raum zwischen dem vorderen Deckblech und der ersten Mörtelschicht wird mit Hilti HIT-HY 70 ausgefüllt



Abb. 10.8 Links: Injizieren des Raumes zwischen Finne und Stirnblech mit Mörtel;
Rechts: Befestigen des vorderen Deckbleches

- ◆ zwischen dem vorderen Deckblech und der Glasfinne wird ein Silikon-Dichtband als Abstandhalter eingepresst (siehe Abb. 10.9)
- ◆ an den Stirnseiten der vorderen Glasscheiben werden sowohl auf der Zugseite, als auch auf der Druckseite DMS unter dem Einspannbereich geklebt (siehe Abb. 10.9)

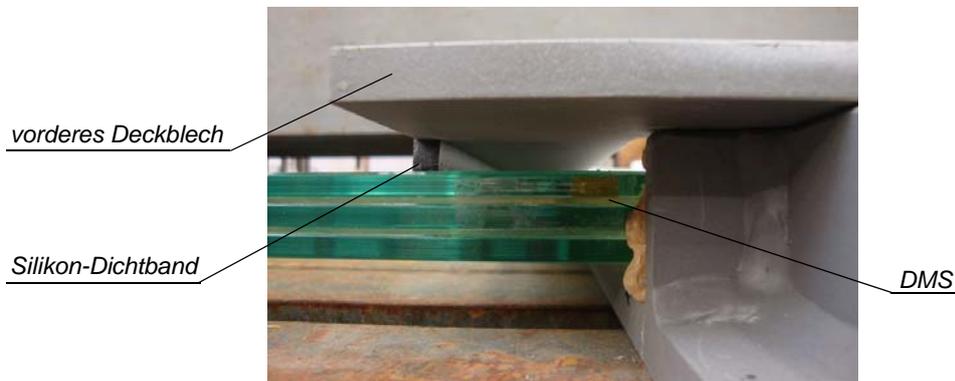


Abb. 10.9 Silikon-Dichtband zwischen Glasfinne und vorderes Deckblech und Verkleben von DMS an der Stirnseite der vorderen Glasscheibe unter dem Einspannbereich

- ◆ das mit Aramis aufzunehmende Messfenster wird mit einem weißen, matten Lack besprüht (siehe Abb. 10.10 links)
- ◆ auf dem mit Aramis aufzunehmenden Messfenster wird mit einem schwarzen Lack ein Punktmuster gesprüht (siehe Abb. 10.10 rechts)



Abb. 10.10 Links: Besprühen des Messfensters (Aramis) mit einem weißen, matten Lack; Rechts: schwarzes Punktmuster auf dem Aramis-Messfenster

Nachdem alle diese Schritte durchgeführt wurden, wird der Versuchskörper mit einem Kran in vertikaler Lage gehoben und es werden die zwei Stahlträger an dem Glasschwert mit Schraubzwingen befestigt. Anschließend wird der Versuchskörper zum Prüfraumen geführt und an diesem mit vier M27 Schrauben befestigt. Der letzte Schritt vor der Durchführung der Versuche ist das Einrichten der drei Wegaufnehmer in die richtige Position.

Versuchsdurchführung und Resttragfähigkeit

Die Messtechnik und die Art wie die Last durch den Zylinder eingeleitet wird wurde schon im Kapitel 10.1 besprochen. Die Laststeigerung erfolgt Weg-gesteuert mit einer Geschwindigkeit von 20 mm pro Minute. Die Dauer eines Versuches beträgt ca. 3 bis 4 Minuten. Der Bruch tritt spontan auf und es versagen alle drei Glasscheiben gleichzeitig. Kurz vor dem Bruch kann festgestellt werden, dass die Werte, die vom Wegaufnehmer 3 (quer zum Glasschwert) aufgenommen werden, höher werden. Daraus kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass das Versagen nicht nur aufgrund der Biegung in Scheibenrichtung erfolgt. Die Abb. 10.11 links zeigt den Versuchskörper V1M während der Versuchsdurchführung.

Beim Bruch springen einige Glaskrümmel der äußeren Scheiben weg von den PVB-Folien. Zur Resttragfähigkeit kann gesagt werden, dass das Glasschwert nach dem Bruch im Stahlschuh hängen bleibt (siehe Abb. 10.11 mitte), jedoch verliert dieses ihre Steifigkeit (siehe Abb. 10.11 rechts). Mit der Zeit zieht sich die Folie mit den gebrochenen Scheiben in die Länge (Kriechen). Nach etwa 15 Minuten wird schon ein Zuwachs von ca. 6 cm über die gesamte Glasschwertlänge gemessen.



Abb. 10.11 Links: Versuchskörper V1M während der Versuchsdurchführung; Mitte: Versuchskörper V1M nach dem Bruch - im Stahlschuh hängend; Rechts: Versuchskörper V1M nach dem Bruch - die Glaskrümmel haften an den PVB-Folien

Bruchbilder

An dieser Stelle werden Bruchbilder der drei gevouteten Glasschwerter mit Mörtel als Kontaktmaterial gezeigt. Direkt unter der Einspannstelle sind die Bruchbilder durch den Ausbau der Versuchskörper etwas verfälscht, da die Glasfalten, aufgrund der Höhe, in diesem Bereich geknickt werden mussten.



Abb. 10.12 Bruchbilder des Versuchskörper V1M

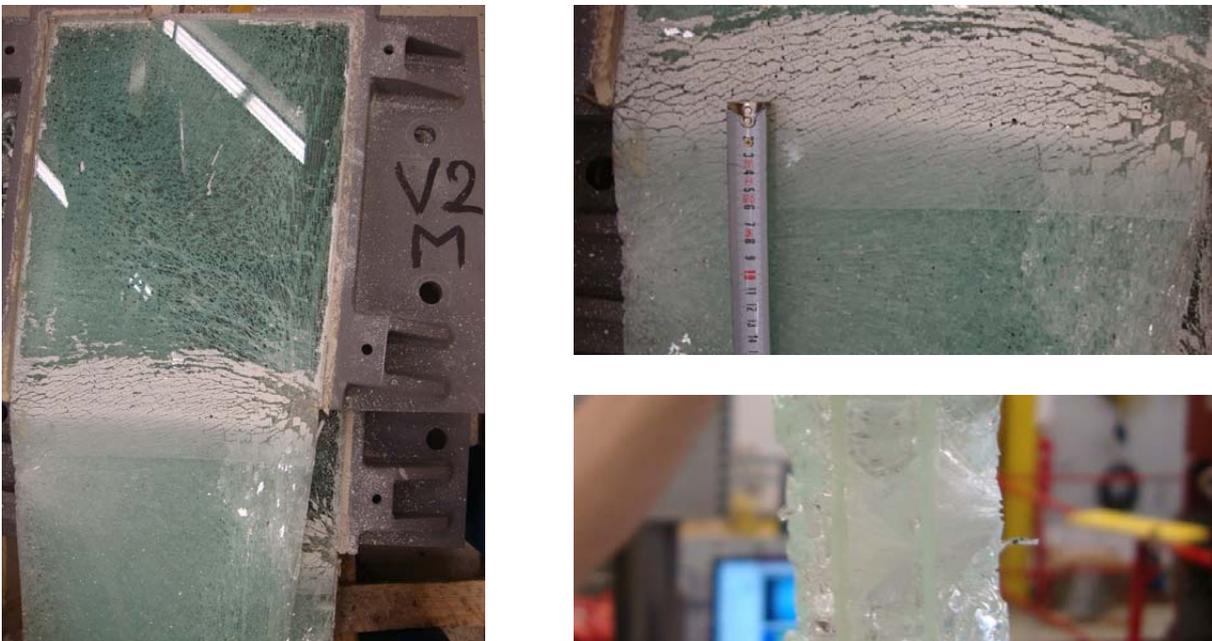


Abb. 10.13 Bruchbilder des Versuchskörper V2M

Aus den Bruchbilder der drei Versuchskörper kann man erschliessen, dass der Bruch von der Zugkante ausgeht, dieser aber in verschiedenen Abständen vom Stahlschuh liegt. Dieses kann dadurch erklärt werden, dass der Bruch an einem Mikroriss im Glas entsteht, so dass man die genaue

Lage nicht voraussagen kann. Außerdem kann man in den Bildern die Spannungstrajektorien erkennen. Anhand dieser kann man sehen an welchen Stellen Lasten aus dem Glas über dem Mörtel in den Stahlschuh eingeleitet werden. Beim Versuchskörper V2M kann man erkennen, dass der Bruch in zwei der drei Scheiben von der gleichen Stelle ausgeht. Beim Versuchskörper V3M kann man auf der Zugseite auf der vorderen Scheibe zwei Punkte erkennen von denen aus der Bruch ausgegangen zu sein scheint (in Abb. 10.14 rechts rot eingekreist).

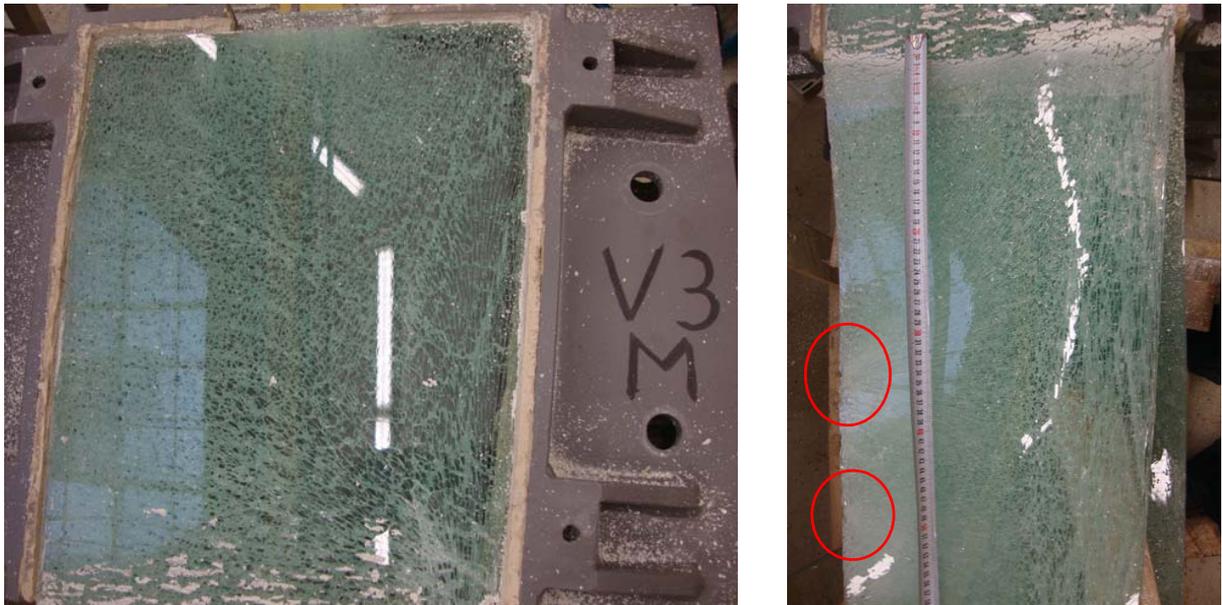


Abb. 10.14 Bruchbilder des Versuchskörper V3M

Messwerte - Wegaufnehmer und DMS

In diesem Abschnitt werden anhand von Diagrammen die Messergebnisse der Wegaufnehmer 1 und 2 und der zwei geklebten DMS für die drei getesteten gevouteten Glasschwerter mit Mörtel als Kontaktmaterial dargestellt. Die Lage der Wegaufnehmer und der DMS ist in Abb. 10.3 ersichtlich. Der Wegaufnehmer 1 misst die Verschiebung der Finne relativ zum Prüfrahmen. In diesem Weg ist auch die Verformung des Gesamtprüfkörpers enthalten. Der Wegaufnehmer 2 misst die Verschiebung der Finne relativ zum Stahlschuh. Vergleicht man die beiden Diagramme (Abb. 10.15 und Abb. 10.16), erkennt man, dass die Verschiebung des Versuchskörpers durch das Lochspiel der Schraubenverbindung einen erheblichen Anteil an der Gesamtverschiebung ausmacht.

Aus den drei Diagrammen kann auch die Bruchlast für jeden der drei Prüfkörper entnommen werden. Diese liegt beim Versuchskörper V2M bei 35,3 kN, der höchste Wert aller getesteten Prüfkörper.

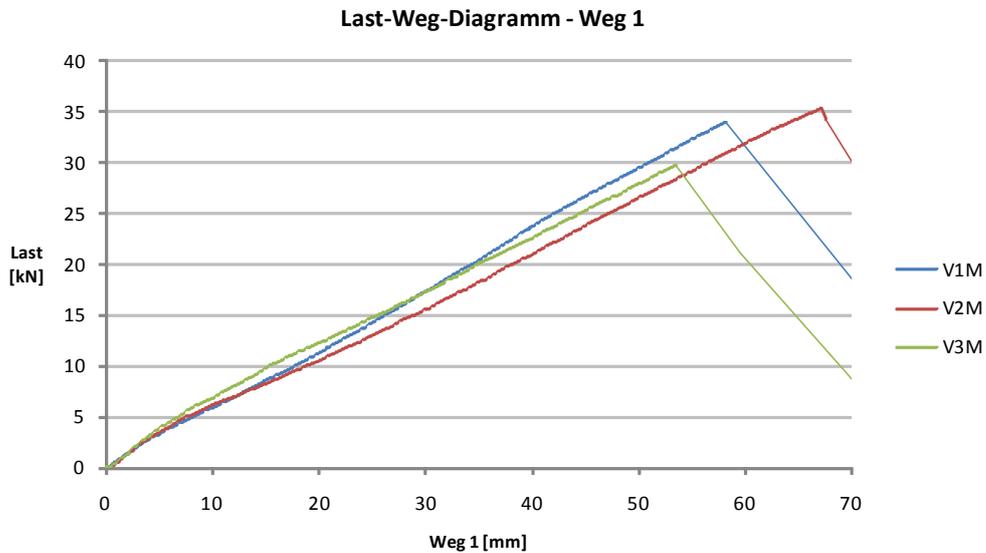


Abb. 10.15 Last-Weg-Diagramm - Wegaufnahme 1 - Verschiebung der Glasfinne zum Prüfraumen für die Versuchskörper V1M, V2M und V3M

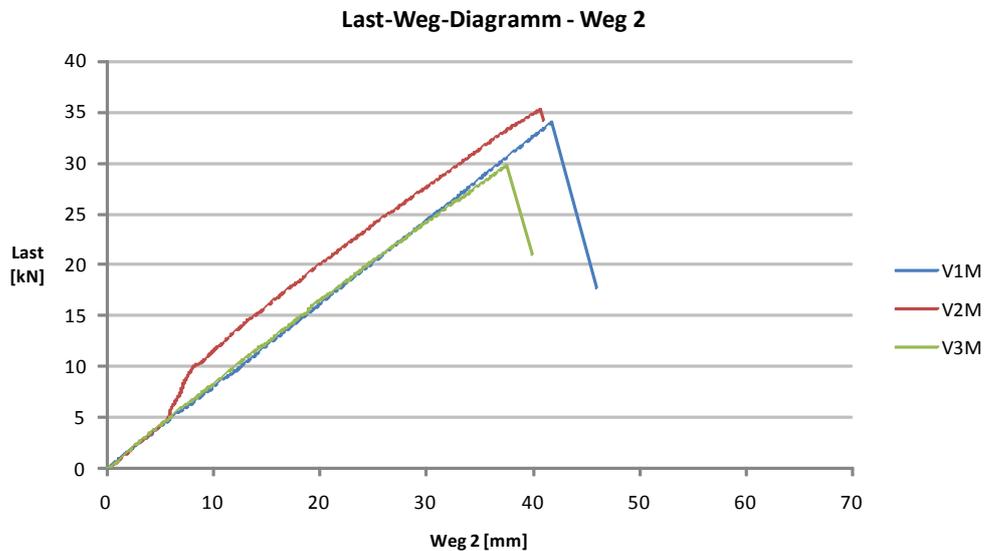


Abb. 10.16 Last-Weg-Diagramm - Wegaufnahme 2 - Verschiebung der Glasfinne zum Stahlschuh für die Versuchskörper V1M, V2M und V3M

Die Abb. 10.17 zeigt den Dehnungszuwachs an der Zugseite und an der Druckseite über die gesamte Laststeigerung an den Stellen, wo die DMS geklebt wurden. Diese Stellen befinden sich in dem Bereich wo die maximalen Zug- und Druckspannungen auftreten sollten. Es kann aber sein, dass auch höhere Werte in deren Nähe entstehen. Da Glas ein linear-elastisches Material ist lassen sich die maximalen Zug- und Druckspannungen an diesen Stellen mit dem E-Modul von 70.000 N/mm^2 nach dem Hooke'schen Gesetz ermitteln ($\sigma = E \times \epsilon$).

Versuchskörper	Dehnung - Zug [%]	Zugspannung [N/mm ²]	Dehnung - Druck [%]	Druckspannung [N/mm ²]
V1M	0,19	133	-0,20	-140
V2M	0,21	147	-0,18	-126
V3M	0,17	119	-0,16	-112

Tab. 10.2 Dehnungen und Spannungen an den Messstellen der zwei DMS für die Versuchskörper V1M, V2M und V3M

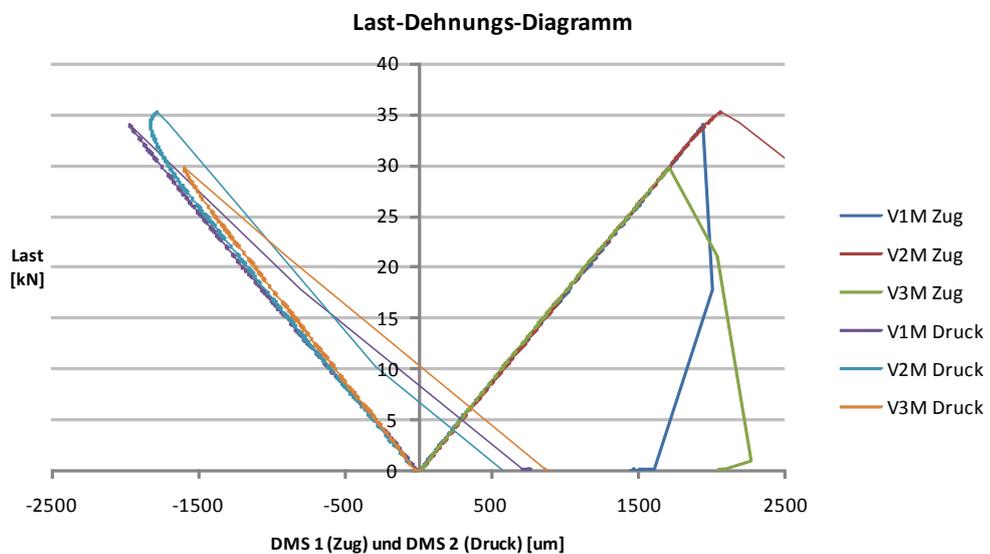


Abb. 10.17 Last-Dehnungs-Diagramm - DMS 1 und DMS 2- Dehnungen (Zug und Druck) an den Stirnseiten der vorderen Scheibe der Versuchskörper V1M, V2M und V3M, unter dem Stahlschuh

Dehnungsmessung mit Aramis

In diesem Abschnitt werden für die gevouteten Glasschwerter mit Mörtel die mit ARAMIS aufgenommenen Messergebnisse analysiert. Es werden in den Abb. 10.18 bis Abb. 10.20 für jeden der drei Versuchskörper das Dehnungsbild vor dem Bruch und der Verlauf der Dehnungen über die Laststeigerung für zwei ausgewählte Punkte - einer auf der Zugseite und einer auf der Druckseite - dargestellt. Es wird versucht die Punkte, welche die maximalen Dehnungen bzw. Stauchungen erfahren, auszuwählen.

Photogrammetrische Aufnahmen mit ARAMIS bringen viele Vorteile (siehe Kapitel 8.3.3), doch für die in diesem Fall durchgeführten Messungen werden auch zwei Nachteile festgestellt:

- ♦ im Kantenbereich, wo die maximalen Dehnungen und Spannungen auftreten, können aufgrund des Höhensprunges zwischen Glas und Deckblech keine Facetten gebildet werden und somit werden keine Werte angegeben
- ♦ es wird nur die dem Messgerät zugewandte Seite des Versuchskörpers aufgenommen

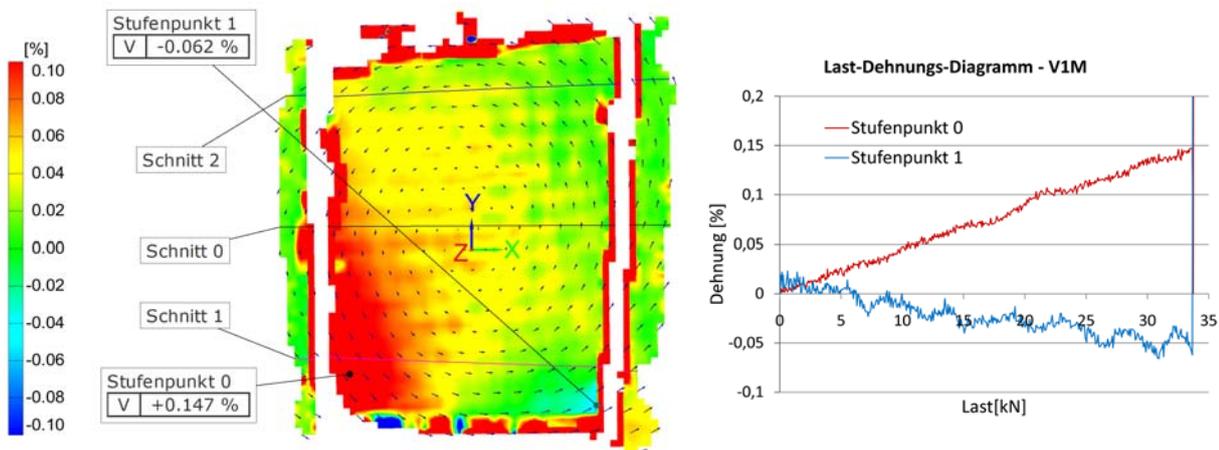


Abb. 10.18 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V1M

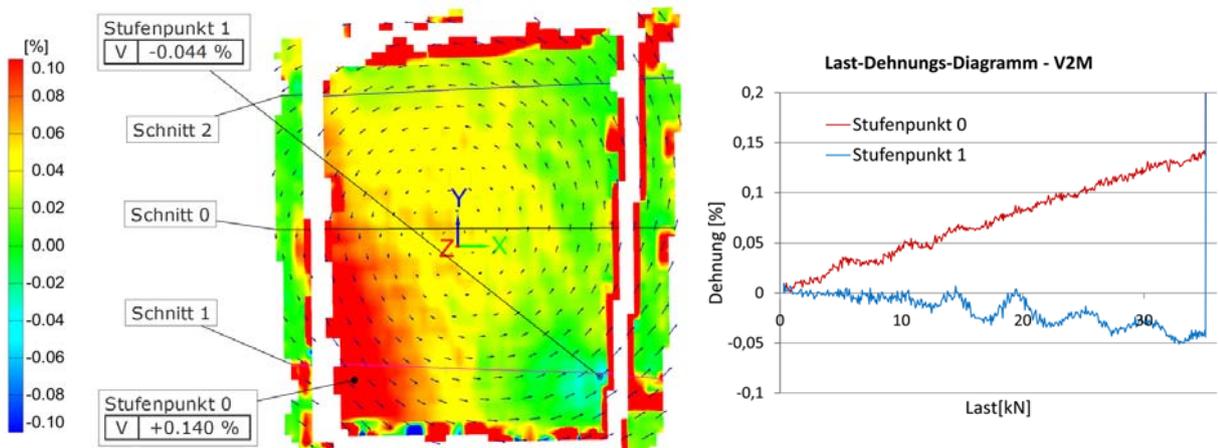


Abb. 10.19 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V2M

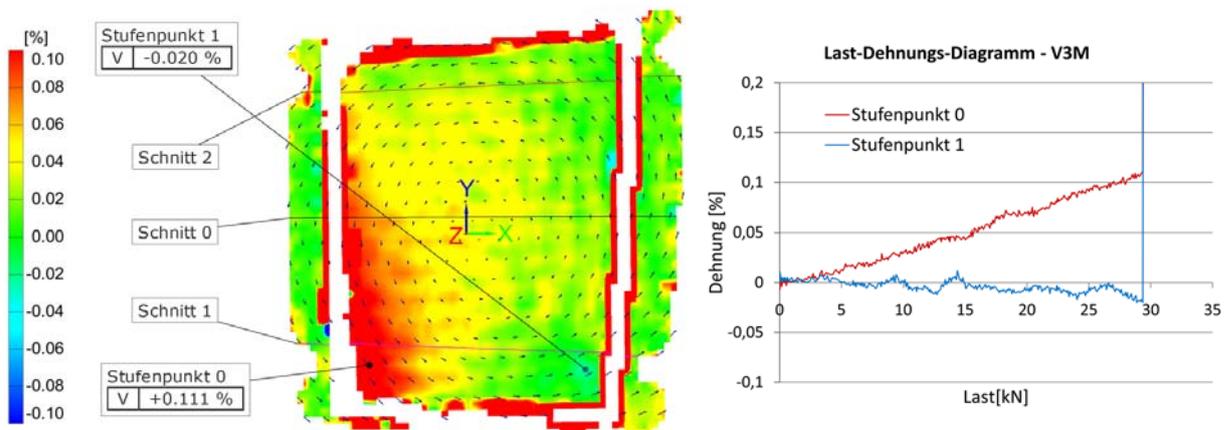


Abb. 10.20 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V3M

Bei dieser Versuchsreihe stimmen die Dehnungsbilder der drei Versuchskörper gut überein. Dieses ist auch an den kleinen, blauen Pfeilen erkennbar, welche die Richtung der Dehnungen angeben. Man stellt fest, dass das betrachtete Messfenster bei den drei Versuchskörper etwa den gleichen Drehmittelpunkt hat. Eine quantitative Beurteilung ist nur bedingt möglich, da bei den gemessenen Werten ein Rauschen feststellbar ist (siehe Diagramme auf der rechten Seite der Abbildungen). Vergleicht man aber die Dehnungen auf der Zugseite für den ausgewählten Punkt bei einer Last von 25 kN variieren die Werte nur geringfügig: 0,113 % für V1M, 0,102 % für V2M und 0,091% für V3M.

10.3.2 Versuchsreihe gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen

Die zweite getestete Variante ist das gevoutete Glasschwert mit Klotzungen aus POM (Polyoxymethylen) als Kontaktmaterial.

Zusammenbau

Auch diese Versuchskörper müssen zuerst zusammengebaut werden. Im Folgenden wird der Zusammenbau der gevouteten Glasschwerter mit Klotzungen stichwortartig erklärt und anhand von Fotos dokumentiert. Die meisten Schritte stimmen mit denen bei den gevouteten Glasschwertern mit Mörtel überein. Für diese wird auf die Abbildungen im Kapitel 10.3.1 verwiesen.

- ◆ in die Stahlschuhe wird im Abstand von 10 mm zu den Stirnblechen ein Silikon-Dichtband mit einer Höhe von 10 mm als Abstandhalter und zur Kammerung des Mörtels verklebt (siehe Abb. 10.7 links)
- ◆ die Glasfinne wird im Stahlschuh auf die geklebten Silikonstreifen eingelegt (siehe Abb. 10.7 rechts)
- ◆ die Klotzungsblöcke werden aus Folien mit verschiedenen Dicken (3 mm, 4 mm und 5 mm) auf die entsprechende Größe (80 x 45 mm seitlich und 50 x 45 mm oben) geschnitten und zwischen Glasfinne und Stirnbleche eingedrückt (siehe Abb. 10.21)

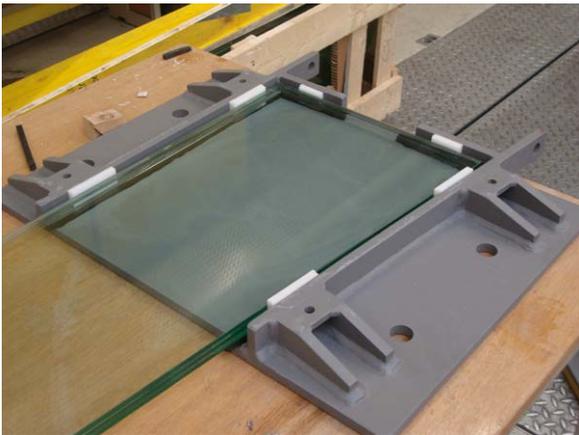


Abb. 10.21 Einbau der Klotzungsblöcke

- ◆ das vordere Deckblech wird mit vier M12 Schrauben befestigt (siehe Abb. 10.8 rechts)
- ◆ zwischen dem vorderen Deckblech und der Glasfinne wird ein Silikon-Dichtband als Abstandhalter eingepresst (siehe Abb. 10.9)

Anschließend werden DMS geklebt und der weiße Lack und das schwarze Punktmuster gesprüht. Die weiteren Schritte bis zur Versuchsdurchführung erfolgen gleich wie bei dem gevouteten Glasschwert mit Mörtel.

