



Technische Universität Graz
- Fakultät für Bauingenieurwesen -

Masterarbeit

„Mechanisch vorgespannte Glasträger“

verfasst von

Nenad Đorđević BSc

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

(Dipl.-Ing.)

der Fachrichtung

Konstruktiver Ingenieurbau

ausgeführt am

Institut für Hochbau

unter der Anleitung von

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

in Graz, März 2015

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, März 2015

Nenad Đorđević

Danksagung

Ich freue mich meine akademische Laufbahn mit dieser Masterarbeit zu beenden. Sie ist das Finale einer spannenden Phase meines wissenschaftlichen Lebens.

Für die Betreuung bei der Erstellung dieser Masterarbeit möchte ich mich an Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Englhardt bedanken, als auch an Herrn Dipl.-Ing. Vlad Silvestru, der als mitbetreuende Person mich kontinuierlich unterstützt hat. Darüber hinaus danke ich den allen Mitarbeitern des Institutes für Hochbau für ein harmonisches und produktives Arbeitsklima.

Für die konstante und bedingungslose Unterstützung meines Studiums, als auch meines Privatlebens in Graz, bedanke ich mich an meiner Eltern Biljana und Svetislav. Ein spezieller Dank geht auch an meinen Opa Dipl.-Ing. Sreten Stojanovic.

Zum Schluss möchte ich noch an allen Kollegen und Freunden für die während des Studiums unvergesslich verbrachte Zeit bedanken.

Захвалност

Овом приликом желим да се захвалим пре свега својим родитељима који су омогућили, и у сваком погледу подржали моје школовање на техничком универзитету у Грацу. Посебно се захваљујем свом брату, мојим баки и деки као и баби, који никад нису сумњали у успех мојих студија. Искористићу прилику да се присетим и свог деде, кога нажалост не памтим баш најбоље.

За менторство током израде мастер рада захваљујем се професору доктору Оливеру Енглхардту, као и асистенту дипломираном инжењеру Владу Силвестру за непрекидно давање смерница и пружање стручне помоћи. Даље бих желео да кажем једно „хвала“ осталим запосленима на институту за високоградњу, за пријатну и продуктивну радну атмосферу.

На крају бих се захвалио и поздравио моје колеге и пријатеље, због којих ће ми време проведено на студирању у Грацу заувек остати у лепим сећањима.

Abstract

This master thesis examines mechanical post-tensioning of glass beams and their load-bearing behavior. The paper can be subdivided into four major parts. The first part comprises of chapters: “Glass as Building Material,” “Load-bearing Behavior of Laminated Glass,” “Constructing with Glass,” “Glass Beams,” and “Post-tensioning Concept,” aiming to provide theoretical insight into the paper’s main focus, that will be further analysed in subsequent chapters.

The chapter “Mechanically Post-tensioned Glass Beams” gives overview of experimental testing of mechanical post-tensioning of glass beams already carried out on some universities, as well as conclusions drawn thereafter.

Finally, numerical testing took place with a piece of software called “Abaqus,” which is the last part of this paper. A four-layer glass beam mounted on a glass facade for wind load-bearing purposes was tested. Two parametrical studies were carried out thereto. The goal of the first study was to show the extent of benefits post-tensioning brings. The second study illuminates the relation between the increase of cross-sectional geometry and the elongation of post-tensioned beam.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit dem mechanischen Vorspannen eines Glasträgers und seinem Tragverhalten. Die Arbeit kann in vier Abschnitte unterteilt werden. Im ersten Teil befinden sich die Kapitel: „*Glas als Baustoff*“, „*Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas*“, „*Konstruieren mit Glas*“, „*Glasträger*“ und „*Prinzip der Vorspannung*“. Mit der Behandlung dieser Themen wurde versucht, eine theoretische Einleitung für den Schwerpunkt der Arbeit, der in den nächsten Kapiteln behandelt wird, zu geben.

Das Kapitel „*Mechanisch vorgespannte Glasträger*“ gibt einen Überblick über die an einigen Universitäten schon durchgeführten experimentellen Untersuchungen des mechanischen Vorspannens von Glasträgern (auch genannt „*Spannglasträger*“) und über die Schlussfolgerungen, die daraus gezogen wurden.

Schlussendlich wurde eine numerische Untersuchung mit der Software Abaqus durchgeführt, was den letzten Teil dieser Arbeit darstellt. Es wurde ein vierschichtiger Glasträger untersucht. Der Träger wird für die Abtragung einer auf eine Glasfassade kommende Windbelastung vorgesehen. Dazu wurden zwei Parameterstudien durchgeführt. Das Ziel der ersten Studie war, zu zeigen, in welchem Maß eine Vorspannung Vorteile bietet. Die zweite Studie erläutert die Beziehung zwischen der Querschnittserhöhung und der Verlängerung des vorgespannten Trägers.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Glas als Baustoff	2
2.1	Definition von Glas	2
2.2	Herstellung des Basisproduktes–Floatglas	2
2.3	Chemische Zusammensetzung von Floatglas.....	3
2.4	Physikalische Eigenschaften von Floatglas.....	4
2.5	Glasprodukte	5
2.6	Einscheibensicherheitsglas– ESG	6
2.7	Teilvorgespanntes Glas – TVG	7
2.8	Verbundglas und Verbundsicherheitsglas –VG u. VSG	8
3	Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas	10
3.1	Schubverbund bei Verbundsicherheitsglas	10
3.2	Resttragfähigkeit	13
4	Konstruieren mit Glas	15
4.1	Tragwerkskonzepte	15
4.2	Tragende Bauteile aus Glas	16
5	Glasträger	17
5.1	Unbewehrte Glasträger.....	18
5.2	Schlaff bewehrte Glasträger	19
5.3	Mechanisch vorgespannte Glasträger.....	22
5.4	Hybridträger	22
6	Prinzip der Vorspannung	24
6.1	Allgemeines.....	24
6.2	Arten der Vorspannung	25
6.3	Vorspannung ohne Verbund.....	26
6.4	Schnittgrößen aus Vorspannung.....	27
6.5	Spannkraftverluste.....	29

7 Mechanisch vorgespannte Glasträger	34
Experimentelle Untersuchungen	35
7.1 T-Träger.....	35
7.2 Hohlprofil-Träger	37
7.3 Träger mit Spanngliedumlenkungen	39
7.3.1 Aufbau.....	39
7.3.2 Lastfall: Vorspannung	41
7.3.3 Lastfall: Biegebelastung.....	45
7.4 Vorspannkrafteinleitung - verschiedene Variante	47
7.4.1 Trägersausführung	47
7.4.2 Krafteinleitung	47
7.4.3 Biegeversuch	54
7.4.4 Schlussfolgerungen	55
8 Beispiel – Glasschwert	56
8.1 Konstruktive Ausbildung	56
8.2 Numerische Untersuchung	59
8.2.1 Finite-Elemente Modell	59
8.2.2 Parameterstudie 1	60
8.2.3 Parameterstudie 2	68
8.2.4 Schlussfolgerungen	71
9 Zusammenfassung und Ausblick	72
9.1 Zusammenfassung	72
9.2 Ausblick.....	72
Literatur	74
Anhang A	77

1 Einleitung

In der heutigen Zeit nimmt die Verwendung von Glasbauteilen zu. Mit ihrer Transparenz verleihen Gebäuden ein ästhetisches und modernes Erscheinungsbild. Die vermehrte Nutzung hat auch eine Zunahme der Forschung im Bereich Glas zur Folge.

Diese Masterarbeit befasst sich mit dem mechanischen Vorspannen eines Glasträgers und seinem Tragverhalten. Die Arbeit kann in vier Abschnitte unterteilt werden. Im ersten Teil befinden sich die Kapitel: „*Glas als Baustoff*“, „*Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas*“, „*Konstruieren mit Glas*“, „*Glasträger*“ und „*Prinzip der Vorspannung*“. Mit der Behandlung dieser Themen wurde versucht, eine theoretische Einleitung für den Schwerpunkt der Arbeit, der in den nächsten Kapiteln behandelt wird, zu geben.

Das Kapitel „*Mechanisch vorgespannte Glasträger*“ gibt einen Überblick über die an einigen Universitäten schon durchgeführten experimentellen Untersuchungen des mechanischen Vorspannens von Glasträgern (auch genannt „*Spannglasträger*“) und über die Schlussfolgerungen, die daraus gezogen wurden.

Schlussendlich wurde eine numerische Untersuchung mit der Software Abaqus durchgeführt, was den letzten Teil dieser Arbeit darstellt. Es wurde ein vierschichtiger Glasträger untersucht. Der Träger wird für die Abtragung einer auf eine Glasfassade kommende Windbelastung vorgesehen. Dazu wurden zwei Parameterstudien durchgeführt. Das Ziel der ersten Studie war, zu zeigen, in welchem Maß eine Vorspannung Vorteile bietet. Die zweite Studie erläutert die Beziehung zwischen der Querschnittserhöhung und der Verlängerung des vorgespannten Trägers.

2 Glas als Baustoff

2.1 Definition von Glas

Glas ist ein amorpher Festkörper (griechisch: amorphos - ohne Gestalt). Der Unterschied zwischen Glas und anderen amorphen Feststoffen liegt darin, dass Glas beim Erhitzen im Bereich der Glasübergangstemperatur in einen flüssigen Zustand übergeht, während nicht glasartige amorphe Substanzen dabei kristallisieren. Eine weitere, genauere Definition, die in der Literatur zu finden ist, klassifiziert Glas als eine eingefrorene, unterkühlte Flüssigkeit, die ohne Kristallisation erstarrt ist. [1] Die von der American Society for Testing Material (ASTM) erarbeitete Definition lautet: „Glas ist ein anorganisches Schmelzprodukt, das zu einem starren Zustand ohne Kristallisation abgekühlt wurde.“ (*„Glass is an inorganic product of fusion which has been cooled to a rigid condition without crystallization“*) [2] Darüber hinaus wird für den Werkstoff Glas, der meist eine silikatische Zusammensetzung und ein sprödes Materialverhalten aufweist, folgende Definition gegeben: „Glas ist ein in seiner überwiegenden Masse nichtkristalliner spröder, anorganischer, vorzugsweise oxidischer Werkstoff.“ [3] Eine allgemeine Definition für Glas ist in DIN 1259-1 angeführt. Demnach ist Glas ein „anorganisches nichtmetallisches Material, das durch völliges Aufschmelzen einer Mischung von Rohmaterialien bei hohen Temperaturen erhalten wird, wobei eine homogene Flüssigkeit entsteht, die dann bis zum festen Zustand abgekühlt wird, üblicherweise ohne Kristallisation.“ [4]

2.2 Herstellung des Basisproduktes–Floatglas (*engl. Annealed glass*)

Im konstruktiven Glasbau kommt in erster Linie Flachglas zur Anwendung. Bei allen Herstellungsverfahren ist das Schmelzen die zentrale Phase der Glaserzeugung. Man unterscheidet zwei Prozesse der Herstellung: Floatprozess und Gussglasprozess. [1] Da das Floatglas das wichtigste Glasbasisprodukt im Bauwesen ist, wird in dieser Arbeit nur das Float-Verfahren beschrieben.

Das Float-Verfahren wurde von der englischen Firma Pilkington Ltd. im Jahr 1959 entwickelt. Im Floatprozess wird das Glas bei etwa 1050°C von der Schmelzwanne in die sogenannte Floatkammer (Zinnbad) überführt. In der Floatkammer befindet sich flüssiges Zinn. Da das spezifische Gewicht von Glas nur etwa ein Drittel des Gewichts von Zinn beträgt, schwimmt („floatet“) das Glas auf dem Zinn. In der Floatkammer kühlt das Glas bis auf etwa 600 °C (über eine Länge von ca. 70 m) ab. Am Ende wird das Glas kontinuierlich von der Zinnoberfläche abgehoben und über Transportrollen durch einen Kühlkanal geführt und kontrolliert auf etwa 100°C abgekühlt, damit sich keine Eigenspannungen innerhalb des Glases bilden. Nach dem Abkühlen kann die Weiterverarbeitung beginnen. Die Konsistenz von Glas geht von einem flüssigen über einen teigigen in einen festen Zustand über. Mögliche Glasdicken werden bis 25 mm

hergestellt, für die Baupraxis sind aber in der Regel Stärken zwischen 2 und 19 mm verfügbar. [1] [5]

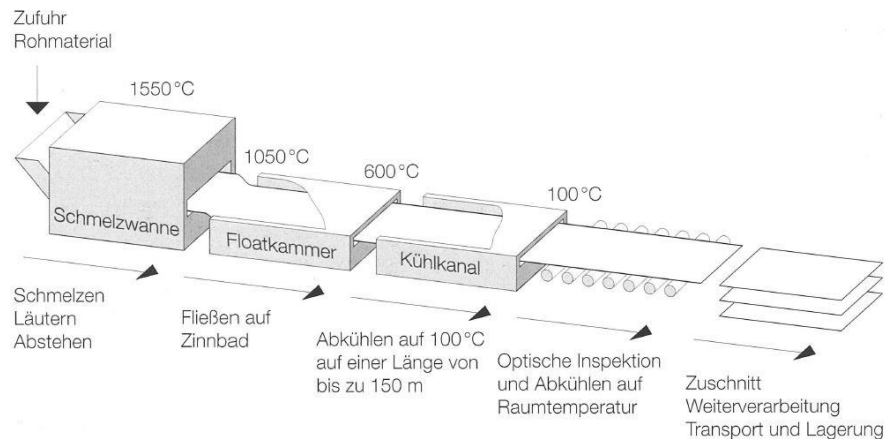


Abb. 2-1 Prinzipische Skizze des Floatprozesses [1]

Floatglas ist heute das wichtigste Glasbasisprodukt für Fenster, Fassaden, Innenausbau und Möbel. Es kann gebogen und thermisch oder chemisch vorgespannt werden und wird zu Verbundglas und Isolierglas weiterverarbeitet. [5]

2.3 Chemische Zusammensetzung von Floatglas

Chemisch gesehen ist Glas ein Schmelzprodukt mit amorpher Struktur. Die meisten Gläser bestehen hauptsächlich aus Siliciumdioxid, wie z. B. Trinkgläser oder Fenstergläser. Im konstruktiven Ingenieurbau werden vorwiegend zwei Arten von Basis-Gläsern eingesetzt: Kalk-Natronglas und Borosilikatglas. Für Flachglas wird im Bauwesen vorwiegend Kalk-Natronglas verwendet. [5] [6]

Chemische Bestandteile	Kalk-Natronglas	
Siliziumoxid (Sand)	SiO_2	69...74 %
Calciumoxid (Kalk)	CaO	5...12 %
Natriumoxid (Soda)	Na_2O	12...16 %
Aluminiumoxid	Al_2O_3	0...3 %
Magnesiumoxid	MgO	0...6 %
Sonstige	Kleinere Mengen	

Tab. 2-1 Typische Zusammensetzung von Kalk-Natronglas [5]

2.4 Physikalische Eigenschaften von Floatglas

Die Eigenschaften von Glas kann man in verschiedene Kategorien einteilen. Neben den mechanischen Kennwerten wie Dichte, Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit usw. sind die optischen und thermischen Eigenschaften von Interesse. Zu den wesentlichen optischen Kennwerten zählen die Lichttransmission, Reflexion, Absorption und die Brechung. Wesentliche thermische Eigenschaften des Glases sind die Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und die Emisivität. [4] Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf dem Tragverhalten eines Glasbauteils liegt, sind in der Tabelle 2.2 nur die mechanischen Eigenschaften angegeben.

	Einheit	Kalk-Natronglas
Dichte ρ	kg/m ³	2.500
Elastizitätsmodul E	N/mm ²	70.000
Poissonzahl ν	-	0,23
Biegezugfestigkeit f_k	N/mm ²	45
Druckfestigkeit	N/mm ²	700 - 900
Max. Rissausbreitungsgeschw.	m/s	1520

Tab. 2-2 Physikalische Eigenschaften von Kalk-Natronglas [4]

Aus der Tabelle II-2 wird deutlich, dass Glas die gleiche Dichte wie Stahlbeton und ein doppelt so hohes Elastizitätsmodul wie standardfester Beton (z. B. C30/35) aufweist. Die Druckfestigkeit von Glas ist größer als jene von standardfestem Stahl (z. B. S235 oder S355), aber wegen seiner sehr geringen Biegezugfestigkeit und Sprödigkeit kommt Glas nicht oft als tragendes Material zum Einsatz. Deswegen wurden, neben der thermischen bzw. chemischen Vorspannung von Glasprodukten, in den letzten Jahren das Bewehren und das mechanische Vorspannen von Glasbauteilen erforscht.

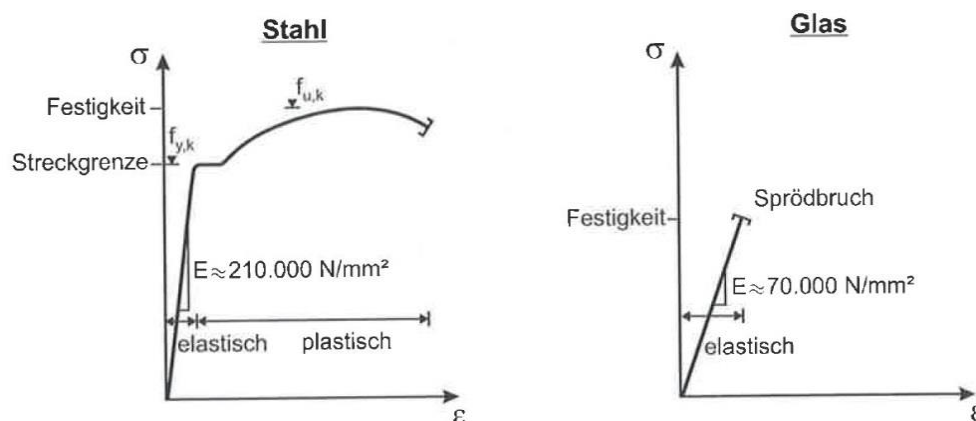


Abb. 2-2 Spannungs-Dehnungsverhalten von Stahl und Glas im Vergleich [5]

2.5 Glasprodukte

Da das Floatglas nicht alle notwendigen Anforderungen (Resttragsicherheit, Sonnenschutz, Brandschutz, Schallschutz, Wärmedämmung...) anbieten kann, kommen im Bauwesen sehr häufig veredelte Glasprodukte. Es gibt verschiedene Veredelungsprozesse (Abb. 2.3). Zur Erhöhung der Tragfähigkeit als auch zur Erreichung des erforderlichen Bruchbildes, ist das Vorspannen (thermisch bzw. chemisch) im konstruktiven Glasbau der wichtigste Veredelungsprozess.

In der DIN 1259 ist vorgespanntes Glas auf folgende Weise definiert: „*Vorgespanntes Glas sind Glaserzeugnisse mit künstlich erzeugten Druckspannungen an den Glasoberflächen und einer Zugspannungszone im Glaskern. Die Vorspannung wird durch Abschrecken von Temperaturen des zäh-elastischen Bereiches (thermische Vorspannung) oder durch Ionenaustausch (chemische Vorspannung) erzielt. Durch die Vorspannung werden die mechanische Festigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit um ein Mehrfaches erhöht.*“ [7]

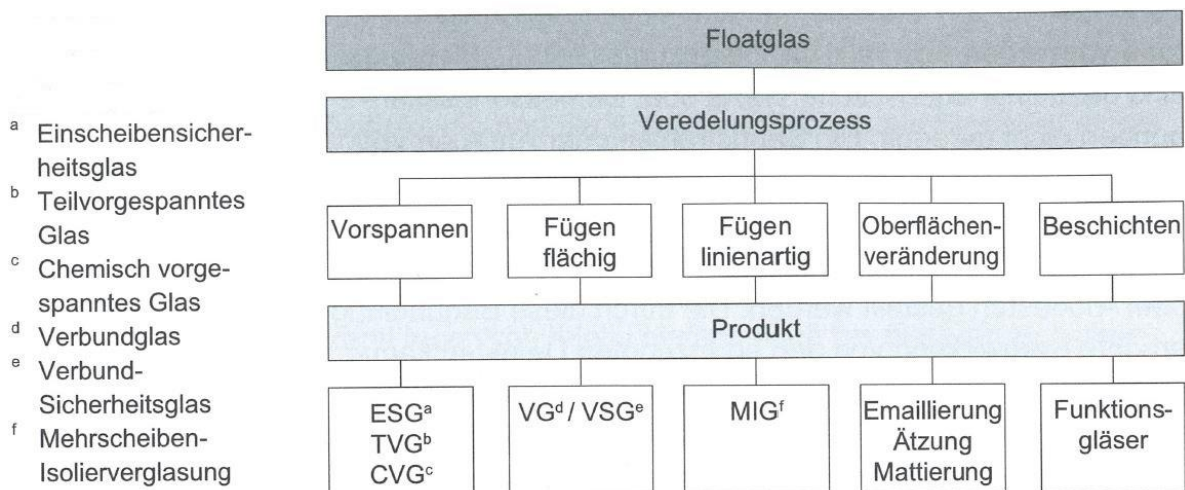


Abb. 2-3 Veredelungsprozesse und Produkte [4]

Für einen tragenden Glasbauteil kommen, neben dem Floatglas, thermisch vorgespannte Glasprodukte zum Einsatz. Da in dieser Arbeit der Fokus auf Glasträgern liegt, werden in der Folge nur thermisch vorgespannte Glaserzeugnisse (ESG, TVG) näher beschrieben.

2.6 Einscheibensicherheitsglas– ESG (engl. Fully tempered glass)

Bei der thermischen Vorspannung werden Glasscheiben zuerst erhitzt (ca. 620 – 675°C [8]) und anschließend mit Luftdüsen beidseitig abgeblasen und damit abgekühlt. Dadurch kommt es zur früheren Erstarrung der Außenseiten als des Glasinneren und damit bildet sich ein parabelförmiges Eigenspannungsprofil, bei welchem die Oberflächen unter Druckspannung und der Querschnittskern unter Zugspannung stehen. Über die Querschnittshöhe sind die Spannungen im Gleichgewicht. [5]

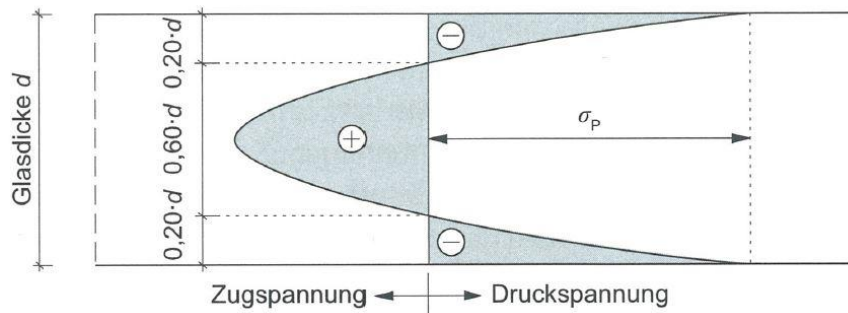


Abb. 2-4 Eigenspannungsverlauf bei thermisch vorgespannten Gläsern [4]

ESG (auch „voll vorgespanntes Glas“ genannt) besitzt an den Oberflächen eine Druckspannung in der Größenordnung von 100 bis 150 N/mm². Wegen des Eigenspannungszustands zerspringt das Glas bei Bruch in kleine stumpfkantige Splitter, womit die Verletzungsgefahr minimiert ist. Je höher der Vorspanngrad ist, desto feiner wird das Bruchbild. ESG aus Floatglas hat nach DIN 12150-1 eine charakteristische Biegezugfestigkeit von 120 N/mm².



Abb. 2-5 Bruchbild von ESG [1]

2.6.1 ESG-H - Heißgelagertes Einscheibensicherheitsglas

Eine spezielle Form von ESG ist das sogenannte heißgelagerte Einscheibensicherheitsglas. Um ESG-H-Scheiben zu bekommen, muss der Heat-Soak-Test nach der Herstellung der Glasscheiben durchgeführt werden. Diese Form von ESG wurde entwickelt um einen Spontanbruch von ESG-Scheiben zu vermeiden. Zum Spontanbruch von ESG kann es wegen der Nickelsulfid-Einschlüsse (NiS) kommen. Das Bruchbild bei einem Spontanbruch entspricht der Schmetterlingsform.

Weitere Beschreibungen von ESG-H und von dem Heat-Soak-Test sind in [5], [1] als auch in [7] zu finden.

2.7 Teilvorgespanntes Glas – TVG (*engl. Heat strengthened glass*)

TVG wird im gleichen Prozess wie ESG hergestellt, dabei aber langsamer abgekühlt. Infolge dessen kommt es zu einer geringeren Oberflächendruckspannung, die zwischen den Werten von 40 und 75 N/mm² liegt. Der charakteristische Wert der Biegezugfestigkeit befindet sich zwischen jenen von Floatglas und ESG und beträgt 70 N/mm². Der große Unterschied im Vergleich zu ESG liegt im Bruchbild. TVG bricht in große, aber nicht so spitze Splitter wie Floatglas. Trotzdem ist keine Reduktion der Verletzungsgefahr möglich und deswegen ist der Einsatz von monolithischen Einzelscheiben in sicherheitsrelevanten Bereichen nicht zulässig. Da die grobe Bruchstruktur nach der Zerstörung eine verbleibende Tragfähigkeit besitzt, hat das TVG einen großen Vorteil gegenüber ESG. TVG-Scheiben produziert man nur bis zu einer Dicke von 12 mm, weil ein Abkühlungsprozess bei dickeren Scheiben schwierig zu kontrollieren ist. [1] [7]

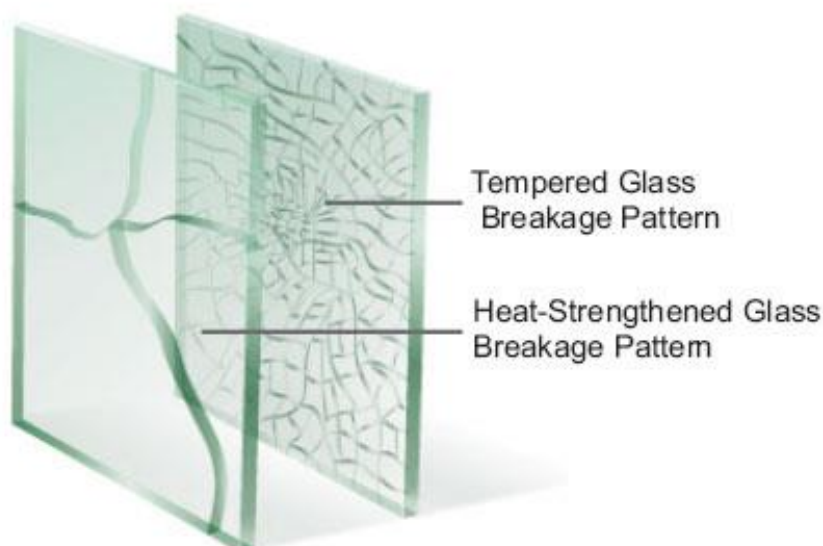


Abb. 2-6 Vergleich der Bruchbilder von TVG (*Heat-Strengthened Glass*) und ESG (*Fully Tempered Glass*) {2}

Bearbeitungen der Glasprodukte ESG bzw. TVG wie Bohren oder Schneiden müssen vor der thermischen Vorspannung des Glases durchgeführt werden, also schon am Floatglas, da sie eine Störung des Eigenspannungszustandes verursachen und damit zum Bruch des Glases führen würden. [6]

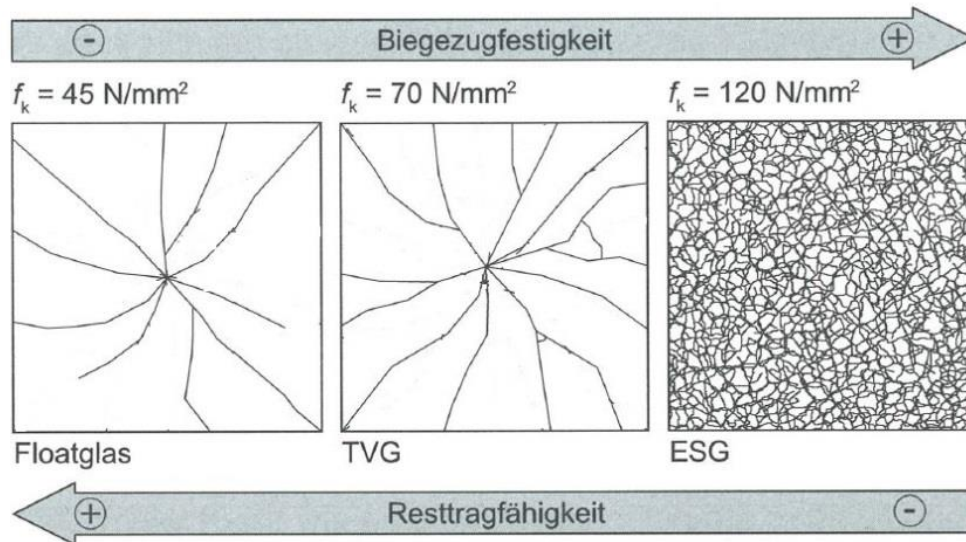


Abb. 2-7 Gegensatz Festigkeitszunahme zu Resttragfähigkeitsabnahme [4]

2.8 Verbundglas und Verbundsicherheitsglas –VG u. VSG

(engl. laminated glass and laminated safety glass)

Verbundgläser bestehen aus mehreren Glasscheiben, (Float- oder thermisch vorgespannte Glasscheiben) die mit Hilfe von Zwischenschichten aus Kunststoff miteinander verbunden sind. Verbundgläser sind notwendig, um spezielle Anforderungen zu gewährleisten, die Einzelscheiben nicht erfüllen können, wie z. B. Widerstand gegen Stoß oder Feuer bzw. Schalldämmung. [5]

Im konstruktiven Glasbau kommen oft sogenannte Verbundsicherheitsgläser zum Einsatz. Sie stellen eine Untergruppe von Verbundgläsern dar, und im Fall eines Bruches erfüllen sie folgende Anforderungen: [5]

- Begrenzung der Öffnungsgröße
- Verringerung der Verletzungsgefahr
- Gewährleistung einer Resttragfähigkeit
- Zurückhalten von Glasbruchstücken

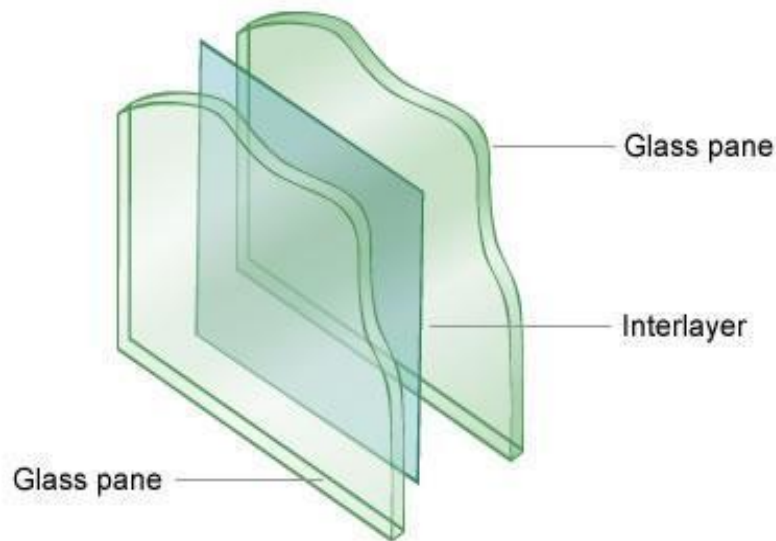


Abb. 2-8 Schematische Darstellung {3}

Das Verbundsicherheitsglas besteht aus mindestens zwei Glasscheiben die meistens mit einer Polyvinylbutyral-Folie (PVB-Folie) mit einer Dicke von 0.38 mm verbunden sind. Die Folie kann zwei-, vier- oder sechslagig eingesetzt werden, in Abhängigkeit von den Anforderungen. Neben PVB-Folien werden im Bauwesen auch Ionomer-Folien - SentryGlas[®] (SG) verwendet. SG besitzt eine höhere Eigensteifigkeit, eine größere Transparenz sowie ein höheres Schubmodul als PVB. [4] [7] In der Tabelle 2.3 sind die wichtigsten Eigenschaften von PVB und SG angeführt.

