

Diploma Thesis

**Bracing Timber-Glass-Facade:
Feasibility studies, performance assessments
and optimization**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

**Zur Aussteifung mehrgeschossiger Gebäude
mit Holz-Glas-Verbundelementen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

David Wagner, BSc

Matr.Nr.: 00928689

unter der Anleitung von

Associate Prof. DI Dr.techn. **Alireza Fadai**

DI Dr.techn. **Matthias Rinnhofer, BSc**

Institut für Architekturwissenschaften – Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E259-2, A-1040 Wien

Wien, im Oktober 2017

Vorwort

Für die fachkundige Betreuung und die Begutachtung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bei Herrn Associate Prof. DI Dr.techn. Alireza Fadai bedanken.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn DI Dr.techn. Matthias Rinnhofer, der mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mich während der gesamten Arbeitszeit intensiv betreute.

Bedanken möchte ich mich selbstverständlich auch bei den Projektpartnern, die es mir ermöglicht haben, die experimentellen Großprüfkörper in diese Arbeit aufzunehmen: Herr DI HTL-Ing. Peter Schober von der Holzforschung Austria und Herr Hanspeter Petschenig der Firma Petschenig glastec GmbH. Weiterer Dank gilt Frau DI (FH) Karin Hauer, die mich während der Auswertung der experimentellen Untersuchung tatkräftig unterstützt hat.

Sehr großen Dank möchte ich Privatdoz. DI Dr.techn., M.S. Christian Schranz aussprechen, der während meiner gesamten Studienlaufbahn ein offenes Ohr für jegliches Anliegen gehabt hat. Seine umfangreiche Unterstützung und Motivation als Freund hat das Vorankommen in sämtlichen Belangen enorm gefördert. Ich bin unglaublich stolz, mich als ehemaliger Mitarbeiter des EDV-Zentrums Bauingenieurwesen bezeichnen zu dürfen. Allen MitarbeiterInnen des Instituts ein herzliches Dankeschön für die gute Laune, und das wohlthuende Arbeitsklima.

Für unzählige fachkundige Gespräche während des Studiums danke ich Mag. Michaela Aniwantner, BSc. Außerdem danke ich meinen Studienkollegen und Freunden, die für die notwendige Ablenkung, aber auch für die richtige Motivation zur rechten Zeit gesorgt haben.

Schließlich ein herzliches Dankeschön an meine Eltern, die mich auf meinem gesamten Lebensweg stets unterstützten und begleiteten. Durch den finanziellen und emotionalen Rückhalt war es mir immer möglich, eigene Ziele zu setzen, diese zu verfolgen und zu erreichen. Das ist nicht selbstverständlich und bedeutet mir sehr viel.

Insbesondere möchte ich auch meine Freundin Carina hervorheben, die unendliche Geduld aufbrachte und mich in vielen Kleinigkeiten im Alltag unterstützt hat. Alle diese Dinge haben mir – bewusst oder unbewusst – die Bearbeitung dieser Arbeit ungemein erleichtert, für die notwendige Zuversicht gesorgt und mich bestärkt.

Kurzfassung

Holz-Glas-Verbund (HGV)-Konstruktionen sind eine innovative Bauweise, die – bestärkt durch das gesellschaftliche und wirtschaftliche Interesse an nachhaltigen und ressourcenschonenden Formen des Bauens – zunehmend an Bedeutung gewinnen. Für den Einsatz im tragenden und aussteifenden Bereich liegen jedoch keine ausreichenden Erkenntnisse vor, weshalb diese neuartigen Entwicklungen einer ingenieurtechnischen Beurteilung bedürfen.

Zu Beginn wird auf bisherige Forschungsarbeiten eingegangen, auf denen diese Arbeit zum Teil basiert. Ein kurzer Überblick über die zu Grunde liegenden Berechnungsmodelle soll verständlich an das Thema heranführen. Für lastabtragende Klebeverbindungen existiert bis dato lediglich eine Richtlinie, aber keine Norm. Deshalb setzt sich dieser Abschnitt auch mit bisher zugelassenen HGV-Konstruktionen auseinander.

Im Fokus stehen anschließend zwei experimentelle Großprüfkörper mit lastabtragenden Klebefugen. Hier liegt das vorrangige Augenmerk darauf, die Verformungsmechanismen über einen langfristigen Beobachtungszeitraum und instationären Klimabedingungen auszuwerten und zu interpretieren. Dabei werden die erzielten Ergebnisse vergleichbaren experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt, um die Aussagekraft der Resultate überprüfen zu können.

Als Hauptbestandteil dieser Arbeit wird das Aussteifungspotential bisheriger HGV-Systeme anhand viergeschossiger ideeller Gebäude unter realer Windbeanspruchung intensiv erforscht und optimiert. Im Hinblick auf die Effizienzsteigerung und Steifigkeitserhöhung wird ebenfalls eine horizontale und vertikale kraftschlüssige Verbindung (Kopplung) zwischen den HGV-Elementen analytisch untersucht. Neben dem bisher üblicherweise eingesetzten Silikonklebstoff kommt als Alternative auch ein höherfestes und steiferes silanterminiertes Epoxid zum Einsatz. Damit lässt sich die Steifigkeit wesentlich erhöhen. Da die Aussteifung ausschließlich HGV-Elemente in Form von HGV-Scheiben übernehmen, kann über Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise deren Ausnutzung und Grenztragfähigkeit abgeleitet werden. Dies geschieht unter Anwendung von wissenschaftlich fundierten Festigkeiten und Materialsicherheitsbeiwerten heute verfügbarer Klebstoffe. Als Resultat der Erkenntnisse werden mehrere Bemessungsdiagramme entwickelt. Sie sollen Baubeteiligten die Auswahl der statisch notwendigen HGV-Elemente zur Gebäudeaussteifung erleichtern. Zu guter Letzt werden in einem Optimierungsverfahren diverse Adaptionen an Bauteilkomponenten schrittweise vorgenommen. Dies verdeutlicht klar die komplexen Zusammenhänge im Aussteifungsverhalten.

Abschließend wird ein Ausblick auf die weitere Forschungsarbeit gegeben und gezeigt, welche Punkte in diesen Themengebieten offen geblieben sind und einer Klärung bedürfen.

Abstract

Timber-glass-facades are innovative constructions which are getting more importance as a result of the social and economic interest in sustainable and resourceefficient buildings. However, there is insufficient knowledge available to use them in load-bearing and bracing areas. Therefore these new developments require an engineering assessment.

At first there is a short excursion to previous research activities this thesis mainly based on. To introduce course of the subject a brief overview of existing computational models is given. Up to now there is only a guideline but no european standard for structural-sealant-glazing systems. Therefore the first section deals with previously approved Timber-glass composite structures.

The focus will be on two experimental large-sized specimens with load-bearing adhesives. The main aspect is to evaluate and interpret the deformation mechanisms over a long-term observation period and unsteady climatic conditions. The obtained results are compared with other experimental investigations from different researchers in order to check the validity of the results.

The feasibility studies, performance assessments and optimization of bracing timber-glass-facades is a main component. Therefore ideal four-story buildings are exposed to horizontal wind force. To increase stiffness a horizontal and vertical connection (coupling) between the timber-glass composite elements is analyzed. In addition to the commonly used silicone adhesive a stiffer epoxy is used as an alternative. In this way it is also possible to reach higher stiffness. Timber-glass-facades should replace the stiffening walls in the following and take all the bracing function. To calculate their utilization and resistance, stress and stability analysis are required. Safety factors and strength values based on scientific knowledge are the basis for that. As a result several diagrams are developed. They allow to easily select the statically necessary timber-glass-facades and ensure sufficient bracing of the structure against horizontal loads. Last but not least various component-adaptations are carried out step by step. This illustrates the complex relationship in the stiffening behavior.

Finally we will look at further research work and all the topics which have remained open in the thesis or also need clarification.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
1.1 Motivation	3
1.2 Zielsetzung	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Frühere Forschungsarbeiten	5
2.2 Normenregelung und bisherige Zulassungen	8
3 Experimentelle Untersuchung	12
3.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	12
3.2 Herstellung und Montage der Versuchskörper	13
3.3 Versuchsaufbau und Versuchsablauf	16
3.4 Auswertung der Messdaten	21
3.4.1 Verformungsmechanismen der Gesamtelemente	22
3.4.2 Verformungsmechanismen der BFU-Koppelleisten	25
3.4.3 Kriechverhalten der Silikonklebefugen	29
3.4.4 Kriechverhalten der Klebefugen des tragenden Randverbunds	35
3.5 Verformungsanteile der Systemkomponenten an der Gesamtverformung	39
3.6 Resümee	43
4 Aussteifungspotential von HGV-Scheiben in Holzbauten	45
4.1 Grundlagen zur Gebäudeaussteifung und vorangegangene Forschungsarbeiten	45
4.2 Fallstudie für verschiedene HGV-Konstruktionen	48
4.2.1 Regelbausystem, Materialeigenschaften und Konstruktionsvarianten	51
4.2.2 Kopplung von HGV-Elementen und Berechnung der Wandsteifigkeit	53
4.2.3 Gebäudemodelle und Belastung	57
4.2.4 FE-Rechenmodelle	60
4.2.5 Analytisches Nachweisverfahren mit dem Ersatzfedermodell	69
4.3 Ergebnis der Fallstudie	78
4.3.1 Ausnutzung und Grenztragfähigkeit	78
4.3.2 Bemessungsdiagramm zur Gebäudeaussteifung	84
4.3.3 Optimierungsverfahren	92
4.4 Resümee	108
5 Interpretation und Ausblick	110
A Datenblätter der Klebstoffe	113
A.1 OTTOCOLL® S660	113
A.2 nolax C44.8505	117
A.3 HILTI HIT-RE 500	119

B Ergänzende Tabellen **124**

- B.1 Verformungsprotokoll 124
- B.2 Differenztafel 126
- B.3 Wandsteifigkeit 128
- B.4 Traglast für Beulversagen 134

Abkürzungsverzeichnis

abZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BFU	Birkenfurniersperrholz
BTZ	Bautechnische Zulassung
CE	Communauté européenne
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
ESG	Einscheibensicherheitsglas
ETB	Europäische technische Bewertung
FE	Finite-Elemente
hEN	Harmonisierte europäische Norm
HFA	Holzforschung Austria
HGV	Holz-Glas-Verbund
ift	Institut für Fenstertechnik
ITI	Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
KMP	Klimamesspunkt
MAS	Mechanische Absturzsicherung
MIG	Mehrscheibenisoliervglas
MP	Messpunktposition
MSS	Mechanische Scheibensicherung
MW	Mittelwert
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
OSB	oriented strand board
ÖTZ	Österreichische technische Zulassung
PA	Polyamid
PVB	Polyvinylbutyral
PVC	Polyvinylchlorid
SSGS	Structural Sealant Glazing System

- TU** Technische Universität
UV Ultraviolett
ÜA Übereinstimmung Austria
VSG Verbundsicherheitsglas
ZiE Zustimmung im Einzelfall

Kapitel 1

Einleitung

Für die hohen Ansprüche der Architektur hat Glas seit jeher eine große Bedeutung. Der Wunsch nach einer transparenten Gebäudehülle und damit verbundenen ästhetischen Effekten, nahm in den letzten Jahrzehnten stets zu – eine hohe Nachfrage besteht auch weiterhin. Die Entwicklungen, die zukünftig unsere Bauten prägen werden, sind jedoch schon heute entscheidend mitzugestalten.

1.1 Motivation

Architekten, Konstrukteure und Planer stehen vor großen Herausforderungen, wenn es um die Frage geht, die vorhandenen Tragreserven von Glasfassaden – im Sinne einer ressourceneffizienten Bauweise – zu erschließen. Da auch die Nachhaltigkeit und Energieeffizienz von Bauwerken eine immer größere Rolle spielt, können Holz und Holzwerkstoffe in dieser Entwicklung einen entscheidenden Part einnehmen. Nicht zuletzt deshalb, weil Holz ein dem Glas ähnliches Temperaturverhalten besitzt, wodurch sich diese beiden Materialien positiv ergänzen. Glas hat die Eigenschaft, große Druckkräfte aufnehmen zu können. Holz ist im Stande, dessen vergleichsweise geringe Zugfestigkeit auszugleichen. Besondere Beachtung muss allerdings der kraft- und formschlüssigen Verbindung dieser beiden Werkstoffe geschenkt werden, da Glas spröde ist. Diesbezüglich können Klebstoffe einen homogenen Kraftfluss bei gleichzeitiger Verminderung örtlicher Spannungsspitzen ermöglichen.

Als Neuentwicklung auf diesem Gebiet zählen HGV-Konstruktionen. Durch die umlaufenden, lastabtragenden Klebefugen können sie als tragende Wände oder zur Aussteifung der gesamten Tragstruktur beziehungsweise eines Teilsystems eingesetzt werden. Die elastische Klebeverbindung weist dabei im Vergleich zum Holz oder Glas den noch größten Untersuchungsbedarf auf. Bei den bisher üblicherweise eingesetzten Silikonklebstoffen treten schon unter geringen Belastungen relativ große Verformungen auf, welche im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit allerdings auf ein erforderliches Maß zu begrenzen sind. Aufgrund der hohen Nachgiebigkeit bleibt der Einsatz von HGV-Konstruktionen derzeit auf Gebäude mit höchstens zwei Geschossen limitiert. Aus dem Gesichtspunkt, auch mehrgeschossige Gebäude Horizontallasten infolge Wind beziehungsweise Erdbeben auszusetzen, erwächst ein erheblicher Forschungsbedarf.

1.2 Zielsetzung

Die Entwicklungsarbeit im Holz-Glas-Verbundbau ist in den letzten Jahren weit fortgeschritten, dennoch gibt es immer noch offene Punkte, die einer Klärung bedürfen. Um einerseits auf die großteils noch unbekanntenen Reaktionen der lastabtragenden Klebefugen unter instationären Klimabedingungen einzugehen, liegt das vorrangige Augenmerk im ersten Teil dieser Arbeit darauf, die Verformungsmechanismen anhand von zwei experimentellen Großprüfkörpern über einen langfristigen Beobachtungszeitraum auszuwerten und zu interpretieren.

Da andererseits noch Unklarheit herrscht, ob tatsächlich mehrgeschossige Gebäude mittels HGV-Konstruktionen ausgesteift werden können, stellt dies den wesentlichen Schwerpunkt des

zweiten Teils dieser Arbeit dar. Hier wird das Aussteifungspotential bisheriger HGV-Systeme anhand viergeschossiger ideeller Gebäude unter realer Windbeanspruchung intensiv erforscht und optimiert. Um Baubeteiligten statisch sinnvolle Lösungen anbieten zu können, werden Bemessungsdiagramme entwickelt. Indem die Komplexität im Aussteifungsverhalten klar verdeutlicht wird, können Optimierungsverfahren zukünftig bereits an den richtigen Stellen ansetzen. Dies kann auch für Baubeteiligte eine wesentliche Erleichterung darstellen. Womit schließlich das Vertrauen und die wirtschaftliche Akzeptanz, das den HGV-Konstruktionen entgegengebracht wird, weiter vorangetrieben werden soll.

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Frühere Forschungsarbeiten

Am Beginn untersuchte Hamm [1] erstmals den Einsatz von Klebstoffen im statischen Verbund zwischen Holz und Glas. Basierend auf seinen Versuchen entwickelte er Bemessungskonzepte um Wandscheiben, Plattenbalken und Biegeträger mit dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept nachweisen zu können.

Niedermaier [2] stellte Untersuchungen zur aussteifenden Wirkung von schubbeanspruchten Glasscheiben bei HGV-Konstruktionen im Wintergarten- und Fassadenbau an. Er konzentriert sich auf elastische Silikonklebstoffe um damit Spannungsspitzen zu unterbinden. Gemeinsam mit Kreuzinger wurde das in Abb. 2.1a dargestellte analytische Federmodell für schubverklebte Scheiben (Schubfeldtheorie) entwickelt und erste Berechnungskonzepte [3] für aussteifende Scheiben als HGV-Konstruktionen vorgestellt. Gemeinsam mit Hochhauser hat Kreher [4] das Federmodell sogar noch erweitert, woraus schließlich das Federmodell für geklotzte Scheiben (Fachwerktheorie) entstand (Abb. 2.1b).

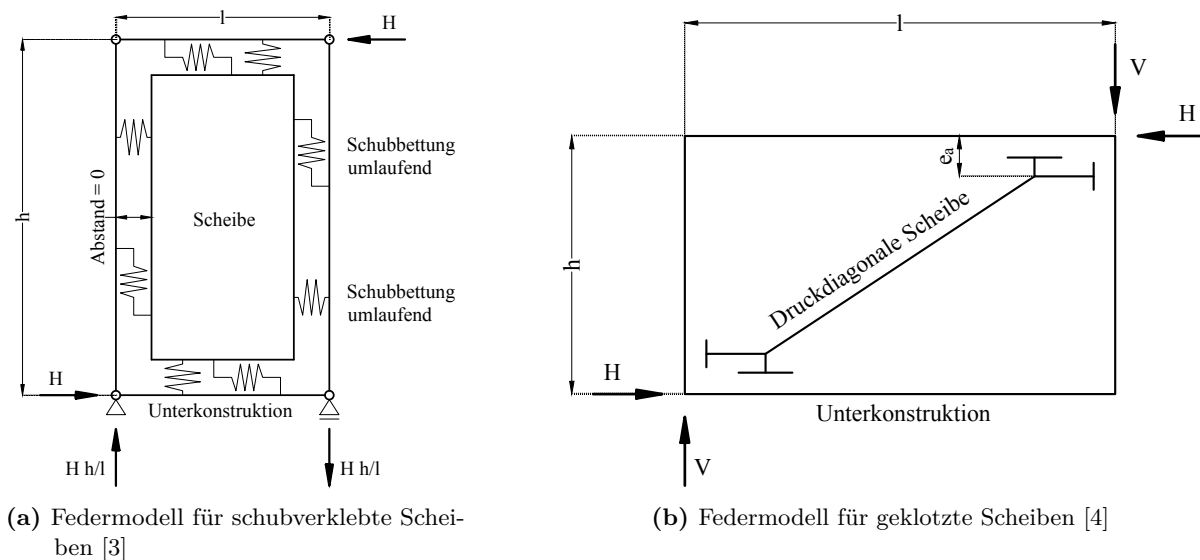


Abb. 2.1: Federmodelle für schubverklebte beziehungsweise geklotzte Scheiben

Die erste praxistaugliche Konstruktion eines wandartigen HGV-Elements mit statisch aussteifender Wirkung entstand in den Forschungsarbeiten von Edl [5, 6]. Das System mit der gezahnten Koppelleiste wurde in weiterer Folge zum Patent [7] angemeldet. Der Vorteil dieser Entwicklung liegt im hohen Vorfertigungsgrad: Zum Einen kann dadurch eine rasche Montage auf der Baustelle erfolgen, zum Anderen besteht die Möglichkeit einzelne beschädigte Elemente

problemlos auszutauschen. Zusätzlich wird auch die Ansichtsbreite der Unterkonstruktion auf ein Minimum reduziert und die Glassassade kommt voll zur Geltung was den Vorgaben der Architekten entspricht.

Darauf aufbauend wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes [8] an der Holzforschung Austria (HFA) zahlreiche Einzeluntersuchungen durchgeführt. Neubauer [9] setzte dabei den Schwerpunkt auf die tatsächliche Realisierung und Bemessung dieses patentierten HGV-Elements. Neben experimentellen Untersuchungen an Kleinprüfkörpern zum Tragverhalten unterschiedlicher Klebstoffverbindungen, wurde der Prototyp aus dem Vorgängerprojekt [7] in ein bauphysikalisch funktionsfähiges Fassadensystem übergeführt. Die Leistungsfähigkeit von Großprüfkörpern zum Einsatz in der Gebäudeaussteifung wurde ermittelt. Zusammen mit diesen experimentellen Untersuchungen erarbeitete Neubauer über numerische Rechenverfahren und dem bestehenden analytischen Federmodell für schubverklebte Scheiben schließlich ein Handbuch für den Einsatz von HGV-Elementen [10]. Das Handbuch enthält auch einen Bemessungsvorschlag für lastabtragende Klebstoffugen (Horizontallasten aus Wind, Erdbeben und Gebäudeschiefstellung beziehungsweise Vertikallast aus Eigengewicht der Glasscheibe). Anhand fünf typischer Gebäudegeometrien des Einfamilienhausbaus wendete er diesen an und erstellte Musterstatiken hinsichtlich der Gebäudeaussteifung. Er erkannte welche Leistungsfähigkeit in den heutigen Klebstoffsystemen steckt und zeigte, dass mit schubverklebten HGV-Elementen die Abtragung von planmäßigen Lasten in Scheibenebene möglich wird. Zum Abschluss setzte Neubauer die gewonnenen Erkenntnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen in realen Prototypen-Bauwerken um.

Grundsätzlich werden beim System [7] in Abb. 2.2a die horizontalen Kräfte aus der Unterkonstruktion entlang der umlaufenden Verklebung in die Glasscheibe eingeleitet, wodurch das Glas vorrangig als Schubfeld in der Scheibenebene beansprucht und schließlich das HGV-Element als steife Wandscheibe aktiviert wird. Die Weichheit des Klebstoffs zwischen Koppelleiste und Glasscheibe ermöglicht einen gleichmäßigen Lasteintrag – dabei kann ein Sprödbruch oder eine Oberflächenbeschädigung des Glases ausgeschlossen werden. Dass bei diesem „reinen Schubfeld“ die Horizontalkräfte lediglich parallel zur kontinuierlichen Verklebung übertragen werden, wirkt sich jedoch auf Kosten der Systemsteifigkeit aus.

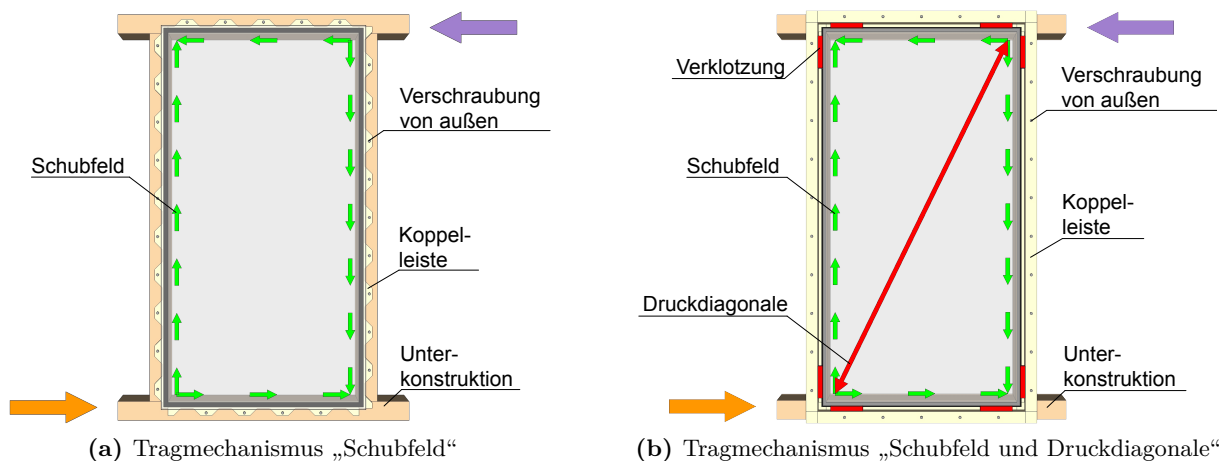


Abb. 2.2: Kombination zweier Tragmechanismen nach [11]

Um die aufnehmbare Horizontalkraft und die Steifigkeit des HGV-Systems [7] weiter steigern zu können, wurde in einem Forschungsprojekt [12] der Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieur-

holzbau (ITI) an der Technischen Universität (TU) Wien der Tragmechanismus des Schubfelds (in der Verklebung) um die Komponente einer Druckdiagonale (in der Glasscheibe) ergänzt. Die Überlagerung beider Tragmechanismen ist in Abb. 2.2b dargestellt. Für die praktische Ausführung bedeutet das, dass an den Stirnseiten in den Eckbereich der Glasscheibe zusätzlich Klötze anzubringen sind, was zur Folge hat, dass auch die Druckdiagonale einen beträchtlichen Lastanteil übernehmen kann. Für die neue Entwicklung wurde ebenfalls ein Patent [13] angemeldet. Die beiden unterschiedlichen Ausführungsvarianten der gezahnten Koppelleiste nach [7] und der L-förmigen Koppelleiste nach [13] werden in Abb. 2.3 gegenübergestellt.

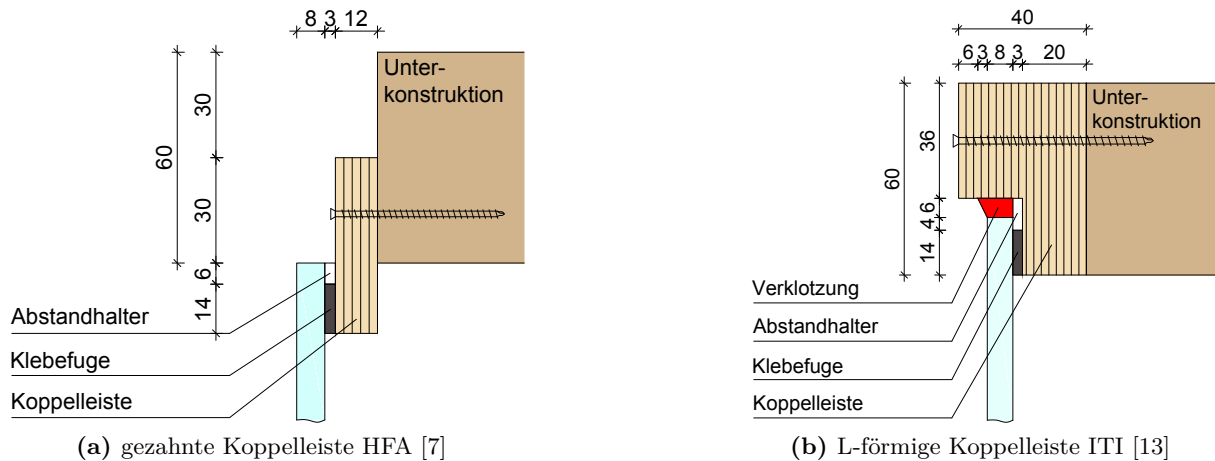


Abb. 2.3: Anschlussdetails unterschiedlicher HGVS-Systeme nach [11]

Das Ziel von [12] lag darin, ein geeignetes und durch ausreichend experimentelle Versuche verifiziertes Berechnungs- und Bemessungskonzept für HGVS-Konstruktionen zu erstellen, um eine Grundlage für eine Zulassung zu bieten und damit die Anerkennung der neuen Bauweise voranzutreiben. Als Ergebnis wurden schließlich das Ersatzfedermodell (Abb. 2.4) – das eine Verknüpfung dieser beiden Tragmechanismen darstellt – und eine allgemeine Nachweisführung zur Bemessung von HGVS-Konstruktionen publiziert. Mit dem Ersatzfedermodell wurde es möglich, die Wandsteifigkeit von HGVS-Konstruktionen mit Schubverklebung und Verklotzung analytisch zu ermitteln und auf die Beanspruchung der beteiligten Bauteilkomponenten zu schließen. Diese Punkte werden in Kapitel 4 sehr intensiv und detailliert behandelt.

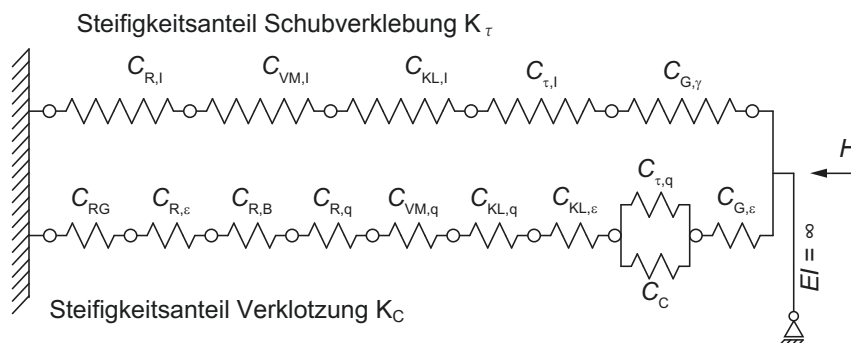


Abb. 2.4: Überlagerung der beiden Tragmechanismen aus Abb. 2.2 zu einem Ersatzfedermodell [12]

Hochhauser [14] hat als Erweiterung des Forschungsprojekts der HFA [8] die Tragfähigkeit von Gebäuden unter Berücksichtigung verschieden steifer Wandscheiben untersucht, worauf in Kapitel 3 dieser Arbeit kurz eingegangen wird. Außerdem versteht sich seine Arbeit als Vertiefung des Forschungsprojekts am ITI [12] wo er das vorgestellte Berechnungs- und Bemessungsdiagramm erweitert hat und sich mit Problemstellungen zum Beulverhalten von Verbundsicherheitsgläsern (VSG) beschäftigte.

Das Aussteifungsvermögen von HGV-Konstruktionen war ein zentrales Thema für Weissensteiner in [15]. Seine Variantenstudie stellt die Systemsteifigkeiten und aufnehmbaren Horizontalkräfte von HGV-Scheiben mit verschiedenen Ausführungsformen gegenüber. Durch eine Adaptierung des Ersatzfedermodells in Abb. 2.4 wurde erstmals die Wandsteifigkeit beim Zusammenwirken von HGV-Scheiben im Verband berechnet. An einer Wintergartenkonstruktion wurden zudem die notwendigen Nachweise aus [12] geführt.

Parallel zur Entwicklung von Berechnungsmodellen, der Bestimmung der Leistungsfähigkeit beziehungsweise der Optimierung unterschiedlicher HGV-Konstruktionen, wurden in diversen Forschungsarbeiten [9, 11, 16] Klebstoffe untersucht. Der in dieser Arbeit durchgeführte experimentelle Versuch in Kapitel 3 beziehungsweise die Fallstudie über das Aussteifungspotential von HGV-Scheiben in Kapitel 4 beschäftigen sich ausschließlich mit dem Zwei-Komponenten Silikonklebstoff OTTOCOLL[®] S660 der Firma Hermann Otto GmbH (Anhang A.1) und dem silanterminierten Zwei-Komponenten Epoxid nolax C44.8508 der Firma nolax AG (Anhang A.2). Den aktuellen Wissensstand hierfür bilden die folgenden Arbeiten:

Zum erstgenannten Silikonklebstoff OTTOCOLL[®] S660 finden sich in Rinnhofer [11] umfangreicher Forschungsergebnisse experimenteller Schubversuche und wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen, woraus die bemessungsrelevanten Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens auf Basis des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes abgeleitet werden konnten.

Nicklisch [16] behandelt den Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf aussteifende HGV-Konstruktionen die vorrangig als Schubfeld in der Scheibenebene beansprucht werden (Abb. 2.2a) und untersucht hierfür mehrere Klebstoffe in Scher-, Schub- und Zugversuchen. Das Hauptaugenmerk richtet er neben der Anfangsfestigkeit auf Aspekte der Alterungsbeständigkeit und des zeitabhängigen Materialverhaltens unter langandauernder mechanischer Beanspruchung. Aus der Erweiterung des Untersuchungsspektrums auf höherfeste Industrieklebstoffe, geht schließlich der Klebstoff mittlerer Steifigkeit nolax C44.8508 als Vorzugsklebstoff hervor und wird für den Einsatz in aussteifenden HGV-Scheiben vorgeschlagen. Als Abschluss seiner Arbeit hat Nicklisch anhand eines einfachen Berechnungsbeispiels die Tragfähigkeit einer solchen HGV-Scheibe abgeschätzt.

Im Forschungsvorhaben [17, 18] wurde das Aussteifungsverhalten von HGV-Scheiben an ideellen Gebäuden aus Stahlbeton und Holz untersucht. In beiden Fällen erfolgte die Aussteifung fast ausschließlich durch die HGV-Elemente selbst. Der Parameterstudie ist als Ergebnis schließlich die maximale Ausnutzung der HGV-Elemente infolge Wind und Erdbeben für mehrgeschossige Gebäude mit unterschiedlichen Grundrissen zu entnehmen. Zusätzlich wurde als Schwerpunkt auch das Tragverhalten im Brandfall untersucht. Die Erkenntnisse aus [16, 18] stellen eine wesentliche Grundlage der vorliegenden Arbeit dar, weshalb deren Inhalte detailliert in Kapitel 4 behandelt werden.

2.2 Normenregelung und bisherige Zulassungen

Die Grundlage für die technische Beurteilung der Brauchbarkeit von geklebten Glaskonstruktionen bildet die Leitlinie der europäischen technischen Zulassung für „Geklebte Glaskonstruktionen – Teil 1: gestützte und ungestützte Systeme“ ETAG 002-1 [19]. Der Geltungsbereich von [19] für die

so genannten Structural Sealant Glazing Systems (SSGS) ist festgelegt zur Verwendung in Fassaden und Dächern mit einer Verglasung in einem beliebigen Winkel zwischen der Vertikalen und 7° Neigung zur Horizontalen. Des Weiteren besitzt [19] lediglich Gültigkeit für Verbundsysteme, bei denen die Haftflächen der Verklebung aus unbeschichtetem oder anorganisch beschichtetem Glas, sowie aus anodisiertem Aluminium oder nichtrostendem Stahl bestehen.

Abb. 2.5 verdeutlicht, dass nach [19] derzeit geklebte Glaskonstruktionen auf vier verschiedenen Arten konstruiert werden können: Bei Typ I und II wird das Eigengewicht der Glaskonstruktion vollständig mechanisch abgestützt, die Verklebung überträgt alle anderen einwirkenden Lasten auf die Unterkonstruktion. Im Unterschied dazu kommt der Verklebung bei Typ III und IV eine besondere Bedeutung zu – sowohl das Eigengewicht als auch alle anderen einwirkenden Lasten werden ausschließlich über die Verklebung abgetragen. Lediglich bei Typ I und III sind Haltevorrichtungen vorgesehen, um die Gefahr einer abstürzenden Glasscheibe im Fall eines Versagens der Verklebung zu verringern.

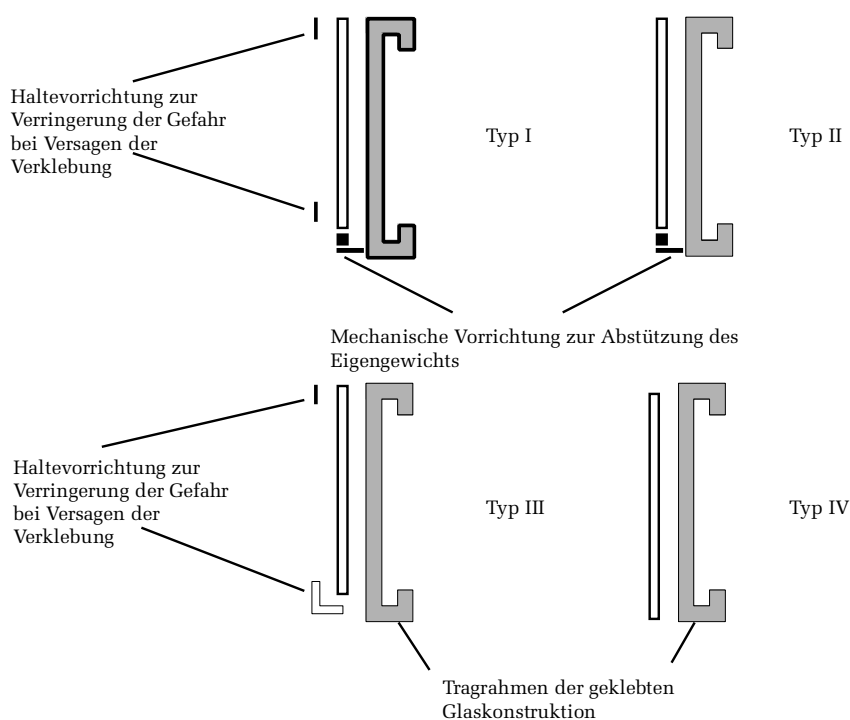


Abb. 2.5: Schematische Darstellung von Beispielen der verschiedenen Arten von geklebten Glaskonstruktionen [19]

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem mit Silikon verklebten Verbundsystem aus Holz und Glas. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass [19] hier keine Gültigkeit besitzt. Da es sich jedoch sehr wohl um ein SSGS handelt, dient [19] im Falle einer Zulassung als Anlehnung. In Österreich sind zusätzlich die bautechnischen Vorschriften – herausgegeben vom österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) – zu beachten. OIB-Richtlinie 4 [20] behandelt die Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit und schreibt folgendes vor, damit die Ausführung von HGV-Konstruktionen gesetzlich zulässig ist: „Vor- und abgehängte Bauteile und Fassadensysteme sind gegen Herabfallen zu sichern. Dies gilt jedenfalls als erfüllt, wenn diese Bauteile und Fassadensysteme entsprechend einer bautechnischen Zulassung (BTZ), einer europäischen

technischen Bewertung (ETB) oder einer harmonisierten europäischen Norm (hEN) ausgeführt sind.“ [20] Ebenfalls sind die Verwendungsbestimmungen für Bauprodukte aus Glas beziehungsweise Glasfassaden in den österreichischen Baustofflisten zu berücksichtigen. Baustoffliste ÖA [21] legt für Bauprodukte, die noch keinen europäischen Regelungen und somit keiner Communauté européenne (CE)-Kennzeichnung unterliegen fest: Die Anforderungen für die Verwendung sind über BTZ zu regeln. Baustoffliste ÖE [22] erfasst jene Bauprodukte, für die bereits europäische technische Regelwerke vorliegen und schränkt den Verwendungszweck weiter ein: Es ist nur zulässig, die Typen I und III aus Abb. 2.5 zu verwenden. Die Typen II und IV benötigen eine Bewilligung der Behörde, weshalb diese somit nur in Ausnahmefällen verwendet werden dürfen.

Für ein (silikon-)verklebtes Verbundsystem aus Holz und Glas liegt derzeit weder eine hEN noch ETB vor. Da keine normativen Grundlagen existieren, stellt dieses Bauprodukt ein unreguliertes Feld in der Baubranche dar weshalb die Erlangung eines CE-Kennzeichens (für den EU-weiten Einsatz) bisher noch nicht möglich ist. Um eine HGV-Konstruktion in Österreich dennoch in Verkehr bringen zu können, kann via eines Übereinstimmung Austria (ÜA)-Einbauzeichens die regelwerkkonforme Produktion sowie die Verwendbarkeit eines Bauproduktes geregelt werden. Wie bereits erwähnt, bewegt sich eine HGV-Konstruktion auch nur teilweise innerhalb des Anwendungsbereiches von [19] und weicht damit ebenfalls von den Bestimmungen der Baustoffliste ÖA [21] ab. Deshalb ist nach [21] eine BTZ beziehungsweise österreichische technische Zulassung (ÖTZ) erforderlich. Diese besteht neben Name und Adresse des Antragstellers aus zwei Teilen:

- Dem Brauchbarkeitsnachweis, der die technische Produktbeschreibung inklusive der Leistungsmerkmale (Regelungen zu Entwurf, Bemessung, Herstellung, Nutzung und Wartung) und der Prüfbestimmungen (Standicherheit, Wärme-, Schall- und Brandschutz, Schutz gegen schädliche Einflüsse etc.) beziehungsweise schematischen Darstellungen enthält und
- den festgelegten Verwendungsbestimmungen, wobei jedenfalls die baurechtlichen Bestimmungen, wie etwa die Bauordnungen oder Bautechnikverordnungen der jeweiligen Bundesländer, einzuhalten sind.