Versuchsdurchführung und Resttragfähigkeit

Die Versuchsdurchführung erfolgt ebenfalls gleich wie bei dem gevouteten Glasschwert mit Mörtel. Der Bruch tritt gleichzeitig in allen drei Scheiben spontan auf und es kann ein seitliches Ausweichen vor dem Bruch festgestellt werden. Diese Ausweichung ist beim Versuchskörper V6K am besten erkennbar. Bei einer Last von ca. 25 kN entsteht ein Peak, anschließend beginnt die Last wieder abzufallen, der Weg senkrecht zur Glasfinne nimmt zu und schließlich kommt es zum Bruch. Die Abb. 10.22 links zeigt den Versuchskörper V5K während der Versuchsdurchführung.

Weiters konnte festgestellt werden, dass die Klotzungen, wo keine Drucklasten eingeleitet werden, locker werden und teilweise wegrutschen (siehe Abb. 10.22 mitte). Es war vorgesehen, dass diese durch das vordere Deckblech gehalten werden. Bei einer konkreten Anwendung für die Aussteifung einer Fassade müssen die Klotzungen verklebt werden, damit sie auch bei Lastwechselzyklen (Winddruck und Windsog auf die Fassade) in ihrer Lage bleiben.

Zur Resttragfähigkeit kann man sagen, dass auch bei dieser Variante die Glasfinne im Stahlschuh hängen bleibt, allerdings rutscht sie etwas weiter nach unten bis sie sich durch die Voute einklemmt (siehe Abb. 10.22 mitte und rechts). Nach dem Bruch verlieren die Glasschwerter ihre Steifigkeit und sind nicht mehr im Stande Lasten aufzunehmen.



Abb. 10.22 Links: Versuchskörper V5K während der Versuchsdurchführung; Mitte: Versuchskörper V4K nach dem Bruch - die Klotzung rechts oben ist nach unten verrutscht; Rechts: Versuchskörper V4K nach dem Bruch - im Stahlschuh hängend

Bruchbilder

An dieser Stelle werden Bruchbilder der drei gevouteten Glasschwerter mit Klotzungen als Kontaktmaterial dargestellt. Direkt unter der Einspannstelle sind die Bruchbilder durch den Ausbau der Versuchskörper etwas verfälscht, da die Glasfinnen, aufgrund der Höhe, in diesem Bereich geknickt werden mussten.

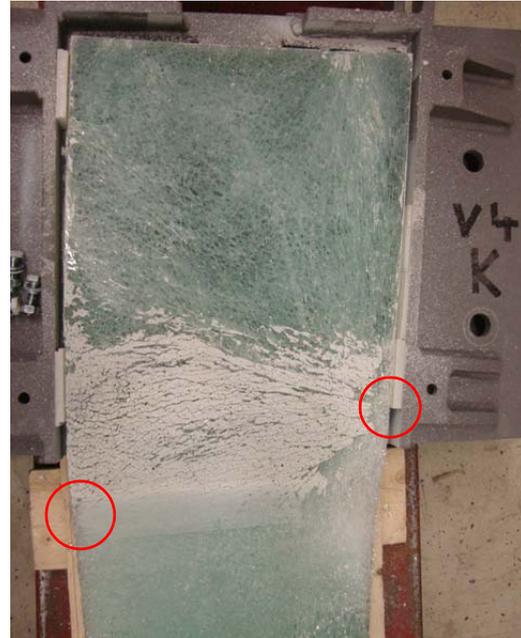


Abb. 10.23 Bruchbilder des Versuchskörper V4K

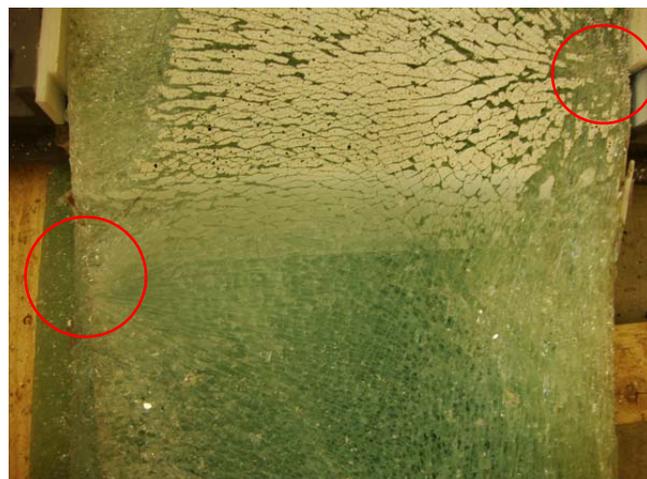
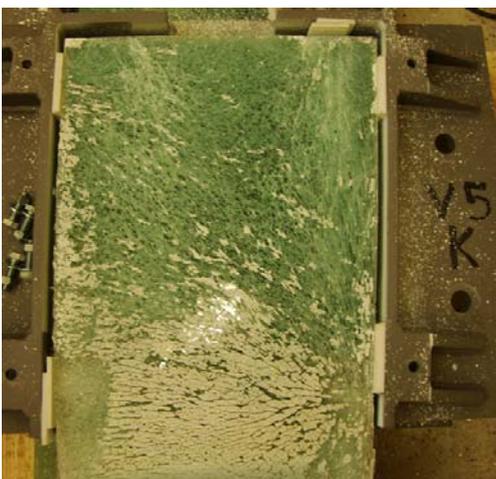


Abb. 10.24 Bruchbilder des Versuchskörper V5K

Eine eindeutige Lage des Erstbruches konnte bei diesen Versuchskörpern nicht festgestellt werden. Es wird aber vermutet, dass diese entweder auf der Zugkante unter dem Einspannbereich liegt, oder auf der Druckseite unter der Klotzung rechts, unten (in den Abbildungen rechts rot eingekreist). Im zweiten Fall kann der Bruch durch eine Überlagerung mit Zugspannungen aus der lokalen Knickbeanspru-

chung erklärt werden. Außerdem ist der Steifigkeitssprung am Klotzungsrand von Nachteil für die Beanspruchung des Glases in diesem Bereich.

Anhand der Bruchbilder kann man sehr gut die Spannungstrajektorien erkennen. Vor allem die Druckspannungstrajektorien, die zu den drei für die Lasteinleitung in dem Stahlschuh wirksamen Klotzungen führen, sind bei alle drei Versuchskörper erkennbar.

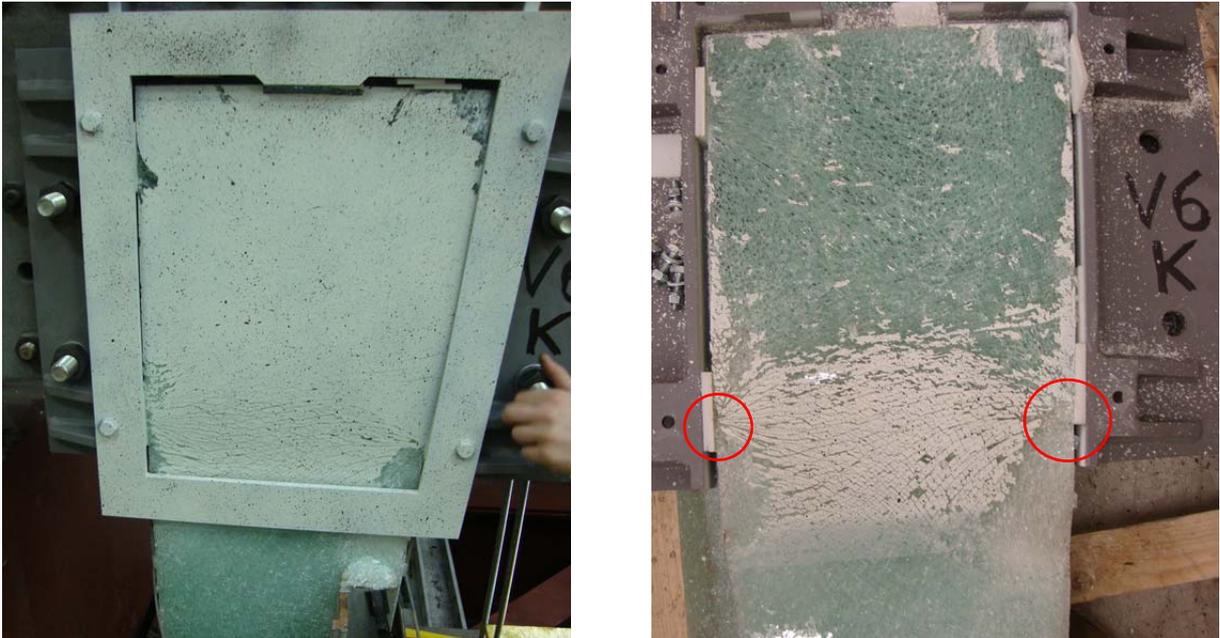


Abb. 10.25 Bruchbilder des Versuchskörper V6K

Messwerte - Wegaufnehmer und DMS

In diesem Abschnitt werden anhand von Diagrammen die Messergebnisse der Wegaufnehmer 1 und 2 und der zwei geklebten DMS für die drei getesteten gevouteten Glasschwerter mit Klotzungen als Kontaktmaterial dargestellt. Die Lage der Wegaufnehmer und der DMS ist in Abb. 10.3 ersichtlich. Der Wegaufnehmer 1 misst die Verschiebung der Finne relativ zum Prüfrahmen. In diesem Weg ist auch die Verformung des Gesamtprüfkörpers enthalten. Der Wegaufnehmer 2 misst die Verschiebung der Finne relativ zum Stahlschuh. Auch bei dieser Versuchsreihe kann man erkennen, dass sich der Versuchskörper zum Teil auch als Starrkörper verschiebt (verdreht).

Aus den drei Diagrammen kann auch die Bruchlast für jeden der drei Prüfkörper entnommen werden. Diese liegt beim Versuchskörper V5K bei 33,0 kN. Man kann aber auch bemerken, dass die Bruchlast bei den drei Prüfkörper der Versuchsreihe stark variiert.

Bei dem Versuchskörper V6K ist bei etwa 25 kN ein Peak aufgetreten. Die Last hat angefangen abzunehmen, während die Dehnungen weiter bis zum Bruch zugenommen haben. Dieses Verhalten ist für das linear-elastische, spröde Material Glas uncharakteristisch.

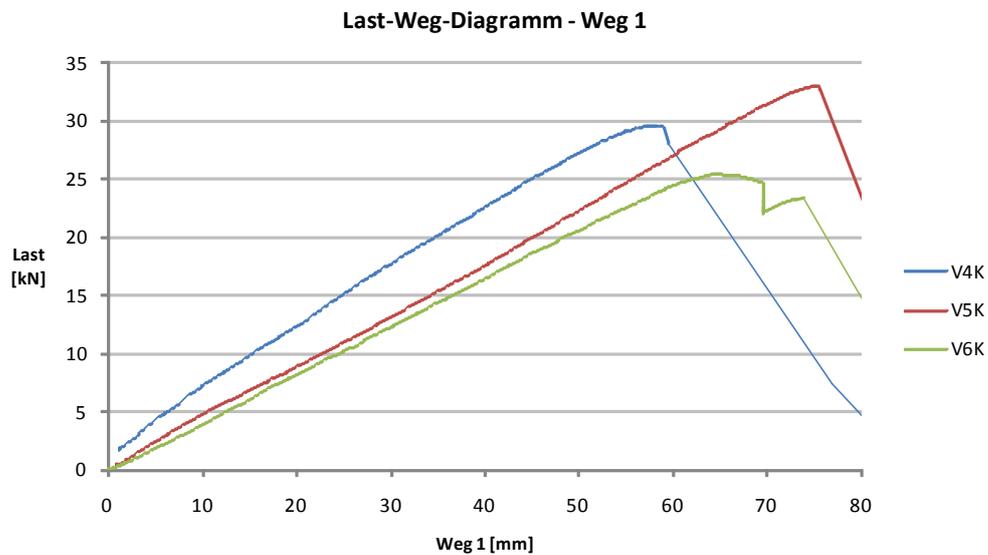


Abb. 10.26 Last-Weg-Diagramm - Wegaufnahme 1 - Verschiebung der Glasfinne zum Prüfraumen für die Versuchskörper V4K, V5K und V6K

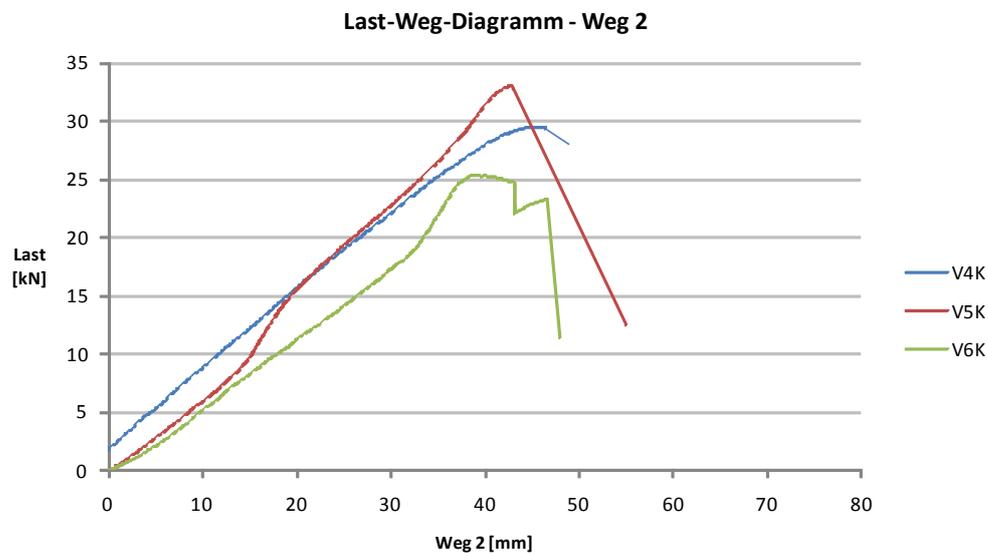


Abb. 10.27 Last-Weg-Diagramm - Wegaufnahme 2 - Verschiebung der Glasfinne zum Stahlschuh für die Versuchskörper V4K, V5K und V6K

Die Abb. 10.28 zeigt den Dehnungszuwachs an der Zugseite und an der Druckseite über die gesamte Laststeigerung an den Stellen, wo die DMS geklebt wurden. Diese Stellen befinden sich in dem Bereich wo die maximalen Zug- und Druckspannungen auftreten sollten. Es kann aber sein, dass auch höhere Werte in deren Nähe entstehen.

Versuchskörper	Dehnung - Zug [%]	Zugspannung [N/mm ²]	Dehnung - Druck [%]	Druckspannung [N/mm ²]
V4K	0,19	133	-0,15	-105
V5K	0,21	147	-0,18	-126
V6K	0,20	140	-0,12	-84

Tab. 10.3 Dehnungen und Spannungen an den Messstellen der zwei DMS für die Versuchskörper V4K, V5K und V6K

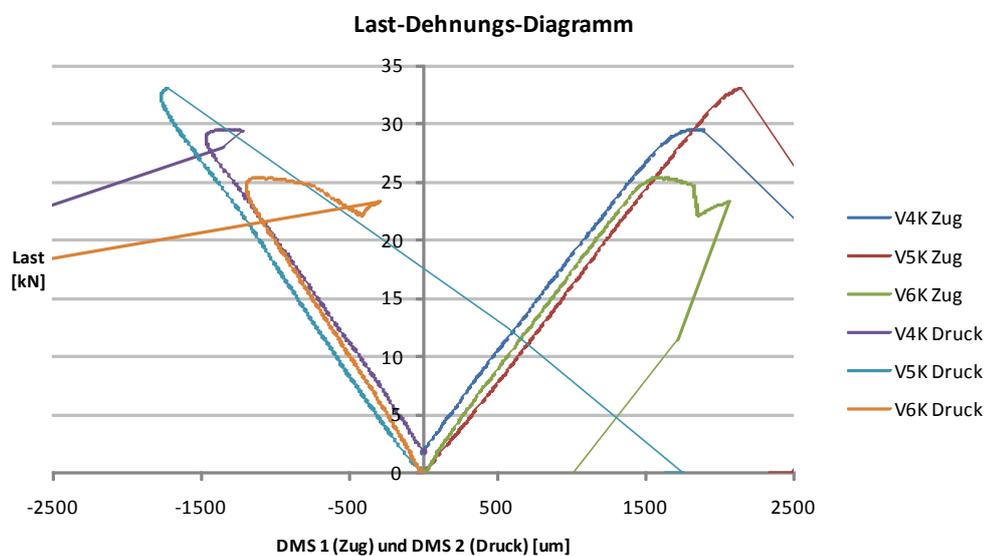


Abb. 10.28 Last-Dehnungs-Diagramm - DMS 1 und DMS 2- Dehnungen (Zug und Druck) an den Stirnseiten der vorderen Scheibe der Versuchskörper V4K, V5K und V6K, unter dem Stahlschuh

Dehnungsmessung mit Aramis

In diesem Abschnitt werden für die gevouteten Glasschwerter mit Klotzungen die mit ARAMIS aufgenommenen Messergebnisse analysiert. Es werden in den Abb. 10.29 bis Abb. 10.31 für jeden der drei Versuchskörper das Dehnungsbild vor dem Bruch und der Verlauf der Dehnungen über die Laststeigerung für zwei ausgewählte Punkte - einer auf der Zugseite und einer auf der Druckseite - dargestellt. Es wird versucht die Punkte, welche die maximalen Dehnungen bzw. Stauchungen erfahren, auszuwählen.

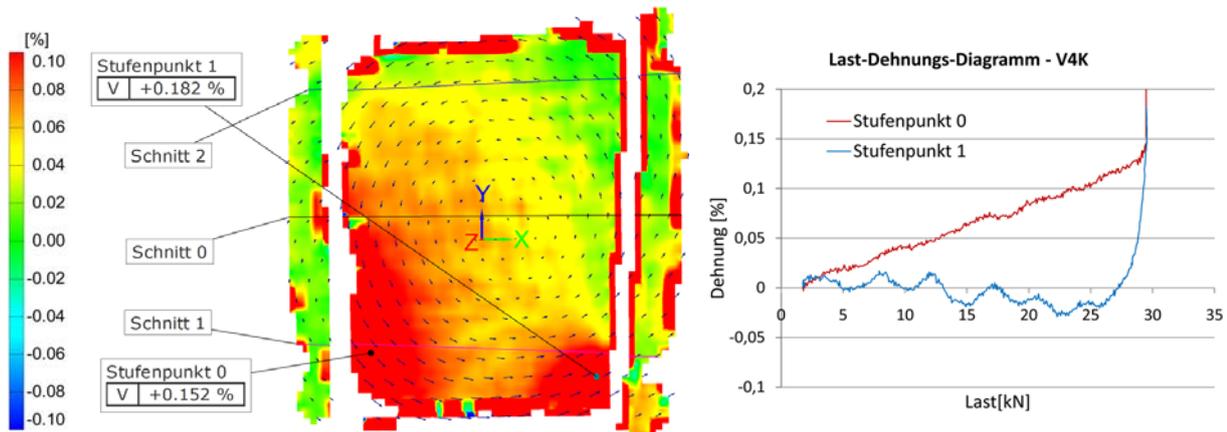


Abb. 10.29 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V4K

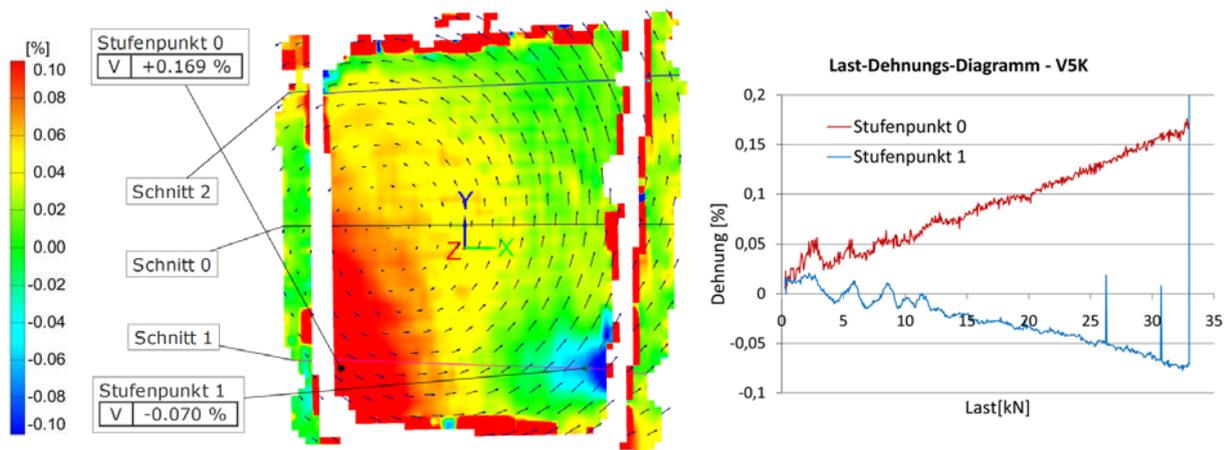


Abb. 10.30 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V5K

Bei dieser Versuchsreihe stimmen die Dehnungsbilder der drei Versuchskörper nicht gut überein. Dieses spiegelt sich auch in der Variation der Bruchlast von 25,4 kN beim Versuchskörper V6K bis 33,0 kN beim Versuchskörper V4K wider. Beim Versuchskörper V5K sieht man im Dehnungsbild den Lasteinleitungsbereich auf der Druckseite ganz deutlich (blau gefärbt in Abb. 10.30). Bei den anderen zwei Versuchskörper werden in diesem Bereich Zugspannungen (Dehnungen) angezeigt. Dieses kann durch die Verformung senkrecht zur Finne erklärt werden. In Abb. 10.32 werden für die Versuchskörper V4K

und V6K die Verschiebungen in Z-Richtung (senkrecht zur Finne) für die zwei betrachteten Punkte über die Belastungszeit dargestellt. Dabei sind positive Werte in Richtung des Aufnahmegerätes gerichtet. Man sieht, dass in beiden Fällen bei höheren Laststufen der Punkt auf der Druckseite Verschiebungen weg vom Messgerät erfährt. Somit kann man darauf zurückschliessen, dass die äussere, in der Messung aufgenommene Scheibe Zugspannungen erfährt, die sich den Druckspannungen aus der Biegung in Scheibenrichtung überlagern.

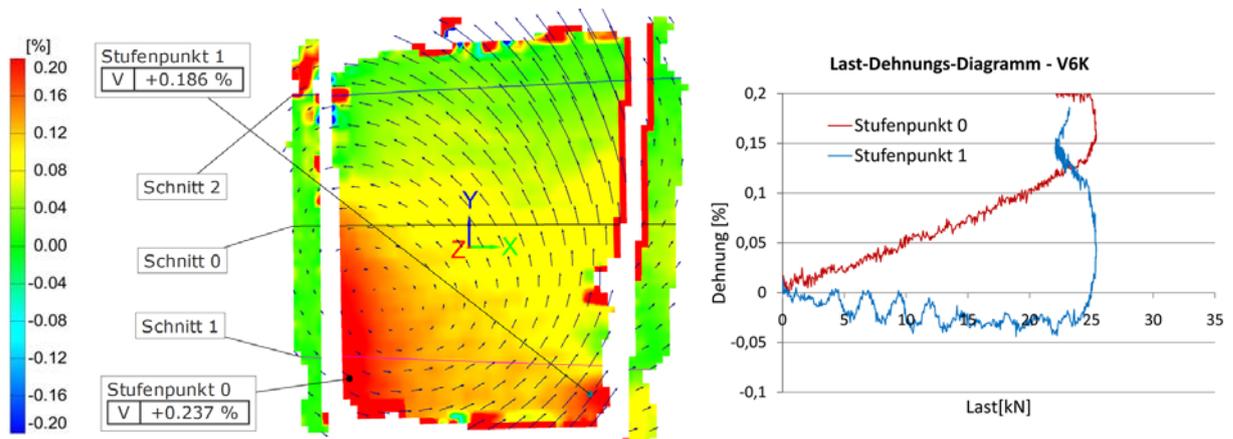


Abb. 10.31 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V6K

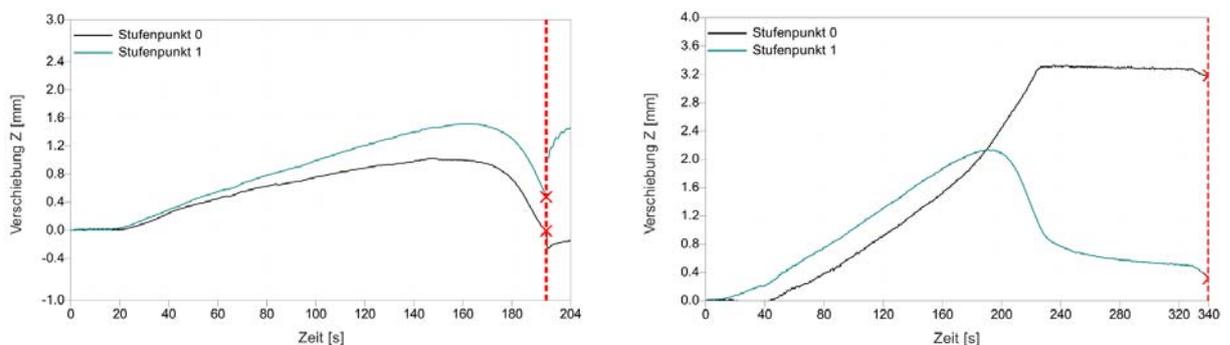


Abb. 10.32 Verschiebungen senkrecht zur Glasfinne für zwei ausgewählte Punkte (Links: V4K; Rechts: V6K)

Zusätzlich kann man beim Vergleich der Trajektorien in den Dehnungsbildern feststellen, dass die Lage des Drehmittelpunktes bei den drei Versuchskörper nicht übereinstimmt.

Vergleicht man die Dehnungen auf der Zugseite für den ausgewählten Punkt bei einer Last von 25 kN, variieren die Werte etwas stärker als bei dem gevouteten Glasschwert mit Mörtel: 0,104 % für V4K, 0,120 % für V5K und 0,142% für V6K.

10.3.3 Versuchsreihe rechteckiges Glasschwert mit Mörtel

Die dritte getestete Variante ist das rechteckige Glasschwert mit Mörtel Hilti HIT-HY 70 als Kontaktmaterial. Die Geometrie wurde gleich wie die der gevouteten Glasschwerter im Kapitel 8 bei der Versuchskörperentwicklung behandelt.

Zusammenbau

Im Folgenden wird der Zusammenbau der rechteckigen Glasschwerter mit Mörtel stichwortartig erklärt und anhand von Fotos dokumentiert. Zusätzlich zu den Schritten, die beim gevouteten Glasschwert erforderlich waren, müssen bei den rechteckigen zuerst die Aluminiumhülsen in die Bohrlöcher eingebaut werden. Dazu werden die Hülsen mit Nägel an eine Doka-Schalttafel befestigt und die Glasfinnen darüber gelegt. Der Raum zwischen Hülse und Finne wird mit Mörtel Hilti HIT-HY 70 ausinjiziert (siehe Abb. 10.33 links). Dieser muss den eventuellen Kantenversatz der drei ESG-Scheiben ausgleichen, damit keine Spannungsspitzen entstehen (siehe Abb. 10.33 rechts).

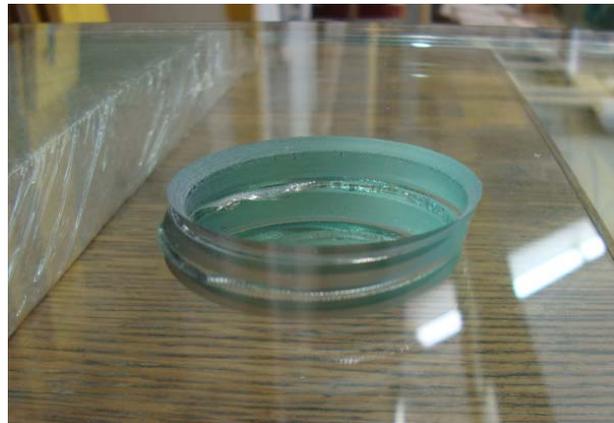


Abb. 10.33 Links: Einbau der Alu-Hülsen; Rechts: Kantenversatz im Bereich des Bohrloches

Die weiteren Schritte sind gleich wie bei den gevouteten Glasschwertern mit Mörtel:

- ◆ in die Stahlschuhe wird im Abstand von 10 mm zu den Stirnblechen ein Silikon-Dichtband mit einer Höhe von 10 mm als Abstandhalter und zur Kammerung des Mörtels verklebt
- ◆ die Glasfinne wird im Stahlschuh auf die geklebten Silikonstreifen eingelegt
- ◆ in dem Raum zwischen Stirnblechen und Glasfinne wird eine erste Mörtelschicht Hilti HIT-HY 70 injiziert
- ◆ das vordere Deckblech wird mit vier M12 Schrauben befestigt
- ◆ der Raum zwischen dem vorderen Deckblech und der ersten Mörtelschicht wird mit Hilti HIT-HY 70 ausgefüllt
- ◆ zwischen dem vorderen Deckblech und der Glasfinne wird ein Silikon-Dichtband als Abstandhalter eingepresst



Abb. 10.34 Links: Zusammengebauter Versuchskörper R7M; Detail des zusammengebauten Versuchskörper R8M

Anschließend werden, gleich wie bei den gevouteten Glasschwertern, DMS geklebt und der weiße Lack und das schwarze Punktmuster gesprüht.