	Polyvinylbutyral	SentryGlas [®]
Dichte ρ [kg/m ³]	1060-1090	950
Schubmodul G [MPa]	0 bis 4	7
Poissonzahl ν [-]	0,5	0,5
Zugfestigkeit [MPa]	>20	>30
Bruchdehnung ϵ [%]	>250	>300
Thermische Ausdehnung α_T [K ⁻¹]	$80 \cdot 10^{-6}$	$10-15 \cdot 10^{-3}$

Tab. 2-3 Eigenschaften von PVB und SG [4] [7] [9]

3 Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas

3.1 Schubverbund bei Verbundsicherheitsglas

Die Zwischenschichtfolie spielt eine große Rolle im Tragverhalten des Verbundglases. Sie hat Einfluss auf die Spannungsverteilung über den Querschnitt, ermöglicht den Zusammenhalt von Glasbruchstücken nach dem Bruch und erhöht somit die Resttragfähigkeit des Glasbauteils.

Die Verbundfolien PVB als auch SG weisen eine Temperaturabhängigkeit auf. Die PVB-Folie zeigt auch Kriechverformungen bei längerer und mittlerer Belastungsdauer, wie z. B. bei Eigengewicht bzw. Schnee. [6] Je nach Temperaturbereich und Belastungsdauer unterscheidet man drei verschiedene Möglichkeiten des Tragverhaltens (Abb. 2.9).

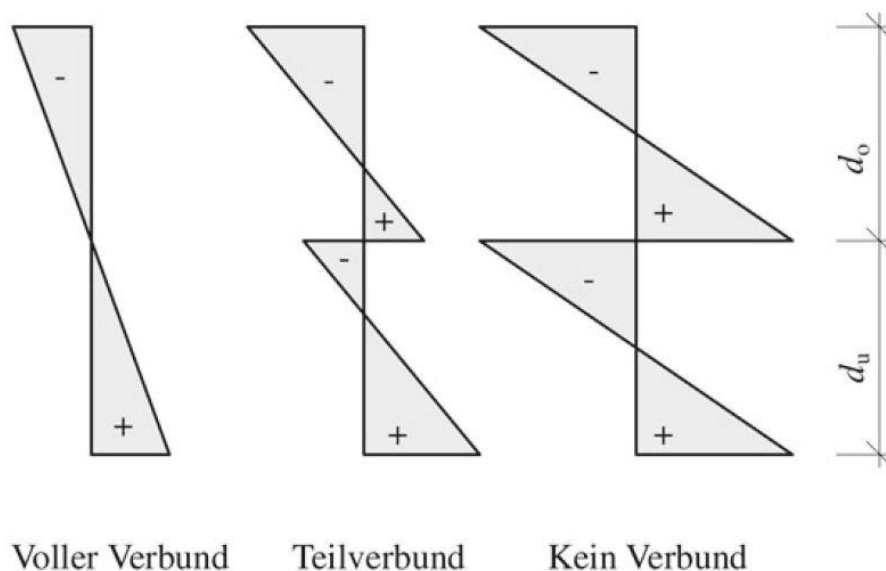


Abb. 3-1 Spannungsverteilung bei VSG in Abhängigkeit der Verbundwirkung [10]

Bei Temperaturen unter 50°C und einer Kurzzeitbelastung herrscht eine fast vollständige Verbundwirkung. Sehr hoher Schubverbund besteht auch bei Langzeitlasten (z. B. Schneelast) und tiefen Temperaturen (Gefrierpunkt). Ein voller Verbund wirkt auch bei Stoßbelastungen. Bei Raumtemperatur kommt es zu einer teilweisen Verbundwirkung (elastischer Verbund). Bei Temperaturen über 50°C tritt kein Schubverbund mehr auf, weil die Steifigkeit der Zwischenschichtfolie mit der Erhöhung der Temperatur stark abnimmt. [11] [6]

In Fällen des vollen Schubverbundes verhält sich die Verbundscheibe wie eine monolithische Platte, bei der die Dicke der Summe der Einzelscheibendicken entspricht.

Deswegen kann die Ermittlung von Biegespannung und Verformung unter Berücksichtigung der gesamten Querschnittsdicke durchgeführt werden.

Falls kein Schubverbund eintritt, verformen sich die beiden Scheiben gleich und die Belastung verteilt sich auf die Einzelscheiben im Verhältnis der einzelnen Biegesteifigkeiten zur gesamten Biegesteifigkeit. Der Anteil der Belastung, die auf die obere Scheibe wirkt, kann mit folgender Formel ermittelt werden:

$$\delta_o = \frac{d_o^3}{d_o^3 + d_u^3}$$

Der Anteil der Belastung für die untere Scheibe beträgt:

$$\delta_u = \frac{d_u^3}{d_o^3 + d_u^3}$$

Nach der Verteilung der Belastung auf die Scheiben ermittelt man die Biegespannungen unter Verwendung des Widerstandsmomentes der Einzelscheibe. [11]

Der Einsatz eines elastischen Verbundes bzw. einer Verbundwirkung der Zwischenfolie, ermöglicht eine realistische Interpretation der laminierten Glasquerschnitte. Für solche Berechnungen muss zuerst das Schubmodul der Folie bekannt sein, welches über die Folienbreite und die Foliendicke als Schlupfsteifigkeit K_s bestimmt werden kann: [5]

$$K_s = \frac{G_F}{t} \cdot B$$

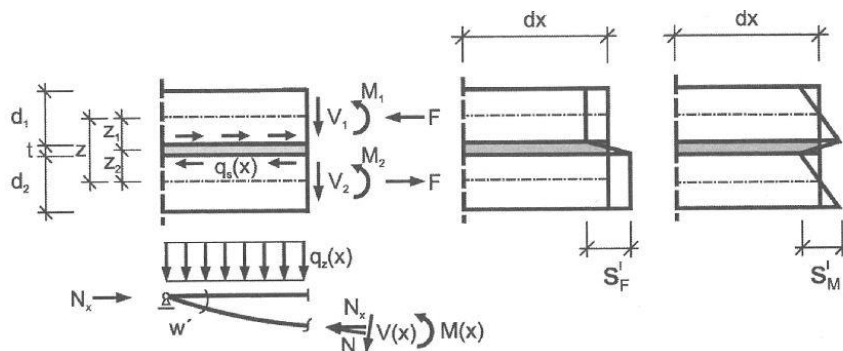
- K_s - Schlupfsteifigkeit
- G_F - Schubmodul der Folie
- B - Breite der Folie
- t - Dicke der Folie

Die Beziehung zwischen dem Schlupf $s_{(x)}$, der Schlupfsteifigkeit K_s und dem entlang der Fuge angeregten Kraftfluss $q_{s(x)}$ ist gegeben durch: [5]

$$q_{s(x)} = K_s \cdot s_{(x)}$$

- $q_{s(x)}$ - Kraftfluss
- $s_{(x)}$ - Schlupf

2-fach-Laminat



3-fach-Laminat

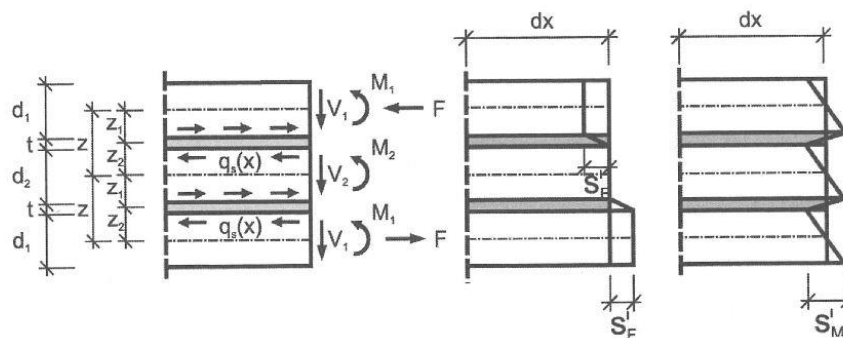


Abb. 3-2 Schnittgrößen und Schlupfdifferentiale aus Dehnung und Krümmung [5]

Die allgemeine inhomogene Schlupfdifferentialgleichung 4. Ordnung lautet:

$$s''''(x) - \frac{1}{E} \left[\frac{N + K_s \cdot z^2}{I_1 + I_2} + \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) K_s \right] \cdot s''(x) + \frac{N \cdot K_s}{E^2 (I_1 + I_2)} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \cdot s(x) = \frac{z}{E(I_1 + I_2)} q'_{z(x)}$$

wobei

- N - Normalkraft innerhalb des VSG
- z - Abstand zwischen den Schwerachsen der Einzelscheiben
- A_{1,2} - Querschnittsfläche der Einzelscheiben
- I_{1,2} - Trägheitsmoment der Einzelscheiben
- E - Elastizitätsmodul von Glas ist.

Die Herleitung der Schlupfdifferentialgleichung findet man in [5].

In Tabelle III-1 sind die verschiedenen Schubmodule von SG in Abhängigkeit von der Temperatur nach abZ (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung) angeführt. Tabelle III-2 zeigt Forschungsergebnisse für den Schubmodul der PVB-Folie abhängig von der Belastungsdauer **t** und der Temperatur **T**.

Temperatur [°C]	30	35	40	45	50	55	60
Schubmodul [N/mm ²]	65	30	9	7	4	3	2

Tab. 3-1 Schubmodul für SG in Abhängigkeit der Temperatur [4]

Lastdauer	t < 5 sec	t < 10 min	t < 1 d	t < 7 d	t < 90 d	Ständig
T < 3 °C	1,86	1,44	1,01	0,84	0,62	-
T < 25 °C	0,54	0,37	0,19	0,12	0,03	-
T < 50 °C	0,32	0,09	-	-	-	-
T < 70 °C	0,15	-	-	-	-	-

Tab. 3-2 Versuchsergebnisse für den Schubmodul G [N/mm²] der PVB-Folie [6]

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass die Berücksichtigung der Verbundwirkung der Zwischenfolie in den verschiedenen nationalen Normen und Richtlinien unterschiedlich definiert wird. Beispielsweise ist laut ÖNORM B 3716-1 ein Schubmodul von $G_{PVB}=0,4$ N/mm² zu verwenden, wenn eine PVB-Folie mit in der Norm definierten mechanischen Eigenschaften benutzt wird. Die gleiche Norm erlaubt sogar die volle Verbundwirkung für den Fall einer Stoßbelastung. Dagegen darf ein günstig wirkender Schubverbund zwischen den Einzelscheiben nach DIN 18008-1 nicht eingesetzt werden. In beiden Normen ist bei ungünstig wirkendem Schubverbund (z. B. bei Zwangsbeanspruchungen) eine Berechnung wie für eine monolithische Platte (voller Verbund) vorgesehen.

3.2 Resttragfähigkeit

Unter dem Begriff Resttragfähigkeit ist der Zeitraum zwischen dem Bruch und dem vollständigen Versagen des VSG unter Eigengewicht und einer Zusatzlast gemeint. Der Wert der Zusatzlast (meistens halbe Nutzlast) und die Mindeststandzeit sind in Abhängigkeit des Anwendungsbereiches festgelegt (begehbare Verglasung bzw. Überkopfbelastung). [6] Die Bindung der Splitter nach dem Glasbruch ermöglicht die Zwischenschichtfolie (PVB bzw. SG). Neben der Glas- und Lagerungsart sind die Art und Dicke der Folien wichtige Einflussfaktoren für die Resttragfähigkeit von VSG. Da SG eine höhere Steifigkeit als PVB besitzt, kommt es bei der Verwendung von SG zu deutlich geringeren Verformungen nach dem Bruch. Eine Verbesserung bei VSG mit PVB kann durch dickere PVB-Folien erzielt werden. [7]

Das Bruchbild spielt auch eine wesentliche Rolle bei der Resttragfähigkeit des VSG. Da die kleinen Krümel (Splitter), die nach dem Bruch von ESG entstehen, nicht mittragen können, hat VSG aus ESG eine geringere Resttragfähigkeit als VSG aus TVG bzw. Floatglas. Nach dem Bruch hängt VSG aus ESG membranartig durch, während die Splitter im Fall von VSG aus TVG bzw. Floatglas sich gegenseitig stützen (Abb. 3-3; Abb. II-4; Abb. II-5). [7] Schlussendlich gewährleistet eine vierseitige linienförmige Lagerung eine höhere Resttragfähigkeit als eine zweiseitige Lagerung. Bei den punktförmigen Lagerungen verhalten sich Tellerhalter günstiger als versenkte Punkthalter. [7]



Abb. 3-3 VSG aus Floatglas bei zweiseitiger Lagerung [6]

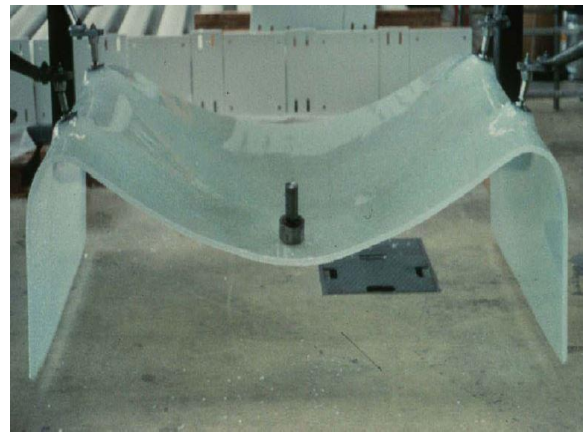


Abb. 3-4 VSG aus ESG mit Punkthalter [6]



Abb. 3-5 VSG aus TVG nach Kugelabwurf [6]

4 Konstruieren mit Glas

Die Verwendung von Glas als Baumaterial erfordert eine möglichst realistische Erfassung aller Einflussfaktoren. Das Spröbruchverhalten unterscheidet Glas grundlegend von anderen im Bauwesen verwendeten Materialien (Stahl, bewehrter Beton und Holz). Nach der Überschreitung der Tragfähigkeit bei monolithischen Glasscheiben kommt es plötzlich zum vollständigen Einsturz des ganzen Bauteils. Darüber hinaus ist Glas sehr empfindlich auf lokale Spannungsspitzen, die meistens durch eine konzentrierte Lasteinleitung entstehen. Daher sollten diese durch geeignete konstruktive Maßnahmen verringert werden. Weiters muss der Kontakt zwischen Glas und anderen harten Materialien (z. B. Stahl, anderes Glas...) vermieden werden. Dies kann mit Hilfe von weichen und elastischen Zwischenschichten erreicht werden. Glas weist darüber hinaus eine sehr geringe Schlagfestigkeit auf. [1] [11]

4.1 Tragwerkskonzepte

4.1.1 Redundanz

Unter dem Begriff Redundanz versteht man, dass beim Einsturz eines Systemtragelementes die Belastung von einem anderen Bauteil der Tragkonstruktion übernommen wird. Das bedeutet, dass eine Verteilung der Lasten auf mehrere Elemente bzw. Richtungen schon bei der Tragwerksplanung vorgesehen werden muss. [7] Dies hat ein mehrfach statisch unbestimmtes System zur Folge.

4.1.2 Hierarchisches System

Ein sogenanntes hierarchisches Tragsystem besteht aus drei Arten von Elementen:

- Primärelemente
- Sekundärelemente
- Tertiärelemente

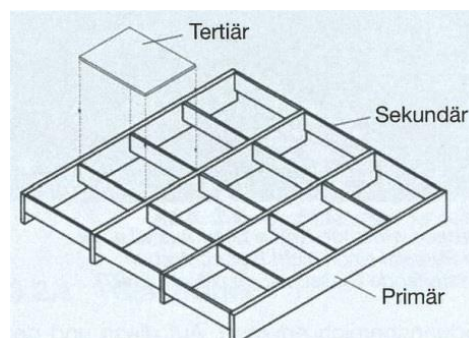


Abb. 4-1 Darstellung eines hierarchischen Systems [7]

Tertiärelemente haben die Aufgabe, nur lokale Lasten auf die sekundären bzw. primären Tragelemente zu übertragen. Ihr Versagen zieht daher keine signifikanten Auswirkungen nach sich. Sekundäre Tragelemente geben die Lasten von Tertiärelementen auf die Primärelemente weiter. Bei ihrem Versagen sind die Konsequenzen größer als beim Versagen der Tertiärtragelemente, aber die Stabilität des ganzen Gebäudes wird dadurch trotzdem nicht gefährdet. Schlussendlich haben die Primärtragelemente die wichtigste Bedeutung in einem Tragsystem. Falls sie versagen, kommt es zum Einsturz des gesamten Tragsystems (Abb.4.1). [7] [1]

4.2 Tragende Bauteile aus Glas

Eine weitere Klassifizierung von Glastragelementen erfolgt in Abhängigkeit der Beanspruchungsart. Hier unterscheidet man eine in der Glasscheibenebene und eine senkrecht zur Scheibenebene wirkende Beanspruchung. In der Regel werden die Glastragelemente als Primär- bzw. Sekundärelemente für in der Glasscheibenebene wirkende Belastungen benutzt (eine Ausnahme sind Glastreppen bzw. Glasbrücken), weil die Glaselemente eine höhere Tragfähigkeit in Scheibenrichtung als senkrecht zu ihr besitzen. [7] In Scheibenrichtung beanspruchte Glaselemente sind Glasstützen, Glasbalken (Glasträger) und Glasschwerter als auch aussteifende Glasscheiben. Wegen ihrer Schlankheit bzw. geringen Biegezug- und Torsionssteifigkeit müssen solche Glaselemente hinsichtlich ihres Stabilitätsversagens untersucht werden. [12]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden nur Glasträger behandelt. Mehr über andere tragende Glasbauteile findet man in [12], [5] und [13].



Abb. 4-2 Glasschwert {4}



Abb. 4-3 Glasstütze [1]

5 Glasträger

Dank neuer technischer Untersuchungen und der Forschung, die an zahlreichen Universitäten durchgeführt werden, wird heutzutage eine zunehmende Verwendung von Glasträgern ermöglicht. Mit ihrer Transparenz verleihen sie Gebäuden ein ästhetisches und modernes Erscheinungsbild. Eine bekannte Glasträgerkonstruktion befindet sich in New York beim Apple Store (Abb. 5-1).



Abb. 5-1 Apple Store in New York [5]

Glasträger als vertikale Tragelemente kommen erstmals in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts zum Einsatz. Sie wurden vertikal positioniert und als aussteifende Bauteile von Glasfassaden verwendet. Beanspruchungen infolge von Windlasten verursachen eine Biegung der Träger (in dem Fall „Glasschwerter“) um die starke Achse. Heutzutage benutzt man Glasträger auch als horizontale Tragelemente, um ständige Lasten zu übertragen. [7] Beide Typen von Glasträgern wurden im Beispiel aus Abbildung 5-2 verwendet.

Bei Glasträgern handelt es sich um nicht geregelte Bauprodukte, weswegen alle Einzelfälle einer Zustimmung bedürfen. [14] Dennoch ist es geregelt, dass Glasträger aus Verbundsicherheitsglas hergestellt werden müssen, um die notwendigen Anforderungen wie z. B. die Resttragfähigkeit gewährleisten zu können. Monolithische Glasträger findet man in älteren Projekten, während heutzutage eine mindestens dreischichtige Ausführung notwendig ist, bei welcher die mittlere Scheibe durch die äußeren zwei vor Stoßbeanspruchungen geschützt ist. Meistens bestehen die VSG-Träger aus TVG-

Scheiben. Um aber eine höhere Tragfähigkeit zu erreichen, kommen auch ESG-Scheiben zum Einsatz. Wegen der fehlenden Resttragfähigkeit bei VSG aus ESG ist auch eine Kombination von ESG- und TVG-Scheiben bei der Herstellung von VSG möglich. [7]

Nach der vorhandenen (bzw. nicht vorhandenen) Bewehrung und ihrer Art sind drei Typen von Glasträgern zu unterscheiden:

- Unbewehrte Glasträger
- Schlaff bewehrte Glasträger *(engl. Reinforced Glass Beams)*
- Mechanisch vorgespannte Glasträger *(engl. Post-tensioned Glass Beams)*

Eine besondere Art von Glasträger ist der sogenannte Hybridträger.

5.1 Unbewehrte Glasträger

Bei unbewehrten Glasträgern handelt es sich um Träger, bei welchen der Baustoff Glas alle Tragaufgaben übernimmt.

Die Verwendung von Verbundsicherheitsglas für Glasträger erfordert eine mindestens dreischichtige Ausführung. In der Regel ist die maximale Länge der Glasträger auf etwa 9,0 m beschränkt. [14]



Abb. 5-2 Dreischichtiger VSG aus TVG Glasträger (Arnold House School in north London) {6}

Das Beispiel aus [14] (Abb. 5-3 links) zeigt einen Glasträger aus einem vierschichtigen Verbundsicherheitsglas. Die einzelnen Scheiben sind aus ESG mit einer Dicke von je 10 mm, die mit 1,52 mm dicken PVB-Folien miteinander verbunden sind. Das Blech (Edelstahlblech), das oberhalb der Glasscheiben liegt, gehört nicht zum Träger selbst, sondern dient der Befestigung des Aufsatzprofils, das im Beispiel vorgesehen ist. Eine Klebung aus Silikon verbindet den Stahl mit dem Glasträger. Der Träger ist 4 m lang und

statisch bestimmt gelagert. Die Belastungen kommen aus dem Eigengewicht, Schnee, Wind und einer Nutzlast.



Abb. 5-3 links: Querschnitt des Glasträgers (alle Maße in mm) [14]; rechts: Foto aus Arnold House School [6]

5.2 Schlaff bewehrte Glasträger

Um eine Erhöhung der Tragfähigkeit zu erreichen bzw. ein duktiles Bruchverhalten des Glasträgers gewährleisten zu können, sind Ingenieure auf die Idee gekommen, Glas zu bewehren. Das Konzept beruht auf dem Prinzip von Stahlbeton, wo die Bewehrung als Rissüberbrückung dient. Nach dem Bruch von Glas hat die Bewehrung die Aufgabe, Zugkräfte zu übernehmen, während die Druckkräfte in der ungerissenen Zone des Glases wirken. Ein duktiles Bruchverhalten der Glasträger wird durch eine in der Zugzone entlang der Glasträgerkante geklebte Edelstahlbewehrung erzielt. [15]

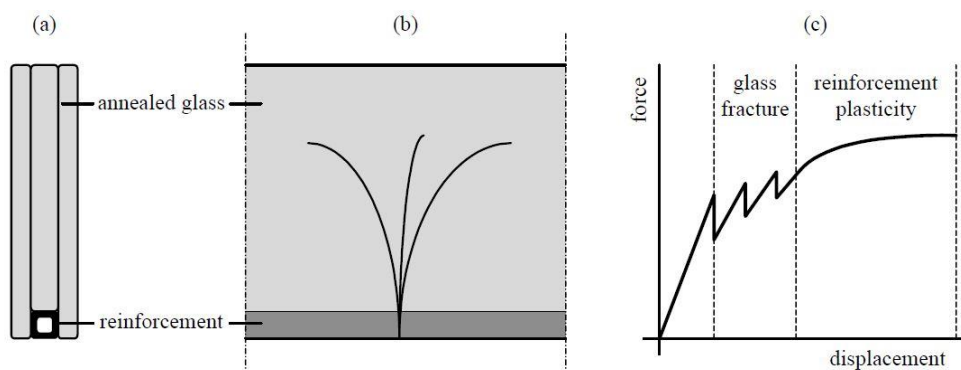


Abb. 5-4 Schematische Darstellung des Wirkungsprinzips: (a) - Querschnitt; (b) - Seitenansicht (mit dem dargestellten Riss) des bewehrten Glasträgers; (c) - Kraft-Verschiebungs-Diagramm [16]

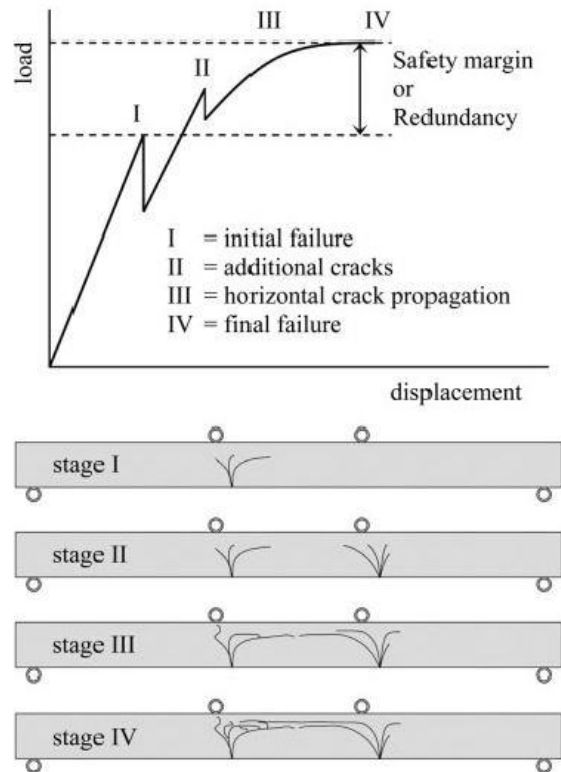







Abb. 5-5 Kraft-Verformungs-Diagramm mit den Versagensstufen I bis IV [15]

Beim Bruchverhalten eines Glasträgers unterscheidet man vier Phasen, die im Kraft-Verformungs-Diagramm zu sehen sind:

1. *Anfangsversagen:* Bis zur Entstehung des ersten Risses zeigt der Träger ein linear-elastisches Verhalten. Der Riss erstreckt sich bis etwa 2/3 der Trägerhöhe.
2. *Fortschreitendes Versagen:* Nach dem Anfangsversagen kommt es zuerst zum Fallen der aufgebracht Last (weggesteuertes Prüfverfahren), aber dann steigt die Last wieder an und überschreitet die Anfangsversagenslast. Weiters kommt es zur Entstehung neuer Risse und zur Verringerung der Biegesteifigkeit des Trägers.
3. *Horizontale Rissausbreitung:* Mit der weiteren Aufbringung von Last verlängern sich die schon entstandenen Risse und in der ungerissenen Druckzone entstehen neue horizontale Risse.
4. *Endversagen:* Zur vollständigen Kollabierung des Trägers kommt es entweder durch die Ablösung der Bewehrung (Versagen der Klebung zwischen Glas und Bewehrung) oder wegen der Trennung der Druckzone von der Zugzone, weswegen sich die Quersteifigkeit der Träger verringert. Die Trennung der Zonen verursacht übermäßige horizontale Risse. [15]

In [9] werden die Effekte verschiedener Glasprodukte (Floatglas, TVG bzw. ESG), ihres Bewehrungsgrads und der Größe der Träger auf das Tragverhalten von bewehrten Glasträgern untersucht. Die einzelnen Scheiben sind mit SentryGlas-Folien miteinander verbunden.

Series designation		AN	HS	FT	SOLID	LARGE
						
Number of specimens		5	5	5	3	3
Overall geometry						
Beam length	[mm]	1500	1500	1500	1500	3200
Beam height	[mm]	125	125	125	125	285
Beam width	[mm]	25.04 ^(a)	25.04 ^(a)	25.04 ^(a)	25.04 ^(a)	34.04 ^(a)
Glass						
Type		annealed	heat-strengthened	fully tempered	annealed	annealed
Section dimensions outer glass layers	[mm]	6*125	6*125	6*125	6*125	8*285
Section dimensions inner glass layer	[mm]	10*115	10*115	10*115	10*115	15*270
Reinforcement						
Section dimensions reinforcement	[mm]	10*10*1 hollow	10*10*1 hollow	10*10*1 hollow	10*10 solid	15*15*1.5 hollow
Reinforcement area (A_{re})	[mm ²]	36	36	36	100	81
Reinforcement percentage	[%]	1.36	1.36	1.36	3.8	0.94
Interlayer						
Thickness SG interlayer	[mm]	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52

AN – Floatglas
 HS – Teilvorgespanntes Glas
 FT – Einscheibensicherheitsglas

Abb. 5-6 Übersicht der verschiedenen VSG-Träger Ausführungen [9]

Die fünf verwendeten Varianten von Querschnitten sind mit den notwendigen Daten in Abb. 5-6 zu sehen. Die Untersuchung wurde durch Vierpunktbiegeversuche durchgeführt. Folgende Schlussfolgerungen konnten daraus gezogen werden:

- **Glasarten** (Floatglas, TVG bzw. ESG) haben nicht nur Einfluss auf die Tragfähigkeit beim Anfangsversagen, sondern auch auf die Resttragfähigkeit nach der Entstehung des ersten Risses und auch auf die Duktilität.
- Mit der Erhöhung des **Bewehrungsgrades** erhöht sich die Druckzone und es kommt zu einer Erhöhung von Resttragfähigkeit des Glasträgers nach der Entstehung des ersten Risses.
- Die **Größe** des bewehrten Trägers hat nur geringen Einfluss auf sein Tragverhalten.
- Für Träger mit der verwendeten Geometrie ist die **globale seitliche Stabilität** kein kritisches Thema. [9]

5.2.1 Klebung zwischen Glas und Bewehrung

Für bewehrte Glasträger spielt die Klebung zwischen Bewehrung und Glas eine wichtige Rolle. In Untersuchungen wurden verschiedene Klebstoffe wie Epoxidharze, Acrylate, Polyurethane und Silikone getestet. Da die Impulslast, die infolge des Glasbruchs auf den Klebstoff wirkt, zum Versagen der Klebung führen könnte, ist die Schlagfestigkeit der Klebstoffe von großer Bedeutung. Neben der Schlagfestigkeit ist, für die Auswahl des verwendeten Klebstoffs, auch seine Zähigkeit entscheidend. [15] Mehr über Klebungen bei bewehrten Glasträgern ist in [15] zu lesen.

5.3 Mechanisch vorgespannte Glasträger

Da mechanisch vorgespannte Glasträger das Hauptthema der vorliegenden Arbeit bilden, werden sie im nächsten Kapitel getrennt behandelt.

5.4 Hybridträger

Hybridträger stellen eine besondere Gruppe von Glasträgern dar. Ein Hybridträger wird in der Regel durch eine Kombination der Baustoffe Glas und Stahl hergestellt (Abb. 5-7). Dennoch gibt es auch die Varianten, bei denen statt Stahl, Beton bzw. Holz zum Einsatz kommen (Abb. 5-8 und Abb. IV-9).

Ein Hybridträger wird in der Regel als I-Profil hergestellt, bei welchem der Steg aus Glas und die Flansche aus Stahl, Stahlbeton oder Holz bestehen.