Nach erfolgter Montage des Bauprodukts ist die Übereinstimmung mit der BTZ zu kontrollieren. In Österreich wird im Zuge dieses Eignungsnachweises entweder vom Hersteller eine Übereinstimmungserklärung abgegeben oder es ist ein Übereinstimmungszeugnis (Registrierungsbescheinigung) einer akkreditierten Stelle (Zertifizierungsstellen der Länder oder durch vom OIB ermächtigte Zulassungsstellen) erforderlich. Mit der Antragstellung sind unter anderem folgende Unterlagen einzureichen: Angaben zur werkseigenen Produktionskontrolle, Angaben über die verwendeten Ausgangsstoffe sowie Nachweise und korrekte Kennzeichnung, positiver Prüfbericht der festgelegten Erstprüfung, Nachweis der Fremdüberwachung, etc. Wenn die eingereichten Unterlagen positiv beurteilt wurden, wird ein ÜA-Kennzeichnung ausgestellt womit das Bauprodukt zu kennzeichnen ist.

Um ein nicht geregeltes Bauprodukt in Deutschland durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) national auf den Markt bringen zu können, ist ausschließlich das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) zuständig. Über den Antrag einer abZ kann die Verwendbarkeit beziehungsweise Anwendbarkeit im Hinblick auf die bauaufsichtlichen Anforderungen geregelt werden. Ähnlich zu Österreich bedarf das Bauprodukt nach Erteilung der Zulassung noch einer Bestätigung ihrer Übereinstimmung mit der abZ. Nach einer positiven Prüfung der vorgelegten Übereinstimmungsnachweise wird dies auf dem Bauprodukt durch das Übereinstimmungszeichen (ÜA-Zeichen) kenntlich gemacht.

In Österreich gilt bisher der Typ I aus Abb. 2.5 unter Beachtung gewisser Einschränkungen als genehmigt und bedarf keiner weiteren Zulassung. Kapitel 3 geht auf diese HGV-Konstruktion und die vorgeschriebenen Einschränkungen detailliert ein.

Auch in Deutschland wurde bereits für eine HGV-Konstruktion eine Zulassung vom DIBt erteilt. In der abZ [23] ist der Anwendungsbereich exakt definiert: Die geklebte Glaskonstruktion dieser abZ entspricht Typ I oder Typ II aus Abb. 2.5. Für Typ I ist einerseits eine mechanische Abstützung des Glaseigengewichts erforderlich und andererseits noch zusätzlich eine mechanische Sicherung (Haltevorrichtung) zur Aufnahme der Windlasten für den Fall des Versagens der Verklebung vorzusehen. Für Typ II ist nur eine mechanische Abstützung des Glaseigengewichts und keine Haltevorrichtung erforderlich. Außerdem ist Typ II in Deutschland bis zu einer Höhe von 8m verwendbar.

In beiden Fällen ist es derzeit noch nicht zulässig, das Eigengewicht der Glasscheibe nur über die Klebefuge abzutragen. Dazu sind Klotzungen vorgesehen, die als mechanische Abstützungen das Eigengewicht direkt auf die Unterkonstruktion übertragen. Des Weiteren sind zur Sicherung der Glasscheibe gegen Herausfallen (im Falle des Versagens der Klebefuge) zusätzlich Haltevorrichtungen notwendig um die gesetzlichen Bestimmungen der jeweiligen Nation zu erfüllen. Während nach [23] in Deutschland ab einer Einbauhöhe von 8m diese Haltevorrichtungen einzubauen sind, ist in Österreich dieses Kriterium auch in Höhen unter 8m einzuhalten.

Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit von den Verwendungsbestimmungen der Baustoffliste ÖE [22] abzuweichen und die HGV-Konstruktion gemäß Typ IV aus Abb. 2.5 ohne jegliche Haltevorrichtung und ohne Verklotzung auszuführen. Der Bauwerber (Firma) ist in diesem Fall verpflichtet, der Bauaufsichtsbehörde des zuständigen Bundeslandes die geforderten Nachweise vorzulegen. Diese prüft im Einzelfall ob das notwendige Sicherheitsniveau erreicht wird und eine Genehmigung erteilt werden kann. Jedes Bauwerk macht eine gesonderte Zulassung der Baubehörde erforderlich. Das gilt ebenso für Deutschland: Bauprodukte, die nicht unter eingeführte technische Baubestimmungen fallen, und für die keine abZ vorliegt beziehungsweise die stark davon abweichen, bedürfen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE). Diese ist ebenfalls auf das jeweilige Bauvorhaben begrenzt. Zusätzlich ist in beiden Fällen auch ein Eignungsnachweis im Zuge der Übereinstimmungsprüfung zu führen.

Durch den Einsatz der neuartigen Bauweise im tragenden Bereich, befindet sich die HGV-Konstruktion des Typs III oder IV aus Abb. 2.5 erneut in einem technisch unregulierten Bereich. In Zukunft auch lastabtragende Silikonverklebungen wirtschaftlich sinnvoll ausführen zu können und auf die bisher erforderlichen Haltevorrichtungen zu verzichten, bietet einen Anreiz für Wirtschaft und Forschung. Hat die Klebefuge dauerhaft Schubkräfte infolge des Eigengewichts der Glasscheibe aufzunehmen, so ist dies in jedem Fall rechnerisch nachzuweisen. Abschnitt 2.1 erläutert, welche Berechnungsmodelle bisher entwickelt und welche sicherheitstheoretischen Überlegungen dazu in den letzten Jahren angestellt wurden. Außerdem gibt es einen weiteren sehr wesentlichen Aspekt: Auch das Monitoring und die Analyse des realen Verformungsverhaltens an tragend verklebten HGV-Prototypen liefert Aussagen über den Einfluss der Verklebung am Lastabtrag. Durch Kapitel 3 soll durch Aussagen zum Langzeitverhalten das tatsächliche Materialverhalten genauer nachvollzogen werden können. Auch die Beurteilung des Aussteifungspotentials und der Gesamttragfähigkeit von HGV-Konstruktionen in Kapitel 4 leistet einen Beitrag dazu, dass das Vertrauen in diese Bausysteme weiter wächst. Einerseits kann so auf die Problematik der fehlenden normativen Regelung für (lastabtragende) Holz-Glas-Verklebungen eingegangen werden. Und andererseits können die aufwendigen Zulassungsprozesse in diesem unregulierten Baufeld für die produzierenden und vertreibenden Firmen zukünftig vereinfacht werden.

Kapitel 3

Experimentelle Untersuchung

In diesem Kapitel wird die im Zuge der vorliegenden Arbeit durchgeführte experimentelle Langzeituntersuchung von tragend verklebten HGV-Elementen behandelt. Ziel ist es, ihr Verformungsverhalten genau zu beobachten beziehungsweise die gewonnenen Messdaten auszuwerten und die Verformungsmechanismen zu interpretieren. Das Monitoring soll über Jahre hinweg und unter instationären Klimabedingungen durchgeführt werden – dadurch kann das Verhalten von realen Bauten gut nachgestellt werden. Um das Langzeitverhalten dieses tragend verklebten HGV-Systems genauer nachvollziehen zu können, liegt das Hauptaugenmerk auf dem tatsächlichen Materialverhalten einzelner Systemkomponenten. Das Kriechverhalten des Silikonklebstoffs unter Langzeitbeanspruchung steht zwar im Vordergrund, dennoch ist auch das Verformungsverhalten der Birkenfurniersperrholz (BFU)-Koppelleiste von besonderem Interesse.

3.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Die Großprüfkörper, an denen die experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurden, basieren auf dem System nach Edl [7]. Zusammen mit den positiven Forschungsergebnissen der HFA [8] konnte eine Grundlage für die marktreife Serienfertigung und den baupraktischen Einsatz dieses HGV-Systems des Typs I aus Abb. 2.5 geschaffen werden. Deshalb gilt es in Österreich als genehmigt und bedarf auch keiner weiteren Zulassung. Da es sich jedoch um eine neuartige und weiterhin normativ nicht geregelte Bauweise handelt ([19] trifft nur bedingt zu), ist ein Eignungsnachweis zur Verwendung zu erbringen. Diese unumgängliche Übereinstimmungsprüfung wurde in Abschnitt 2.2 erläutert.

Die Firma UniGlas GmbH & Co. KG – ein Gesellschaftskreis unabhängiger internationaler Unternehmer – vertreibt das HGV-System in Form von „UNIGLAS | FACADE Holz-Glas-Verbundelement“. Basierend auf den Forschungsergebnissen der HFA [8] beschreibt UniGlas in einem Handbuch [24] die Anforderungen an die verwendeten Materialien und verdeutlicht auch jene Voraussetzungen und Einschränkungen, die in den Phasen der Planung, Herstellung, Montage und Nutzung unbedingt einzuhalten sind.

Demnach hat unabhängig von der Zulassung jedenfalls eine prüffähige statische Bemessung aller, für die Stabilität und Tragfähigkeit des Bauwerks maßgeblichen Komponenten zu erfolgen. Darunter ist die Bemessung der Unterkonstruktion (Primärtragwerk), stiftförmigen Verbindungsmittel, Isolierglasscheibe beziehungsweise Klebebreite im Isolierglasrandverbund und der Koppelleistenverklebung gemäß der aktuellen Normenreihe EN 199X zu verstehen.

Es darf nur der im Handbuch [24] genannte Klebstoff verwendet werden. Der Einsatz anderer Klebstoffe wird durch die Zulassung nicht abgedeckt, in diesem Fall sind die erforderlichen Nachweise gesondert durchzuführen. Die geforderten Nachweise der Prüfung gemäß Richtlinie VE-08/4 [25] konnten für den Zwei-Komponenten Silikonklebstoff OTTOCOLL[®] S660 bereits im Rahmen des Forschungsprojekts der HFA [8] erbracht werden. Eine erfolgreiche Erstprüfung in Hinblick auf Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und Widerstand gegen Windlast wurde durchgeführt. Das Datenblatt des verwendeten Klebstoffs ist Anhang A.1 beigelegt. orderten

Nachweise der Prüfung gemäß Richtlinie VE-08/4 [25] konnten für den Zwei-Komponenten Silikonklebstoff OTTOCOLL[®] S660 bereits im Rahmen des Forschungsprojekts der HFA [8] erbracht werden. Eine erfolgreiche Erstprüfung in Hinblick auf Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und Widerstand gegen Windlast wurde durchgeführt. Das Datenblatt des verwendeten Klebstoffs ist Anhang A.1 beigelegt.

Die Genehmigung für „UNIGLAS | FACADE Holz-Glas-Verbundelement“ entspricht Typ I aus Abb. 2.5. Deshalb ist zum Einen das Eigengewicht der Glasscheibe nicht über die Klebung sondern über eine mechanische Abstützung (Klotzung) direkt in die Unterkonstruktion abzutragen. Zum Anderen ist stets eine mechanische Scheibensicherung (MSS) als Haltevorrichtung, zur Aufnahme der Windlasten für den Fall des Versagens der Verklebung, vorzusehen. Falls die geklebten Einselemente auch absturzsichernde Eigenschaften übernehmen sollen, sind zusätzlich zu den MSS auch mechanische Absturzsicherungen (MAS) anzuordnen.

In der Zulassung ist die gebäudeaussteifende Wirkung mit dem Einselement „UNIGLAS | FACADE Holz-Glas-Verbundelement“ nicht vorgesehen. Unter Beachtung und Einhaltung der im Handbuch [24] angeführten Randbedingungen und Systemgrenzen (Anforderungen an Gebäude und Geometrie) kann dieses HGV-System jedoch einen Beitrag zur Gebäudeaussteifung bieten. Für einfache Anwendungen können Musterstatiken von fünf typischen Gebäudegeometrien des Einfamilienhausbaus herangezogen werden, die Neubauer [9] erstellt hat. Dabei wird jedenfalls vorausgesetzt, dass das Eigengewicht der Glasscheibe über eine Klotzung von der Unterkonstruktion abgetragen wird.

Wie in Abschnitt 2.2 angesprochen, wird in derzeitigen Forschungsprojekten der Fokus vorzugsweise auf HGV-Systeme gelegt, die Typ III oder Typ IV aus Abb. 2.5 entsprechen. Indem auf die bisher notwendigen Halte- und Abstützungsanordnungen verzichtet wird, kann ihr wirtschaftliche Potential näher erfasst und weiter ausgeschöpft werden. Aufgrund dieser Überlegungen wurde das marktreife HGV-System „UNIGLAS | FACADE Holz-Glas-Verbundelement“ des Typs I zu einem System des Typs III mit tragender Verklebung und Haltevorrichtung adaptiert. Die laufende experimentelle Untersuchung verzichtet somit auf die mechanische Abstützung – die tragende Verklebung übernimmt in weiterer Folge alle einwirkenden Lasten einschließlich des Eigengewichts der Glasscheibe und überträgt diese durch Schubkräfte auf den Tragrahmen der Verklebung. Eine weitere bauliche Veränderung betrifft die Haltevorrichtung, die in diesem Versuchsstand auf die MAS reduziert wurde.

3.2 Herstellung und Montage der Versuchskörper

Bei den Großprüfkörpern in Abb. 3.1 handelt es sich um zwei senkrechte Vertikalverglasungen in Form von HGV-Konstruktionen. Sie dienen als Abgrenzung der Werkshalle von den angrenzenden Büros im Werk der HFA beim Standort Stetten. Der Aufbau dieser HGV-Elemente ist vollkommen ident und in Abb. 3.2 schematisch dargestellt.

Aus dem Lieferprotokoll geht hervor, dass für beide HGV-Elemente Glasscheiben verwendet wurden, die anfangs für Pendelschlagprüfungen vorgesehen waren. Diese wurden jedoch nicht durchgeführt und die Verglasungen mit absturzsichernden Eigenschaften in weiterer Folge am Versuchsstand eingesetzt. Es handelt sich um Mehrscheibenisolierverglasung (MIG), gebildet aus zwei Glasscheiben und 16mm Scheibenzwischenraum mit tragendem Isolierglasrandverbund. Die äußere Glasscheibe besteht aus VSG mit 2x4mm Float und 0,76mm Polyvinylbutyral (PVB)-Folie. Die innere Glasscheibe wurde aus 8mm Einscheibensicherheitsglas (ESG) ausgeführt. Dabei beschreibt die Ausrichtung „innen“ die zu den Büroräumen gerichtete Seite der HGV-Elemente, also jene, wo sich die ESG-Scheibe befindet. Mit „außen“ ist die zur Werkshalle gerichtete Seite gemeint, wobei das MIG an dieser Stelle aus VSG besteht.



Abb. 3.1: Fertig montierte HGV-Elemente im Versuchsstand (Ansicht von der Werkshalle aus)
– links HGV-Element SÜD und rechts HGV-Element NORD

Das 2480mm breite und 3540mm hohe MIG wurde direkt auf eine unbeschichtete BFU-Koppelleiste mit einer Mindestnenndicke von 12mm verklebt. Die auf allen vier Seiten umlaufende Verklebung am Rand des MIG mit der so genannten gezahnten Koppelleiste erfolgte mit Zwei-Komponenten Silikonklebstoff OTTOCOLL® S660. Die Fugengeometrie des Konstruktionssilikons ergibt sich aus der Klebefugenbreite von 12mm und der Klebefugendicke, die 3,2mm beträgt. Um den Anforderungen an die Klebstofffuge nach [24] gerecht zu werden, durfte die Silikonverklebung des MIG mit der Koppelleiste nicht in situ am Montageort erfolgen, sondern musste als Werksverklebung vor der eigentlichen Montage durchgeführt werden. Dies übernahm die Firma Petschenig glastec GmbH. Zur Gewährleistung der geplanten Fugenbreite und -dicke wird das Distanzklebeband THERMALBOND® Space Tape V 2100 3,2x6mm der Firma Saint Gobain Plastics S.A. eingesetzt, welches die Glasscheibe in Lage und Abstand positioniert, die Klebefugenabmessungen vorab definiert und somit eine sichere Herstellung ermöglicht. Sobald die vollständige Aushärtung gewährleistet war, konnte die Firma Petschenig glastec GmbH schließlich auch die beiden vorgefertigten HGV-Elemente mit der Unterkonstruktion im Werk der HFA verschrauben.

Was für dieses wettergeschützte HGV-System bauphysikalisch eher von untergeordneter Bedeutung ist, der Vollständigkeit halber jedoch angeführt wird, ist das kompressible Klebeband DUPLOCOLL® 1002 einseitig ausgerüstet mit DUPLOCOLL VP 6504 der Firma Lohmann Klebebandsysteme GmbH. Zur Herstellung der Luft- und Schlagregendichtheit sowie als Dampfbremse wirkend, wurde es zuvor auf die Unterkonstruktion aufgebracht. Bei dieser wiederum handelt es sich um eine 160mm tiefe Wandscheibe aus fünffach verleimten Fichten-Brettspertholz.

Danach erfolgte die eigentliche Montage am 8. März 2016, indem die HGV-Elemente eingehoben und zur Ausrichtung auf vorab montierte Leisten abgestellt wurden. Als schonende Auflager-

flächen für die empfindlichen Glaskanten, dienen dabei je HGV-Element zwei lastabtragende Polyamid (PA)-Klötze PA6 auf diesen Leisten. Die beiden Klötze mit einer Breite von 100mm, einer Höhe von 16mm und einer Tiefe von 32mm wurden im Abstand von 20mm zur linken und rechten Glasecke entfernt angeordnet. Sie leiten das Eigengewicht der Verglasung über die an den Brettsperrholz-Wandscheibe montierten Leisten direkt an die Unterkonstruktion weiter. Für die exakte Ausrichtung sind auch die HGV-Elemente selbst durch Holzschrauben mit der Unterkonstruktion zu verschrauben. Dafür sind Bohrungen mit einem Durchmesser von 3,5mm im Abstand von 120mm an den Koppelleisten vorgesehen. Die trapezförmige Geometrie der gezahnten Koppelleisten ermöglicht grundsätzlich ein Ineinandergreifen von angrenzenden gezahnten Koppelleisten benachbarter HGV-Elemente. Die beiden HGV-Elemente wurden in dieser Ausführung unabhängig voneinander und mit einem Glaskantenabstand von 46,5cm verschraubt.

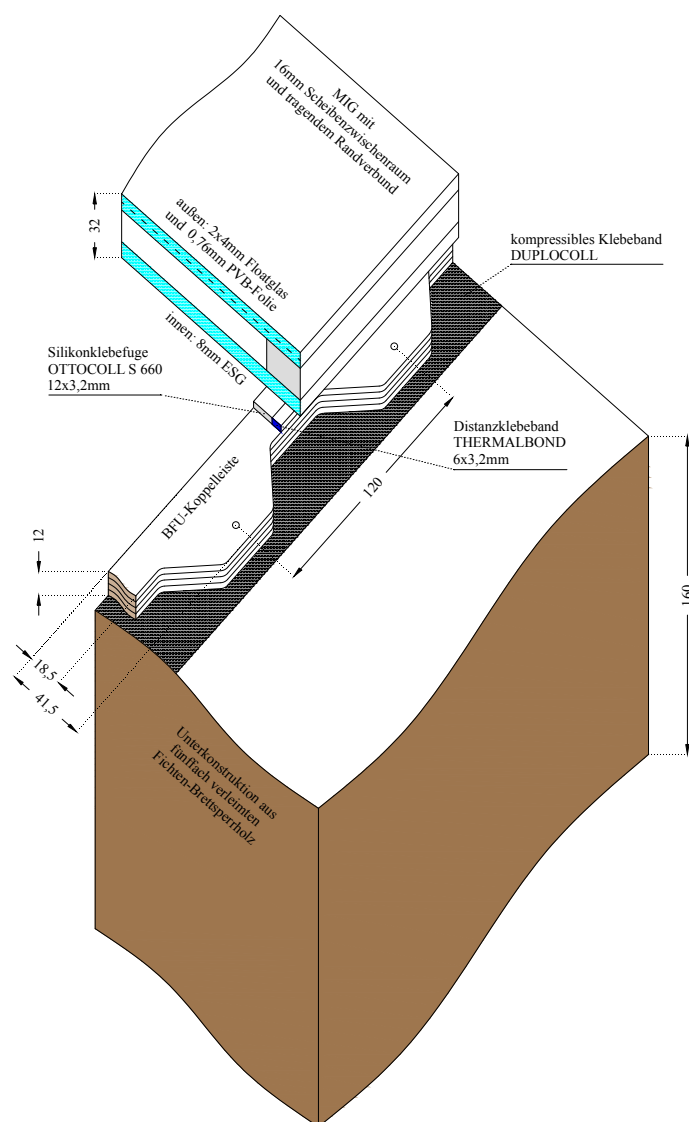


Abb. 3.2: Aufbau eines HGV-Elements nach [24], Maße in [mm]

Nachdem dadurch die vorschriftsmäßige Montage beider HGV-Elemente am 8. März 2016 abgeschlossen war, konnten bereits am darauffolgenden Tag, dem 9. März 2016, alle mechanischen Abstützungen in Form der PA-Klötze wieder vollständig entfernt werden. Ab diesem

Zeitpunkt übernahm die Silikonklebefuge die Abtragung des Eigengewichts des MIG. Durch diese bauliche Veränderung wurde das marktübliche HGV-System „UNIGLAS | FACADE Holz-Glas-Verbundelement“ des Typs I aus Abb. 2.5 zu einem Versuchsstand mit tragend verklebten HGV-System des Typ III adaptiert.

Wie in Abschnitt 3.1 verdeutlicht, sind an den HGV-Elementen Haltevorrichtungen für den Fall des Versagens der Klebefugen vorzusehen. Da am Versuchsstand abszurzsichernde Verglasungen zum Einsatz kamen, wurden bei den vorliegenden Konstruktionen nach der Montage in jedem Fall die MAS gemäß Leitdetail SYS-020 [24] angebracht. In Abb. 3.3 sind alle Teile erkennbar aus denen eine MAS besteht: Ein PA-Klotz PA6 39x17x14mm und ein Edelstahlplättchen 32x17x4mm werden mittels Schraube miteinander verbunden. Die Verschraubung verläuft durch die Koppelleiste bis zur Unterkonstruktion. Die Edelstahlplättchen binden etwa 10mm in Haltescheiben im tragenden Randverbund ein. Damit dies möglich ist, sind die notwendigen Polyvinylchlorid (PVC)-Inlets im MIG bereits bei der Herstellung in das frische Randverbundsilikon einzuschieben. Am 29. März 2016 wurde der Großteil der Absturzsicherungen entfernt, je HGV-Element verblieben vier dieser MAS gelockert im MIG, jeweils zwei an der linken und rechten Seite. In Abb. 3.6 ist ihre Lage gekennzeichnet. Auf die generell erforderlichen MSS wurde in weiterer Folge verzichtet.

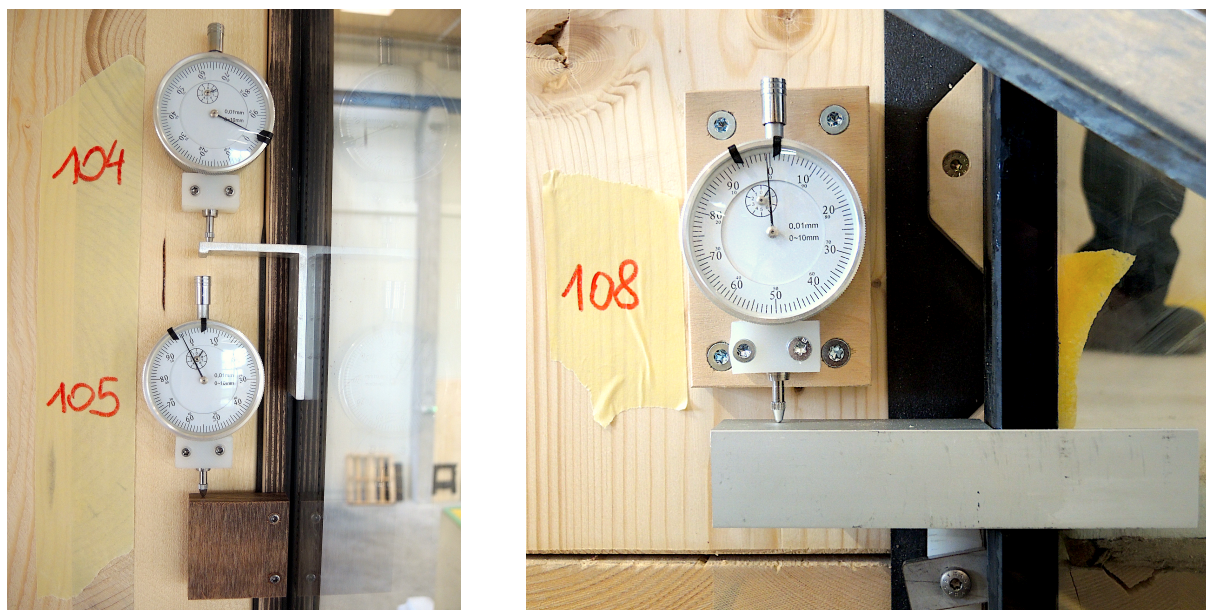


Abb. 3.3: MAS nach [24] als Haltevorrichtung für die MIG-Scheibe

3.3 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Die experimentellen Untersuchungen sind während der Bearbeitung dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen und dienen vorrangig der Beobachtung des Verformungsverhaltens der Klebstoffuge, die durch das Eigengewicht des MIG eine Langzeitbeanspruchung erfährt. Um den gesamten Verformungszustand der beiden HGV-Elemente im Beobachtungszeitraum zu erfassen, wurden nach der fertiggestellten Montage der HGV-Elemente am 8. März 2016 (Tag 0) bis zum darauffolgenden Tag insgesamt 12 Messmittel angebracht. Für das Monitoring werden Messuhren verwendet, womit Relativverschiebungen zwischen zwei Punkten in einer Genauigkeit von 1/100tel mm gemessen werden können. Als Referenzpunkt dient die Unterkonstruktion. Abb. 3.4 zeigt, auf

welche drei Arten die Messuhren an der Unterkonstruktion verschraubt beziehungsweise an den HGV-Elementen befestigt sind.



(a) Messuhr auf der ESG-Scheibe (oben) beziehungsweise auf der BFU-Koppelleiste (unten) – Seitenansicht

(b) Messuhr auf der VSG-Scheibe – Frontalansicht

Abb. 3.4: Messuhren zur Auswertung des gesamten Verformungsverhaltens

In Abb. 3.4a unten ist eine Messuhr auf der BFU-Koppelleiste dargestellt, die sich auf der Seite der Büroräume und etwa 217cm über der MIG-Unterkante befindet. Am 8. März 2016 wurden je HGV-Element insgesamt zwei dieser Messuhren (einmal links innen und einmal rechts innen) montiert und auf null gesetzt. Durch ein Panzerholz das mit zwei Schrauben an der Koppelleiste befestigt ist, werden die Relativverschiebung zwischen Koppelleiste und Unterkonstruktion an die Messuhr weitergeleitet. Diese ist in einen Kunststoffklotz geklemmt der seinerseits mit zwei Schrauben an der Unterkonstruktion befestigt ist. Am selben Tag wurden je HGV-Element zusätzlich zwei weitere Messuhren (einmal links innen und einmal rechts innen) auf der zu den Büroräumen gerichteten Glasseite angebracht und auf null gesetzt. Abb. 3.4a oben zeigt eine dieser Messuhren auf der ESG-Scheibe, etwa 230cm über der MIG-Unterkante. Die Relativverschiebung zwischen ESG-Scheibe und Unterkonstruktion wird in diesem Fall von einem Metallwinkel, der mit Ultraviolett (UV)-Klebstoff auf die Glasinnenseite geklebt ist, an die Messuhr weitergeleitet. Diese ist wiederum in einen Kunststoffklotz geklemmt, der, wie zuvor, mit zwei Schrauben an der Brettsperrholz-Wandscheibe befestigt ist. Die verbleibenden vier Messuhren wurden am 9. März 2016 auf der zur Werkshalle gerichteten Glasseite (VSG-Scheibe), jeweils etwa 33cm über der MIG-Unterkante, montiert (einmal links außen und einmal rechts außen). Daraufhin wurde die Nullmessung gemeinsam mit der ersten Ablesung der anderen Messuhren durchgeführt. Der Aufbau in Abb. 3.4b ist grundsätzlich ident mit jenem auf den ESG-Scheiben. Lediglich ein Sperrholzklotz ist als Abstandhalter zwischen der Unterkonstruktion und dem Kunststoffklotz vorgesehen um die Relativverschiebung zwischen VSG-Scheibe und Unterkonstruktion zu erfassen.

In den folgenden Abschnitten wird zur Beschreibung der drei unterschiedlichen Messuhren die Bezeichnung „Messpunkt“ eingeführt und zur Unterscheidung lediglich die jeweiligen Messpunkt-

positionen (MP) herangezogen. Dazu ist in Abb. 3.5 der Horizontalschnitt A-A aus Abb. 3.6 dargestellt, dem die räumliche Anordnung der jeweiligen MP entnommen werden kann. MP1 entspricht demnach allen Messuhren auf den BFU-Koppelleisten (Abb. 3.4a unten), welche die Relativverschiebungen zwischen den BFU-Koppelleisten und der Unterkonstruktion zusätzlich aber auch jene Verformung der Schraubenebene erfassen. Alle Messuhren auf den ESG-Scheiben gemäß Abb. 3.4a oben entsprechen MP2 und stellen die Relativverschiebung zwischen den ESG-Scheiben und der Unterkonstruktion dar. An MP3 (Messuhren auf den VSG-Scheiben in Abb. 3.4b) kann die Relativverschiebung zwischen VSG-Scheibe und Unterkonstruktion abgelesen werden. Dabei handelt es sich um die resultierende Verformung des jeweiligen Gesamtelements. Über verschiedene Differenzbetrachtungen der Messwerte dieser MP wurde das Verformungsverhalten einzelner Systemkomponenten errechnet (siehe Differenztable aus Anhang B.2), was noch spezifischere Aussagen in der Auswertung ermöglicht. Indem der Messwert der MP1 von jenem der MP2 abgezogen wird, kann das Kriechverhalten der Silikonklebefuge (zwischen Koppelleiste und MIG) inklusive der Verformung der ESG-Scheibe separat dargestellt werden. Aus der Differenzbetrachtung zwischen MP3 und MP2 wird das Kriechverhalten der Klebefuge des tragenden Randverbunds im MIG und gleichzeitig die Verformung der VSG-Scheibe abgebildet. Der KMP in Abb. 3.5 stellt lediglich schematisch dar, dass das instationäre Klima der Werkshalle (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) aufgezeichnet wird.

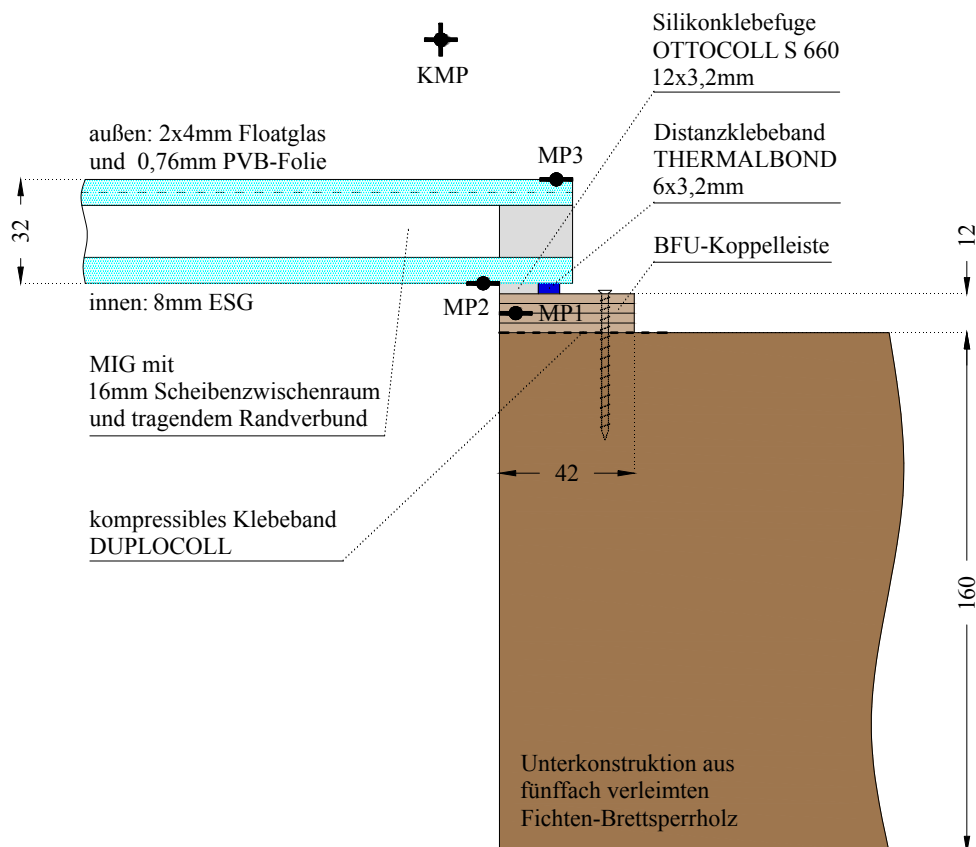


Abb. 3.5: Monitoring am Versuchsstand durch drei Messpunkte und einen Klimamesspunkt (KMP), Maße in [mm]

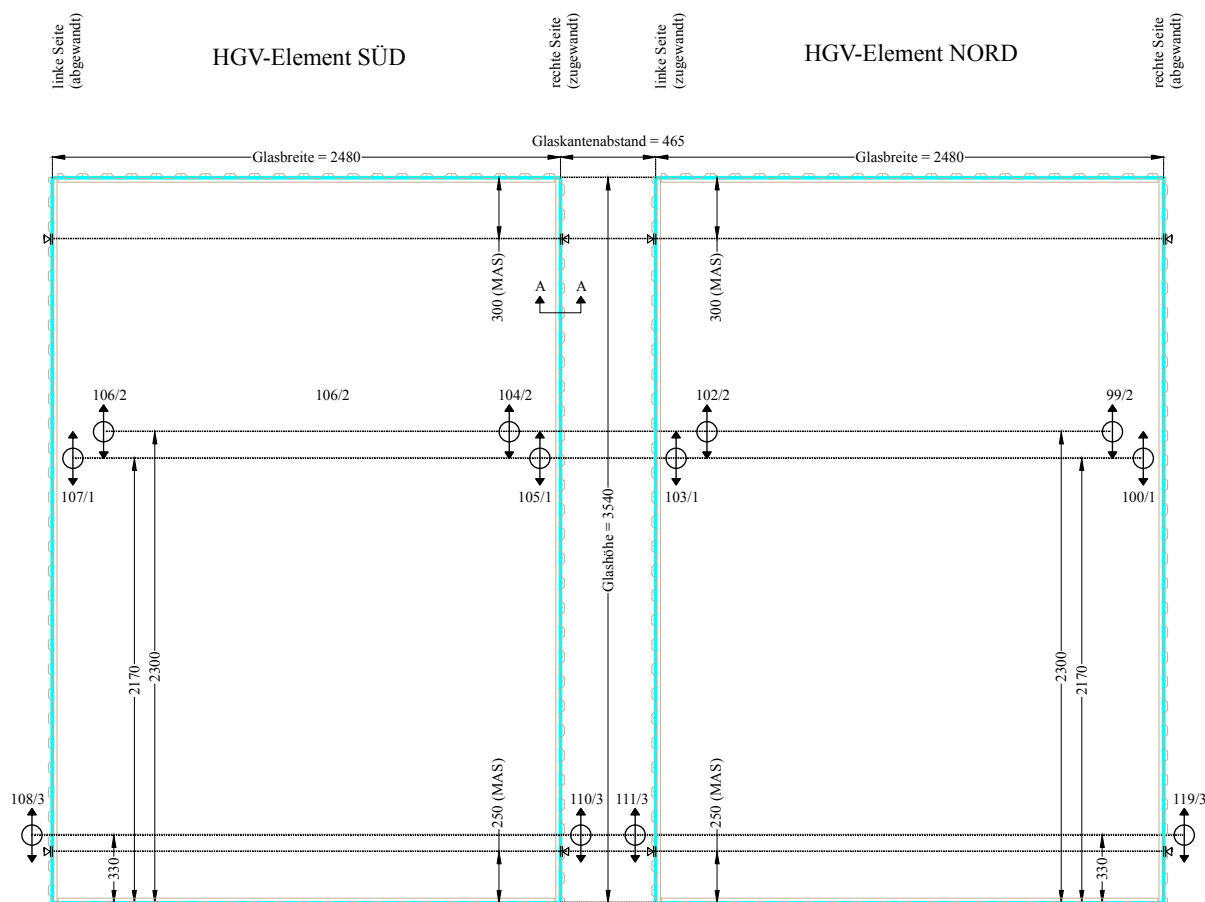


Abb. 3.6: Prinzipische Skizze der HGV-Elemente mit Prüfkörperbezeichnung und Anordnung der Messuhren samt Messuhrbezeichnungen, Maße in [mm]

Der schematischen Skizze in Abb. 3.6 kann die genaue Bezeichnung der beiden Prüfkörper entnommen werden. Fortlaufend wird „HGV-Element SÜD“ für die linke und „HGV-Element NORD“ für die rechte Konstruktion gewählt. Die Seitenbezeichnungen „linke Seite“ und „rechte Seite“ orientieren sich an der Ansichtsfäche von außen – also den VSG-Scheiben der HGV-Elemente die ein Betrachter von der Werkshalle aus sieht (Abb. 3.1). Die linke Seite des HGV-Elements SÜD und rechte Seite des HGV-Elements NORD sind abgewandte Seiten, die rechte Seite des HGV-Elements SÜD und die linke Seite des HGV-Elements NORD sind einander zugewandt. Abb. 3.6 zeigt auch die exakte Lage aller angebrachten Messuhren und die zugehörige Messuhrbezeichnung, die sich aus Messuhrnummer und zugehöriger MP zusammensetzt. Beispielsweise meint 108/3 die Messuhrnummer jener Messuhr auf der linken Seite des HGV-Elements SÜD und /3 macht deutlich, dass diese Messuhr eine MP3 darstellt. In diesem Fall handelt es sich also um eine Messuhr, die sich auf der VSG-Scheibe (zur Werkshalle gerichtete Glasseite) befindet und die resultierenden Verformungen der linken Seite des Gesamtelements erfasst. Eine Zusammenfassung der Messuhrbezeichnungen dieses Monitorings ist in der folgenden Aufzählung vermerkt:

- Messuhren auf den BFU-Koppelleisten – MP1: 100/1, 103/1, 105/1 und 107/1
- Messuhren auf den ESG-Scheiben – MP2: 99/2, 102/2, 104/2 und 106/2
- Messuhren auf den VSG-Scheiben – MP3: 108/3, 110/3, 111/3 und 119/3

Nachdem die Montage der 12 Messuhren am 9. März 2016 abgeschlossen war (Messbeginn beziehungsweise Tag 1 ab fertiggestellter Montage), konnten auftretende Verformungszustände durch eine Mitarbeiterin der HFA händisch abgelesen und dokumentiert werden. Im Verformungsprotokoll aus Anhang B.1 sind die gesamten Messdaten von HGV-Element SÜD beziehungsweise HGV-Element NORD bis Tag 450 (1. Juni 2017) detailliert aufgelistet. Über die Differenztafel aus Anhang B.2 kann zusätzlich das Verformungsverhalten einzelner Systemkomponenten abgeleitet werden. Beide Tabellen sind ähnlich aufgebaut: Die Spalten stellen die Verformungen in mm je Messuhr beziehungsweise Differenzbetrachtung der jeweiligen MP dar. Ein negatives Vorzeichen kennzeichnet eine Absenkung nach unten. Somit haben positive Werte die Bedeutung einer Hebung. Die Zeilen beschreiben den Ablesezeitpunkt mit zugehörigem Ablesedatum und dem Tag ab fertiggestellter Montage.