Versuchsdurchführung und Resttragfähigkeit

Die Versuchsdurchführung erfolgt gleich wie bei den gevouteten Glasschwertern. Die Last wird Weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s aufgebracht. Der Bruch tritt gleichzeitig in allen drei Scheiben spontan auf. Auch bei dieser Versuchsreihe wird eine steigende Verschiebung quer zur Glasfinne mit dem Wegaufnehmer 3 aufgenommen. Beim Versuchskörper R8M beträgt diese fast 7 mm. Die Abb. 10.35 links zeigt den Versuchskörper R8M vor der Versuchsdurchführung.

Zur Resttragfähigkeit kann man sagen, dass auch bei dieser Variante die Glasfinne im Stahlschuh hängen bleibt (siehe Abb. 10.35 mitte). Im Unterschied zu den gevouteten Schwertern aber hängt der zerstörte Versuchskörper an dem Bolzen. Es ist zu erwähnen, dass bei dieser Versuchsreihe, wie auch bei den gevouteten Glasschwertern mit Mörtel als Kontaktmaterial, keine Risse im Mörtel sichtbar waren, obwohl bei den erreichten Lasten die Druckspannungen im Mörtel deutlich höher als die vom Hersteller angegebenen maximalen charakteristischen Werte sind. Daraus kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass bei Kammerung des Mörtels (Querdehnungsbehinderung) dieser deutlich höhere Druckspannungen aufnehmen kann.

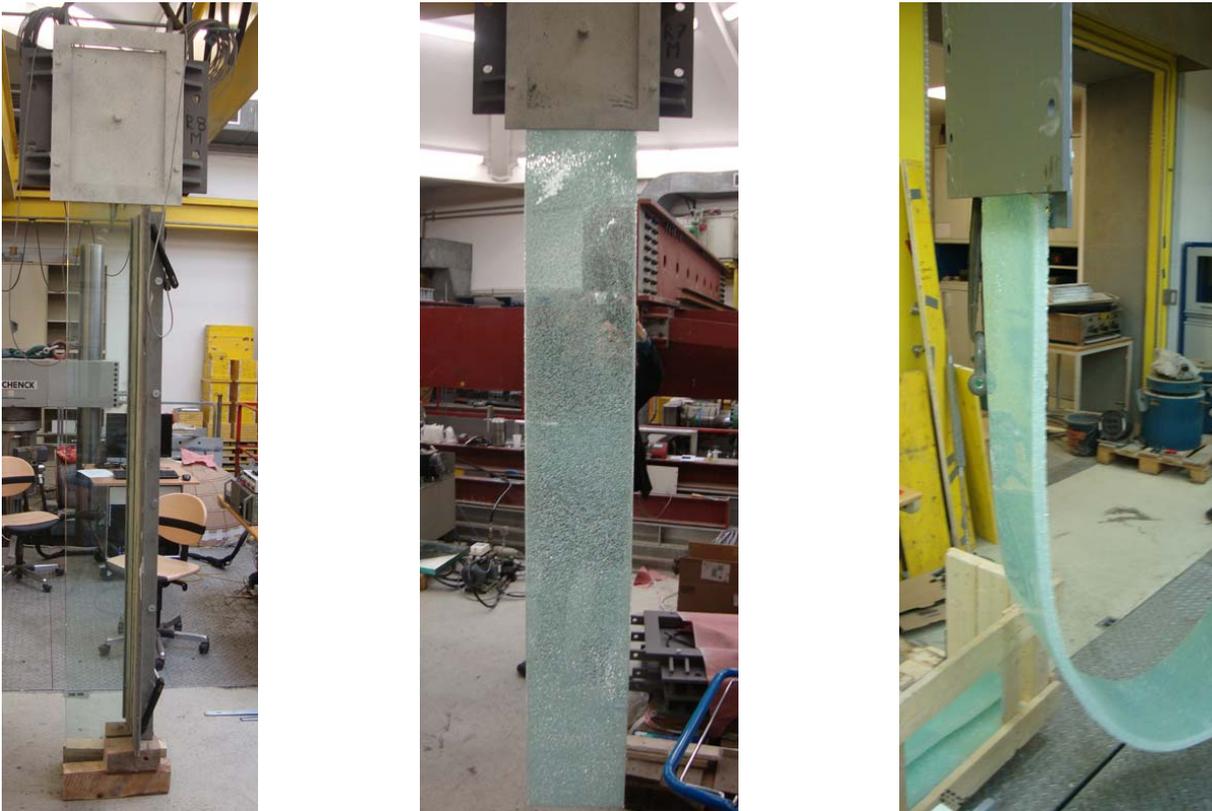


Abb. 10.35 Links: Versuchskörper R8M vor dem Einbau; Mitte: Versuchskörper R7M nach dem Bruch - im Stahlschuh hängend; Rechts: Versuchskörper R9M nach dem Bruch - die Glaskrümmel haften an den PVB-Folien

Bruchbilder

In diesem Abschnitt werden Bruchbilder der drei rechteckigen Glasschwerter mit Mörtel als Kontaktmaterial dargestellt. Direkt unter der Einspannstelle sind die Bruchbilder durch den Ausbau der Versuchskörper etwas verfälscht, da die Glasfinnen, aufgrund der Höhe, in diesem Bereich geknickt werden mussten.

Anhand der Bruchbilder kann man vor allem die Spannungstrajektorien erkennen. Die Richtung der Lastabtragung und die Stellen an welchen die Lasten in den Stahlschuh eingeleitet werden sind deutlich zu sehen. Außerdem kann man eine Drucktrajektorie entlang des Bohrloches feststellen. Durch die Krümmung dieser Trajektorie um das Bohrloch kann man auf Querspannungen in diesem Bereich zurückschließen. Diese Bilder zeigen, dass die Überlegungen aus Kapitel 6.4, das Bohrloch nach oben (in Abb. 10.38 rechts nach rechts) zu verlegen durchaus gerechtfertigt sind. In diesem Bereich herrschen niedrigere Beanspruchungen des Glases.

Die Lage des Erstbruches scheint auf der Zugkante unter dem Stahlschuh zu liegen, da sich von diesem Punkt aus Trajektorien in allen Richtungen ausbreiten. Beim Versuchskörper R7M liegt diese Stelle im Bereich des Stahlschuhs.

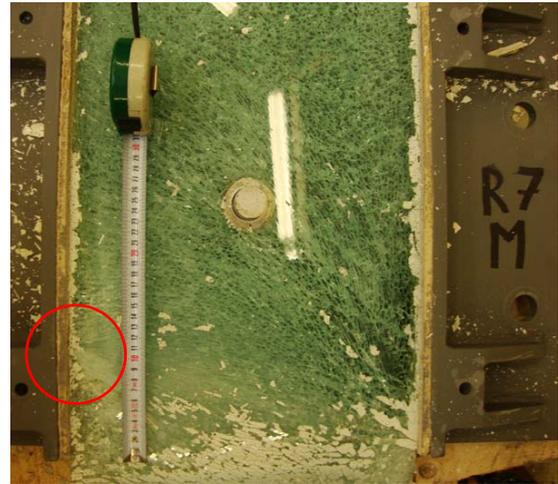


Abb. 10.36 Bruchbilder des Versuchskörper R7M



Abb. 10.37 Bruchbilder des Versuchskörper R8M



Abb. 10.38 Bruchbilder des Versuchskörper R9M

Messwerte - Wegaufnehmer und DMS

In diesem Abschnitt werden anhand von Diagrammen die Messergebnisse der Wegaufnehmer 1 und 2 und der zwei geklebten DMS für die drei getesteten rechteckigen Glasschwerter mit Mörtel als Kontaktmaterial dargestellt. Die Lage der Wegaufnehmer und der DMS ist gleich wie im Falle der gevouteten Glasschwerter. Der Wegaufnehmer 1 misst die Verschiebung der Finne relativ zum Prüfrahmen. In diesem Weg ist auch die Verformung des Gesamtprüfkörpers enthalten. Der Wegaufnehmer 2 misst die Verschiebung der Finne relativ zum Stahlschuh. Auch bei dieser Versuchsreihe kann man erkennen, dass sich der Versuchskörper zum Teil auch als Starrkörper verschiebt (verdreht).

Aus den drei Diagrammen kann auch die Bruchlast für jeden der drei Prüfkörper entnommen werden. Diese liegt bei alle drei Versuchskörper bei ca. 30,0 kN. Im Unterschied zu den gevouteten Glasschwertern mit Klotzungen variiert die Bruchlast bei dieser Versuchsreihe nicht.

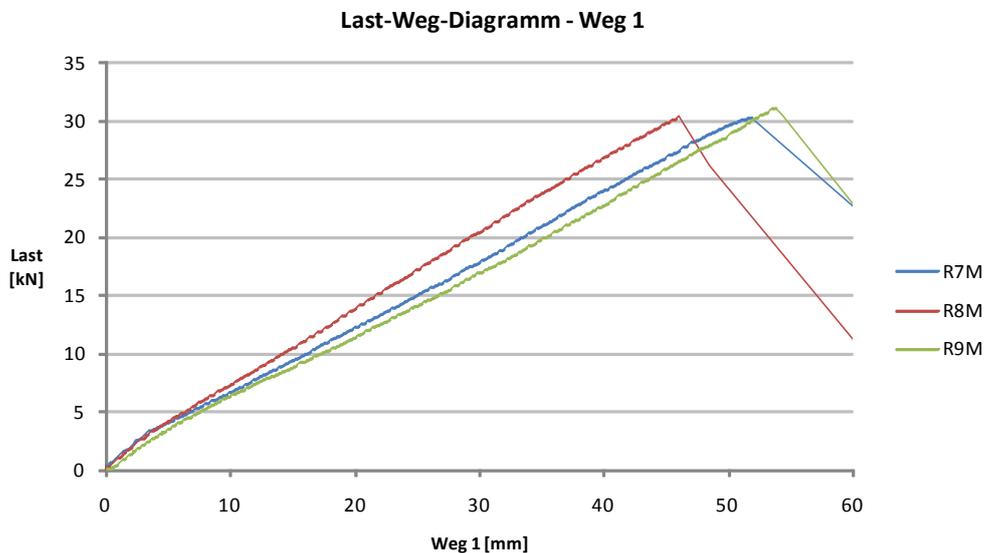


Abb. 10.39 Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 1 - Verschiebung der Glasfinne zum Prüfrahmen für die Versuchskörper R7M, R8M und R9M

Die Abb. 10.41 zeigt den Dehnungszuwachs an der Zugseite und an der Druckseite über die gesamte Laststeigerung an den Stellen, wo die DMS geklebt wurden. Diese Stellen befinden sich in dem Bereich wo die maximalen Zug- und Druckspannungen auftreten sollten. Es kann aber sein, dass auch höhere Werte in deren Nähe entstehen.

Versuchskörper	Dehnung - Zug [%]	Zugspannung [N/mm ²]	Dehnung - Druck [%]	Druckspannung [N/mm ²]
R7M	0,18	126	-0,15	-105
R8M	0,18	126	-0,18	-126
R9M	0,20	140	-0,18	-126

Tab. 10.4 Dehnungen und Spannungen an den Messstellen der zwei DMS für die Versuchskörper R7M, R8M und R9M

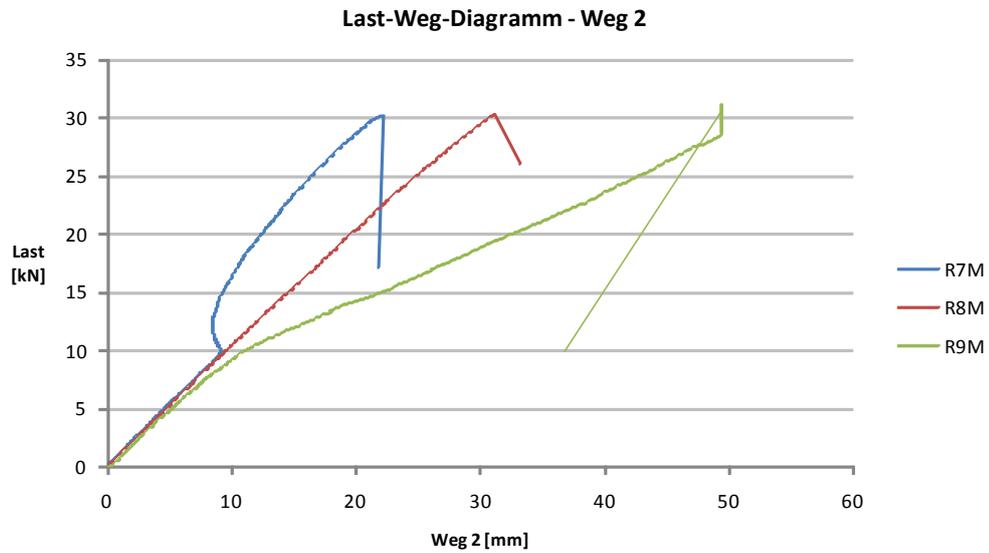


Abb. 10.40 Last-Weg-Diagramm - Wegaufnahme 2 - Verschiebung der Glasfinne zum Stahlschuh für die Versuchskörper R7M, R8M und R9M

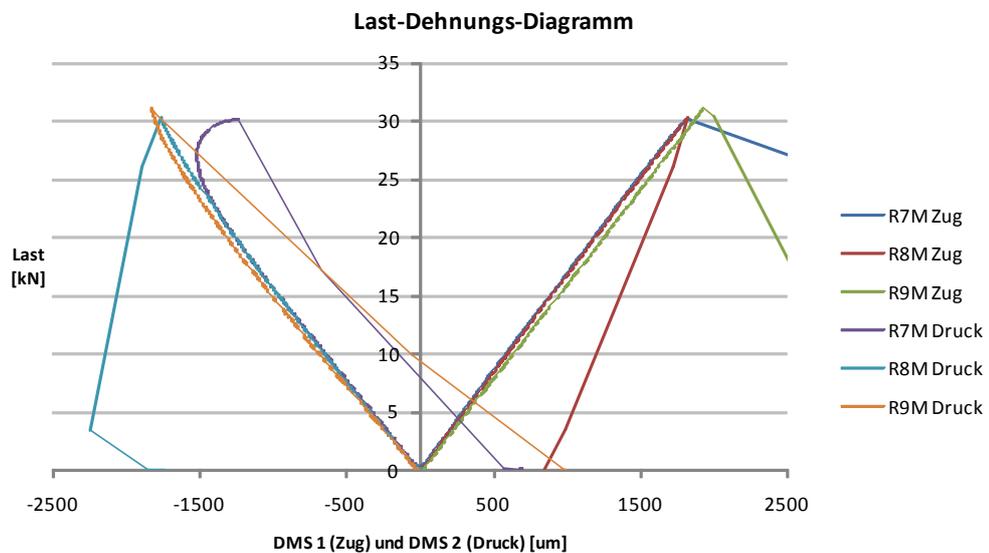


Abb. 10.41 Last-Dehnungs-Diagramm - DMS 1 und DMS 2- Dehnungen (Zug und Druck) an den Stirnseiten der vorderen Scheibe der Versuchskörper R7M, R8M und R9M, unter dem Stahlschuh

Dehnungsmessung mit Aramis

In diesem Abschnitt werden für die rechteckigen Glasschwerter mit Mörtel die mit ARAMIS aufgenommenen Messergebnisse analysiert. Es werden in den Abb. 10.42 bis Abb. 10.44 für jeden der drei Versuchskörper das Dehnungsbild vor dem Bruch und der Verlauf der Dehnungen über die Laststeigerung für drei ausgewählte Punkte dargestellt. Zusätzlich zu den zwei Punkten auf der Zugseite und auf der Druckseite, die schon bei den gevouteten Glasschwertern betrachtet wurden, werden hier auch die Dehnungen (Hauptzugspannungen) im Bereich des Bohrloches mit einem Punkt erfasst (orange in den Diagrammen). Es wird versucht die Punkte, welche die maximalen Dehnungen bzw. Stauchungen erfahren, auszuwählen.

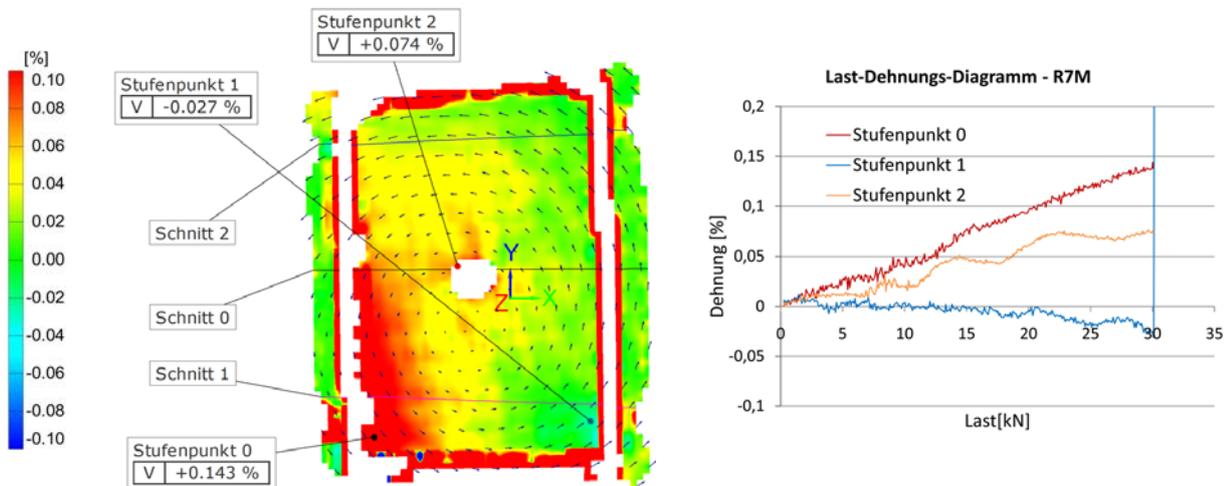


Abb. 10.42 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R7M

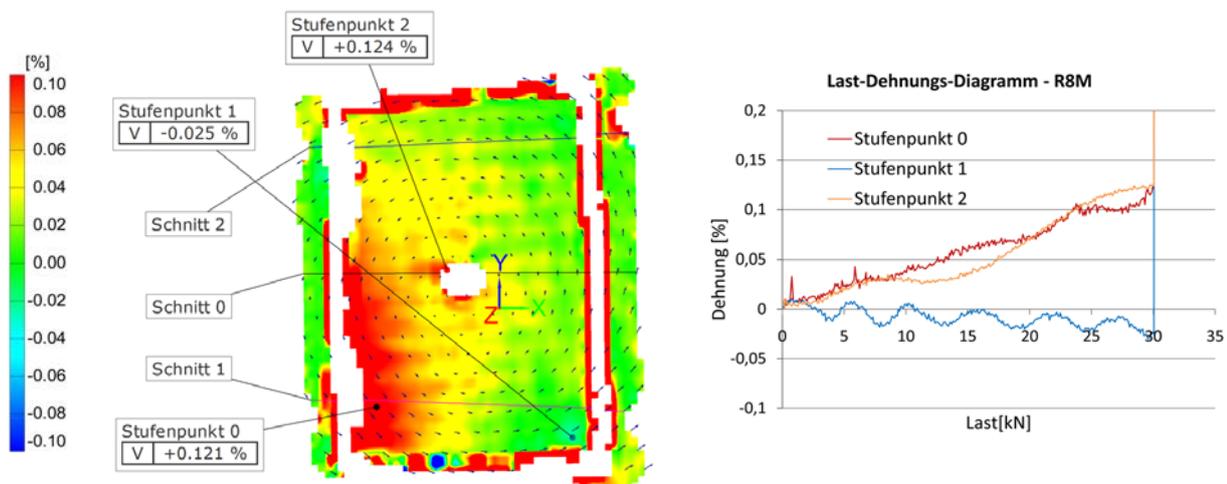


Abb. 10.43 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R8M

Bei dieser Variante, wie auch schon bei dem gevouteten Glasschwert mit Mörtel stimmen die Dehnungsbilder der drei Versuchskörper gut überein. Auch die Bruchlasten liegen mit 30,2 kN bei R7M, 30,4 kN bei R8M und 31,1 kN bei R9M nahe aneinander. Ausserdem liegen die Drehmittelpunkte bei

allen drei Versuchskörper wie erwartet im Bereich des Bohrloches. In den dargestellten Diagrammen kann man (wie schon in der numerischen Berechnung gezeigt) erkennen, dass auch im Bereich des Bohrloches hohe Dehnungen und somit Zugspannungen entstehen.

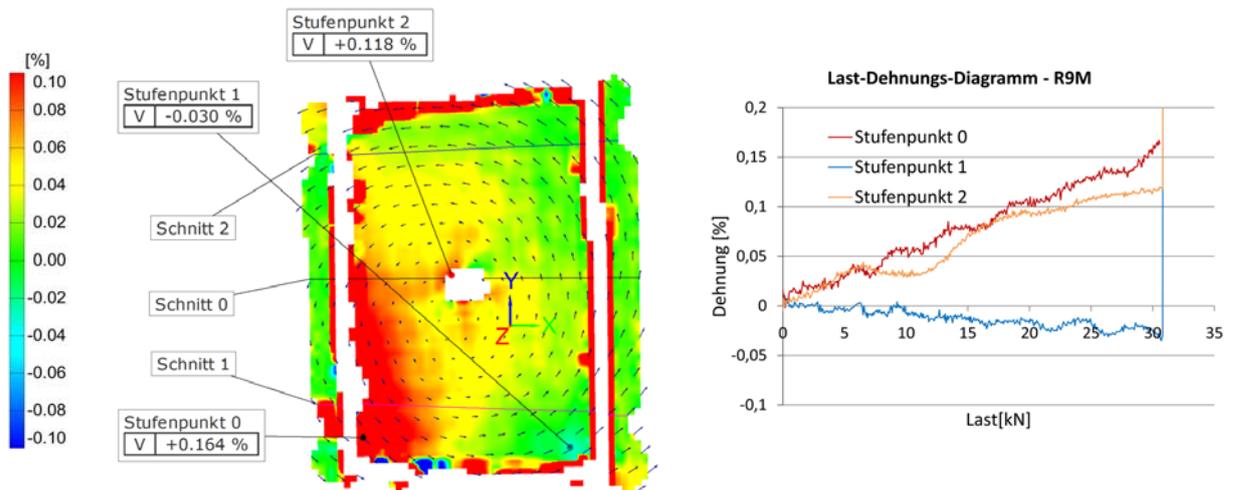


Abb. 10.44 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R9M

Vergleicht man die Dehnungen auf der Zugseite für den ausgewählten Punkt bei einer Last von 25 kN variieren die Werte nur geringfügig: 0,119 % für R7M, 0,101 % für R8M und 0,126 % für R9M. Eine Auswertung der Verschiebungen in Z-Richtung zeigt, dass sich der Punkt auf der Druckseite bis zum Bruch bei allen drei Versuchskörper um etwa 2,5 mm in Richtung des Messgerätes verschiebt.

10.3.4 Versuchsreihe rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen

Die letzte getestete Variante ist das rechteckige Glasschwert mit Klotzungen aus POM (Polyoxymethylen) als Kontaktmaterial.

Zusammenbau

Im Folgenden wird der Zusammenbau der rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen stichwortartig erklärt und anhand von Fotos dokumentiert. Die durchzunehmenden Schritte sind gleich wie bei der gevouteten Variante mit Klotzung, nur dass als Erstes, wie auch bei dem rechteckigen Glasschwert mit Mörtel, die Alu-Hülsen eingebaut werden müssen.

- ◆ die Hülse wird im Bohrloch eingelegt und der Raum zwischen Hülse und Finne wird mit Mörtel Hilti HIT-HY 70 ausinjiziert
- ◆ in die Stahlschuhe wird im Abstand von 10 mm zu den Stirnblechen ein Silikon-Dichtband mit einer Höhe von 10 mm als Abstandhalter und zur Kammerung des Mörtels verklebt
- ◆ die Glasfinne wird im Stahlschuh auf die geklebten Silikonstreifen eingelegt
- ◆ die Klotzungsblöcke werden aus Folien mit verschiedenen Dicken (3 mm, 4 mm und 5 mm) auf die entsprechende Größe (80 x 45 mm) geschnitten und zwischen Glasfinne und Stirnbleche eingedrückt (siehe Abb. 10.45 links)
- ◆ das vordere Deckblech wird mit vier M12 Schrauben befestigt
- ◆ zwischen dem vorderen Deckblech und der Glasfinne wird ein Silikon-Dichtband als Abstandhalter eingepresst (siehe Abb. 10.45 rechts)

Anschließend werden, gleich wie bei den bisher besprochenen Glasschwertern, DMS geklebt und der weiße Lack und das schwarze Punktmuster gesprüht. Die weiteren Schritte bis zur Versuchsdurchführung erfolgen ebenfalls gleich wie bei den restlichen Glasschwertern.

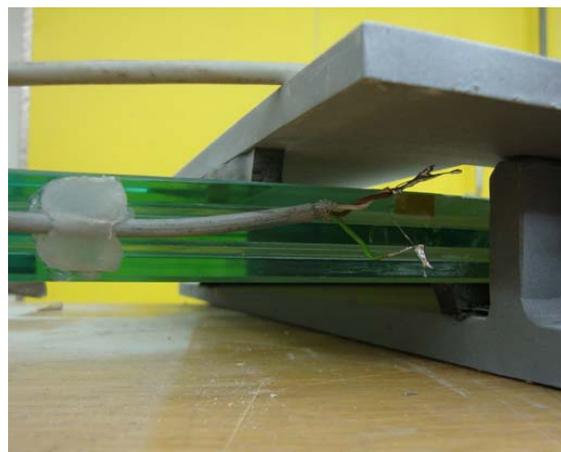


Abb. 10.45 Links: Einbau der Klotzungsblöcke beim Versuchskörper R10K;
Rechts: Silikon-Dichtband als Abstandhalter und DMS beim Versuchskörper R10K

Versuchsdurchführung und Resttragfähigkeit

Die Versuchsdurchführung erfolgt gleich wie bei den restlichen Glasschwertern. Die Last wird Weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s aufgebracht. Im Unterschied zu den anderen Versuchsreihen ist bei dieser bei einem Versuchskörper (R12K) nur eine Scheibe gebrochen. Nach dem Bruch ist die Last abgefallen. Bei diesem Glasschwert wurde ein Kantenversatz der einen Scheibe von ca. 1 mm gemessen. Da die Klotzungen diese Ungenauigkeit nicht ausgleichen können, wird die eine Scheibe auf der Druckseite vor den anderen beansprucht. Bei dieser Versuchsreihe werden kleinere Verschiebungen quer zur Glasfinne mit dem Wegaufnehmer 3 aufgenommen. Beim Versuchskörper R11K beträgt diese maximal etwa 1mm. Bei dem Versuchskörper R10K kommt sie auf etwa 4,5 mm. Die Abb. 10.46 links zeigt den Versuchskörper R10K während der Versuchsdurchführung.

Zur Resttragfähigkeit kann man bei dieser Versuchsreihe zwei Behauptungen machen. Einerseits bleiben die Schwerter auch beim Bruch aller Scheiben in den Stahlschuh aufgrund der Lochleibungsverbindung hängen. Andererseits ist beim Versuchskörper R12K eine einzige Scheibe gebrochen, so dass man in diesem Fall behaupten kann, dass die Finne auch noch eine gewisse Steifigkeit aufweist, Jedoch kann man davon ausgehen, dass es eher eine Ausnahme ist, dass nur eine Scheibe versagt, so dass bei der Planung eine Redundanz berücksichtigt werden sollte.

Bei dieser Versuchsserie kann man im Falle der zwei Versuchskörper, bei denen alle drei Scheiben gebrochen sind bemerken, dass der Mörtel im Bereich der Hülse gerissen ist. Das lässt darauf zurück-schliessen, dass in diesem Bereich hohe Druckspannungen eingeleitet werden und im Glas Querspannungen entstehen.



Abb. 10.46 Links: Versuchskörper R10K während der Versuchsdurchführung; Mitte: Versuchskörper R11K nach dem Bruch - im Stahlschuh hängend; Rechts: Versuchskörper R12K nach dem Bruch - nur eine Scheibe ist gebrochen

Bruchbilder

An dieser Stelle werden Bruchbilder der drei rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen als Kontaktmaterial dargestellt. Direkt unter der Einspannstelle sind die Bruchbilder durch den Ausbau der Versuchskörper etwas verfälscht, da die Glasfalten, aufgrund der Höhe, in diesem Bereich geknickt werden mussten.



Abb. 10.47 Bruchbilder des Versuchskörper R10K



Abb. 10.48 Bruchbilder des Versuchskörper R11K

Auch bei den Bruchbildern dieser Versuchsreihe kann man die gleichen Spannungstrajektorien feststellen wie bei der rechteckigen Variante mit Mörtel. Die Lasten gehen konzentriert in die zwei Klotzungen, die durch die Biegung wirksam sind, ein. Auch die Drucktrajektorien entlang des Bohrloches sind deutlich zu erkennen.

Im Unterschied zu dem rechteckigen Glasschwert mit Mörtel, lassen sich in diesem Fall keine Erstbruchstellen an der Zugkante erkennen. Aufgrund des gerissenen Mörtels im Bereich der Hülse bei den Versuchskörpern R10K und R11K (siehe Abb. 10.47 und Abb. 10.48) wird vermutet, dass der Erstbruch in diesem Bereich aufgrund des entstehenden Querzuges auftritt.

Bei dem Versuchskörper R12K sind die Trajektorien des Bruchbildes am besten zu erkennen, weil nur eine Scheibe (siehe Abb. 10.49 rechts) gebrochen ist und sich somit nicht die Bruchbilder von drei Scheiben überlagern.