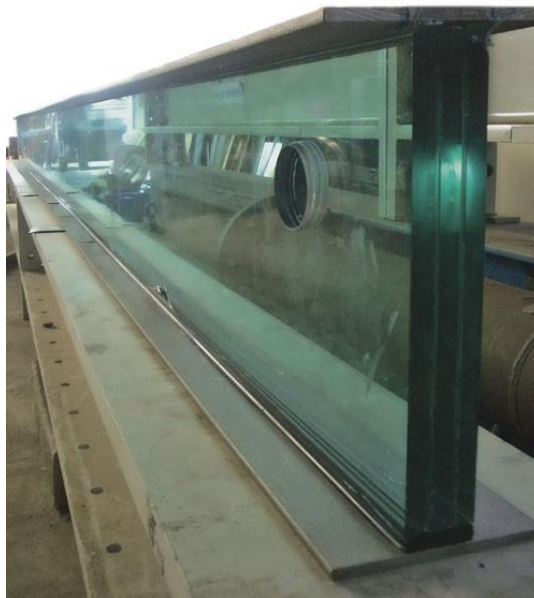


Abb. 5-7 Geklebter Stahl-Glas Hybridträger aus einem gläsernen VSG-Steg und einem Stahlflansch
{7}



Abb. 5-8 Holz-Glas Hybridträger untersucht von Cruz & Pequeno [16]

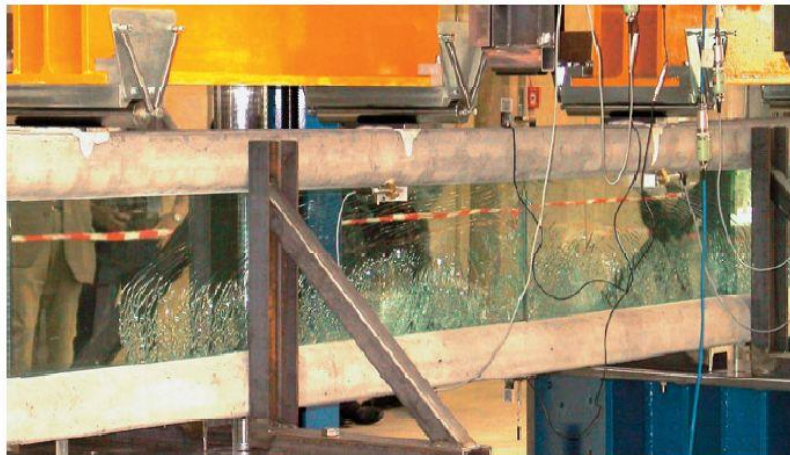
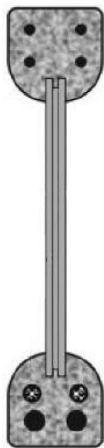


Abb. 5-9 Stahlbeton-Glas Hybridträger untersucht von Freytag [16]

6 Prinzip der Vorspannung

Zwischen den Baustoffen Beton und Glas kann eine Parallele gezogen werden, da beide Baustoffe eine sehr geringe Zugfestigkeit im Vergleich zur Druckfestigkeit besitzen. Da die mechanische Vorspannung des Glases bislang noch nicht so breit untersucht worden ist, wird in diesem Kapitel, näher auf das Prinzip der Vorspannung basierend auf Spannbeton eingegangen. Insbesondere wird die Variante "Vorspannung ohne Verbund" betrachtet, weil diese beim mechanischen Vorspannen von Glaträgern durchführbar ist.

Als Literatur für dieses Kapitel wurden vorwiegend [17], aber auch [18] und [19] verwendet.

6.1 Allgemeines

Das Konzept der Vorspannung beruht auf dem Erzeugen von Druckspannungen innerhalb des Bauteils. Wegen der geringen Zugfestigkeit des Betons (das Gleiche gilt für Glas) treten Risse schon bei geringen Belastungen auf, was eine Verminderung der Steifigkeit und eine Vergrößerung der Verformungen zur Folge hat. Um diese unerwünschten Folgen zu vermeiden, wird durch die Vorspannung eine Druckkraft in die Zugzone des Bauteils eingeleitet. Die so erzeugten Druckspannungen wirken den Zugspannungen aus äußeren Lasten entgegen. Damit Zugspannungen und daraus resultierende Risse entstehen, müssen zuerst die Druckspannungen abgebaut werden. Die Vorspannung erfolgt mit Hilfe eines mit dem Bauteil verbundenen Stahlseils, des sogenannten Spannglieds. Das Spannglied kann in der Schwerpunkttachse des Bauteils liegen, dann spricht man von einer zentrischen Vorspannung, bei welcher auf dem Bauteil nur eine Druckkraft (P) infolge einer Vorspannung wirkt. Ist das Spannglied in einem Abstand von der Schwerachse des Bauteils eingelegt, wirkt neben der Druckkraft auch ein Vorspannungsmoment (M_p) auf dem Bauteil. Das Moment kann durch die Multiplikation der Vorspannungskraft (P) mit dem Abstand (z_p) ermittelt werden. Der Zustand, bei welchem die aus Vorspannung erzeugten Druckspannungen durch Lastspannungen annulliert werden, wird Dekompression genannt (Abb. V-1).

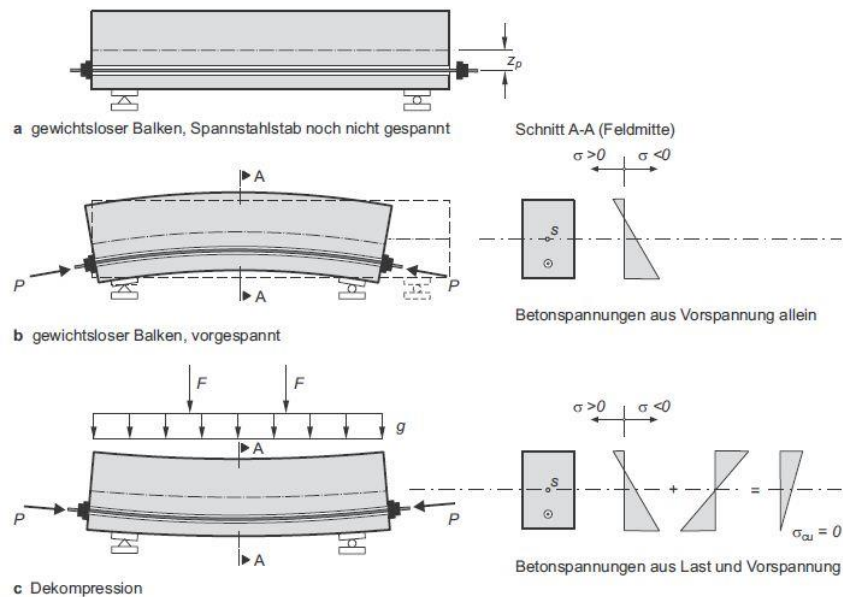


Abb. 6-1 Vorspannung eines Balkens [17]

6.2 Arten der Vorspannung

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, um Druckkraft ins Bauteil einzuleiten bzw. gibt es verschiedene Arten der Vorspannung. Die unterschiedlichen Verfahren der Vorspannung unterscheidet man nach folgenden Merkmalen:

- Verbundwirkung zwischen dem Beton und dem Spannglied
 - *Vorspannung mit Verbund*
 - *Vorspannung ohne Verbund*
- Zeitpunkt des Auftretens der Verbundwirkung
 - beim Betonieren des Bauteils: *Vorspannung mit sofortigem Verbund*
 - nach dem Erhärten des Betons und der Einleitung der Vorspannkraft: *Vorspannung mit nachträglichem Verbund*
- Zeitpunkt der Einleitung der Vorspannkraft
 - Spannen vor dem Erhärten des Betons: *Vorspannung mit sofortigem Verbund*
 - Spannen gegen den erhärteten Beton: *Vorspannung mit nachträglichem und ohne Verbund*
- Lage der Spannglieder
 - *Interne Vorspannung*
 - *Externe Vorspannung*

Da bei einem Glasträger nur eine Vorspannung ohne Verbund durchführbar ist, wird nur diese Ausführungsart weiter behandelt.

6.3 Vorspannung ohne Verbund

Im Vergleich zur Vorspannung mit Verbund ist das Spannglied bei der Vorspannung ohne Verbund nur an den Ankerstellen fest mit dem Bauteil verbunden. Da ein starrer Verbund zwischen Stahl und Beton entfällt, kann man die Verträglichkeitsbedingungen der Dehnungen für den Spannstahl nicht über eine ebene Dehnungsverteilung am Querschnitt, sondern nur auf dem Bauteilniveau aufstellen. Die Vorspannkraft bleibt zwischen den Endverankerungen annähernd gleich. Eine Dehnungszunahme des Spanngliedes infolge äußere Lasten im gerissenen Beton tritt kaum auf.

Für eine Vorspannung ohne Verbund gibt es zwei mögliche Ausführungen: die interne und die externe Vorspannung. Bei der internen Vorspannungsart wird das Spannglied durch ein Hüllrohr, das sich innerhalb des Bauteils befindet, eingeführt (Abb. V-2). Das Verpressen mit Zementmörtel, wie bei der Variante mit nachträglichem Verbund entfällt. Für den Korrosionsschutz des Spanngliedes werden Fett oder ähnliche Korrosionsschutzmassen benützt.

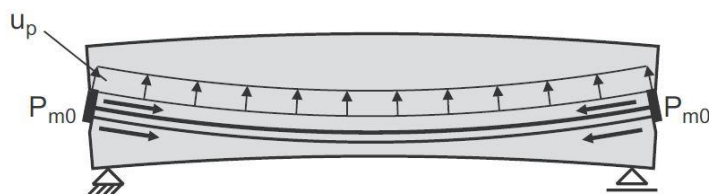


Abb. 6-2 Interne Vorspannung [17]

Bei der externen Vorspannung liegt das Spannglied außerhalb des Betonquerschnitts und verläuft zwischen den Endverankerungen entweder gerade oder wird an Querträgern bzw. Sätteln umgelenkt (Abb. V-3).

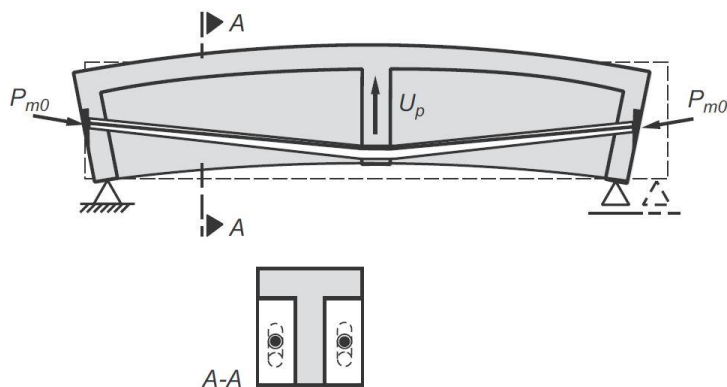


Abb. 6-3 Externe Vorspannung [17]

Falls ein Spannglied gerade zwischen den Endverankerungen verläuft, wird der Beton nur durch die Vorspannungskraft (P_m) beeinflusst. Ist das Spannglied umgelenkt, entstehen neben der Vorspannungskraft (P_m) noch die Umlenkkräfte (U_p), die auf den Beton wirken. Bei der externen Vorspannung wirken die Umlenkkräfte nur als punktuelle Lasten (Abb. V-3), während sie bei der internen Vorspannung auch in Form von Streckenlast auf den Beton wirken können (Abb. V-2).

6.4 Schnittgrößen aus Vorspannung

Bei statisch bestimmt gelagerten Bauteilen entsteht ein geschlossenes Kraftsystem, das keine Auflagerreaktionen verursacht. Beton und Spannstahl erhalten die Kräfte aus der Vorspannung, die miteinander im Gleichgewicht stehen. Dies hat zur Folge, dass keine resultierenden Schnittgrößen am Gesamtquerschnitt entstehen. Es tritt ein reiner Eigenspannungszustand auf (Abb. V-4).

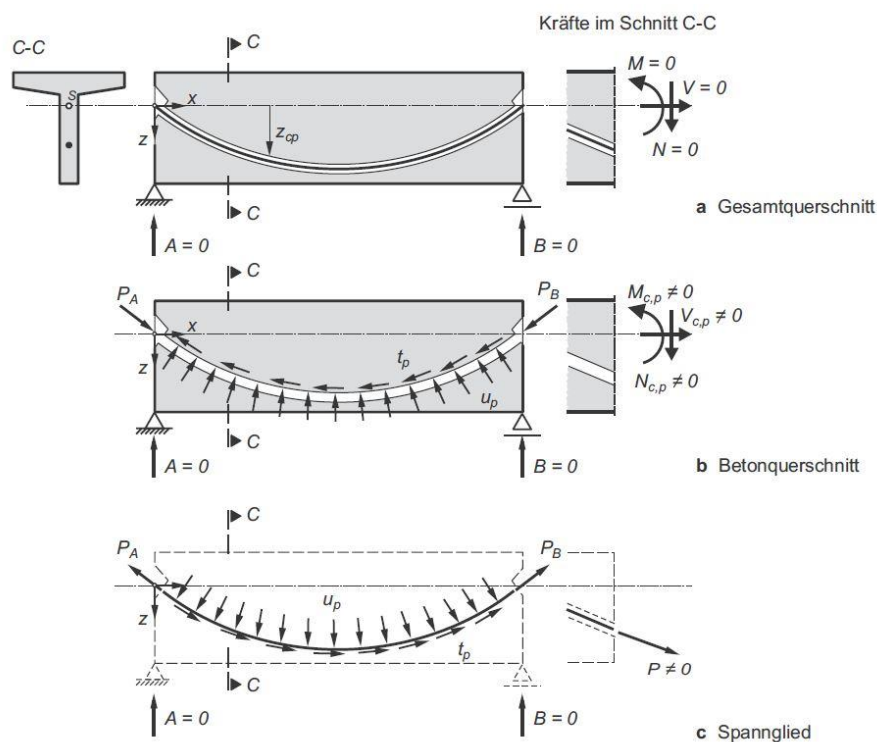


Abb. 6-4 Wirkung der Vorspannung- Unterscheidung zwischen den Querschnitten [17]

Bei statisch unbestimmten Systemen treten wegen der Verformungsbehinderung Kräfte innerhalb des Bauteils auf. Diese sogenannte *statisch unbestimmte Wirkung der Vorspannung* verursacht Auflagerreaktionen und Schnittgrößen am Gesamtquerschnitt. Da diese Arbeit auf einen Spannglied-Einfeldträger begrenzt ist, werden im Folgenden nur statisch bestimmte Systeme betrachtet. Mehr über die Vorspannung statisch unbestimmter Systeme findet man in [17].

Zur Ermittlung der Schnittgrößen des Betonquerschnitts aus Vorspannungen bei statisch bestimmten Systemen gibt es zwei Methoden:

- 1) **auf Querschnittsebene** über Gleichgewichtsbedingungen mit der Berücksichtigung der Vordehnung (Abb. V-5).

$$\begin{aligned} \sum H: N_{c,p}(x) &= -P(x) \\ \sum V: V_{c,p}(x) &= -P(x) \cdot \theta_p \\ \sum M: M_{c,p}(x) &= -P(x) \cdot z_{cp} \end{aligned}$$

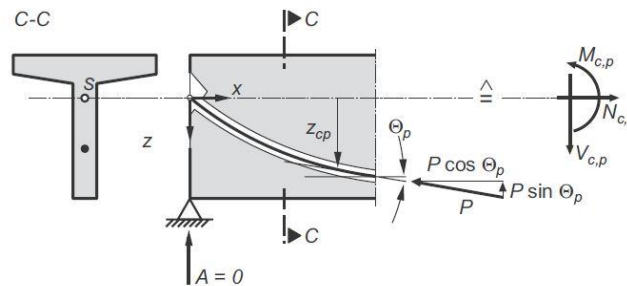
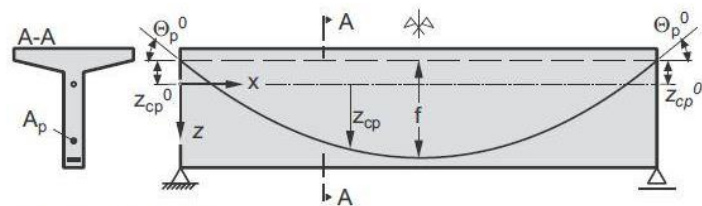
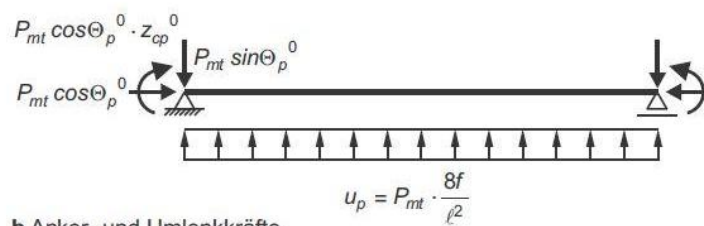


Abb. 6-5 Gleichgewicht am Querschnitt [17]

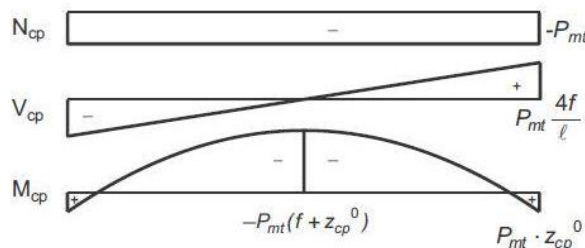
- 2) **auf Systemebene** mit der Berücksichtigung von Umlenk-, Anker-, und Reibungskräften als äußerer Einwirkung. Ankerkräfte wirken als Einzellasten an den Endverankerungen und die Umlenkkräfte und Reibungskräfte entstehen entlang der Spanngliedachse (Abb. V-6).



a Spanngliedführung



b Anker- und Umlenkkräfte



c Schnittgrößen aus Vorspannung

Abb. 6-6 Beispiel der Schnittgrößen zufolge parabolischer Spanngliedführung. Berechnung mit Anker- u. Umlenkkräften [17]

6.5 Spannkraftverluste

Wegen der verschiedenen Verluste entspricht die an der Spannpressen abgelesene Kraft nicht der Vorspannkraft, die nach der Vorspannung im Bauteil wirkt. Die Verluste der Spannkraft werden in zwei Gruppen unterteilt: solche die während und sofort nach dem Verkeilen des Spanngliedes eintreten, und jene die aus den zeitabhängigen Wirkungen nachfolgen. Zur ersten Gruppe gehören Spannkraftverluste aus Keilschlupf, Reibung und elastischer Verkürzung des Betons. Die zweite Gruppe umfasst die Verluste aus Betonverkürzung infolge von Kriechen und Schwinden als auch die Relaxation des Spannstahls.

Da in dieser Arbeit keine Spannbetonträger, sondern ausschließlich Glasträger behandelt werden, werden im Folgenden Verluste aus Verkürzung des Bauteils infolge von Kriechen und Schwinden vernachlässigt.

Der Mittelwert der Spannkraft ($P_{m(x)}$) kann ausgedrückt werden durch:

$$P_{m(x)} = P - \Delta P_{\mu(x)} - \Delta P_{sl(x)} - \Delta P_{el(x)} - \Delta P_{r(x)}$$

wobei:

- P - Vorspannkraft an der Spannpressen
- $\Delta P_{\mu(x)}$ - Verluste aus Reibung zwischen Spannglied und Hüllrohr bzw. Umlenkstellen
- $\Delta P_{sl(x)}$ - Verluste aus Keilschlupf
- $\Delta P_{el(x)}$ - Verluste aus der elastischen Verformung des Bauteils
- $\Delta P_{r(x)}$ - Verluste aus der Relaxation des Spannstahls

6.5.1 Reibungsverluste

Während der Vorspannung gegen erhärteten Beton (bzw. Glas) entsteht an den Umlenkstellen und entlang des Kontaktes zwischen Spannglied und Hüllrohrwandung Reibung, die der Spannkraft entgegen wirkt. Demzufolge nimmt die Spannkraft entlang des Spanngliedes ab.

Der Spannkraftverlust $\Delta P_{\mu(x)}$ infolge von Reibung ist gegeben durch:

$$\Delta P_{\mu(x)} = P \cdot (1 - e^{-\mu \vartheta_p(x)})$$

wobei:

- μ - Reibbeiwert
- ϑ_p - Umlenkwinkel

Der Umlenkwinkel $\vartheta_{p(x)}$ umfasst den planmäßigen Umlenkwinkel ($\theta_{p(x)}$) (Abb. V-7) und den ungewollten Umlenkwinkel* ($k \cdot x$), die miteinander zu addieren sind:

$$\vartheta_{p(x)} = \sum \theta_{p(x)} + k \cdot x$$

*Ein ungewollter Umlenkwinkel entsteht durch unplanmäßige Umlenkungen des Spanngliedes. Da die Hüllrohre nur in bestimmten Abständen unterstützt sind, kommt es zwischen den punktuellen Unterstüzungen zu einem Hängen ihrerseits. Dies hat zusätzliche, unplanmäßige Umlenkungen des Spanngliedes zur Folge.

Nach EN 1992-1-1 ist ein ungewollter Umlenkwinkel $k = 0,005 \div 0,01 \frac{rad}{m}$ angegeben.

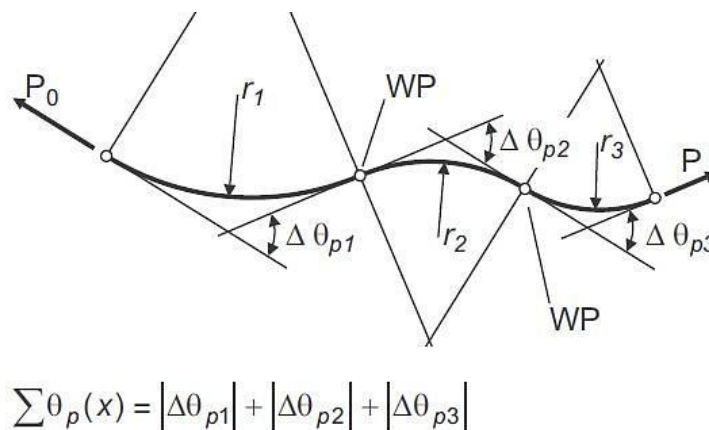


Abb. 6-7 Planmäßige Umlenkwinkel [17]

6.5.2 Verluste aus Keilschlupf

Beim Spannvorgang befinden sich an den Spannritzenenden die lose sitzenden Keile, die zur Verankerung an den Bauteilenden dienen. Vor dem Verankern kommt es zu kleinen Bewegungen von Spannritzen und Keilen gegen die Spannrichtung. Diese Bewegung bzw. den Gleitweg bezeichnet man als *Keilschlupf* (Δl_{sl}) (Abb. V-8). Er beträgt je nach Spannsystem zwischen 2 und 10 mm.

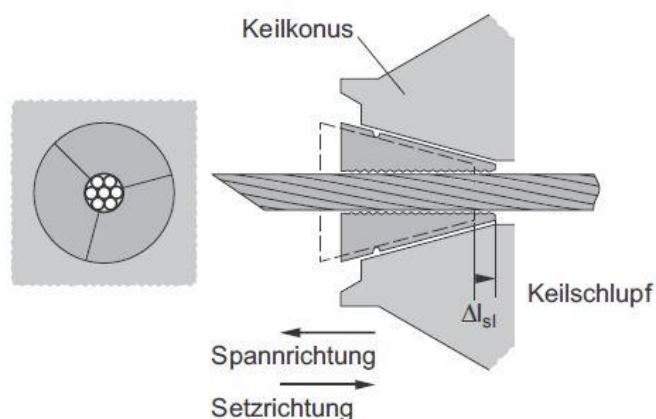


Abb. 6-8 Keilverankerung [17]

Der Keilschlupf hat einen Dehnungsverlust des Spanngliedes zur Folge. Wegen der Reibung zwischen Spannglied und Hüllrohr tritt die Dehnungsabnahme nicht auf der ganzen Spanngliedlänge auf. Sie ist auf eine Nachlasslänge (l_{sl}) begrenzt.

Für den beliebigen Spanngliedverlauf ist eine allgemeine, geschlossene Lösung zur Bestimmung der Verluste nicht möglich. Diese werden iterativ bestimmt (über einen Schätzwert der Nachlasslänge l_{sl} ; weitere Erklärungen sind in [17] zu finden).

Die Nachlasslänge (l_{sl}) kann für eine Spanngliedführung mit konstanter Krümmung $1/r$ (Kreis, Parabel) mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} \cdot E_p}{\sigma_{p0} \cdot \mu \cdot \left(\left|\frac{1}{r}\right| + k\right)}}$$

wobei:

- σ_{p0} - Spannstahlspannung an Ankerstelle ($x=0$) **vor** dem Verankern
- E_p - Elastizitätsmodul des Spannstahls

Für den Fall einer parabolischen Spanngliedführung gilt: $\left|\frac{1}{r}\right| = \frac{8f}{l^2}$.

Wenn die Nachlasslänge bekannt ist, kann der Spannungsverlauf und damit der Vorspannungsverlust bestimmt werden (Abb. V-9):

$$\sigma_{p(x=l_{sl})} = \sigma_{p0} \cdot e^{-\mu(\Sigma \theta(l_{sl}) + k \cdot l_{sl})}$$

bzw.

$$\sigma_{p(x=l_{sl})} = \sigma'_{p0} \cdot e^{+\mu(\Sigma \theta(l_{sl}) + k \cdot l_{sl})}$$

wobei:

- σ'_{p0} - Spannstahlspannung an Ankerstelle ($x=0$) **nach** dem Verankern

Der Spannungsverlust ($\Delta\sigma_{p0}$) aus Keilschlupf beträgt:

$$\Delta\sigma_{p0} = \sigma_{p0} - \sigma'_{p0}$$

Der Spannkraftverlust (ΔP_{s10}) kann durch die Multiplikation des Spannungsverlustes ($\Delta\sigma_{p0}$) mit der Spannstahlquerschnittsfläche A_p ermittelt werden.

$$\Delta P_{s10} = \Delta\sigma_{p0} \cdot A_p$$

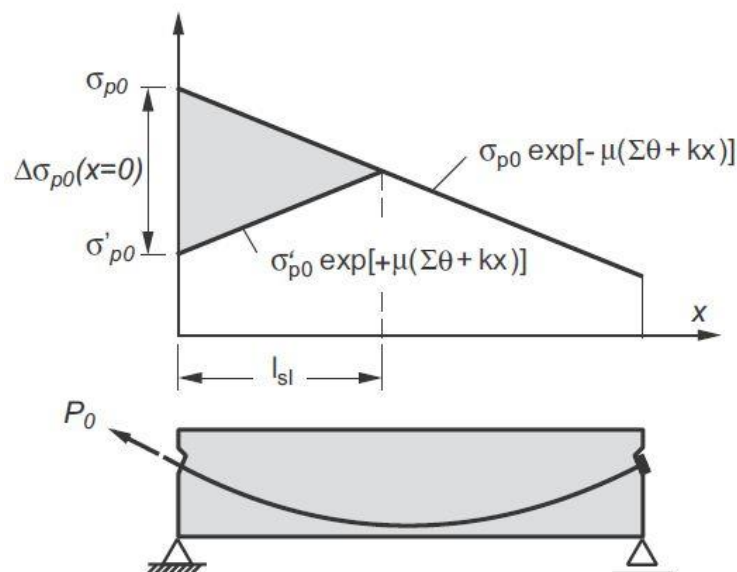


Abb. 6-9 Verlauf der Spannstahlspannungen [17]

6.5.3 Verluste aus elastischer Bauteilverkürzung

Unter dem Begriff elastische Verkürzung versteht man hier eine Verkürzung des Bauteils, die gleichzeitig mit dem Spannvorgang auftritt. Bei der Vorspannung mit nur einem Spannglied kommt es mit der Stahlausdehnung gleichzeitig zu einer Betonverkürzung. Dies bedeutet, dass die Betonverkürzung keinen Einfluss auf die Spannkraft hat, sondern nur auf den Spannweg*.

*Der Spannweg (Δl) stellt den Unterschied zwischen der Verlängerung des Spannstahls (Δl_p) und der Verkürzung des Betons (Δl_{cp}) dar: $\Delta l = \Delta l_p - \Delta l_{cp}$

Müssen mehrere Spannglieder gespannt werden, werden diese nicht gleichzeitig, sondern nacheinander gespannt. (Ein gleichzeitiges Vorspannen von mehreren Spanngliedern ist baupraktisch nicht möglich und auch nicht sinnvoll.) Dies hat zur Folge, dass es beim Spannen von jedem nächsten Spannglied zu einer neuen Bauteilverkürzung kommt, was einen Kraftverlust in schon gespannten Spanngliedern verursacht (Abb.V-10).

Unter der Annahme ähnlicher Spannkraften und gleicher Querschnittsflächen aller Spannglieder berechnet man den mittleren Kraft- (ΔP_{el}) bzw. Spannungsverlust ($\Delta \sigma_{p,el,m}$) auf folgende Weise:

$$\Delta P_{el} = A_p \cdot \sigma_{cp} \cdot \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{n(n-1)}{2n}$$

bzw.

$$\Delta \sigma_{p,el,m} = \frac{\Delta P_{el}}{n \cdot A_p} = \sigma_{cp} \cdot \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{n-1}{2n}$$

wobei:

- n - Anzahl der Spannglieder
- E_p - Elastizitätsmodul des Spannstahls
- E_{cm} - Elastizitätsmodul des Betons
- A_p - Querschnittsfläche eines Spanngliedes

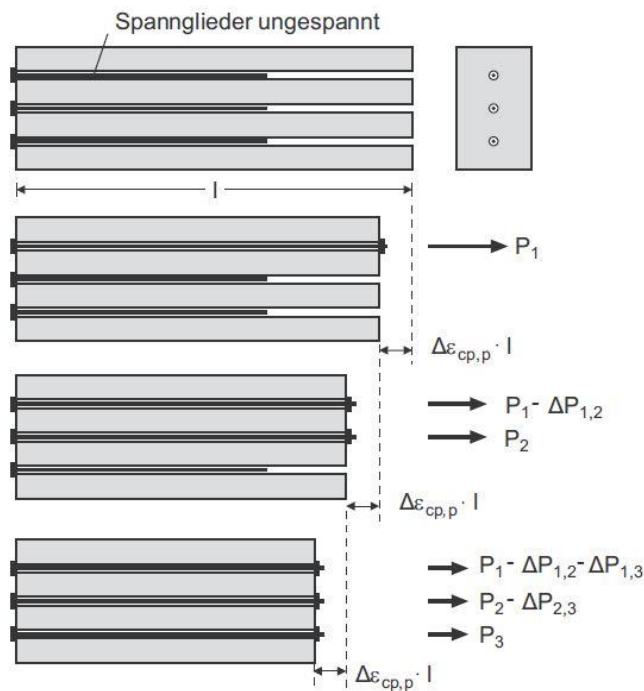


Abb. 6-10 Elastische Bauteilverkürzung bei Vorspannung mit mehreren Spanngliedern [17]

6.5.4 Verluste infolge einer Relaxation des Spannstahls

Relaxation definiert man als Spannungsverlust des Spannstahls infolge seiner konstanten Dehnung. Die Relaxation ist von der Spannstahlsorte und der Anfangsspannung im Spannstahl abhängig. In der Tabelle V-1 sind Werte für den Spannungsverlust ($\Delta\sigma_{p,t}$) in % der Anfangsspannung ($\Delta\sigma_{pm0}$) bei Litzen mit sehr niedriger Relaxation gegeben:

$\Delta\sigma_{pm0}/f_{pk}$	Zeit nach dem Vorspannen [h]						
	1	10	$2 \cdot 10^2$	10^3	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^5$	10^6
0,5	<1,0						
0,55							
0,60					1,2	2,5	2,8
0,65				1,3	2,0	4,5	5,0
0,70			1,0	2,0	3,0	6,5	7,0
0,75		1,2	2,5	3,0	4,5	9,0	10,0
0,80	1,0	2,0	4,0	5,0	6,5	13,0	14,0

Tab. V-1 Spannungsverluste $\Delta\sigma_{p,t}$ in % der Anfangsspannung $\Delta\sigma_{pm0}$ [19]

7 Mechanisch vorgespannte Glasträger

Der Unterschied zwischen schlaff bewehrten Glasträgern und mechanisch vorgespannten Glasträgern liegt, analog zum Spannbetonkonzept, in der Aktivierung der Bewehrung. Bei schlaff bewehrten Glasträgern bekommt die Bewehrung erst nach der Entstehung von Rissen bzw. wenn die Zugfestigkeit des Glases überschritten ist, eine Kraft. Bei mechanisch vorgespannten Glasträgern ist schon vor dem Belasten des Trägers eine Zugkraft im Spannglied vorhanden.