Um Verformungsänderungen in der Anfangsphase exakter zu erfassen, wurden die Messdaten innerhalb der ersten sechs Wochen ab Messbeginn häufiger protokolliert. Das war vor allem deshalb wichtig, um die bauliche Adaptierung der MAS am Tag 21 (29. März 2016) und das daraus resultierende abhängige Verformungsverhalten zu berücksichtigen. Erst ab Tag 55 (2. Mai 2016) erfolgte die Messung im Monatsrhythmus und seit Tag 125 (11. Juli 2016) wird auch das instationäre Klima der Werkshalle (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) mit einem Klimadatenlogger (KMP in Abb. 3.5) stündlich aufgezeichnet. Somit kann jegliche Klimaveränderung genau verfolgt und in der Auswertung ein etwaiger Zusammenhang mit den Verformungen hergestellt werden.

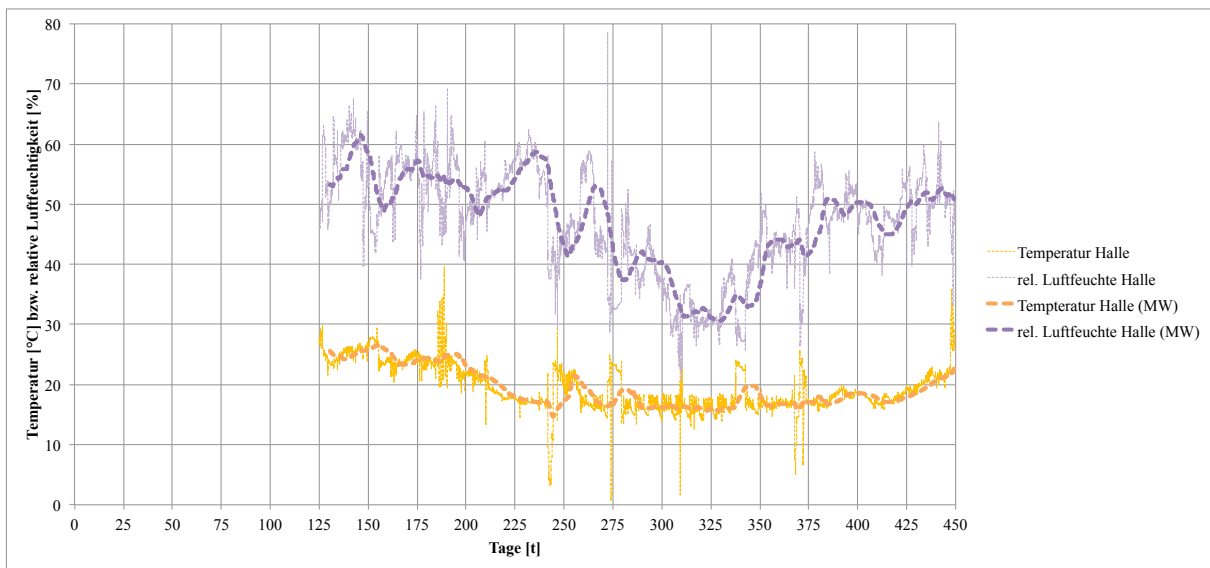


Abb. 3.7: Ganglinien der klimatischen Bedingungen in der Werkshalle

In Abb. 3.7 sind mittels Ganglinien die täglichen Schwankungen bezüglich Temperatur in orange und der relativen Luftfeuchte in violett angegeben. Zusätzlich wird der jeweilige Mittelwert (MW) als gleitender Durchschnitt gezeigt. Dieser ermöglicht es, vereinfacht eine Tendenz im Klimaverlauf im Beobachtungszeitraum zu erkennen. Sehr deutlich wird, welche großen Klimaschwankungen während der Versuchsdauer aufgetreten sind: Die Minimal- und Maximalwerte betragen 20,6% beziehungsweise 78,6% bezüglich der relativen Luftfeuchte, während die Temperatur zwischen 0,6°C und 39,8°C schwankte. Man bemerkt, dass ab dem Tag 240 (3. November 2016) die relative Luftfeuchte stark abgenommen hat, um Tag 330 (1. Februar 2017) ihren Tiefpunkt erreicht und in der anschließenden Phase wieder kontinuierlich zunimmt. Für den Temperaturverlauf stellt sich mit Tag 240 ebenso ein markanter Punkt ein: Durch die vorangegangene Kälteperiode beginnend mit Tag 190 (14. September 2016), bei der die Temperatur von etwa 30°C auf 10°C abnimmt –

und dem darauffolgenden erneuten Anstieg bis Tag 260 (23. November 2016). Ansonsten scheint die Werkshalle relativ konstanten Temperaturbedingungen ausgesetzt zu sein. Die mittlere relative Luftfeuchte im gesamten Beobachtungszeitraum beträgt 47,1%, die mittlere Temperatur 19,4°C. Zu beachten sind auch die Schwankungen des Klimas innerhalb eines vollständigen Tages. Innerhalb von 24h ist es zu Schwankungen der relativen Luftfeuchte von bis 45,3% zu gekommen. Der gemessene Temperaturunterschied innerhalb von 24h betrug maximal 23,6°C. Somit spielt für die Messung der Verformungen auch der Zeitpunkt der täglichen Ablesung eine Rolle und erfolgte daher immer zur selben Zeit, in etwa gegen 10 Uhr in der Früh des jeweiligen Messtages. Um Aussagen über das Temperaturgefälle zwischen Hallenklima und Büroklima zu treffen, wurde ebenfalls einmal die Innentemperatur der Büroboxen gemessen. Leider liegen hierfür keine laufenden Temperaturaufzeichnungen vor. Am Tag 358 (28. Februar 2017) betrug diese um 13 Uhr 22°C. Im Vergleich dazu konnten mit dem KMP in der Werkshalle 16,8°C und eine relative Luftfeuchte von 42,9% gemessen werden. Während die Werkshalle durch Dunkelstrahler beheizt wird, ist das Klima in den Büroboxen einer Temperatursteuerung mittels Radiatoren unterworfen. Konkret bedeute das, dass in der Nacht auf etwa 16°C und am Wochenende auf ca. 12°C abgesenkt wird. Die hohe Absenkung findet außerdem im Betriebsurlaub – jedes Jahr zwischen Weihnachten und Silvester – statt. Die Gänge, die zu den einzelnen Büroboxen führen, sind ungeheizt. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass sich im Innenraum ein moderates Innenklima mit durchschnittlich 20°C und 60% relativer Luftfeuchte einstellt.

3.4 Auswertung der Messdaten

Die bis zum Tag 450 aufgetretenen Verformungsmechanismen werden in diesem Abschnitt ausgewertet und interpretiert. Aus den unterschiedlichen MP in Abb. 3.5 ergaben sich an den beiden HGV-Elementen mehrere nützliche Daten als Ergebnis der Untersuchungen. Neben dem Gesamtsystem werden die Verformungsmechanismen der einzelnen Systemkomponenten untersucht:

- Verformungsmechanismen der Gesamtelemente (MP3)
- Verformungsmechanismen der BFU-Koppelleisten und Schraubenebene (MP1)
- Kriechverhalten der Silikonklebefuge und Verformung der ESG-Scheibe (MP2-MP1)
- Kriechverhalten der Klebefugen des tragenden Randverbunds und Verformung der VSG-Scheibe (MP3-MP2)

Mit Hilfe der Daten des Verformungsprotokolls aus Anhang B.1 wurden mehrere Verformungskurven erstellt. Die linke Seite des HGV-Elements SÜD ist fortan in dunkelgrün, die rechte Seite in hellgrün dargestellt. Für das HGV-Element NORD wurde links hellblau und rechts dunkelblau gewählt. In jedem Diagramm macht eine schematische Abbildung der beiden HGV-Elemente im rechten oberen Eck diese Farbwahl nochmals deutlich, auch die jeweilige MP ist gekennzeichnet. Beim Verformungsverlauf ist eine fallende Kurve (negative Werte) mit einer Absenkung gleichzusetzen. Steigt die Kurve nach oben an (positive Werte), hat sich auch die betrachtete Stelle nach oben bewegt. Am Beginn werden die beiden HGV-Elemente immer getrennt voneinander analysiert. Erst im Anschluss werden die Verformungsmechanismen gegenübergestellt um Zusammenhänge zu betrachten. In den Abbildungen mit überlagerten Kurven wird ebenfalls der Klimaeinfluss und dessen Zusammenhang mit der Geschwindigkeit der Deformationen sichtbar. Dazu sind jeweils links die Verformungen in mm sowie rechts die Temperatur in °C beziehungsweise die relative Luftfeuchte in % aufgetragen. Die vorliegenden

Verformungskurven lassen Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten zu, auch mögliche Gründe dafür werden erläutert. Zum Abschluss werden noch Problemstellungen im Monitoring aufgezeigt.

3.4.1 Verformungsmechanismen der Gesamtelemente

Wie in Abschnitt 3.3 erläutert und in Abb. 3.6 gekennzeichnet, stellen die äußeren Messuhren 108/3 beziehungsweise 110/3 auf der VSG-Scheibe (MP3 in Abb. 3.5) die resultierenden Verformungen auf der linken und rechten Seite des HGV-Elements SÜD dar. In Abb. 3.8 ist das Verhalten dieses Gesamtelements im betrachteten Zeitraum erkennbar. Erwartungsgemäß registrierten diese Messuhren die höchsten Verformungswerte.

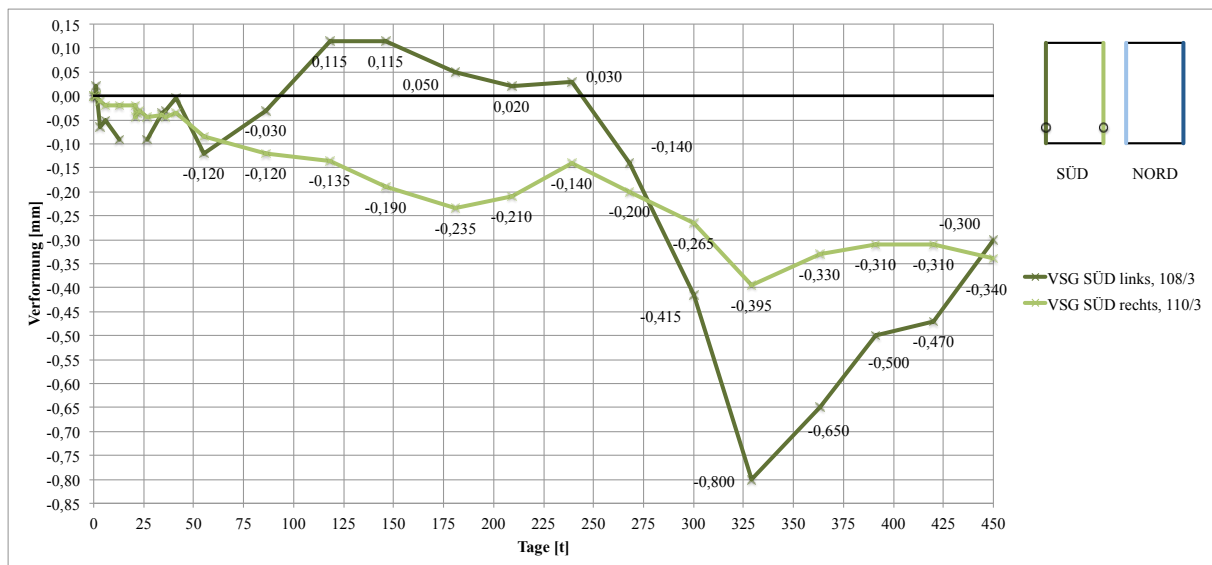


Abb. 3.8: Gesamtverformung des HGV-Elements SÜD

Der Startwert beider Verformungskurven liegt direkt auf der Abszisse bei Null (Nullmessung). Am Tag 1 um 8 Uhr hat die erste Messung stattgefunden. Um einen Überblick von den gesamten elastischen Anfangsverschiebungen zu bekommen, wurde kurz nach Lastaufbringung (Entfernung der PA-Auflager) am selben Tag um 9 Uhr eine weitere Ablesung aller Messuhren durchgeführt. Durch eine Differenzbetrachtung (Differenz zwischen dem Messwert um 9 Uhr und dem Messwert um 8 Uhr) im Verformungsprotokoll aus Anhang B.1 kann die gesamte elastische Anfangsverschiebung für beide Seiten berechnet werden. Die linke Seite hat sich um $+0,02\text{mm}$ angehoben (Differenz zwischen $+0,02\text{mm}$ und $0,00\text{mm}$) und erst die Messwerte von Tag 3 zeigen eine Absenkung auf $-0,065\text{mm}$. Auf der rechten Seite hat sich gar keine plötzliche Anfangsverschiebung eingestellt. Jedoch haben die Verformungen in den ersten Monaten linear zugenommen, weshalb sich das Gesamtelement rechts nach unten abgesenkt hat. In weiterer Folge bewegte sich die linke Seite nach oben und die rechte Seite nach unten. Anschließend verlaufen beide Kurven annähernd parallel. Es ist offensichtlich, dass die linke Seite um Tag 330 eine größere und intensivere Verformung erlitten hat als die rechte. Während auch die Rückverformungen links viel stärker ausgeprägt sind, klingen rechts die Verformungen nach und nach ab und scheinen am Ende des Beobachtungszeitraums fortschreitend wieder leicht zuzunehmen.

Ein Problem mit der linken MP 108/3 auf der VSG-Scheibe ist ein weiterer Grund dafür, dass die Deformationen in den ersten sechs Wochen ab Messbeginn sehr unregelmäßig aufgezeichnet wurden. Der Metallwinkel, welcher mit UV-Klebstoff auf die Glasfläche verklebt wurde, hat sich zwischen Tag 13 und Tag 21 gelöst. Nachdem er mit Uhu Plus Zwei-Komponenten Epoxidkleber

am Tag 24 neu befestigt wurde, konnte nach der Aushärtung die Ablesung an dieser Messstelle ab Tag 27 (4. April 2016) wieder fortgesetzt werden. Das erklärt die in diesem Zeitraum fehlenden Messdaten und die Unterbrechung der Verformungskurve. Um diese Messuhr auf das bisherige Verformungsverhalten des HGV-Elements zu kalibrieren, wurde die bis zum Tag 13 aufgetretene Verformung an dieser Messstelle als Startwert für den weiteren Messverlauf übernommen. Die Fehlstelle könnte ein Hinweis sein, für den sprunghaften Verlauf (Absenkung und Hebung der linken Seite) in diesem Zeitraum. Möglicherweise hatte es auch eine Auswirkung auf die gemessene elastische Anfangsverschiebung. Um sicherzustellen, ob keine Beeinflussung der laufenden Messung vorliegt, sollte der neu verklebte Metallwinkel laufend auf eine Verdrehung beziehungsweise Lockerung untersucht werden. Diese Vorsichtsmaßnahme gilt ebenso für alle anderen Metallwinkel. In Abb. 3.4b ist die Winkelposition der Messuhr 108/3 dargestellt.

Gut zu erkennen sind die bisher aufgestellten Vermutungen und Interpretationen ebenfalls auch an den resultierenden Verformungen am HGV-Element NORD in Abb. 3.9. Die elastischen Anfangsverschiebungen des Gesamtelements am Tag 1 betragen gemäß Verformungsprotokoll aus Anhang B.1 links $-0,07\text{mm}$ (Differenz zwischen $-0,07\text{mm}$ und $0,00\text{mm}$) und rechts $-0,08\text{mm}$ (Differenz zwischen $-0,08\text{mm}$ und $0,00\text{mm}$). In Abb. 3.9 ist jedoch ein Maximum am Tag 3 von $-0,13\text{mm}$ sehr deutlich erkennbar. Dem folgt links eine gleichmäßige Verformungszunahme mit Fortschreiten der Versuchsdauer. Rechts hingegen kommt es zu einem durchwachsenen und unregelmäßigen Bereich mit einer rückläufigen Bewegungen. Beide Kurven klingen im Anschluss tendenziell ab, auf der rechten Seite wird sogar der Ausgangswert der Nullmessung erreicht. Diese erleidet im Anschluss um Tag 330 große Verformungen, welche jedoch wieder um die Hälfte zurückgehen. Während auf der linken Seite das erste Drittel des Beobachtungszeitraums den Großteil der Verformungen ausmacht, sind diese in den folgenden zwei Dritteln auf ein Minimum begrenzt.

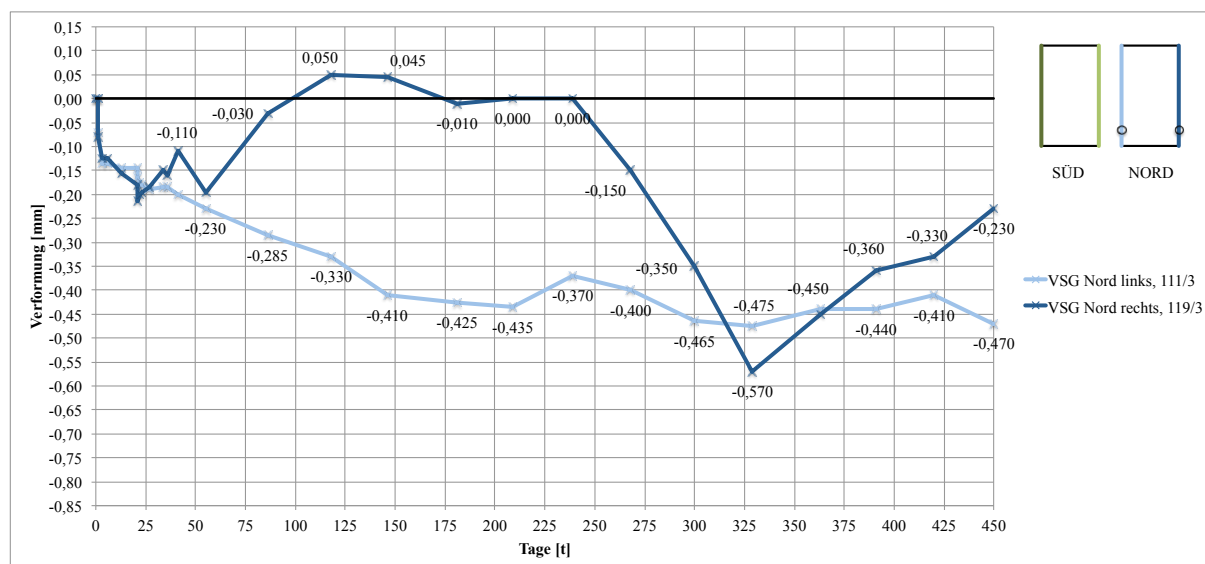


Abb. 3.9: Gesamtverformung des HGV-Elements NORD

Zur deutlichen Betrachtung des Zusammenhangs zwischen resultierenden Deformationen am SÜD- beziehungsweise NORD-Element und Klima werden in Abb. 3.10 die Verformungskurven und die gemittelten Klimaverläufe übereinandergelagert. Obwohl die beiden HGV-Elemente unabhängig voneinander an der Unterkonstruktion befestigt sind, erkennt man einen eindeutigen Zusammenhang bei den Deformationen der abgewandten Seiten (linke Seite des HGV-Elements

SÜD und rechte Seite des HGV-Elements NORD) und der zugewandten Seiten (rechte Seite des HGV-Elements SÜD und linke Seite des HGV-Elements NORD).

Alle Verformungskurven scheinen im Bezug auf die gesamten elastischen Anfangsverschiebungen eines gemein zu haben: Diese waren direkt nach Lastaufbringung und zum Zeitpunkt der zweiten Messung am Tag 1 offenbar noch nicht vollständig abgeschlossen. Blickt man in Abb. 3.10, erkennt man zu Beginn der Belastungsgeschichte einen Fortschritt der elastischen Verformungen über den Messzeitpunkt hinaus. Erst mit der nächsten Messung am Tag 3 werden die maximalen Anfangsverschiebungen abgebildet.

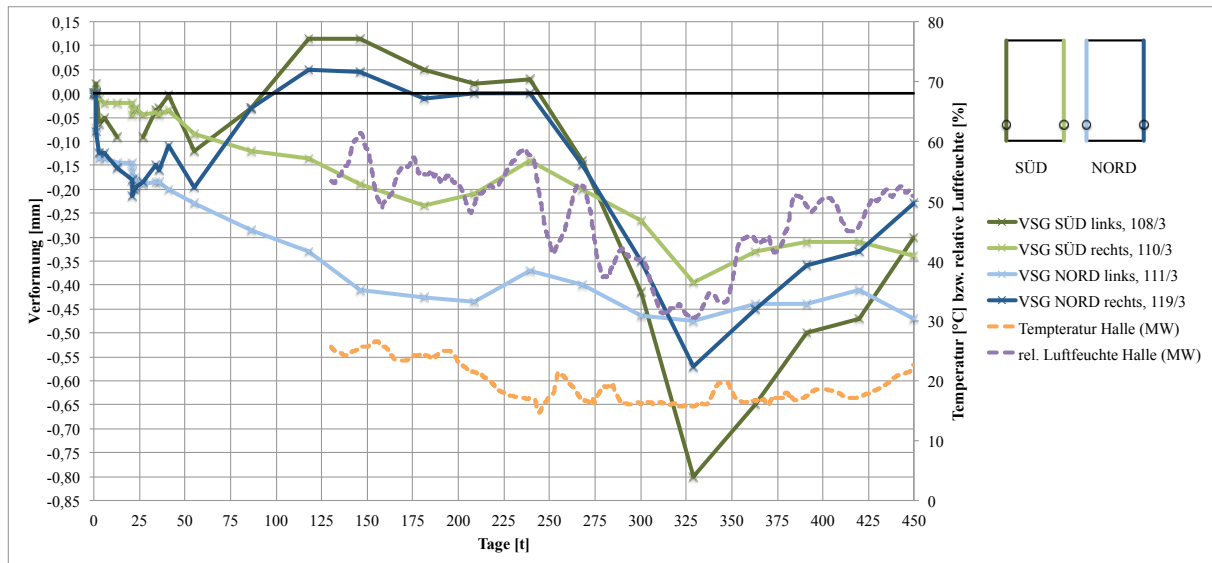


Abb. 3.10: Überlagerte Gesamtverformungen von HGV-Element SÜD und HGV-Element NORD samt den gemittelten Klimaverläufen

Die Verformungsverläufe liefern einen ersten Anhaltspunkt für die Annahme einer Rotation der Gesamtelemente: Während sich am Beginn die abgewandten Seiten nach oben bewegen, setzt an den zugewandten Seiten das kontinuierliche Absinken nach unten fort. Es ist eine Bewegung hin zur gemeinsamen Mitte erkennbar und es scheint, als würden sich zwischen Tag 50 und Tag 125 das HGV-Element SÜD nach rechts und das HGV-Element NORD nach links zu drehen beginnen. Die Drehbewegung endet, indem sich schließlich beide HGV-Elemente vollständig aber unregelmäßig nach unten bewegen.

Wie einheitlich die Verformungsverläufe der abgewandten Seiten sind, ist sehr interessant. Die Annahme, dass ein Montageproblem der Messuhr 108/3 vom HGV-Element SÜD für den sprunghaften Verlauf der linken Seite um Tag 25 verantwortlich war, könnte somit widerlegt werden. Bei genauerer Betrachtung der Verformungskurven dieser beiden Seiten fällt außerdem auf, dass in etwa der selbe zeitliche Verlauf wie bei der Luftfeuchtigkeitsentwicklung besteht. Zwischen den Tagen 225 und 350 sollte sich zudem auch die Deformationen der rechten Seite des HGV-Elements SÜD und der linken Seite des HGV-Elements NORD allmählich anpassen. Folgende Aussage kann getroffen werden: Ein Zusammenhang der Gesamtverformungen mit der Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit in der Halle ist zum Teil gegeben. Die steil fallenden Kurven mit dem Tiefpunkt am Tag 330 liefern zusätzlich folgenden Anhaltspunkt den auch Rinnhöfer [11] erkannt hat: Mit abfallender relativer Luftfeuchte ist auch eine rasche Zunahme der Deformationen verbunden. Möglicherweise waren ebenfalls die sprunghaften Verläufe am Beginn (Absenkungen und Hebungen) aufgrund dieser direkten Abhängigkeit mit der relativen Luftfeuchte verknüpft.

Ein Zusammenhang der Gesamtverformungen mit der Entwicklung der Temperatur in der Halle ist auf den ersten Blick nicht erkennbar. Es wird weder dargestellt, dass aus höheren Temperaturen stärkere Verformungen resultieren, noch, dass bei geringeren Temperaturen die Verformung konstant bleiben. Das kann mit der geringen Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Hallentemperatur von $19,4^{\circ}\text{C}$ und mittlerer Bürotemperatur von etwa 20°C zusammenhängen (Abschnitt 3.3), aus der sich kaum ein Temperaturgefälle ergibt.

Ob diese Annahmen als richtig zu bewerten sind, wird sich im Laufe des weiteren Versuchs zeigen. Im folgenden Abschnitt werden die Messdaten der BFU-Koppelleisten detailliert ausgewertet und diese ersten Anhaltspunkte (elastische Anfangsverschiebung, Rotation, Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen) überprüft.

3.4.2 Verformungsmechanismen der BFU-Koppelleisten

Die Relativverschiebungen zwischen BFU-Koppelleiste und Unterkonstruktion des HGV-Elements SÜD werden durch MP1 in Abb. 3.5 erfasst und sind in Abb. 3.11 zu sehen. Sofort fällt auf, wie unterschiedlich sich die linke Koppelleiste im Gegensatz zur rechten verhalten hat.

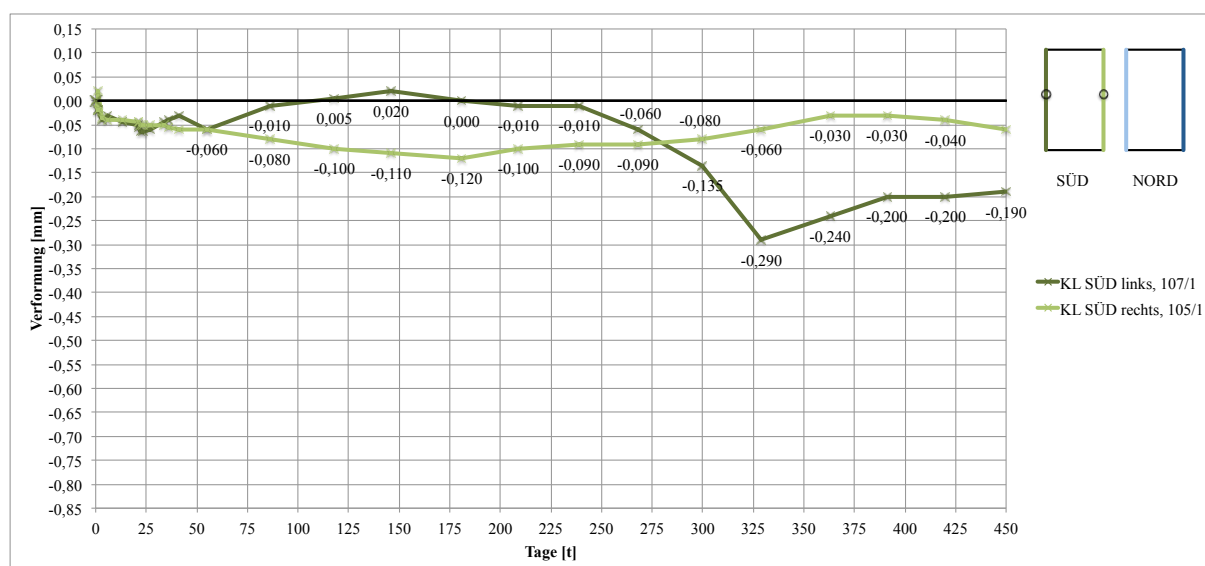


Abb. 3.11: Koppelleistenverformung des HGV-Elements SÜD

Zu Beginn wird ebenfalls mit Hilfe des Verformungsprotokolls aus Anhang B.1 untersucht, ob durch die Differenzbetrachtung eine elastische Anfangsverschiebung vorliegt. Unmittelbar nach Lastaufbringung hat sich demnach auf der linken Seite keine eingestellt (Differenz zwischen $-0,02\text{mm}$ und $-0,02\text{mm}$). Auf der rechten Seite ist sogar eine Hebung aufgetreten die gemäß Verformungsprotokoll $+0,04\text{mm}$ (Differenz zwischen $+0,02\text{mm}$ und $-0,02\text{mm}$) beträgt. Für beide Seite gilt: Die maximale Anfangsverschiebung ergibt sich am Tag 3 zu etwa $-0,04\text{mm}$. Die Verformungen sind sehr ähnlich, nehmen beiderseits bis Tag 25 nur minimal zu und stimmen auch hier noch gut überein. Auf der rechten Seite verläuft der Verformungszuwachs linear weiter, und zwar unabhängig von den klimatischen Bedingungen, bis ein Tiefpunkt um Tag 180 erreicht wird. Ab diesem Zeitpunkt ist eine Rückverformung zu erkennen. Nachdem auch diese abklingt, bleibt schließlich eine geringe Restverformung erhalten die in etwa der Absenkung um Tag 3 entspricht. Ganz anders sieht es auf der linken Seite des HGV-Elements SÜD aus. Die rückläufige Bewegung nimmt immer mehr ab und die Verformungen bleiben nahezu konstant wodurch sich der Höchstwert der Hebung im Beobachtungszeitraum um Tag 150 einstellt. Im Anschluss tritt wie am

Gesamtelement ebenfalls eine Verformungszunahme auf, die mit einer gleichmäßigen Absenkung ihren Tiefstwert um Tag 330 erreicht. Gegen Ende hin nimmt die Verformung tendenziell um ein Drittel wieder ab.

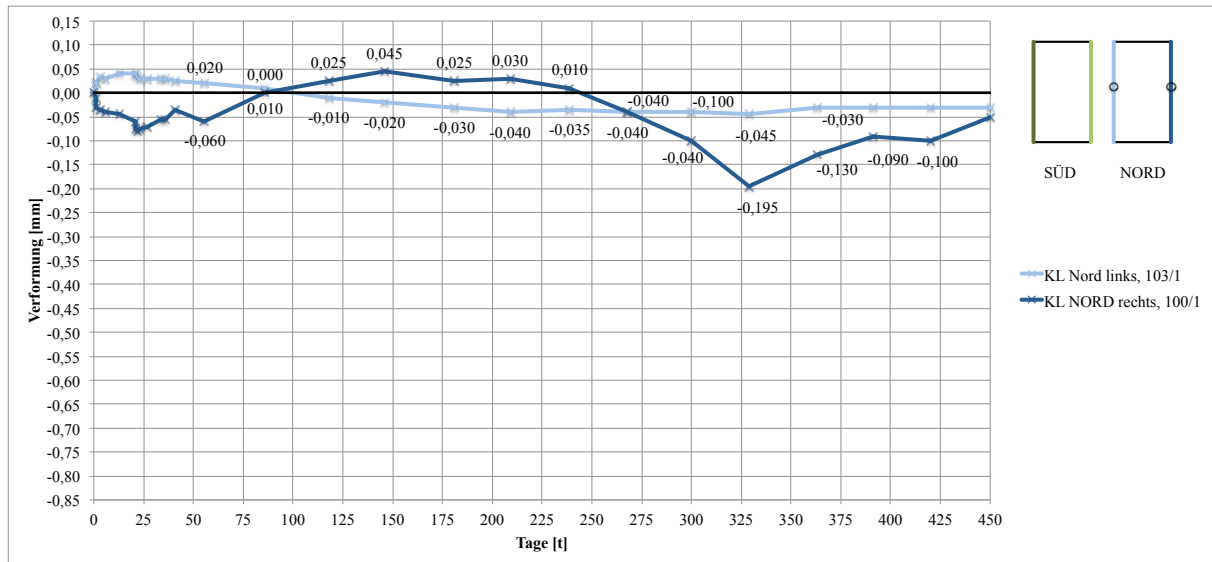


Abb. 3.12: Koppelleistenverformung des HGV-Elements NORD

Die Auswertung der Messdaten des HGV-Elements NORD in Abb. 3.12 zeigt keine Überraschungen im Vergleich zum SÜD-Element, ähnliche Unterschiede zwischen den beiden Koppelleisten sind erkennbar. Gemäß Verformungsprotokoll aus Anhang B.1 gab es bei der linken Koppelleiste keine elastische Anfangsverschiebung (Differenz zwischen $+0,02\text{mm}$ und $+0,02\text{mm}$). Diese war in den darauffolgenden Tagen sogar einer Hebung ausgesetzt, welche sich in den ersten Monaten nur langsam abbauen konnte. Die Deformationen scheinen nach einem sehr einheitlichen und linearen Verlauf mit wenig Auf- und Abbewegungen als sehr geringe Restverformungen erhalten zu bleiben. Bei der rechten Koppelleiste konnte unmittelbar nach Lastaufbringung durch die Messwerte $-0,03\text{mm}$ und $-0,02\text{mm}$ eine elastische Anfangsverschiebung von $-0,02\text{mm}$ berechnet werden. Der folgende Verformungszuwachs erinnert an die linke Seite des HGV-Elements SÜD. Wie ident die Verformungskurven der Koppelleisten beider HGV-Elemente sind, ist in Abb. 3.13 zu sehen, in der auch die gemittelten Klimaverläufe dargestellt sind. Betrachtet man die Verläufe, wird deutlich, dass erneut ein Zusammenhang bei den Deformationen der abgewandten und zugewandten Seiten besteht.

Um der Annahmen einer Rotation genauer auf den Grund zu gehen, wird folgendes festgestellt: Bei den Koppelleisten ist am Beginn zwischen Tag 50 und Tag 150 die selbe Bewegung erkennbar, wie an den überlagerten Verformungskurven der beiden Gesamtelemente in Abb. 3.10. Die Ebene der Koppelleiste von HGV-Element SÜD dreht sich nach rechts und jene vom HGV-Element NORD nach links. Im restlichen Beobachtungszeitraum besteht nur zum Teil eine Übereinstimmung in diesen Abbildungen. Um Tag 175 bis Tag 330 kann am HGV-Element SÜD in Abb. 3.13 der Verformungsverlauf in der Ebene der Koppelleisten als Linksdrehung interpretiert werden, da sich die linke Koppelleiste nun nach unten absenkt und die rechte Koppelleiste nach oben anhebt. Im Falle des HGV-Elements NORD ist aufgrund des geringen Verformungszuwachses der linken Koppelleiste eine weitere gegenseitige Verdrehung nicht zu erkennen. Darüber hinaus kann dennoch folgende Aussage getroffen werden: Die Rotation könnte aus der Ebene der Koppelleisten stammen. Auch Rinnhofer [11] hat bei seinen mittelgroßen Versuchskörpern im Kurzzeitversuch eine leichte Verdrehung bemerkt, die aufgrund der asymmetrischen Verschraubung der gezahnten

Koppelleisten mit der Unterkonstruktion entstanden ist. Um diesem Hinweis im aktuellen Versuchsstand nachzugehen, findet sich in Abb. 3.14 und auch im Handbuch „UNIGLAS | FACADE Holz-Glas-Verbundelement“ [24] ein Montagedetail der gezahnten BFU-Koppelleisten mit den einzelnen horizontalen und vertikalen Leistenelementen sowie dem Schraubenabstand und den Eckdetails.