Abb. 10.49 Bruchbilder des Versuchskörper R12K

Messwerte - Wegaufnehmer und DMS

In diesem Abschnitt werden anhand von Diagrammen die Messergebnisse der Wegaufnehmer 1 und 2 und der zwei geklebten DMS für die drei getesteten rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen als Kontaktmaterial dargestellt. Die Lage der Wegaufnehmer und der DMS ist gleich wie bei den restlichen Glasschwertern. Der Wegaufnehmer 1 misst die Verschiebung der Finne relativ zum Prüfrahmen. In diesem Weg ist auch die Verformung des Gesamtprüfkörpers enthalten. Der Wegaufnehmer 2 misst die Verschiebung der Finne relativ zum Stahlschuh. Bei dieser Versuchsreihe ist der Anteil der Starrkörperverformung an der Gesamtverformung am größten.

Aus den drei Diagrammen kann auch die Bruchlast für jeden der drei Prüfkörper entnommen werden. Diese liegt bei allen drei Versuchskörpern geringfügig unter 25,0 kN. Damit weist dieser Typ von Glasschwert die geringste Tragfähigkeit.

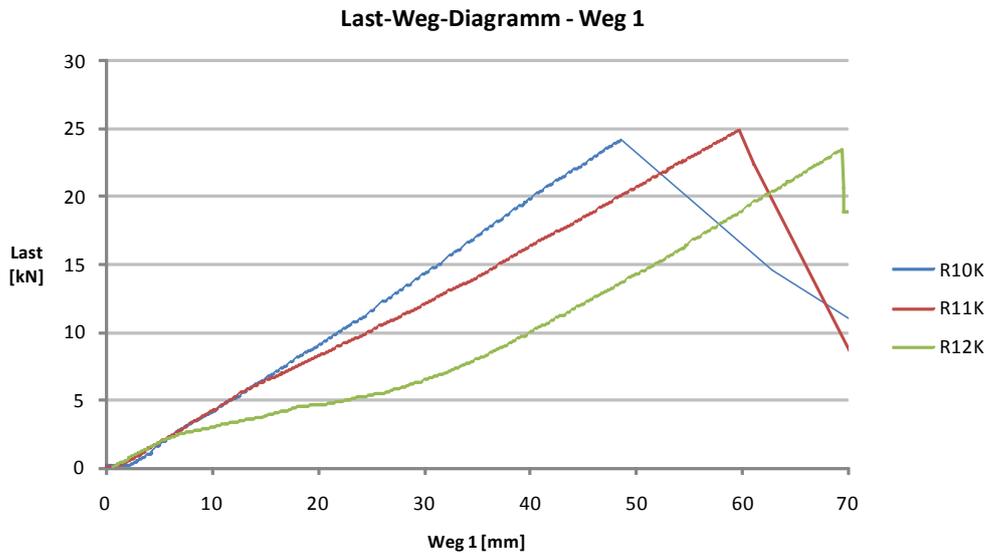


Abb. 10.50 Last-Weg-Diagramm - Wegaufnahme 1 - Verschiebung der Glasfanne zum Prüfrahm für die Versuchskörper R10K, R11K und R12K

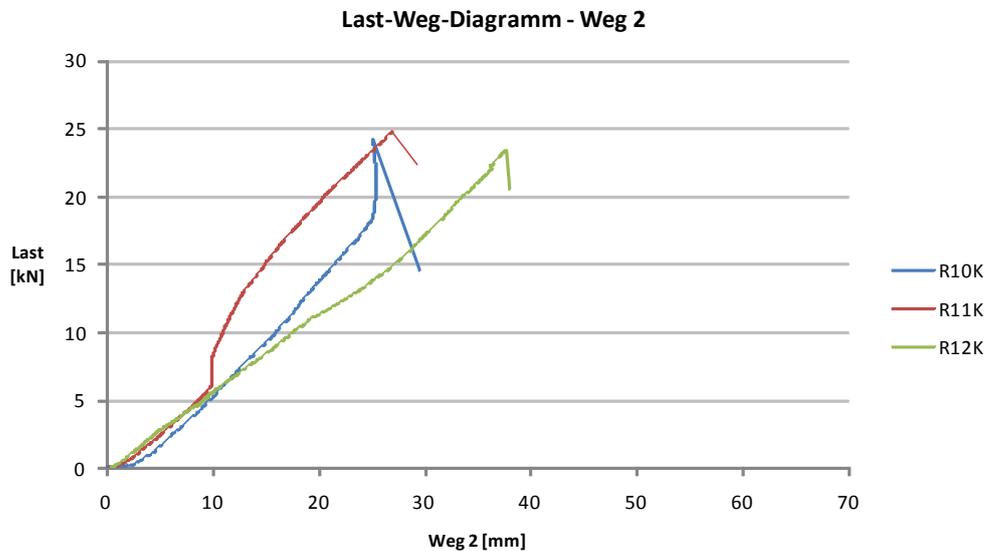


Abb. 10.51 Last-Weg-Diagramm - Wegaufnahme 2 - Verschiebung der Glasfanne zum Stahlschuh für die Versuchskörper R10K, R11K und R12K

Die Abb. 10.52 zeigt den Dehnungszuwachs an der Zugseite und an der Druckseite über die gesamte Laststeigerung an den Stellen, wo die DMS geklebt wurden. Diese Stellen befinden sich in dem Bereich wo die maximalen Zug- und Druckspannungen auftreten sollten. Es kann aber sein, dass auch höhere Werte in deren Nähe entstehen.

Versuchskörper	Dehnung - Zug [%]	Zugspannung [N/mm ²]	Dehnung - Druck [%]	Druckspannung [N/mm ²]
R10K	0,16	112	-0,14	-98
R11K	0,17	119	-0,14	-98
R12K	0,15	105	-0,13	-91

Tab. 10.5 Dehnungen und Spannungen an den Messstellen der zwei DMS für die Versuchskörper R10K, R11K und R12K

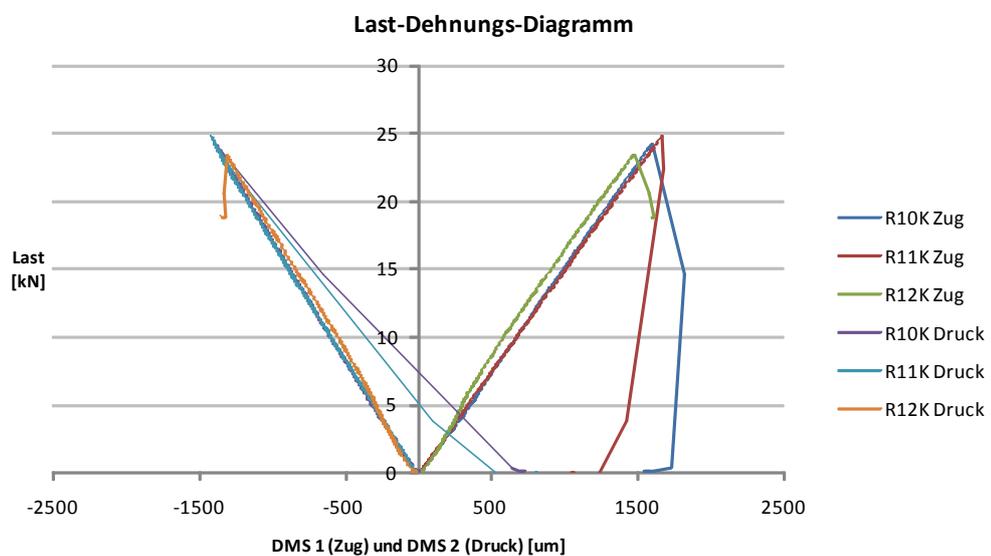


Abb. 10.52 Last-Dehnungs-Diagramm - DMS 1 und DMS 2- Dehnungen (Zug und Druck) an den Stirnseiten der vorderen Scheibe der Versuchskörper R10K, R11K und R12K, unter dem Stahlschuh

Dehnungsmessung mit Aramis

In diesem Abschnitt werden für die rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen die mit ARAMIS aufgenommenen Messergebnisse analysiert. Es werden in den Abb. 10.53 bis Abb. 10.55 für jeden der drei Versuchskörper das Dehnungsbild vor dem Bruch und der Verlauf der Dehnungen über die Laststeigerung für drei ausgewählte Punkte dargestellt. Wie auch schon bei dem rechteckigen Glasschwert mit Mörtel wird zusätzlich zu den zwei Punkten auf der Zugseite und auf der Druckseite, ein Punkt für die Dehnungen (Zugspannungen) im Bereich des Bohrloches ausgewertet. Es wird versucht die Punkte, welche die maximalen Dehnungen bzw. Stauchungen erfahren, auszuwählen.

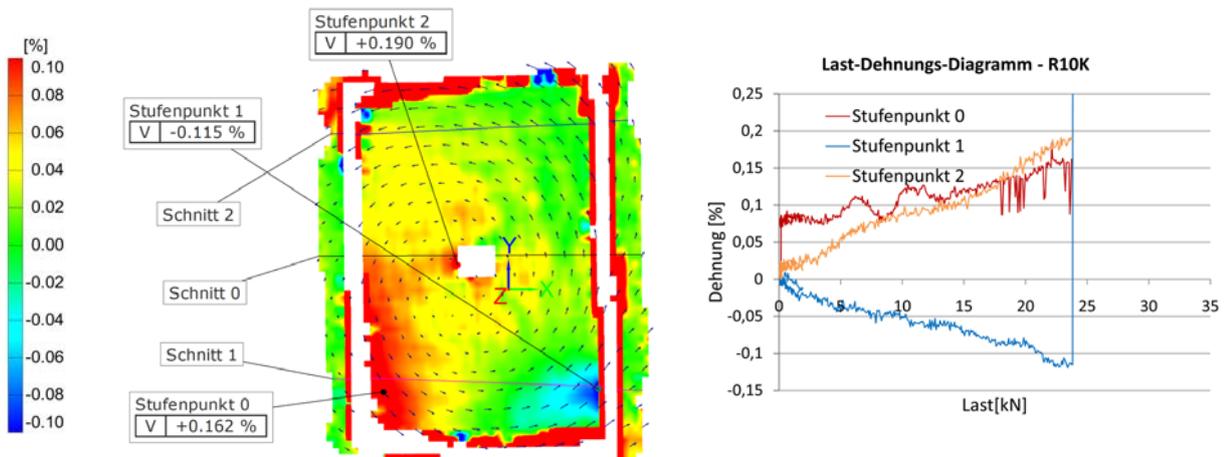


Abb. 10.53 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R10K

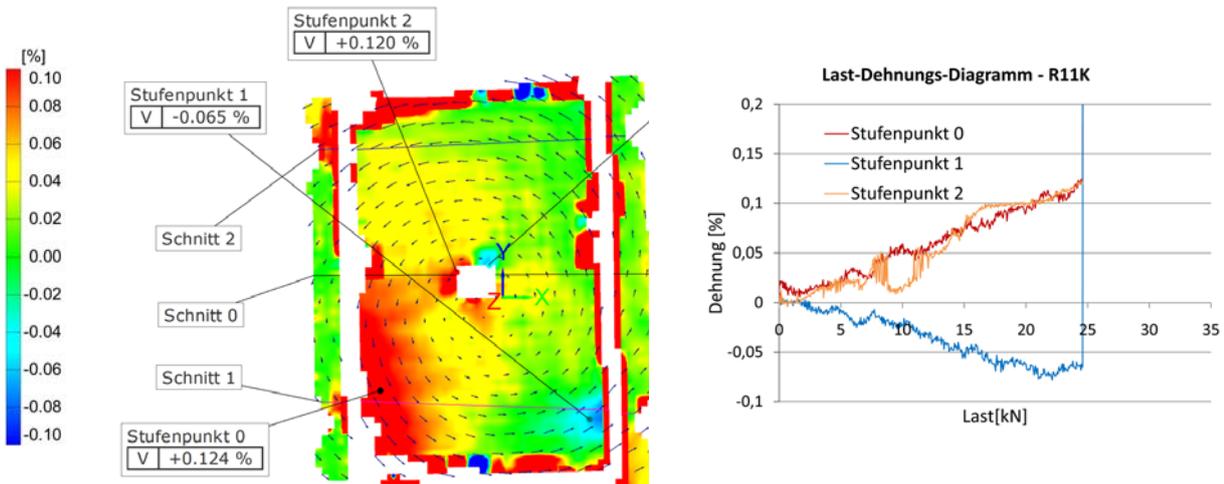


Abb. 10.54 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R11K

Auch bei dieser Versuchsserie stimmen sowohl die Dehnungsbilder, als auch die Bruchlasten der drei Versuchskörper gut überein. Die Bruchlasten betragen aber im Vergleich zu der Variante mit Mörtel um etwa 5 kN weniger.

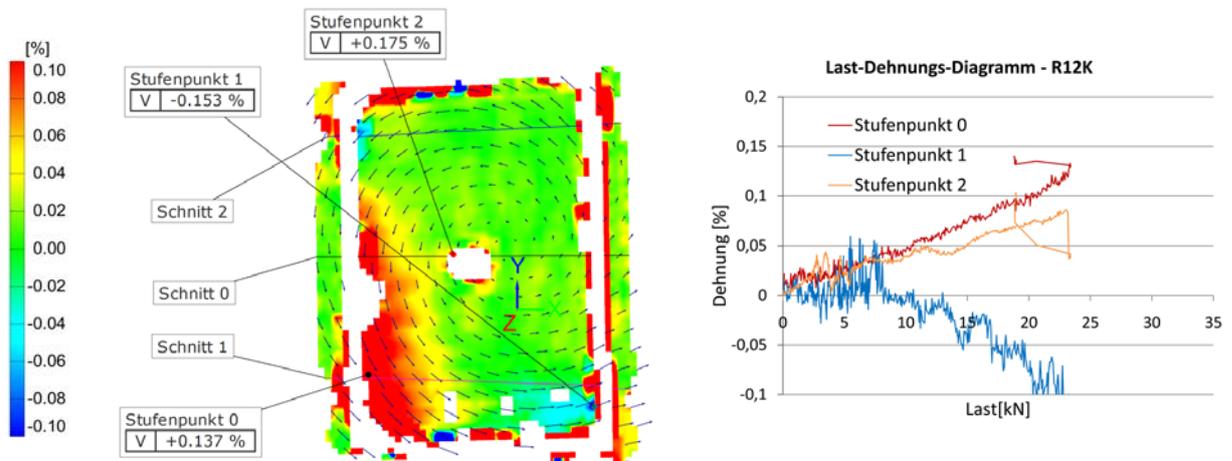


Abb. 10.55 Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R12K

Vergleicht man die Dehnungen auf der Zugseite für den ausgewählten Punkt bei einer Last von 23 kN variieren die Werte etwas stärker als bei dem rechteckigen Glasschwert mit Mörtel: 0,163 % für R10K, 0,102 % für R11K und 0,121 % für R12K.

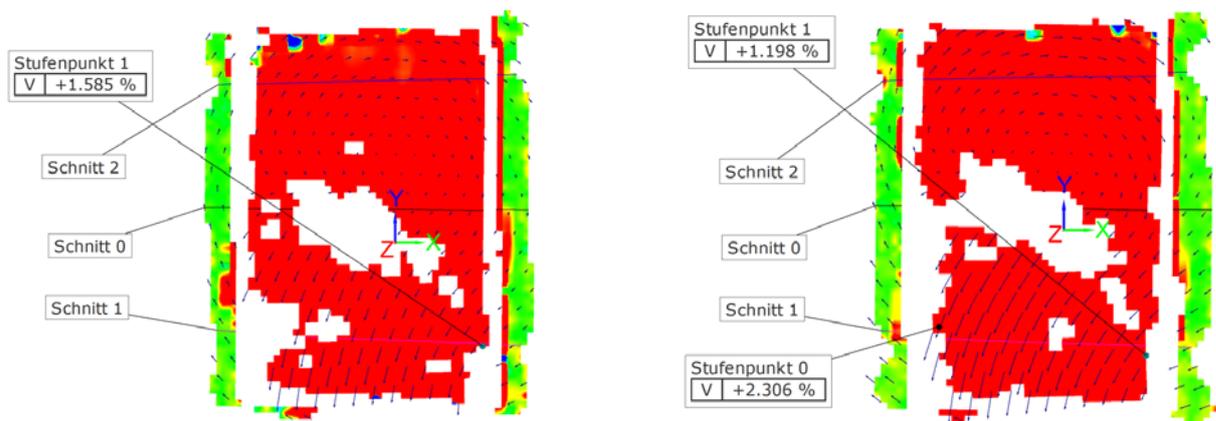


Abb. 10.56 Dehnungsbilder nach dem Bruch für die Versuchskörper R10K (links) und R11K (rechts)

In Abb. 10.56 werden die mit ARAMIS aufgenommenen Dehnungsbilder gleich nach dem Bruch für die Versuchskörper R10K und R11k dargestellt. Aufgrund des Fehlens der Facetten im Bereich des Bohrloches und des schon gezeigten Bruchbildes kann man die Aussage treffen, dass bei dieser Versuchsreihe der Bruch vom Bohrloch ausgegangen ist. Auch die Diagramme in Abb. 10.53 und Abb. 10.54 zeigen hohe Dehnungen für den Punkt im Bereich des Bohrloches.

Für den Versuchskörper R12K wurde ein solches Bild mit ARAMIS nicht aufgenommen, da nur die hintere Scheibe gebrochen ist, während die vordere, vom Messgerät aufgenommene Scheibe ganz geblieben ist.

10.4 Vergleich der Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die bei den Versuchen aufgenommenen Messwerte und Bilder mit den Ergebnissen der numerischen Berechnung verglichen. Ein direkter quantitativer Vergleich ist nicht möglich, da die Bilder aus den numerischen Berechnungen Spannungsbilder sind und die Bilder und Werte aus den Messungen Dehnungen darstellen. Da Glas aber ein linear-elastisches Material ist, können Dehnungen durch Multiplizieren mit dem E-Modul von 70.000 N/mm^2 in Spannungen umgerechnet werden. Die Bilder aus der numerischen Berechnung stellen Hauptspannungen (Hauptspannung I aus Sofistik) dar und die Dehnungen aus ARAMIS sind Hauptdehnungen in der gleichen Richtung. Somit können diese nach dem Hooke'schen Gesetz umgerechnet werden.

In weiterer Folge werden für jede Versuchsreihe die mit dem Wegaufnehmer 2 gemessenen Verschiebungen und die mit den DMS gemessenen Dehnungen mit den Ergebnissen aus der numerischen Berechnung verglichen. Außerdem wird ein qualitativer Vergleich des mit ARAMIS aufgenommenen Dehnungsbildes für die Bruchlast (je ein Versuchskörper) mit dem Spannungsbild aus Sofistik bei der zugehörigen Last gezeigt. Für die Bilder aus ARAMIS wird eine Farbskala von $-0,10\%$ bis $0,10\%$ ausgewählt, da bei höheren Werten der Farbenverlauf nicht mehr so deutlich ist. Bei den Bildern aus Sofistik geht die Skala von -140 N/mm^2 bis 140 N/mm^2 und umgerechnet in Dehnungen von $-0,20\%$ bis $0,20\%$. Quantitativ stimmt die Größe der mit ARAMIS gemessenen Dehnungen gut mit den numerisch berechneten Werten überein. Eine detaillierte Auswertung der photogrammetrischen Messergebnisse wird nach dem Abschluss dieser Arbeit erfolgen.

Aus den Last-Weg-Diagrammen können durch Berechnung der Steigungen der Geraden Steifigkeitskonstanten für die jeweiligen Systeme ermittelt werden. Außer der Steifigkeit der Glasfinne ist darin auch die Steifigkeit des verwendeten Kontaktmaterials - Mörtel Hilti HIT-HY 70 oder POM - miteinbehalten. Knicke oder gekrümmte Richtungswechsel in den Last-Weg-Linien können durch Änderungen im System, wie zum Beispiel Verrutschen von Klotzungsblöcken oder Anliegen des Bolzens an der Aluminiumhülse, erklärt werden. Je steiler die Geraden sind, desto höher ist die Steifigkeit des Systems.

Die Steigungen der gemessenen Last-Weg-Kurven ändern sich bereichsweise über die Laststeigerung, im Großen aber passen sie mit den Steigungen der numerisch ermittelten Geraden gut zusammen. Daher wird für jede Versuchsreihe ein Richtwert der Systemsteifigkeitkonstante, berechnet anhand der numerisch ermittelten Last-Weg-Geraden, angegeben.

10.4.1 Gevoutetes Glasschwert mit Mörtel

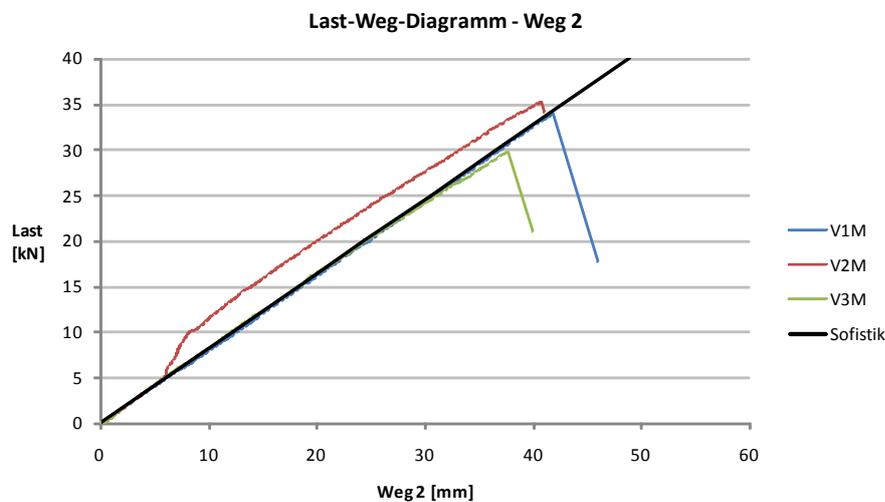


Abb. 10.57 Last-Weg-Diagramm für die gevouteten Glasschwerter mit Mörtel - Vergleich mit dem numerischen Modell

In der Abb. 10.57 kann man erkennen, dass die mit Sofistik berechneten Verschiebungen an der Wirkungsstelle der horizontalen Last mit den gemessenen Verschiebungen (Weg 2) für die Versuchskörper V1M und V3M perfekt übereinstimmt. Im Falle des Versuchskörper V2M sind die gemessenen Wege ab einer Last von 10 kN um etwa 4 mm geringer.

Durch Berechnung der Steigung der numerisch ermittelten Geraden ergibt sich eine Steifigkeitskonstante des Systems von ca. 815 N/mm.

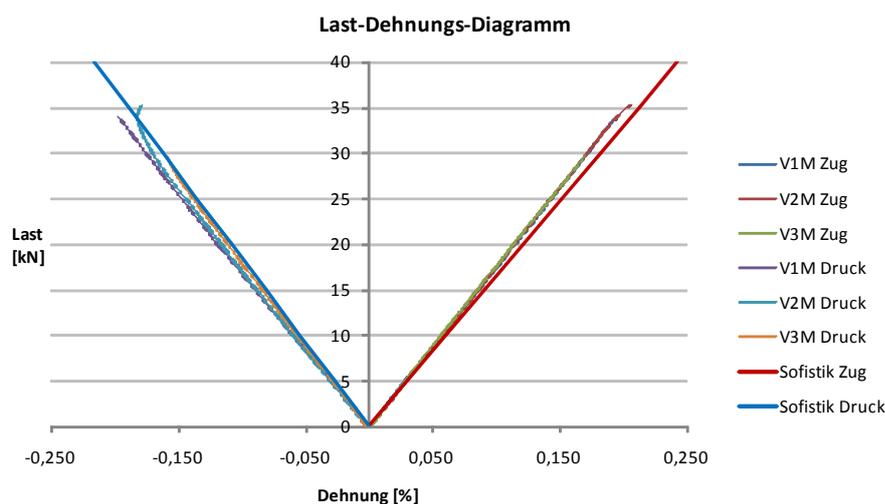


Abb. 10.58 Last-Dehnungs-Diagramm für die gevouteten Glasschwerter mit Mörtel - Vergleich mit dem numerischen Modell

Auch im Falle der Dehnungen stimmen die numerischen Ergebnisse mit den Messergebnissen gut überein (siehe Abb. 10.58). Man kann aber bemerken, dass die numerisch ermittelten Dehnungen

geringfügig höher und die numerisch ermittelten Stauchungen geringfügig niedriger als die Messergebnisse liegen.

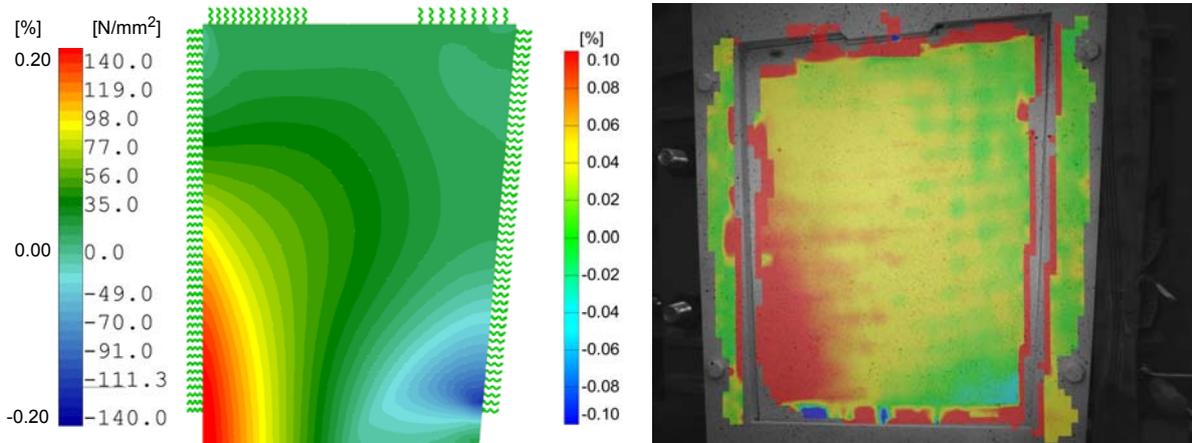


Abb. 10.59 *Gevoutetes Glasschwert mit Mörtel - Links: Spannungsbild aus Sofistik; Rechts: Dehnungsbild aus ARAMIS für V1M*

Die Abb. 10.59 zeigt, dass die mit ARAMIS aufgenommenen Dehnungsbilder qualitativ mit dem Spannungsverlauf aus Sofistik übereinstimmen. Auch die Größenordnung der ausgegebenen Werte passt gut mit den aus Sofistik umgerechneten Werten, allerdings kann über die Laststeigerung ein gewisses Rauschen festgestellt werden.

10.4.2 Gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen

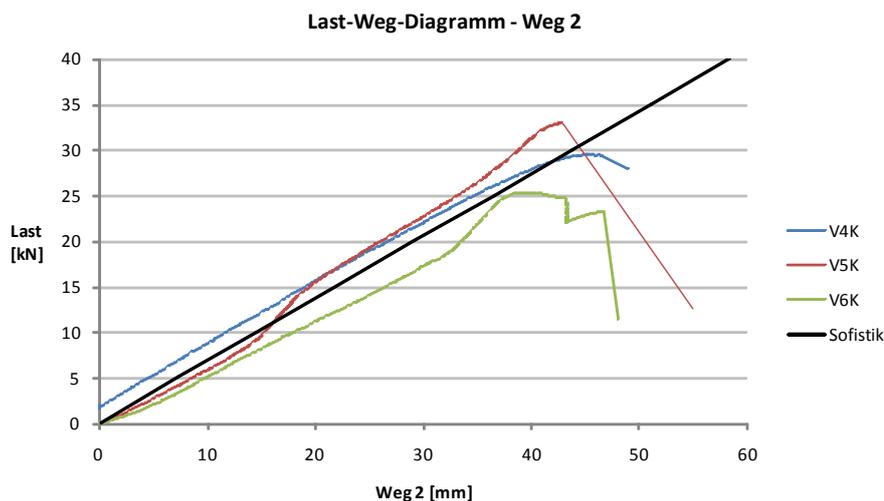


Abb. 10.60 *Last-Weg-Diagramm für die gevouteten Glasschwerter mit Klotzungen - Vergleich mit dem numerischen Modell*

Für diese Versuchsreihe stimmen die mit Sofistik berechneten Verschiebungen nicht so gut überein wie bei dem gevouteten Glasschwert mit Mörtel. Trotzdem liegt die numerisch ermittelte Kraft-Dehnungs-Linie in der Abb. 10.60 zwischen den Kraft-Dehnungs-Linien der drei Versuchskörper.

gemessenen Wege hängen auch von der Steifigkeit der Klotzungen und von deren möglichen Einbaugenauigkeit. Vor allem letztere und ein mögliches Verrutschen von Klotzungen kann eine Erklärung für die Variation zwischen den drei Versuchskörper sein.

Durch Berechnung der Steigung der numerisch ermittelten Geraden ergibt sich eine Steifigkeitskonstante des Systems von ca. 680 N/mm.