Im Konzept des mechanischen Vorspannens von Glasträgern ist keine Klebung zwischen Glas und Spannglied vorgesehen [16], was im Vergleich zum Spannbetonkonzept einer Vorspannung ohne Verbund entspricht.

Das mechanische Vorspannen von Glasträgern hat mehrere Vorteile. Zunächst wird mit Hilfe des Spannglieds eine Druckkraft ins Glas eingeführt und damit sein Zugwiderstand vergrößert. Ein weiterer Vorteil einer mechanischen Vorspannung der Glasträger ist das duktile Tragverhalten des Trägers nach der Entstehung des ersten Risses. [16]

In experimentellen Forschungsprojekten, die vor allem an den Technischen Universitäten Delft und Dresden durchgeführt wurden, konnten bislang bereits einige verschiedene Querschnitte untersucht werden: Dazu zählen das T-Profil, Hohlprofil und Rechteckprofil mit Spanngliedumlenkungen. Die Träger wurden mit 4-Punkt-Biegeversuchen untersucht.



Abb. 7-1 Spannlasträger in Dachkonstruktion [20]

Experimentelle Untersuchungen

7.1 T-Träger

Im Jahr 2004 wurde ein Spannglasträger mit T-Querschnitt an der TU-Delft getestet. Der Steg des Trägers bestand aus drei Float-Glasscheiben. Die äußeren zwei hatten eine Dicke von je 8 mm und der inneren Scheibe betrug 10 mm. Den Flansch bildeten zwei Float-Glasscheiben von je 8 mm Dicke, und mittels des GB 368 Acrylate Klebstoffes von „DELO“ wurde auf den Steg geklebt. Der Träger war 3 m lang mit einer veränderlichen Höhe von 110 bis 210 mm. Die Breite des Flanschs variierte zwischen 60 und 90 mm. Ein Hohlprofil aus Edelstahl mit den Dimensionen 10*10*1 mm wurde in den Steg eingebaut (Abb. VI-2). Durch das Stahlprofil wurde ein Spannglied mit einem Durchmesser von 7 mm ($\sigma_y = 1670$ MPa) geführt und gegen die Trägerenden angespannt. [16]

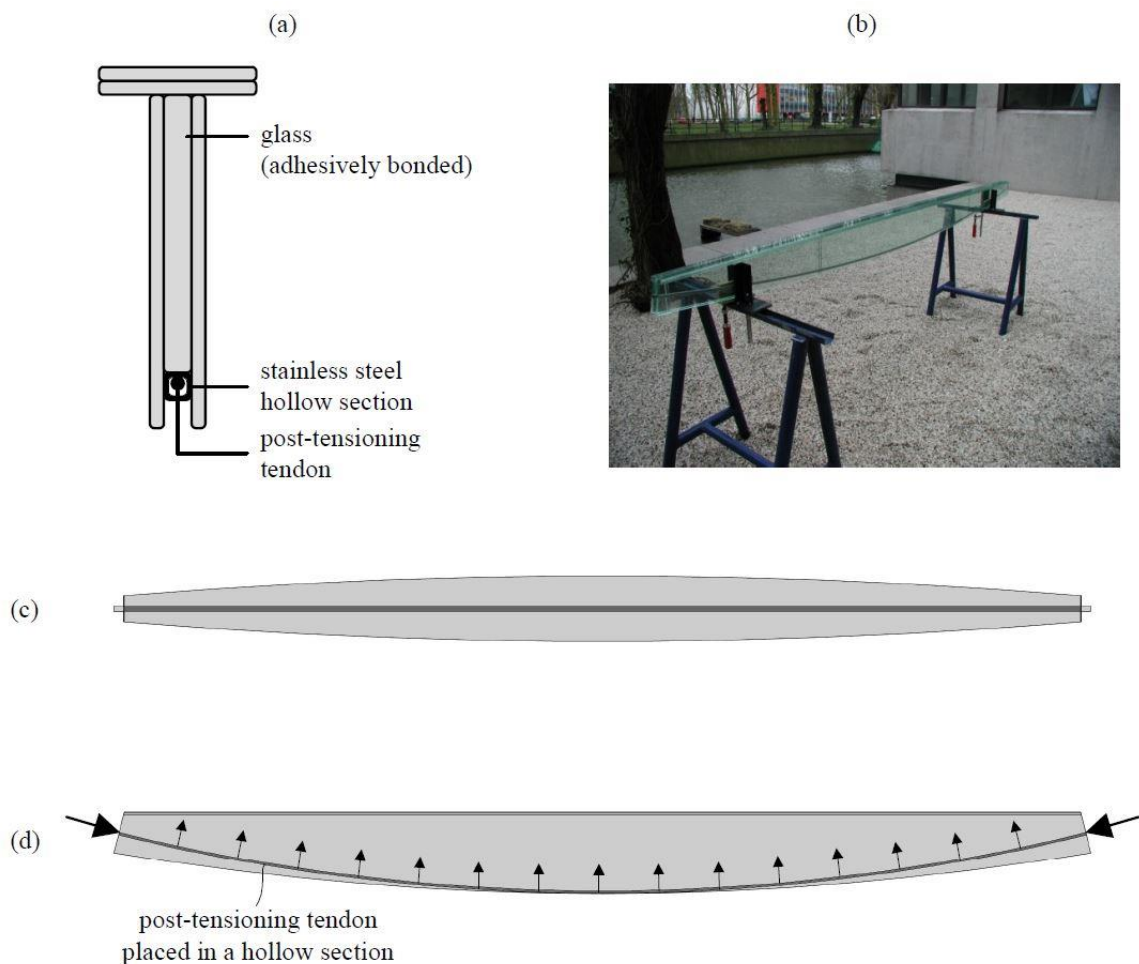


Abb. 7-2 (a) Querschnitt; (b) Foto eines Trägerprototyps; (c) Draufsicht; (d) Seitenansicht [16]

Für den Spannvorgang wurde an jedem Ende des Trägers ein Stahlkopf angebaut. Zwischen Glas und Stahl wurde auch ein Zwischenstück aus Neopren eingebaut (Abb. VI-3). Mit Hilfe einer hydraulischen Spannpressen wurde eine Vorspannkraft von 20 kN eingebracht. Der Träger wurde im 4-Punkt-Biegeversuch getestet (Abb. VI-4). [16]



Abb. 7-3 Glasträger während des Vorspannens [16]

Nach dem linear-elastischen Verhalten kam es zu einem V-Riss. Mit der Vergrößerung der Belastung entstanden neue Risse und der Träger zeigte eine signifikante Erhöhung der Tragfähigkeit nach Entstehung des ersten Risses (bis zu 117% der Belastung, die das Anfangsversagen verursachte). Mit der weiteren Aufbringung von Belastung versagte der Träger in seiner Druckzone (Abb. VI-5). [16]



Abb. 7-4 Spannglastträger im 4-Punkt-Biegeversuchsgerät [16]



Abb. 7-5 Spannglasträger während des 4-Punkt-Biegeversuchs [16]

Es wurde festgestellt, dass das Konzept von mechanisch vorgespannten T-Glasträgern (aus Floatglas) umsetzbar ist als auch, dass solche Träger eine hohe Resttragfähigkeit nach dem Anfangsversagen (Entstehung des ersten Risses) besitzen.

7.2 Hohlprofil-Träger

Ein Hohlprofil-Spannglasträger wurde im Jahr 2007 getestet. Der Träger bestand aus vier Float-Glasscheiben mit zwei Hohlprofilen (10*10*1) aus Edelstahl an beiden Rändern (oben und unten). Die Edelstahlhohlprofile wurden mit Hilfe von GB 368 Acrylate Klebstoff von „DELO“ mit dem Glas verbunden. Durch die Stahlprofile wurden Spannglieder mit Durchmessern von je 7 mm ($\sigma_y = 1670$ MPa) eingeführt und gegen die Trägerenden angespannt. An den Trägerenden wurden U-Stahlprofile eingebaut. Der Hohlraum zwischen dem Glas und dem Stahl wurde mit Aluminium-epoxid Kitt ausgefüllt, um eine ausgeglichene Spannkrafteinleitung gewährleisten zu können (Abb. VI-6). Mittels synchronisierter hydraulischer Pressen wurde der Glasträger eingespannt und danach im 4-Punkt Biegeversuch getestet.

Der Hohlprofil-Spannglasträger zeigte ähnliche Merkmale im Tragverhalten wie der T-Spannglasträger. Nach einem linear-elastischen Tragverhalten entstand ein V-Riss. Mit der weiteren Aufbringung von Belastung kam es zur Entstehung von neuen Rissen und einer horizontalen Ausbreitung der schon vorhandenen Risse. [16]

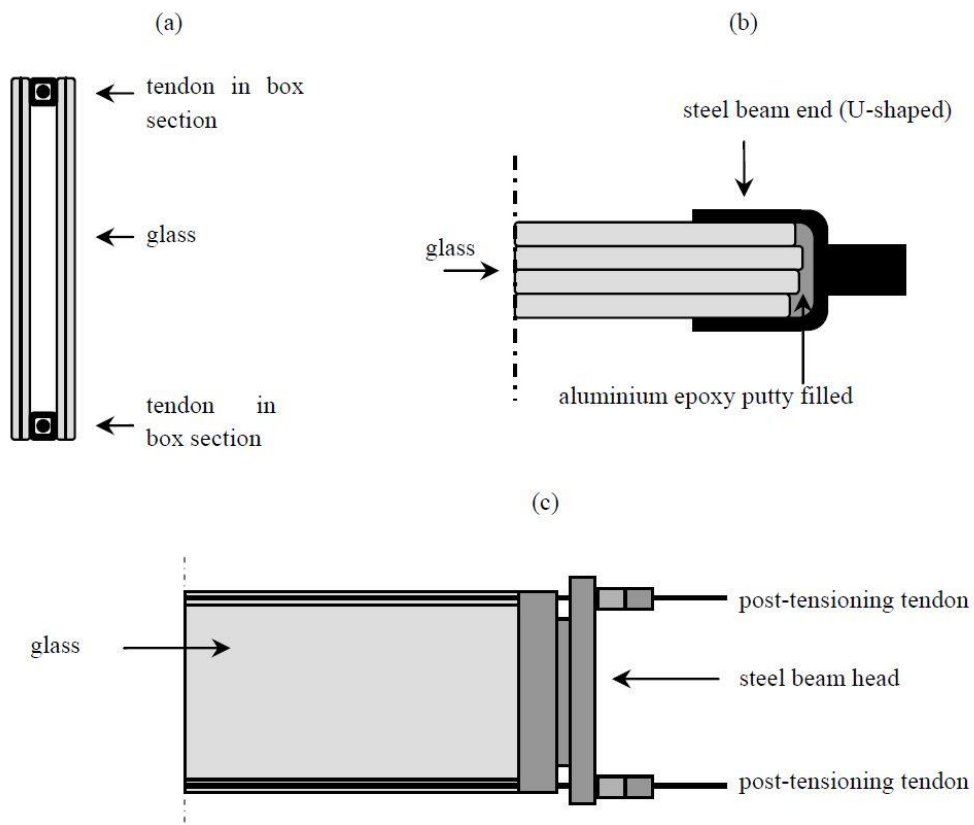


Abb. 7-6 (a) Querschnitt; (b) Draufsicht des Trägerendes; (c) Seitenansicht des Trägerendes [16]

Nach der Entstehung des ersten Risses (nach dem Anfangsversagen) zeigte der Träger einen Anstieg in Resttragfähigkeit (bis 110% der Belastung, die das Anfangsversagen verursacht hatte), als auch ein (semi-)duktiler Tragverhalten bis zum lokalen Stabilitätsversagen (Biegeknicken) (Abb. VI-7). [16]



Abb. 7-7 Lokales Knicken des Spannglasträgers [16]

7.3 Träger mit Spanngliedumlenkungen

Am Institut für Baukonstruktion an der Technischen Universität Dresden wurden Spannglasträger mit Spanngliedumlenkungen getestet. Ziel der Untersuchungen war die experimentelle Ermittlung einer Kraft-Verformungs-Beziehung infolge einer Vorspannung und einer nachträglich aufgebrachtten Biegebelastung. Die Analyse des Lastfalls „Vorspannung“ ist in [21] beschrieben und weitere Untersuchungen des Lastfalls „Biegebelastung“ findet man in [22].

7.3.1 Aufbau

Alle Träger hatten die gleichen Abmessungen, aber für die Anpassung an einer mögliche, reale Belastung wurden vier unterschiedliche Varianten der Spanngliedführung getestet. Der Unterschied lag in der Spanngliedanzahl (ein oder zwei Spannglied/er) bzw. in ihrer/n Führung/en durch die Träger (ein oder zwei Umlenkung/en), wie in Abbildung VI-8 dargestellt.

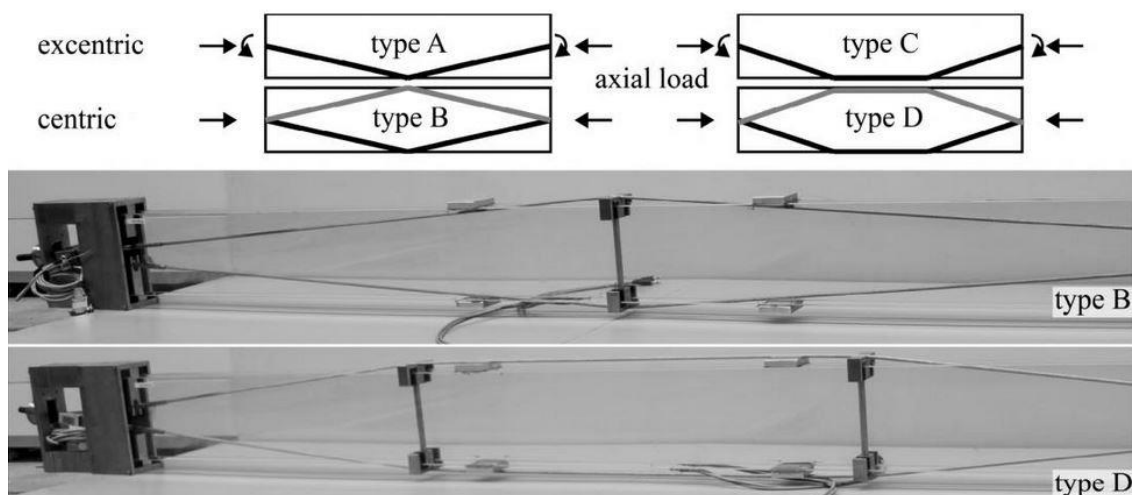


Abb. 7-8 Spannglasträger, unterschiedliche Spanngliedführungen [21]

Aus dem allgemeinen Vorspannungskonzept ist bekannt, ist dass man bei Trägern mit nur einem Spannglied mit Umlenkung/en (exzentrisch: Typen A u. C) neben einer Druckkraft auch ein Vorspannungsmoment ($M_{p,dir}$) im Träger bekommt. Bei den „zentrischen Varianten“ (B u. D) kommt es zur Annullierung der Umlenkkräfte (bei gleicher Vorspannung beider Spannglieder), was das Verschwinden des Vorspannungsmomentes zur Folge hat.

Die getesteten Träger sind 2 m lang und 150 mm hoch. Sie bestehen aus zwei Paketen mit je zwei Glasscheiben (ESG bzw. TVG), die je eine Dicke von 6 mm aufweisen. Die Glasscheiben sind mit PVB-Folien mit einer Stärke von 0,76 mm miteinander verbunden. Der Abstand zwischen dem „Glasscheibenpaketen“ beträgt 28 mm (Abb. VI-9). Auf diese Weise (mit Umlenkelement/en und getrennten Glasscheibenpaketen) wird ein höherer Widerstand gegen die Stabilitätsprobleme erreicht. Als Bewehrung werden Seile aus

hochlegiertem Stahl mit einem Durchmesser von 5 mm verwendet. Der Kontakt zwischen den Stahlköpfen, die sich an den Enden der Träger befinden, und dem Verbundsicherheitsglas selbst wird durch eine Polyoxymethylen-Klotzung (POM) unterbunden. Die Klotzung dient zur Übertragung der Vorspannkkräfte zwischen Stahl und Glas. [21] [22]

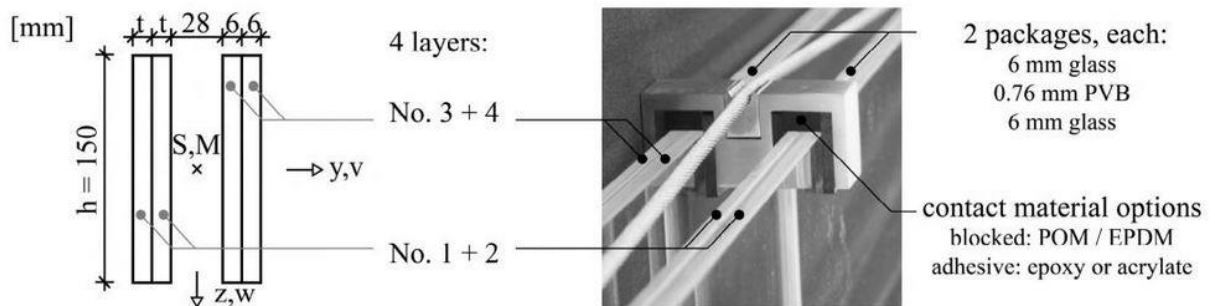


Abb. 7-9 Querschnitt und Umlenkelement des Spannglasträgers [21]

7.3.1.1 Umlenkkonstruktionen

Die aus der Vorspannung entstandenen Umlenkkkräfte werden durch die Umlenkkonstruktion in die Glaskanten, je nach Typ des Trägers, in die Feldmitte bzw. in die Drittelpunkte eingeleitet. Um einem Glas-Metall-Kontakt auszuweichen, wurden zwei Arten der Umlenkkonstruktionen verwendet: Klotzungsvarianten und Klebkonstruktionen. Die Klotzungsvarianten wurden mit einer POM-Klotzung (Polyoxymethylen) erstellt, während für die Klebkonstruktionen eine „steife“ Klebung mit 2-K-Epoxidharz sowie eine „weiche“ mit 2-K-Acrylatklebstoff durchgeführt wurde (Abb. VI-10).

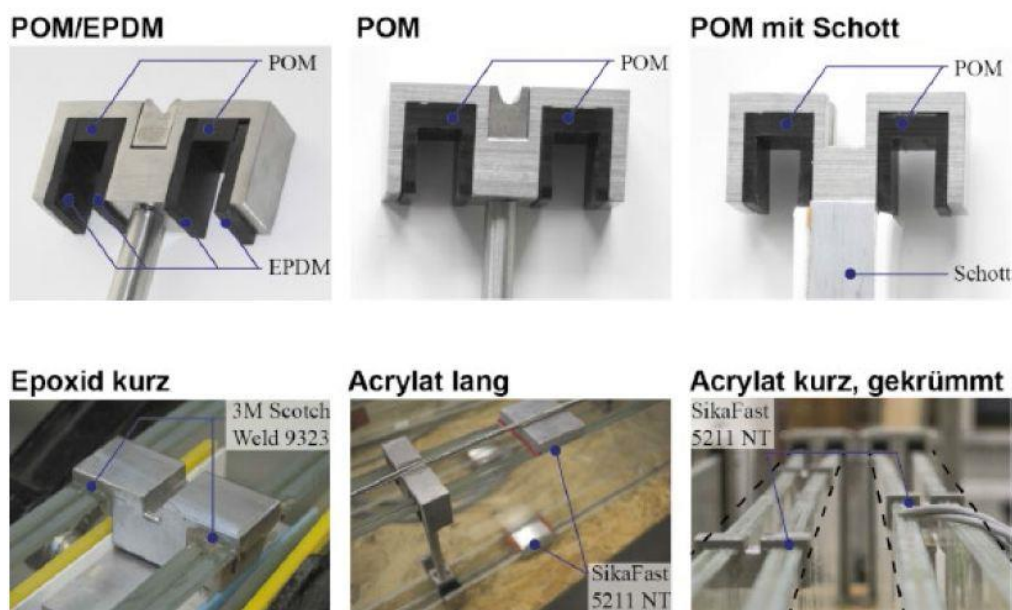


Abb. 7-10 Umlenkkonstruktionen: Klotzungsvarianten u. Klebkonstruktionen [22]

7.3.2 Lastfall: Vorspannung

7.3.2.1 Methoden für die Ermittlung von Spannungen und Verschiebungen

– Analytischer Ansatz

Für die analytische Berechnung wurde die Vorspannung durch äußere Belastung eingebracht. Die Belastung entspricht einer Ankerkraft (P) und einer bzw. zwei Umlenkkräften (U), je nach Anzahl der Umlenkstellen (Abb. VI-11). Bei den Varianten mit zwei Spanngliedern kommt es zur Annullierung der Umlenkkräfte und damit treten kein Moment aus Vorspannung und keine vertikale Verschiebung ($M_y = 0$; $w_z = 0$) auf. Die Drucknormalkraft entspricht in diesem Fall der doppelten Kraft P ($N_x = -2P$).

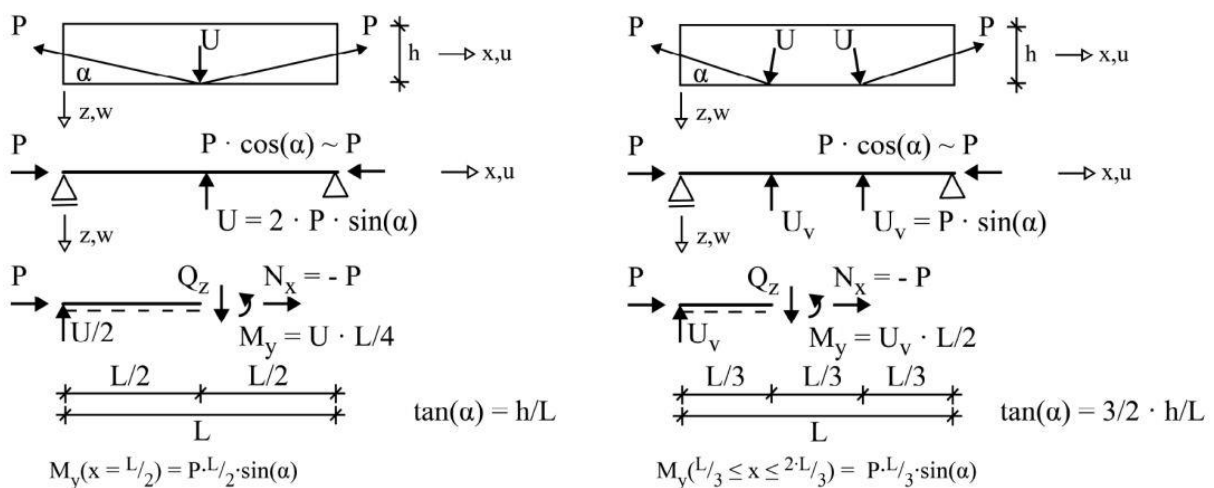


Abb. 7-11 Schnittgrößen der Varianten mit einem Spannglied [21]

Die Spannung innerhalb des Glases kann aus den nun bekannten Schnittgrößen (Moment und Normalkraft) berechnet werden. Die Dehnung erfolgt aus dem Hookeschen Gesetz: $\varepsilon_x = \sigma_x/E$, wobei E das Elastizitätsmodul des Glases ist und 70 GPa beträgt.

Die vertikalen Verschiebungen der Träger nach der Balkentheorie betragen:

$$W_{z,Typ A}(P) = \frac{U \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_y} = \frac{2 \cdot P \cdot \sin(\alpha_{Typ A}) \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_y}$$

$$W_{z,Typ C}(P) = \frac{3 \cdot U \cdot L^3}{76,8 \cdot E \cdot I_y} \cdot \left(1 - \frac{0,8}{3^2} - \frac{0,2}{3^4}\right) = \frac{23}{648} \cdot \frac{P \cdot \sin(\alpha_{Typ C}) \cdot L^3}{E \cdot I_y}$$

Wegen der Imperfektionen in der Trägerform, die in Realität immer vorhanden sind, kommt es zu einer horizontalen Verschiebung der Träger. Die Höhe der horizontalen Verschiebung hängt von der anfänglichen geometrischen Imperfektion v_0 (allgemeine

Annahme $v_0 = L/1000$) als auch von dem Trägheitsmoment um die schwache Achse (I_z) (Abb. VI-12) ab.

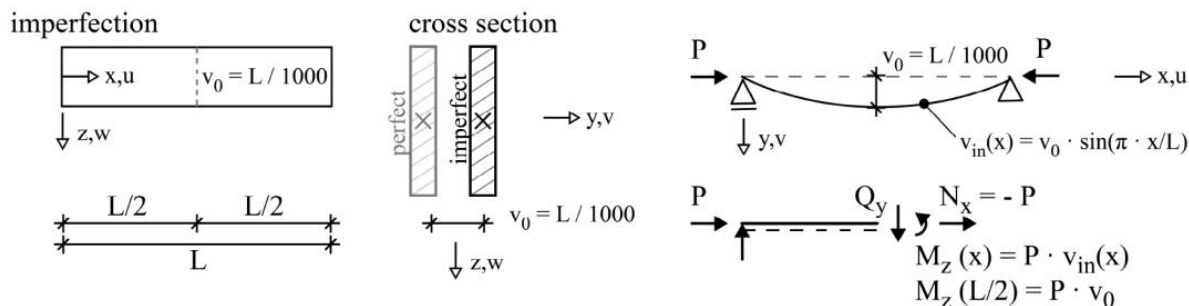


Abb. 7-12 Horizontale Verschiebung: Imperfektionsform - $v_0 = L/1000$ [21]

Die maximale horizontale Verschiebung infolge der Vorspannkraft (P) tritt in der Mitte des Trägers ($x=L/2$) auf und beträgt:

$$v_{max} = \frac{L^2}{\pi^2} \cdot \frac{v_0}{EI_z} \cdot P$$

– Experimenteller Ansatz

Insgesamt wurden 27 Träger auf Raumtemperatur getestet. 17 dieser Träger besaßen POM-Klotzungen, während die restlichen mit Klebekonstruktionen ausgeführt waren. Die Abmessungen und der Aufbau der Träger wurden bereits beschrieben.

Ein Dehnmessstreifen wurde an den Unterkanten aller vier Glasscheiben angesetzt. Um vertikale und horizontale Verschiebungen zu messen, wurden Wegaufnehmer (*transducers*) benutzt. Die Vorspannkraft wurde durch das Anziehen einer Vorspannmutter eingeleitet (Abb. VI-13).

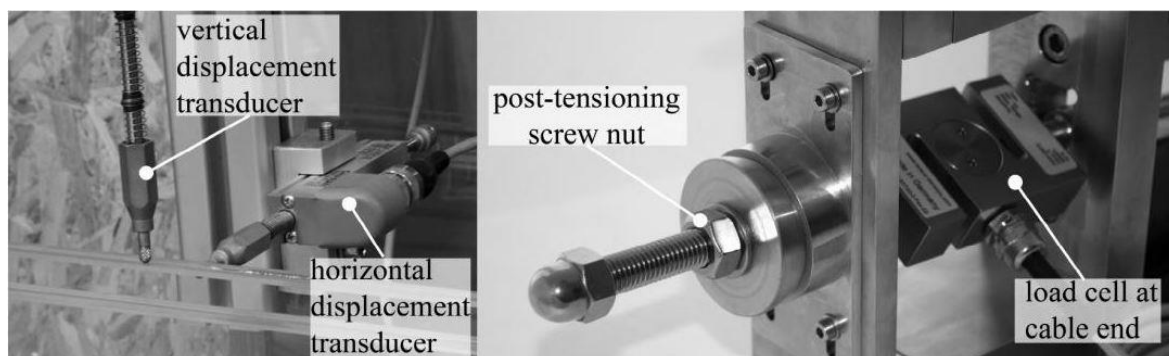


Abb. 7-13 links: Wegaufnehmer rechts: Vorspannmutter und Kraftmesszelle [21]

Die Übertragung der Kraft erfolgte durch einen Verglasungsklotz (*setting-block*) aus Polyoxymethylen (POM) in den Glaskanten an den Trägerenden. Um die Kraftübertragung zu kontrollieren bzw. sichtbar zu machen wurde eine Druckmessfolie (*pressure measurement film*) zwischen der POM-Klotzung und dem Glas eingebaut. Die ungedrückte

Folie ist weiß, erst mit einem aufgebrachtten Druck von mindestens $2,5 \text{ N/mm}^2$ wird sie rot. Bei den Varianten mit einem Spannglied wurde die Kraft in Schritten von 1 kN bis zu maximal 10 kN angehoben. In den Fällen mit zwei Gliedern erhöhte man die Kraft zuerst auf einer Seite und danach auf der anderen Seite.

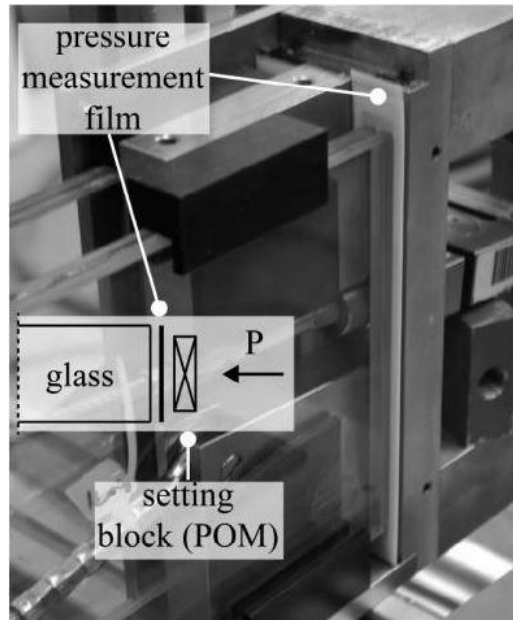


Abb. 7-14 Druckmessfolie [21]

7.3.2.2 Ergebnisse

Druckmessfolie und Kraftübertragung

Die Druckmessfolie zeigte, dass nur bei 4 von 16 Proben die POM-Klotzung einen Kontakt mit den beiden Glasscheiben des gleichen Paketes hatte. Bei den restlichen Proben wurde der Kontakt nur mit einer Glasscheibe eines Paketes erzeugt und damit wurde die Kraft nur in einer Glasscheibe jedes Paketes eingeleitet. Weiters wurde die Kraft über das Zwischenschichtmaterial in die nebenliegende Scheibe überführt. Auf diese Weise wurde am anderen Ende des Trägers nur diese Scheibe gegen die Klotzung gedrückt, was auf der Druckmessfolie eindeutig ablesbar war (Abb. VI-15).