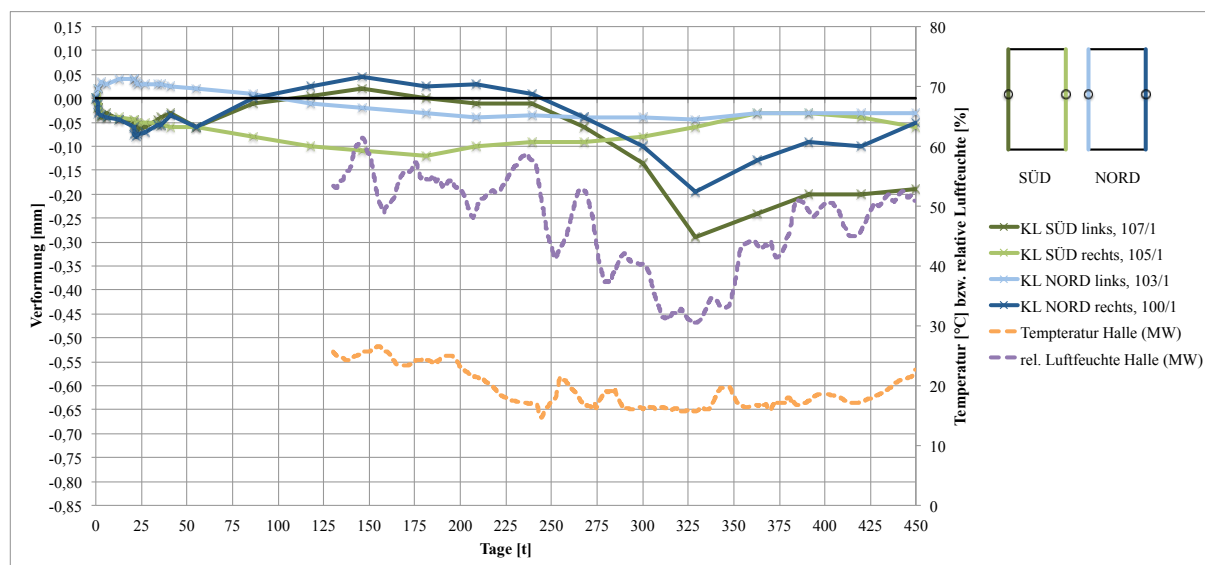


Abb. 3.13: Überlagerte Koppelleistenverformungen von HGV-Element SÜD und HGV-Element NORD samt den gemittelten Klimaverläufen

Besonders gut erkennt man in den Eckbereichen eine versetzte Anordnung der gezahnten Koppelleisten sowie der Senkbohrungen was zu einer asymmetrischen Verschraubung führt. Bei beiden HGV-Elementen im Versuchsstand liegt diese Koppelleistenanordnung vor. Dabei ist es im direkten Vergleich zwischen HGV-Element SÜD und HGV-Element NORD weder zu einer Spiegelung noch zu einer Drehung der Anordnung gekommen. Das bedeutet, dass die linke Koppelleiste in Abb. 3.14 die linke Seite des HGV-Elements SÜD und NORD in Abb. 3.6 darstellt. Zusammengefasst ergibt sich daraus folgende Erkenntnis: Da die Verdrehungsmechanismen der beiden linken beziehungsweise der beiden rechten Seiten in Abb. 3.13 nicht übereinstimmen, wäre widerlegt, dass die Verdrehung aufgrund der asymmetrischen Verschraubung der gezahnten Koppelleisten entstanden ist. Indem die vertikalen Leisten 29 mal und die horizontalen Leisten 20 mal im Abstand von 120mm mit der Wandscheibe verschraubt sind, entsteht ein starrer Verbund der diese Drehbewegung zusätzlich behindern könnte und somit auch unwahrscheinlich macht. Dieser Verbund wirkt außerdem der Längenänderung der BFU-Koppelleisten (Quellen und Schwinden) entgegen, immerhin wurde in Vergleichsrechnungen [9] bereits gezeigt, dass durch Holzfeuchteänderungen von mehr als 10% Zwängungen im Klebstoff auftreten, die eigentlich vermieden werden müssen. Mit diesem Längenänderungswiderstand der Koppelleisten infolge Verbundwirkung beschäftigten sich Neubauer [9] und Hochhauser [14]. Diesbezüglich wurde festgestellt, dass Zwangsspannungen in der Silikonklebefuge zufolge dieses Längenänderungswiderstandes auf 25% reduziert werden können. Die daraus resultierenden geringeren Zwangsspannungen gehen nicht so sehr zu Lasten der Klebefugentragfähigkeit (Schub längs), die ohnehin bereits durch die Abtragung des Eigengewichts der MIG-Scheibe begrenzt ist. Des Weiteren besitzt Holz ohnehin ein dem Glas ähnliches Temperaturverhalten, wodurch Zwangsspannungen weitgehend vermieden werden. Davon profitiert die Silikonklebefugenverformung die der folgende Abschnitt behandelt.

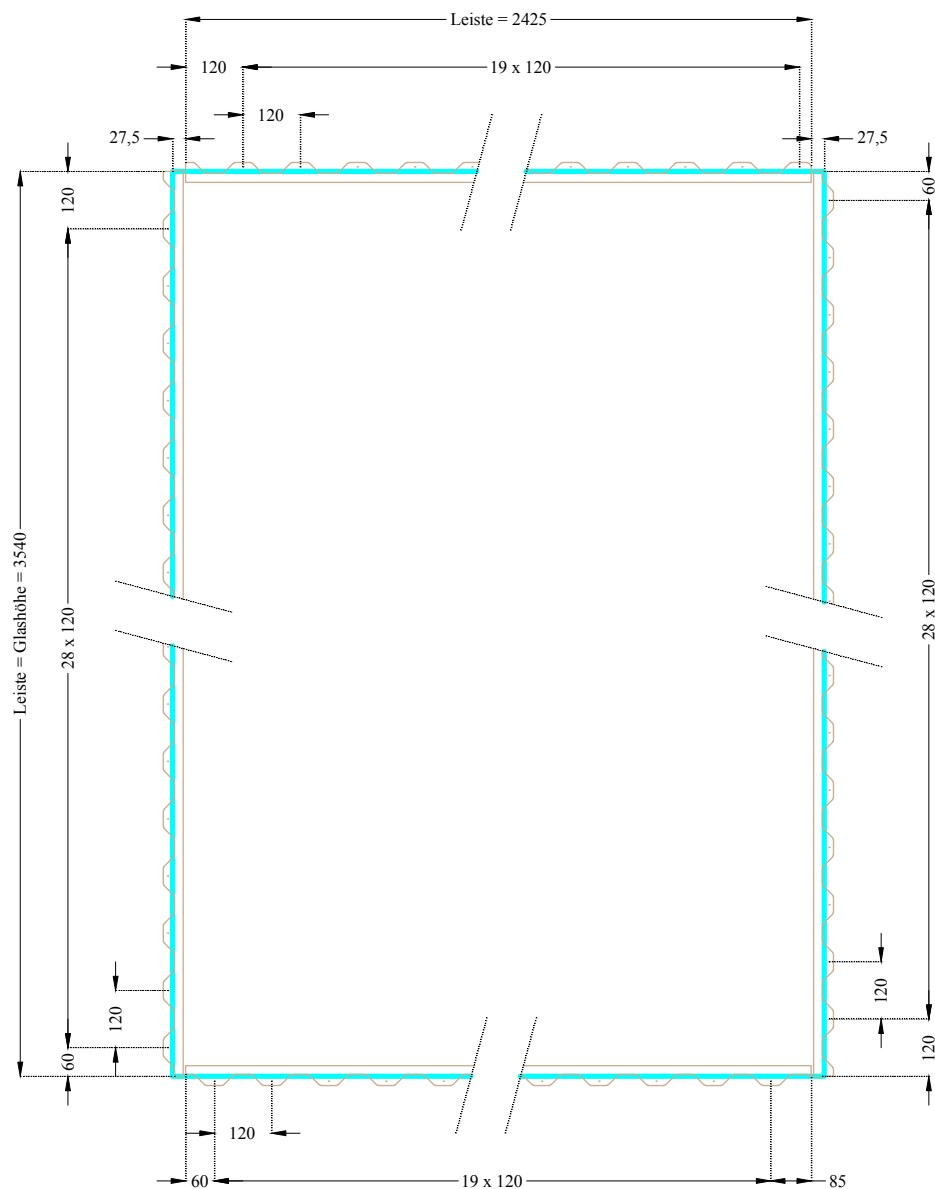


Abb. 3.14: Montagedetail der gezahnten BFU-Koppelleisten, Maße in [mm]

In Abb. 3.13 fällt sofort auf, dass die Verformungskurven „KL SÜD links, 107/1“ und „KL NORD rechts, 100/1“ parallel zum gemittelten Verlauf der relativen Luftfeuchte der Halle sind und diesem qualitativ stark ähneln – die beiden anderen Kurven der zugewandten Seiten verhalten sich scheinbar unabhängig dazu. Betrachtet man die Tage, an denen bei den abgewandten Seiten Knicke in den Deformationslinien auftreten, wird der Zusammenhang klar. Aufgrund der hohen Luftfeuchte um Tag 240 nimmt die BFU-Koppelleiste zu diesem Zeitpunkt viel Feuchtigkeit aus der Luft auf. Dem Kälteeinbruch zufolge ist die Temperatur hingegen entsprechend gering und bis Tag 330 schließt zusätzlich eine Phase mit geringer relativer Luftfeuchte an. Das Zusammenspiel dieser Faktoren wirkt sich auf das Verformungsverhalten der Koppelleiste aus. Dies bedingt den starken Verformungsrückgang während der genannten Zeitspanne und beeinflusst die Messungen durchaus. Über Rinnhofer [11] lassen sich diese Vorgänge erklären. Indem die BFU-Koppelleisten bei sich ändernder Feuchtigkeit schwinden und quellen, entstehen Verformungen. Während mit

einer hohen Luftfeuchtigkeit eine Verlängerung der Leisten (Quellen) einhergeht, bedingt eine niedrige Luftfeuchtigkeit eine Verkürzung (Schwinden). Dabei wird bei der gewählten Anordnung der Messuhren das Schwinden als Absenkung in den Verformungen gemessen. Auch eine Rückverformung (Hebung) durch das Quellen der Hölzer erscheint als durchaus logisch. Die Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe ist auch für Neubauer [9] ein Thema. Dazu hat er Koppelleisten unterschiedlicher Materialien und Beschichtungssystemen einer genaueren Untersuchung mit unterschiedlichen Differenzklimata unterzogen. Im Falle des BFU wurde eine starke Wasseraufnahmefähigkeit festgestellt, die sich in weiterer Folge auch auf das Quell- und Schwindverhalten auswirkt. Er stellte fest, dass die Holzfeuchtigkeit in der unbeschichteten Koppelleiste rasanter auf volle Sättigung des Holzsubstrates steigt, als bei beschichteten (dichteren) Systemen, in der prinzipiell der Feuchteandrang stärker verzögert wird. Der schneller ansteigenden Holzfeuchtigkeit steht jedoch auch ein schnellerer Feuchterückgang durch Rücktrocknung bei höheren Temperaturen entgegen. Es lässt sich vermuten, dass sich die unbeschichtete Koppelleiste stärker dem vorliegenden Feuchteverlauf anpasst. Diese Tatsache erklärt ebenfalls, weshalb die Koppelleisten so stark dem Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind. Auf die Vor- und Nachteile von Beschichtungssystemen wird hier nicht näher eingegangen und auf Neubauer [9] verwiesen.

In Rinnhofer [11] wurde am Verformungsverhalten von HGV-Prüfkörpern die Beeinflussung der Sonneneinstrahlung sichtbar, weshalb dieses Thema durchaus Aufmerksamkeit verdient. Da im aktuellen Versuchsstand durch die Positionierung der Großprüfkörper in der allseits abgeschlossenen Werkshalle ein Energieeintrag der Sonneneinstrahlung ausgeschlossen werden kann, hat dies jedoch hier keine Relevanz. Für detaillierte Zusammenhänge sei auf Schober [26] verwiesen. Er zeigte, dass bei derartigen Ausrichtungen die UV-Belastung keinen Einfluss auf das Materialverhalten einer Silikonklebefuge mit sich bringt, sondern das Sorptionsverhalten der BFU-Koppelleisten (Schwinden und Quellen) ausschlaggebend wird. Demnach hat die deutliche Reduktion der Holzfeuchtigkeit durch (Rück-)Trocknung eine besonders hohe Auswirkung auf die Gesamtverformungen.

Wie an den Gesamtelementen in Abschnitt 3.4.1 ist außerdem auch hier keine Übereinstimmung zwischen Koppelleistenverformungen und Temperaturganglinie zu erkennen. Wieso manche Seiten allerdings von den klimatischen Bedingungen unbeeinflusst sind, bleibt eine offene Frage, die möglicherweise im weiteren Versuchsverlauf beantwortet werden kann. Es scheint aber, als wären die zugewandten Seiten jeweils systembedingten Randbedingungen unterworfen. Das legt zum ersten Mal die Vermutung nahe, dass die etwa 50cm schmale Wandscheibe aus fünffach verleimten Fichten-Brettspertholz zwischen den beiden HGV-Elementen (Abb. 3.6) aufgrund ihrer Weichheit und Nachgiebigkeit einer stärkeren Verschiebung ausgesetzt sein könnte als die breiteren und somit steiferen Wandscheiben der abgewandten Seiten. Dieser Anhaltspunkt kann mitunter auch ein Grund für die Rotation beider HGV-Elemente sein.

3.4.3 Kriechverhalten der Silikonklebefugen

Wie in Abschnitt 3.3 erläutert, bildet die Differenz aus den Messwerten von MP2 und MP1 aus Abb. 3.5 die Verformung der Silikonklebefuge. Am Beispiel der linken Seite des HGV-Elements SÜD in Abb. 3.6 würde das bedeuten, dass der Messwert der Messuhr 107/1 vom Messwert der Messuhr 106/2 abzuziehen ist. Die Silikonklebefugenverformungen für die linke und rechte Seite des HGV-Elements SÜD sind in Abb. 3.15 dargestellt.

Auf den ersten Blick ist sofort zu erkennen, dass sich die beiden Seiten im Beobachtungszeitraum gegengleich verhalten. Man würde erwarten, dass besonders durch das elastische Materialverhalten der Silikonklebefuge eine eindeutige elastische Anfangsverschiebung auftritt und diese einen großen Anteil an der gesamten elastischen Anfangsverschiebung ausmacht. Immerhin hat nach Belastungsbeginn das Konstruktionseigengewicht des MIG von der sehr weichen Schubverklebung

über die Schraubenebene der BFU-Koppelleisten bis zur Unterkonstruktion übertragen werden müssen. Um den Bereich des Belastungsbeginns in Abb. 3.15 genauer zu betrachten, kann die elastische Anfangsverschiebung aus den Messwerten der Differenztable aus Anhang B.2 ident zu Abschnitt 3.4.1 berechnet werden. Für die linke Seite ergibt sich diese zu $-0,02\text{mm}$ (Differenz zwischen $-0,03\text{mm}$ und $-0,01\text{mm}$). Erst mit Tag 3 war die Absenkung der Silikonklebefuge – wie bei der BFU-Koppelleiste – vollständig abgeschlossen und die maximale Anfangsverschiebung von $-0,04\text{mm}$ stellte sich ein. Bis Tag 55 gibt es geringe Auf- und Abbewegungen. Während die Silikonklebefuge danach genau um dem Wert der maximalen Anfangsverschiebung rückt, bleiben im Anschluss zwischen Tag 85 und Tag 210 trotz der Dauerbelastung die Verformungen über einen längeren Zeitraum konstant. Die Kurve verläuft nahezu horizontal, das bedeutet, es treten in diesem Zeitraum kaum zusätzliche Verformungen auf. Mit Tag 210 beginnen die Kriechverformungen jedoch wieder zuzunehmen (375% der maximalen Anfangsverschiebung), klingen jedoch bereits ab Tag 330 scheinbar nach und nach ab und eine deutliche Hebung stellt sich am Ende des Beobachtungszeitraums ein.

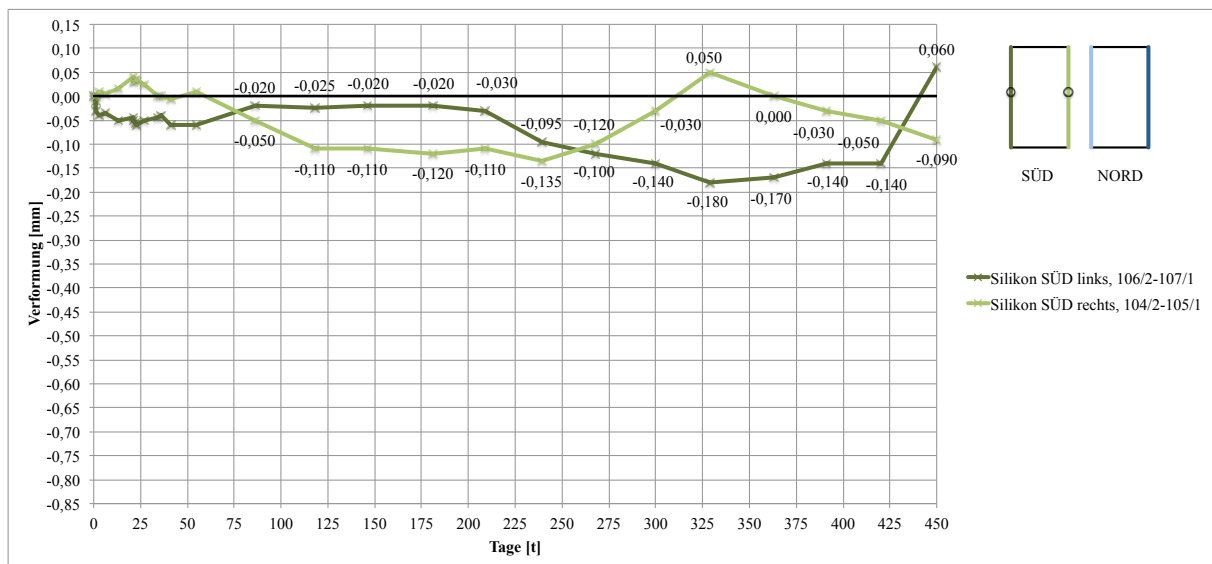


Abb. 3.15: Silikonklebefugenverformung des HGV-Elements SÜD

Gemäß Differenztable aus Anhang B.2 hat auf der rechten Seite des HGV-Elements SÜD keine elastische Anfangsverschiebung stattgefunden (Differenz zwischen $0,00\text{mm}$ und $0,00\text{mm}$). Ganz im Gegenteil: Diese Silikonklebefuge ist zwar keinem starken jedoch einem kontinuierlichen Rückkriechen ausgesetzt. Ein Zusammenhang mit der Koppelleiste ergibt sich deshalb, weil dort auch eine elastische Anfangsverschiebung in Form einer Hebung festgestellt wurde. In dem darauf folgenden Monat beginnen die Verformungen zuerst nach unten anzuwachsen und dann wieder abzunehmen, was durch die leicht fallende und steigende Kurve erkennbar ist. Betrachtet man den weiteren Verlauf, wird deutlich, dass das Kriechen über etwa 60 Tage kontinuierlich fortschreitet und dann, wie links, abrupt abnimmt. Aufgrund der nahezu horizontalen Kurve, treten in der Zeitspanne von Tag 120 bis Tag 240 kaum zusätzliche Verformungen zufolge Dauerlast auf. Dem starken Rückkriechen bis Tag 330 folgt, dass die Kriechverformungen nach und nach abnehmen.

In Abb. 3.16 sind die Silikonklebefugenverformungen für beide Seiten des HGV-Elements NORD dargestellt. Diese Verformungsverläufe unterstreichen die Erkenntnis vom HGV-Element SÜD, wonach sich beide Seiten gegengleich und scheinbar unabhängig voneinander verhalten. Es lässt sich durch die Differenztable aus Anhang B.2 für die linke Silikonklebefuge eine elastische Anfangsverschiebung von $+0,05\text{mm}$ errechnen. Im Gegensatz zur linken Koppelleiste

stellt sich mit der darauffolgenden Messung am Tag 3 die maximale Anfangsverschiebung als Absenkung zu $-0,125\text{mm}$ ein. Im weiteren Verformungsverlauf ist sehr auffällig, dass die Silikonklebefuge bis Tag 150 intensive Kriechverformungen erleidet und zwar etwa 175% der maximalen Anfangsverschiebung. Danach zeigt sich unter Dauerlast eine rückläufige Bewegung. Das tendenziell etwas langsamere Rückkriechen um 200% der maximalen Anfangsverschiebung geht ab Tag 330 in eine Phase über, in der sich sehr rasch in etwa die selbe Verformung einstellt die nach der elastischen Anfangsverschiebung um Tag 1 vorgefunden wurde. Da die Verformungskurve eine Horizontale darstellt, treten hier kaum zusätzliche Kriechverformungen zufolge Dauerlast auf. Erst gegen Ende des Beobachtungszeitraums scheint sich eine neue Verformungstendenz abzubilden.

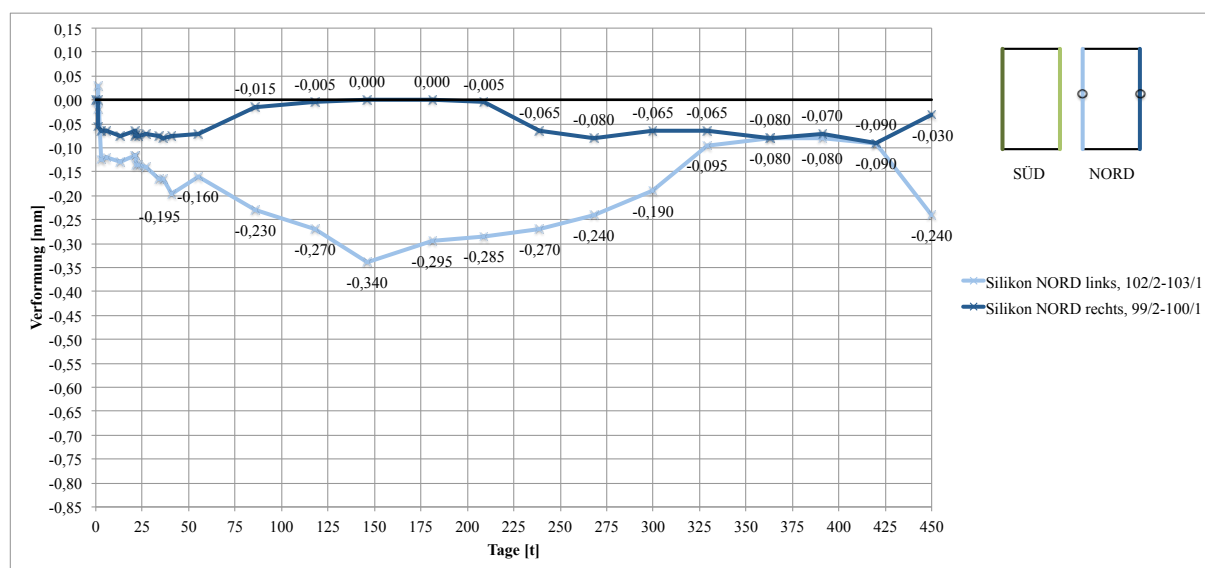


Abb. 3.16: Silikonklebefugenverformung des HGV-Elements NORD

Der Verformungsverlauf der rechten Seite des HGV-Elements NORD in Abb. 3.16 deutet erstmals das erwartete elastische Materialverhalten der Silikonklebefuge an. Die elastische Anfangsverschiebung beträgt $-0,055\text{mm}$ (Differenz zwischen $-0,055\text{mm}$ und $0,00\text{mm}$ gemäß Differenztafel aus Anhang B.2). Die sich eingestellte Verformung bleibt in den ersten 60 Tagen beinahe erhalten. Nachdem das Rückkriechen (100% der maximalen Anfangsverschiebung) um Tag 90 den Ausgangswert der Nullmessung erreicht hat, tritt eine sehr lange und stabile Phase von 120 Tagen auf, in der es trotz konstanter Dauerbelastung zu keiner zusätzlichen Verformung kommt. Es ist offensichtlich, dass die Kriechverformungen der rechten Seite im Vergleich zur linken deutlich geringer ausfallen. Anschließend sinkt die Silikonklebefuge zwischen Tag 210 und Tag 240 wieder ab, und zwar so weit, dass sich in etwa der Wert der maximalen elastischen Anfangsverschiebung wiederfindet. In den letzten Monaten des Beobachtungszeitraums ist das Kriechverhalten unter Dauerlast auf ein Minimum begrenzt und eine unterschiedliche Verformungstendenz zur linken Silikonklebefuge zeichnet sich ab.

In den beiden Abbildungen Abb. 3.17 und Abb. 3.18 sind zusätzlich zu den Silikonklebefugenverformungen die Relativverschiebung zwischen BFU-Koppelleiste und Unterkonstruktion aus Abb. 3.11 beziehungsweise 3.12 grau hinterlegt um Zusammenhänge zu verdeutlichen. Zwar weichen die Koppelleistenverformungen zu manchen Zeitpunkten etwas ab, eine Verknüpfung im Verformungsverhalten ist jedoch eindeutig erkennbar. Es fällt auf, dass manche Silikonklebefugenverformungen annähernd geglättete Kurven der Koppelleistenverformungen darstellen – mit Ausnahme der Kriechkurve „Silikon NORD links, 102/2-103/1“, die im Vergleich zur Kurve

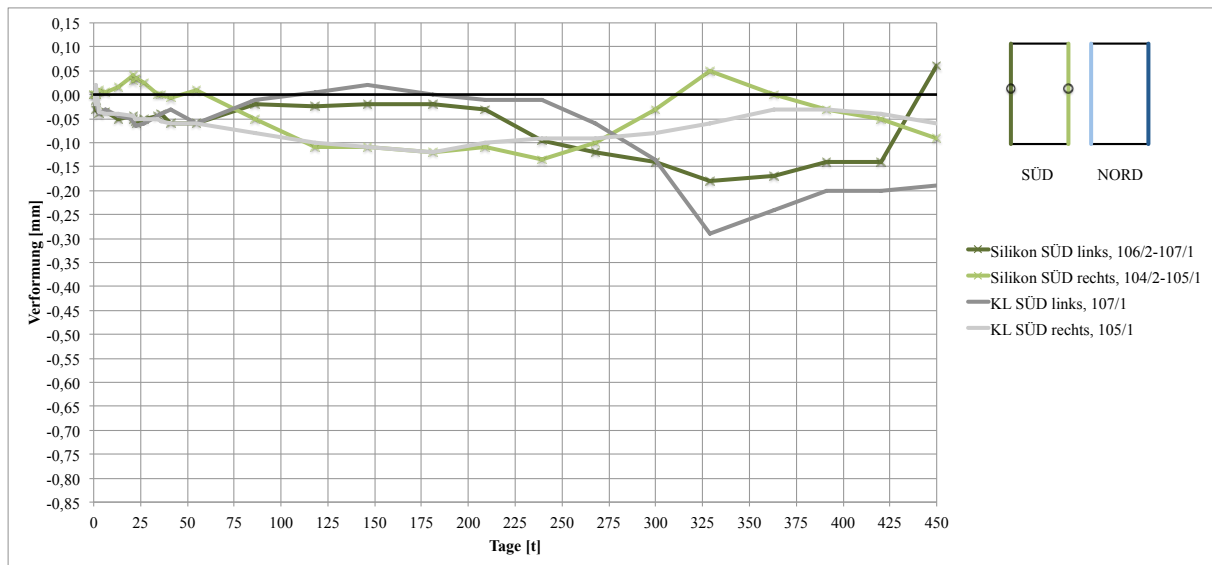


Abb. 3.17: Überlagerung der Silikonklebefugenverformung und Koppelleistenverformung des HGV-Elements SÜD

„KL NORD links, 103/1“ wesentlich stärkere Verformungen zeigt. Das einheitliche Verhalten lässt sich anhand zweier Punkte erklären: Wie in Abschnitt 3.3 erläutert und in Abb. 3.5 dargestellt, wird mit der Differenzbetrachtung von MP2 und MP1 zusätzlich zur Verformung der Silikonklebefugen auch die der ESG-Scheibe ermittelt. Somit können die Kurven ebenfalls auch als Verformungen des ESG interpretiert werden. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient der BFU-Koppelleiste dem des Fensterglases grundsätzlich sehr ähnlich ist, ist auch eine Übereinstimmung im Verformungsverhalten naheliegend.

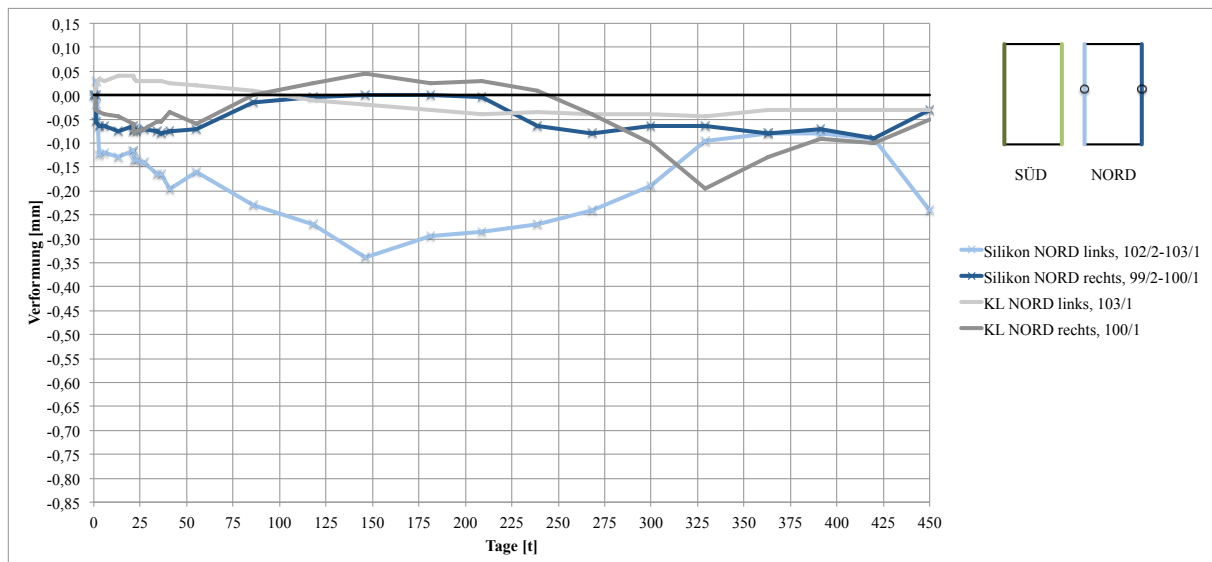


Abb. 3.18: Überlagerung der Silikonklebefugenverformung und Koppelleistenverformung des HGV-Elements NORD

Hinzu kommt, dass der in Abschnitt 3.4.2 beschriebene (starre) Verbund einer Längenänderung der Koppelleisten (Quellen und Schwinden) und den daraus resultierenden Silikonklebefugen-

verformung entgegen wirkt beziehungsweise diese reduziert wodurch eine Glättung der Kurven als durchaus logisch erscheint. Bei der linken Seite des HGV-Elements NORD fällt es schwerer den Kriechverlauf nachzuvollziehen. Obwohl die Dauerlast konstant bleibt, nimmt das Kriechen stark zu und die Verschiebungen zwischen Koppelleiste und Silikonklebefuge werden mehr. Diese Umstände können auf die klimatischen Bedingungen in der Werkshalle und den damit Verbundenen Auswirkungen auf die Materialien zurückzuführen sein. Es liegt nicht so fern, dass die in Abschnitt 3.4.2 aufgestellte Vermutung ihre Berechtigung hat: Die stärkere Verschiebung der nachgiebigen Brettsperrholz-Wandscheibe zwischen den beiden HGV-Elementen kann Auswirkungen auf die zugewandten Seiten der HGV-Elemente haben und dazu führen, dass diese systembedingten Randbedingungen unterworfen sind. Um mögliche Klimaeinflüsse auf die Silikonklebefugenverformung und sonstige Übereinstimmungen und Differenzen zwischen den beiden HGV-Elementen deutlicher zu machen, sind in Abb. 3.19 die Kriechverformungen aller vier vertikalen Silikonklebefugen und die gemittelten Klimaverläufe übereinandergelagert.

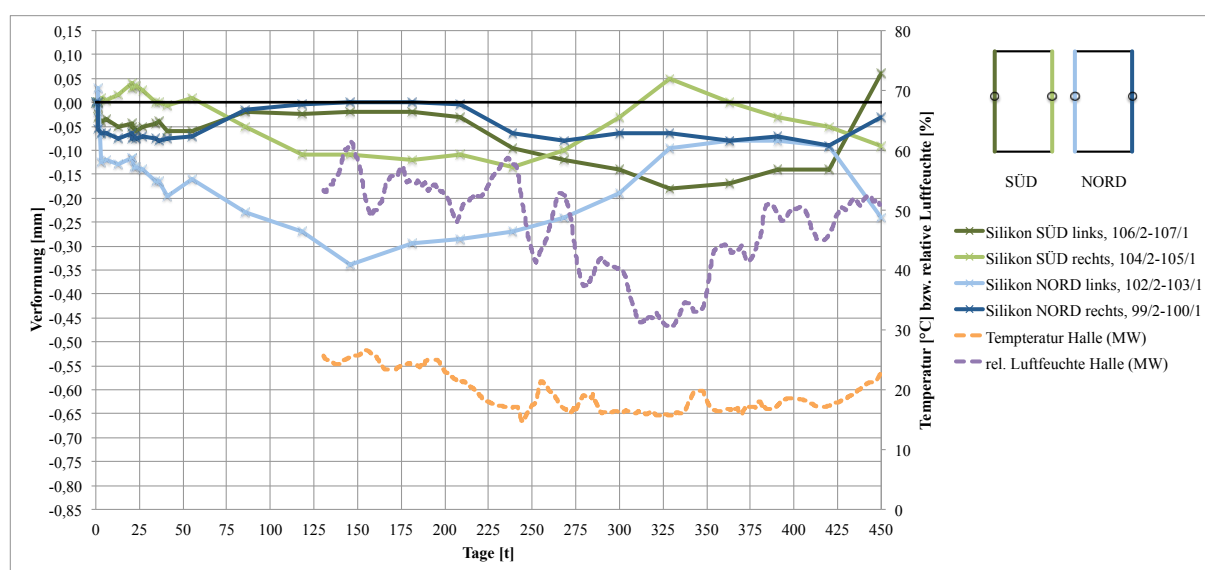


Abb. 3.19: Überlagerte Silikonklebefugenverformungen von HGV-Element SÜD und HGV-Element NORD samt den gemittelten Klimaverläufen

Wie in den vorangegangenen Abschnitten ist auch hier auffällig, dass es an den linken und rechten Seiten zu divergierenden Bewegungen kommt und sich die abgewandten und zugewandten Seiten beider HGV-Elemente ähnlich verhalten. Um Tag 50 bis Tag 85 tritt in der Ebene der Silikonklebefugen SÜD eine Rechtsdrehung beziehungsweise NORD eine Linksdrehung auf. Wie bei der Koppelleiste ist mit fortschreitender Versuchsdauer zwischen Tag 230 und Tag 330 nur SÜD eine Linksdrehung zu erkennen. Grundsätzlich ist bei der Silikonklebefugenverformung von einer Verzerrung zu sprechen, die sich in weiterer Folge als Rotation des MIG auswirken kann. Für nähere Zusammenhänge mit dem Gleitwinkel γ sei auf Rinnhofer [11] verwiesen.

Es scheint nur Ansatzweise ein ähnliches Verhalten zur Entwicklung der relativen Luftfeuchte zu bestehen. Betrachtet wird der Zeitraum, wo die Luftfeuchtigkeit stark abgenommen hat – zwischen Tag 230 und Tag 330 – und deutlich angestiegen ist – zwischen Tag 330 und Tag 420: Im gesamten Bereich bewegen sich die abgewandten Klebefugen kaum, die zugewandten heben sich zuerst an, anschließend tritt mit ansteigender Luftfeuchte nur bei der Verformungskurve „Silikon SÜD rechts, 104/2-105/1“ eine Verformungszunahme auf. Sehr prägnant ausgeprägt ist dabei das Umschwenken der Verformungen und der relativen Luftfeuchte am Tag 230 und

Tag 330. Diesbezüglich sei auf Abschnitt 3.5 verwiesen, wo Säulendiagramme die prozentualen Verformungsanteile der Silikonklebefugen an der Gesamtverformung darstellen.

Es wird festgehalten, dass in diesem Versuchsstand die Kriechverformungen der Silikonklebefugen bisher kaum vom vorherrschenden Temperaturniveau beeinflusst wurden. Einen Anhaltspunkt dazu bieten Untersuchungen von Schleicher [27], wo er den verwendeten Klebstoff OTTOCOLL® S660 bei unterschiedlichen Temperaturen untersuchte. Dabei zeigte sich erst ab 80°C ein deutlich weiches Materialverhalten. In dem Versuchsstand der vorliegenden Arbeit wurde lediglich eine Maximaltemperatur von 39,8°C erreicht (Abschnitt 3.3). Da im Temperaturverlauf kaum Schwankungen erkennbar sind, liegen stabile Temperaturverhältnisse vor. Wie Rinnhofer [11] beschreibt, ist davon auszugehen, dass die Silikonklebefugen positiv sowie auch negativ sensibler auf klimaabhängige Einwirkungen reagieren, als unter verhältnismäßig stabilen Laborbedingungen. Die Auf- und Abbewegungen gleichen sich im Mittel deshalb aus. Es deutet somit alles darauf hin, dass die Temperatur noch keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Silikonklebefugen gehabt haben könnte.

Zum Abschluss dieses Abschnitts wird noch auf die Dauerschubspannung der vertikalen Silikonklebefugen eingegangen. Durch den in Abb. 3.2 dargestellten Aufbau des HGV-Elements ergibt sich ein Eigengewicht des MIG von etwa 3,7kN. Das geht auch aus dem Lieferprotokoll der MIG-Scheibe hervor. Teilt man diese Eigenlast vereinfacht auf die vertikalen Silikonklebefugen auf der rechten und linken Seite des HGV-Elements auf, ergibt sich bei einer Klebefugenbreite von 12mm und einer Klebefugenlänge von 3540mm eine Dauerschubspannung von $0,043N/mm^2$ für die lastabtragende Verklebung zwischen innerer Glasscheibe und BFU-Koppelleiste. Dass in der Realität auch die horizontalen Silikonklebefugen entlang der Wandscheibe einen geringen Beitrag zur Lastabtragung leisten werden, wird außer Acht gelassen, da die Berechnung auf diese Art und Weise auf der sicheren Seite liegt und die Dauerschubbeanspruchung vereinfacht und rasch quantifiziert werden kann. Prinzipiell existieren zum Kriechverhalten und zur Restscherfestigkeit nach unterschiedlicher Lastgeschichte in diversen Normen und Richtlinien verschiedene Kriterien und Grenzwerte, die es einzuhalten gilt. Auf diesbezüglich zu achtende Punkte sei auf Rinnhofer [11] verwiesen, der – wie in Abschnitt 2.1 erwähnt – mehrere Versuchsserien von mit Silikon verklebten HGV-Elementen auf unterschiedliche Dauerlastniveaus untersucht und daraus resultierenden Restscherfestigkeiten nachträglich ermittelt hat. Im Rahmen der Auswertung der experimentellen Untersuchung der vorliegenden Arbeit, werden die Silikonklebefugenverformungen nur im Hinblick auf einen dieser Grenzwerte qualitativ betrachtet: In der Produktnorm für lastübertragende und/oder UV-beständige Dichtstoffe ÖNORM EN 15434 [28] ist die Verformung der Klebefuge am Ende einer 91 Tage andauernden Belastung mit 1,0mm begrenzt. Am Tag 86 wurde eine Ablesung aller Messuhren durchgeführt. Gemäß Differenztafel aus Anhang B.2 ergibt sich die Maximalverschiebung bei der linken Silikonklebefuge des HGV-Elements NORD an diesem Tag zu -0,23mm und liegt weit unter dem in [28] genannten Grenzwert von 1,0mm. Auch alle anderen Silikonklebefugen unterschreiten zu jeder Zeit die zulässige Gesamtverformung, sogar nach 450 Tagen Belastung ist dieses Kriterium eindeutig erfüllt. Neben den Verformungsmessungen die über Jahre hinweg durchgeführt werden, können auch am Ende des Versuchszeitraums weitere Erkenntnisse über das tatsächliche Materialverhalten dieser tragend verklebten Silikonklebefugen – mit einem vorangegangenen Dauerlastniveau von $0,043N/mm^2$ und dem Langzeiteinfluss mit wechselnden Klimabedingungen – erzielt werden. Dazu sollte nach der Demontage der HGV-Elemente unbedingt die Restscherfestigkeit der Silikonklebefugen über Scherprüfungen ermittelt und anschließend zur Bestimmung der für die Bemessung relevanten Beiwerte k_{mod} und k_{def} herangezogen werden.