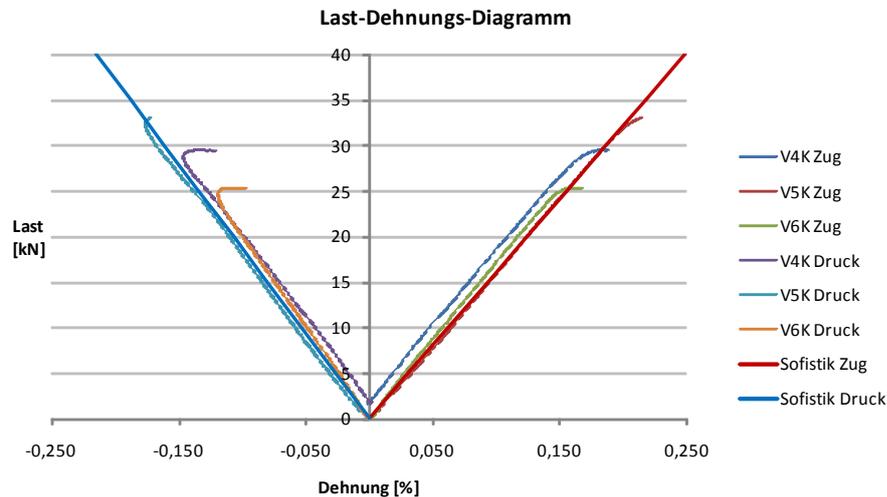


Abb. 10.61 Last-Dehnungs-Diagramm für die gevouteten Glasschwerte mit Klotzungen - Vergleich mit dem numerischen Modell

Auch im Falle der Dehnungen können geringfügige Abweichungen der Messwerte zwischen den drei Versuchskörper festgestellt werden. Die numerisch ermittelte Kraft-Dehnungs-Linie stimmt in etwa mit dem Mittelwert der gemessenen Dehnungen überein.

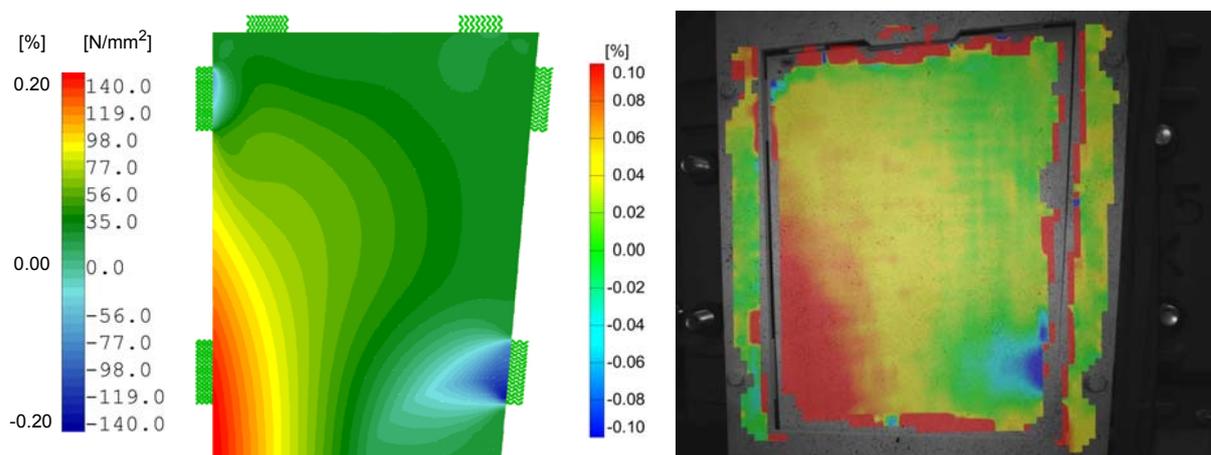


Abb. 10.62 Gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen - Links: Spannungsbild aus Sofistik; Rechts: Dehnungsbild aus ARAMIS für V5K

Gleich wie im Falle der gevouteten Variante mit Mörtel, kann auch bei dieser eine gute Übereinstimmung der zwei Bilder in Abb. 10.62 festgestellt werden. Vor allem die Druckspannungen (Stauungen) im Lasteinleitungsbereich bei der Klotzung rechts, unten ist deutlich erkennbar.

10.4.3 Rechteckiges Glasschwert mit Mörtel

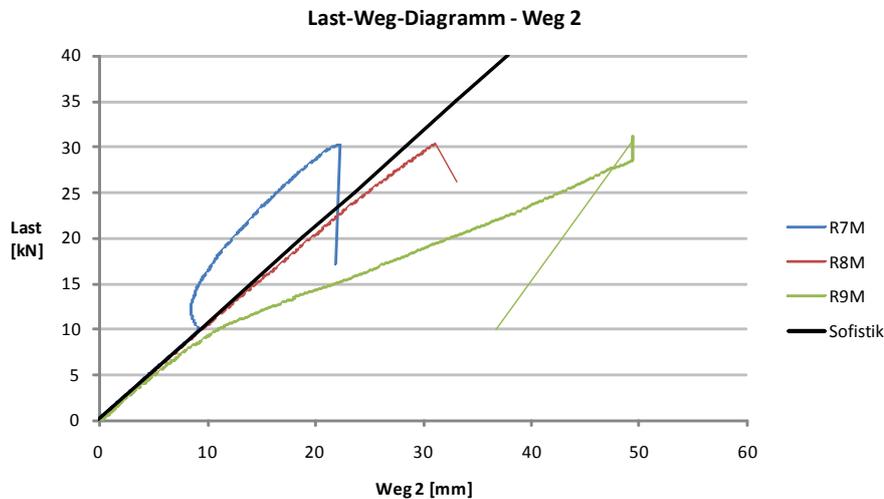


Abb. 10.63 Last-Weg-Diagramm für die rechteckigen Glasschwerter mit Mörtel - Vergleich mit dem numerischen Modell

Die unterschiedlichen gemessenen Wege bei den drei Versuchskörpern dieser Versuchsserie können durch die Drehung um das Bohrloch erklärt werden. Da der Bolzen ein Lochspiel von 2 mm hat, kann sich die Glasfinne bei Belastung unterschiedlich an diesem anlegen. Die numerisch ermittelten Verschiebungen passen gut mit den gemessenen Verschiebungen des Versuchskörper R8M (siehe Abb. 10.63) zusammen.

Durch Berechnung der Steigung der numerisch ermittelten Geraden ergibt sich eine Steifigkeitskonstante des Systems von ca. 1050 N/mm. Bei dem Versuchskörper R9M kann ab einer Last von 10 kN ein deutlicher Abfall der Steifigkeit festgestellt werden.

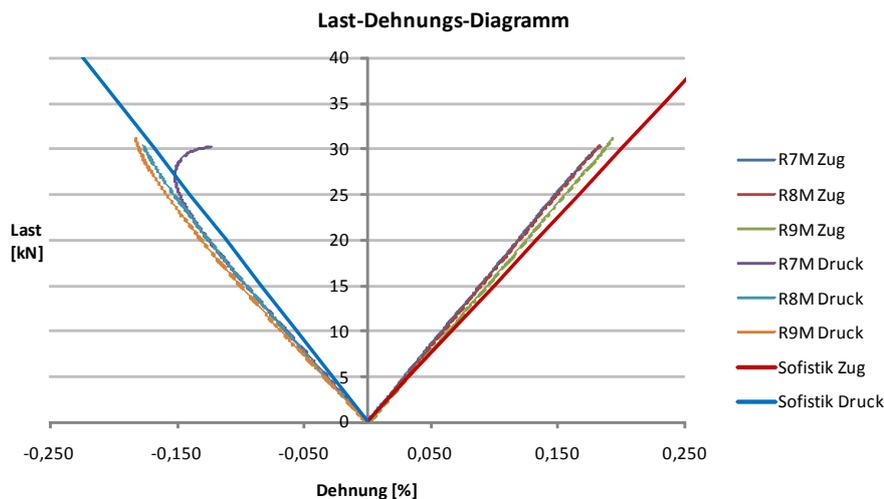


Abb. 10.64 Last-Dehnungs-Diagramm für die rechteckigen Glasschwerter mit Mörtel - Vergleich mit dem numerischen Modell

Bei den numerisch ermittelten Dehnungen können in der Abb. 10.64 die gleichen geringfügigen Abweichungen zu den gemessenen Werten festgestellt werden, wie schon bei der gevouteten Variante mit Mörtel.

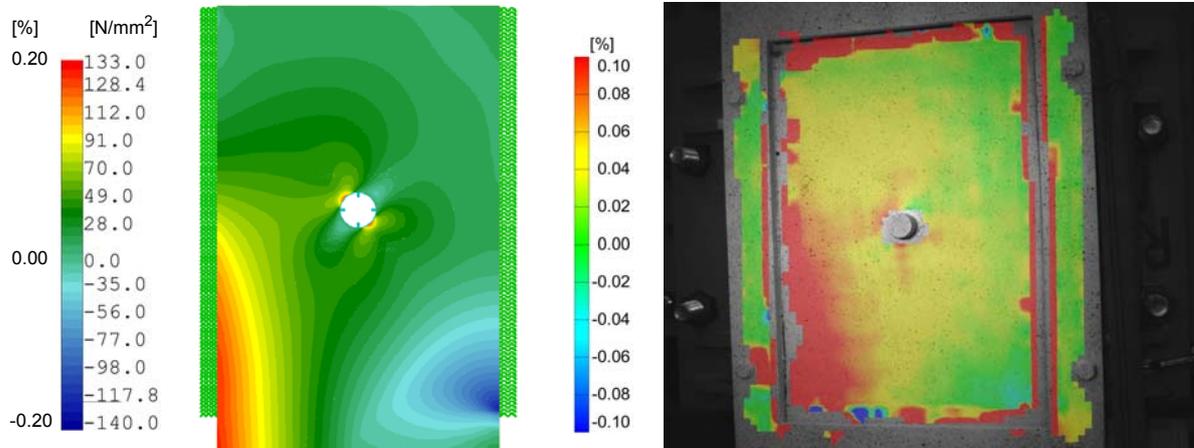


Abb. 10.65 Rechteckiges Glasschwert mit Mörtel - Links: Spannungsbild aus Sofistik; Rechts: Dehnungsbild aus ARAMIS für R9M

Auch bei dieser Versuchsreihe stimmen die Dehnungsbilder aus ARAMIS mit den Spannungsbildern aus Sofistik qualitativ überein. Man kann auch die entstehenden Zugspannungen im Bereich des Bohrloches feststellen, allerdings fehlen die Facetten, die an dem Mörtel angrenzen.

10.4.4 Rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen

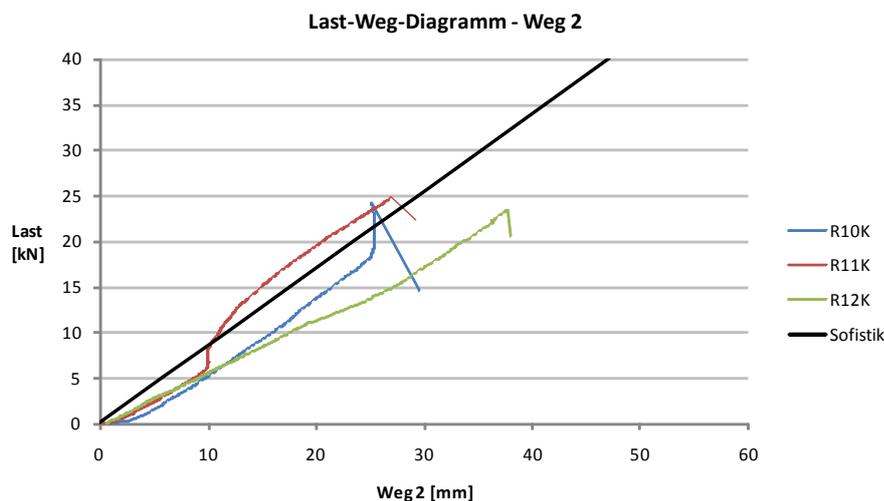


Abb. 10.66 Last-Weg-Diagramm für die rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen - Vergleich mit dem numerischen Modell

Die unterschiedlichen gemessenen Verschiebungen bei den drei rechteckigen Versuchskörpern mit Klotzungen (siehe Abb. 10.66) können einerseits durch die Ungenauigkeiten beim Einbau der Klotzungen und andererseits durch das Lochspiel des Bolzens erklärt werden. Die numerisch ermittelten

Verschiebungen liegen im Größenbereich der gemessenen Werte für die Versuchskörper R10K und R11K, aber um bis zu 10 mm unter denen des Versuchskörper R12K.

Durch Berechnung der Steigung der numerisch ermittelten Geraden ergibt sich eine Steifigkeitskonstante des Systems von ca. 845 N/mm.

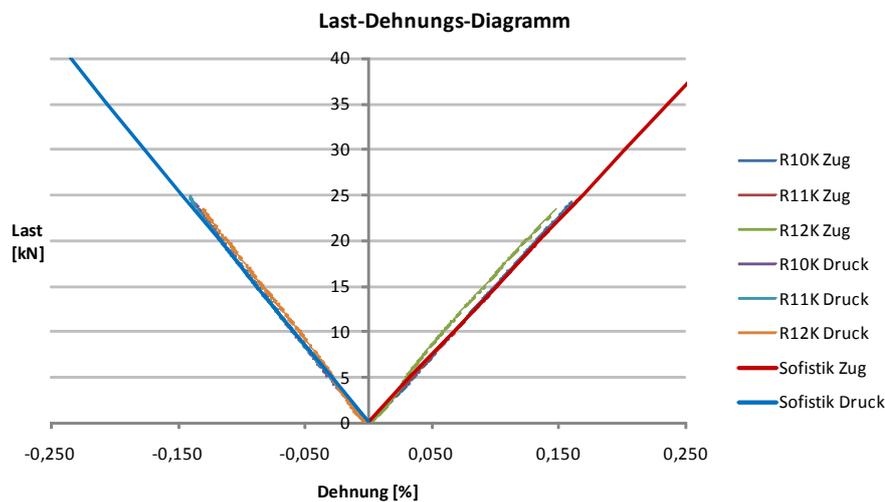


Abb. 10.67 Last-Dehnungs-Diagramm für die rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen - Vergleich mit dem numerischen Model

Die mit Sofistik ermittelten Dehnungen stimmen gut mit den mittels DMS gemessenen Dehnungen der drei Versuchskörper überein (siehe Abb. 10.67).

Die Abb. 10.68 zeigt, dass auch bei dem rechteckigen Glasschwert mit Klotzungen, wie auch bei den restlichen betrachteten Varianten die Messung mit ARAMIS gute qualitative Ergebnisse liefert. Auch die Größenordnung der Werte passt mit den numerisch berechneten Dehnungen gut überein. Eine detaillierte Auswertung der photogrammetrischen Messergebnisse wird, wie schon am Anfang dieses Kapitels erwähnt, nach Abschluss dieser Arbeit erfolgen.

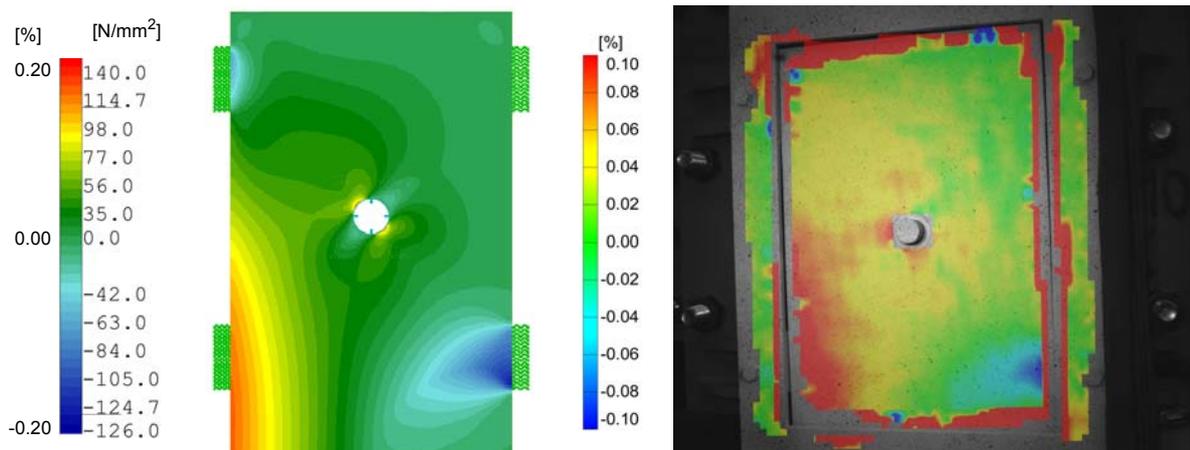


Abb. 10.68 Rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen - Links: Spannungsbild aus Sofistik; Rechts: Dehnungsbild aus ARAMIS für R10K

11.1 Zusammenfassung

Theoretische Grundlagen

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es verschiedene Varianten von hängenden Glasschwertern hinsichtlich der Lasteinleitung in die Unterkonstruktion und der Spannungsverteilung im Glas zu untersuchen und zu optimieren. Dazu wurden als Erstes grundlegende Kenntnisse über Glas als Werkstoff und das Konstruieren mit Glas zusammengefasst. Anschließend wurden der aktuelle Stand der Normen und Richtlinien angegeben und eine eingehende Erfassung des Standes der Wissenschaft für folgende Themen durchgeführt:

- ◆ Einleitung von Drucklasten in Glaskanten (Scheibenbeanspruchung):
- ◆ Eigenschaften verschiedener Kontaktmaterialien - Vergussmörtel Hilti HIT-HY 70 und die Thermoplasten Polyoxymethylen (POM) und Polyacetal (PA)
- ◆ Verteilung der thermischen Vorspannung über die Glasscheibe - an Kanten und Ecken ist die Vorspannung geringer als in der Fläche
- ◆ Scher-Lochleibungsverbindungen im konstruktiven Glasbau
- ◆ Stabilität von Glasträger und Glasschwerter

Als nächstes wurden im Kapitel 5 einige Referenzprojekte für Glasschwerter vorgestellt. Die Glasschwerter beim Main Canopy des ADNEC Capital Gate in Abu Dhabi dienen als Ausgangspunkt für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit.

Numerische Parameteruntersuchungen

Nach der Aufbereitung der erforderlichen theoretischen Kenntnisse wurde weiters zu den eigentlichen Untersuchungen fortgeschritten. Als Erstes wurde ein Glasschwerttyp mit rechteckiger Geometrie des Einspannbereiches untersucht. Bei diesem wird die vertikale Einwirkung aus Eigengewicht über eine SL-Verbindung mit einem Bolzen in die Stahlunterkonstruktion übertragen. Die horizontalen Einwirkungen (Windlast am unteren Glasschwertende) werden über Kontaktdruck in die Unterkonstruktion

weitergeleitet. Als Kontaktmaterialien wurden einerseits der Mörtel Hilti HIT-HY 70 und andererseits das Thermoplast Polyoxymethylen (POM) untersucht.

Bei der Variante mit POM wurden Parameterstudien hinsichtlich Abstand der Klotzung zur Glasecke, Länge der Klotzung und Abstand zwischen den Klotzungen durchgeführt. Es ergaben sich folgende optimalen Werte: ein Abstand zur Glasecke von 40 mm und eine Mindestlänge der Klotzung von 80 mm. Für den Abstand zwischen den Klotzungen ist auch die zur Aufnahme der horizontalen Belastung erforderliche Einspannlänge von Bedeutung. Für den betrachteten Fall ist ein Abstand von 200 mm erforderlich. Bei kürzeren Glasschwertern oder geringerer Belastung sind auch kleinere Abstände denkbar.

Für den Glasschwerttyp mit Lochleibungsverbindung wurden auch Überlegungen zum Bohrloch durchgeführt. Die Lage des Loches in der Mitte des Einspannbereiches stellt sich als ungünstig heraus, da sich genau durch dieses eine Druckdiagonale bildet und im Glas in diesem Bereich Querspannungen entstehen. Durch den Einsatz einer weichen Hülse (zum Beispiel aus injiziertem Mörtel) zwischen Bolzen und Glasfinne können diese Zugspannungen auf ein ungefährliches Mass verringert werden.

Der zweite untersuchte Glasschwerttyp weist eine trapezförmige Geometrie des Einspannbereiches auf. Durch diese Formgebung können auch die vertikalen Einwirkungen über Kontaktdruck an den Glaskanten in die Unterkonstruktion eingeleitet werden. Der wirtschaftliche Vorteil dieser Konstruktion ist, dass man auf Bohrloch und Bolzen verzichten kann. Eine Parameterstudie für den Winkel der geneigten Kante ergab einen günstigen Wert von 5 Grad. Bei größeren Neigungen müsste bei der betrachteten Glasschwertlänge ein innenliegender Knick ausgeführt werden, für dessen Herstellung ein Bohrloch erforderlich ist.

Versuchsdurchführung

Um das Verhalten der zwei betrachteten Kontaktmaterialien, wie auch die Tragfähigkeit und die Resttragfähigkeit der verschiedenen Glasschwerttypen zu untersuchen wurden in weiterer Folge Versuche durchgeführt. Der Entwurf der Prüfkörper und die Anpassung an den Prüfstand wurde ausführlich im Kapitel 8 dokumentiert. Insgesamt wurden 12 Versuche mit 2,8 m langen, hängend gelagerte und durch eine horizontale Druckeinzellast am unteren Ende belastete Glasschwerter, durchgeführt, je drei für jedes der folgenden Varianten:

- ◆ rechteckiges Glasschwert mit Mörtel Hilti HIT-HY 70 als Kontaktmaterial
- ◆ rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen aus POM als Kontaktmaterial
- ◆ gevoutetes Glasschwert mit Mörtel Hilti HIT-HY 70 als Kontaktmaterial
- ◆ gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen aus POM als Kontaktmaterial

Als Messgeräte wurden bei jedem Versuch drei Wegaufnehmer und zwei DMS verwendet. Außerdem wurde der gesamte Einspannbereich der Glasfinne (340 mm x 500 mm) mit dem optischen Messsystem ARAMIS photogrammetrisch aufgenommen

Schlussfolgerungen

Im Anschluss an den Versuchen wurden die verschiedenen Messergebnisse ausgewertet und mit den Ergebnissen der numerischen Berechnungen verglichen. Dabei sind verschiedene Erkenntnisse erfasst worden, die an dieser Stelle nochmals zusammengefasst werden.

Stabilität:

Im Zuge der Belastung des ersten Versuchskörpers konnte schon bei einer Last von 10 kN ein seitliches Ausweichen des unteren Glasschwertendes festgestellt werden. Dieses Stabilitätsproblem ist ein wichtiges Erkenntnis, das weitere Untersuchungen erfordert, aber nicht Ziel der geplanten Versuche war. Um ein Stabilitätsversagen auszuschließen, wurden an dem Glasschwert seitlich zwei Stahlträger mit Schraubzwingen befestigt, ohne aber die Steifigkeit der Glasfinne im Messbereich zu verändern.

Zugspannungen und Dehnungen:

Bei den gevouteten Versuchskörpern wurden mit den verwendeten DMS Dehnungen von bis zu 0,21 % gemessen. Umgerechnet in Zugspannungen sind das Werte von bis zu 150 N/mm² und liegen um einen Faktor von bis zu 1,25 über den charakteristischen Wert der Zugfestigkeit von ESG (120 N/mm²). Bei den rechteckigen Glasschwertern mit Mörtel wurden Zugspannungen von bis zu 140 N/mm² ermittelt, während bei der rechteckigen Variante mit Klotzungen diese geringfügig unter dem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit liegen (ca. 115 N/mm²). Der Vergleich der gemessenen Wege und Dehnungen mit den Werten aus der numerischen Simulation zeigte eine gute Übereinstimmung.

Bruchbilder:

Nach Analyse der Bruchbilder stellte man fest, dass die Lage des Erstbruches nicht immer eindeutig erkennbar ist. Anhand der Spannungstrajektorien, die auf der gebrochenen Scheibenoberfläche deutlich zu erkennen sind und in der Regel zu den Erstbruchstellen an den Glaskanten führen, sind aber Aussagen dazu möglich. Bei den Versuchskörpern mit Mörtel als Kontaktmaterial scheint der Bruch von der Zugkante ausgegangen zu sein, allerdings in verschiedenen Höhen. Bei der gevouteten Variante mit Klotzungen als Kontaktmaterial könnte dieser sowohl von der Zugkante, als auch von der Druckkante neben der Klotzung ausgegangen sein. Im Falle der rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen lässt sowohl das Bruchbild, als auch die Aufnahmen mit ARAMIS darauf zurückschließen, dass der Erstbruch im Bereich des Bohrloches aufgetreten ist.

Photogrammetrische Messung:

Die photogrammetrische Messung mit ARAMIS zeigte, dass dieses Messgerät, trotz anfänglicher Befürchtungen, genügend hohe Genauigkeiten bei der Messung von Glasoberflächen erreicht. Qualitativ passen die gemessenen Dehnungsbilder sehr gut mit denen aus den numerischen Simulationen zusammen. Quantitativ wurde im Rahmen dieser Arbeit gezeigt, dass die Größenordnung der gemessenen Werte für die höheren Laststufen passt. Beim Vergleich einzelner Werte mit den numerischen Ergebnissen wurden nur geringe Abweichungen festgestellt. Allerdings weisen die gemessenen Werte ein Rauschen über die Laststeigerung auf. Eine detailliertere Aufarbeitung der photogrammetrischen Messergebnisse wird nach Abschluss dieser Arbeit erfolgen.

Die Messung mit ARAMIS zeigte aber auch zwei Nachteile. Erstens wird nur die dem Messgerät zugewandte Seite aufgenommen. Zweitens können in der Nähe von Höhensprüngen in der aufgenommenen Ebene, keine Werte angegeben werden. Dieses war bei den im Rahmen dieser Arbeit getesteten Versuchskörper im Kantenbereich der Glasscheiben und im Bohrlochbereich der Fall. Diese sind aber die kritischen Stellen, von denen Brüche ausgehen und deren Erfassung erwünscht ist.

Vergleich der untersuchten Varianten:

Beim Vergleich der vier untersuchten Varianten muss man einerseits die zwei Geometrien und andererseits die zwei Kontaktmaterialien vergleichen. Mit den gevouteten Glasschwertern wurden höhere Bruchlasten als mit den rechteckigen erreicht: maximal 35,3 kN beim Versuchskörper V2M zu 31,1 kN beim Versuchskörper R9M. Außerdem können die Befürchtungen zur Resttragfähigkeit, dass die Glasfinne aus dem Stahlschuh herausrutscht abgewehrt werden. Die Finne bleibt aufgrund der geneigten Kante des Stahlschuhes in diesem hängen (sowohl mit Mörtel als auch mit Klotzungen). Der große Vorteil, den diese Variante mit sich bringt ist die Ersparnis der Ausführung des Bohrloches und somit das Ausschließen eines Versagens in diesem Bereich.

Im Vergleich der zwei Kontaktmaterialien zeigte der Mörtel ein wesentlich besseres Verhalten als die Klotzungen. Die Bruchlasten lagen mit 35,3 kN (V2M) zu 33,0 kN (V5K) bei den gevouteten und 31,1 kN (R9M) zu 24,8 kN (R11K) bei den rechteckigen Glasschwertern im Falle der Verwendung des Mörtels höher. Außerdem konnten in dem an den Kanten injizierten Mörtel keine Risse festgestellt werden. Der wesentliche Vorteil des Mörtels gegenüber den Klotzungen ist, dass er die Ungenauigkeiten im Stahl, wie auch eventuelle Kantenversätze im Glas ausgleicht. Bei den Klotzungen sind beim Einbau der Blöcke Schwierigkeiten wegen Schweißnahtspuren und beim Prüfkörper R12K wegen einem Kantenversatz von etwa 1 mm aufgetreten. Man musste die Blöcke durch Schleifen an die vorhandenen Spaltenbreiten zwischen Glasfinne und Stahlschuh anpassen. Bei dem Versuchskörper R12K brach aufgrund des Kantenversatzes nur eine Scheibe, da diese als erste auf die Klotzung gedrückt hat.

Als Conclusio kann festgehalten werden, dass sich das gevoutete Glasschwert mit Mörtel als Kontaktmaterial am besten verhalten hat. Die gevoutete Variante zeigt im Vergleich zum rechteckigen Glasschwert mit Lochleibungsverbindung nur Vorteile. Als Kontaktmaterial eignet sich für die Lasteinleitung aus der Glasfinne in dem Stahlschuh der Mörtel Hilti HIT-HY 70 besser als Klotzungen aus POM.

11.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden numerische und versuchstechnische Untersuchungen von hängenden Glasschwertern durchgeführt. Die analysierten Problempunkte kommen aber auch bei anderen Elementen aus dem konstruktiven Glasbau vor. Werden Glasscheiben in Scheibenrichtung beansprucht, erfolgt in der Regel die Lasteinleitung über die Glaskanten. Eine wichtige Rolle haben in diesem Fall die verwendeten Kontaktmaterialien. Weiterführende Untersuchungen sind sowohl im Falle des Mörtels (Druckfestigkeit bei Querdehnungsbehinderung, Langzeitverhalten), als auch im Falle der Klotzungen (mechanische Eigenschaften bei Druckbeanspruchung, Optimierungen des Einbaus) erforderlich.

Die Anwendung des optischen Messgerätes ARAMIS zeigte bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche gute Ergebnisse, obwohl die Dehnungen des linear-elastischen Materials Glas (bis 0,20 %) sehr gering im Vergleich zu Materialien wie Beton oder Stahl im plastischen Bereich sind. Diese Messtechnik bringt den Vorteil einer kontaktfreien Messung und ein Vielfaches an aufgenommenen Messdaten im Vergleich zu elektrischen Messtechniken wie DMS oder Wegaufnehmer. Außerdem können auch flächenhafte Beurteilungen über die aufgenommenen Messbereiche gemacht werden.