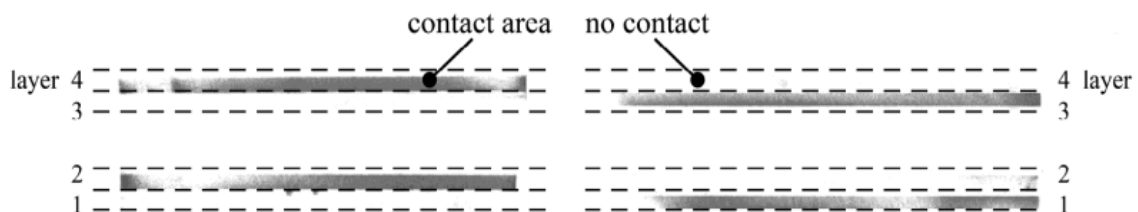


Abb. 7-15 Erzeugte Kraftübertragung gezeigt durch die Druckmessfolie [21]

Es wurde festgestellt, dass dieses Verhalten keine negativen Effekte erzeugt. Dennoch wurde auch klar, dass das viskoelastische Materialverhalten der Zwischenschicht eine entscheidende Rolle bei der Kraftübertragung spielt.

Spannung und Dehnung

Das Experiment zeigte eine um 10% größere Dehnung als analytisch berechnet worden war. Diese Abweichung wird durch die verwendeten Vereinfachungen in den analytischen Annahmen erklärt. Da die Abweichung nicht zu groß ist, ist der analytische Ansatz für die Schätzung von Spannungen und Dehnungen anwendbar.

Vertikalverschiebung

Der Vergleich von Kraft-Verschiebung-Kurven zeigt, dass die Kurven aus experimentellen Ergebnissen immer über der Kurve, die analytisch ermittelt wurde, liegen. (Abb. VI-16; *strichlierte Linie stellt die analytischen Ergebnisse dar*). Die durchschnittliche Steigung der experimentell ermittelten Kurven beträgt 138% für Trägertyp A bzw. 148% für Trägertyp C von der Steigung der analytisch ermittelten Kurven. Der Grund für diese Abweichung liegt in den idealisierten Annahmen bei der analytischen Berechnung als auch in einem eventuellen Aufheben der Träger während des manuellen Vorspannens.

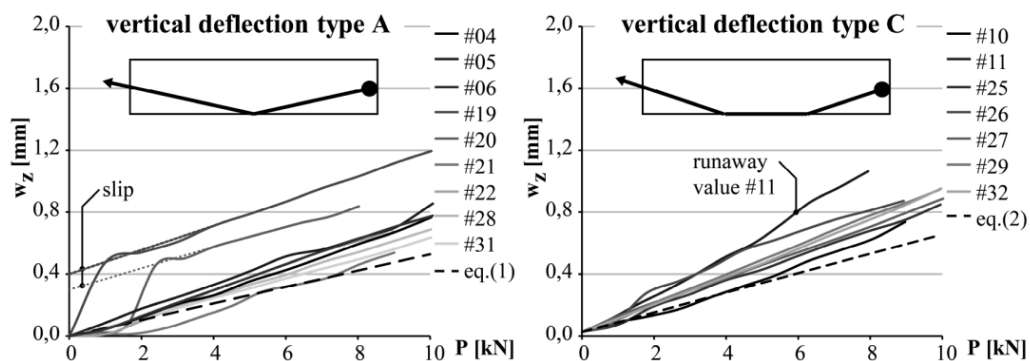


Abb. 7-16 Vertikalverschiebung von exzentrischen Trägertypen [21]

Horizontalverschiebung

Die Messung der Horizontalverschiebung zeigt, dass alle Kraft-Verschiebung-Kurven sich unter den analytisch ermittelten Werten oder in ihrer Nähe befinden. (Abb. VI-17; Abb. VI-18; *strichlierte Linie stellt die analytischen Ergebnisse dar*). Es wurde festgestellt, dass eine in der analytischer Berechnung getroffene Annahme der Imperfektion ($v_0 = L/1000$) größer als die tatsächlich vorhandene ist.

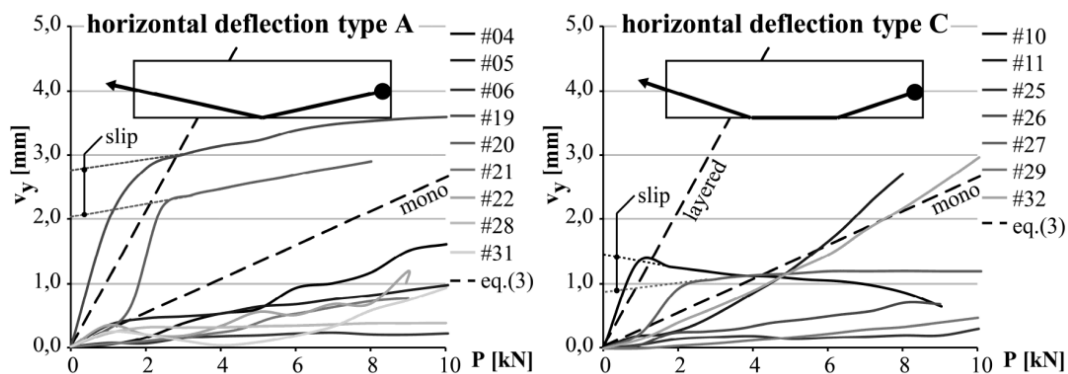


Abb. 7-17 Horizontalverschiebung von exzentrischen Trägertypen [21]

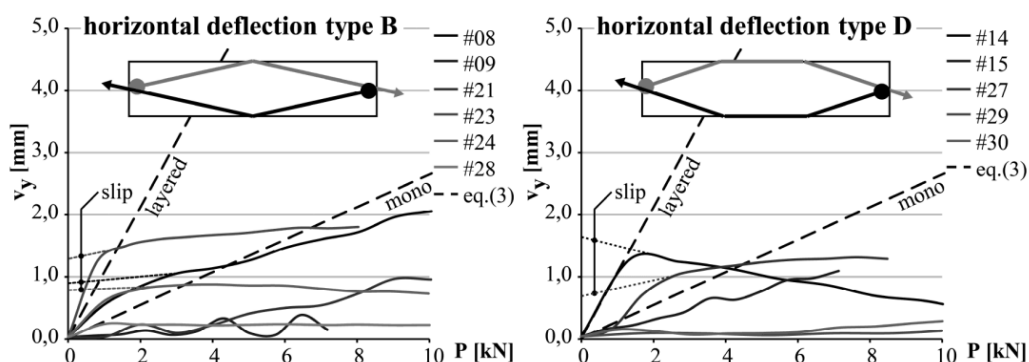


Abb. 7-18 Horizontalverschiebung von zentrischen Trägertypen [21]

7.3.2.3 Schlussfolgerung

Die angewendete Konstruktionsart ermöglicht eine Vorspannkrafteinleitung, durch die ein günstiger Druck innerhalb des Glases erzeugt werden kann. Die Verwendung der Balkentheorie ist möglich, aber es muss bedacht werden, dass sie die Realität bei der Berechnung von Verschiebungen nicht vollständig widerspiegelt. Deswegen wird neben der analytischen auch eine numerische Untersuchung bei der Berechnung von Spannglasträgern empfohlen. Die durchgeführte Analyse enthält keine Langzeiteffekte. Es ist zu erwarten, dass diese Effekte eine Erhöhung der Verschiebungen verursachen können, womit auch ein Verlust der Vorspannkraft bzw. der günstigen Druckspannungen auftreten würde.

7.3.3 Lastfall: Biegebelastung

Die Biegebelastung wurde mit einem Vierpunkt-Biegeversuchsstand aufgebracht. Die Last wurde konstant angehoben, sodass sie eine Spannungsrate von $2 \cdot \frac{N}{mm^2 \cdot s}$ erreichte. Die Messinstrumente wurden auf die gleiche Weise positioniert wie beim Lastfall Vorspannung (Abb. VI-19).

Das Experiment zeigte eine starke Abweichung der Bruchlasten abhängig von der gewählten Konstruktionsart. Die Ursache des Bruches lag im Biegedrillknicken, wegen der

deutlichen seitlichen Verformung, die kurz vor dem Versagen aufgetreten war. Für die Träger mit Klotzungsvarianten der Umlenkkonstruktionen befanden sich die Mittelwerte der Bruchlasten bei etwa 12% bis 26% über denen der Referenzträger (Träger mit den gleichen Abmessungen aber ohne Bewehrung). Die POM-Konstruktion zeigte die größte mittlere Bruchlaststeigerung. Dies wurde durch die geringste horizontale Verschieblichkeit beider Glaspakete gegeneinander erklärt.

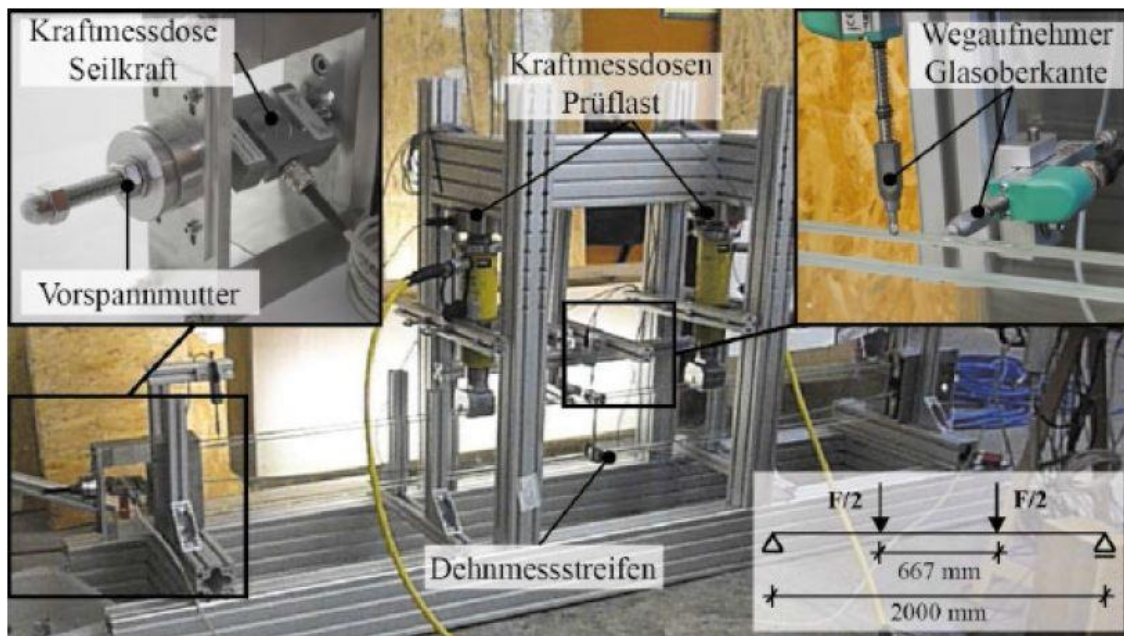


Abb. 7-19 Vierpunkt-Biegeversuchsstand mit Messinstrumenten [22]

Aus der Analyse des Tragverhaltens der verschiedenen Klebkonstruktionen gegenüber den Referenzträgern ergaben sich sehr unterschiedliche Ergebnisse. Als ungünstigste Variante zeigte sich die Klebvariante mit Epoxidharz, da diese noch vor den Referenzträgern versagte. Der Bruchsprung trat unmittelbar am geklebten Umlenkpunkt auf. Die Gründe dafür wurden in der steifen Klebung und in der kurzen Umlenkkonstruktion gefunden. Die besten Ergebnisse bzw. die höchsten Bruchlasten wurden durch Konstruktionen mit Acrylatklebstoff erzielt. Die erzielten Werte liegen zwischen 16 und 42% über den Werten der Referenzträger. Da der weichere Klebstoff und die breitere Umlenkkonstruktion sich positiv auf die Steifigkeit der Gesamtkonstruktion auswirken, wurde diese Konstruktionsart als Vorzugsvariante für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

Nach dem Vergleich der Bruchlasten von schlaff bewehrten und nicht bewehrten Trägern mit jenen von Glasträgern mit vorgespannter Bewehrung stellte man eine Erhöhung der Bruchlastwerte der mechanisch vorgespannten Träger von durchschnittlich 18% fest. Schlussendlich erfolgte eine Analyse unterschiedlicher Bewehrungstypen. Mechanisch vorgespannte Glasträger mit nur einer Umlenkung liefern demnach bessere Ergebnisse. Solche Konstruktionen erreichen eine größere mittlere Bruchlaststeigerung als jene mit zwei Umlenkungsstellen. Die Ursache dafür liegt im Abstand der Umlenkpunkte zwischen den Lasteinleitungen.

7.4 Vorspannkrafteinleitung - verschiedene Variante

Ein weiteres Forschungsprojekt mit mechanisch vorgespannten Glaträgern wurde an der „Delft University of Technology“ durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchung war es, verschiedene Varianten der Vorspannkrafteinleitung zu prüfen. Eine detaillierte Beschreibung der Untersuchungen ist in [23] enthalten.

7.4.1 Trägersausführung

Die Träger wurden als dreischichtiges Verbundglas aus Floatglas gebaut. Die zwei äußeren Glasscheiben waren 6 mm dick und die innere Scheibe besaß eine Stärke von 10 mm. Die Träger waren 0,8 m lang und weisen eine Höhe von 80 mm auf. Spannglieder mit einem Durchmesser von je 8 mm wurden an der oberen und der unteren Seite des Balkens geführt (Abb. VI-20). Für die Verbindung der Glasscheiben wurden UV- bzw. lichterhärtende Klebstoffe verwendet.

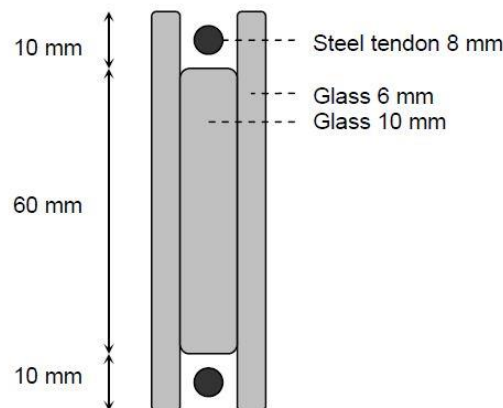


Abb. 7-20 Querschnitt [23]

7.4.2 Krafteinleitung

Da der Baustoff Glas Spannungen nicht umlagern kann, bzw. durch die Spannungsspitzen sehr gefährdet ist, muss eine Vorspannkraft gleichmäßig auf die Kontaktfläche des Glases verteilt werden.

In dieser Forschungsarbeit wurden vier verschiedene Methoden zur Vorspannkrafteinleitung getestet. Bei zwei von ihnen wurde die Kraft direkt auf die Glaträgerenden übertragen und bei den anderen Varianten wurde sie seitlich in die Träger eingeleitet. (Abb. VI-21)

Alle Träger wurden in einem Drucktest geprüft. Die aufgebrachte Kraft wurde auf 31 kN eingestellt. Für die Tests wurde die Länge der Träger auf 0,4 m verkürzt, um ein eventuelles Knicken des Trägers auszuschließen. Statt der Spannglieder wurden Bolzen eingebaut, welche eine punktuelle Krafteinleitung simulieren sollten.

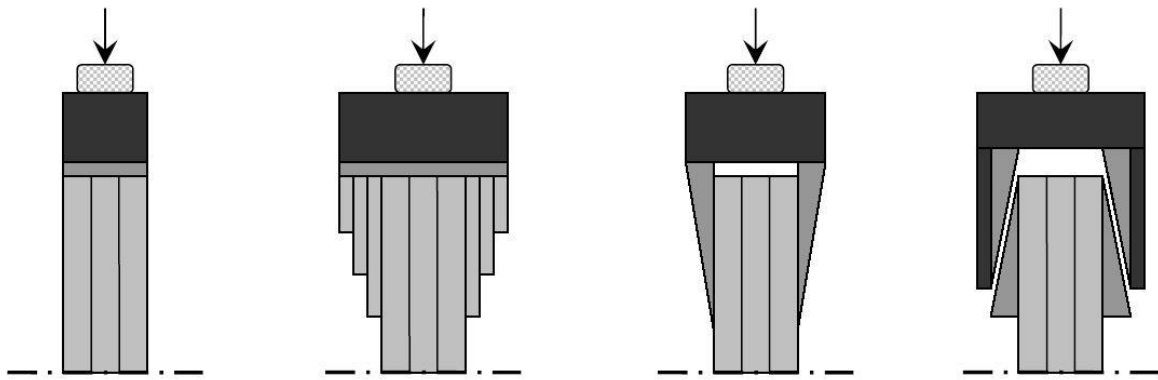


Abb. 7-21 Schematische Darstellung aller Varianten (1-4 von links nach rechts) [23]

7.4.2.1 Methode I

Bei dieser Methode wurde die Vorspannkraft direkt in die kürzere Kante des Trägers durch eine 30 mm dicke Stahlplatte eingeleitet. Zwischen Stahl und Glas wurde eine Aluminiumplatte mit einer Stärke von 2 mm eingefügt, um den direkten Kontakt der Materialien zu vermeiden. (Abb. VI-22).

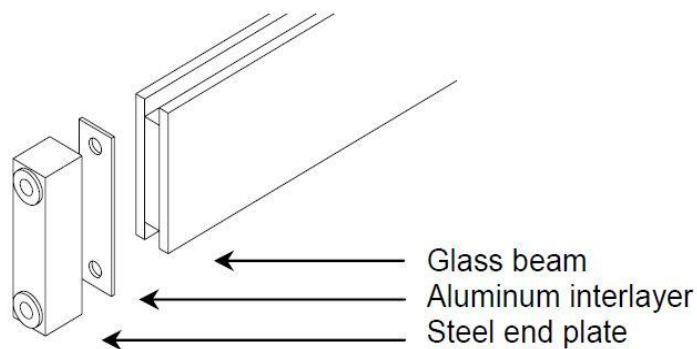


Abb. 7-22 links: Schematische Darstellung des Aufbaus; rechts: Foto der Konstruktion [23]

Der wichtigste Punkt in dieser Art der Ausführung ist das Aneinanderreihen der Glasscheiben an den Trägerenden. Ein maximaler Spielraum der Scheibenlängen muss innerhalb von $\pm 0,1$ mm bleiben. Da in der Glasindustrie oft ein Freiraum von $\pm 2,5$ bis ± 5 mm üblich ist, sollten die Glasscheiben, nachdem sie miteinander verklebt wurden, geschnitten und geschliffen werden.

Während des Drucktests wurde eine Kraft von 110 kN, mit der dazugehörigen Druckspannung von 70 N/mm^2 problemlos eingeleitet. Die Druckkraft wurde erhöht, bis der Träger vollständig versagte. Dies trat bei einem Wert von 122,6 kN mit einer

resultierenden Druckspannung von $78,6 \text{ N/mm}^2$ ein. Die Bruchstelle entstand an dem nicht geschnittenen und geschliffenen Ende. Nach der Analyse wurde festgestellt, dass die Kraft nur in die innere Glasscheibe eingeleitet wurde. Dies hatte eine lokale Spannung von 205 N/mm^2 zur Folge.



Abb. 7-23 Träger während des Drucktests [23]

7.4.2.2 Methode II

Wie bei Methode I ist auch hier eine direkte Krafteinleitung an den Trägerenden vorhanden. Der Unterschied zwischen diesen beiden Methoden besteht in der besonderen Ausführung der Kontaktfläche bei der zweiten Methode. Die Kontaktfläche wurde nämlich mittels zusätzlicher Glaselemente, die auf beide Seiten des Trägers angeklebt wurden, verbreitert, um lokale Spannungen abzubauen (Abb. VI-24). Die Klebung der zusätzlichen Elemente erfolgte, gleich wie bei der Verbindung der Glasscheiben miteinander, mittels UV- bzw. lichterhärtender Klebstoffe. Diese Klebstoffe halten eine Schubspannung von 23 N/mm^2 stand. Da die Klebfläche ziemlich groß ist, bleibt die Schubspannung innerhalb des Klebstoffs auch bei großen Einleitungskräften relativ klein.



Abb. 7-24 links: Schematische Darstellung des Aufbaus; rechts: Foto des Trägers [23]

Diese Trägerprobe hielt einer Kraft von 53 kN mit der zugehörigen Druckspannung von 34 N/mm^2 stand. Bei dieser Last versagte die Klebung zwischen dem Träger und einem Glaspaket. Die Glaspakete als auch der Träger selbst wurden geschnitten und geschliffen, aber bei der Verbindung der Glaspakete wurde der Rand nicht abgeglichen (Abb. VI-25). Deswegen wurde die Kraft ungleich über die Kontaktfläche verteilt, wodurch eine große Pealspannung auftrat, wegen der der Klebstoff letztendlich versagte.

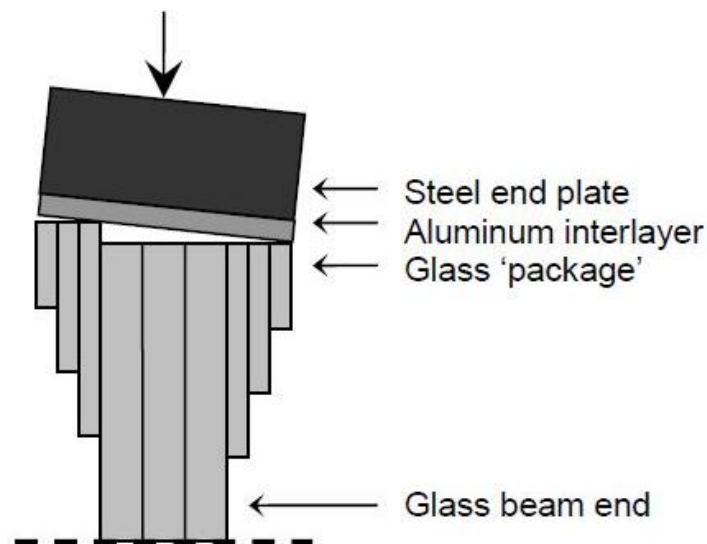


Abb. 7-25 Fehlabgleich beim Ankleben der Glaspakete [23]

7.4.2.3 Methode III

Diese Methode (als auch die Methode IV) unterscheidet sich grundsätzlich von den vorherigen. Der Unterschied liegt in der Kraftübertragung, da hier keine direkte Krafteinleitung in den Glasträgerenden vorhanden ist. Auf beiden Seiten des Trägers wurden kegelförmige Aluminiumkeile (*engl. aluminum wedges*) auf das Glas geklebt. Die Vorspannkraft geht von der Stahlplatte zu den Aluminiumkeilen über und danach über Schubspannung innerhalb der Klebschicht ins Glas. (Abb. VI-26)

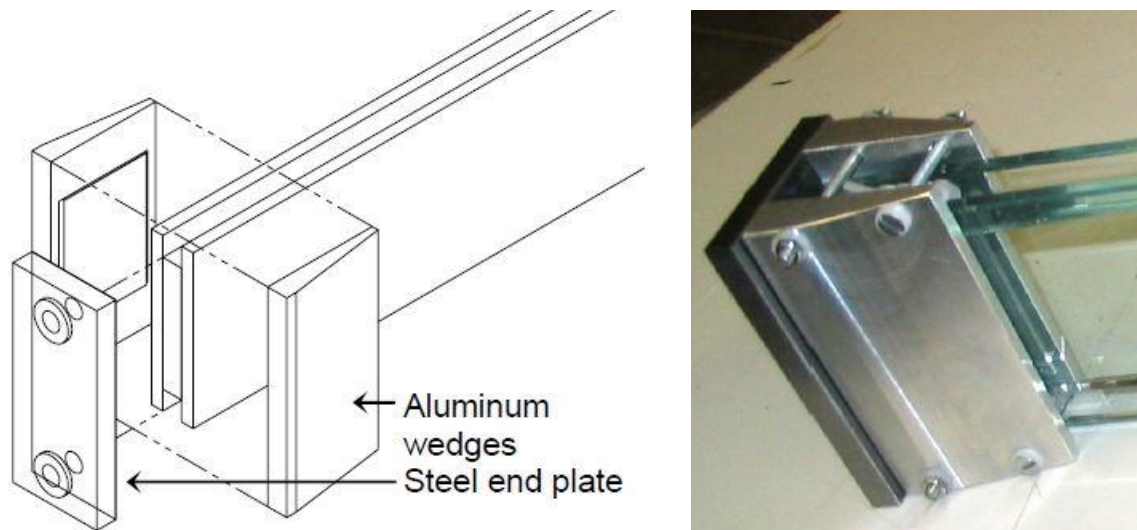


Abb. 7-26 links: Schematische Darstellung des Aufbaus; rechts: Foto der Konstruktion [23]

Diese Konstruktionsart ermöglicht die Einleitung von Kräften von bis zu 42,5 kN mit der zugehörigen Druckspannung von $27,2 \text{ N/mm}^2$. Bei dieser Last versagte die Klebschicht, die damit eine kleine Abbruchstelle im Glas verursachte. Bei der Fertigung der Konstruktion, bzw. bei der Klebung der Aluminiumkeile auf das Glas kam es zu einem Fehlabgleich auf einer Seite des Trägers, was ein inneres Moment und eine nicht gleichmäßig verteilte Kraftübertragung an der Glas-Aluminium-Klebläche zur Folge hatte.

7.4.2.4 Methode IV

Wie bei letzterer Methode ist auch hier eine seitliche Krafteinleitung vorhanden. Die Übertragung erfolgt über Schubspannungen als auch über Reibung.

Auf beiden Seiten der Träger wurden Aluminiumkeile mittels UV- bzw. lichterhärtender Klebstoffe angeklebt. Zwei entgegengesetzte Aluminiumkeile wurden in einer Stahlklammer (*engl. steel bracket*) eingebaut. Die Stahlklammern wurden an den Trägerenden angebracht, sodass ein Aluminium-Aluminium Kontakt erreicht werden konnte. Die Stahlklammern übertrugen die Vorspannkraft auf die Aluminiumkeile und danach erfolgte durch eine Schubwirkung der Klebschichten, eine weitere Übertragung der Kraft ins Glas (Abb.VI-27).

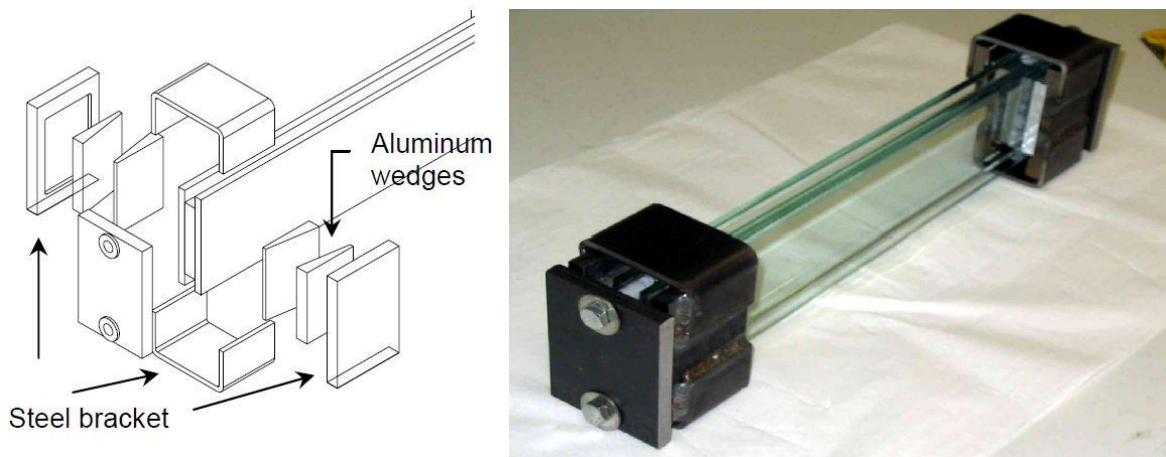


Abb. 7-27 links: Schematische Darstellung des Aufbaus; rechts: Foto des Trägers [23]

Da bei dieser Ausführungsart eine Vorbeanspruchung der Klebschichten infolge einer horizontalen Last auftritt, kommt es zur Reduzierung der Peelspannung innerhalb der Klebschichten.

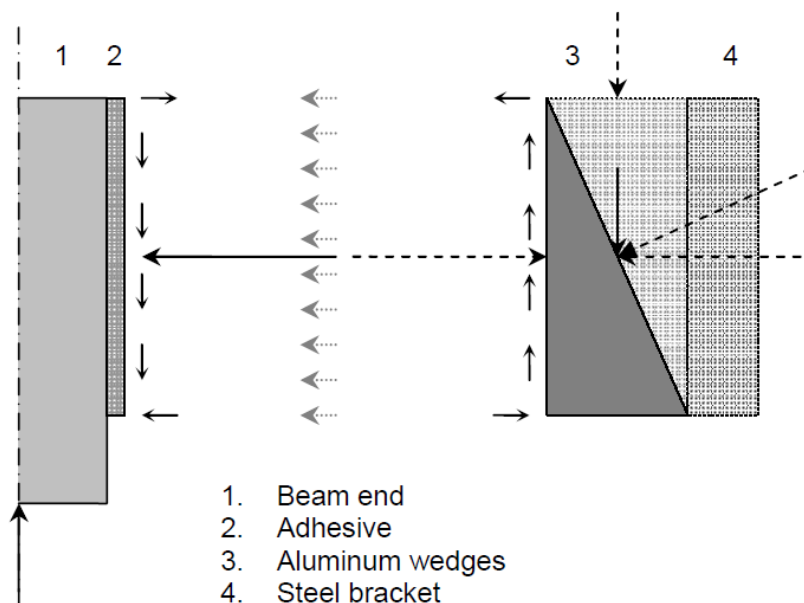


Abb. 7-28 Horizontale Beanspruchung der Klebschicht [23]

Die maximale Druckkraft, die eingeleitet werden konnte, lag bei nur 20 kN, mit der dazugehörigen Druckspannung von $12,8 \text{ N/mm}^2$. Als die Kraft einen Wert von 14 kN erreichte, fing die Stahlklammer an, sich plastisch zu verformen. Wegen dieser plastischen Deformation wurde die Steifigkeit des ganzen Systems reduziert. Die Stahlklammer glitt zu weit hinunter und drückte an den Trägerenden direkt auf das Glas. Als dieser Kontakt erfolgte, wurde der Test beendet.

7.4.2.5 Schlussfolgerung

Nach den Untersuchungen wurde zusammengefasst, dass die Methode I nicht nur am einfachsten in der Ausführung ist, sondern auch die besten Ergebnisse liefert. Die Methode 4 konnte der erforderlichen Kraft von 31 kN nicht standhalten. Mit einer stärkeren Ausführung der Stahlklammer könnte sie verbessert werden, trotzdem ist sie, wegen der zahlreichen dafür nötigen Einzelteile, zu kompliziert herzustellen bzw. ist es schwierig, alle Teile abzugleichen. Das gleiche Problem tritt auch bei den „Methoden II u. III“ auf. Je mehr Teilstücke vorhanden sind, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit eines Fehlableiches, aufgrund dessen es dann zu Spannungsspitzen kommen kann.