3.4.4 Kriechverhalten der Klebefugen des tragenden Randverbunds

Wie in Abschnitt 3.3 erläutert, bildet die Differenz aus den Messwerten der von MP3 und MP2 aus Abb. 3.5 die Verformung der Klebefuge des tragenden Randverbunds im MIG. Für das HGV-Element SÜD und das HGV-Element NORD sind in Abb. 3.20 gleich zu Beginn alle vier Seiten gegenübergestellt, da sich die Kurven qualitativ sehr stark ähneln und es erstmals keine Unterschiede zwischen den abgewandten und zugewandten Seiten der beiden HGV-Elemente gibt. Auch die klimatischen Einflüsse werden wie in den vorangegangenen Abschnitten auf gleiche Weise sichtbar.

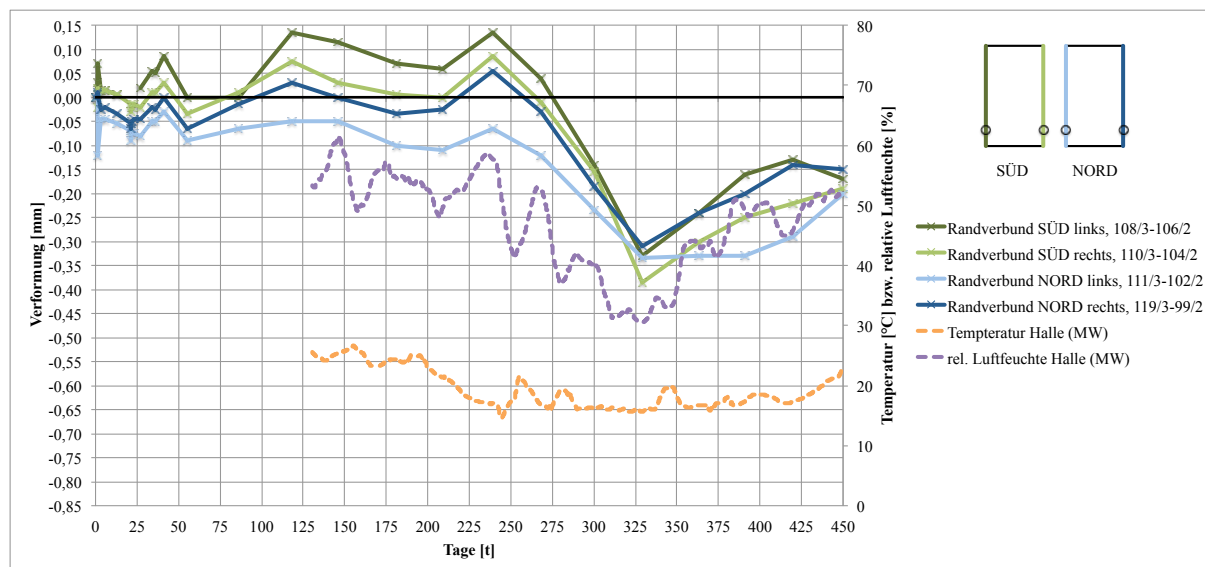


Abb. 3.20: Überlagerte Randverbundverformungen von HGV-Element SÜD und HGV-Element NORD samt den gemittelten Klimaverläufen

Zu Beginn wird auch hier untersucht, ob durch die Differenzbetrachtung eine elastische Anfangsverschiebung vorliegt. Gemäß Differenztablelle aus Anhang B.2 ergeben sich für Tag 1 folgende Werte: HGV-Element SÜD links $+0,04\text{mm}$ (Differenz zwischen $+0,07\text{mm}$ und $+0,03\text{mm}$) beziehungsweise rechts $-0,04\text{mm}$ (Differenz zwischen $-0,02\text{mm}$ und $+0,02\text{mm}$) und HGV-Element NORD links $-0,12\text{mm}$ (Differenz zwischen $-0,12\text{mm}$ und $0,00\text{mm}$) beziehungsweise rechts $-0,005\text{mm}$ (Differenz zwischen $0,005\text{mm}$ und $0,01\text{mm}$). Ein direkter und eindeutiger Zusammenhang mit den elastischen Anfangsverschiebungen der anderen Systemkomponenten konnte im Zuge dieser Datenauswertung nicht festgestellt werden. Aus diesem Grund sind in Abschnitt 3.5 noch die einzelnen Verformungsanteile der Systemkomponenten an der Gesamtverformung in Säulendiagrammen für die Tage 1 und 3 gegenübergestellt. Dass sich lediglich der Randverbund SÜD links nach dem Entfernen der PA-Auflager anhebt, scheint physikalisch unerklärlich zu sein. Ein Blick auf die Unterbrechung der Verformungskurve „Randverbund SÜD links, 108/3-106/2“ in Abb. 3.20 um Tag 25 könnte jedoch eine logische Erklärung liefern. Immerhin war in diesem Zeitraum der lose Metallwinkel, welcher erneut mit UV-Klebstoff auf die Glasfläche verklebt wurde, für den Ausfall von MP 108/3 verantwortlich (Abschnitt 3.4.1). Ob dadurch auch die Messung über einen längeren Zeitraum beeinflusst war, geht aufgrund des gleichmäßigen Verlaufs mit den anderen Kriechkurven nicht eindeutig hervor. Es kann keine Verdrehung in der Ebene des tragenden Randverbunds festgestellt werden, wenn man betrachtet, wie ident die Verformungen beider Seiten eines HGV-Elements sind. Dass die zugewandten Seiten aufgrund der nachgiebigeren Brettsperrholz-Wandscheibe systembedingten Randbedingungen unterworfen sein

könnten (Abschnitt 3.4.2), die sich mitunter durch ungleichmäßige Verschiebungen auswirken könnten, scheint hier ebenfalls in keinster Weise sichtbar zu sein. Ergänzend wird festgehalten, dass nicht ausschließlich von der Vermutung „Rotation der Gesamtelemente“ zu sprechen ist, da zusätzlich translatorische Bewegungen und Verzerrungsdeformationen auftreten. Natürlich stellen auch die Deformationen der Schrauben beziehungsweise Glasscheiben Verformungsanteile der Gesamtverformung dar (Abschnitt 3.3), die im Versuchsstand jedoch nicht eruiert werden konnten. Nachgegangen werden kann, inwieweit das kompressible Klebeband DUPLOCOLL® (Abb. 3.2) das Diffundieren von Wasserdampf einschränkt (Entstehung von Luftfeuchtedifferenz) und ob es an allen Seiten ausreichend befestigt ist. Beziehungswise ob es Fehlstellen gibt, die zum Ausgleich dieser Differenz (kein Partialdampfdruck) und schließlich zu Absenkungen und Hebungen führen könnten.

Betrachtet man in Abb. 3.20 die Tage 210 und 240, an denen Knicke in den Kriechkurven auftreten, wird klar, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Wechsel der Luftfeuchtigkeitsbedingungen und den Auf- und Abbewegungen des VSG besteht (Abschnitt 3.4.2). Rund um Tag 330 ist ein sehr markantes klimatisches Ereignis feststellbar. Wie die Versuchsauswertung der dreigeschossigen SSGS-Fassade des Instituts für Fenstertechnik (ift) [29] wiedergibt, lässt sich auch in diesem Versuchsstand darauf schließen, dass das Zusammenspiel der niedrigen Außentemperatur bei gleichzeitig geringer Luftfeuchte in der Halle für die (Rück-)Verformungen verantwortlich gewesen sein könnte. Aus der direkten Abhängigkeit ergibt sich, dass die Klebefuge des tragenden Randverbunds durch intensive Kriechverformungen sehr sensibel auf diese Klimaveränderungen reagiert. Der Vergleich liefert einen Anhaltspunkt für die Vermutung, dass es eine Verknüpfung mit den sprunghaften Verformungsverläufen um Tag 25 gibt. Aber auch, dass der Randverbund an eben diesen Absenkungen und Hebungen der Gesamtelemente in Abb. 3.10 einen enormen Beitrag geleistet hat. Für die markanten Ereignissen am Tag 239 und 329 bieten die Säulendiagramme im folgenden Abschnitt ebenfalls eine klare Aufschlüsselung darüber, welche Verformungsanteile die Systemkomponenten zur Gesamtverformung beitragen.

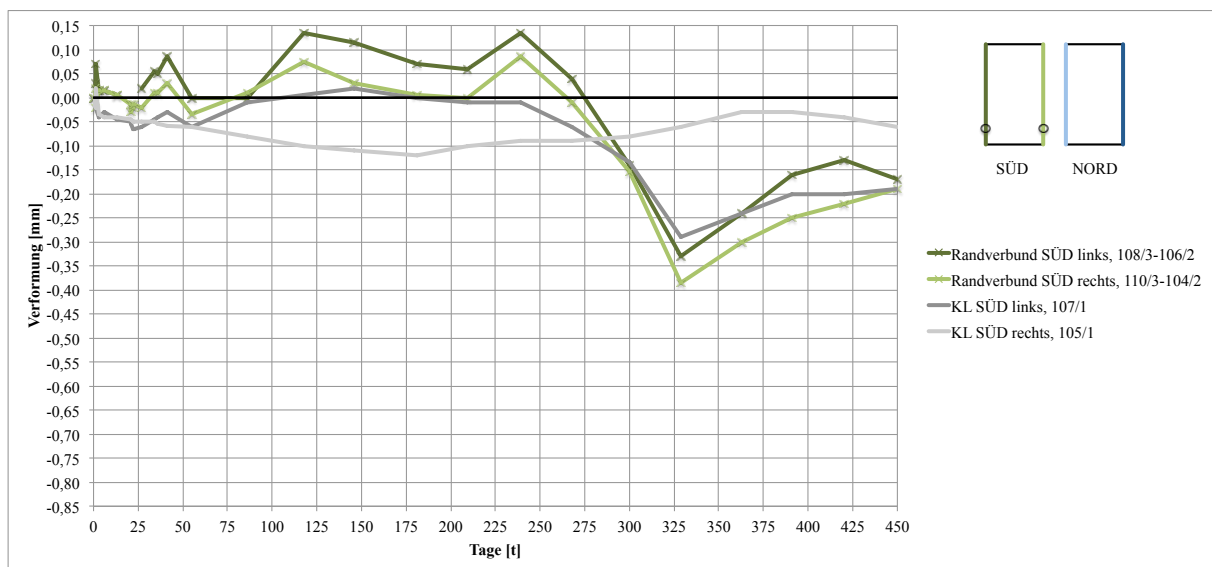


Abb. 3.21: Überlagerung der Randverbundverformung und Koppelleistenverformung des HGV-Elements SÜD

Der Isolierglasrandverbund stellt für das MIG eine Wärmebrücke dar, wodurch dieser dem Temperaturgefälle zwischen Innen- und Außenraum direkt ausgesetzt ist. Wie in dem vorange-

gangenen Abschnitt 3.4.4, kann auch in Abb. 3.20 kein negativer Einfluss der Temperatur auf die Verformungen festgestellt werden.

Festgestellt wurde in Abschnitt 3.4.3, dass die Verformungen des ESG, abgebildet durch die Silikonklebefugenverformungen, ein ähnliches Klimaverhalten aufweisen wie die Koppelleistenverformungen. Dass diese Tatsache auch auf das VSG zutrifft zeigen die Verformungskurve „KL SÜD links, 107/1“ in Abb. 3.21 und die Verformungskurve „KL NORD rechts, 100/1“ in Abb. 3.22. Beide sind in dunkelgrau angedeutet. Die Verformungen des VSG sind in den Verformungen des Randverbunds enthalten, wie Abschnitt 3.3 beschreibt. Deshalb kann aus diesen Abbildungen das ähnliche Dehnungsverhalten zwischen Fensterglas und BFU-Koppelleiste abgelesen werden. Nur zu manchen Zeitpunkten kommt es zu Abweichungen. Auf das Verformungsverhalten der übrigen BFU-Koppelleisten wurde in Abschnitt 3.4.2 ausführlich eingegangen.

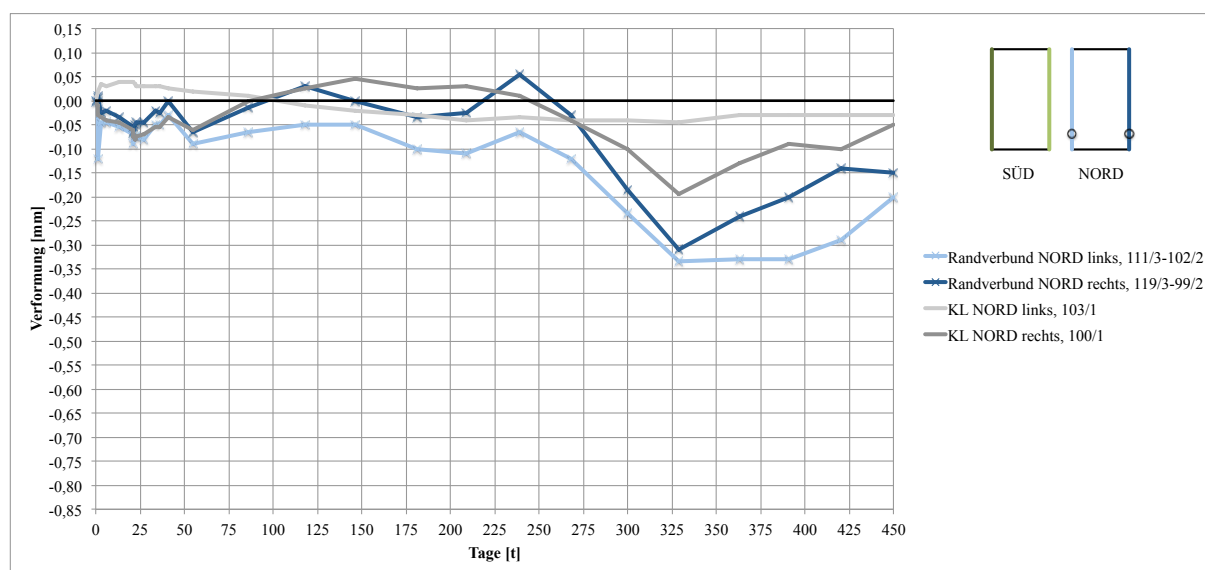


Abb. 3.22: Überlagerung der Randverbundverformung und Koppelleistenverformung des HGV-Elements NORD

In Abb. 3.23 und Abb. 3.24 sind die Kriechkurven der Klebefugen des tragenden Randverbunds und jene der Silikonklebefugen aus Abb. 3.19 übereinandergelagert. Die Verformungen entstanden im Falle der Klebefuge des tragenden Randverbunds dadurch, dass das Eigengewicht des VSG aufzunehmen war. Die Silikonklebefuge hatte das gesamte Gewicht des MIG abzutragen, wodurch sich das in Abschnitt 3.4.3 erläuterte Dauerlastniveau von $0,043N/mm^2$ einstellte. Besonders interessant erscheint in Abb. 3.23, dass die Silikonklebefugen trotz der höheren Beanspruchung mit geringeren Kriechverformungen reagieren. Dieser Umstand kann auf die klimatischen Bedingungen zurückgeführt werden. Dadurch wird abermals bestätigt, dass Temperatur und relative Luftfeuchte die Verformungsmessungen stark beeinflussen und beinahe mehr Einfluss auf das Verformungsverhalten haben, als die Dauer oder Intensität einer vorangegangenen Langzeitbelastung. Da diese beiden Abbildungen ebenfalls die Verformungsdifferenzen zwischen VSG und ESG abbilden (Abschnitt 3.3), können im Falle beider HGV-Elemente somit auch Unterschiede zwischen den äußeren und inneren Seiten festgestellt werden.

Die Differenzbetrachtung dieses Abschnitts zwischen den Messwerten von MP3 und MP2, aus der sich das Kriechverhalten der Klebefugen des tragenden Randverbunds im MIG ergeben hat, ist als kritisch anzusehen. Besonders deshalb, weil sich die äußeren Messuhren – wie in Abb. 3.6 deutlich wird – im Vergleich zu den inneren Messuhren in völlig unterschiedlicher Lage am HGV-Element befinden. Da somit die Deformationen an unterschiedlichen Stelle aufgezeichnet

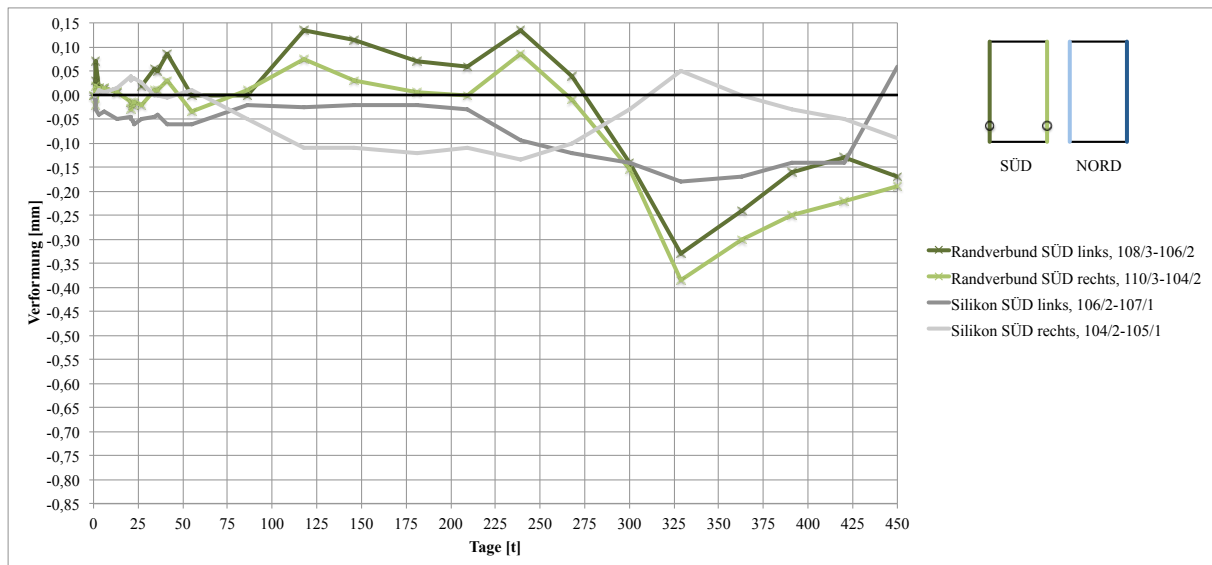


Abb. 3.23: Überlagerung der Randverbundverformung und Silikonklebefugenverformung des HGV-Elements SÜD

werden, listet die Differenztafel aus Anhang B.2 Verformungswerte auf, die keiner eindeutigen Lage zugeordnet werden können. Um die Aussagekraft von Differenzbetrachtungen zwischen Messpunkten zu gewährleisten, sollten in weiteren Projekten die Messuhren in einheitlicher Lage (horizontale und vertikale Ausrichtung) an den Versuchsständen appliziert werden. In diesem Fall hat sich die vertikale Ausrichtung der Messuhren auf den VSG-Scheiben wegen der enormen Höhe des MIG als schwierig erwiesen weshalb sie im Hinblick auf die einfache Erreichbarkeit der laufenden Ablesung relativ weit unten angebracht worden sind.

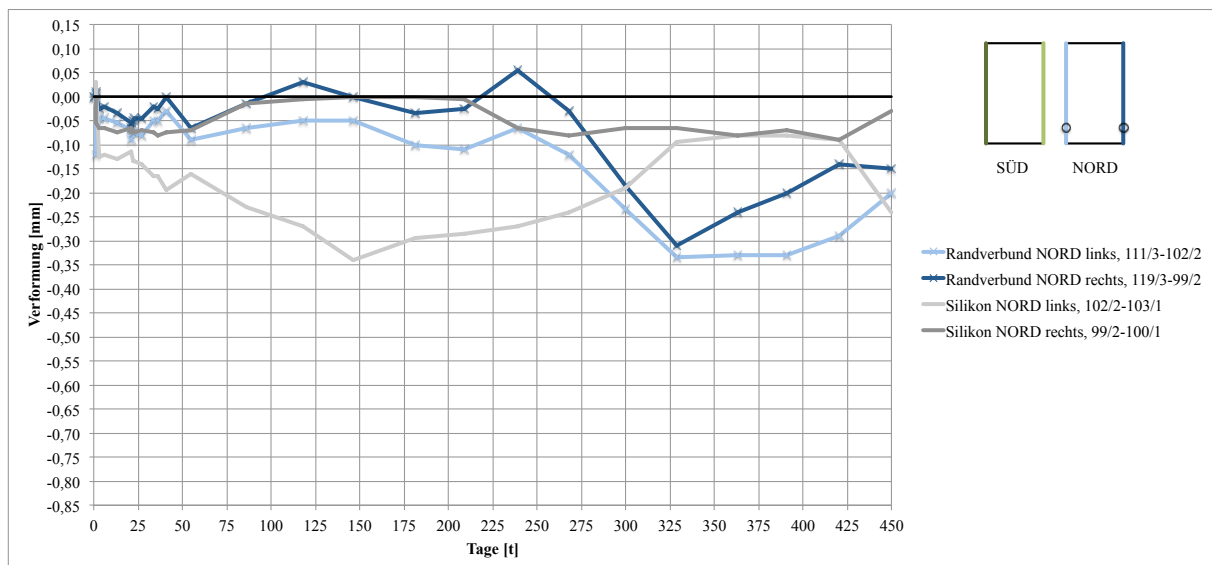


Abb. 3.24: Überlagerung der Randverbundverformung und Silikonklebefugenverformung des HGV-Elements NORD

Ein Vergleich der Messwerte des Innen- und Außenraums ist auch problematisch, weil aufgrund der unzureichenden Klimataufzeichnung im Büro nur Annahmen zum vorherrschenden

Temperaturniveau (Abschnitt 3.3) und keine präzisen Aussagen über das klimaabhängige Verformungsverhalten der Systemkomponenten (Schrauben, BFU-Koppelleisten Silikonklebefuge, ESG, Klebefuge des tragenden Randverbunds im MIG und VSG) möglich sind. Es wird abschließend darauf hingewiesen, dass besonders die Überlegungen und angestellten Interpretationen dieses Abschnitts mit Bedacht behandelt werden sollten.

3.5 Verformungsanteile der Systemkomponenten an der Gesamtverformung

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Verformungsanteile der Koppelleiste, Silikonklebefuge beziehungsweise die der Klebefuge des tragenden Randverbunds an der Gesamtverformung in Prozent dargestellt. Sinn und Zweck ist es, ein besseres Bild der Zusammenhänge für die Tage 1, 3 sowie der markanten Ereignisse am Tag 239 und 329 zu bekommen. Abb. 3.25 und Abb. 3.26 zeigen die prozentualen Aufschlüsselung am Tag 1 (direkt nach dem Entfernen der PA-Klötze) und Tag 3. Dabei sind die resultierenden Verformungen, die die äußeren Messuhren auf der VSG-Scheibe (MP3 in Abb. 3.5) aufzeichnen, für die jeweilige Seite des HGV-Elements und dem entsprechenden Messtag aus Anhang B.1 zu entnehmen. Die Gesamtverformungen finden sich auch in diesen Abbildungen unter jedem Säulendiagramm. Wie üblich, kennzeichnet ein negatives Vorzeichen die Absenkung nach unten.

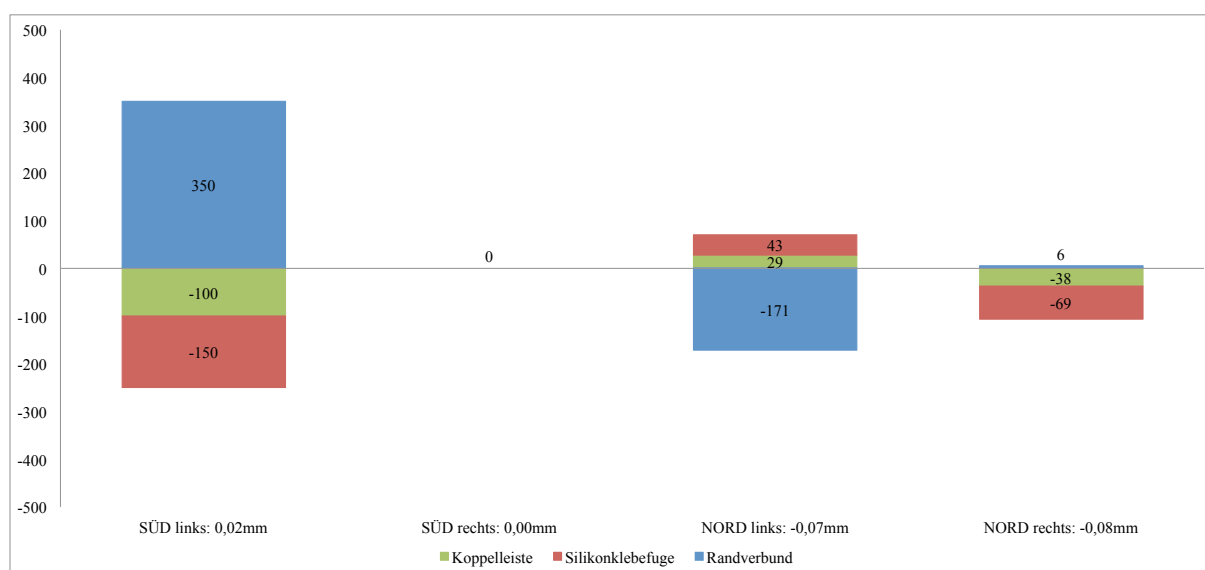


Abb. 3.25: Verformungsanteile der Systemkomponenten an der Gesamtverformung in [%] von Tag 1

Zusammengefasst lassen sich demnach die Deformationen der Gesamtelemente in Abb. 3.10 um Tag 1 und 3 folgendermaßen beschreiben: Auf der linken Seite des HGV-Elements SÜD haben sich die Koppelleiste und Silikonklebefuge geringer abgesenkt, weshalb die Hebung am Beginn dem tragenden Randverbund zuzurechnen ist. Rechts hingegen gleichen sich am Tag 1 die Verformungen der Koppelleiste (Hebung) und des Randverbunds (Absenkung) aus, erst mit Tag 3 bewegte sich auch die Silikonklebefuge. Außerdem kehrt sich das Verformungsbild um, die Koppelleiste senkt sich nach unten ab. Gemeinsam mit der relativ geringen Anfangsverschiebung erklärt dies den flachen Verformungszuwachs in Abb. 3.10. Es beantwortet sich auch die Frage, woher die plötzliche Absenkung auf der linken Seite des HGV-Elements NORD um Tag 3 hauptsächlich

stammt: Zum Großteil von der Silikonklebefuge und der Rest von der Klebefuge des tragenden Randverbunds im MIG. Fest steht, dass die BFU-Koppelleiste am Tag 1 einer Hebung ausgesetzt war. Auf der rechten Seite des HGV-Elements NORD leisten alle drei Systemkomponenten einen Beitrag zur Absenkung, allen voran die Silikonklebefuge mit einem erheblichen Einfluss.

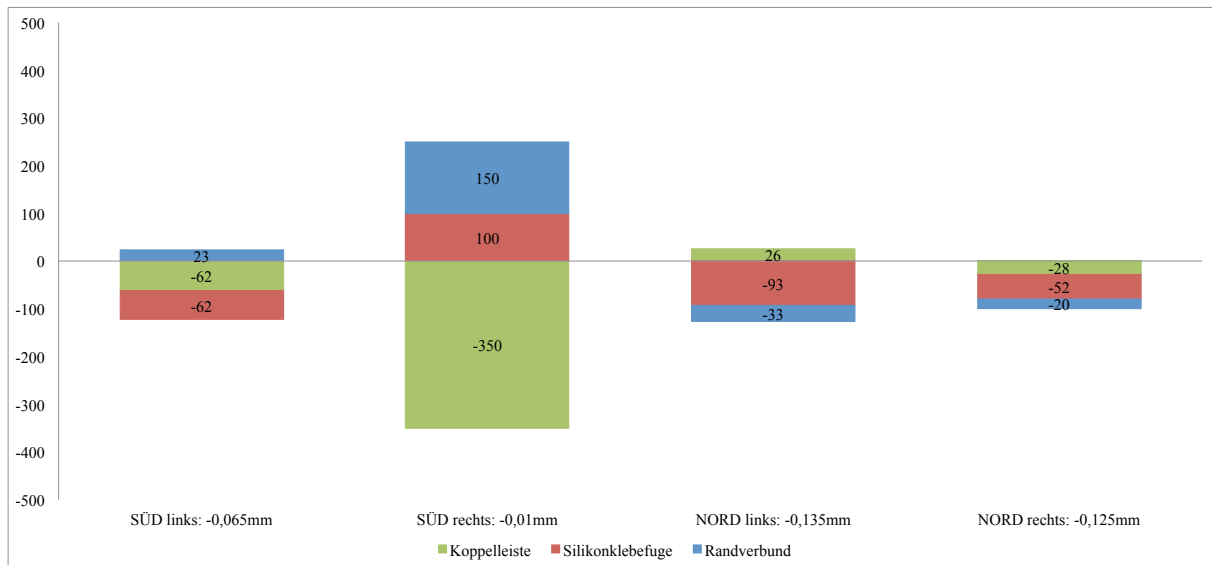


Abb. 3.26: Verformungsanteile der Systemkomponenten an der Gesamtverformung in [%] von Tag 3

Vergleicht man die resultierenden Verformungen von Abb. 3.25 und Abb. 3.26 untereinander, scheint die Vermutung aus Abschnitt 3.4.1 bestätigt zu sein. Es deutet alles darauf hin, dass die elastischen Anfangsverschiebungen nach dem Entfernen der PA-Klötze (und zum Zeitpunkt der zweiten Messung am Tag 1) noch nicht vollständig abgeschlossen waren, und die maximalen Anfangsverschiebungen erst mit der nächsten Messung am Tag 3 erfasst werden konnten. Hier zeigt sich auch das erwartete elastische Materialverhalten der Silikonklebefugen, beim HGV-Element SÜD und NORD – wie aus Abschnitt 3.4.3 hervorgeht. Im Monitoring von Versuchsständen sollte deshalb eine Ablesung der Messuhren zwar unbedingt am Tag des Belastungsbeginns, jedoch – im Vergleich zu diesem Versuchsstand – zu einem etwas späteren Zeitpunkt erfolgen, um die anfänglichen Setzungen vollständig abklingen zu lassen und entsprechend erfassen zu können.

Bei der Analyse von Abb. 3.10 wurde festgestellt, dass zum Teil ein Zusammenhang der Gesamtverformungen mit der Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit in der Halle gegeben ist. Betrachtet werden in Abb. 3.27 und Abb. 3.28 deshalb die markanten Zeiträume, wo die Luftfeuchtigkeit stark abgenommen hat – ab Tag 239 – und deutlich angestiegen ist – ab Tag 329. Es kann Abb. 3.27 abgeleitet werden, dass das Kriechverhalten der Silikonklebefugen und Koppelleisten bei einer hohen relativen Luftfeuchte (Tag 329) überwiegt. In diesem Zusammenhang wurde auf das Quellen und Schwinden bereits in Abschnitt 3.4.2 detailliert eingegangen. Der Randverbund reagiert bei beiden HGV-Elementen zum Großteil durch Rückverformung. Bei der rechten Seite des HGV-Elements NORD kommt es zum Ausgleich zwischen der Hebung des Randverbunds und den Kriechverformungen der Silikonklebefugen und Koppelleisten, weshalb sich keine resultierende Deformation einstellt.

Hingegen leistet das Zusammenspiel der niedrigen Außentemperatur bei gleichzeitig geringer Luftfeuchte in der Halle (Tag 329 in Abb. 3.28) einen enormen Beitrag für die intensiven Kriechverformungen des Randverbunds. Das deckt sich mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 3.4.4. Aufgrund dieser direkten Abhängigkeit ist es sehr wahrscheinlich, dass die Verformungen der

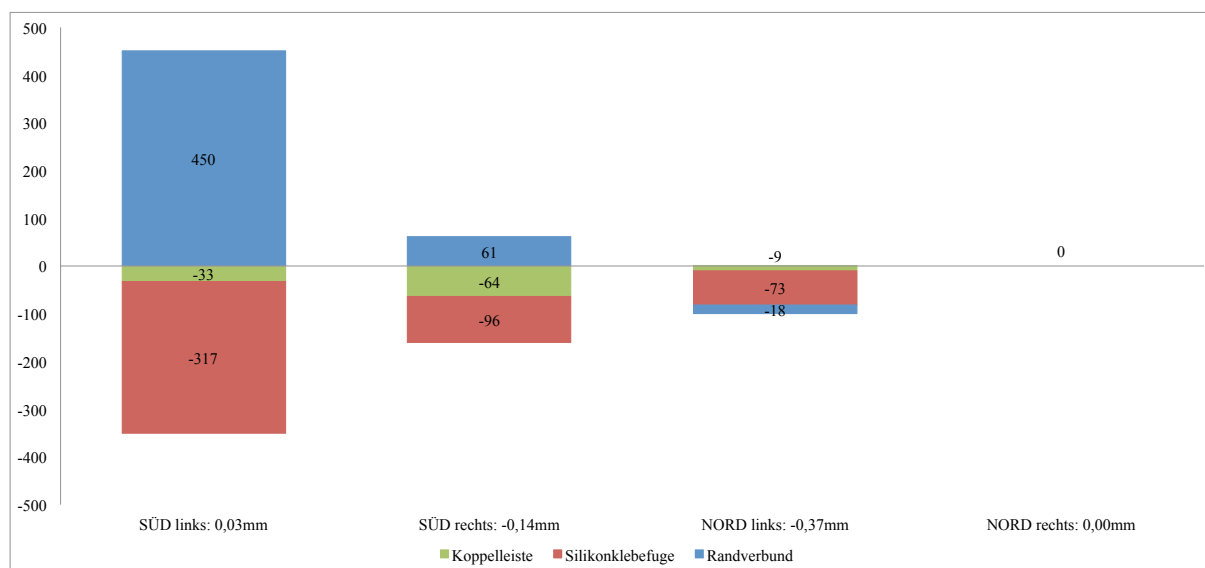


Abb. 3.27: Verformungsanteile der Systemkomponenten an der Gesamtverformung in [%] von Tag 239

beiden HGV-Elemente mit der relativen Luftfeuchte eng verknüpft sind und in diesem experimentellen Versuch eine sensible Reaktion auf Klimaveränderungen vorausgesetzt werden kann.

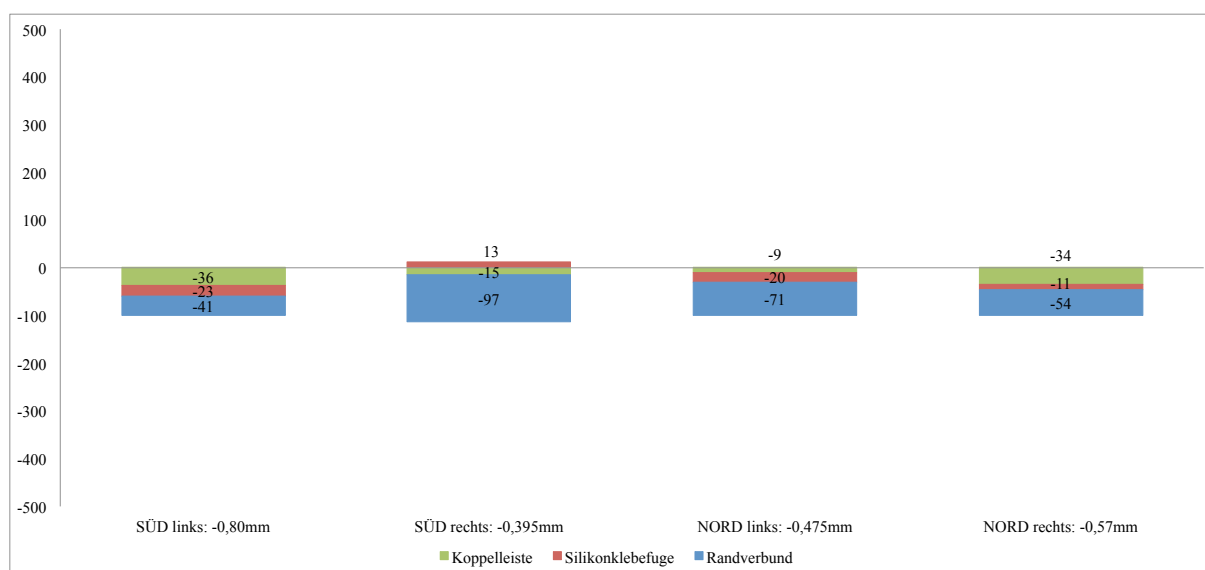


Abb. 3.28: Verformungsanteile der Systemkomponenten an der Gesamtverformung in [%] von Tag 329

Mit den Erkenntnissen dieses Abschnitts werden zum Abschluss noch einmal die Gesamtelemente in Abb. 3.10 und im Speziellen der Verlauf der Verformungskurven am Beginn betrachtet. Zum Einen scheint es durchaus möglich zu sein, dass auch die sprunghaften Verformungsverläufe um Tag 25 mit der relativen Luftfeuchte verknüpft waren (Abschnitt 3.4.4). Zum Anderen ist es immer noch fragwürdig, weshalb sich auf der rechten Seite des HGV-Element SÜD in Abb. 3.10 kaum eine Anfangsverschiebung eingestellt hat. Auf das Rückkriechen der Silikonklebefugen der

zugewandten Seiten und die Verschiebung der nachgiebigen Brettsperrholz-Wandscheibe geht Abschnitt 3.4.3 ein. Es wurde zwar stets darauf geachtet, sowohl bei der Lagerung als auch bei der Montage eine vorzeitige Belastung der Silikonklebefugen zu vermeiden, dennoch könnte es doch vorab bereits dazu gekommen sein. Zu diesem Zeitpunkt hätten Verformungen aufgrund des fehlenden Monitorings jedoch noch nicht erfasst werden können. Es ist natürlich auch möglich, dass eine ungleichmäßige Belastung beider Silikonklebefugen auftrat, indem beispielsweise die mechanischen Abstützungen in Form der (PA)-Klötze nicht zeitgleich (links und rechts) entfernt wurden. Die Hebung der rechten Seite des HGV-Elements SÜD beziehungsweise die Absenkung der linken Seite in Abb. 3.15 erscheint dann als durchaus logisch – dies stellt bereits den Beginn der Rotation dar.