Die Erkenntnis des Stabilitätsproblems bei den getesteten Glasschwertern kann auch als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen betrachtet werden. Es existieren bereits einige Arbeiten über Knicken von Glasstützen, Kippen von Glas-Einfeldträgern und Beulen von Glasscheiben. Es wäre aber eine Übertragung auf auskragende/hängende Glas-Tragelemente erforderlich. Vor allem die Untersuchung des vorhandenen Schubverbundes im Falle von stabilitätsgefährdeten, in Scheibenrichtung beanspruchten VSG-Elementen ist erforderlich um ein Bemessungskonzept für Stabilitätsbeanspruchungen auszuarbeiten.

LITERATURVERZEICHNIS

Bücher und Zeitschriften

- [1] BAITINGER, Mascha: Zur Bemessung von SL-belasteten Anschlüssen im konstruktiven Glasbau, Dissertation. - Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen - 2009
- [2] BEHLING, Sophia; BEHLING, Stefan: Glass - Konstruktion und Technologie in der Architektur. - München: Prestel Verlag - 1998. ISBN 3-7913-2155-2
- [3] ENGLHARDT, Oliver: Flächentragwerke aus Glas - Tragverhalten und Stabilität, Dissertation - Wien: Universität für Bodenkultur Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren - 2007
- [4] FELDMANN, Markus; ALBRECHT, Gert; WÖRNER, Johann Dietrich: Untersuchung von Stahl-Glas-Verbindungen im Hinblick auf die Normung, Forschungsbericht 2/2007. - Düsseldorf: Deutscher Ausschluß für Stahlbau DASt, Stahlbau Verlags- und Service GmbH - 2007. ISBN 978-3-923726-39-4
- [5] HALDIMANN, Matthias; LUIBLE, Andreas; OVEREND, Mauro: Structural Use of Glass - Structural Engineering Documents 10. - Zürich: IABSE - AIPC - IVBH, ETH Zürich - 2008. ISBN 978-3-85748-119-2
- [6] HESS, Rudolf: Glasträger - Forschungsbericht. - Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Institut für Hochbautechnik - 2000. ISBN 3-7281-2730-2
- [7] KNAACK, Ulrich: Konstruktiver Glasbau. - Köln: Rudolf Müller - 1998. ISBN 3-481-01427-9
- [8] KNAACK, Ulrich; FÜHRER, Wilfried; WURM, Jan: Konstruktiver Glasbau 2 - Neue Möglichkeiten und Techniken. - Köln: Rudolf Müller - 2000. ISBN 3-481-01685-9
- [9] KOOYMANS, John; SCHNEIDER, Jens; TECHEN, Holger: Long span glass fin design. - Delft: Challenging Glass 2 - 2010
- [10] KREWINKEL, Heinz: Glasarchitektur - Material, Konstruktion und Detail. - Basel: Birkhäuser - Verlag für Architektur - 1998. ISBN 3-7643-5649-9
- [11] LAUFS, Wilfried: Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser, Dissertation. - Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag - 2000. ISBN 3-8265-8044-3
- [12] LIESS, Johannes: Bemessung druckbelasteter Bauteile aus Glas, Dissertation. - Kassel: Universität Kassel - 2001. ISBN 3-8311-1558-3
- [13] LOUTER, Christian: Fragile yet Ductile - Structural Aspects of Reinforced Glass Beams, Dissertation - Delft: Technische Universität Delft - 2011. ISBN 978-90-8570-743-1
- [14] LUIBLE, Andreas: Stabilität von Tragelementen aus Glas, Dissertation - Lausanne: Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne - 2004
- [15] MANG, Herbert; HOFSTETTER, Günter; EBERHARDSTEINER, Josef: Festigkeitslehre - Dritte, aktualisierte Auflage - Wien: Springer-Verlag - 2008. ISBN 978-3-211-72453-8
- [16] MANIATIS, Iris: Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-Plane Loads, Dissertation. - München: Technische Universität München - 2006
- [17] OFNER, Robert: Leichtbau und Glasbau - Skriptum. - Graz: Institut für Stahlbau und Flächentragwerke, Technische Universität Graz - 2008

-
- [18] PETERSEN, Christian: Dynamik der Baukonstruktionen. - Braunschweig / Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH - 1996. ISBN 3-528-08123-6
- [19] SCHITTICH, Christian; STAIB, Gerald; BALKOW, Dieter; SCHULER, Matthias; SOBEK, Werner: Glasbau Atlas. - Basel: Birkhäuser - 1998. ISBN 3-7643-5944-7
- [20] SCHNEIDER, Jens; WELLER, Bernhard: Glass / Facade / Energy. - Düsseldorf: International conference at glasstec - Technische Universität Darmstadt, Technische Universität Dresden - 2010. ISBN 978-3-86780-177-5
- [21] SISCHKA, Johann - Waagner-Biro Stahlbau AG: „Pole Position“ - Stahlbau Rundschau: Das Fachmagazin des Österreichischen Stahlbauverbandes, Ausgabe Nr. 102, Oktober 2009, Seite 15-16. - Wien: Industriemagazin Verlag
- [22] Studienarbeit Bauen mit Glas. - München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung - 2001
- [23] WELLER, Bernhard; HÄRTH, Kristina; TASCHE, Silke; UNNEWEHR, Stefan: Konstruktiver Glasbau - Grundlagen, Anwendungen, Beispiele. - Regensburg: Aumüller Druck - 2008. ISBN 978-3-920034-24-9
- [24] WELLER, Bernhard; SCHADOW, Thomas: Forschung und Entwicklung im Konstruktiven Glasbau. - Stahlbau 76 (2007), Heft 3, Seite 162-166. - Berlin: Ernst & Sohn
- [25] WELLER, Bernhard; EBERT, Jan; REICH, Stefan: Local load application into glass plane edges at transparent space grid structures. - Tagungsband: IASS-SLTE - Symposium 2008; New materials and technologies, new designs and innovations - A sustainable approach to architectural and structural design. - Acapulco 2008
- [26] WELLER, Bernhard; REICH, Stefan; EBERT, Jan: Contact materials for structural glass. - Tagungsband: ECF17 - 17th European Conference on Fracture. - Brno 2008
- [27] WELLER, Bernhard; EBERT, Jan; REICH, Stefan: Solid materials for in-plane load application into glass edges. - Tagungsband: Glass Performance Days 2009. - Tampere 2009. Seite 490-493
- [28] WELLER, Bernhard; SCHNEIDER, Jens; REICH, Stefan; EBERT, Jan: Kontaktmaterialien zur Einleitung von Druckkräften in Glas. - Bauingenieur (85) 2010, Heft 3, Seite 118-127
- [29] WELLER, Bernhard; REICH, Stefan; EBERT, Jan: Long term behaviour of polymers under compressive stress. - Book of Abstracts: ECF 18 - European Conference of Fracture. -Dresden 2010
- [30] WIGGINGTON, Michael: Glas in der Architektur. - Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt - 1997. ISBN 3-421-03126-6
- [31] WURM, Jan: Glas als Tragwerk - Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. - Basel: Birkhäuser Verlag AG - 2007. ISBN 978-3-7643-7607-9

Normen

- [32] ÖNORM B 3716-1: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Teil 1: Grundlagen. - 2009-11-15
- [33] ÖNORM B 3716-2: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen. - 2009-11-15
- [34] ÖNORM B 3716-3: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Teil 3: Absturzsichernde Verglasungen. - 2009-11-15
- [35] ÖNORM B 3716-4: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Teil 4: Betretbare, begehbare und befahrbare Verglasungen. - 2009-11-15
- [36] ÖNORM B 3716-5: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Teil 5: Punktförmig gelagerte Verglasungen und Sonderkonstruktionen. - 2007-12-01
- [37] ÖNORM B 3716 Beiblatt 1: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Beiblatt 1: Beispiele für Glasanwendungen. - 2010-06-01

Online-Quellen und Datenblätter

- [38] <http://www.koelner-dom.de/typo3temp/pics/59f3595757.jpg> - 23.06.2011
- [39] <http://www.staedte-fotos.de/1024/amiens-kathedrale-notre-dame-suedquerhaus-18590.jpg> - 26.06.2011
- [40] <http://www.ploetzl.com/pub/derturm/img/bild44.jpg> - 23.06.2011
- [41] http://glaserei-frankfurt.de/files/ganzglas_pavillon_1.jpg - 23.06.2011
- [42] <http://www.fosterandpartners.com/content/projects/0102/38038.jpg> - 23.06.2011
- [43] http://viewfinder.english-heritage.org.uk/gallery/450/BB9/BB91_04625.jpg - 23.06.2011
- [44] http://imgs.abduzeedo.com/files/archi/norman_foster/willis2.jpg - 11.01.2012
- [45] <http://www.cambridge2000.com/gallery/images/P4104454e.jpg> - 11.01.2012
- [46] http://tragkonstruktionen.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-betonbau/Diverse/Labor/GrPrRamen_01.pdf - 09.01.2012
- [47] GOM - Gesellschaft für optische Messung: ARAMIS Optische 3D-Verformungsanalyse, <http://www.gom.com/de/messsysteme/systemuebersicht/aramis.html> - 10.01.2012
- [48] http://austria-lexikon.at/attach/Wissenssammlungen/Museen/Palmenhaus_Wien_Sch%C3%B6nbrunn/Palmenhaus.jpg - 20.01.2012
- [49] <http://www.waagner-biro.at/references/#/reference/marina-hotel/> - 27.02.2012
- [50] <http://www.waagner-biro.at/references/#/reference/zlote-tarasy/> - 27.02.2012

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2.1	Eigenschaften von Floatglas aus Kalk-Natronsilicatglas [17], [22]	12
Tab. 4.1	charakteristische Biegezugfestigkeit f_k verschiedener Glaserzeugnisse [32]	31
Tab. 4.2	Durchbiegungsbegrenzungen [32]	31
Tab. 4.3	Mechanische Eigenschaften von Hilti HIT-HY 50 und Hilti HIT-HY 70 [1]	37
Tab. 4.4	Vergleich zwischen Hilti HIT-HY 50 und Hilti HIT-HY 70 [1]	37
Tab. 4.5	Mechanische Eigenschaften von POM, POM-C und POM GF30 [4]	40
Tab. 4.6	Mechanische Eigenschaften von PA 6, PA 6 GF30 und PA 66 [4]	41
Tab. 4.7	Gültigkeitsbedingungen für die Bemessungsformel aus Abb. 4.11	50
Tab. 9.1	Ergebnisse der numerischen Berechnung für das rechteckige Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht	122
Tab. 9.2	Ergebnisse der numerischen Berechnung für das rechteckige Glasschwert mit Klotzungen als Zwischenschicht	124
Tab. 9.3	Ergebnisse der numerischen Berechnung für das gevoutete Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht	126
Tab. 9.4	Ergebnisse der numerischen Berechnung für das gevoutete Glasschwert mit Klotzungen als Zwischenschicht	128
Tab. 10.1	Bezeichnung und Bruchlast der Versuchskörper	136
Tab. 10.2	Dehnungen und Spannungen an den Messstellen der zwei DMS für die Versuchskörper V1M, V2M und V3M	143
Tab. 10.3	Dehnungen und Spannungen an den Messstellen der zwei DMS für die Versuchskörper V4K, V5K und V6K	151
Tab. 10.4	Dehnungen und Spannungen an den Messstellen der zwei DMS für die Versuchskörper R7M, R8M und R9M	158
Tab. 10.5	Dehnungen und Spannungen an den Messstellen der zwei DMS für die Versuchskörper R10K, R11K und R12K	167

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1	Palmenhaus beim Schloss Schönbrun in Wien [48];	4
Abb. 1.2	Links: Seilnetzfassade beim Hotel Kempinski in München [17]; Rechts: Fassade mit Glasschwerter beim Museum für Stadtgeschichte in Luxemburg [7]	4
Abb. 1.3	Links: Marina Hotel in Abu Dhabi [49]; Rechts: Zlote Tarasy in Warschau [50]	5
Abb. 2.1	Gotische Kathedralen - Links: Lichteinfall im Kölner Dom [38]; Rechts: Kathedrale von Amiens (1220-1288) [39]	7
Abb. 2.2	Der Kristallpalast in London [40]	8
Abb. 2.3	Ganzglas-Ausstellungspavillon der Firma Glasbau Hahn [41]	9
Abb. 2.4	Verwaltungsgebäude Willis Faber & Dumas in Ipswich - Links: Außenansicht [42]; Rechts: Innenansicht [43]	9
Abb. 2.5	Spannungsdehnungslinien von Glas, Stahl und Beton [17]	10
Abb. 2.6	Skizze - Herstellung von Floatglas [23]	11
Abb. 2.7	Bruchbilder verschiedener Glasprodukte: von li. nach re.: Floatglas, ESG, TVG [17] .	12
Abb. 2.8	Herstellung von ESG [17]	14
Abb. 2.9	Eigenspannungszustand von ESG und Spannungsverlauf bei einer Biegebeanspruchung [17]	14
Abb. 2.10	Herstellung von VSG [17]	16
Abb. 2.11	Spannungsverteilung im Querschnitt bei VSG	17
Abb. 2.12	Links: VSG aus ESG mit Punkthalterung; Rechts: VSG aus TVG nach Kugelfallversuch [17]	18
Abb. 3.1	Tragwerkssystematik nach Ackermann [7]	20
Abb. 3.2	Links: Glasschwerter beim Foyer des stadthistorischen Museums Luxembourg [7]; Rechts: hängende Glasschwerter beim Main Canopy des ADNEC Capital Gate in Abu Dhabi	21
Abb. 3.3	Scheiben mit aussteifenden Systemen: Fachwerk und Verspannungen [7]	22
Abb. 3.4	Scheiben mit aussteifenden Systemen: Glasschwerter [7]	22
Abb. 3.5	Links: Glasbrücke in Rotterdam - Träger aus Glas [7]; Rechts: Tensegrity-Skulptur - glasstec 1996 [2]	23
Abb. 3.6	Übersicht der Fügetechniken [31]	24
Abb. 3.7	Reibverbindung schematisch [17]	24
Abb. 3.8	Links: Modell einer Reibverbindung für VSG; Rechts: Zangenartige Ausführung einer Reibverbindung, Sony Center Berlin [31]	25
Abb. 3.9	Links: Lochleibungsverbindung schematisch[17]; Rechts: Lochleibungsverbindung - Sony Center Berlin [31]	26
Abb. 3.10	Klebeverbindung [17]	27
Abb. 3.11	Qualitativer Vergleich verschiedener Klebstoffsysteme [31]	28
Abb. 4.1	Links: Pendelschlagversuch [17]; Rechts: Kugelfallversuch [17]	34
Abb. 4.2	Anwendungen des Mörtels Hilti HIT-HY 70 - Links: Punkthalter (Bohrloch); Rechts: Einspannung einer Glasbrüstung [Datenblatt Hilti HIT-HY 70]	39
Abb. 4.3	Links: Druck-Versuchsstand [28]; Rechts: Last-Verformungs-Kurven unter Drucklast bei	

	einer Klotzfläche von 800 mm ² [28]	42
Abb. 4.4	Dreiteilige Prüfkörper für die Lasteinleitung von Drucklasten an Glaskanten	43
Abb. 4.5	Last-Verformungs-Mittelwertkurven unter Drucklast bei einer Klotzfläche von 1280 mm ² [28]	43
Abb. 4.6	Schematische Arbeitslinie von Thermoplasten [28]	44
Abb. 4.7	Verformungsverhalten von viskoelastischen Kunststoffen als Burger-Modell [28]	45
Abb. 4.8	Links: Einflusstiefen der vier Zonen für ESG; Rechts: qualitative Verteilung der thermisch eingepprägten Vorspannung für Zone 2 [11]	46
Abb. 4.9	qualitative Verteilung der thermisch eingepprägten Vorspannung für Zone 3 (links) und Zone 4 (rechts) [11]	46
Abb. 4.10	Links: Komponenten einer SL-Verbindung mit Vergussmörtel als Zwischenschicht; Rechts: Bohrloch mit Vergussmörtel und zusätzlicher Aluminiumhülse [1]	48
Abb. 4.11	Bemessungsgleichung für SL-Verbindungen im Glasbau [1]	49
Abb. 4.12	Versuchsordnung - Tragverhalten von Glasträger - ETH Zürich [6]	52
Abb. 4.13	Versuchsstand für die Knickversuche [14]	54
Abb. 4.14	Versuchsstand für die Kippversuche [14]	56
Abb. 4.15	Verteilung der Hauptzugspannungen auf der Glasoberfläche abhängig von der Höhe der Belastung [14]	56
Abb. 4.16	Systeme der in [3] durchgeführten Beulversuche	57
Abb. 4.17	Übersicht des FE-Modells [9]	58
Abb. 4.18	Unten: Verteilung der Hauptzugspannungen [9]	59
Abb. 4.19	Versuchsaufbau [9]	59
Abb. 5.1	Gesamtansicht aus der Luft [44]	61
Abb. 5.2	Links: Isometrie des Gebäudes; Rechts: Isometrie der Glaswand [30]	62
Abb. 5.3	Nutverbindungen für ebene (li.) und geschwungene (re.) Fassadenflächen [30]	62
Abb. 5.4	Innenansichten mit den Glasschwertern [30]	63
Abb. 5.5	Aussenansicht [45]	63
Abb. 5.6	Ansicht Süd-Ost [7]	64
Abb. 5.7	Innenansicht [7]	65
Abb. 5.8	Links: Isometrie des Systems; Rechts: Fassade mit Dreigurtfachwerkträger und Glasschwerter [7]	65
Abb. 5.9	Gesamtansicht [7]	66
Abb. 5.10	Links: Gesamtansicht; Rechts: Isometrie des Tragwerkes [7]	67
Abb. 5.11	Detailpunkte - Links: Kopfpunkt; Rechts: Fußpunkt [7]	67
Abb. 5.12	Aussenansicht des Museums für Stadtgeschichte in Luxemburg [10]	68
Abb. 5.13	Links: Blick von aussen durch die Glaswand [7]; Detailansicht der Verbindung der Glasschwerter untereinander [10]	69
Abb. 5.14	Detailschnitt / -ansicht der Glasschwerter [7]	69
Abb. 5.15	ADNEC Capital Gate - Gesamtansicht [21]	70
Abb. 5.16	Links: Gesamtansicht der Main Canopy; Rechts: Glasschwerter im Bauzustand	71
Abb. 5.17	Links: Glasschwerter im Bauzustand; Rechts: Injizieren des Mörtels zwischen Glasschwerter und Stahlschuh	71

Abb. 6.1	Glasschwert von dem bei den Untersuchungen ausgegangen wird Links: Ansicht; Rechts: Schnitt durch den Stahlschuh	74
Abb. 6.2	Spider-elemente zur Einleitung der Lasten von der Fassade auf die Glasschwerter ...	74
Abb. 6.3	Variante mit im Kantenbereich abgekapselter Mörtel	75
Abb. 6.4	Einwirkende Lasten	76
Abb. 6.5	Auflagerkräfte [kN] in den Druckfedern bei einer Windlast von 20 kN	77
Abb. 6.6	Hauptspannungen [N/mm ²] im Einspannbereich des Glasschwertes bei einer Windlast von 20 kN	77
Abb. 6.7	Parameter - Klotzungen	78
Abb. 6.8	Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Größe der Windlast und vom Abstand der Klotzungen vom oberen Rand des Glasschwertes	80
Abb. 6.9	Hauptzugspannungen im Bereich der linken, oberen Klotzung, abhängig von der Größe der Windlast und vom Abstand der Klotzungen vom oberen Rand des Glasschwertes	81
Abb. 6.10	Hauptzugspannungen im Glas an verschiedenen Stellen des Einspannbereiches bei einer Windlast von 40 kN und abhängig vom Abstand der Klotzungen vom oberen Rand ...	81
Abb. 6.11	Hauptspannungen [N/mm ²] infolge einer Windlast von 40 kN im Bereich der Klotzung links, oben für einen Abstand zum oberen Rand von 40 mm	82
Abb. 6.12	Hauptspannungen [N/mm ²] infolge einer Windlast von 40 kN für verschiedene Klotzungslängen - li, o: 20 mm; re, o: 40 mm; li, u: 80 mm; re, u: 120 mm	83
Abb. 6.13	Hauptzugspannungen im Bereich der linken, oberen Klotzung, abhängig von der Größe der Windlast und von der Länge der Klotzungen	83
Abb. 6.14	Hauptzugspannungen im Glas an verschiedenen Stellen des Einspannbereiches bei einer Windlast von 40 kN und abhängig von der Länge der Klotzungen	84
Abb. 6.15	Hauptspannungen [N/mm ²] infolge einer Windlast von 40 kN für verschiedene Abstände zwischen den Klotzungen - li, o: 100 mm; re, o: 160 mm; li, u: 200 mm; re, u: 240 mm	85
Abb. 6.16	maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende, abhängig von der Windlast und vom Abstand zwischen den Klotzungen	85
Abb. 6.17	Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Windlast und vom Abstand zwischen den Klotzungen	86
Abb. 6.18	Hauptzugspannungen im Bereich der linken, oberen Klotzung, abhängig von der Windlast und von dem Abstand zwischen den Klotzungen	86
Abb. 6.19	Hauptzugspannungen im Glas an verschiedenen Stellen des Einspannbereiches bei einer Windlast von 40 kN und abhängig von dem Abstand zwischen den Klotzungen	87
Abb. 6.20	maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende, abhängig von der Windlast und von der Glasstärke	88
Abb. 6.21	Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Windlast und von der Glasstärke	88
Abb. 6.22	Hauptspannungen [N/mm ²] im Bereich des Bohrloches bei einer Windlast von 20 kN - Links: Modell ohne Hülse; Rechts: Modell mit Hülse	89
Abb. 6.23	Links: Belastung und Auflagerkräfte; Mitte: Ausbildung der Druckdiagonale; Rechts: Hauptspannungen [N/mm ²] als Isoflächen für eine Windlast von 20 kN	90
Abb. 6.24	Abstand des Bohrloches vom oberen Rand: 250 mm - Links: Lage des Bohrloches; Rechts: Hauptspannungen [N/mm ²] im Bereich des Bohrloches	91

Abb. 6.25	Abstand des Bohrloches vom oberen Rand: 150 mm - Links: Lage des Bohrloches; Rechts: Hauptspannungen [N/mm ²] im Bereich des Bohrloches	91
Abb. 6.26	Abstand des Bohrloches vom oberen Rand: 350 mm - Links: Lage des Bohrloches; Rechts: Hauptspannungen [N/mm ²] im Bereich des Bohrloches	92
Abb. 7.1	Gevoutetes Glasschwert - Links: ohne Knick; Rechts: mit Knick	94
Abb. 7.2	Kräftegleichgewicht am gevouteten Glasschwert (Verfahren nach Culmann)	95
Abb. 7.3	Übersicht der Geometrien für die Variation des Winkels beim gevouteten Glasschwert ohne Knick	97
Abb. 7.4	Gevoutetes Glasschwert ohne Knick - maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende, abhängig von der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen	98
Abb. 7.5	Gevoutetes Glasschwert ohne Knick - Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Größe der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen	98
Abb. 7.6	Gevoutetes Glasschwert ohne Knick - maximale Druckspannungen im Mörtel (Absolutwerte), abhängig von der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen ..	99
Abb. 7.7	Vergleich der Druckspannungen (Absolutwerte) in den Zwischenschichten (Mörtel und Klotzung) für das gevoutete Glasschwert ohne Knick mit einem Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen von 5 Grad	100
Abb. 7.8	Vergleich der Hauptspannungen [N/mm ²] im Glas bei einem Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen von 5 Grad, einer Windlast von 20 kN und verschiedenen Zwischenschichtmaterialien - links mit Mörtel; rechts mit Klotzungen	100
Abb. 7.9	Übersicht der Geometrien für die Variation des Winkels beim gevouteten Glasschwert mit Knick	101
Abb. 7.10	Gevoutetes Glasschwert mit Knick - maximale Verschiebung am unteren Glasschwertende, abhängig von der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen ...	102
Abb. 7.11	Gevoutetes Glasschwert mit Knick - Hauptzugspannungen aus der globalen Biegung, abhängig von der Größe der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen	102
Abb. 7.12	Gevoutetes Glasschwert mit Knick - maximale Druckspannungen im Mörtel (Absolutwerte), abhängig von der Windlast und vom Winkel der geneigten Kante zur Vertikalen	103
Abb. 8.1	Prüfkörpergeometrie - erster Entwurf	106
Abb. 8.2	Skizze des Prüfrahmens, an dem die Glasschwerter für die Versuche befestigt werden sollen [46]	107
Abb. 8.3	Prüfrahmen mit Laschenstoss, an dem die Glasschwerter befestigt werden	108
Abb. 8.4	Links: Aufbau des Hydraulikzylinders; Rechts: Hydraulikzylinder	108
Abb. 8.5	Induktive Wegaufnehmer - Links: Wirkungsprinzip; Rechts: Beispiele [15]	110
Abb. 8.6	Schema eines Folien-DMS [15]	111
Abb. 8.7	Ausführungsarten von Folien-DMS [ZSE-DMS-Katalog]: (a) Linearstreifen; (b) 45°-Linearstreifen für Schubdehnung; (c) 0°/90°-Doppel-Messgitter-DMS; (d) 0°/45°/90°-Dreifach-Messgitter-DMS; (e) Messkette mit 5 Messgittern; (f) 0°/90°-Rosette mit zwei gestapelten Gittern; (g) 0°/45°/90°-Rosette mit drei gestapelten Gittern; (h) 0°/60°/120°-Dreifach-Messgitter-DMS; (i) 0°/30°/90°/150°-Vierfach-Messgitter-DMS	111
Abb. 8.8	Links: Photogrammetrische Messung mit Aramis bei einem Zugversuch; Rechts: ARAMIS Messgerät (Kamera) [47]	112

Abb. 8.9	Prüfkörpergeometrie nach Berücksichtigung aller Randbedingungen - Links: Rechteckiges Glasschwert (Glasfinne); Rechts: Gevoutetes Glasschwert (Glasfinne)	115
Abb. 8.10	Einspannbereich des rechteckigen Glasschwertes (von oben und von vorne) mit Bezeichnung der Bestandteile	116
Abb. 8.11	Einspannbereich des gevouteten Glasschwertes (von oben und von vorne) mit Bezeichnung der Bestandteile	117
Abb. 9.1	Geometrien der numerisch untersuchten Glasschwerttypen:	121
Abb. 9.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das rechteckige Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht bei einer Druckbelastung von 0 bis 40 kN	122
Abb. 9.3	Hauptspannungen [N/mm ²] im Einspannbereich des rechteckigen Glasschwertes mit Mörtel als Zwischenschicht bei verschiedenen Laststufen	123
Abb. 9.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das rechteckige Glasschwert mit Klotzungen als Zwischenschicht bei einer Druckbelastung von 0 bis 40 kN	124
Abb. 9.5	Hauptspannungen [N/mm ²] im Einspannbereich des rechteckigen Glasschwertes mit Klotzungen als Zwischenschicht bei verschiedenen Laststufen	125
Abb. 9.6	Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das gevoutete Glasschwert mit Mörtel als Zwischenschicht bei einer Druckbelastung von 0 bis 40 kN	126
Abb. 9.7	Hauptspannungen [N/mm ²] im Einspannbereich des gevouteten Glasschwertes mit Mörtel als Zwischenschicht bei verschiedenen Laststufen	127
Abb. 9.8	Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das gevoutete Glasschwert mit Klotzungen als Zwischenschicht bei einer Druckbelastung von 0 bis 40 kN	128
Abb. 9.9	Hauptspannungen [N/mm ²] im Einspannbereich des gevouteten Glasschwertes mit Klotzungen als Zwischenschicht bei verschiedenen Laststufen	129
Abb. 9.10	Nebenspannungen [N/mm ²] bei einer horizontalen Drucklast von 30 kN im Einspannbereich der vier untersuchten Glasschwertvarianten	130
Abb. 10.1	Gelieferte Bestandteile für die Versuchskörper	131
Abb. 10.2	Links: Aramis-Messgerät; Rechts: Kalibrierung des Messgerätes	132
Abb. 10.3	Links: Dehnungsmessstreifen; Rechts: Lage der Wegaufnehmer	132
Abb. 10.4	Links: Lasteinleitung mit einem mit POM-Streifen verkleideten U-förmigen Stahlschuh; Lasteinleitung nur mit POM-Streifen	133
Abb. 10.5	a. erster Versuch mit Glasschwert alleine; b. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln - Aufbau; c. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln - globale Verformung; d. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln - lokale Verformung	134
Abb. 10.6	a. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln mit aussteifenden Latten - Aufbau; b. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Doka-Tafeln mit aussteifenden Latten - Verformung; c. erster Versuch mit Glasschwert und beidseitigen Stahlträgern - Aufbau	135
Abb. 10.7	Links: Verkleben der Silikon-Dichtbänder als Abstandhalter; Rechts: Einlegen der Glasfinne im Stahlschuh	137
Abb. 10.8	Links: Injizieren des Raumes zwischen Finne und Stirnblech mit Mörtel; Rechts: Befestigen des vorderen Deckbleches	137
Abb. 10.9	Silikon-Dichtband zwischen Glasfinne und vorderes Deckblech und Verkleben von DMS an der Stirnseite der vorderen Glasscheibe unter dem Einspannbereich	138
Abb. 10.10	Links: Besprühen des Messfensters (Aramis) mit einem weißen, matten Lack; Rechts: schwarzes Punktmuster auf dem Aramis-Messfenster	138