In Abb. VI-29 sind die Kraft-Verformungsdiagramme aller Methoden dargestellt.

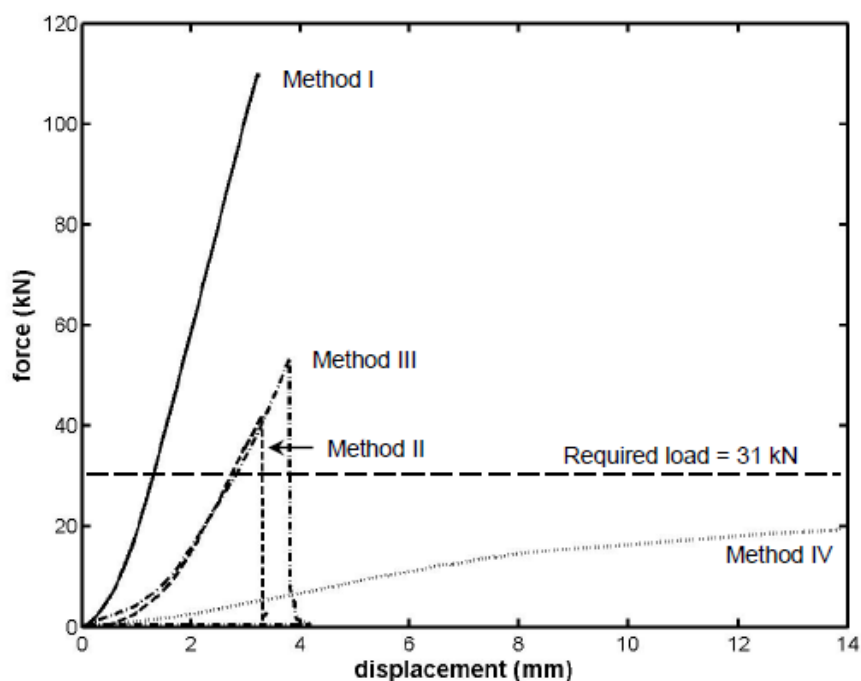


Abb. 7-29 Kraft-Verformungsdiagramme verschiedener Methoden [23]

7.4.3 Biegeversuch

Abschließend wurden zwei identische Träger im Vierpunkt-Biegeversuch getestet. Da die Methode I der Vorspannkrafteinleitung die besten Ergebnisse geliefert hatte, entscheidet man sich für diese Art der Konstruktion. Die Trägereausführung wurde für diesen Fall bereits beschrieben. Die Vorspannkraft wurde erhöht, bis die Druckspannung im Glas einen Wert von 7 N/mm^2 erreichte.

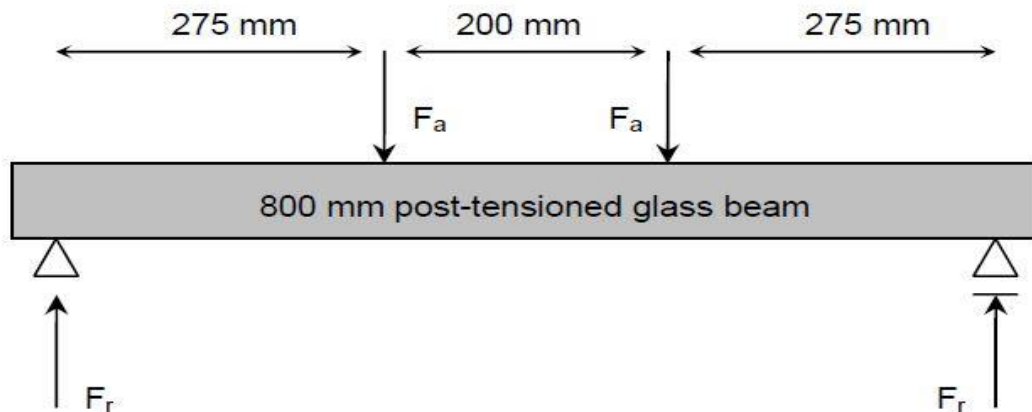


Abb. 7-30 Testaufbau für Biegeversuch [23]

Wie es zu erwarten war, zeigten die beiden Träger fast gleiche Merkmale beim Biegeversuch. Beim Träger I entstand der erste V-Riss bei einer Kraft von $6,9 \text{ kN}$ und einer Zugspannung von $+39,7 \text{ N/mm}^2$ bzw. einer Druckspannung von $-51,5 \text{ N/mm}^2$ (Ia in Abb. VI-31). Die Steifigkeit des Trägers wurde abgemindert, aber trotzdem stieg die Kraft bis auf $8,4 \text{ kN}$. Die Spannungen in diesem Moment betragen $+49,3 \text{ N/mm}^2$ bzw. $-61,1 \text{ N/mm}^2$ (Ib). Bei dieser Kraft traten große Risse auf und die Kraft fiel auf $7,9 \text{ kN}$. Als die Risse die Druckzone innerhalb des Trägers erreicht hatten, fingen sie an sich horizontal auszubreiten. Die Kraft begann wieder zu wachsen, bis neue ähnliche Risse bei $8,5 \text{ kN}$ entstanden (Ic). Vor dem letzten Ansteigen der Kraft fiel sie zuerst auf $6,5 \text{ kN}$. Bei der Last von $11,7 \text{ kN}$ verlor der Träger einen großen Teil seiner Biegesteifigkeit und der Test wurde damit beendet. Beim Träger II entstand der erste Riss bei einer Last von $9,8 \text{ kN}$ (IIa), was ein Absenken zum Wert von $6,5 \text{ kN}$ zur Folge hatte. Die Kraft stieg wieder auf $10,1 \text{ kN}$ an, bis neue Risse entstanden (IIb). Dies verursachte ein neues Abfallen zu einem Wert von $9,6 \text{ kN}$, als die Kraft wieder zu steigen begann. Wie beim Träger I wurde der Test bei der Last von $11,7 \text{ kN}$ beendet.

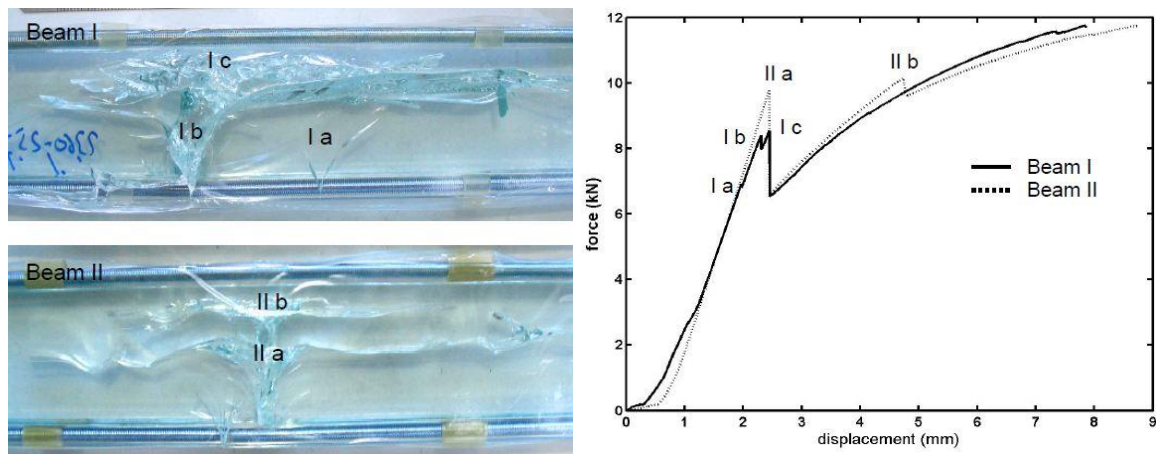


Abb. 7-31 links: Bruchbild; rechts: Kraft-Verformungsdiagramm [23]

7.4.4 Schlussfolgerungen

Am Ende der Untersuchungen wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Ein schrittweises Versagensverhalten eines Verbundglasträgers kann durch das Prinzip des Vorspannens mit an den Trägerenden verankerten Spanngliedern gewährleistet werden.
- Das Vorspannen von Glasträgern erfordert einen sehr präzisen Abgleich der Kontaktfläche über welche die Vorspannkraft eingeleitet wird.
- Bei der direkten Kraftübertragung an den Glasträgerenden kann der Abgleich durch Schneiden und Schleifen der Kanten nach dem Kleben der Glasscheiben miteinander erfolgen.
- Schäden an der Glasoberfläche sind weniger kritisch als erwartet. Fehlableiche und kleine Montagefehler sind jedoch sehr kritisch.
- Eine Erhöhung der Anzahl der Einzelteile im Vorspannsystem vergrößert die Gefahr der Entstehung von Spannungsspitzen, aufgrund der größeren Wahrscheinlichkeit von Fehlableichen bei der Montage.

8 Beispiel – Glasschwert

8.1 Konstruktive Ausbildung

In dem folgenden Beispiel wird ein Glasschwert für eine vertikale Situation in einer Fassade behandelt. Es wurde angenommen, dass sich die von dem Glasschwert gehaltene Fassade in Wien befindet. Die Fassade wird alle 6 m von einem Glasschwert gehalten (Abb. VIII-1). Nach ÖNORM EN 1991-1-4 (Windlasten; siehe Anhang) und mit der angenommenen Einflussbreite von 6 m ergibt sich eine auf das Glasschwert wirkende Windbelastung von 2,95 kN/m (Abb. VIII-2). Die Höhe der Fassade bzw. die Länge des Glasschwertes wurden nicht konstant angenommen, sondern sind sie die Schwerpunkte der Untersuchung.

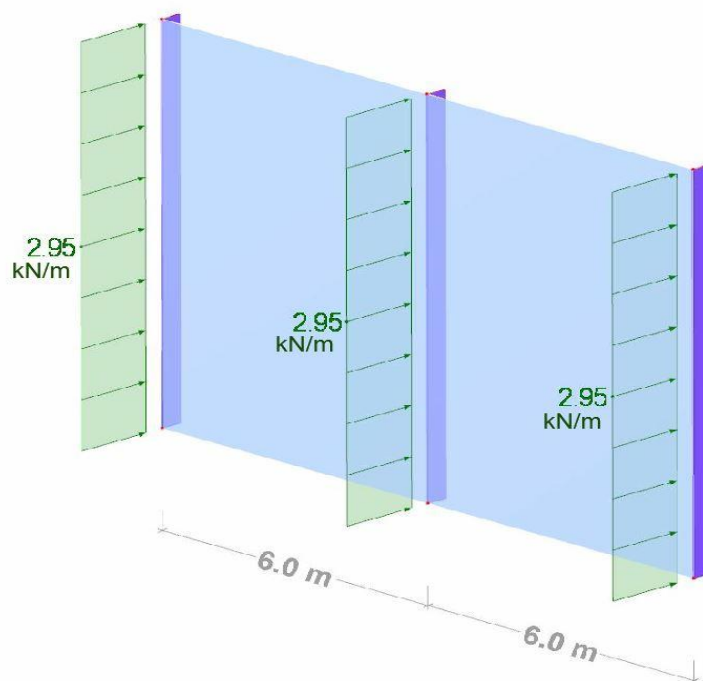


Abb. 8-1 Schematische Darstellung der Fassade

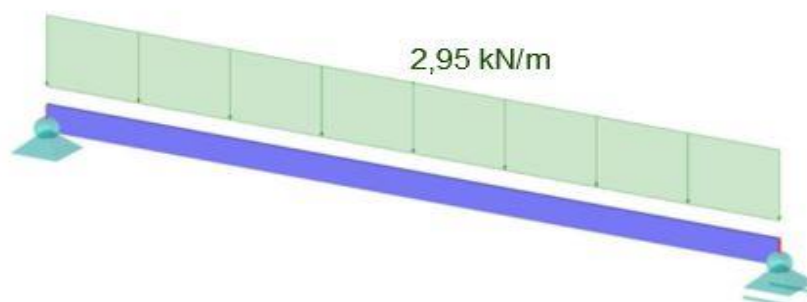


Abb. 8-2 Glasschwert als Einfeldträger - horizontal dargestellt

Im Beispiel wurde die Trägerquerschnittsbreite immer gleich beibehalten. Der Querschnitt besteht aus zwei TVG-Scheiben mit einer Dicke von 8 mm (innenliegend), zwei TVG-Scheiben mit einer Dicke von 6 mm (außenliegend) und 3 zwischen den Glasscheiben liegenden PVB-Folien mit einer Stärke von je 1,52 mm (Abb. VIII-3) (der spätere Einbau der Stahlprofile bringt auch keine Veränderungen in der Querschnittsbreite).

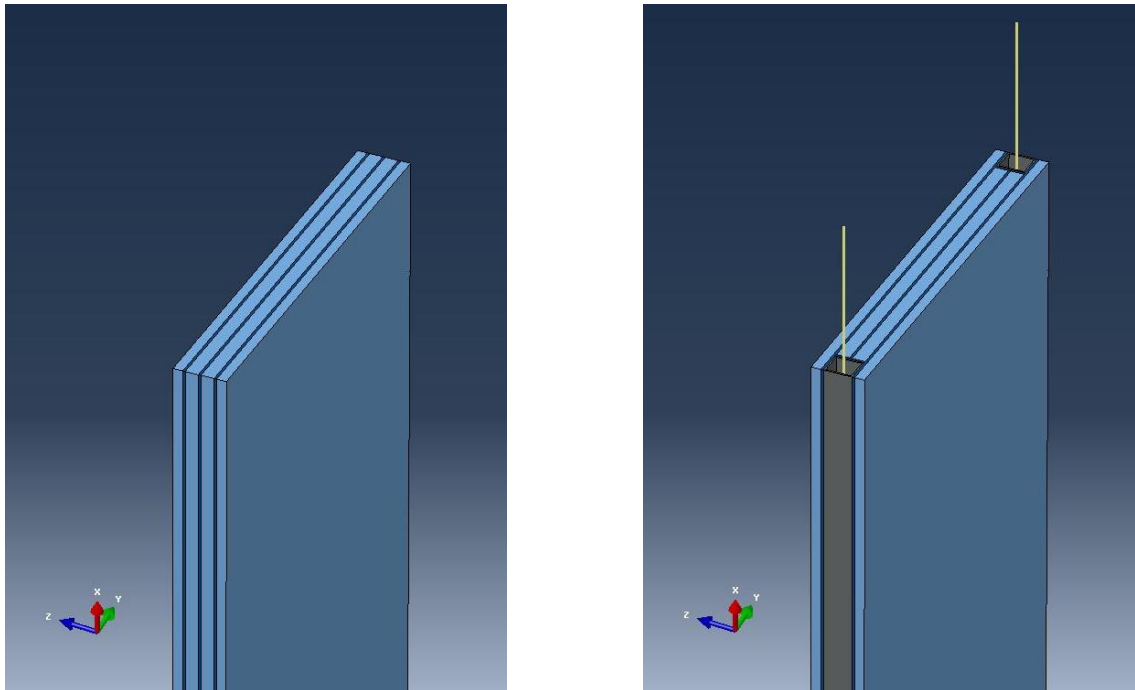


Abb. 8-3 Verschiedene Trägerquerschnitte (links: unbewehrter Querschnitt; rechts: Querschnitt mit Stahlprofilen und Spannseilen)

An den Enden der Glasscheiben wurden Stahlklötze angebaut (Abb. VIII-4). Die Glasscheiben sind 7cm an beiden Seiten in den Stahlblöcken eingefügt (Abb. VIII-5). Um einen harten Kontakt zwischen dem Stahl und dem Glas zu vermeiden, wurden Aluminiumplatten und Vergussmörtel (Hilti HIT-HY 70) eingefügt (Abb. VIII-6) (die detaillierte Darstellung des Trägers ist im Anhang zu finden). Die Bemessungslängen (z. B. 8m, 10m...) stellen immer die Länge zwischen den Stahlblöcken dar. Der Träger wurde statisch bestimmt gelagert. Die Stabilität des Glasbauteiles ist in der Berechnung (im Rahmen dieser Arbeit) nicht betrachtet worden und muss konstruktiv gelöst werden.

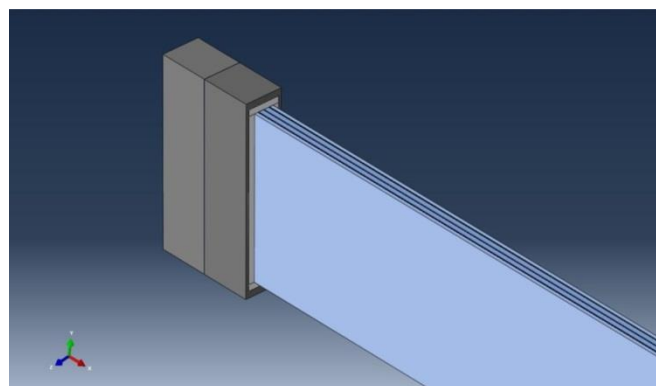


Abb. 8-4 Auflagerbereich

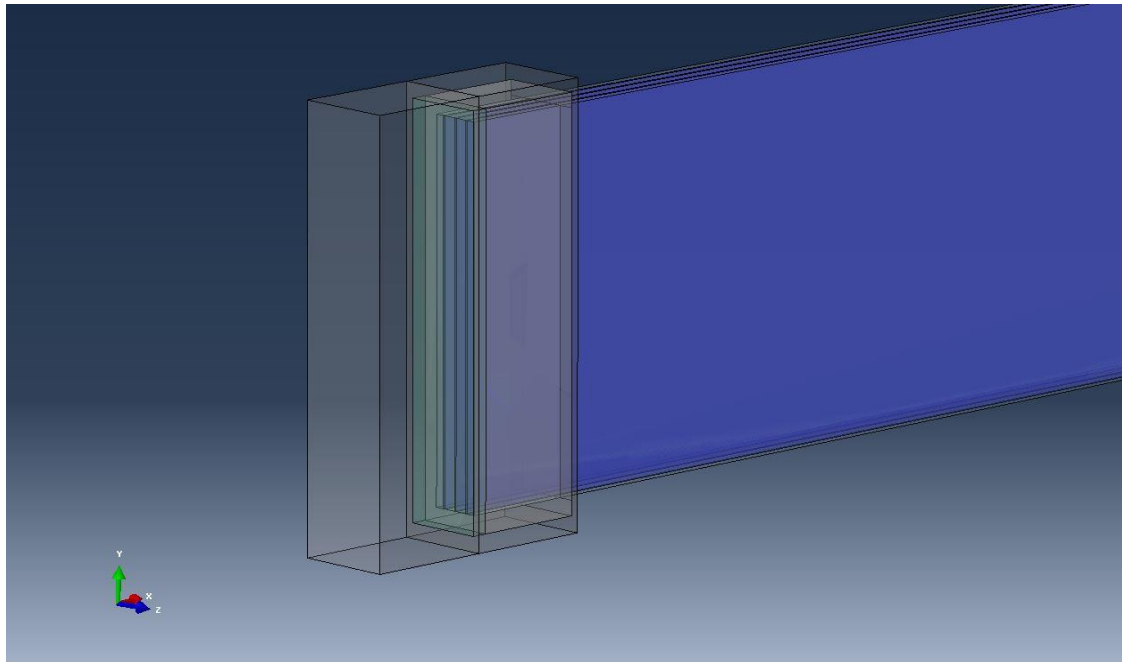


Abb. 8-5 Glasscheibenende innerhalb des Stahlblocks

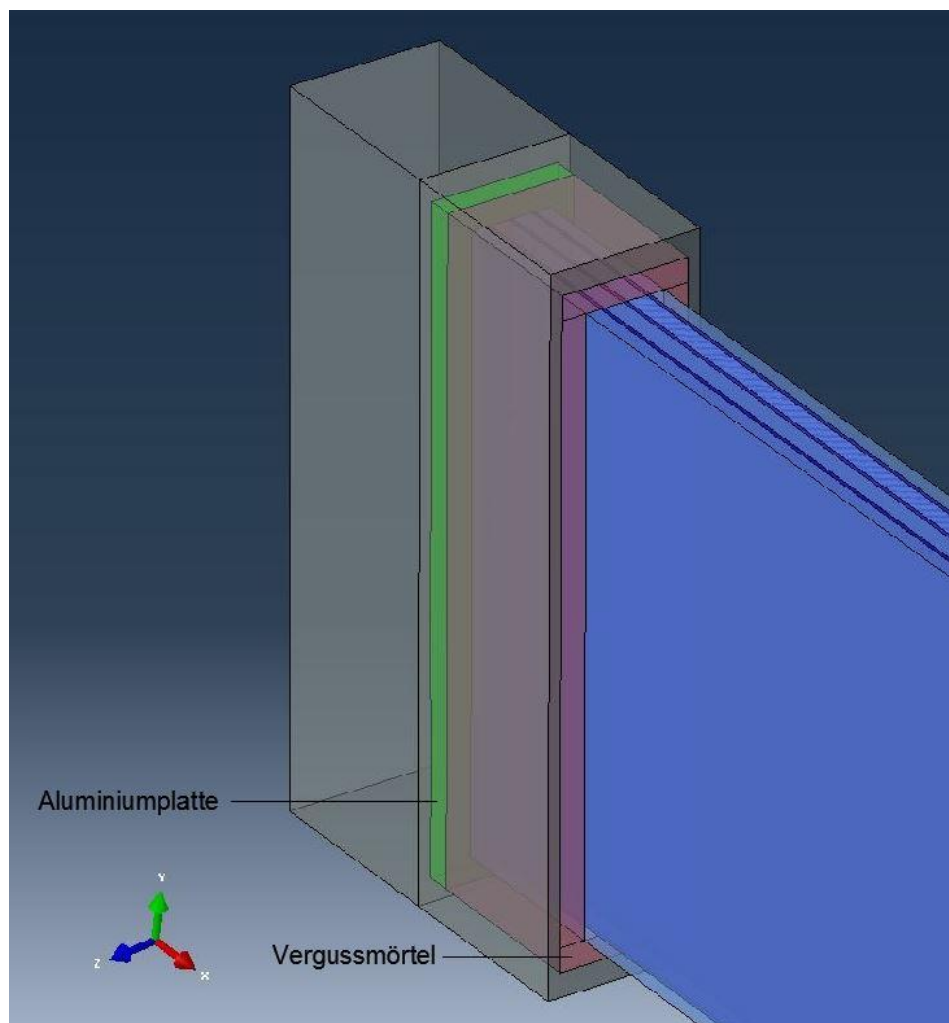


Abb. 8-6 Trägerelemente innerhalb des Stahlblocks: Aluminiumplatte (grün); Vergussmörtel (rot)

8.2 Numerische Untersuchung

Das Ziel der folgenden numerischen Untersuchungen ist es zu zeigen, ob eine Erhöhung der Tragfähigkeit, in diesem Fall, eine Verlängerung des Trägers (Glasschwertes), durch eine Vorspannung machbar ist. Ebenso ist auch eine Untersuchung durchzuführen, in der gezeigt werden soll, in welchem Maß eine Verlängerung möglich wäre. Die erste Studie bietet einen Vergleich zwischen einem nicht bewehrten und einem mechanisch vorgespannten Träger. Die zweite Studie stellt eine Beziehung zwischen der Querschnittserhöhung und der Verlängerung des vorgespannten Trägers her.

8.2.1 Finite-Elemente Modell

Für die numerische Untersuchung wurde die Software „Abaqus CAE“ benutzt. Die Elemente wurden in zwei verschiedene Varianten geteilt. Die Elemente aller Teile des Trägers (Glasscheiben, PVB-Folien, Stahlklötze, Aluminiumplatte, Stahlprofile, Mörtel) außer der Spannseilelemente wurden gleich definiert:

- *Glasscheiben, PVB-Folien, Stahlklötze, Aluminiumplatte, Stahlprofile, Mörtel:*
 - Elementtyp: Solid, Homogeneous
 - Elementtyp (für Netz): 3D Stress - 8 Knoten (C3D8R)
 - Elementform (für Netz): Hex

- *Spannseile*
 - Elementtyp: Beam, Truss
 - Elementtyp (für Netz): Truss - 2 Knoten (T3D2)
 - Elementform (für Netz): Line

Darüber hinaus wurde Materialverhalten aller verwendeten Materialien als „linear-elastisch“ definiert. Die Verbindung aller Teile erfolgte mit dem Typ „Tie“, außer bei der Verbindung zwischen den Seilen und den Stahlblöcken, die als „Coupling“ definiert wurde. Die Vorspannkraft wurde über die Temperaturänderung in den Seilen erzeugt. Als Ergebnisse wurden immer die Knotenspannungen abgelesen.

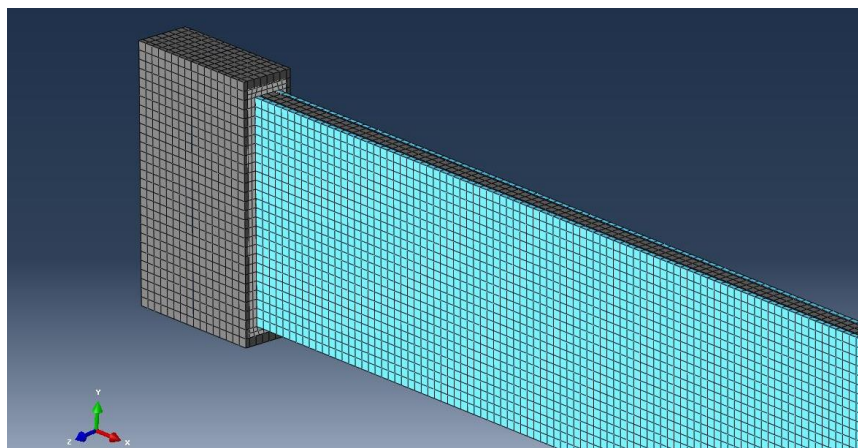


Abb. 8-7 Träger – angezeigt durch Netzelemente (Elementlänge in X-Richtung = 1 cm)

8.2.2 Parameterstudie 1

Das Ziel der ersten Studie war der Versuch, eine mögliche Erhöhung in der Tragfähigkeit (Verlängerung des Trägers), nach dem Vorspannen zu erzeugen.

Die Höhe des Trägers wurde auf 25 cm begrenzt. Der Träger wurde aus insgesamt vier TVG-Glasscheiben gebaut. Die zwei inneren Scheiben besaßen eine Stärke von 8 mm, während die äußeren zwei 6 mm dick waren. Zwischen den Glasscheiben wurden PVB-Folien mit einer Dicke von 1,52 mm eingebaut. Der Träger wurde statisch bestimmt gelagert, aber da die Glasscheiben von Stahlklötzen gehalten wurden, zeigten sie ein Tragverhalten wie bei einer beidseitigen Drehfederlagerung.

Wegen seiner geringen Biegezugfestigkeit ist die maximale Zugspannung (engl. Max. Principal) ein maßgebender Spannungswert für Glas. Die Ergebnisse aus der Software „Abaqus CAE“ zeigen, dass die maximale Zugspannung, infolge einer Vorspannung und Windbelastung bei dem untersuchten Träger immer in den äußeren Glasscheiben (symmetrisch) herrscht. Und zwar unmittelbar neben dem Stahlklotz (Abb.VII-8), der neben Y- und Z- auch in X-Richtung (Längsrichtung) gelagert wurde.

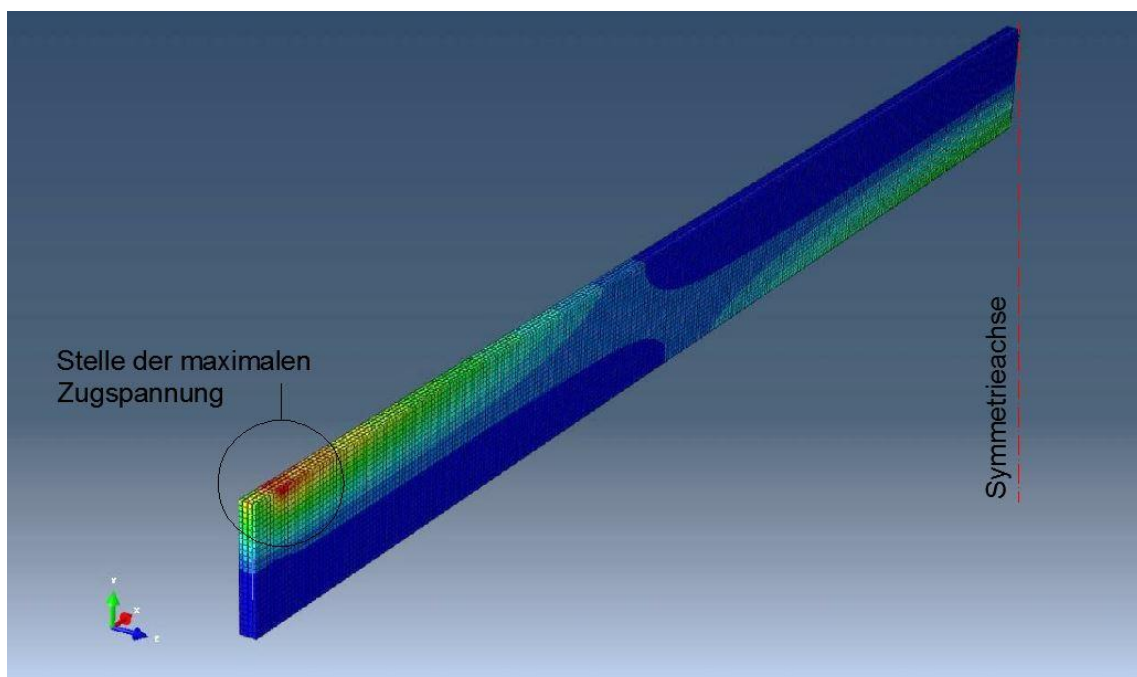
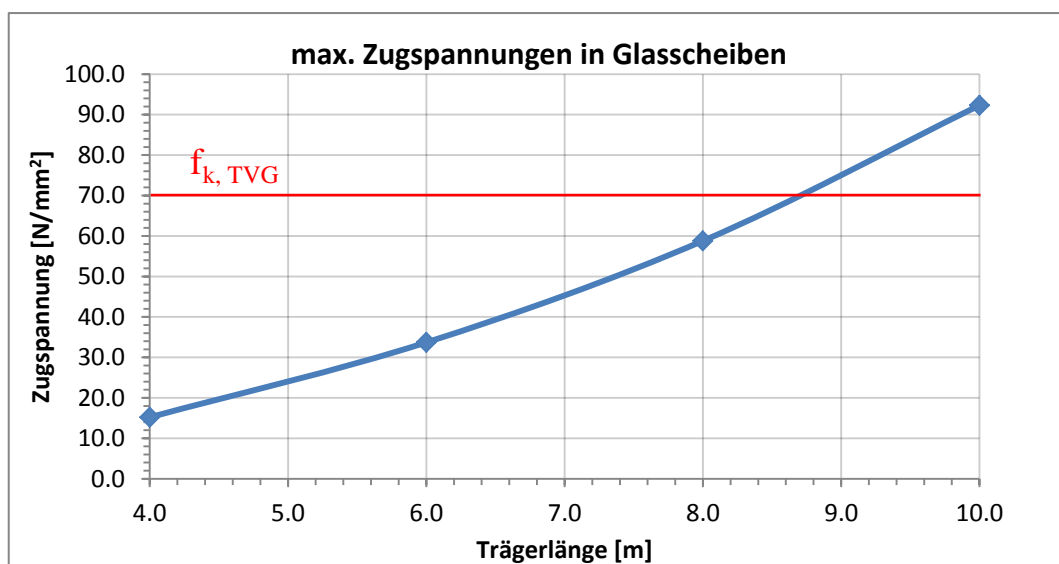


Abb. 8-8 Stelle der maximalen Zugspannung (rot) im Glas (dargestellt am Halbträger)

8.2.2.1 Unbewehrter Träger

Die erste Untersuchung wurde auf einem unbewehrten Träger mit schon beschriebenem Querschnitt durchgeführt. Es wurden vier unterschiedliche Längen des Trägers (4m, 6m, 8m u. 10m) geprüft. Die Windbelastung betrug 2,95kN/m. Dividiert man die Windbelastung mit der Trägerbreite von 28 mm, bekommt man eine Druckbelastung von 105,357 kN/m². Die Belastung wurde auf die Trägeroberkante aufgebracht.