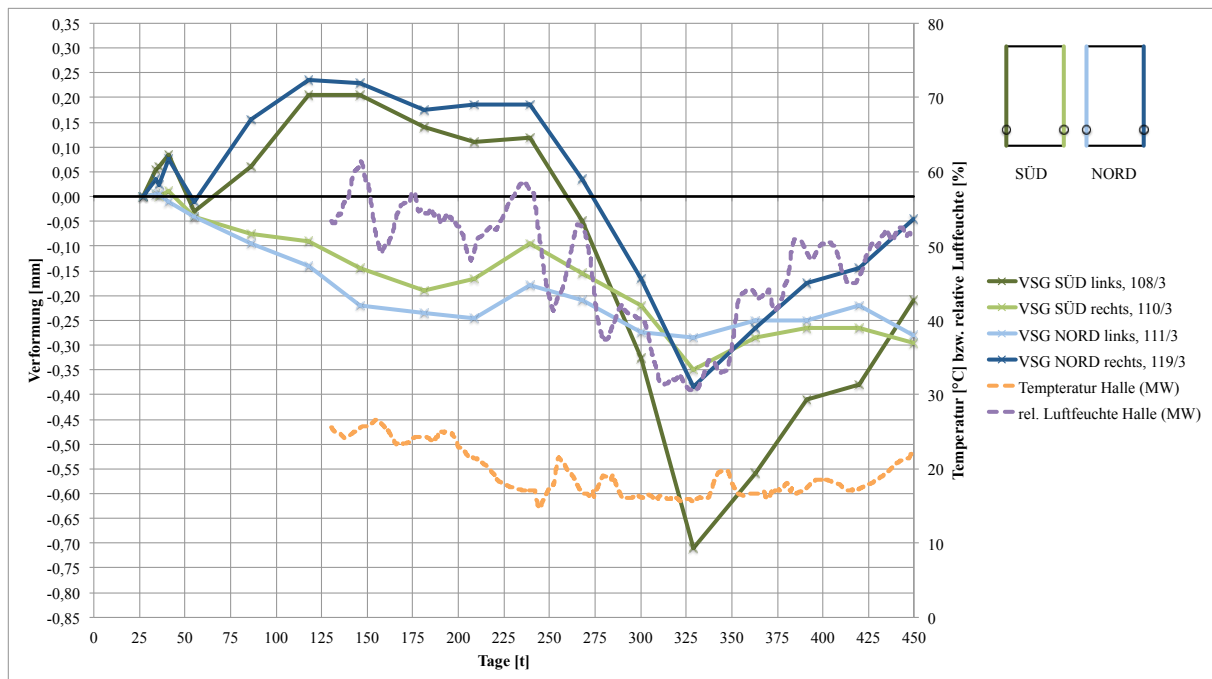


Abb. 3.29: Überlagerte Gesamtverformungen von HGV-Element SÜD und HGV-Element NORD samt den gemittelten Klimaverläufen – Startwert ab Tag 27

Um herauszufinden, wie erheblich der Einfluss des defekten Metallwinkels (Abschnitt 3.3) auf die Messwerte war, ist in Abb. 3.29 der Tag 27 (4. April 2016) als Startwert festgelegt. Also jener Tag, ab dem die Messung mit dem neu verklebten Metallwinkel wieder aufgenommen werden konnte. Sämtliche Verformungen die bis hier hin aufgetreten waren, bleiben in dieser Abbildung außer Acht – als hätte keinerlei Verschiebung stattgefunden. Im Vergleich zu Abb. 3.10, die den gesamten Beobachtungszeitraum erfasst, dient das Folgende noch als Ergänzung: In Abb. 3.29 ist das Umschwenken der Verformungen und der relativen Luftfeuchte am Tag 230 und Tag 330 bei den zugewandten Seiten eindeutiger zu entnehmen. Die Verformungskurven beider HGV-Elemente liegen relativ nah beieinander und zeigen qualitativ ein sehr ähnliches Verformungsbild. Auch die Verformungskurven der einzelnen Systemkomponenten rücken näher zusammen. Diese werden hier jedoch nicht erneut angeführt. Obwohl die beiden HGV-Elemente unabhängig voneinander an der Unterkonstruktion befestigt sind, erkennt man einen eindeutigen Zusammenhang bei den Deformationen der abgewandten Seiten und der zugewandten Seiten. Womit diese Abbildung schließlich auch sämtliche Erkenntnisse dieser Arbeit bestätigt.

3.6 Resümee

Bei den Versuchsaufbauten wurden je HGV-Element vor allem zwischen der linken und rechten Seite (Abb. 3.10) große Unterschiede im Verhalten unter Dauerlast festgestellt. Auch im direkten Vergleich der beiden HGV-Elemente zeigen die abgewandten Seiten (linke Seite des HGV-Elements SÜD und rechte Seite des HGV-Elements NORD) und die zugewandten Seiten (rechte Seite des HGV-Elements SÜD und linke Seite des HGV-Elements NORD) durchwegs ein konsistentes Verhalten – und zwar bei den BFU-Koppelleisten in Abb. 3.19 sowie bei den Silikonklebefugen in Abb. 3.13.

Im Bezug auf die elastischen Anfangsverschiebungen gingen aus den Messwerten keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Systemkomponenten (Schraube, BFU-Koppelleiste, Silikonklebefuge, ESG, Klebefuge des tragenden Randverbunds im MIG und VSG) hervor. Diesbezüglich beschäftigte sich Abschnitt 3.5 mit den Verformungsanteilen der Systemkomponenten an der Gesamtverformung und stellt diese in Abb. 3.25 und Abb. 3.26 für Tag 1 und Tag 3 gegenüber. Es deutet alles darauf hin, dass die elastischen Anfangsverschiebungen nach dem Entfernen der PA-Klötze (und zum Zeitpunkt der zweiten Messung am Tag 1) noch nicht vollständig abgeschlossen waren, und somit die maximalen Anfangsverschiebungen erst mit der nächsten Messung am Tag 3 erfasst werden konnten. Hier zeigt sich auch das erwartete elastische Materialverhalten der Silikonklebefugen.

Offensichtlich wird an den Gesamtverformungen beider HGV-Elemente mit Abb. 3.10, dass die klimatischen Bedingungen einen großen Einfluss auf die an den abgewandten Seiten gemessenen Verformungen haben. Es kann allerdings darauf geschlossen werden, dass ein Teil dieser Verformungsänderungen zufolge Differenzen der relativen Luftfeuchte aus dem Quellen und Schwinden der BFU-Koppelleisten resultiert. Den Großteil nimmt jedoch das Verhalten der Klebefugen des tragenden Randverbunds im MIG ein. Diese signifikante Luftfeuchteabhängigkeit zeigt sich auf Basis der Messdaten bei den zugewandten Seiten erneut und hauptsächlich beim Isolierglasrandverbund. Dazu liefern die sprunghaften Verformungsverläufe in Abb. 3.20 ein eindeutiges Bild der Sensibilität für einen Wechsel der Luftfeuchtigkeitsbedingungen. Dagegen trifft das bei den BFU-Koppelleisten und Silikonklebefugen weniger zu, es fällt schwerer die Verformungsmechanismen nachzuvollziehen.

Um diesbezüglich der Annahme „Rotation der Gesamtelemente“ aus den vorangegangenen Abschnitten genauer auf den Grund zu gehen, wird folgendes festgestellt: Die Vermutung „Verschiebung der nachgiebigen Brettsperrholz-Wandscheibe“ (Abschnitt 3.4.2) soll hierfür als weiterer Anhaltspunkt dienen und ist mit Fortschreiten der Versuchsdauer weiter zu überprüfen. Jedoch sind die komplexen Zusammenhänge nur erschwert zu quantifizieren, weshalb zusätzliche Messpunkte (Abb. 3.5) hilfreich wären. Sie könnten einen Aufschluss über den Verformungsmechanismus der Unterkonstruktion geben.

Eine weitere interessante Erkenntnis liefern Abb. 3.27 und Abb. 3.28, wo die markanten Klimaereignisse am Tag 239 und 329 gegenübergestellt sind: Bei hoher Luftfeuchte in der Halle überwiegen die Kriechverformungen der Silikonklebefugen, bei geringer Luftfeuchte die des tragenden Randverbunds im MIG. Ein Zusammenhang der Verformungen mit der Temperaturentwicklung in der Halle ist durchwegs nur schwer zu erkennen, es ist aber davon auszugehen, dass alle Systemkomponenten aufgrund der verhältnismäßig stabilen Temperaturbedingungen (Abschnitt 3.4.1) sehr neutral darauf reagieren. Laut den vorgestellten Ergebnissen der Silikonklebefugen (Abb. 3.19) scheint die Klimabeeinträchtigung nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Um die Klimazusammenhänge zwischen Innen- und Außenraum besser zu verstehen, wird vorgeschlagen, im Versuchsstand neben dem Außenklima zukünftig auch das Innenklima (relative Luftfeuchte und Temperatur) mit einem Klimadatenlogger kontinuierlich zu erfassen.

Vor dem Abschluss dieses Kapitels wird auf vergleichbare experimentelle Versuchsauswertungen zum Thema „Langzeitverhalten von mit Silikon verklebten HGV-Konstruktionen“ verwiesen: Auf die langjährige und bereits abgeschlossene Untersuchung einer dreigeschossigen SSG-Fassade am ift [29], und auf [30], wo der umfangreiche Freilandversuch mit HGV-Elementen der HFA an der Fassade des Logistikzentrums der Firma Hermann Otto GmbH behandelt wird.

Es ist auch in Zukunft unabdingbar, an einer baugleichen HGV-Konstruktion wie dieser, experimentelle Langzeituntersuchungen durchzuführen. Der Versuchsstand ist genau zu beobachten und die gewonnenen Messdaten sind auszuwerten beziehungsweise zu interpretieren, um das Langzeitverhalten dieses tragend verklebten HGV-Systems genauer nachvollziehen zu können. Bis dato kann festgehalten werden, dass sich in den ersten 450 Tagen keine außergewöhnlichen Ereignisse zugetragen haben, weshalb diesen mechanisch ungestützten HGV-Konstruktionen des Typs III aus Abb. 2.5 und den langzeitbeanspruchten, lastabtragenden Silikonklebefugen mit einem Dauerlastniveau von $0,043\text{N/mm}^2$ durchaus mehr Vertrauen entgegengebracht werden sollte.

Kapitel 4

Aussteifungspotential von HGV-Scheiben in Holzbauten

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Aussteifungspotential von Wandscheiben, die ausschließlich aus HGV-Elementen bestehen. Finite-Elemente (FE)-Rechenmodelle unterschiedlicher Gebäudevarianten veranschaulichen die resultierenden Belastungen und Verformungen, die bei den HGV-Scheiben infolge Windbeanspruchung auftreten. Darauf aufbauend wird einerseits ihre Grenztragfähigkeit untersucht und andererseits die prozentuelle Ausnutzung dargestellt. Dies geschieht unter Anwendung von wissenschaftlich fundierten Festigkeiten und Materialsicherheitsbeiwerten heute verfügbarer Klebstoffe. Die notwendige Nachweise unter realen Lastbedingungen werden mit Hilfe des Berechnungs- und Bemessungskonzepts [12] geführt. Neben dem Stand der Technik wird im Hinblick auf die Effizienzsteigerung auch die Auswirkung unterschiedlicher Elementanordnungen betrachtet. Für die Berechnung deren Wandsteifigkeiten kommt das Ersatzfedermodell [12] zum Einsatz. Diese Fallstudie hat drei Ziele: Zum Einen, die Ausnutzung der HGV-Elemente, die als HGV-Scheiben ausschließlich die Aussteifung von mehrgeschossigen Holzskelettbauten unter Windbeanspruchung übernehmen, darzustellen. Zum Anderen werden daraus die Grenztragfähigkeit und in weiterer Folge sogar Bemessungsdiagramme abgeleitet, um Baubeteiligten die Auswahl der statisch notwendigen HGV-Elemente zur Gebäudeaussteifung bei kurzfristiger Lasteinwirkung infolge Wind zu vereinfachen. Und zu guter Letzt – im Hinblick auf die weitere Effizienzsteigerung – wird eine HGV-Konstruktion optimiert. Dabei werden die komplexen Zusammenhänge des Ersatzfedermodells klarer und auch sehr deutlich, welchen Einfluss die Adaptionen einzelner Bauteilkomponenten aufeinander haben.

4.1 Grundlagen zur Gebäudeaussteifung und vorangegangene Forschungsarbeiten

Aus der Windanströmung, der Abtriebskraft infolge einer unplanmäßigen Schrägstellung sowie durch Erdbebenlast entstehen Horizontalkräfte, die Hochbauten belasten. Damit solche Horizontalkräfte sicher in die Gründung des Bauwerks übertragen werden können, ist eine Aussteifungsebene notwendig und auch essentiell für die Stabilität des Gebäudes. Im Massivbau bedient man sich üblicherweise mehrerer Wandscheiben und/oder steifer Kerne, welche schubfest an die Decken angeschlossen werden. Im Skelettbau stehen massive Wandscheiben und schubsteife Deckenkonstruktionen oftmals nicht zur Verfügung. Dass dem Skelettbau aus Holz im Speziellen ein sehr geringes Aussteifungspotential zugrunde liegt, dazu tragen noch zusätzlich die nachgiebigeren und eher weichen Holzkonstruktionen bei. Um eine ausreichende Aussteifung von Holzbauten zu gewährleisten, haben somit andere Aussteifungssysteme zum Einsatz zu kommen. Neben den konventionellen Möglichkeiten (Einspannung von Stielen, biegesteife Ausführung der Rahmenecken, Anordnung von Windverbänden etc.) bietet die Technologie der HGV-Bauweise ein Potential zum horizontalen Lastabtrag. Durch die HGV-Konstruktion [13] (Abb. 2.2b) wird es möglich, auch die Fassadenverglasung zur Aussteifung von Gebäuden zu nutzen – das Glas

übernimmt dann neben seiner bekanntesten Funktion des Hüllens insbesondere auch eine statische Funktion.

In Neubauer [9] wurde gezeigt, dass rein schubverklebte HGV-Konstruktionen [7] (Abb. 2.3a) mit dem Tragmechanismus „Schubfeld“ (Abb. 2.2a) zur Aussteifung von Einfamilienhausbauten geeignet sein können. Unter Anwendung des Bemessungsvorschlags [10] stieß der ungünstige Gebäudetyp seiner Musterstatiken - ein zweigeschossiges Gebäude mit Windangriff an der Längsseite, welches über die beiden kürzeren Seiten ausschließlich mittels HGV-Scheiben ausgesteift wurde - jedoch sehr rasch an seine Grenzen. Die Steifigkeit der HGV-Konstruktion reichte nicht aus, um die Aussteifung zu gewährleisten und die zulässigen Tragfähigkeiten der HGV-Elemente wurden rasch überschritten.

Aufgrund des unzureichenden Aussteifungspotentials hat Hochhauser [14] die Tragfähigkeit dieses Gebäudetyps unter Berücksichtigung verschieden steifer Wandscheiben näher untersucht. Dabei wurden die steiferen beplankten oriented strand board (OSB)-Wände und die weicheren rein schubverklebten HGV-Elemente gemeinsam in dem typischen Gebäudegrundriss angeordnet. Es stellte sich die Frage, wie die verschieden steifen Wandscheiben zusammenwirken. Um die auftretenden Belastungen und Verformungen je Wandscheibe quantifizieren zu können, wurde eine Analyse am Gebäudemodell mittels Statikprogramm durchgeführt. Als Ergebnis hielt er fest, dass die steiferen Tragsysteme den Großteil der Kräfte an sich ziehen und die HGV-Scheiben stark entlasten. Und dass dieser Effekt sich auch noch verstärkt, je weicher die HGV-Elemente im Vergleich zu den anderen aussteifenden Tragsystemen werden.

Rein schubverklebte HGV-Elemente sowie jene mit dem Tragmechanismus „Schubfeld und Druckdiagonale“ (Abb. 2.2b) wurden in einem anderen baupraktischen Beispiel von Weissensteiner in einer Variantenstudie [15] im Hinblick auf die Gebäudeaussteifung untersucht. Dabei kam das Ersatzfedermodell [12] zum Einsatz und eine allgemeine Nachweisführung der beteiligten Bauteilkomponenten erfolgte. Eine Glasfassade aus mehreren nebeneinander angeordneten HGV-Elementen hatte die Aussteifung eines Wintergartenzubaus zu übernehmen. Auch hier wurden bei den rein schubverklebten HGV-Elementen die Nachweise unter realistischen Windbelastungen bei Weitem überschritten. Die schubverklebten und geklotzten HGV-Elemente schnitten besser ab, da sich die Kräfte je nach Steifigkeit der einzelnen Bauteilkomponenten auf die Schubverklebung und auf die Klotzung aufteilten. Im Zuge der Gegenüberstellung der HGV-Elemente im „Verband“ zu den „Einzelelementen“ wurde zudem eine Steigerung der Wandsteifigkeit um etwa das 30-fache beziehungsweise der „aufnehmbaren Horizontalkraft“ um den Faktor sechs festgestellt. Gemäß [15] ist als maßgebendes Versagenskriterium von HGV-Elementen (sowohl für „Einzelelemente“ als auch Elemente im „Verband“) generell die „kritische Beullast“ H_{crit} heranzuziehen. Dies kann aus Sicht des Autors dieser Arbeit nur schwer nachvollzogen werden, weshalb diese Thematik als Untersuchungsschwerpunkt dient.

Mit den Forschungsergebnissen aus [15] wurde im Forschungsvorhaben [17, 18] das Aussteifungsverhalten von HGV-Scheiben an ideellen Gebäuden aus Stahlbeton und Holz untersucht. An Grundrissverhältnissen von 1:1, 1:1,5 beziehungsweise 1:2 mit einer variierenden Stockwerkszahl von eins bis vier (Geschosshöhe 3,25m) wurden realistische Belastungsniveaus (Lastfall Wind und Erdbeben gemäß ÖNORM B 1991-1-4 [31]) angesetzt. Wie schon Hochhauser [14] feststellte, konnten die HGV-Scheiben bei der Stahlbetonstruktur aufgrund der größeren Steifigkeit des Stahlbetonkerns beziehungsweise der Stahlbetonwände nur gering aktiviert werden. Der planungs- und baupraktisch relevanten Reduktion dieser tragenden (und aussteifenden) Bauteile stand letztlich eine verhältnismäßig geringe Entlastung durch die HGV-Scheiben gegenüber. Aus diesem Grund wurden sämtliche an der Gebäudeaussteifung mitwirkenden Bauteile entfernt um die Belastung und Verformung (Kopfverschiebung) der verbliebenen HGV-Elemente zu eruieren. Dazu war es notwendig, die ideellen Gebäude als dreidimensionale Objekte in einem Statikpro-

gramm zu modellieren und die HGV-Elemente als Ersatzrahmen mit linearen Ersatzfedern zu berücksichtigen. Die Parameterstudie verfolgte zum Einen das Ziel, die Ausnutzung der HGV-Elemente unter Traglast darzustellen. Eine allgemeine Nachweisführung gemäß Berechnungs- und Bemessungskonzept [12] blieb hier jedoch unberücksichtigt. In Anlehnung an [15] wurde ebenfalls die „kritische Beullast“ H_{crit} als generell maßgebliche Bruchlast herangezogen und mit der im Rechenmodell eruierten Belastung je HGV-Element verglichen. Hier ergab sich ein weiterer Punkt, der aus Sicht des Autors dieser Arbeit nicht nachvollziehbar ist: Bei dem HGV-Element mit einer Glasstärke von 12mm VSG (2x6mm) [18] entspricht H_{crit} etwa dem HGV-Element mit einer Glasstärke von 8mm VSG (2x4mm) [15]. Es wird behauptet, dass in erster Linie die Erhöhung der Glasstärke eine Verbesserung von dem Beulwiderstand eines HGV-Elements mit sich führen sollte. Um der Diskrepanz auf den Grund zu gehen, wird diese Behauptung im Zuge der Arbeit ausführlich untersucht. In der Parameterstudie wurde zum Anderen auch die Gebrauchstauglichkeit über die Stockwerksverschiebung nachgewiesen. Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis wurde die im Rechenmodell eruierte Verformung mit dem normativen Grenzwert von $\frac{H}{300}$ verglichen. Überdies wurde der international gebräuchliche Grenzwert von $\frac{H}{500}$ untersucht. H stellt hier die Gebäudehöhe oder Stockwerkshöhe dar. Als Ergebnis der Parameterstudie ist die untersuchte HGV-Konstruktion (Tragmechanismus „Schubfeld und Druckdiagonale“ in Abb. 2.2b) für bis zu zweigeschossige Holzbauten zu empfehlen. Bei den drei und vier Geschossen wurde die Windbelastung sowohl bei der Verformung als auch bei der Traglast maßgeblich, wohingegen eine entsprechende Entwicklung in eine höhere Traglast und eine höhere Steifigkeit im Bereich von 50 bis 100% als zielführend empfunden wird.

Um die Traglast von HGV-Elementen zu erhöhen und eine realistische aber auch wirtschaftliche Bemessung zu ermöglichen, ist es unabdingbar sich mit der Herleitung von Sicherheitsbeiwerten auf der Widerstandsseite auseinanderzusetzen. Da in diesem Kapitel der Schwerpunkt auf der Bemessung unter kurzfristiger Lasteinwirkung liegt, sei auch den Materialsicherheitsbeiwerten γ_M die Aufmerksamkeit gewidmet. Hinsichtlich des in dieser Arbeit behandelten Silikonklebstoffs OTTOCOLL® S660 spielen die Forschungsergebnisse von Rinnhofer [11] eine entscheidende Rolle, in der erstmals Bemessungsbeiwerte auf Basis des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes abgeleitet wurden. Dies beinhaltet einerseits den Materialsicherheitsbeiwert γ_M und andererseits den Modifikationsbeiwert $k_{mod,lang}$ beziehungsweise den Deformationsbeiwert k_{def} zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens. Eine Zusammenfassung der Forschungsergebnisse findet sich in Abschnitt 4.2.5

Dass der üblicherweise eingesetzte Silikonklebstoff aufgrund seiner hohen Nachgiebigkeit und vergleichsweise geringen Festigkeit die Gebäudeaussteifung mittels HGV-Scheiben auf höchstens zwei Geschosse limitiert, war auch Nicklisch [16] nicht neu. Seine Forschungsarbeit knüpft deshalb an einer anderen Stelle an, und zwar mit der Untersuchung von höherfesten Klebstoffen, die aufgrund ihrer deutlich höheren Steifigkeit beziehungsweise Festigkeit die Tragwirkung von HGV-Scheiben (Tragmechanismus „Schubfeld“ in Abb. 2.2a) verbessern können. Auch hier wurde anhand eines exemplarischen Bauwerks eine Parameterstudie durchgeführt, die zum Ziel hatte, die Verteilung der Horizontallasten auf die HGV-Scheiben in Abhängigkeit der Steifigkeit der Verbundfuge zwischen Holz und Glas zu eruiieren. Er kam zu der Erkenntnis, dass das Gesamtsystem bis zu einem Schubmodul von etwa $10N/mm^2$ am meisten profitiert. Der Lastanteil, der auf die HGV-Scheiben in der Fassade entfällt, nimmt bis zu diesem Grenzwert stetig zu. Darüber hinaus konnte er nur noch marginale Zuwächse feststellen. Aus der tiefgründigen Hauptuntersuchung ging schließlich der nachgiebigere, silanterminierte Zwei-Komponenten Epoxidharzklebstoff nolax C44.8505 als Vorzugsklebstoff mittlerer Steifigkeit hervor. Im direkten Vergleich zum Silikonklebstoff OTTOCOLL® S660, der als Referenzmaterial ebenfalls Teil der Studie war, konnte etwa das Sechsfache der charakteristischen Festigkeit (der nicht gealterten Klebschichten)

festgestellt werden; auch die Verformungen konnten erwartungsgemäß deutlich reduziert werden. Darüber hinaus zeigt sich sogar, dass bei den Versuchen mit kurzer Lasteinwirkungsdauer der Bruch des Fügepartners Holz zum maßgebenden Versagenskriterium wird. Für den deutlichen Gewinn an Tragvermögen und Steifigkeit offenbaren sich in Bezug auf die UV-Beständigkeit, der Empfindlichkeit gegen Änderung von Temperatur beziehungsweise Luftfeuchte und der Kriechneigung jedoch auch Schwachstellen dieses Klebstoffs, die in Kauf genommen werden müssen. Demnach empfiehlt [16] den Klebstoff für jene HGV-Scheiben, die in Kombination mit konventionellen Aussteifungssystemen (Kernen aus Massivholzplatten oder Stahlbeton) eingesetzt werden. Als Abschluss seiner Arbeit hat Nicklisch anhand eines einfachen Berechnungsbeispiels die Tragfähigkeit einer HGV-Scheibe basierend auf der Schubfeldtheorie (Abb. 2.1a) abgeschätzt. Er nahm an, dass an seinem Modellgebäude nur veränderliche Lasten auftreten. Die Vordimensionierung zeigte schließlich, dass eine mit nolax C44.8505 geklebte HGV-Scheibe (mit einer Größe von 2,0 auf 3,0m) mindestens für ein zweigeschossiges Gebäude, bei entsprechender Verdopplung der Klebfugenbreite auch für ein viergeschossiges Gebäude nutzbar wäre.

4.2 Fallstudie für verschiedene HGV-Konstruktionen

Die gesammelten Ergebnisse und Erkenntnisse des Wissensstands der in Abschnitt 4.1 genannten Forschungsarbeiten stellen eine wesentliche Grundlage dieses Kapitels der vorliegenden Arbeit dar. Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Teilgebiete, die in der vorliegenden Arbeit aufgenommen, miteinander verknüpft und in eine Fallstudie eingearbeitet werden sollen:

- Nach derzeitigem Kenntnisstand ist mit dem marktüblichen und in Kapitel 3 vorgestellten Konzept [24] eine Aussteifung mehrgeschossiger Gebäude nicht realisierbar, da es eine zu geringe Steifigkeit gegenüber horizontal in Scheibenebene wirkenden Kräften aufweist. Die von der TU Wien entwickelte HGV-Konstruktion mit Tragmechanismus „Schubfeld und Druckdiagonale“ (Abb. 2.2b) kann eine Übertragung höherer Kräfte gewährleisten. Hier knüpft diese Fallstudie zur Erforschung und Optimierung des Aussteifungspotentials an. Untersucht werden HGV-Konstruktionen mit der L-förmigen Koppelleiste [13] aus Abb. 2.2b.
- In Anlehnung an [18] werden an drei ideellen Gebäuden aus Holz mit Grundrissverhältnissen von 1:1, 1:1,5 beziehungsweise 1:2 sowie einer variierenden Stockwerkszahl von eins bis vier ausschließlich HGV-Scheiben zur Stabilisierung der Tragstruktur der Gebäudemodelle angeordnet. In einem FE-Statikprogramm werden die dreidimensionalen Objekte modelliert um unter realer Windlast gemäß ÖNORM B 1991-1-4 [31] die Belastung und zugehörige Verformung je HGV-Element eruieren zu können.
- Dabei wird unter Anwendung des Berechnungs- und Bemessungskonzepts [12] über das Ersatzfedermodell die Wandsteifigkeit der HGV-Elemente für kurzfristige Lasteinwirkung analysiert. Anschließend wird über die allgemeine Nachweisführung die Grenztragfähigkeit und Gesamtausnutzung ermittelt. In diesem Zusammenhang werden Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise geführt.
- Um eine höhere Wandsteifigkeit zu erreichen, werden einzelne HGV-Elemente horizontal und vertikal kraftschlüssig aneinander gereiht (Kopplung nach [15]) beziehungsweise mit nolax C44.8505 [16] geklebte HGV-Elemente untersucht.
- Zur Erhöhung der Traglast setzt sich diese Arbeit einerseits detailliert mit der „kritischen Beullast“ H_{crit} von Glasscheiben auseinander – der Einfluss der Glasstärke wird

untersucht. Andererseits werden erstmals die in [11] hergeleiteten Sicherheitsbeiwerte des Silikonklebstoffs OTTOCOLL[®] S660 in der Bemessung berücksichtigt. Durch den Einsatz des härtesten Klebstoffs aus der mittleren Steifigkeitsklasse $10 \leq E \leq 100 \text{N/mm}^2$ nolax C44.8505 [16] kann die Traglast ebenfalls weiter gesteigert werden.

Das grundlegende Vorgehen bei der Bearbeitung und die Zielsetzung der Fallstudie sind in Abb. 4.1 dargestellt. Einen wesentlichen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet der Einfluss der Kopplung von HGV-Elementen auf die Wandsteifigkeit. Dabei wird zwischen den drei Kopplungsvarianten „Einzelelement“ sowie „Verband“ und „Fassade“ unterschieden, die Abschnitt 4.2.2 detailliert beschreibt. In diesem Zusammenhang wird auch erläutert, inwiefern das Ersatzfedermodell [12] angepasst werden musste. Hier wird jedoch kurz auf das Grundprinzip der Kopplung eingegangen: Das „Einzelelement“ steht in keinem direkten Kontakt zu anderen HGV-Elementen der Fassadenebene. Die horizontalen Einwirkungen auf ein Gebäude verteilen sich über die Decken, je nach Verhältnis der Wandsteifigkeiten, auf die einzelnen HGV-Elemente und werden schließlich in die Gründung abgetragen. Bei der Anordnung im „Verband“ werden nebeneinanderliegende HGV-Elemente durch direkte Kraftweiterleitung horizontal gekoppelt. Dadurch entstehen geschossweise einzelne HGV-Scheiben, die eine entsprechende Lastweiterleitung zulassen. Die gesamte Wandsteifigkeit wird bereits enorm gesteigert. Die Kopplungsvariante „Fassade“ erweitert den Mechanismus und schließt auch übereinanderliegende HGV-Elemente mit ein, wodurch die Fassadenebene zur Gänze als HGV-Scheibe aktiviert wird und die gesamte Wandsteifigkeit weiter zunimmt.

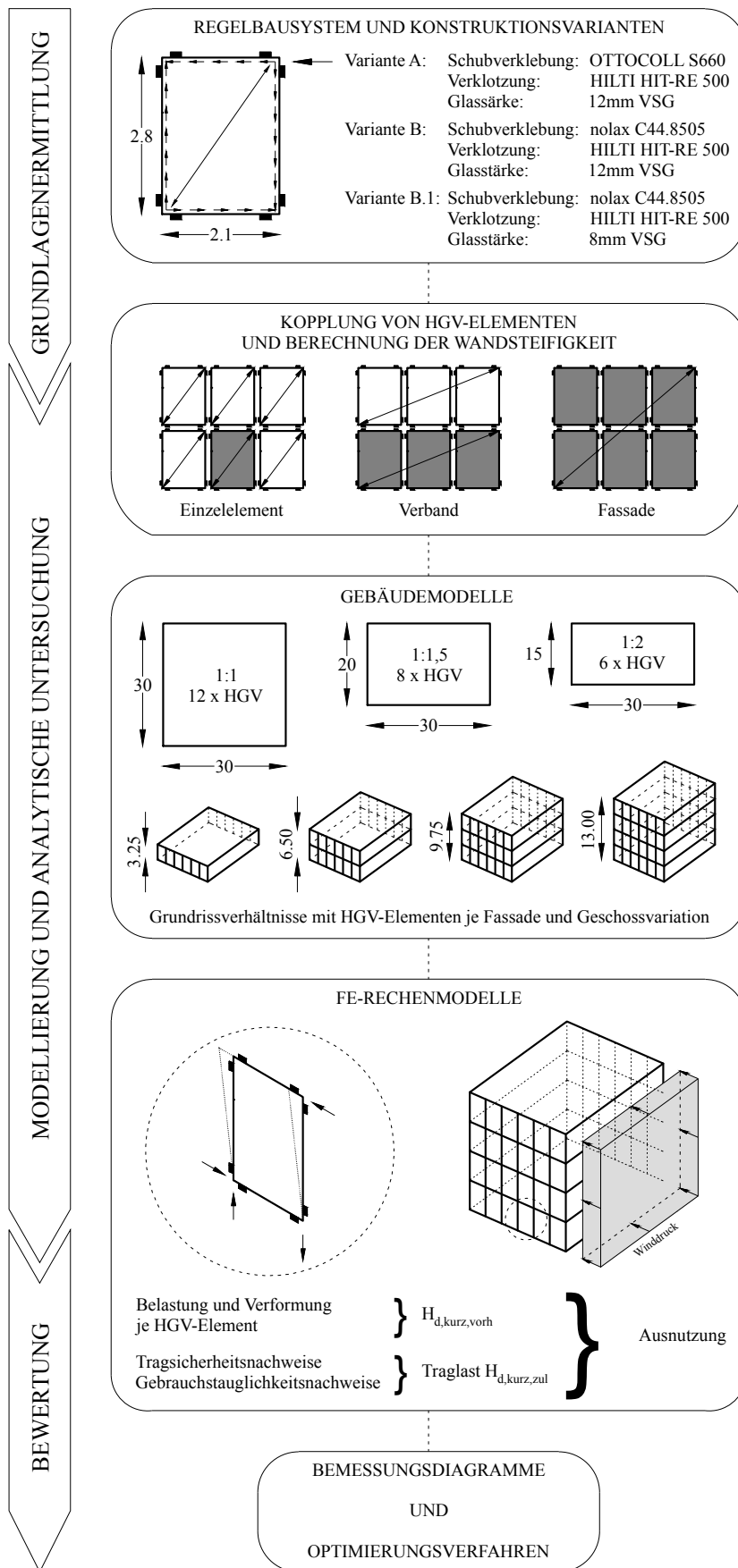


Abb. 4.1: Fallstudie

4.2.1 Regelbausystem, Materialeigenschaften und Konstruktionsvarianten

Als Regelbausystem dient das Konstruktionsprinzip des schubverklebten und verklotzten HGV-Elements aus Abb. 2.3b. Die geometrischen Randbedingungen und Materialeigenschaften werden dabei zum Großteil ident zu [18] gewählt und sind im Anschluss anschaulich zusammengefasst.

- **Glasscheibe:** VSG aus Floatglas und PVB-Folie
 - Glasbreite $B_G = 2100mm$
 - Glashöhe $H_G = 2800mm$
 - Glasstärke $t_G = \text{Variantenstudie}$
 - Elastizitätsmodul $E_G = 70000N/mm^2$
 - Schubmodul $G_G = 28000N/mm^2$
 - Dichte $\rho_G = 2500kg/m^3$
 - Poissonsche Zahl $\nu_G = 0,23$
 - PVB-Foliendicke $t_{PVB} = 0,76mm$
 - Schubmodul $G_{PVB} = 0,40N/mm^2$
- **Koppelleiste:** BFU
 - Koppelleistenbreite gesamt $b_{KL,ges} = 60mm$
 - Koppelleistendicke gesamt $d_{KL,ges} = 40mm$
 - Koppelleistenbreite $b_{KL} = 36mm$
 - Koppelleistendicke $d_{KL} = 20mm$
 - Elastizitätsmodul $E_{KL} = 9333N/mm^2$
 - Schubmodul $G_{KL} = 185N/mm^2$
 - Dichte $\rho_{KL} = 680kg/m^3$
 - Druckfestigkeit parallel zur Faser (für eine Nenndicke von $b_{C,H} = 11mm$)
 $f_{c,||,11} = 27,70N/mm^2$
 - $k_{k,elast.} = 0,50$
 - Modifikationsbeiwert $k_{mod,kurz} = 0,9$
 - Material Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,BFSH} = 1,2$
- **Rahmenkonstruktion:** BauBuche GL70
 - Rahmenbreite $b_R = 60mm$
 - Rahmendicke $d_R = 160mm$
 - Elastizitätsmodul $G_R = 16700N/mm^2$
 - Schubmodul $G_R = 850N/mm^2$
 - Dichte $\rho_R = 680kg/m^3$
- **Rahmengelenk:** Stabdübel
 - Stabdübeldurchmesser $d_S = 6mm$
 - Anzahl der Stabdübel im Rahmengelenk $n_{VM,RG} = 1$

- **Verbindungsmittel:** Holzschrauben
 - Schraubendurchmesser $d_{VM} = 5mm$
 - Anzahl der Holzschrauben im Klotzbereich $n_{VM} = 12$
 - Abstand der Holzschrauben $e_{VM} = 60mm$
- **Schubverklebung:** *Variantenstudie*
 - Verklebungsbreite $b_\tau = 14mm$
 - Verklebungsdicke $d_\tau = 3mm$
 - Schubfestigkeit $\tau_{k,\perp} = \textit{Variantenstudie}$
 - Schubmodul $G_\tau = \textit{Variantenstudie}$
- **Verklotzung:** HILTI HIT-RE 500 aus [12]
 - Klotzlänge $l_C = 200mm$
 - Klotzdicke $d_C = 6mm$
 - Klotzbreite glasseitig $b_{C,G} = 8mm$
 - Klotzbreite holzseitig $b_{C,H} = 11mm$
 - Abstand Klotzmitte zur Glaskante $e_C = 250mm$
 - Druckfestigkeit $\sigma_{c,k} = 86N/mm^2$
 - Elastizitätsmodul $E_c = 5700N/mm^2$

Durch die Variation der Klebstoffe und Glasstärke am Regelbausystem ergeben sich die drei Konstruktionsvarianten in Abb. 4.1, die in der Fallstudie hinsichtlich Steifigkeit und Tragvermögen genau untersucht werden. Das HGV-Element der Konstruktionsvariante A ist mit dem gängigen Silikonklebstoff OTTOCOLL® S660 als Schubverklebung und dem bisher üblicherweise eingesetzten Injektionsmörtel HILTI HIT-RE 500 als Verklotzungsmaterial aufgebaut. Sie dient als Referenzsystem zu [18]. In Konstruktionsvariante B wird durch den Einsatz eines alternativen und wesentlich steiferen Klebsystems überprüft, wie sich die Wandsteifigkeit entsprechend steuern lässt. Als Schubverklebung dient der silanterminierte Zwei-Komponenten Epoxid nolax C44.8508. Als Verklotzung wird ebenfalls HILTI HIT-RE 500 verwendet. Um den Einfluss der Glasstärke auf das Beulverhalten beziehungsweise die Traglast darzustellen, wird diese von 12mm VSG (2x6mm) bei der Konstruktionsvariante A und auf 8mm VSG (2x4mm) bei Konstruktionsvariante B.1 reduziert – der Aufbau und die Materialeigenschaften sind grundsätzlich ident zu Konstruktionsvariante B. Es sei angemerkt, dass sehr steife Klebstoffe bei reiner Schubverklebung grundsätzlich auch eine Wirkung als Verklotzungsmaterial aufweisen. Dadurch stellt sich bereits der Tragmechanismus „Schubfeld und Druckdiagonale“ nach Abb. 2.2b ein, weshalb an den Eckbereichen der Glasscheibe keine zusätzlichen Klötze angebracht werden müssten. Für die Konstruktionsvariante B und B.1 wurde dennoch das übliche Verklotzungsmaterial eingesetzt. Und zwar aus dem Grund, da für die Berechnung der Wandsteifigkeit K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung in Abschnitt 4.2.2 die Druckfestigkeit $\sigma_{c,k}$ und der zugehörige Elastizitätsmodul E_c aus Druckversuchen erforderlich ist. Für nolax C44.8508 und ähnliche Klebstoffe brachte eine Literaturrecherche diesbezüglich jedoch kein Ergebnis. Experimentelle Untersuchungen zu diesen Materialkennwerten wären daher von großem Interesse und sollten in zukünftigen Forschungsarbeiten thematisiert werden.