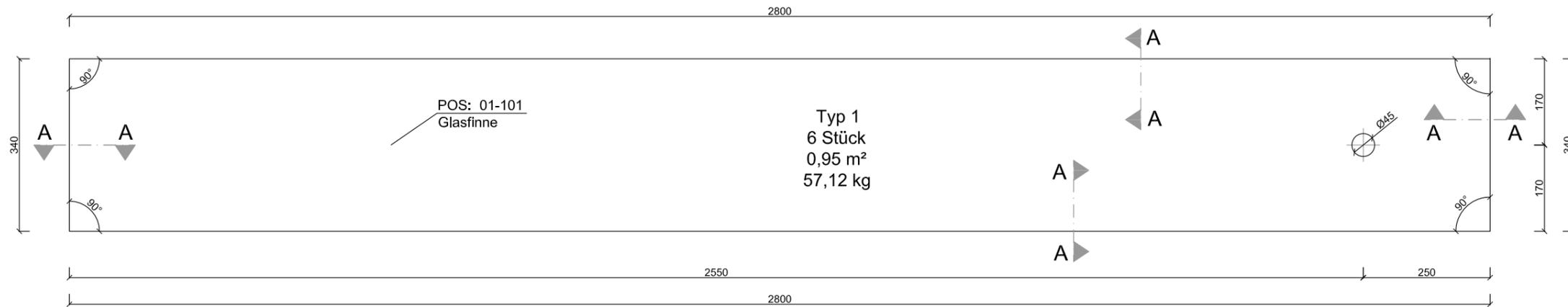
Abb. 10.11	Links: Versuchskörper V1M während der Versuchsdurchführung; Mitte: Versuchskörper V1M nach dem Bruch - im Stahlschuh hängend; Rechts: Versuchskörper V1M nach dem Bruch - die Glaskrümmel haften an den PVB-Folien	139
Abb. 10.12	Bruchbilder des Versuchskörper V1M	140
Abb. 10.13	Bruchbilder des Versuchskörper V2M	140
Abb. 10.14	Bruchbilder des Versuchskörper V3M	141
Abb. 10.15	Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 1 - Verschiebung der Glasfinne zum Prüfrahmen für die Versuchskörper V1M, V2M und V3M	142
Abb. 10.16	Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 2 - Verschiebung der Glasfinne zum Stahlschuh für die Versuchskörper V1M, V2M und V3M	142
Abb. 10.17	Last-Dehnungs-Diagramm - DMS 1 und DMS 2- Dehnungen (Zug und Druck) an den Stirnseiten der vorderen Scheibe der Versuchskörper V1M, V2M und V3M, unter dem Stahlschuh	143
Abb. 10.18	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V1M	144
Abb. 10.19	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V2M	144
Abb. 10.20	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V3M	145
Abb. 10.21	Einbau der Klotzungsblöcke	146
Abb. 10.22	Links: Versuchskörper V5K während der Versuchsdurchführung; Mitte: Versuchskörper V4K nach dem Bruch - die Klotzung rechts oben ist nach unten verrutscht; Rechts: Versuchskörper V4K nach dem Bruch - im Stahlschuh hängend	147
Abb. 10.23	Bruchbilder des Versuchskörper V4K	148
Abb. 10.24	Bruchbilder des Versuchskörper V5K	148
Abb. 10.25	Bruchbilder des Versuchskörper V6K	149
Abb. 10.26	Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 1 - Verschiebung der Glasfinne zum Prüfrahmen für die Versuchskörper V4K, V5K und V6K	150
Abb. 10.27	Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 2 - Verschiebung der Glasfinne zum Stahlschuh für die Versuchskörper V4K, V5K und V6K	150
Abb. 10.28	Last-Dehnungs-Diagramm - DMS 1 und DMS 2- Dehnungen (Zug und Druck) an den Stirnseiten der vorderen Scheibe der Versuchskörper V4K, V5K und V6K, unter dem Stahlschuh	151
Abb. 10.29	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V4K	152
Abb. 10.30	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V5K	152
Abb. 10.31	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper V6K	153
Abb. 10.32	Verschiebungen senkrecht zur Glasfinne für zwei ausgewählte Punkte (Links: V4K; Rechts: V6K)	153
Abb. 10.33	Links: Einbau der Alu-Hülsen; Rechts: Kantenversatz im Bereich des Bohrloches ...	154
Abb. 10.34	Links: Zusammengebauter Versuchskörper R7M; Detail des zusammengebauten Versuchskörper R8M	155
Abb. 10.35	Links: Versuchskörper R8M vor dem Einbau; Mitte: Versuchskörper R7M nach dem Bruch - im Stahlschuh hängend; Rechts: Versuchskörper R9M nach dem Bruch - die Glaskrümmel haften an den PVB-Folien	156
Abb. 10.36	Bruchbilder des Versuchskörper R7M	157
Abb. 10.37	Bruchbilder des Versuchskörper R8M	157
Abb. 10.38	Bruchbilder des Versuchskörper R9M	157

Abb. 10.39	Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 1 - Verschiebung der Glasfinne zum Prüfrahmen für die Versuchskörper R7M, R8M und R9M	158
Abb. 10.40	Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 2 - Verschiebung der Glasfinne zum Stahlschuh für die Versuchskörper R7M, R8M und R9M	159
Abb. 10.41	Last-Dehnungs-Diagramm - DMS 1 und DMS 2- Dehnungen (Zug und Druck) an den Stirnseiten der vorderen Scheibe der Versuchskörper R7M, R8M und R9M, unter dem Stahlschuh	159
Abb. 10.42	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R7M	160
Abb. 10.43	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R8M	160
Abb. 10.44	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R9M	161
Abb. 10.45	Links: Einbau der Klotzungsblöcke beim Versuchskörper R10K; Rechts: Silikon-Dichtband als Abstandhalter und DMS beim Versuchskörper R10K	162
Abb. 10.46	Links: Versuchskörper R10K während der Versuchsdurchführung; Mitte: Versuchskörper R11K nach dem Bruch - im Stahlschuh hängend; Rechts: Versuchskörper R12K nach dem Bruch - nur eine Scheibe ist gebrochen	163
Abb. 10.47	Bruchbilder des Versuchskörper R10K	164
Abb. 10.48	Bruchbilder des Versuchskörper R11K	164
Abb. 10.49	Bruchbilder des Versuchskörper R12K	165
Abb. 10.50	Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 1 - Verschiebung der Glasfinne zum Prüfrahmen für die Versuchskörper R10K, R11K und R12K	166
Abb. 10.51	Last-Weg-Diagramm - Wegaufnehmer 2 - Verschiebung der Glasfinne zum Stahlschuh für die Versuchskörper R10K, R11K und R12K	166
Abb. 10.52	Last-Dehnungs-Diagramm - DMS 1 und DMS 2- Dehnungen (Zug und Druck) an den Stirnseiten der vorderen Scheibe der Versuchskörper R10K, R11K und R12K, unter dem Stahlschuh	167
Abb. 10.53	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R10K	168
Abb. 10.54	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R11K	168
Abb. 10.55	Dehnungsverlauf gemessen mit ARAMIS für den Versuchskörper R12K	169
Abb. 10.56	Dehnungsbilder nach dem Bruch für die Versuchskörper R10K (links) und R11K (rechts)	169
Abb. 10.57	Last-Weg-Diagramm für die gevouteten Glasschwerter mit Mörtel - Vergleich mit dem numerischen Modell	171
Abb. 10.58	Last-Dehnungs-Diagramm für die gevouteten Glasschwerter mit Mörtel - Vergleich mit dem numerischen Modell	171
Abb. 10.59	Gevoutetes Glasschwert mit Mörtel - Links: Spannungsbild aus Sofistik; Rechts: Dehnungsbild aus ARAMIS für V1M	172
Abb. 10.60	Last-Weg-Diagramm für die gevouteten Glasschwerter mit Klotzungen - Vergleich mit dem numerischen Modell	172
Abb. 10.61	Last-Dehnungs-Diagramm für die gevouteten Glasschwerter mit Klotzungen - Vergleich mit dem numerischen Modell	173
Abb. 10.62	Gevoutetes Glasschwert mit Klotzungen - Links: Spannungsbild aus Sofistik; Rechts: Dehnungsbild aus ARAMIS für V5K	173
Abb. 10.63	Last-Weg-Diagramm für die rechteckigen Glasschwerter mit Mörtel - Vergleich mit dem numerischen Modell	174
Abb. 10.64	Last-Dehnungs-Diagramm für die rechteckigen Glasschwerter mit Mörtel - Vergleich mit	

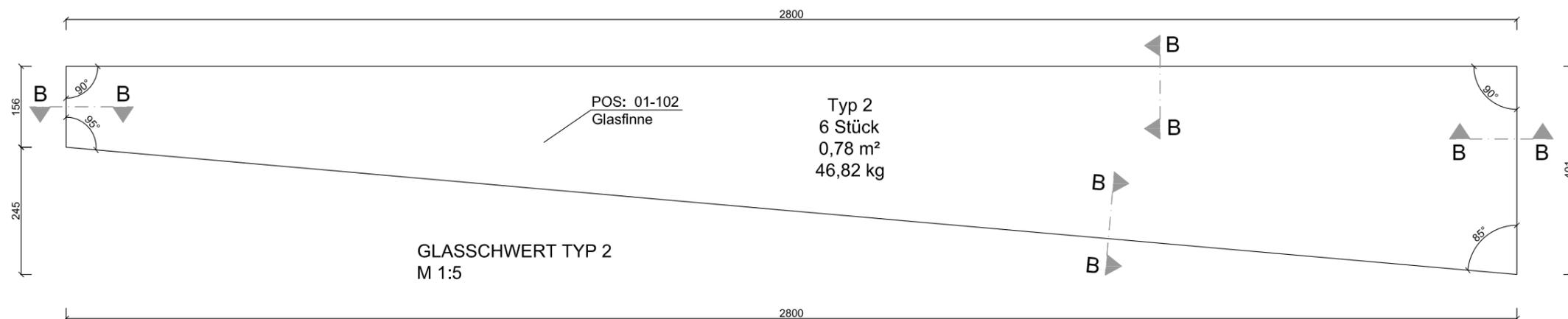
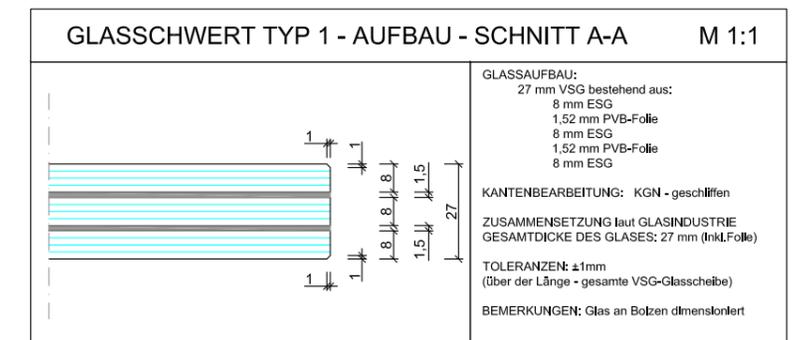
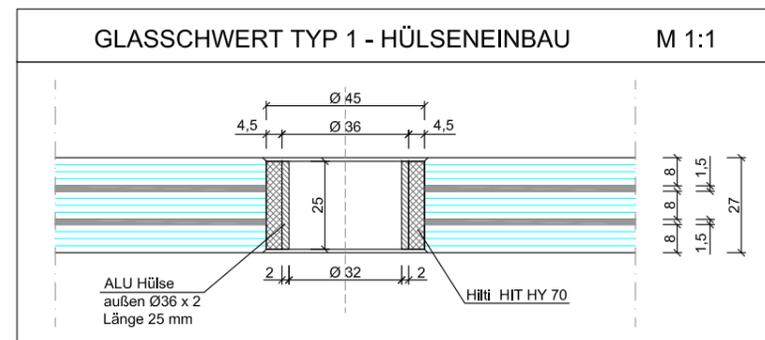
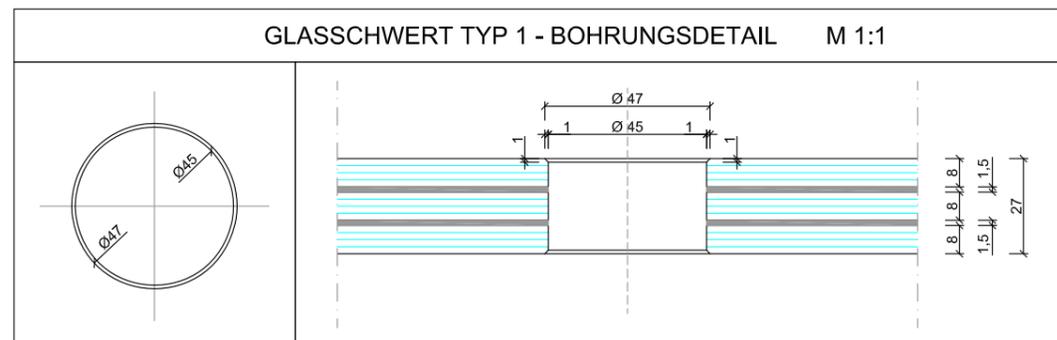
	dem numerischen Modell	174
Abb. 10.65	Rechteckiges Glasschwert mit Mörtel - Links: Spannungsbild aus Sofistik; Rechts: Dehnungsbild aus ARAMIS für R9M	175
Abb. 10.66	Last-Weg-Diagramm für die rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen - Vergleich mit dem numerischen Modell	175
Abb. 10.67	Last-Dehnungs-Diagramm für die rechteckigen Glasschwerter mit Klotzungen - Vergleich mit dem numerischen Modell	176
Abb. 10.68	Rechteckiges Glasschwert mit Klotzungen - Links: Spannungsbild aus Sofistik; Rechts: Dehnungsbild aus ARAMIS für R10K	176

ANHANG

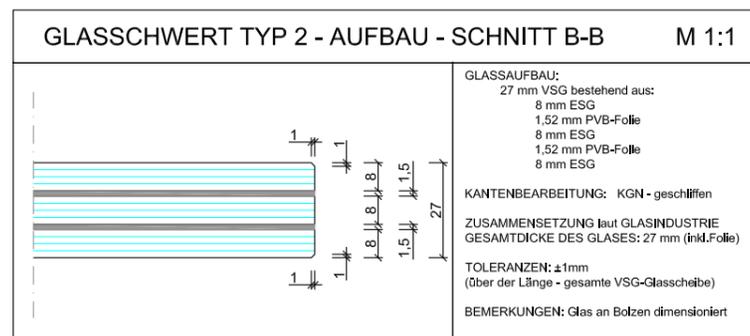
- ◆ Plan Nr.: 01 Rechteckige Glasfinne
Gevoutete Glasfinne
- ◆ Plan Nr.: 02 Rechteckiger Stahlschuh
- ◆ Plan Nr.: 03 Gevouteter Stahlschuh
- ◆ Plan Nr.: 04 Rechteckiges Glasschwert - Zusammenbau
- ◆ Plan Nr.: 05 Gevoutetes Glasschwert - Zusammenbau
- ◆ Positionsliste
- ◆ Massenermittlung für die Bestellung der verschiedenen Bestandteile



GLASSCHWERT TYP 1
M 1:5

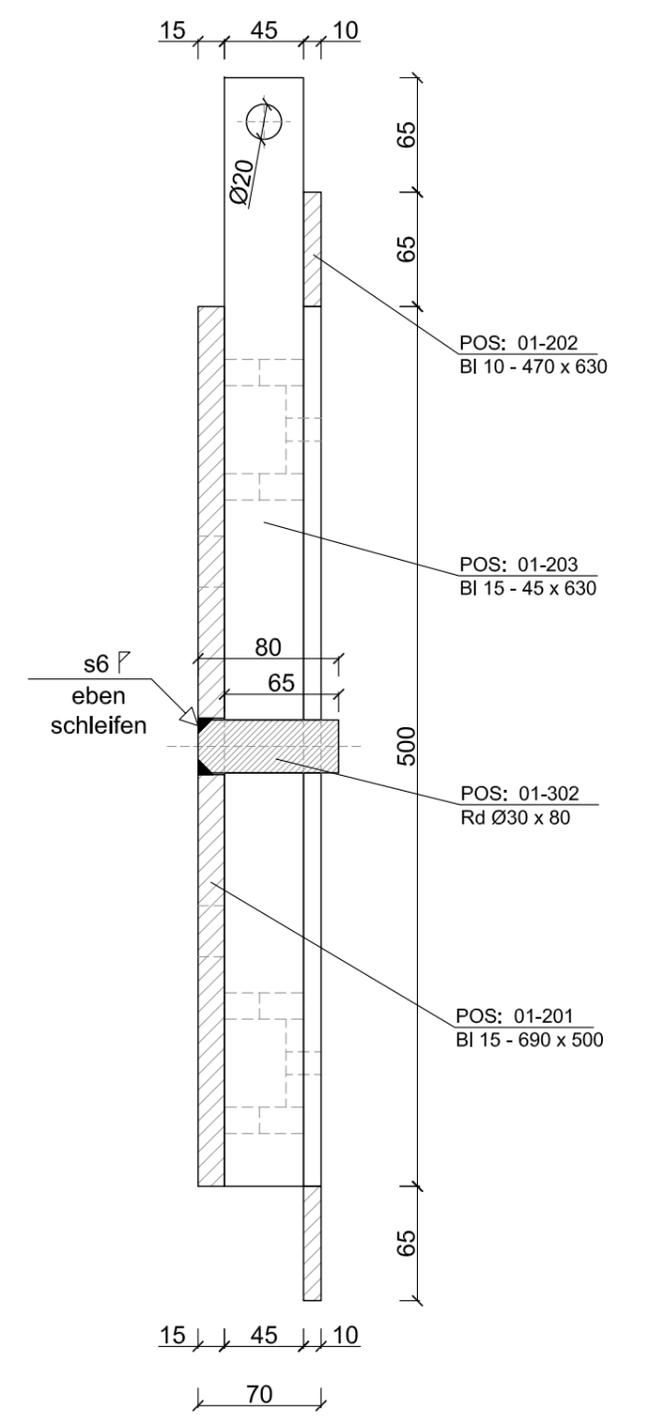
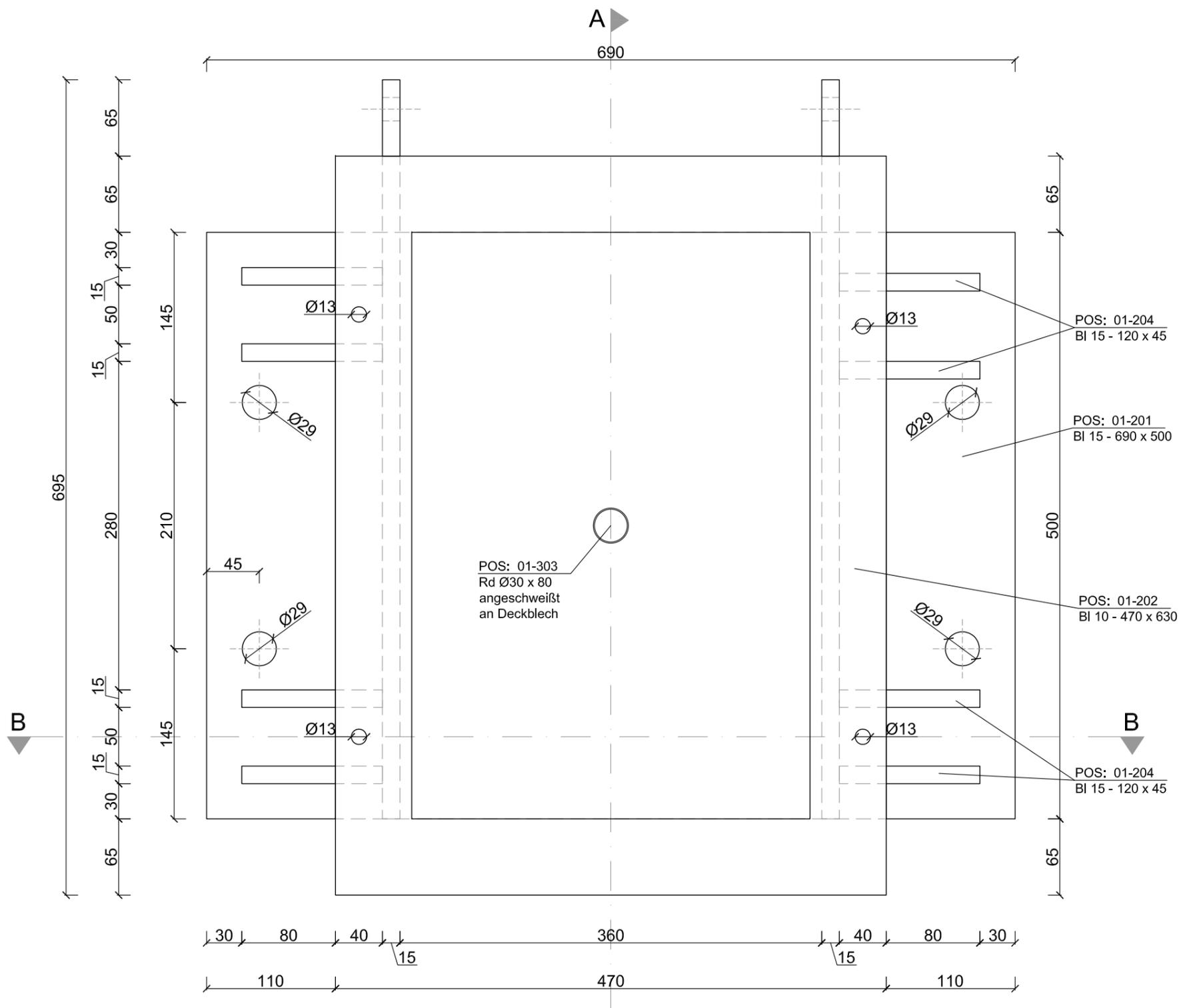


GLASSCHWERT TYP 2
M 1:5



! Ausdruck in Format A3 - maßstabslos !

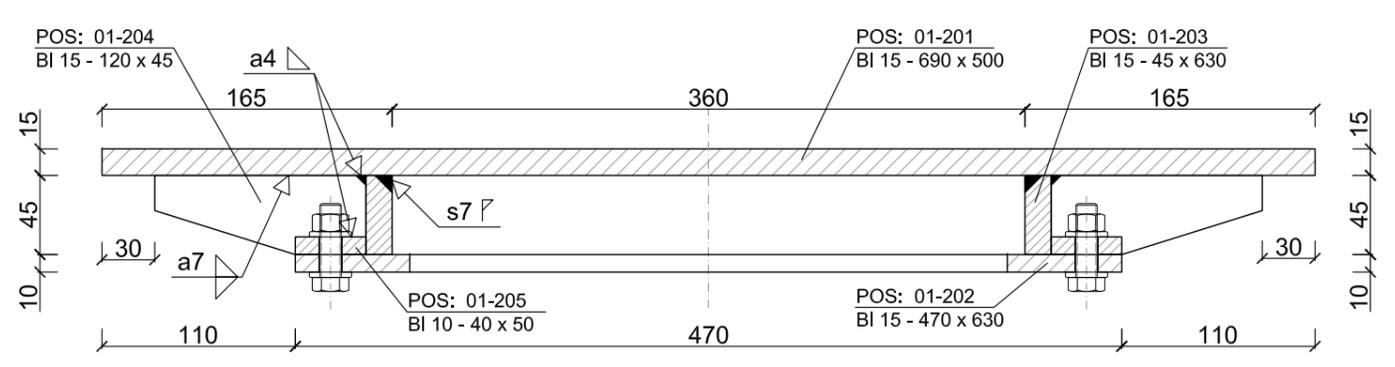
Institut für Hochbau Technische Universität Graz		
Projekt: DIPLOMARBEIT Untersuchung von Glasschwertern		
Planinhalt: Rechteckige Glasfinne Gevoutete Glasfinne	Maßstab: M 1:5, M 1:1	
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt		
Verfasser: Vlad Silvestru	Datum: 24.01.2012	
Format: A1	Plan Nr.: 01	



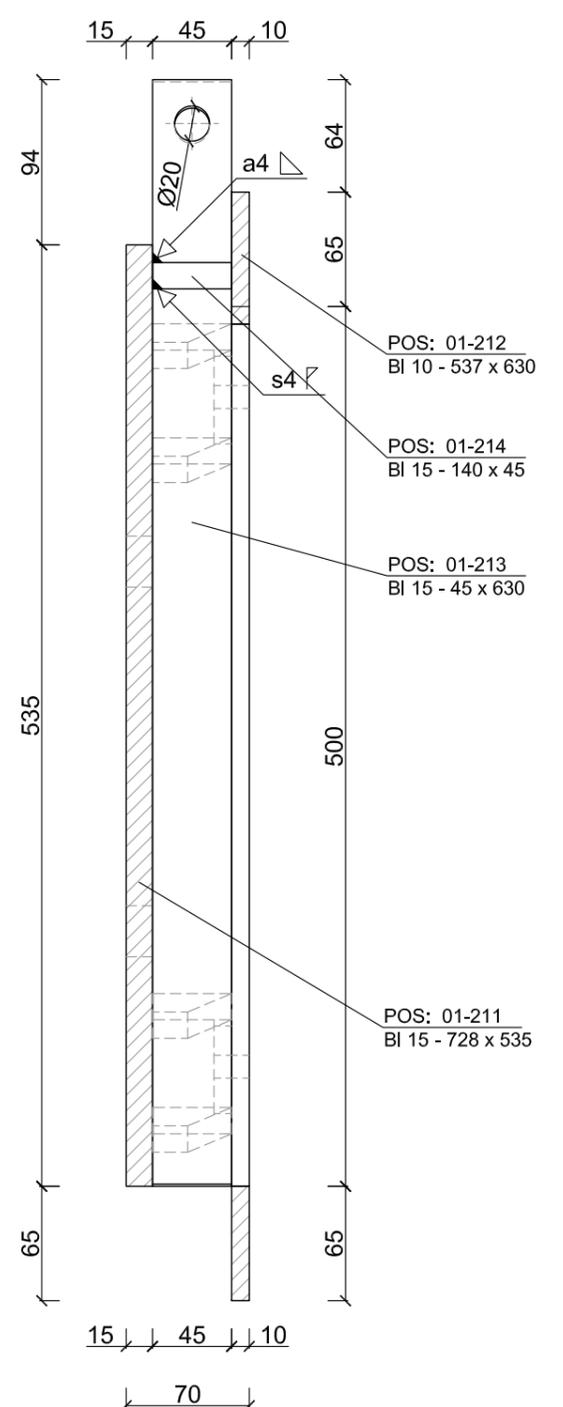
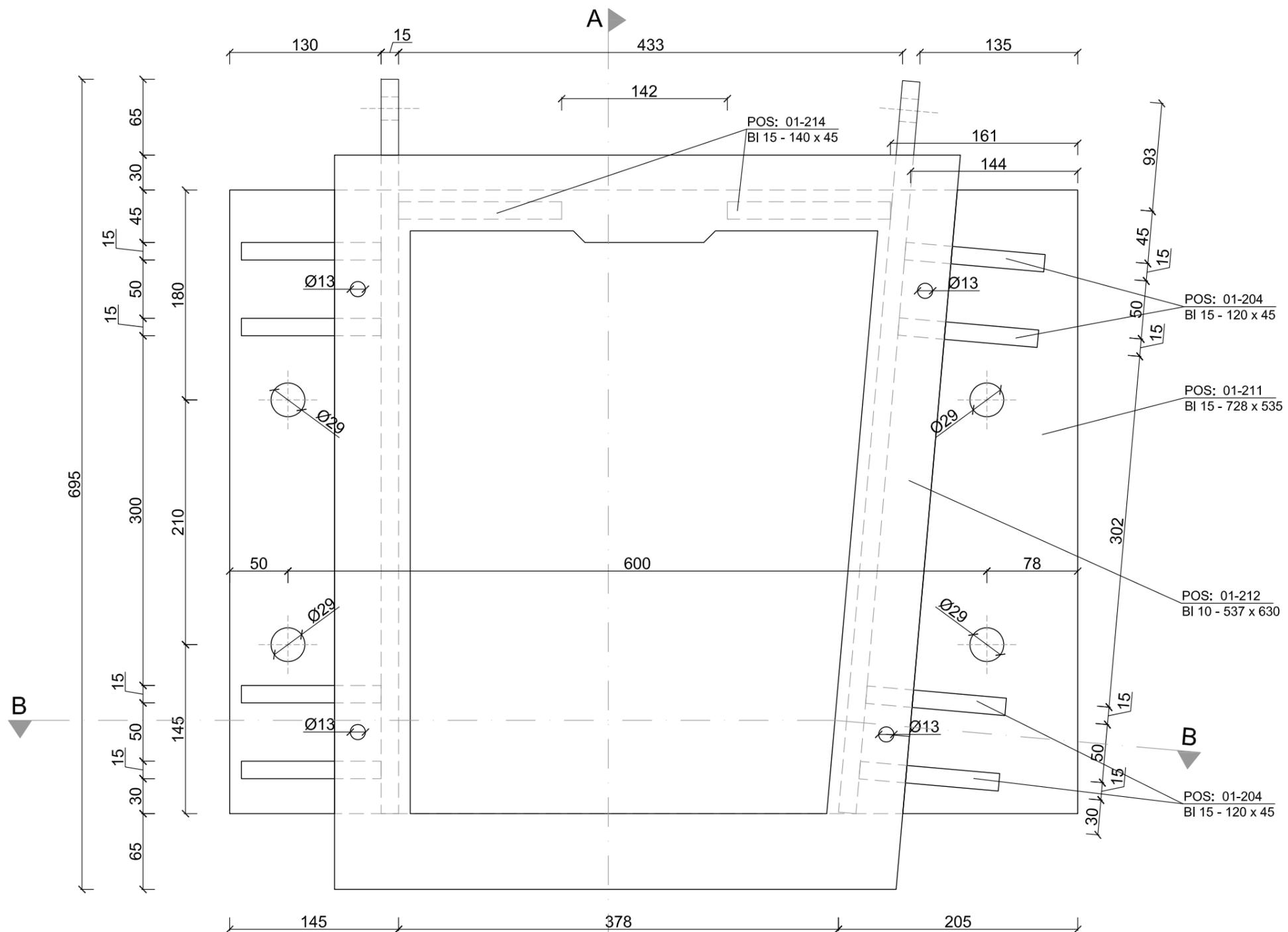
SCHNITT A-A
M 1:2

! Ausdruck in Format A3 - maßstabslos !