Die Kurve aus dem Diagramm VII-1 zeigt die maximale Zugspannung in der Glasscheibe des Trägers. Es ist herauszulesen, dass mit dem schon definierten Trägerquerschnitt eine Benützung für die gegebene Belastung, nur bis zu einer Länge von etwa 8,5 m möglich wäre, weil die Zugfestigkeit der TVG-Scheiben 70 N/mm² beträgt.



Diag. 8-1 Maximale Zugspannungen für die unbewehrten und unterschiedlich langen Glasträger

Hinweis: Die Punkte in allen Diagrammen stellen immer die untersuchte Länge des Trägers dar. Danach sind sie linear miteinander verbunden.

8.2.2.2 Träger mit Stahlprofilen

Um eine Verlängerung des Trägers zu erreichen, wurden als erstes zwei Stahlprofile eingebaut. Der Querschnitt der Profile wurde so gewählt, dass er einen späteren Aufbau des Trägers mit den Spannseilen ohne Änderungen im Querschnitt ermöglicht. Die äußeren Scheiben sind gleich geblieben, die inneren wurden aber beidseitig verkürzt. Da der Träger als Halter einer Fassade vorgesehen wurde und die Windbelastung zwischen Druck und Sog variieren kann, wurde er beidseitig bewehrt (Abb.VIII-9).

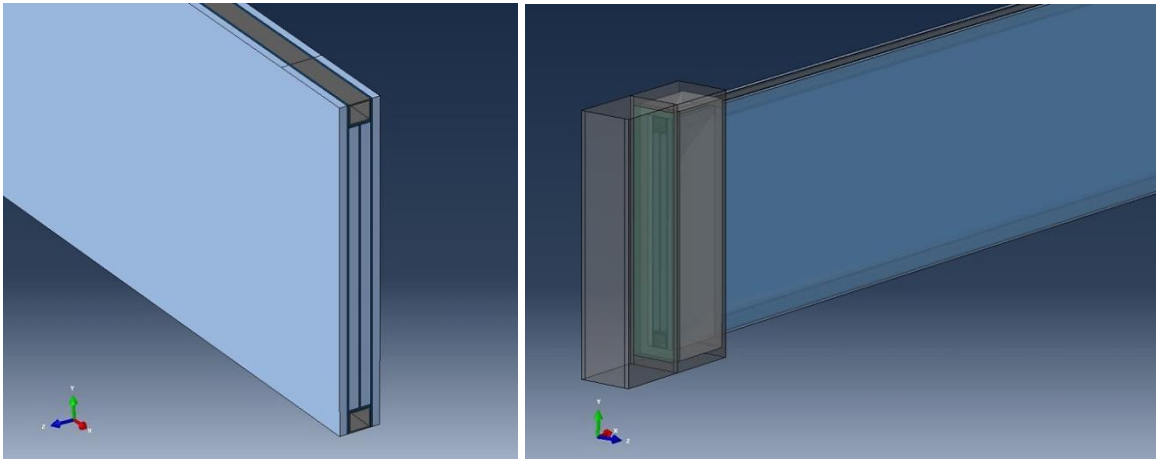
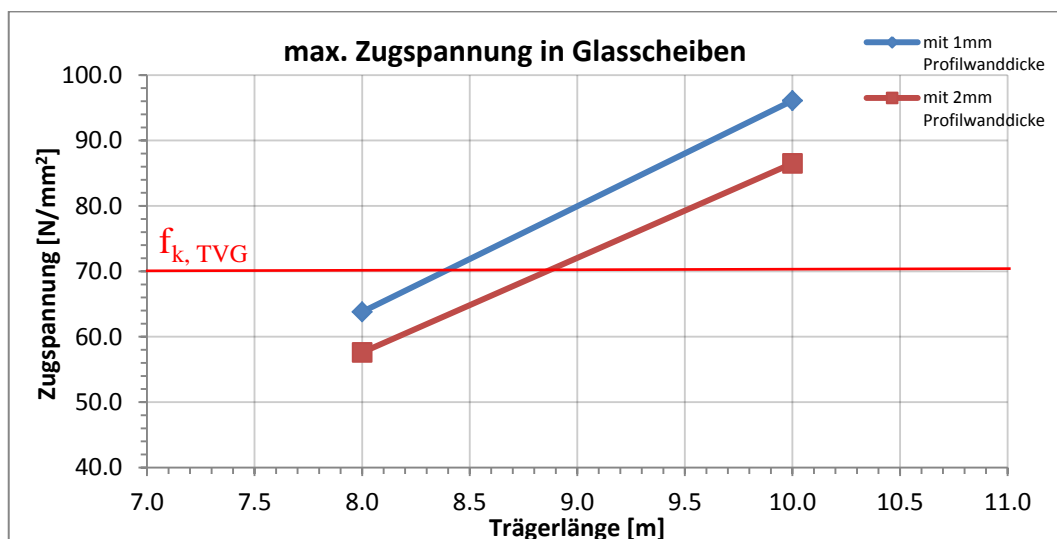


Abb. 8-9 Ansicht des Glasträgers mit Stahlprofilen

Die Stahlprofile wurden in zwei verschiedenen Varianten (nach verschiedenen Wanddicken: 1 mm bzw. 2 mm) ausgeführt.



Diag. 8-2 Maximale Zugspannungen in Glasscheiben (in Abhängigkeit von Profilwanddicke und Trägerlänge)

In Diagramm VIII-2 ist zu sehen, dass das alleinige Bewehren ohne Vorspannen des Glaträgers nur eine geringe Erhöhung in der Tragfähigkeit bewirkt. Die maximale Trägerlänge erhöht sich nur um circa 0,5 m.

8.2.2.3 Einleitung von Vorspannkraft

Für die Einleitung der Vorspannkraft wurde die Methode I (direkte Krafteinleitung) aus dem vorherigen Kapitel benutzt. Durch die Stahlprofile wurden Spannglieder eingeführt und an den Enden der Stahlblöcke befestigt. Die Spannglieder besaßen einen Durchmesser von 10 mm. Zwischen den Stahlblöcken und Glasscheiben wurde eine Aluminiumplatte mit einer Dicke von 10 mm eingefügt, um Spitzenspannungen im Glas abzubauen bzw. einen harten Kontakt zu vermeiden. Die Kraftübertragung erfolgte von den Stahlblöcken über die Aluminiumplatten in die Glasscheiben. Der Aufbau des Trägers mit Spannseilen ist in Abb. VIII-10 zu sehen (für eine detaillierte Darstellung siehe Anhang).

Hinweis: Durch Krümmung der Vorspannachse bei der Verformung des Trägers entsteht ein Kontakt zwischen den Seilen und Stahlprofilen. Wegen einer komplizierten und aufwendigen Berechnung wurde kein Kontakt bei der Untersuchung berücksichtigt.

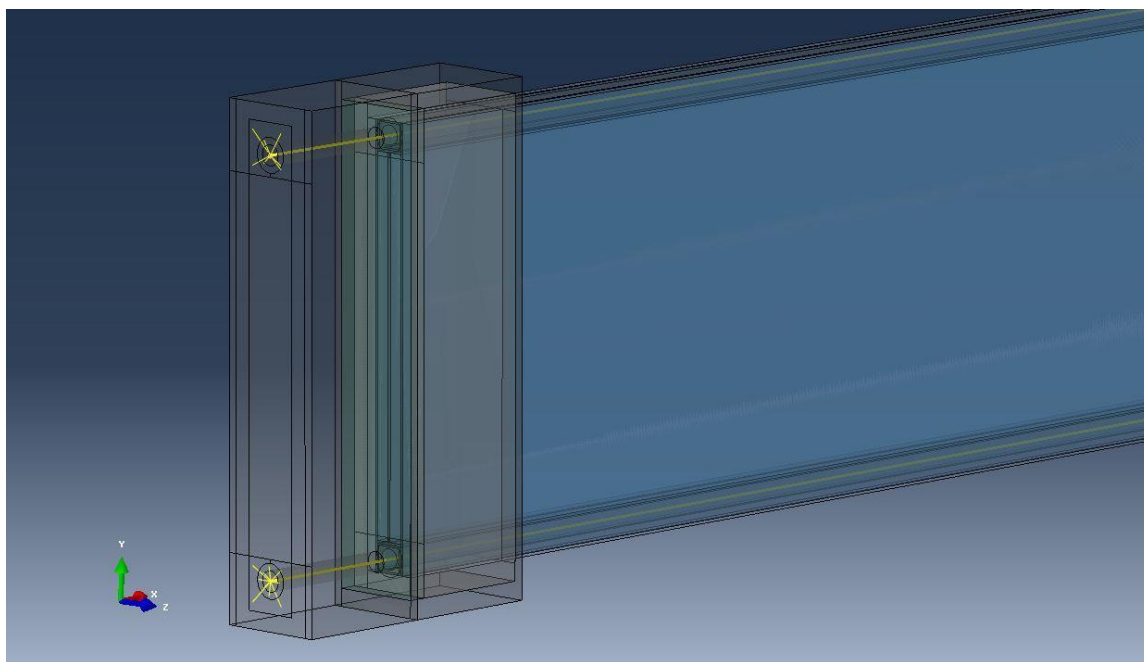


Abb. 8-10 Darstellung der Spannglieder (gelb)

Die Vorspannkraft wurde in Schritten von 10 kN bzw. 20 kN pro Seil auf den Träger mit 8m Länge aufgebracht. Die maximal eingeleitete Kraft betrug 80 kN pro Seil.

Hinweis: Für die Spannseile wurden Spannstahllitzen 7-drähtig nach EN 10138-3 gewählt. Die gewählten Spannseile sind für eine maximale Kraft von 97,4 kN vorgesehen. Sie wurden aber in der numerischen Berechnung mit einer maximalen Vorspannkraft von 80 kN pro Seil gerechnet. Der Grund dafür ist, dass die Mitbewegung vom Seil bei der Biegung des Trägers infolge von Windlasten nicht berücksichtigt wurde, welche eine Erhöhung der Seilkraft hervorruft.

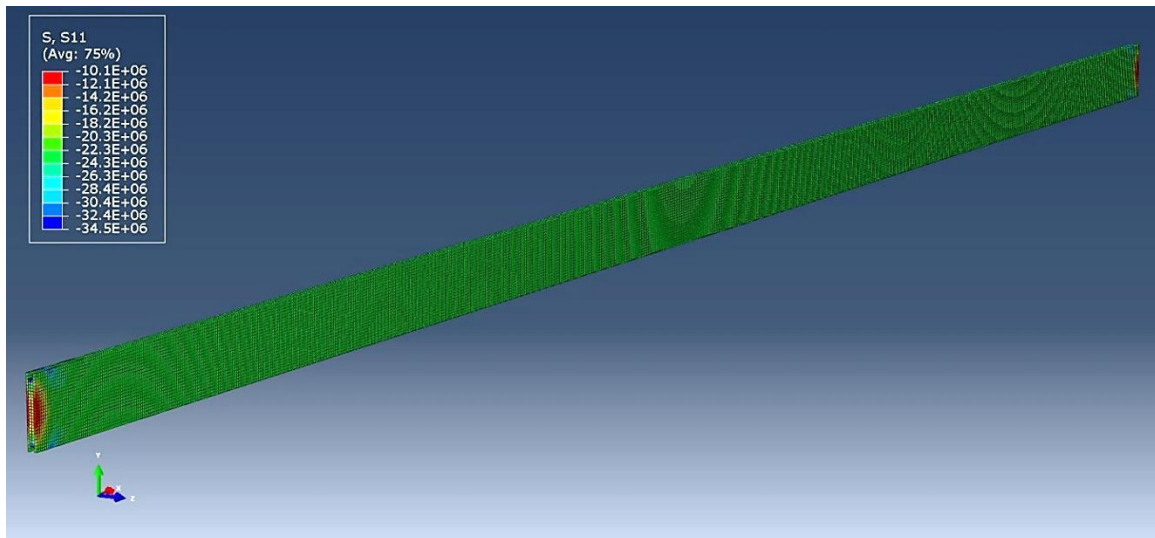


Abb. 8-11 Druckspannungen im Glasträger infolge einer Vorspannkraft von $2 \cdot 80 \text{ kN}$

Mit den maximalen Spannkraften ($2 \cdot 80 \text{ kN}$) wurde eine Druckspannung von etwa 23 N/mm^2 in den Glasscheiben erzeugt.

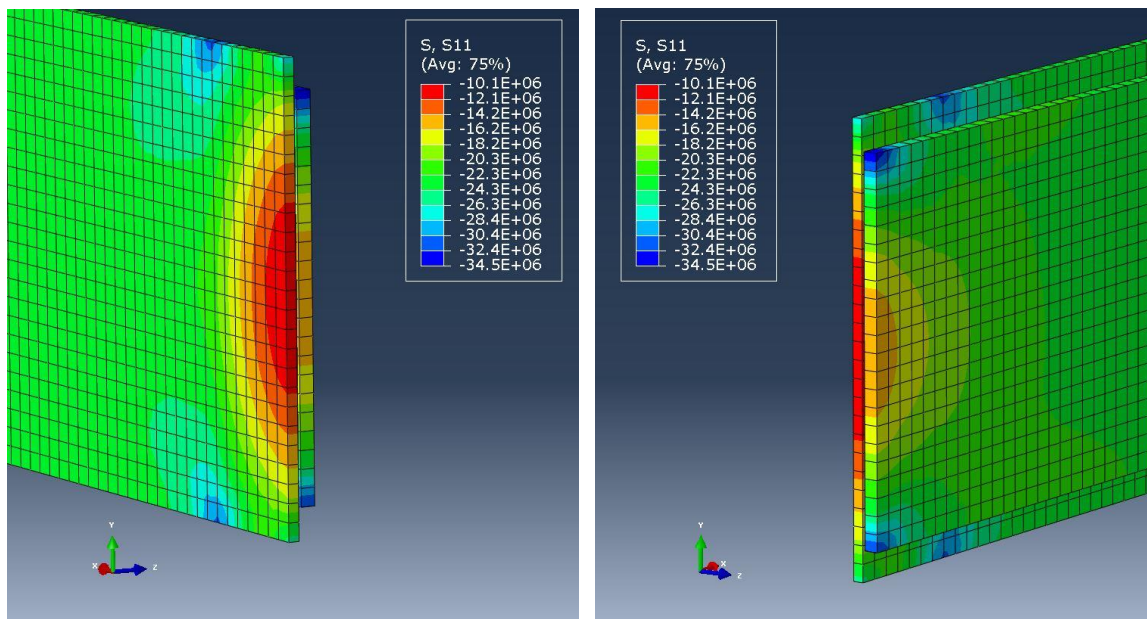


Abb. 8-12 Vorspannkrafteinleitung ($2 \cdot 80 \text{ kN}$) gezeigt durch die Druckspannungen (S_{11}) (dargestellt an einer äußeren und einer inneren Glasscheibe)

In der Untersuchung wurde auch kontrolliert, in welchem Maß ein Querzug im Glas infolge der eingeleiteten Vorspannkraft herrscht. In Abbildung VIII-13 ist die Verformung der Glasscheibenenden infolge einer Vorspannkraft von $2 \cdot 80 \text{ kN}$ (ohne Windbelastung) dargestellt.

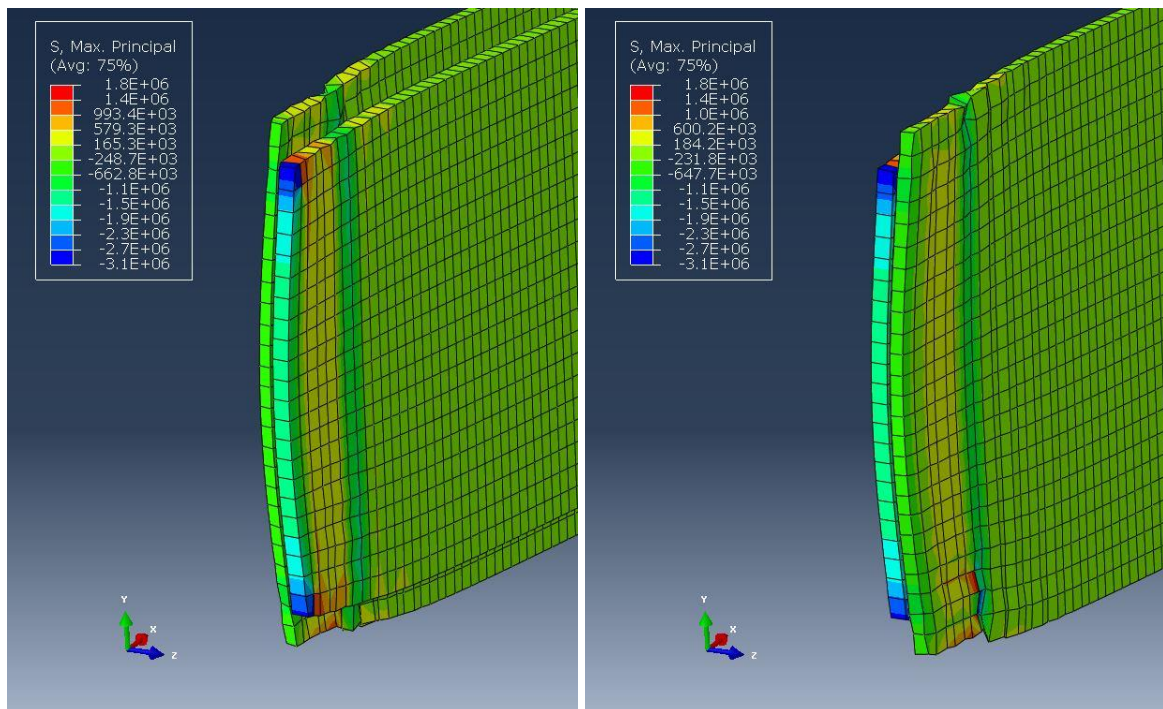
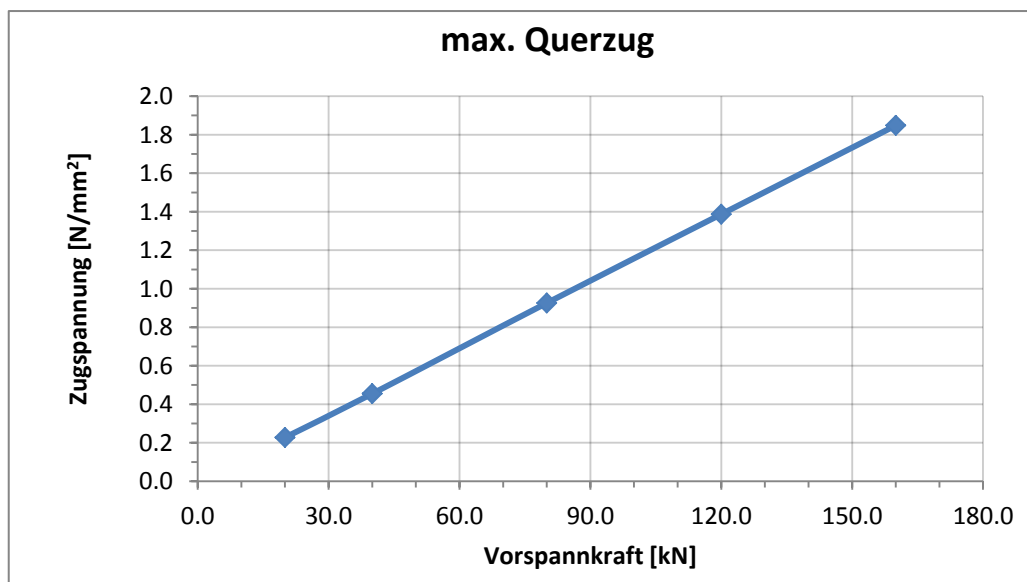


Abb. 8-13 Verformung an Glasscheibenenden infolge Vorspannung (2*80 kN; Vergrößerungsfaktor: 1000) – Zugspannungen

In Diagramm VIII-3 ist die Beziehung zwischen der eingeleiteten Kraft und dem dazukommenden Querzug im Glas zu sehen. Die Werte zeigen, dass die Zugspannungen infolge der Vorspannkraft kein kritisches Thema sind, denn die Zugfestigkeit von TVG-Scheiben beträgt 70 N/mm^2 .



Diag. 8-3 Maximale Querzugspannung (abhängig von der Vorspannkraft)

8.2.2.4 Vorspannung und Windbelastung

Da die von der Belastung beeinflusste Trägerbreite (Stahlprofil und zwei äußere Scheiben) 2,95 cm beträgt, wurde nun die Windbelastung als Druck mit dem Wert von 100,0 kN/m² aufgebracht. Die resultierenden Zugspannungen in den Glasscheiben aus der Belastung und der maximalen Vorspannkraft sind in Abb. VIII-14 zu sehen.

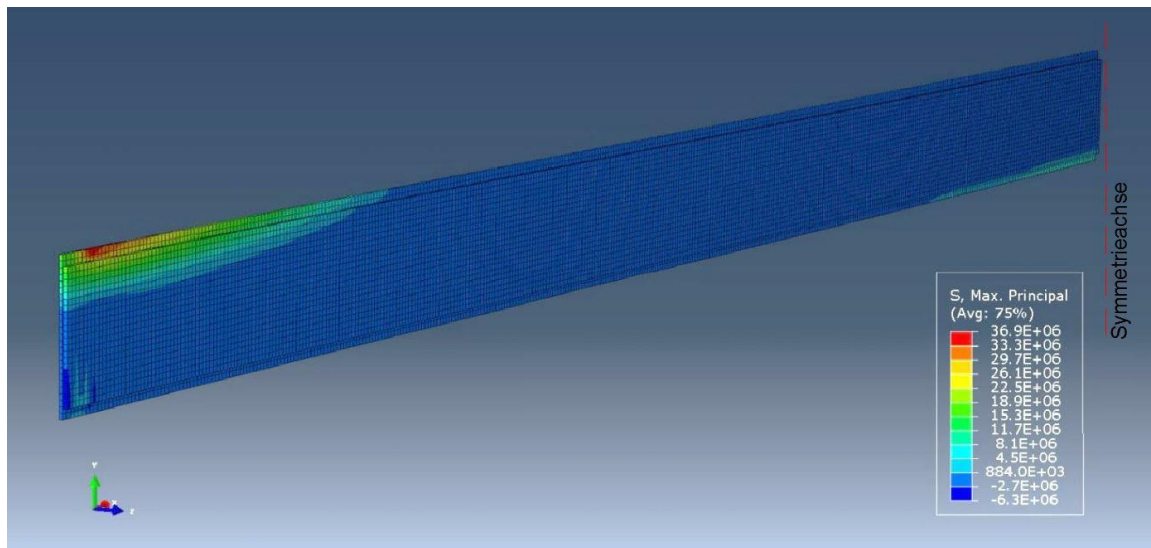
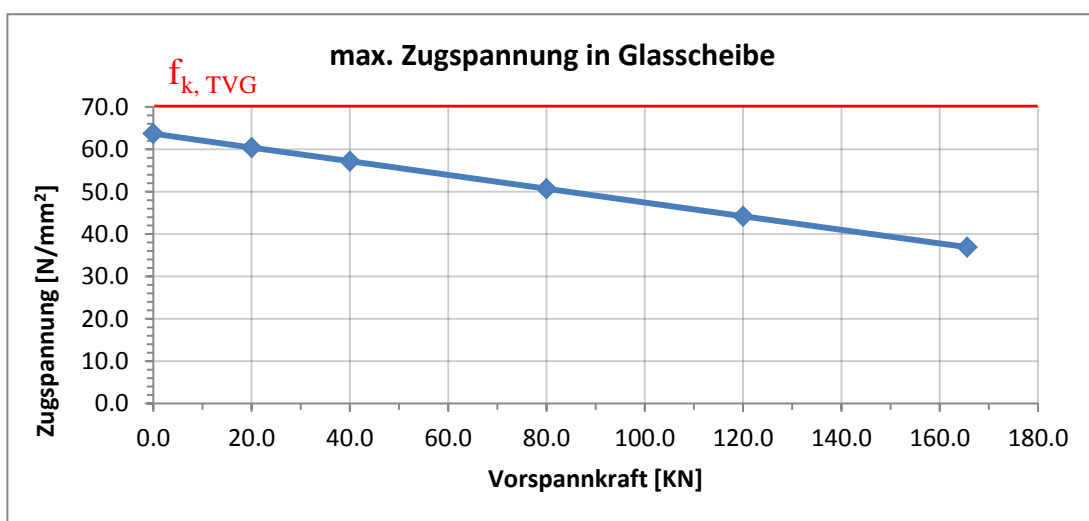


Abb. 8-14 Resultierende Zugspannungen in den Glasscheiben- dargestellt am Halbträger

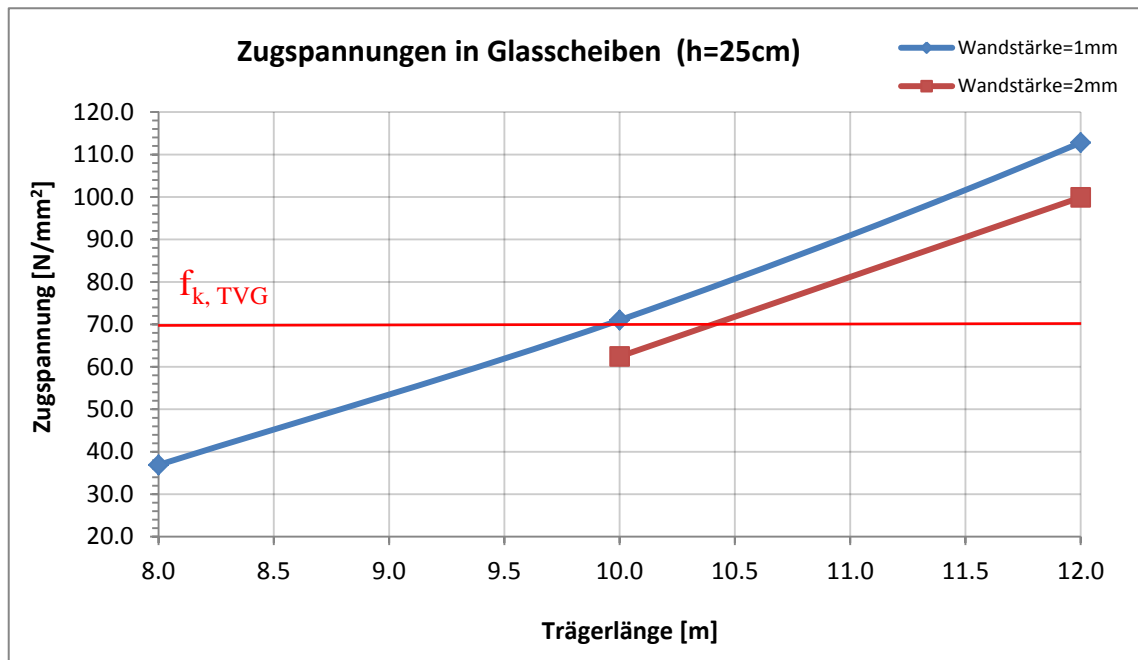
Die Beziehung zwischen der aufgetragenen Kraft und der dazugehörigen maximalen Zugspannung im Glas (mit der konstanten Windbelastung von 2,95 kN/m) sind im Diagramm VIII-3 gegeben. Die Werte der Vorspannkraft sind im Diagramm doppelt gegeben, da die beiden Spannglieder mit der gleichen Kraft gespannt sind.



Diag. 8-4 Maximale Zugspannung im Glas(abhängig von der Vorspannung, Trägerlänge = 8 m)

8.2.2.5 Verlängerung des Trägers

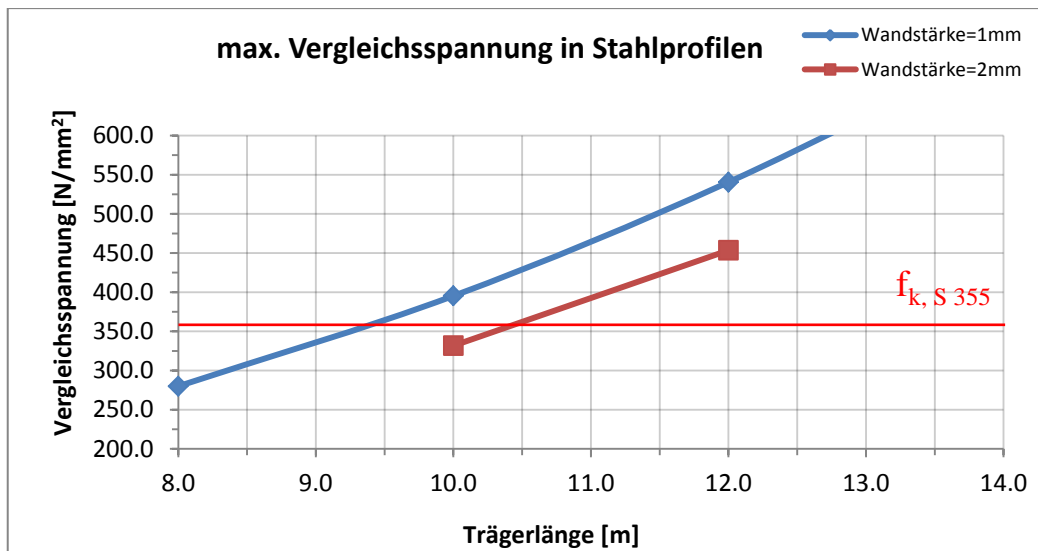
Da die Vorspannkraft eine Verminderung der Zugspannungen im Glas bewirkten, wurde als nächster Schritt eine Verlängerung des Trägers untersucht. Bei der Untersuchung wurde immer mit dem maximalen Wert von der Vorspannkraft ($2 \cdot 80 \text{ kN}$) gerechnet worden. In Diagramm VIII-4 sieht man die ermittelten Werte für die maximale Zugspannung im Glas, infolge der Windbelastung ($2,95 \text{ kN/m}$) und der Vorspannkraft ($2 \cdot 80 \text{ kN}$) abhängig von der Trägerlänge.



Diag. 8-5 Maximale Zugspannung im Glas bei verschiedenen Profilstärken-abhängig von der Trägerlänge

Aus dem Diagramm kann man ablesen, dass die maximale Trägerlänge bei der gegebenen Belastung bei circa 10,5 m liegt (Träger mit Stahlprofilen von 2 mm Wanddicke). Dies stellt, im Vergleich zum unbewehrten Glasträger, eine mögliche Verlängerung um etwa 2 m bzw. 25 % dar.