Die Festigkeitswerte (5-Prozent-Quantile) und Moduli der verwendeten Klebstoffe beziehen sich auf die jeweiligen Forschungsarbeiten, deren Ergebnisse von Scher- und Schubversuchen an Klein- und Großprüfkörpern nachfolgend zusammengefasst sind. Dabei wird der kurzfristige

Modifikationsbeiwert zur Abminderung der Klebstofffestigkeit je nach Lasteinwirkungsdauer in Anlehnung an [8, 12] mit $k_{mod, kurz} = 0,9$ für alle Klebstoffe gewählt. Ihre Datenblätter sind Anhang A beigelegt.

- **OTTOCOLL[®] S660 aus [23]:**
 - Schubfestigkeit $\tau_{k,\perp} = 0,60N/mm^2$
 - Schubmodul $G_\tau = 0,37N/mm^2$
- **nolax C44.8508 aus [16]:**
 - Schubfestigkeit¹ $\tau_{k,\perp} = 2,12N/mm^2$
 - Schubmodul $G_\tau = 33,50N/mm^2$

Mit den Überlegungen dieses Abschnitts wurden die drei unterschiedlichen Konstruktionsvarianten in Tab. 4.1 festgelegt, die auch Abb. 4.1 zeigt:

Tab. 4.1: Konstruktionsvarianten mit Unterscheidungsmerkmalen

Konstruktionsvariante	A	B	B.1
Schubverklebung	OTTOCOLL [®] S660	nolax C44.8508	nolax C44.8508
Verklotzung	HILTI HIT-RE 500	HILTI HIT-RE 500	HILTI HIT-RE 500
Glasstärke	12mm VSG	12mm VSG	8mm VSG

4.2.2 Kopplung von HGV-Elementen und Berechnung der Wandsteifigkeit

Um auch die Grenzwerte der Verformung bei drei- und viergeschossigen Gebäuden einhalten zu können, legte [18] nahe, eine Kopplung von HGV-Elementen anzustreben. In Anlehnung an [15] wird deshalb auch hier untersucht, wie sich die Systemsteifigkeiten und somit die „aufnehmbaren Horizontalkräfte“ bei unterschiedlicher Anordnung der HGV-Elemente verändern. In dieser Arbeit werden drei Kopplungsvarianten untersucht, deren Grundprinzip bereits mit Abb. 4.1 kurz vorgestellt wurde:

- **Einzelement**
- **Verband (Kopplung horizontal)**
- **Fassade (Kopplung horizontal und vertikal)**

Das reale Tragverhalten von HGV-Elementen wird durch die in [12] beschriebene analytische Methode nachempfunden. Diesbezüglich kommt das Ersatzfedermodell aus Abb. 2.4 zum Einsatz. Mit diesem Modell können die Systemsteifigkeit der Schubverklebung längs und quer K_τ beziehungsweise die Systemsteifigkeit der Horizontal- und Vertikalverklotzungen K_C bestimmt werden – also jene Beiträge, die die einzelnen Bauteilkomponenten zur Gesamtsteifigkeit des HGV-Elements beisteuern. Die detaillierten Berechnungen, die diesem Abschnitt zu Grunde

¹In den Versuchen von Nicklisch [16] wirkte sich die Prüfkörpergröße deutlich auf die einzelnen Festigkeitskennwerte aus. Spannungsspitzen an den Klebschichträndern, die den Bruch auslösten, wurden als Indiz für die Streuung gewertet. Nicklisch kam zu dem Entschluss, dass die Kleinproben das Tragvermögen auf unzulässige Weise unterschätzen, weshalb die Ergebnisse des großen Scherprüfkörpers aus [16] in dieser Fallstudie eingearbeitet werden.

liegen, sind in den Forschungsarbeiten [12, 15] angeführt. In dieser Arbeit wird das Aussteifungspotential der HGV-Scheiben infolge kurzfristiger Windlast untersucht, weshalb ausschließlich die resultierenden Wandsteifigkeiten K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung berechnet werden. Das zeitabhängige Materialverhalten der Bauteilkomponenten mittels Deformationsbeiwerten k_{def} bei langfristiger Lasteinwirkung bleibt unberücksichtigt.

Um Missverständnisse mit den Begriffen der „aufnehmbaren Horizontalkraft“ H und der „maximal zulässigen Horizontalkraft“ H_{zul} zu vermeiden, wird als Exkurs an dieser Stelle dennoch das Grundprinzip des Ersatzfedermodells kurz anschaulich erklärt. Dabei wird die „aufnehmbare Horizontalkraft“ in Abhängigkeit der Summe der Systemsteifigkeiten beschrieben zu: $H = u_k * K_{kurz} = u_k * (K_{Schub} + K_{Diagonale})$. Mit K_{Schub} beziehungsweise K_{τ} als Systemsteifigkeit des Tragmechanismus Schubfeld und $K_{Diagonale}$ beziehungsweise K_C als Systemsteifigkeit des Tragmechanismus Druckdiagonale. Über die Kopfverschiebung beziehungsweise Horizontalverformung u_k kann somit jene Horizontalkraft H ermittelt werden, die dieses HGV-Element mit ihrer resultierenden Steifigkeit bei einer auftretenden Verformung aufnehmen kann. Daraus können ebenso einzelne Lastanteile und die Beanspruchungen der Bauteile Verklebung, Verklotzung, Koppelleiste und Glasscheibe analytisch abgeschätzt werden. Erst über die Tragsicherheitsnachweise unter Anwendung des Berechnungs- und Bemessungskonzepts [12] und der Berücksichtigung der zulässigen Materialfestigkeiten wird festgestellt, welche Horizontalkraft maximal zulässig ist damit kein Materialversagen auftritt. Die Traglast (respektive Bruchlast) wird in Abschnitt 4.3.1 ermittelt und soll in weiterer Folge mit $H_{d,kurz,zul}$ bezeichnet werden. Dass die „aufnehmbare Horizontalkraft“ H weit über der Grenztragfähigkeit $H_{d,kurz,zul}$ liegen wird, geht aus Abschnitt 4.3.1 ebenfalls eindeutig hervor. Aus diesem Grund wird auch eine Unterscheidung dieser beiden Begrifflichkeiten dringend empfohlen.

Tab. 4.2: Nachgiebigkeit der Federn von Bauteilkomponenten

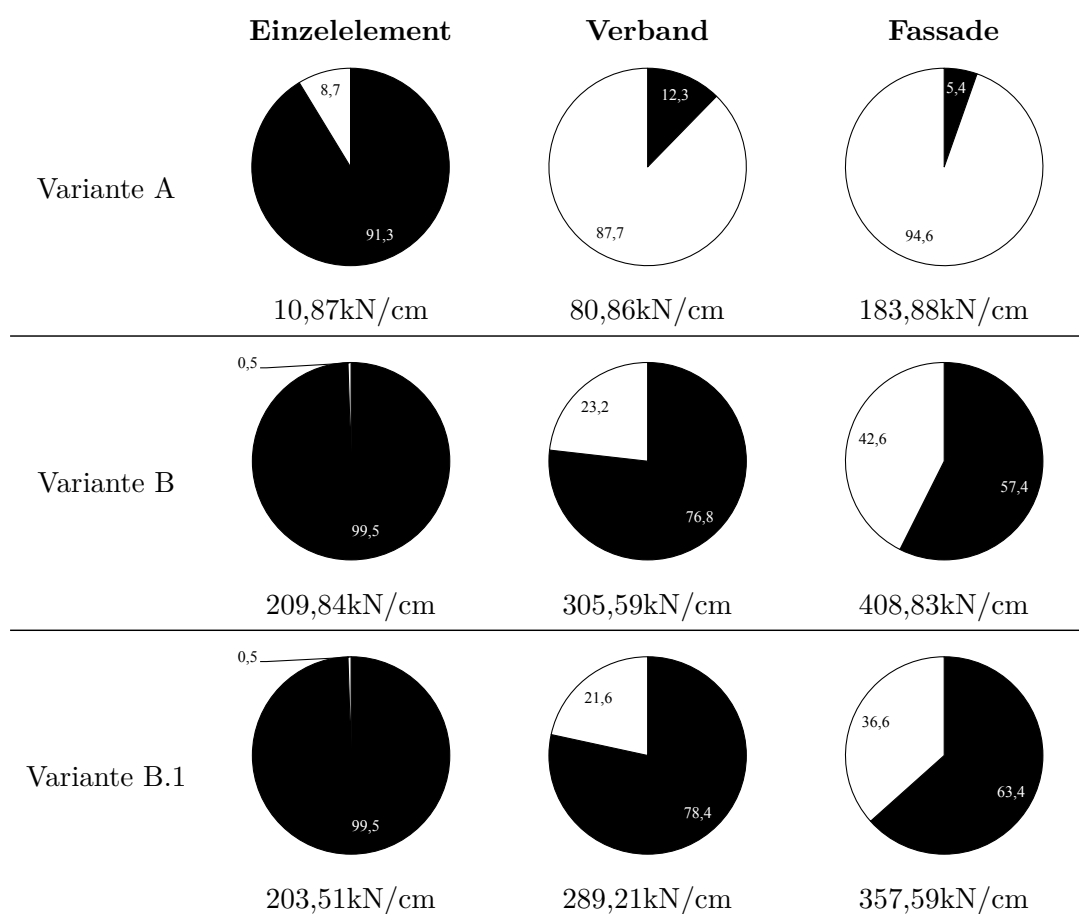
		Einzelelement	Verband	Fassade
Federmodell Schubfeld- theorie	Gleitung der Schubverklebung längs	$C_{\tau,l}$	$C_{\tau,l}$	$C_{\tau,l}$
	Gleitung der Koppelleiste längs	$C_{KL,l}$	$C_{KL,l}$	$C_{KL,l}$
	Verzerrung der Glasscheibe	$C_{G,\gamma}$	$C_{G,\gamma}$	$C_{G,\gamma}$
	Verformung der Verbindungsmittel längs	$C_{VM,l}$	$C_{VM,l}$	$C_{VM,l}$
	Gleitung der Rahmenkonstruktion längs	$C_{R,l}$	∞	∞
Federmodell Druckdiagonale	Gleitung der Schubverklebung quer	$C_{\tau,q}$	$C_{\tau,q}$	$C_{\tau,q}$
	Stauchung der Koppelleiste	$C_{KL,\epsilon}$	$C_{KL,\epsilon}$	$C_{KL,\epsilon}$
	Riegelbiegung	$C_{R,B-Riegel}$	∞	∞
	Pfostenbiegung	$C_{R,B-Pfosten}$	∞	∞
	Stauchung des Klotzmaterials	C_C	C_C	C_C
	Gleitung der Koppelleiste quer	$C_{KL,q}$	∞	∞
	Verformung der Verbindungsmittel quer	$C_{VM,q}$	∞	∞
	Stauchung der Glasscheibe	$C_{G,\epsilon}$	$C_{G,\epsilon}$	$C_{G,\epsilon}$
	Gleitung der Rahmenkonstruktion quer	$C_{R,q}$	∞	∞
	Pfostendehnung	$C_{R,\epsilon}$	$C_{R,\epsilon}$	∞
Verformung des Rahmengelenks	C_{RG}	∞	∞	

Werden HGV-Elemente untereinander gekoppelt, ist das Ersatzfedermodell [12] an die verschiedenen Bausysteme entsprechend anzupassen. Je nachdem wie die HGV-Elemente am Gesamtsystem angeordnet werden, können gewisse Bauteilkomponenten keine Verformungen ausbilden. Aus diesem Grund darf für entsprechende Federn näherungsweise auch keine Nachgiebigkeit

($C = \infty$) angesetzt, wodurch es zu einer Steifigkeitsänderung des Systems und zu einer Änderung des Kraftflusses kommt. In Tab. 4.2 ist dargestellt, welche Federn je nach Kopplungsvariante betroffen sind beziehungsweise entfallen.

Das „Einzelement“ bildet den Tragmechanismus „Schubfeld und Druckdiagonale“ vollständig ab. Welche Annahmen aufgrund der Anordnung der HGV-Elemente im „Verband“ (Kopplung horizontal) getroffen wurden, beschreibt Weissensteiner [15] sehr ausführlich. Zusammengefasst liegt dieser Kopplungsvariante zugrunde, dass die Verformung der Unterkonstruktion durch durchlaufende Pfosten und Riegel unterbunden wird. Auch eine Verformung der Koppelleisten kann sich nicht mehr ausbilden, indem bei nebeneinanderliegenden HGV-Elementen die Druckkräfte von dem einen direkt in das nächste HGV-Element weitergeleitet werden. Damit die Kraftweiterleitung erfolgen kann, sind im Bereich der Verklotzungen zwischen den Koppelleisten nebeneinanderliegender HGV-Elemente Metallteile einzulegen. Für ein in der „Fassade“ liegendes Element kann als Ergänzung zur horizontalen Kopplung auch eine stockwerksübergreifende kraftschlüssige Verbindung zur weiteren Erhöhung der Wandsteifigkeit beitragen. Für diesen konkreten Fall kann sich zusätzlich zu den bei der Verbandswirkung entfallenden Federn auch keine Pfostendehnung mehr ausbilden. Die berechnete Wandsteifigkeit eines gekoppelten HGV-Elements gilt lediglich für ein mittleres HGV-Element – also jenes, das links sowie rechts („Verband“) respektive oben sowie unten („Fassade“) von anderen HGV-Elementen begrenzt wird – und nicht wie vielleicht angenommen werden könnte, für drei nebeneinander liegende HGV-Elemente.

Tab. 4.3: Wandsteifigkeit K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung in [kN/cm] sowie Steifigkeitsanteil der Schubverklebung (schwarz) und Verklotzung (weiß) in [%]



Die detaillierten Berechnungen der Steifigkeitsanteile K_τ beziehungsweise K_C und der resultierenden Wandsteifigkeiten K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung sind Anhang B.3 zu entnehmen. Die wesentlichen Ergebnisse werden in Tab. 4.3 in Abhängigkeit der Konstruktions- und Kopplungsvariante anschaulich gegenübergestellt. Schwarz ist der prozentuale Steifigkeitsanteil der Schubverklebung, weiß der prozentuale Steifigkeitsanteil der Verklotzung.

Im direkten Vergleich der Konstruktionsvariante A ($K_{kurz} = 10,87kN/cm$) zum Referenzsystem [18] ($K_{kurz} = 11,22kN/cm$) stimmen die ermittelten Wandsteifigkeiten der nicht gekoppelten „Einzelelemente“ gut überein und sind plausibel. Die Abweichung erklärt sich dadurch, dass in [18] sowohl der Verformungsmodul der Verbindungsmittel $K_{ser,VM}$ als auch der Verformungsmodul des Rahmengelenks $K_{ser,RG}$ stets für eine Unterkonstruktion aus GL 24h berechnet wurden, obwohl die Wandsteifigkeit für eine Unterkonstruktion aus BauBuche GL70 untersucht werden sollte. Auch andere Unstimmigkeiten in der Berechnung konnten festgestellt werden, weshalb die Wandsteifigkeit mit der weicheren Unterkonstruktion aus GL 24h schließlich $10,53kN/cm$ statt $11,22kN/cm$ beträgt. Und wie erwartet, unter $10,87kN/cm$ mit der steiferen Unterkonstruktion aus BauBuche GL70 liegen muss. Ein stärkerer Einfluss dieser Unstimmigkeiten zeigt sich in der Gegenüberstellung erst bei der Kopplung von HGV-Elementen. Da im Gegensatz zur Parameterstudie [18] der vorliegenden Fallstudie auch die Annahme von Weissensteiner [15] zugrunde liegt, wonach bei der direkten Kraftweiterleitung zwischen nebeneinanderliegenden HGV-Elementen (Metallklötze) auch die Verformung der Verbindungsmittel quer zur Schraubenachse unterbunden wird, konnte eine enorme Steifigkeitserhöhung festgestellt werden. Wird also von dem vorgestellten Prinzip der Kopplung Gebrauch gemacht, so errechnet sich für die Konstruktionsvariante A eine siebenfache Steifigkeitserhöhung für den horizontalen „Verband“ sowie eine 17-fache Erhöhung für „Fassade“.

Konstruktionsvariante B in Tab. 4.3 ist auch eindeutig die von Nicklisch [16] erwartete Verbesserung der Tragfähigkeit durch steifere Klebstoffe zu entnehmen. Die etwa 19-fache Steifigkeitserhöhung bei den „Einzelelementen“ von $10,87kN/cm$ auf $209,84kN/cm$ ist dabei lediglich auf den wesentlich höheren Schubmodul des silanterminierten Zwei-Komponenten Epoxid nolax C44.8508 zurückzuführen, da selbst das Verklotzungsmaterial und sämtliche geometrische Randbedingungen unverändert geblieben sind. Wie Weissensteiner [15] erkannte, zeigt sich auch hier bei Konstruktionsvariante A, dass der Anteil, der beim „Einzelelement“ der Schubverklebung zugeteilt wurde, beim „Verband“ in etwa der Verklotzung entspricht ($91,3\% \approx 87,7\%$). Bei Konstruktionsvariante B hingegen übernimmt die Schubverklebung beinahe die Gänze am Lastabtrag und ist sogar so steif, dass diese sogar noch bei der Fassadenkopplung überwiegt. Besonders ins Auge sticht auch, dass aufgrund des überwiegenden Lastanteils der Schubverklebung die Kopplung weniger Auswirkung auf die Wandsteifigkeit hat. Zwischen dem „Einzelelement“ und dem „Verband“ liegt der Faktor bei 1,9. Die „Fassade“ ist um den Faktor 1,5 steifer als das „Einzelelement“. Die Beobachtungen der Konstruktionsvariante B treffen auch auf Konstruktionsvariante B.1 zu, sogar die prozentualen Steifigkeitsanteile unterscheiden sich nur marginal. Die Gegenüberstellung der beiden Konstruktionsvarianten zeigt außerdem, dass eine Änderung der Glasstärke von 12mm auf 8mm kaum eine Auswirkung auf die Wandsteifigkeit (mit oder ohne Kopplung) hat. Zum Einen kommt das daher, weil im Ersatzfedermodell die Glasstärke nur als Multiplikator in der Verzerrung der Glasscheibe $C_{G,\gamma}$ und in der Stauchung der Glasscheibe $C_{G,\epsilon}$ eingeht. Und zum Anderen ist die Glasstärke sehr klein im Vergleich zu den Scheibenabmessungen, weshalb die Nachgiebigkeit dieser beiden Federn kaum variiert.

Das Tragverhalten dieser Konstruktions- und Kopplungsvarianten wird am Beispiel von Gebäudemodellen analysiert, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

4.2.3 Gebäudemodelle und Belastung

In dieser Fallstudie werden verschiedene Ausführungsvarianten von Gebäudemodellen durchgespielt, die aufzeigen sollen, welches Aussteifungspotential von HGV-Scheiben in relativ weichen Hochbauten aus Holz erwartet werden kann. Und zwar verzichtet hier die Gebäudestruktur auf eine Stabilisierung durch konventionelle Aussteifungsmethoden; diese hat die Glasfassade in weiterer Folge vollständig zu übernehmen. Die vertikale Lastabtragung war nicht Teil dieser Fallstudie und wurde somit auch nicht nachgewiesen. Es ergibt sich daraus jedoch auch kaum ein Einfluss auf die horizontale Beanspruchung. Zur Ableitung des Eigengewichts der Decken wurden planerisch ausschließlich unbedingt notwendige Stützen angeordnet.

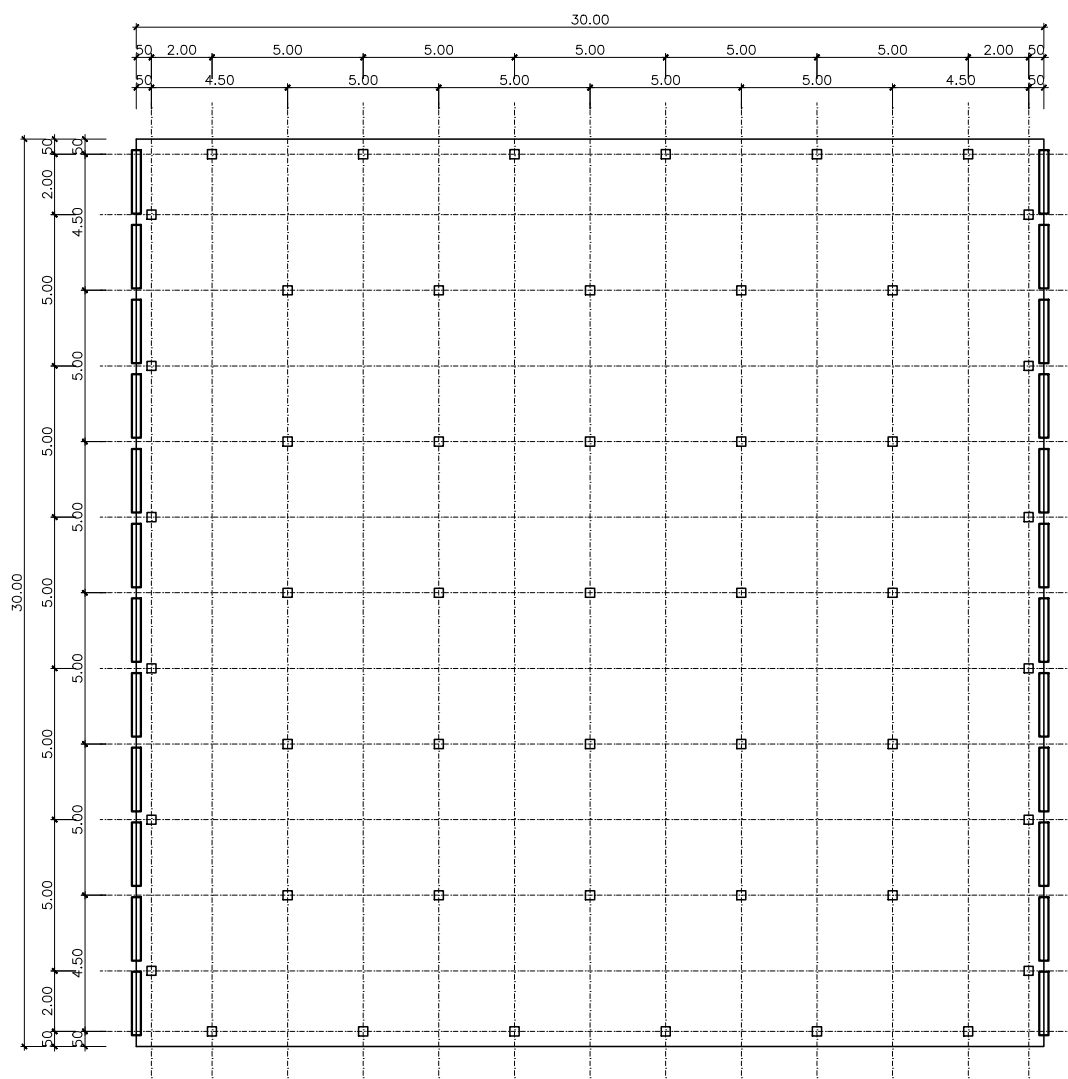


Abb. 4.2: Regelgeschoss – Holzskelettbau 1:1, Maße in [m]

Zum Einen wird die Geschoszahl variiert, welche hier von eins bis vier gewählt wurde. Mit einer Geschosshöhe von 3,25m ergibt das bei dem mehrgeschossigen Holzskelettbau eine Gebäudehöhe von bis zu 13m. Zum Anderen werden drei Grundrisse mit unterschiedlichen Gebäudelänge/Gebäudebreite-Verhältnissen (Grundrissverhältnissen) betrachtet: 1:1, 1:1,5 sowie 1:2 – die Maximallänge beträgt 30m, die kürzeste Seite weist 15m auf. Die Regelgeschosse stellen

Abb. 4.2 sowie Abb. 4.3 und Abb. 4.4 dar. An den rechten beziehungsweise linken Gebäudeseiten sind jeweils die symmetrisch angeordneten HGV-Elemente zu erkennen – ihre Anzahl in der Fassadenfläche bleibt stets konstant und variiert somit nicht: 12 HGV-Elemente je Gebäudeseite beim Grundrissverhältnis 1:1, 8 HGV-Elemente je Gebäudeseite beim Grundrissverhältnis 1:1,5 und 6 HGV-Elemente je Gebäudeseite beim Grundrissverhältnis 1:2. Nicklisch [16] empfiehlt diese gleichmäßige Anordnung im Grundriss, um eine weitestgehend einheitliche Beanspruchung der HGV-Elemente zu erzielen. Für den untersuchten Belastungsfall einer frontalen Windanströmung auf das Gebäude, stellt die Anordnung an den kürzeren Gebäudeseiten für die Lastverteilung den ungünstigsten Fall dar. Mit abnehmender Gebäudelänge stehen zudem weniger HGV-Elemente für die Gebäudeaussteifung zur Verfügung. An den beiden restlichen Gebäudeseiten werden keine HGV-Scheiben angeordnet. Als Ergänzung sei jedoch auf [16] verwiesen, der sich mit der Auswirkung unterschiedlicher Anordnungen auseinandersetzte, die Lastumlagerung bei Ausfall von Elementen behandelte und die Verteilung der Horizontalkräfte auf aussteifende Tragwerksteile bestimmte.

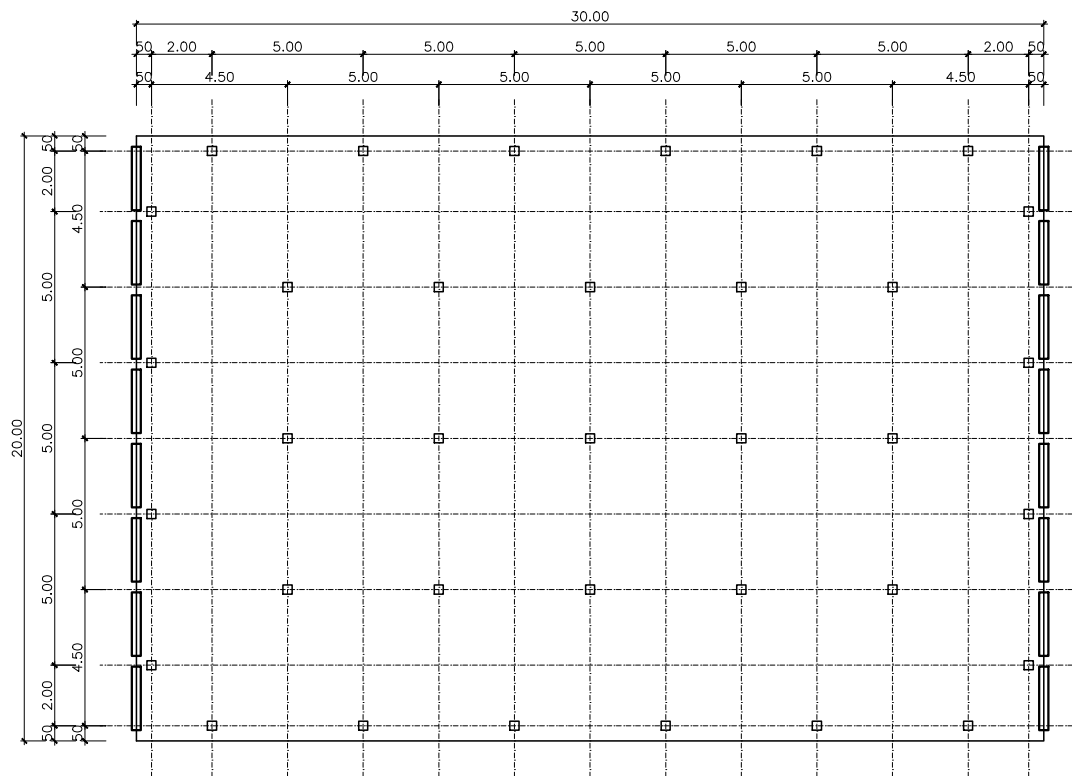


Abb. 4.3: Regelgeschoss – Holzskelettbau 1:1,5, Maße in [m]

Der angesprochene Belastungsfall zufolge kurzfristiger Windbeanspruchung soll ausschließlich eine reine Scheibenbelastung in den HGV-Elementen hervorrufen, weshalb eine frontale Windanströmung der Gebäudemodelle vorausgesetzt wird. Eine Plattenbelastung durch seitliche (orthogonale) oder schräge Windanströmung und daraus abzuleitende notwendige Nachweise bei kombinierter Beanspruchung bleiben aufgrund der komplexen Zusammenhänge in Abschnitt 4.2.5 vorerst unberücksichtigt. Eine Bodenbeschleunigung für den Lastfall Erdbeben wird ebenfalls nicht angesetzt. Diese Punkte könnten im Zuge eines weiteren Forschungsvorhabens jedoch eine Vertiefung darstellen. Zusammengefasst werden also alle Gebäudemodelle unter Kurzzeitbeanspruchung zufolge Wind analysiert. Als Gebäudestandort wird der 22. Wie-

ner Gemeindebezirk gewählt, wo für das vierstöckige Gebäude mit Grundrissverhältnis 1:2 die höchsten Windkräfte auftreten. Aus dem Ortsverzeichnis der ÖNORM B 1991-1-4 [31] wird für den Standort die Basisgeschwindigkeit $v_{b,0} = 27,0\text{m/s}$ und der Basisgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0} = 0,46\text{kN/m}^2$ abgelesen. Aufgrund der vorstädtischen Bebauung ist der Geländefaktor $c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_{b,0}} = 1,75 * (\frac{z}{10})^{0,29}$ für Geländekategorie III heranzuziehen. Daraus lässt sich der Böengeschwindigkeitsdruck $q_p(z)$ ableiten. Für diese Fallstudie wird $q_p(z) = 1,07\text{kN/m}^2$ jedoch in Anlehnung an die Parameterstudie [18] gewählt, wo ebenfalls dieses Gebäudemodell untersucht wurde. Die maßgebenden aerodynamischen Beiwerte auf der Luvseite sind für das Gebäude mit rechteckigem Grundriss gemäß [31] $c_{p,e,10} = 0,8$ für den Außendruck und $c_{p,i} = 0,30$ für den Innendruck. Somit kann der resultierende Winddruck auf die 30m lange Außenwand berechnet werden zu $w_k = w_e + w_i = (c_{p,e,10} + c_{p,i}) * q_p(z) = (0,8 + 0,3) * 1,07 = 1,18\text{kN/m}^2$. [31] legt fest, dass für einen Baukörper mit $h \approx b$ dieser Winddruck konstant über die gesamte Gebäudehöhe anzusetzen ist, weshalb schließlich die Designlast $w_d = w_k * 1,5 = 1,18 * 1,5 = 1,77\text{kN/m}^2$ als Winddruck auf die vertikale Fassadenebene der 30m langen Gebäudeseite angesetzt wird. Windsog an den übrigen Gebäudeseiten bleibt aufgrund der beschriebenen Komplexität unberücksichtigt. Um die Lastverteilung auf das Aussteifungssystem abschätzen zu können, wurde eine Modellierung der entsprechenden Tragstrukturen mittels FE-Statikprogramm durchgeführt, worauf der folgende Abschnitt detailliert eingeht.

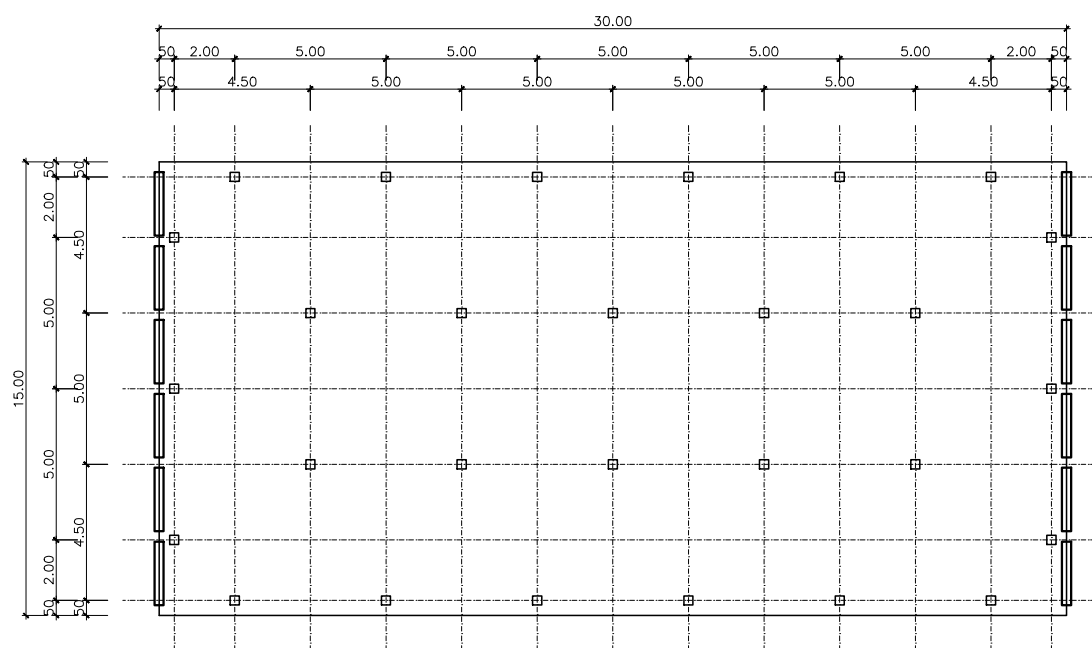


Abb. 4.4: Regelgeschoss – Holzskelettbau 1:2, Maße in [m]

4.2.4 FE-Rechenmodelle

Die Studie zur Abschätzung der Lastverteilung der Winddruckkraft auf die aussteifenden HGV-Scheiben erfolgt mittels FE-Statikprogramm RFEM der Firma Dlubal Software GmbH, wobei im Zuge der Modellierung die folgenden Parameter untereinander variieren:

- Drei Konstruktionsvarianten nach Abschnitt 4.2.1
- Drei Kopplungsvarianten nach Abschnitt 4.2.2
- 12 Gebäudemodelle (drei Grundrissverhältnisse mit variabler Geschosszahl von eins bis vier) nach Abschnitt 4.2.3

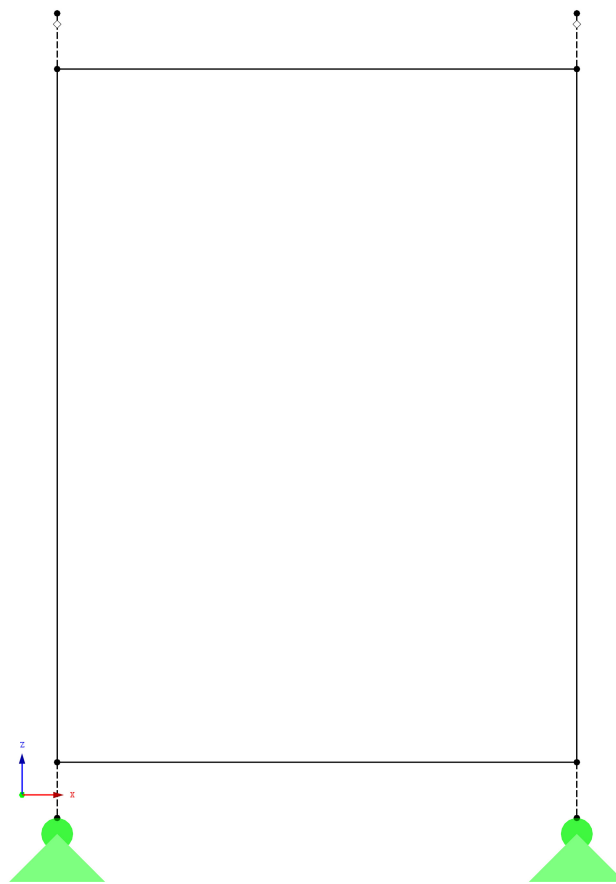


Abb. 4.5: Grundprinzip des Ersatzrahmens eines HGV-Elements

Um die HGV-Elemente berechnungstechnisch erfassen zu können, wurden insgesamt neun Ersatzrahmen mit 2,10m Breite und 2,80m Höhe kalibriert und ihr Last- und Verformungsverhalten anschließend überprüft. Abb. 4.5 zeigt das Grundprinzip eines solchen. Die Stabendgelenke der Rahmenecken stellen biegesteife Verbindungen dar. An den Auflagern sind sie durch Starrstäbe mit dem Rahmen verbunden und dabei um die y-Achse drehbar gelagert um Verformungen zuzulassen. Damit keine Belastung der Decke erfolgt, wurde der Rahmen an der Oberseite – ebenfalls mittels Starrstäbe – vertikal entkoppelt. Sämtliche Stäbe wurden gewichtslos ausgeführt. Für die Kalibrierung sind die berechneten Wandsteifigkeiten der untersuchten Konstruktionsvarianten aus Tab. 4.3 heranzuziehen. Beispielsweise besitzt das „Einzelement“ der Konstruktionsvariante A

eine Wandsteifigkeit von $K_{kurz} = 10,87 \text{ kN/cm}$. Damit der kalibrierte Ersatzrahmen in Abb. 4.6 bei einer Horizontalbelastung von $H_d = 10,87 \text{ kN}$ eine Verformung von 1 cm aufweist, sind diesbezüglich die Biegesteifigkeit EI , Dehnsteifigkeit EA und Schubsteifigkeit GA der Rahmenstäbe entsprechend anzupassen. Die Eichung der gekoppelten HGV-Elemente sowie die Eichung der Ersatzrahmen der beiden anderen Konstruktionsvarianten erfolgt ebenso nach Tab. 4.3 und auf gleiche Weise. In Abb. 4.7 sind beispielhaft die Ersatzrahmen der Konstruktionsvariante A bei Kopplung dargestellt. Diesen Abbildungen ist auch das Kräftegleichgewicht auf einen Blick zu entnehmen.