SCHNITT B-B
M 1:2

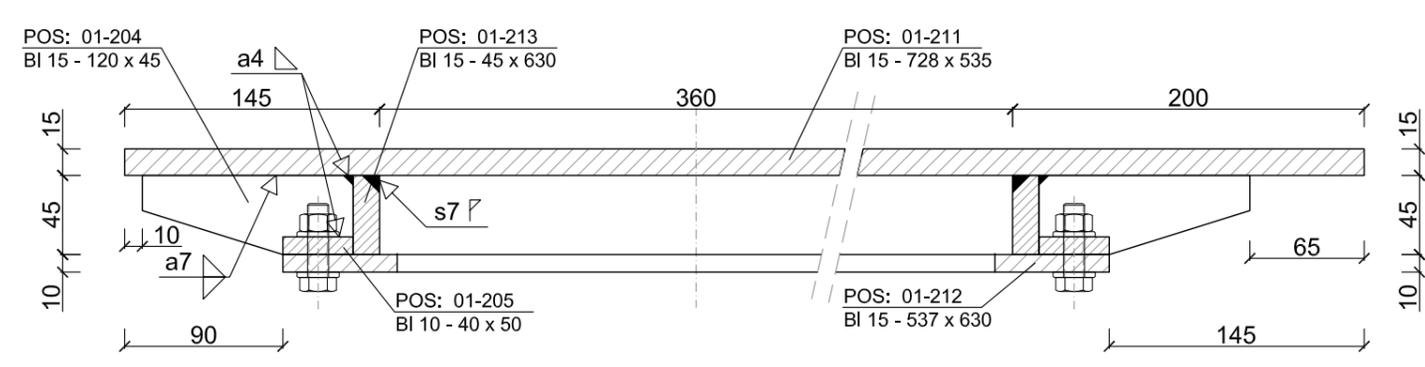


Institut für Hochbau Technische Universität Graz		
Projekt: DIPLOMARBEIT Untersuchung von Glasschwertern		
Planinhalt: Rechteckiger Stahlschuh	Maßstab: M 1:2	
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt		
Verfasser: Vlad Silvestru		Datum: 24.01.2012
		Format: A1 Plan Nr.: 02



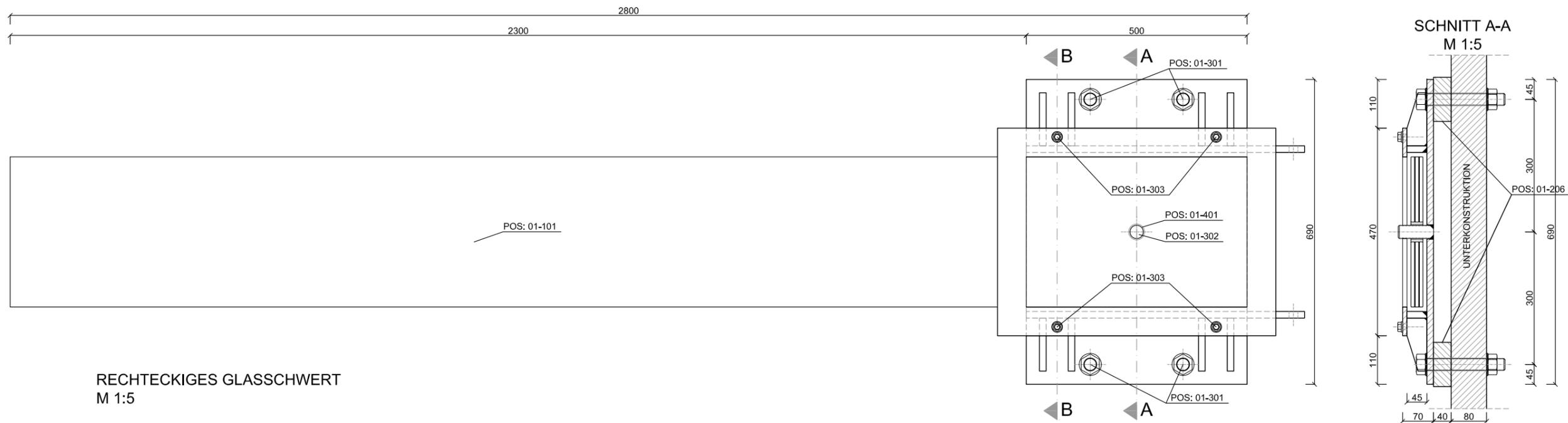
SCHNITT A-A
M 1:2

SCHNITT B-B
M 1:2

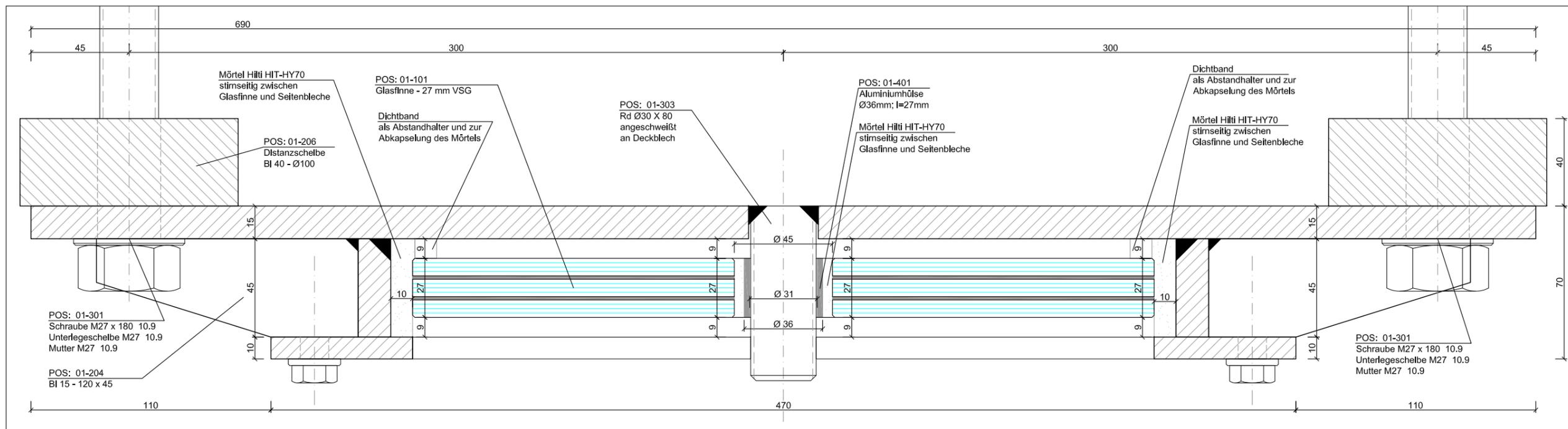


! Ausdruck in Format A3 - maßstabslos !

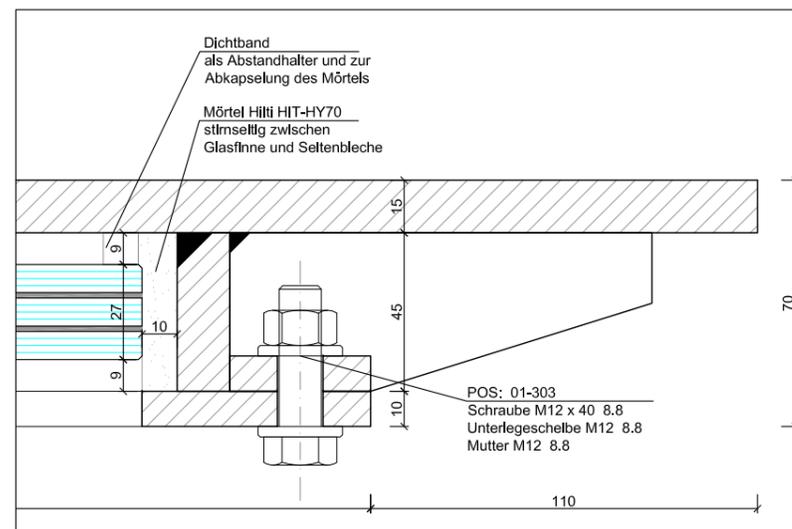
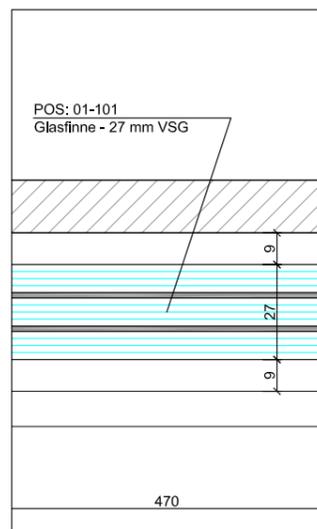
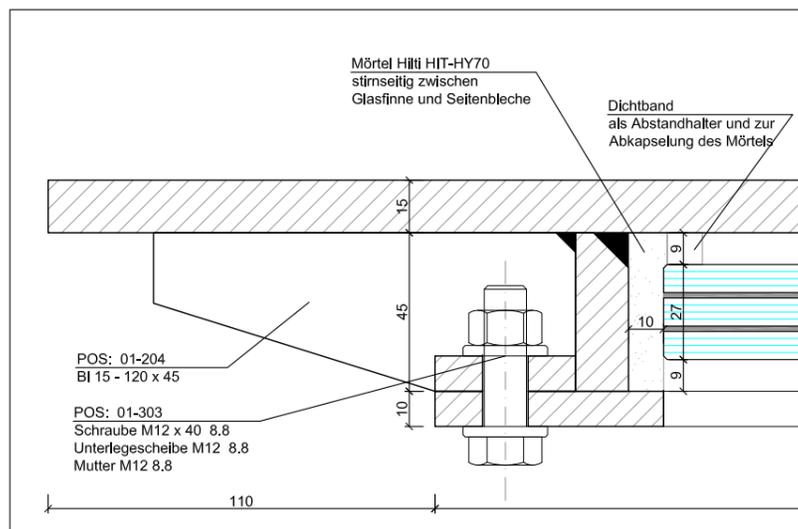
Institut für Hochbau Technische Universität Graz			
Projekt: DIPLOMARBEIT Untersuchung von Glasschwertern			
Planinhalt: Gevouteter Stahlschuh		Maßstab: M 1:2	
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt			
Verfasser: Vlad Silvestru		Datum: 24.01.2012	
		Format: A1	Plan Nr.: 03



RECHTECKIGES GLASSCHWERT
M 1:5



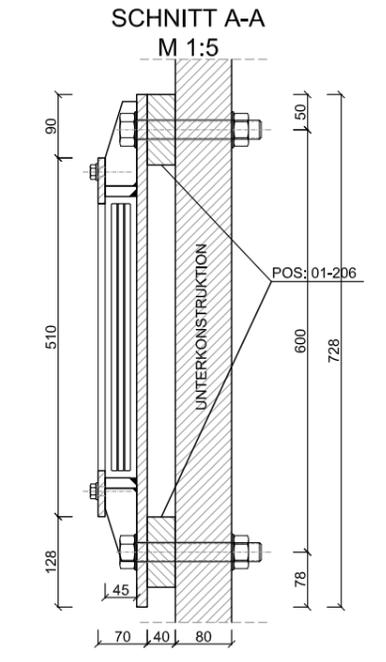
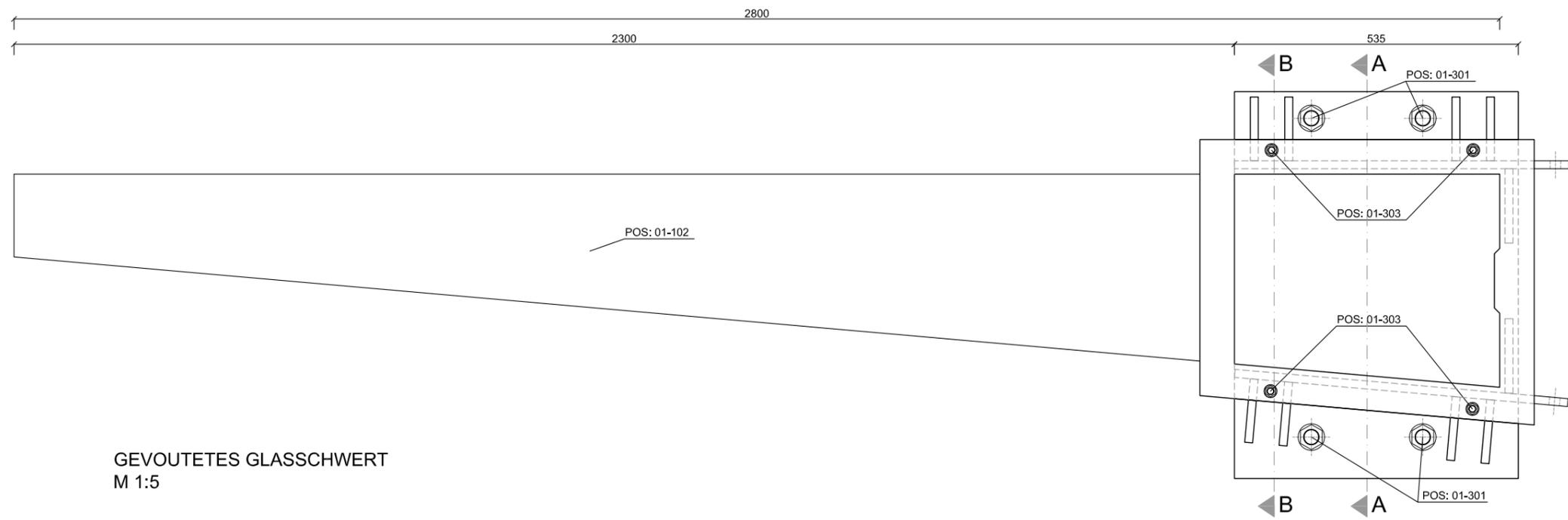
SCHNITT A-A
M 1:1



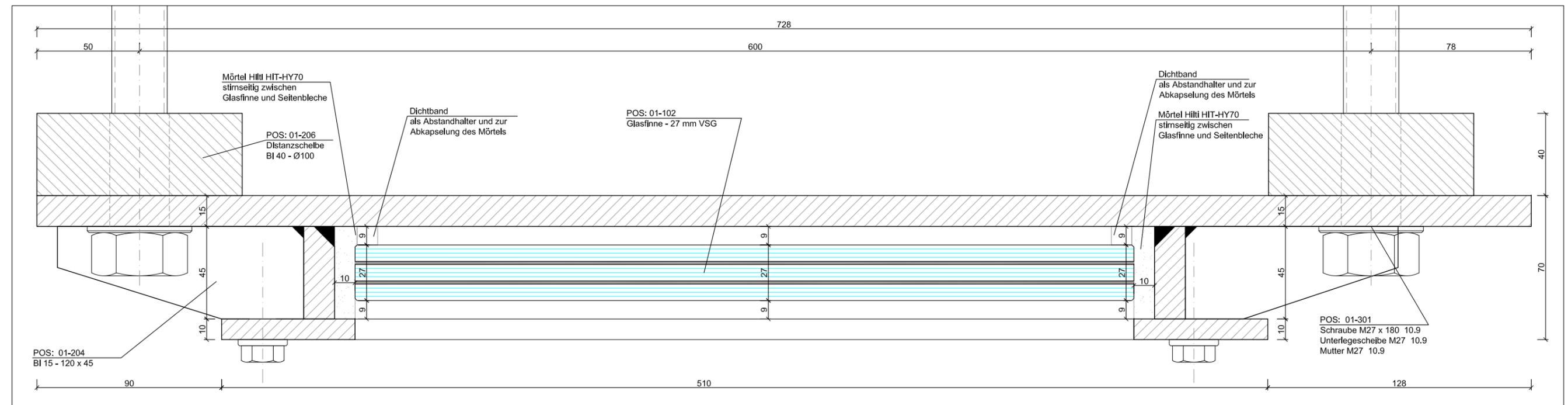
SCHNITT B-B
M 1:1

! Ausdruck in Format A3 - maßstabslos !

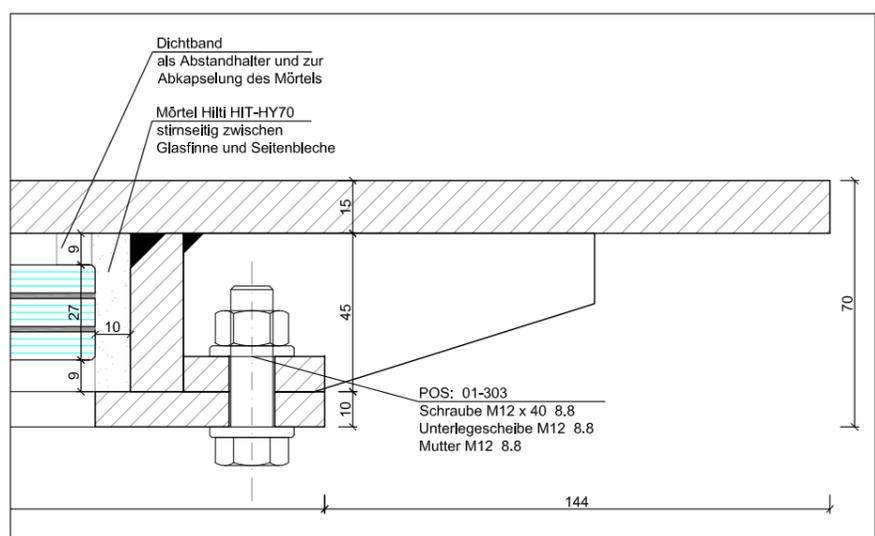
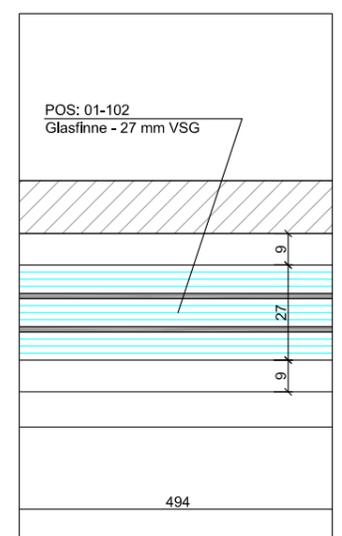
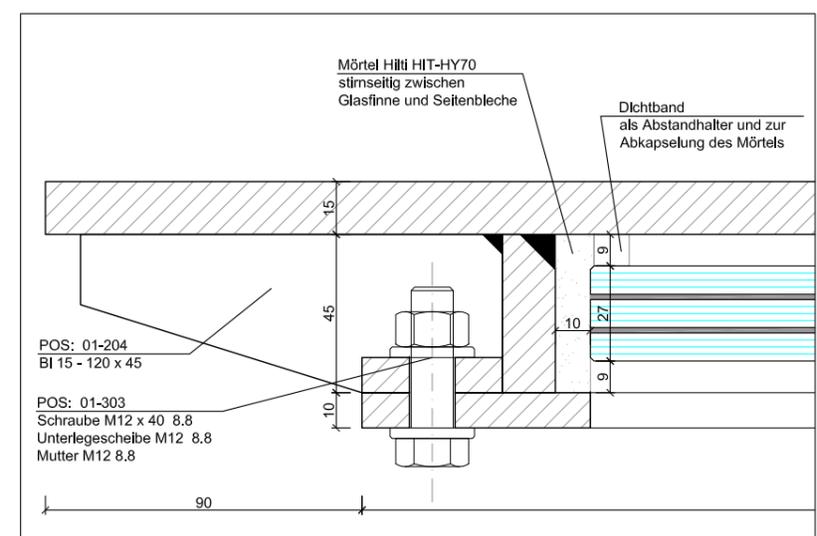
Institut für Hochbau Technische Universität Graz		
Projekt: DIPLOMARBEIT Untersuchung von Glasschwertern		
Planinhalt: Rechteckiges Glasschwert	Maßstab: M 1:5, M 1:1	
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt		
Verfasser: Vlad Silvestru	Datum: 24.01.2012	Form: A1
		Plan Nr.: 04



GEVOUTETES GLASSCHWERT
M 1:5



SCHNITT A-A
M 1:1



SCHNITT B-B
M 1:1

! Ausdruck in Format A3 - maßstabslos !

Institut für Hochbau Technische Universität Graz			
Projekt: DIPLOMARBEIT Untersuchung von Glasschwertern			
Planinhalt: Gevoutetes Glasschwert		Maßstab: M 1:5, M 1:1	
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt			
Verfasser: Vlad Silvestru		Datum: 24.01.2012	
		Format: A1	Plan Nr.: 05

POSITIONSLISTE

POS: 01-1xx	Glasteile	
--------------------	------------------	--

POS: 01-101	rechteckige Glasfinne	6 Stück
POS: 01-102	gevoutete Glasfinne	6 Stück

POS: 01-2xx	Stahlteile	
--------------------	-------------------	--

POS: 01-201	hinteres Deckblech - rechteckiges Glasschwert BI 15 - 670 x 500, S355JR	6 Stück
POS: 01-202	vorderes Deckblech - rechteckiges Glasschwert BI 10 - 470 x 630, S235JRC	6 Stück
POS: 01-203	Stirnbleche - rechtesckiges Glasschwert BI 15 - 45 x 630, S355JR	12 Stück
POS: 01-204	Steifen BI 15 - 120 x 45, S355JR	96 Stück
POS: 01-205	BI 10 - 40 x 50, S355JR	48 Stück
POS: 01-206	Distanzscheibe \varnothing 100 BI 40 - 100 x 100, S235J0	8 Stück
POS: 01-211	hinteres Deckblech - gevoutetes Glasschwert BI 15 - 728 x 535, S355JR	6 Stück
POS: 01-212	vorderes Deckblech - gevoutetes Glasschwert BI 10 - 537 x 630, S235JRC	6 Stück
POS: 01-213	Stirnblech seitlich - gevoutetes Glasschwert wie POS: 01-203 - BI 15 - 45 x 630 S355JR	12 Stück
POS: 01-214	Stirnblech oben - gevoutetes Glasschwert BI 15 - 140 x 45, S355JR	12 Stück

POS: 01-3xx	Bolzen und Schrauben	
--------------------	-----------------------------	--

	Schraube M27 x 180 10.9	8 Stück
POS: 01-301	Unterlegescheibe M27 10.9	16 Stück
	Mutter M27 10.9	8 Stück
POS: 01-302	Rd \varnothing 30 mm x 80, S235JRC an hinteres Deckblech angeschweißt	6 Stück
	Sk-Schraube M12 x 40 8.8	48 Stück
POS: 01-303	Scheibe M12 8.8	96 Stück
	Sk-Mutter M12 8.8	48 Stück
	zur Befestigung des vorderen Deckbleches	

Massenermittlung

Anzahl der Versuche mit rechteckigem Glasschwert und Mörtel:
 Anzahl der Versuche mit rechteckigem Glasschwert und Klotzungen:
 Anzahl der Versuche mit gevoutetem Glasschwert und Mörtel:
 Anzahl der Versuche mit gevoutetem Glasschwert und Klotzungen:
 Anzahl der Versuche insgesamt:

3
3
3
3
12

1. Massen Glasteile

Länge [mm]	Breite unten [mm]	Breite oben [mm]	Fläche [mm ²]	Dicke [mm]	Volumen [mm ³]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Stück
rechteckige Glasfinne (VSG aus 3 x 8 mm ESG mit PVB-Folien - je 1,52 mm) - POS: 01-101									
2800	340	340	952000	24	22848000	0,023	2500	57,12	6
gevoutete Glasfinne (VSG aus 3 x 8 mm ESG mit PVB-Folien - je 1,52 mm) - POS: 01-102									
2800	156	401	780262	24	18726288	0,019	2500	46,82	6

Gesamtmasse Glasteile: 623,61 kg

2. Massen Stahlteile - rechteckiger Stahlschuh

Länge [mm]	Breite [mm]	Fläche [mm ²]	Dicke [mm]	Volumen [mm ³]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Stück
hinteres Deckblech - POS: 01-201								
500	690	345000	15	5175000	0,0052	7850	40,62	6
vorderes Deckblech - POS: 01-202								
1940	65	126100	10	1261000	0,0013	7850	9,90	6
seitliches Stirnblech - POS: 01-203								
630	45	28350	15	425250	0,0004	7850	3,34	12
Steifen - POS: 01-204								
Fläche aus AutoCad		4400	15	66000	0,0001	7850	0,52	48
Bleche zur Befestigung des oberen Deckbleches - POS: 01-205								
50	40	2000	10	20000	0,0000	7850	0,16	24
Distanzscheiben zwischen Stahlschuh und Unterkonstruktion - POS: 01-206								
100	100	10000	40	400000	0,0004	7850	3,14	4

Zwischensumme: 384,39 kg

3. Massen Stahlteile - gevouteter Stahlschuh

Länge [mm]	Breite unten [mm]	Breite oben [mm]	Fläche [mm ²]	Dicke [mm]	Volumen [mm ³]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Stück
hinteres Deckblech - POS: 01-211									
535	728	389480	15	5842200	0,0058	7850	45,86	6	
vorderes Deckblech - POS: 01-212									
2022	65	131430	10	1314300	0,0013	7850	10,32	6	
seitliches Stirnblech - POS: 01-213									
525	45	23625	15	354375	0,0004	7850	2,78	12	
Stirnblech oben - POS: 01-214									
140	45	6300	15	94500	0,0001	7850	0,74	12	
Steifen - POS: 01-204									
Fläche aus AutoCad		4400	15	66000	0,0001	7850	0,52	48	
Bleche zur Befestigung des oberen Deckbleches - POS: 01-205									
50	40	2000	10	20000	0,0000	7850	0,16	24	
Distanzscheiben zwischen Stahlschuh und Unterkonstruktion - POS: 01-206									
100	100	10000	40	400000	0,0004	7850	3,14	4	

Zwischensumme: 420,55 kg

Gesamtmasse Stahlteile: 804,94 kg

7. Verbindungsmittel

Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Festigkeit		Stück
Schrauben M27 10.9 - Anschluss Stahlschuhe an Prüfstand (mit Mutter und Scheibe) - POS: 01-301				
80	27	10.9		8
Rundstahl ø30 S235JRC - Anschluss Glasfinne an Deckblech - POS: 01-302				
80	30	235		6
Schrauben M12 8.8 - Anschluss des vorderen Deckbleches (mit Mutter und Scheibe) - POS: 01-303				
40	12	8.8		48

8. Mörtel Hilti HIT-HY70

Länge [mm]	Querschnittsfläche aus AutoCad [mm ²]	Volumen [mm ³]	Volumen [m ³]	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Stück
Mörtelmenge - rechteckiges Glasschwert							
500	541	270250	0,0003	0,27	1500	0,41	6
Mörtelmenge - gevoutetes Glasschwert - gerade Seite							
640	541	346240	0,0003	0,35	1500	0,52	3
Mörtelmenge - gevoutetes Glasschwert - geneigte Seite							
642	541	347322	0,0003	0,35	1500	0,52	3
Mörtelmenge - rechteckiges Glasschwert - Bohrung							
27	2290	61830	0,0001	0,06	1500	0,09	6

Gesamtmenge Mörtel

4,07

l

6,11

kg

9. Sonstiges

Länge [mm]	Breite [mm]	Fläche [mm ²]	Dicke [mm]	Volumen [mm ³]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Stück
Klotzungen (POM) zwischen Glaskante und Stirnleche - rechteckiges Schwert								
80	45	3600	10	36000	0,0000	1420	0,05	12
Klotzungen (POM) zwischen Glaskante und Stirnleche - gevoutetes Schwert seitlich								
80	45	3600	10	36000	0,0000	1420	0,05	12
Klotzungen (POM) zwischen Glaskante und Stirnleche - gevoutetes Schwert seitlich								
50	45	2250	10	22500	0,0000	1420	0,03	6
Gesamtmasse POM							1,42	kg

Länge [mm]	Breite [mm]	Fläche [mm ²]	Dicke [mm]	Volumen [mm ³]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Stück
Silikon-band zum Abkapseln des Mörtels und als Abstandhalter - rechteckiges Glasschwert								
500	10	5000	10	50000	0,0001			12
Silikon-band zum Abkapseln des Mörtels und als Abstandhalter - gevoutetes Glasschwert links								
640	10	6400	10	64000	0,0001			6
Silikon-band zum Abkapseln des Mörtels und als Abstandhalter - gevoutetes Glasschwert rechts								
642	10	6420	10	64200	0,0001			6
13,69	m	Gesamtlänge						

Länge [mm]	Außendurchmesser [mm]	Innendurchmesser [mm]	Volumen [mm ³]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]	Stück
Aluminiumhülse							
27	36	31	7104	0,0000	2700	0,02	6
Gesamtmasse Al						0,12	kg