Hinweis: Da bei der Trägerlänge von 10,5m die vorhandene maximale Vergleichsspannung im Stahlprofil über 355MPa liegt (Diag. VIII-5), wurde es in diesem Fall notwendig das Profil aus hochfestem Stahl (z.B. S460) herzustellen.

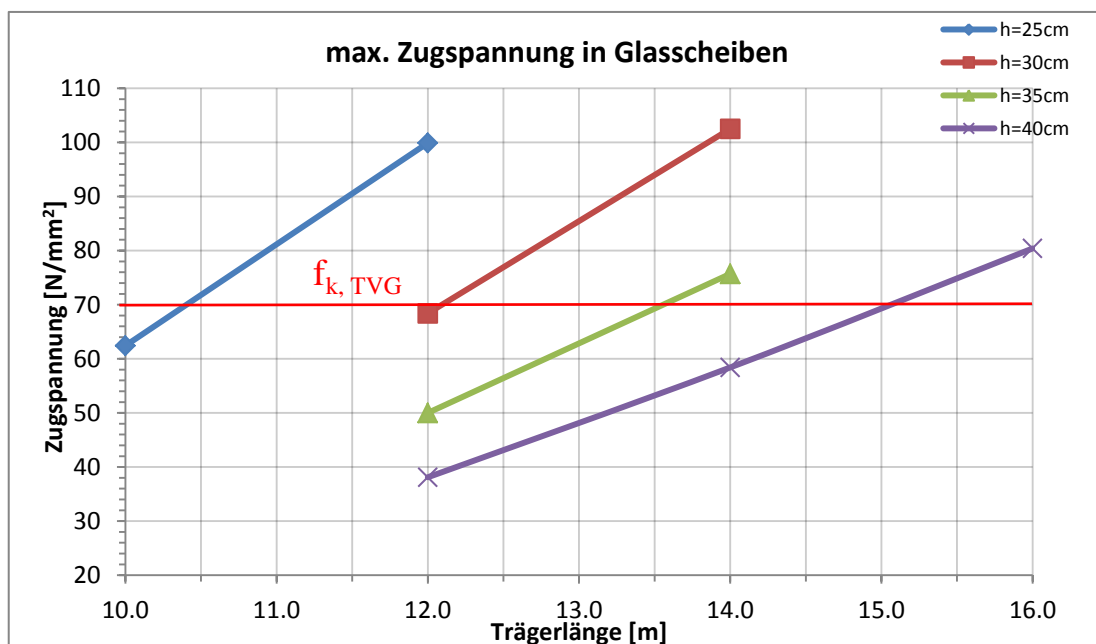


Diag. 8-6 Maximale Vergleichsspannung in den Stahlprofilen, abhängig von der Länge

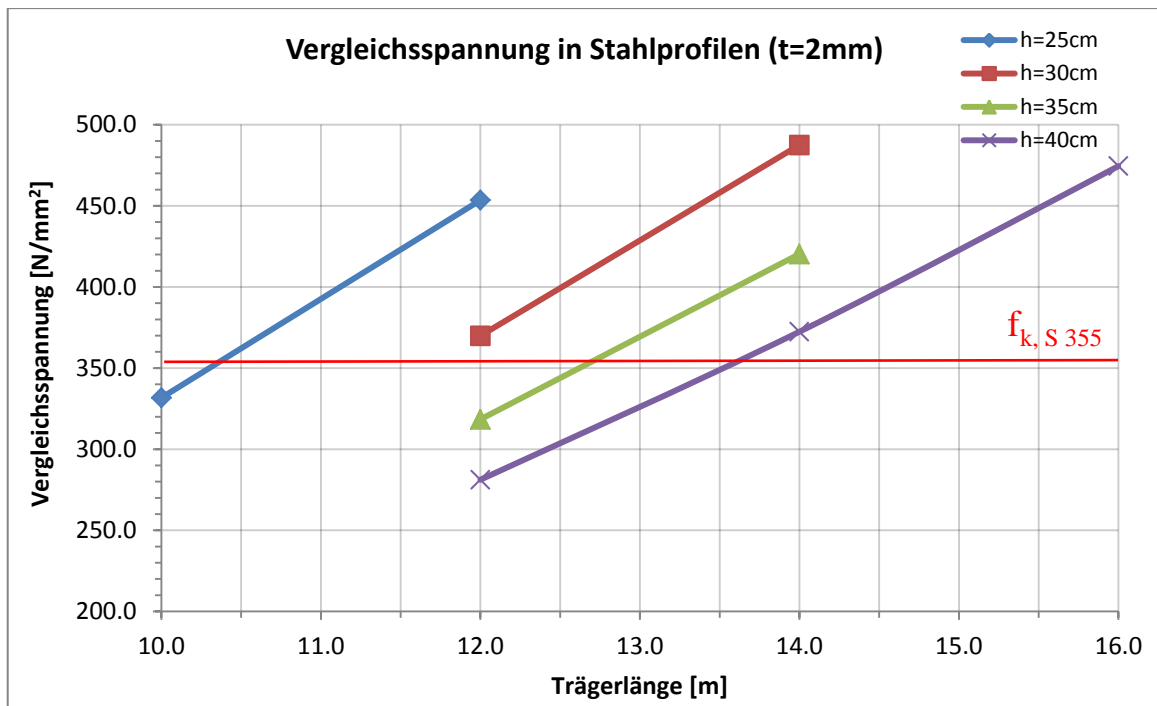
8.2.3 Parameterstudie 2

In folgender Studie wurde untersucht, in welchem Maß eine Änderung der Trägerhöhe eine Verlängerung des Trägers ermöglicht. Die Dicken der Glasscheiben, der Profilquerschnitt, die eingeleitete Vorspannkraft als auch die Windbelastung pro Längsmeter sind gleich wie in der Parameterstudie 1. Die maximal untersuchte Trägerhöhe war 40 cm.

Diagramm VIII-7 zeigt die maximalen Zugspannungen in Glasscheiben der nach Trägerhöhen geordneten Träger in Abhängigkeit von ihren Längen.

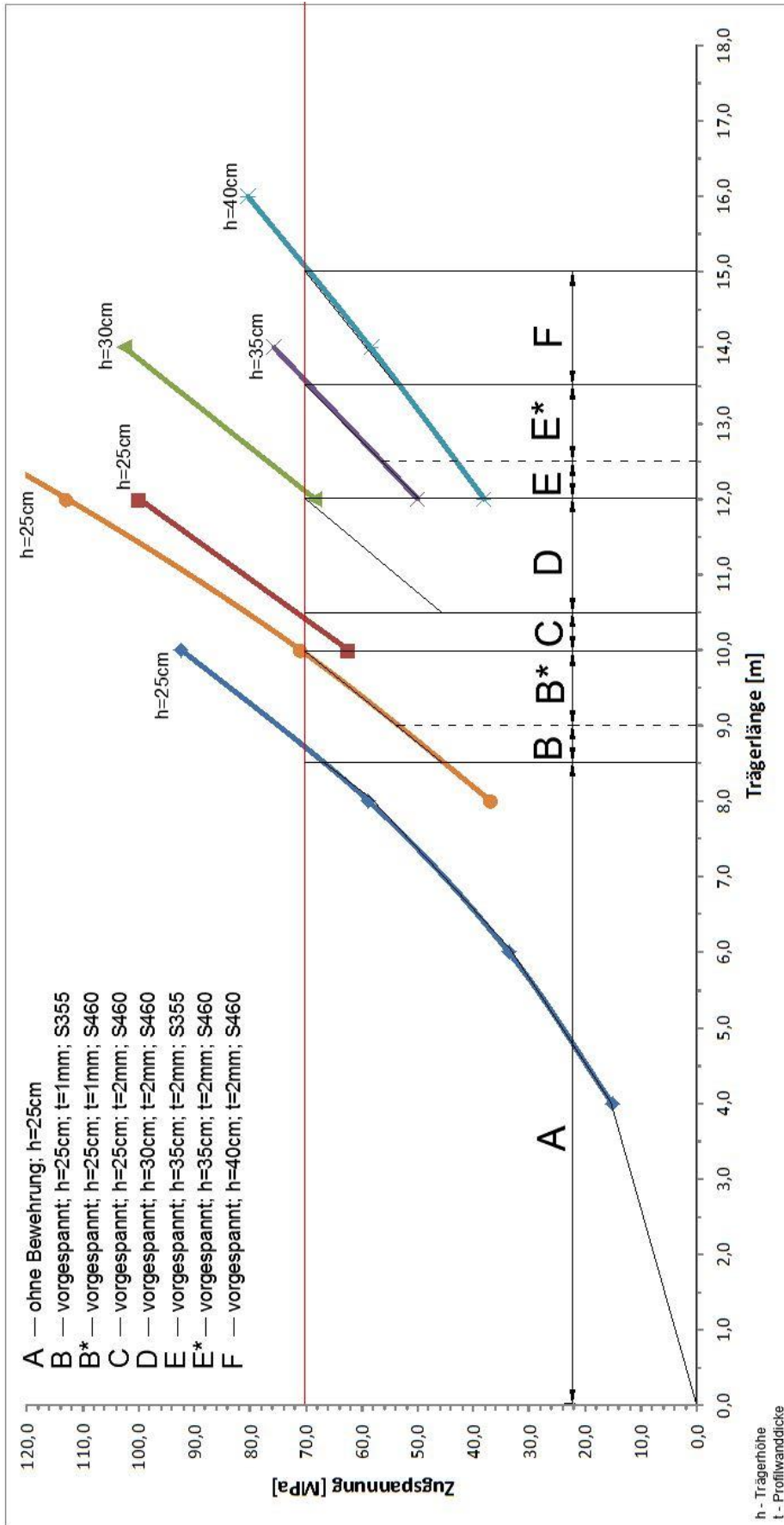


Diag. 8-7 Maximale Zugspannungen in Glasscheiben der nach Höhen geordneten Träger



Diag. 8-8 Vergleichsspannung in Stahlprofilen verschiedener Träger, abhängig von den Längen

In folgendem Diagramm (VIII-8) sind die für die verschiedenen Längen (Fassadenhöhen) notwendigen Trägertypen gegeben.



Diag. 8-9 Notwendige Trägertypen für verschiedene Fassadenhöhen

8.2.4 Schlussfolgerungen

- Studie 1:
 - Ein Glasträger mit dem beschriebenen Querschnitt, ohne Stahlprofile bzw. Vorspannung, erlaubt eine Verwendung für die gegebene Belastung bis zu einer Länge von 8,5 m.
 - Das Bewehren des Trägers (mit den verwendeten geschlossenen Profilen) ohne vorgespannte Seile bietet nur eine geringe Verlängerungsmöglichkeit des Trägers.
 - Der vorhandene Querkzug im Glas infolge der Vorspannung ist kein kritisches Thema.
 - Nach der Einleitung von für die gewählten Spannglieder maximalen Kräften (2*80 kN) ist eine Verlängerung des Trägers um etwa 2 m bzw. 25 % möglich.
 - Eine eventuell zusätzliche Erhöhung in der Vorspannung (z. B. bei Verwendung von stärkeren Spannlitzen) ohne Änderungen im Querschnitt erfordert eine Verwendung von hochfesten Stählen bei der Herstellung der Stahlprofile.

- Studie 2:
 - Eine Vergrößerung des Trägers um 5 cm bringt eine mögliche Verlängerung von 1,5 m. Anders gesagt, erfordert eine Verlängerung des Trägers um 1 m einen 3,3 cm erhöhten Querschnitt.
 - Es ist zu beachten, dass die Stahlprofile in einigen Fällen eine größere Spannung als 355MPa bekommen (Diag. VIII-8). In diesen Fällen müssen hochfeste Stähle zum Einsatz kommen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Wie in der vorliegenden Arbeit gezeigt wurde, birgt eine mechanische Vorspannung von Glasträgern mehrere Vorteile. Mit der Einbringung von Druckkraft ins Glas erhöht sich sein Zugwiderstand und damit die Tragfähigkeit des ganzen Glasbauteils. Weitere Vorteile findet man im duktilen Tragverhalten und in einer hohen Resttragfähigkeit nach dem Anfangsversagen des Glases bzw. nach der Entstehung des ersten Risses.

Die bislang durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass das Verfahren des mechanischen Vorspannens von Glasbauteilen in der Realität machbar ist. Bei der Berechnung von mechanisch vorgespannten Glasträgern wird empfohlen, neben der analytischen, auch eine numerische Untersuchung vorzunehmen. Da die Verwendung der Balkentheorie bei der analytischen Berechnung von Verschiebungen die Realität nicht im Ganzen widerspiegelt, wird die numerische Untersuchung empfohlen. Weiters wurde festgestellt, dass eine direkte Kraftübertragung auf die Glasträgerenden die besten Ergebnisse liefert. Da das Glas durch die Spannungsspitzen sehr gefährdet ist, muss die Kontaktfläche zuvor sehr präzise abgeglichen werden. Der Abgleich kann durch Schneiden und Schleifen der Kanten nach dem Kleben der Glasscheiben erfolgen. Die Anzahl der einzelnen Bestandteile im Vorspannsystem sollte so gering wie möglich gehalten werden, denn eine Vielzahl an Einzelteilen vergrößert die Gefahr der Entstehung von Spannungsspitzen, aufgrund einer größeren Wahrscheinlichkeit von Fehlalignen bei der Montage.

Die durchgeführte numerische Studie zeigte, dass die angewendete Bewehrung ohne Vorspannung nur eine geringe Erhöhung in der Tragfähigkeit bringt. Den experimentellen Untersuchungen zufolge ist sie aber dennoch von großer Bedeutung für die Resttragfähigkeit. Nach der Aufbringung der Vorspannkraft ist aber eine signifikante Vergrößerung der Tragfähigkeit zu bemerken.

9.2 Ausblick

In künftigen Forschungsvorhaben könnte das Stabilitätsproblem mechanisch vorgespannter Glasträger näher betrachtet werden. Interessant wäre auch eine Untersuchung des Einspannungsgrades der Glasscheiben innerhalb des Stahlblocks. Im Rahmen dessen ginge es vor allem darum, den Einfluss der Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit des Halterungselementes (Stahlblock) und der weicheren Lasteinleitungsmaterialien auf das Tragverhalten der Glasscheiben zu definieren. In der vorliegenden Arbeit wurde kein Kontakt zwischen den Seilen und Stahlprofilen infolge Krümmung der Spanachsen berücksichtigt. Weiterführende Untersuchungen sind erforderlich, um den Einfluss des Kontaktes auf Spannungszustand sowie auf Verformung des Trägers zu ermitteln.

Bei der durchgeführten numerischen Untersuchung wurden alle Materialien als „linear-elastisch“ definiert. Es wird vorgeschlagen, eine Untersuchung mit einem viskoelastischen Materialverhalten der Verbundfolie durchzuführen. Schlussendlich wird vorgeschlagen, versuchstechnische Untersuchungen zur Überprüfung der errechneten Ergebnisse durchzuführen.

Literatur

- [1] H. K. T. S. U. S. WELLER B., Konstruktiver Glasbau- Grundlagen, Anwendung, Beispiele, DETAIL Praxis, 2008.
- [2] SIEBERT G., Entwurf und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas, Ernst & Sohn, 2001.
- [3] SAGMEISTER B., Tragende Bauteile aus Glas - Berechnung und Ausführung, Forschungsbericht, IKG, Heft 4, Darmstadt, 1993.
- [4] K. R. WELLER, Glasbau-Praxis; Konstruktion und Bemessung, Band 1, Grundlagen, 3. Auflage, Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [5] K. L. FELDMANN, Glas für tragende Bauteile, Werner Verlag, 2012.
- [6] UNTERWEGER H., *Glas- und Leichtbau*, Graz: Institut für Stahlbau, Technische Universität Graz, 2008.
- [7] *Konstruktiver Glasbau, Lehrunterlagen zur LV Glas- und Leichtbau*, Graz: Institut für Hochbau, Technische Universität Graz, 2013/2014.
- [8] L. A. O. M. HALDIMANN M., *Structural Use of Glass*, Zürich: IABSE-AIPC-IVBH, 2008.
- [9] B. J. V. F. L. J.-P. LOUTER C., „Structural response of SG-laminated reinforced glass beams; experimental investigations on the effects of glass type, reinforcement percentage and beam size,“ *Engineering Structures*, pp. 292-301, 2012.
- [10] VISMAN U., Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln, 34 Auflage, VIEWEG+TEUBNER.
- [11] S. J. F. A. WÖRNER J.D., Glasbau - Grundlagen, Berechnung, Konstruktion, Springer, 2001.
- [12] M. I. SIEBERT G., Tragende Bauteile aus Glas - Grundlagen, Konstruktion, Bemessung, Beispiele; 2. Auflage, Berlin, Germany: Ernst & Sohn, 2012.
- [13] SILVESTRU V., *Numerische und versuchstechnische Untersuchung von hängenden Glasschwertern*, Graz: Institut für Hochbau - TU Graz, 2012.
- [14] E. M. N. F. W. T. WELLER B., Glasbau-Praxis, Konstruktion und Bemessung, Band 2, Beispiele nach DIN 18008, 3. Auflage, Berlin-Wien-Zürich: Beuth Verlag GmbH,

- 2013.
- [15] LOUTER C., „Bewehrte Glasträger,“ in *Stahlbau Spezial 2008 - Konstruktiver Glasbau*, Berlin, Ernst & Sohn.
- [16] LOUTER C., *Fragile yet Ductile - Structural Aspects of Reinforced Glass Beams*, 2011.
- [17] Z. G. ZILCH K., *Bemessung im konstruktiven Betonbau - 2. Auflage*, Berlin: Springer, 2010.
- [18] ROMBACH G., *Spannbetonbau*, Berlin: Ernst & Sohn, 2010.
- [19] H. M. GORIS, *Stahlbetonbau - aktuell 2014 - Praxishandbuch*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [20] G. H. S. J. SCHOBBER H., „Ein Glashaus für die Therme in Badenweiler,“ in *Stahlbau 73 (2004), Heft 11*, Berlin, Ernst & Sohn.
- [21] E. M. WELLER B., „Deformation of Spannglass beams during post-tensioning,“ in *Challenging Glass 4 - COST Action TU0905 Final Conference*, London, Taylor & Francis Group, 2014.
- [22] W. B. ENGELMANN M., „Spannglasträger - Glasträger mit vorgespannter Bewehrung,“ in *Glasbau 2014. 1. Auflage*, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG., 2014.
- [23] V. H. J. V. F. V. J. B. H. V. J. LOUTER C., „Post-tensioned Glass Beams“.
- [24] A. Clerici, „Indirect Determination of the Modulus of Deformation of Rock Masses - Case Histories,“ in *Eurock 1993: safety and environmental issues in rock engineering: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics*, L. Riberio e Sousa und N. Grossman, Hrsg., Rotterdam, A.A. Balkema, 1993, pp. 509-517.
- [25] G. Feder und M. Arwanitakis, „Zur Gebirgsmechanik ausbruchsnaher Bereiche tiefliegender Hohlraumbauten,“ *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, Bd. 121, Nr. 4, pp. 103-117, 1976.
- [26] J. Chern, F. Shiao und C. Yu, „An empirical safety criterion for tunnel construction,“ in *Proc. Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Balkema, 1998, pp. 222-227.
- [27] F. Pacher, „Gebirgs- und Ausbaukennlinien,“ *Geomechanics and Tunnelling*, Bd. 4, pp. 402-408, August 2010.

Online-Quellen:

{1} http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2c/Safety_glass_vandalised_20050526_062_part.jpg – am 02.03.2015

{2} - <http://www.jaykhodiyarglass.com/?p=91#!prettyPhoto>, am 7.8.2014

{3} - <http://www.build.com.au/laminated-glass>, am 7.8.2014

{4} - <http://www.detail.de/architektur/produkte/glasschwerter-fuer-neue-schule-in-zuerich-003285.html>, am 12.8.2014

{5} - <http://www.idesignarch.com/apple-store-fifth-avenue-new-york/>, am 13.8.2014

{6} - http://www.cantifix.co.uk/projects/arnold_house_school_st_john_s_wood, am 22.10.2014

{7} - [http://www.glaswelt.de/Cache/GENTNER/10020/GLW-0113-01-](http://www.glaswelt.de/Cache/GENTNER/10020/GLW-0113-01-AUFMACHER_MjY4MDE5Wg.JPG)

[AUFMACHER_MjY4MDE5Wg.JPG](http://www.glaswelt.de/Cache/GENTNER/10020/GLW-0113-01-AUFMACHER_MjY4MDE5Wg.JPG)

Anhang A

Windlasten (nach ÖNORM EN 1991-1-3)

$$q_{b,0} = \frac{\rho}{2} \cdot V_{b,0}^2$$

mit $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

für Wien: $V_{b,0} = 25,1 \text{ m/s}$; $q_{b,0} = 0,39 \text{ kN/m}^2$

In Österreich: $V_{b,0} = V_b$ und $q_{b,0} = q_b$

$$q_p = C_{e(z)} \cdot q_b$$

- Geländekategorie IV: $C_{e(z)} = 1,2 \cdot \left(\frac{15}{10}\right)^{0,38} = 1,4$
 $z = z_{\min} = 15\text{m}$

$$q_p = 1,4 \cdot 0,39 = 0,546 \text{ kN/m}^2$$

$$W_e = q_p \cdot C_{p_e}$$

➤ Kategorie D: $C_{p_{e,10}} = 0,8$

➤ Kategorie B: $C_{p_{e,10}} = -0,9$

Annahme: $b = 20\text{m}$

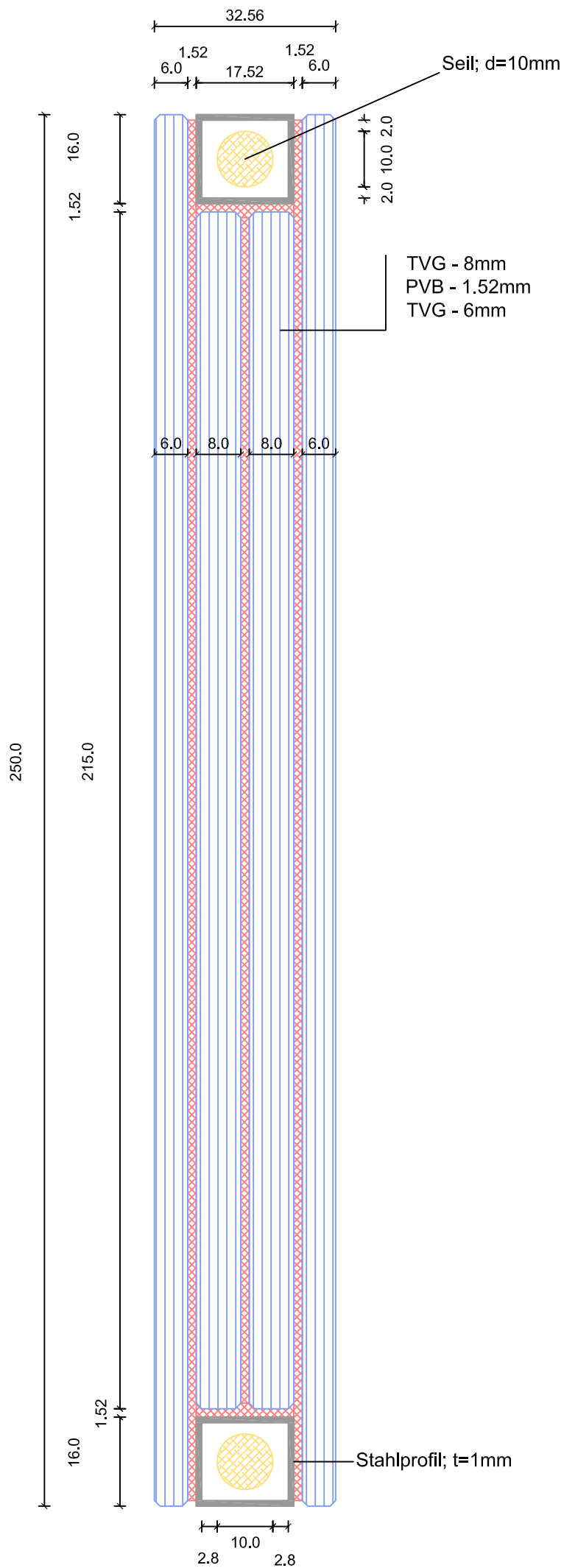
$$A = h \cdot 20 = X\text{m}^2 > 10\text{m}^2 \rightarrow C_{p_e} = C_{p_{e,10}} \quad (h = 4,6,8, \dots 16\text{m})$$

$$W_{e,d} = 0,546 \cdot 0,8 = 0,437 \text{ kN/m}^2$$

$$W_{e,d} = 0,546 \cdot (-0,9) = -0,491 \text{ kN/m}^2$$

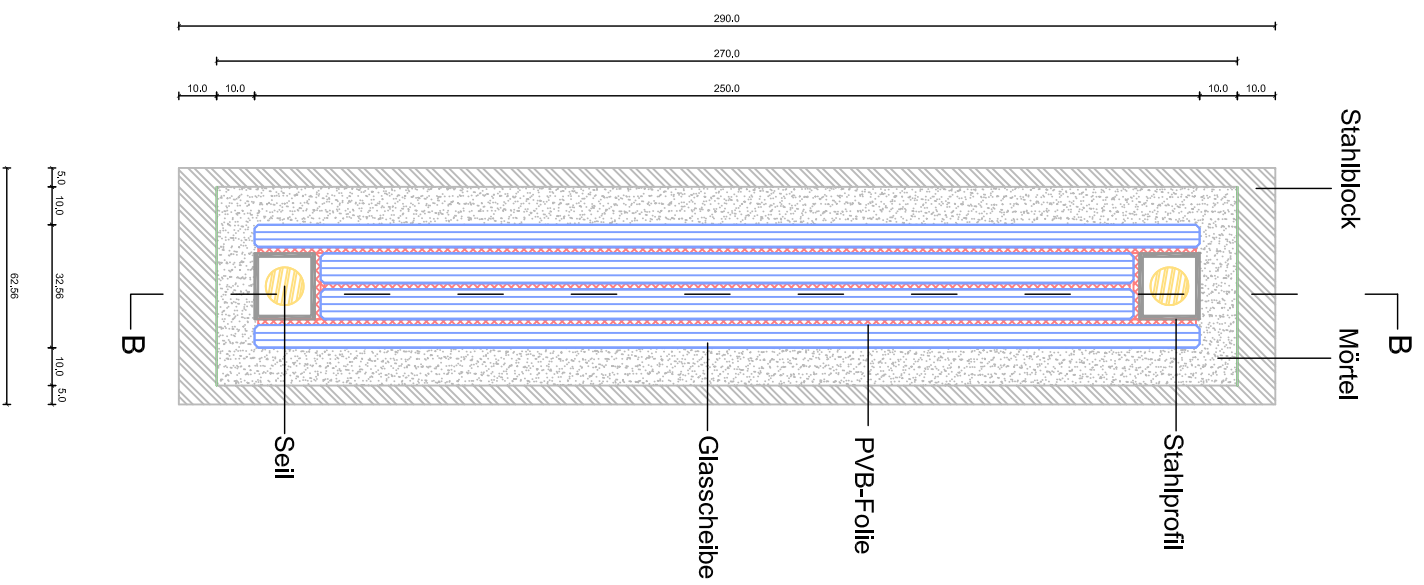
Einflussbreite: $e = 6\text{m}$

$$W_k = |-0,491| \cdot 6 \cong 2,95 \text{ kN/m}$$

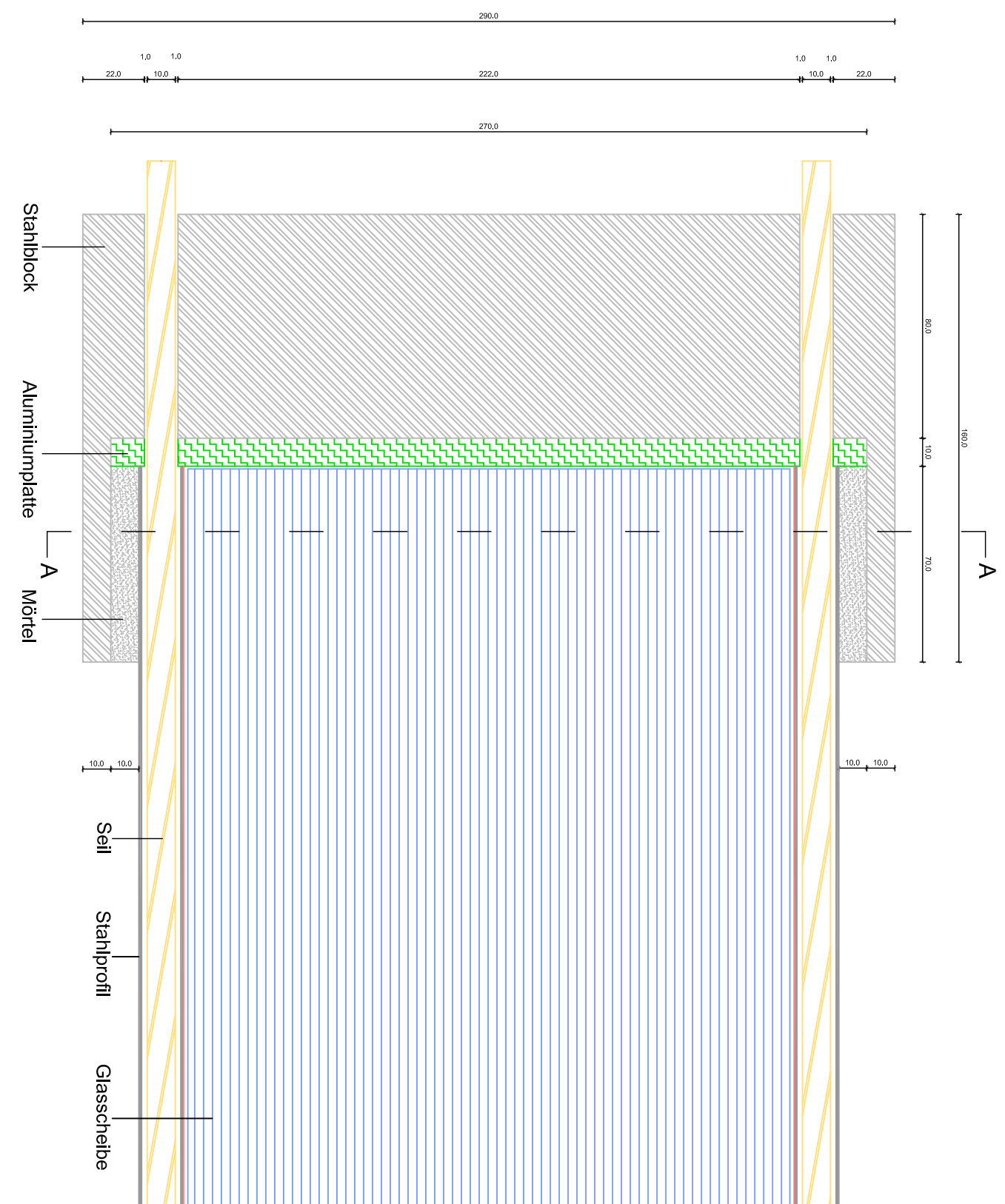


Träger: h=25cm
Querschnitt - Feldbereich
M 1:1 (Papierformat: A4)

Schnitt A-A



Schnitt B-B



Träger: h=25cm

Querschnitte - Auflagerbereich

M 1:2 (Papierformat A3)