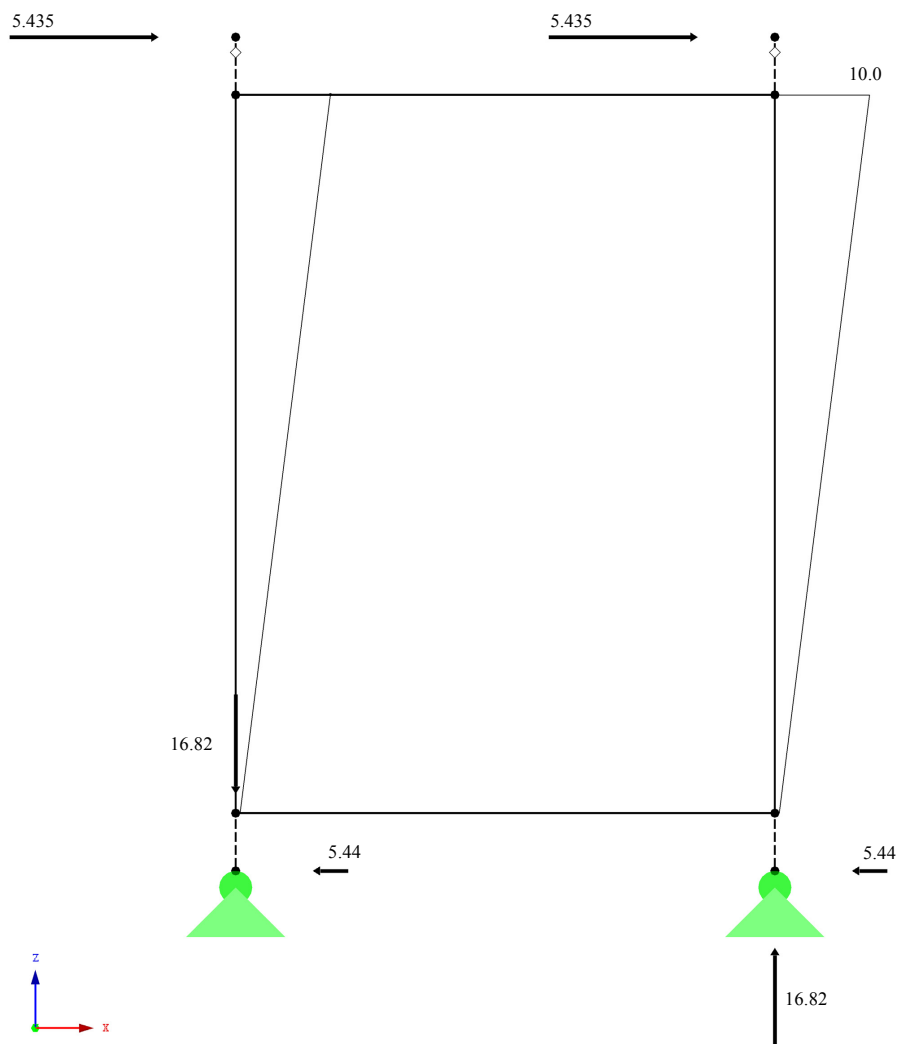


Abb. 4.6: Ersatzrahmen der Konstruktionsvariante A als „Einzelelement“ samt Belastung in [kN] und Verformung in [mm]

In einem weiteren Schritt wurde der Ersatzrahmen aus Abb. 4.5 mehrmals nebeneinander und übereinander angeordnet, wodurch mit Hilfe der Regelgeschosse aus Abb. 4.2 sowie Abb. 4.3 und Abb. 4.4 allmählich dreidimensionale Gebäudemodelle im FE-Statikprogramm entstanden. Für die Stützen wurde das Material Brettschichtholz GL24h gewählt. Durch die Anpassung ihrer Stabendgelenke zu Pendelstützen konnte eine vertikale Lastabtragung des Deckeneigengewichts sichergestellt sowie die Übertragung horizontaler Kräfte unterbunden werden. So wird ermöglicht, dass ausschließlich die HGV-Scheiben die Gebäudeaussteifung zu übernehmen haben. Die Decken

wurden als starre Scheiben modelliert, an denen die HGV-Elemente mit der beschriebenen vertikalen, starren Entkopplung aufgehängt sind.

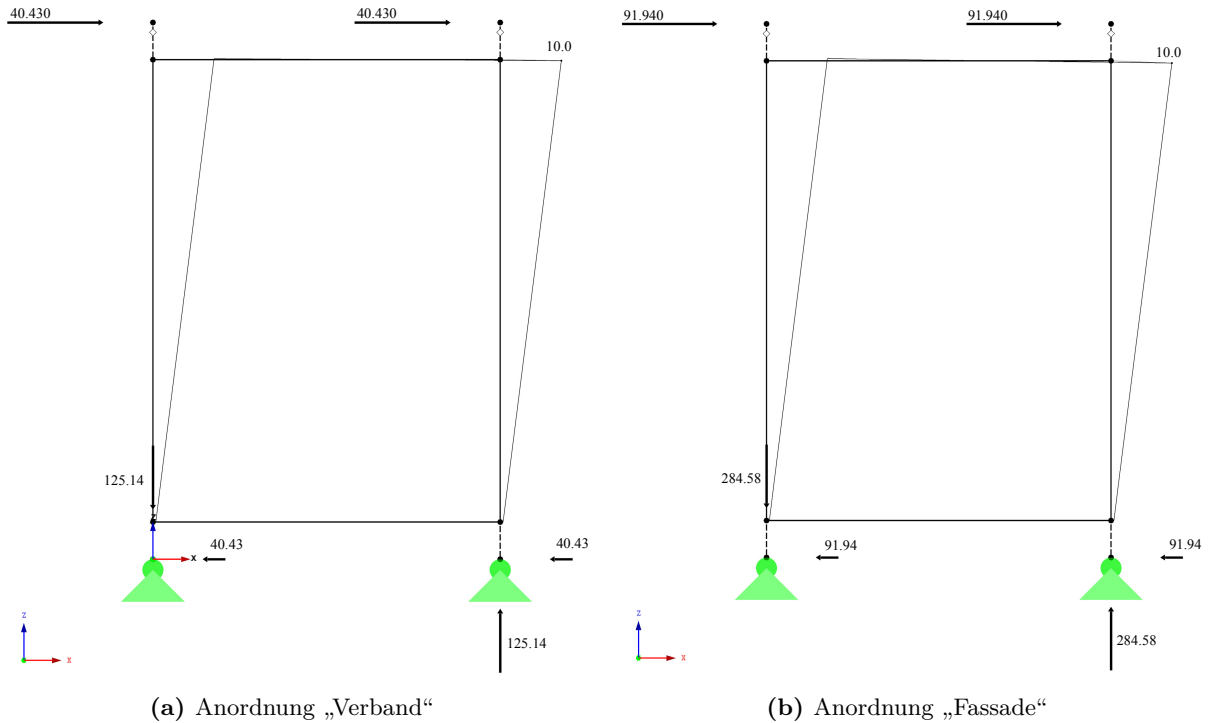


Abb. 4.7: Ersatzrahmen der Konstruktionsvariante A bei Kopplung samt Belastung in [kN] und Verformung in [mm]

In Abb. 4.8, Abb. 4.9 und Abb. 4.10 sind beispielhaft die viergeschossigen Gebäudemodelle der drei unterschiedlichen Grundrissverhältnisse dargestellt. Wie in Abschnitt 4.2.1 erwähnt, lässt sich hier erkennen, dass die Ersatzrahmen der HGV-Elemente aus Abb. 4.5 als einzelne Objekte an der linken und rechten Fassadenebene symmetrisch angeordnet sind. An den übrigen Gebäudeseiten befinden sich keine aussteifenden Wandscheiben.

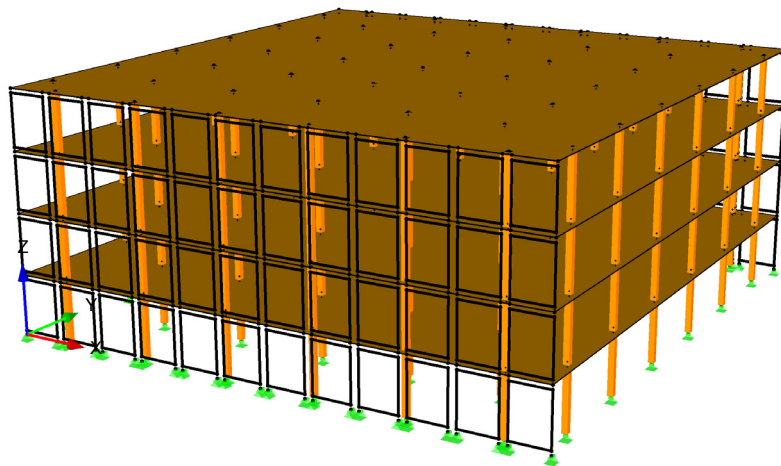


Abb. 4.8: Gebäudemodell 1:1

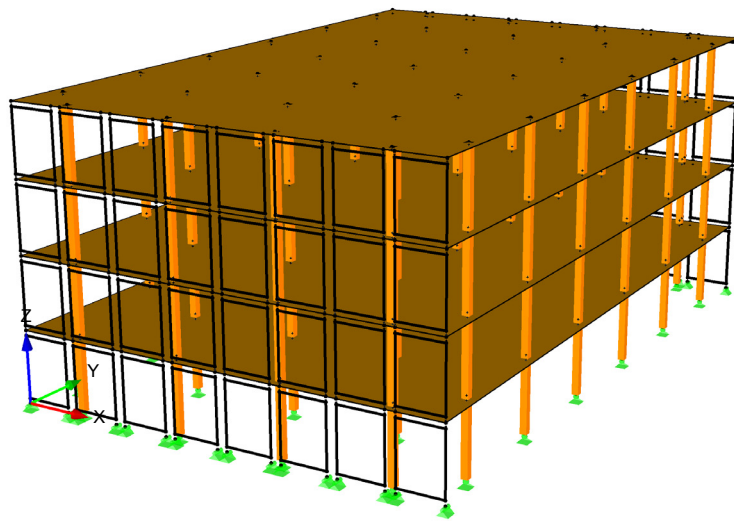


Abb. 4.9: Gebäudemodell 1:1,5

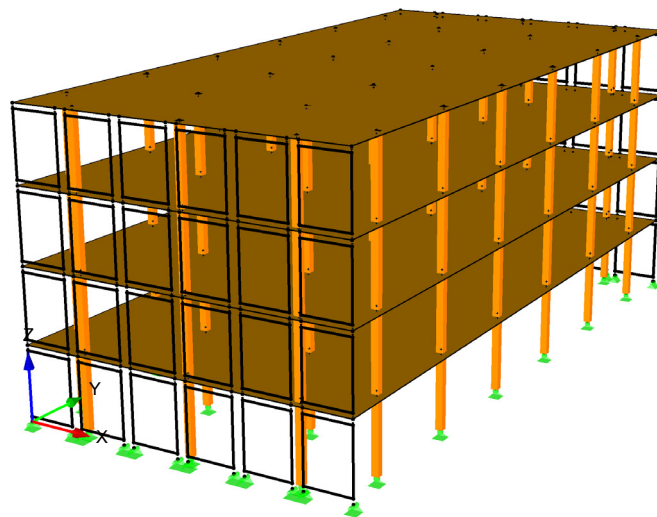


Abb. 4.10: Gebäudemodell 1:2

Die durch Kopplung festgestellte erhebliche Steifigkeitserhöhung wird folgendermaßen berücksichtigt: Die einzelnen Objekte der Ersatzrahmen bleiben stets in ihrer zugewiesenen Lage. Indem den jeweiligen Ersatzrahmen die im Zuge der Kalibrierung festgestellten Biege-, Dehn-, und Schubsteifigkeiten zugeordnet werden, erfolgt für nebeneinander angeordnete HGV-Elemente in grafischer Form vereinfacht eine Parallelschaltung. Um dies anschaulich zu machen, zeigt Abb. 4.11 die Vorgehensweise der Steifigkeitsadaption der Konstruktionsvariante A im „Verband“ anhand des viergeschossigen Gebäudemodells mit Grundrissverhältnis 1:2. Die äußeren Objekte der Fassadenebene (gelb markiert) sollen eine Wandsteifigkeit von $K_{kurz} = 10,87kN/cm$ nach Tab. 4.3 erhalten. Aus diesem Grund werden ihnen jene Biege-, Dehn-, und Schubsteifigkeiten zugewiesen, die dem als „Einzelelement“ kalibrierten Ersatzrahmen aus Abb. 4.6 entsprechen. Die berechnete Wandsteifigkeit eines gekoppelten HGV-Elements gelten nur für ein mittleres HGV-Element (Abschnitt 4.2.2). Den inneren Objekten der Fassadenebene (rot markiert) werden deshalb die jeweiligen Steifigkeiten des kalibrierten Ersatzrahmens mit Anordnung im „Verband“

aus Abb. 4.7a zugewiesen. Dies entspricht für Konstruktionsvariante A einer Wandsteifigkeit von $K_{kurz} = 80,86kN/cm$ nach Tab. 4.3.

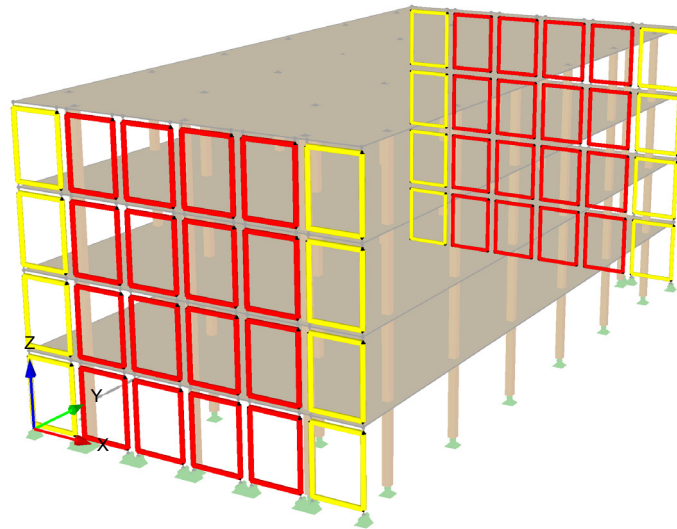


Abb. 4.11: Steifigkeitsadaption der Konstruktionsvariante A im „Verband“ – Gebäudemodell 1:2

Das selbe Vorgehen erfolgt für HGV-Elemente, die horizontal und vertikal gekoppelt werden, wodurch sich die Kopplungsvariante „Fassade“ nach Abschnitt 4.2.2 ergibt. Die Biege-, Dehn-, und Schubsteifigkeiten der äußeren Objekte der Fassadenebene (gelb markiert in Abb. 4.11) bleiben unverändert und bilden als „Einzelemente“ den Abschluss der gesamten HGV-Scheibe. Den inneren Objekten der Fassadenebene (rot markiert in Abb. 4.11) werden die jeweiligen Steifigkeiten des kalibrierten Ersatzrahmens mit Anordnung in der „Fassade“ aus Abb. 4.7b zugewiesen. Dies entspricht einer Wandsteifigkeit von $K_{kurz} = 183,88kN/cm$ nach Tab. 4.3. Die einfachste Form stellt die Anordnung der HGV-Elemente als „Einzelemente“ dar. In diesem Fall werden allen Objekten der beiden Fassadenebenen die selben Steifigkeiten nach Abb. 4.6 zugewiesen, die zuvor lediglich für die äußeren Objekte gewählt wurden. Die Berücksichtigung diverser Konstruktions- und Kopplungsvarianten erfolgt auch bei den anderen FE-Rechenmodellen mit variierenden Grundrissverhältnissen und Geschossezahlen auf gleiche Weise. Es ist das bisher beschriebene Vorgehen bei der Modellierung vorauszusetzen, weshalb es an dieser Stelle nicht als notwendig empfunden wird, explizit auf die Modellierung einzugehen, diese anzuführen und abzubilden.

Um die kurzfristige Druckkraft $w_d = 1,77kN/m^2$ aus dem Lastfall Wind in den Rechenmodellen entsprechend berücksichtigen zu können, werden Linienlasten an der Fassadenebene der 30m langen Gebäudeseite in Höhe der Geschossdecken angesetzt. Abb. 4.14 stellt das Lastmodell dar. Über die Einflussbreite der gesamten Geschosshöhe von 3,25m beziehungsweise der halben Geschosshöhe von 1,625m ergeben sich diese Linienlasten zu: $w_{d,OG} = 1,77 * 3,25 = 5,75kN/m$ für die oberen Geschossdecken beziehungsweise $w_{d,EG} = 1,77 * 1,625 = 2,88kN/m$ für die Decke über dem Erdgeschoss.

Wie bereits angesprochen, ergeben sich aus der Parametervariation (Konstruktionsvarianten, Kopplungsvarianten, Grundrissverhältnisse und Geschossezahlen) mehrere FE-Rechenmodelle, mit dessen Hilfe die Belastung und Verformung je HGV-Element eruiert wird. Dabei erfolgt die Lastverteilung im Gebäude, indem die Winddruckkräfte über die Geschossdecken bis hin zu den aussteifenden HGV-Scheiben transferiert werden. Aufgrund der Annahmen „gleichmäßige Anordnung der HGV-Elemente“ sowie „starre Deckenscheiben“ und „starre Deckenanschlüsse der

Ersatzrahmen“ entsteht ein symmetrisches und statisch bestimmtes Aussteifungssystem. Hierbei kommt es zu einer gleichmäßigen und vollständigen Verteilung der resultierenden Horizontalkräfte zufolge Wind auf die HGV-Elemente. Und zwar nach dem Verhältnis ihrer jeweiligen Wandsteifigkeiten. Infolge dieser Annahmen treten somit ausschließlich Verschiebungen in Achsrichtung der Deckenebene auf. Hingegen würde es bei einem unsymmetrischen Aussteifungssystem zu einer Verdrehung um den Schubmittelpunkt kommen. In diesem Fall würden auch Anteile aus Rotation der Deckenscheiben die aussteifenden Wände belasten. Abermals sei auf Nicklisch [16] verwiesen, wo auch die Nachgiebigkeit der Anschlüsse zur Decke variiert wurde. Damit die HGV-Elemente überhaupt Horizontalkräfte erhalten, spielt die Nachgiebigkeit dieser Verbindung eine entscheidende Rolle. Sie wirkt sich auch auf die endgültige Wandsteifigkeit, die bei der Lastverteilung angesetzt werden kann, aus. Eine ungleichmäßige Anordnung von HGV-Elementen sowie die Nachgiebigkeit von Deckenscheiben und Deckenanschlüssen sollten in zukünftigen Forschungsvorhaben in Anlehnung an diese Arbeit unbedingt näher beleuchtet werden. Diese Punkte sind unabdingbar um das tatsächliche Aussteifungsverhalten von HGV-Scheiben in Gebäuden realitätsnaher zu simulieren.

Das Zusammenspiel der HGV-Elemente mit dem vollständigen Bauwerk unter Windbelastung und die Berechnungsergebnisse eines FE-Rechenmodells (Belastung und Verformung je HGV-Element) werden nun am Beispiel des viergeschossigen Gebäudemodells mit Grundrissverhältnis 1:2 aus Abb. 4.10 analysiert. Betrachtet wird das Referenzsystem Konstruktionsvariante A. Die HGV-Elemente sind horizontal gekoppelt, womit eine Anordnung im „Verband“ entsteht. In Abb. 4.12 sind die Kräfte, die auf die maßgeblich belasteten HGV-Elemente im Erdgeschoss wirken, dargestellt.

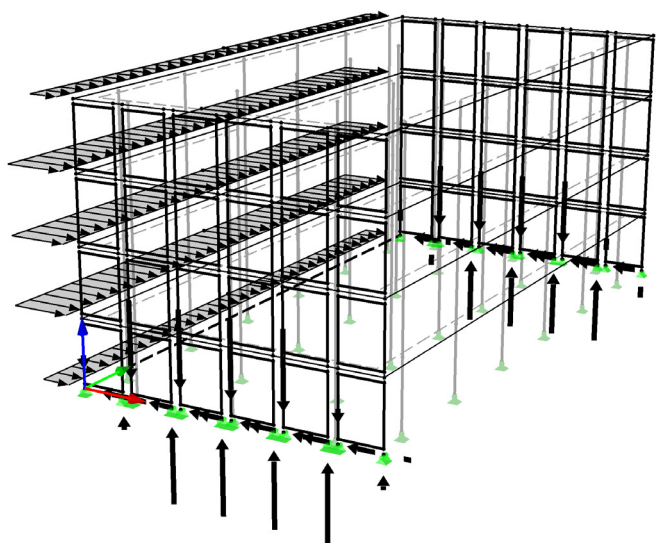


Abb. 4.12: Belastung je HGV-Element der Konstruktionsvariante A im „Verband“ – Gebäudemodell 1:2

Man erkennt, dass die HGV-Elemente am äußeren Rand der Fassadenebene aufgrund ihrer geringeren Wandsteifigkeit von $K_{kurz} = 10,87kN/cm$ dementsprechend weniger Last an sich ziehen. Die gekoppelten und somit steiferen HGV-Elemente mit der einheitlichen Wandsteifigkeit von $K_{kurz} = 80,86kN/cm$ im Inneren der Fassadenebene werden wie erwartet höher belastet. Die symmetrische Anordnung an den beiden Fassadenebenen sorgt dafür, dass auch die Belastung je HGV-Element die selbe ist. Würde in diesem Rechenbeispiel mit Grundrissverhältnis 1:2 die Kopplungsvariante „Einzelement“ untersucht werden, verteilten sich die resultierenden

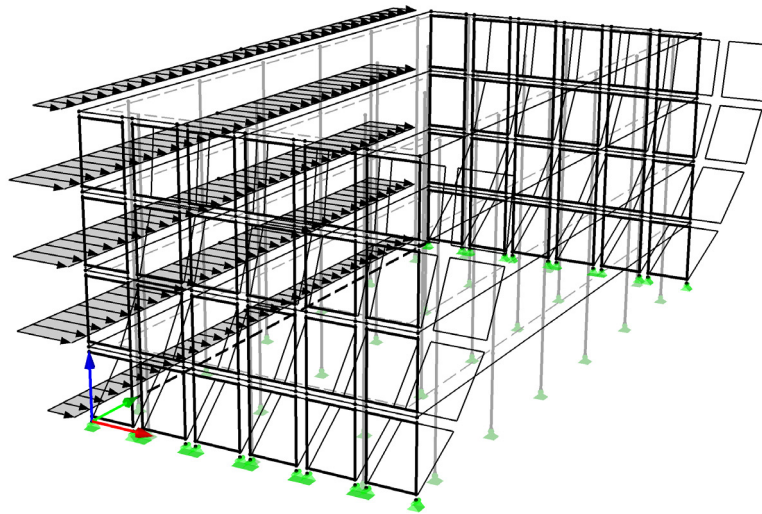


Abb. 4.13: Verformung je HGV-Element der Konstruktionsvariante A im „Verband“ – Gebäudemodell 1:2

Horizontalkräfte zufolge Wind gleichmäßig auf alle sechs HGV-Elemente je Fassadenebene. Bei der Kopplungsvariante „Fassade“ ergibt sich ein qualitativ ähnliches Bild zu Abb. 4.12. Lediglich mit einer höheren Belastung und Verformung je HGV-Element ist zu rechnen, da dies eine zunehmende Wandsteifigkeit gemäß Tab. 4.3 bedingt. Die zugehörigen Verformungen dieses Rechenmodells zeigt Abb. 4.13 und soll gleichzeitig als Veranschaulichung der Verformungsbilder aller Rechenmodelle dienen.

Abb. 4.14 ist der Auszug eines am höchsten belasteten HGV-Elements im Erdgeschoss aus Abb. 4.12. Hiermit soll nochmals verdeutlicht werden, wie die Berechnungsergebnisse (Belastung

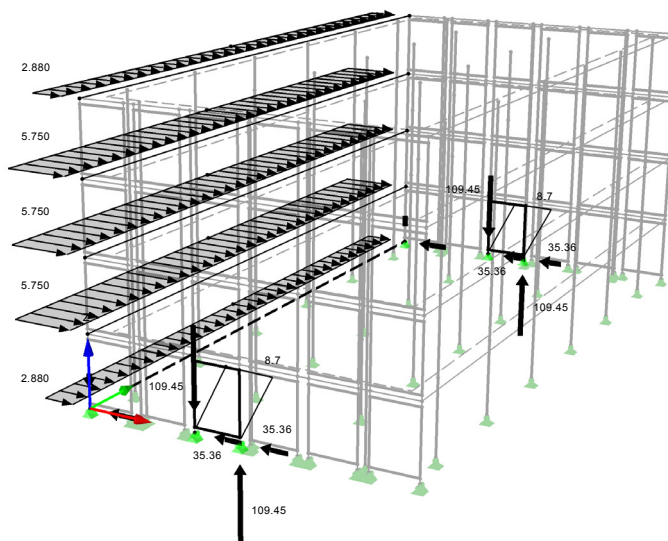


Abb. 4.14: Am höchsten belastetes HGV-Element im Erdgeschoss der Konstruktionsvariante A im „Verband“ – Gebäudemodell 1:2 – Belastung in [kN/m], Auflagerreaktion in [kN] und Verformung in [mm]

und Verformung je HGV-Element) aus den FE-Rechenmodellen abgelesen wurden. Und zwar erfolgte dies stets für ein HGV-Element des Erdgeschosses und im Inneren der Fassadenebene. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass bei Anordnung im „Verband“ wesentlich höhere Auslastungen auftreten sollten als bei „Einzelementen“, welche stets am äußeren Rand einer Fassadenebene anzufinden sind. Beispielsweise beträgt die kurzfristige Bemessungshorizontallast zufolge Wind für das HGV-Element der Konstruktionsvariante A im „Verband“ beim viergeschossigen Gebäude mit Grundrissverhältnis 1:2 $H_{d, kurz, vorh} = 70,74 kN$ (35,37 + 35,37 aus Abb. 4.14) mit der zugehörigen Verformung $u_{vorh} = 8,7 mm$.

Diese beiden Berechnungsergebnisse finden sich für alle Rechenmodelle in Abhängigkeit der Konstruktionsvariante in Ergebnistabellen wieder. Dabei sind jene Werte rot hervorgehoben, wo Tragsicherheits- beziehungsweise Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach Abschnitt 4.2.5 nicht erfüllt werden konnten. Die maßgebenden Nachweise werden in Abschnitt 4.3.1 näher erläutert. In diesen Tabellen lässt sich ein einzelner Wert je nach Kopplungsvariante und Grundrissverhältnis (Spalten) für eine gewisse Geschosszahl (Zeilen) ablesen. Für das vorliegende Beispiel zeigen Tab. 4.4 und Tab. 4.5 die Ergebnisse in der Spalte „Verband“ beziehungsweise „Grundrissverhältnis 1:2“ und der Zeile für vier Geschosse. Des Weiteren bestätigen die Ergebnistabellen auch eine Erwartung: Die Zunahme der Belastung und Verformung je HGV-Element ist mit der Zunahme der Wandsteifigkeit aufgrund der Kopplung eindeutig verknüpft. Die Berechnungsergebnisse der beiden anderen Konstruktionsvarianten sind in Tab. 4.6 und Tab. 4.7 beziehungsweise Tab. 4.8 und Tab. 4.9 aufgelistet.

Tab. 4.4: Kurzfristige Bemessungshorizontallast $H_{d, kurz, vorh}$ der Konstruktionsvariante A in [kN]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	3,59	5,39	7,19	4,20	6,88	10,10	4,26	7,05	10,47
2	10,78	16,17	21,57	12,60	20,64	30,32	12,79	21,15	31,43
3	17,97	26,96	35,95	21,00	34,41	50,53	21,31	35,26	52,38
4	25,16	37,75	50,33	29,41	48,17	70,74	29,84	49,36	73,33

Tab. 4.5: Verformung u_{vorh} der Konstruktionsvariante A in [mm]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	3,3	5,0	6,6	0,5	0,9	1,2	0,2	0,4	0,6
2	9,9	14,9	19,8	1,6	2,6	3,7	0,7	1,2	1,7
3	16,5	24,8	33,1	2,6	4,3	6,2	1,2	1,9	2,8
4	23,1	34,7	46,3	3,6	6,0	8,7	1,6	2,7	4,0

Im Vergleich zwischen den Ergebnistabellen der drei Konstruktionsvarianten können nur geringe Abweichungen der Bemessungshorizontallasten $H_{d, kurz, vorh}$ bei den Konstruktionsvarianten B und B.1 festgestellt werden. Dass die resultierende Horizontalkraft zufolge Wind bei diesen Gebäudemodellen beinahe identisch ist und die HGV-Elemente somit einer ähnlichen Belastung ausgesetzt sind, war zu erwarten. Das wird in Abschnitt 4.3.2 noch deutlicher. Die Differenzen zur Konstruktionsvariante A entstehen lediglich daraus, dass durch die geringere Wandsteifigkeit der Konstruktionsvariante A mehr Verformung auftreten muss um die notwendige „aufnehmbare Horizontalkraft“ aktivieren zu können. Das erklärt auch die deutlichen Unterschiede bei den

Verformungen. Die geringsten resultieren dementsprechend aus jener Konstruktionsvariante mit der höchsten Wandsteifigkeit, Konstruktionsvariante B. Die Erkenntnis aus Abschnitt 4.2.2, wonach eine Reduktion der Glasstärke von 12mm (Konstruktionsvariante B) auf 8mm (Konstruktionsvariante B.1) kaum Auswirkungen auf die Wandsteifigkeit hat, wird auch im Vergleich sichtbar: Die Belastung, die auf eine HGV-Element entfällt, unterscheidet sich in Tab. 4.6 und Tab. 4.8 kaum.

Tab. 4.6: Kurzfristige Bemessungshorizontallast $H_{d, kurz, vorh}$ der Konstruktionsvariante B in [kN]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	3,59	5,39	7,19	3,79	5,85	8,03	3,91	6,14	8,58
2	10,78	16,17	21,57	11,38	17,55	24,09	11,74	18,42	25,75
3	17,97	26,96	35,95	18,97	29,25	40,14	19,56	30,70	42,91
4	25,16	37,75	50,33	26,55	40,96	56,20	27,39	42,98	60,08

Tab. 4.7: Verformung u_{vorh} der Konstruktionsvariante B in [mm]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2
2	0,5	0,8	1,0	0,4	0,6	0,8	0,3	0,5	0,6
3	0,9	1,3	1,7	0,6	1,0	1,3	0,5	0,8	1,0
4	1,2	1,8	2,4	0,9	1,3	1,8	0,7	1,1	1,5

Tab. 4.8: Kurzfristige Bemessungshorizontallast $H_{d, kurz, vorh}$ der Konstruktionsvariante B.1 in [kN]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	3,59	5,39	7,19	3,78	5,82	7,98	3,87	6,04	8,40
2	10,78	16,17	21,57	11,34	17,47	23,94	11,62	18,13	25,19
3	17,97	26,96	35,95	18,91	29,12	39,89	19,37	30,22	41,98
4	25,16	37,75	50,33	26,47	40,77	55,85	27,11	42,31	58,78

Tab. 4.9: Verformung u_{vorh} der Konstruktionsvariante B.1 in [mm]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2
2	0,5	0,8	1,1	0,4	0,6	0,8	0,3	0,5	0,7
3	0,9	1,3	1,8	0,7	1,0	1,4	0,5	0,8	1,2
4	1,2	1,9	2,5	0,9	1,4	1,9	0,8	1,2	1,6

Zum Abschluss wird noch ein Nachweis der korrekten Modellierung im FE-Statikprogramm erbracht. Zum Einen wird diesbezüglich eine Gleichgewichtsbetrachtung $\Sigma H = 0$ anhand der Berechnungsergebnisse des vorgestellten FE-Rechenmodells aus Abb. 4.14 durchgeführt. Die resultierende Horizontalkraft zufolge Wind, die auf das viergeschossige Gebäude wirkt, beträgt $W_d = (3 * w_{d,OG} + w_{d,EG}) * l_{Gebäude} = (3 * 5,75 + 2,88) * 30 \approx 604kN$. Dabei wurden die in diesem Abschnitt erläuterten Linienlasten in der Berechnung angesetzt. Für beide Fassadenebenen ergibt sich die Widerstandskraft der HGV-Scheiben im „Verband“ nach Abb. 4.14 oder über Tab. 4.4 zu $R_d = 2 * (4 * 70,74 + 2 * 9,46) \approx 604kN$. Der Gleichgewichtsnachweis ist somit erfüllt. Da es sich bei der Konstruktionsvariante A um das Referenzsystem zur Parameterstudie [18] handelt, liefert auch ein direkter Vergleich wertvolle Hinweise über die Glaubhaftigkeit der Berechnungsergebnisse. In [18] konnte für das viergeschossige Gebäude mit Grundrissverhältnis 1:2 unter Windlast eine Belastung je HGV-Element (ohne Anordnung im „Verband“) von 53,60kN bei 53,0mm Verformung festgestellt werden. Hier ergab sich $H_{d,kurz,vorh} = 50,33kN$ aus Tab. 4.4 beziehungsweise $u_{vorh} = 46,3mm$ aus Tab. 4.5. Die Differenzen sind nur marginal und die Berechnungsergebnisse der FE-Rechenmodelle somit plausibel.

4.2.5 Analytisches Nachweisverfahren mit dem Ersatzfedermodell

In diesem Abschnitt kommt das in Abschnitt 4.1 beschriebene Ersatzfedermodell erneut zum Einsatz. Zum Einen erfolgt die allgemeine Nachweisführung der beteiligten Bauteilkomponenten eines HGV-Elements unter Anwendung des Berechnungs- und Bemessungskonzepts [12]. Zum Anderen kann daraus ihre Grenztragfähigkeit $H_{d,kurz,zul}$ bei kurzfristiger Horizontallast und die Gesamtausnutzung der HGV-Elemente abgeleitet werden. Dies geschieht für die drei Konstruktions- und Kopplungsvarianten, auf die in den vorangegangenen Abschnitten bereits detailliert eingegangen wurde. Mit dem Ersatzfedermodell in Abb. 2.4 können abhängig vom Steifigkeitsanteil der Schubverklebung K_τ sowie dem Steifigkeitsanteil der Verklotzung K_C Aussagen zum inneren Kraftfluss getroffen und dieser nachgewiesen werden. Im Zuge der umfangreichen Studie des Berechnungs- und Bemessungskonzepts, das auch in Weissensteiner [15] Anwendung fand, wurden die maßgebenden Nachweiskriterien infolge Kurzzeitlast folgender Bauteilkomponenten ausgewählt:

1. Gebrauchstauglichkeitsnachweis mit dem normativen Grenzwert $\frac{H}{300}$
2. Gebrauchstauglichkeitsnachweis mit dem international gebräuchlichen Grenzwert $\frac{H}{500}$
3. Tragsicherheitsnachweis der Schubverklebung
4. Tragsicherheitsnachweis der Verklotzung
5. Beulnachweis der Glasscheibe unter Scheibenbeanspruchung
6. Nachweis der Querpressung der Koppelleiste

Das allgemeine Nachweisverfahren nach [12] war jedoch etwas anzupassen, da hier spezielle Randbedingungen vorliegen:

- Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag darauf, das Aussteifungspotential von HGV-Elementen bei reiner Scheibenbeanspruchung zufolge Windlast zu untersuchen. Aus diesem Grund erfolgte die Berechnung der Wandsteifigkeiten K_{kurz} in Tab. 4.3 auch ausschließlich für kurzfristige Lasteinwirkung – das zeitabhängige Materialverhalten der Bauteilkomponenten mittels Deformationsbeiwerten k_{def} bei langfristiger Lasteinwirkung bleibt unberücksichtigt. Eine langfristige Horizontallast zufolge Gebäudeschrägstellung wird deshalb ebenfalls nicht angesetzt.
- Thermische Zwangsbeanspruchungen aufgrund der Längenänderung der Koppelleisten fallen ebenfalls in den langfristigen Beobachtungszeitraum und bleiben außer Acht.

Der Eigengewichtsabtrag der Glasscheibe wird sehr wohl berücksichtigt und den beiden vertikal laufenden Schubfugen sowie den beiden horizontal liegenden Klötzen zugewiesen. Dabei beteiligen sich beim Lastabtrag über die Schubverklebung die Bauteilkomponenten der Schubverklebung längs $C_{\tau,l}$, der Koppelleiste längs $C_{KL,l}$ und der Verbindungsmittel längs $C_{VM,l}$. Beim Lastabtrag über die beiden Klötze beteiligen sich die Bauteilkomponenten der Schubverklebung quer $C_{\tau,q}$, der Verklötzung C_C , der Koppelleiste quer $C_{KL,q}$ und der Verbindungsmittel quer $C_{VM,q}$ nach Tab. 4.2. Für die detaillierte Berechnung des äquivalenten Schubmoduls $G_{\ddot{a}q,vert}$ und des äquivalenten Elastizitätsmoduls $E_{\ddot{a}q,vert}$ sei auf [12, 15] verwiesen. Hier wird hinreichend dargelegt, wie die Verteilung der Lasten aus Eigengewicht der Glasscheibe erfolgt.

Um Klarheit über die im Nachweisverfahren angesetzten Materialsicherheitsbeiwerte γ_M auf Seiten der Klebstoffe zu schaffen, ist ein grober Überblick über die relevanten Sicherheitskonzepte notwendig. Die Auseinandersetzung mit sicherheitstheoretischen Überlegungen von Klebstoffen war jedoch nicht Ziel dieser Arbeit, weshalb hierfür auf Rinnhofer [11] verwiesen wird. Für die Bemessung von HGV-Konstruktionen existiert derzeit keinerlei normative Grundlage und es wird auf ETAG 002-1 [19] zurückgegriffen, obwohl diese Leitlinie – ursprünglich aus dem Jahr 1998 – für das Substrat Holz keinerlei Gültigkeit besitzt. Des Weiteren bezieht sich [19] noch auf das deterministische Sicherheitskonzept, da seit damals kaum eine Überarbeitung erfolgte. Bezüglich des anzusetzenden Sicherheitsfaktors, zur Abminderung der charakteristischen Festigkeit bei der Ermittlung der Bemessungsspannung, wird der Wert $\gamma_{tot} = 6,0$ als Gesamtsicherheitsfaktor empfohlen, welcher jedoch die Sicherheitsbeiwerte auf Einwirkungs- wie auf Widerstandsseite zu einem gemeinsamen Beiwert zusammenfasst. Im modernen Normenwesen (EN 199X) – basierend auf dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept – werden die Unsicherheiten auf beiden Seiten jedoch unabhängig und getrennt voneinander betrachtet. Auf der Einwirkungsseite erfolgt deshalb ein Erhöhen der charakteristischen Belastung mittels Teilsicherheitsfaktoren, während auf der Widerstandsseite eine Abminderung des charakteristischen Materialwiderstands um den Materialsicherheitsbeiwert vorgenommen wird.

Rinnhofer [11] empfiehlt für den Silikonklebstoff OTTOCOLL® S660 beim gemeinsamen Auftreten unterschiedlicher Einwirkungen (Wind, Eigengewicht etc.) einen Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 3,5$, der dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept entspricht. Da diese bemessungsrelevanten Sicherheitsfaktoren ausschließlich für diesen Klebstoff gelten, wird darauf hingewiesen, dass für das silanterminierte Zwei-Komponenten Epoxid nolax C44.8508 beziehungsweise dem Injektionsmörtel HILTI HIT-RE 500 hingegen weitreichendere Untersuchungen notwendig wären um etwaige Sicherheitsbeiwerte herleiten zu können. Um die Unsicherheit der Widerstandsseite dennoch entsprechen berücksichtigen zu können, findet der Gesamtsicherheitsfaktor γ_{tot} [19] im semiprobabilistischen Nachweisverfahren Anwendung. Die Inkonsistenz zwischen den beiden Bemessungskonzepten ist jedoch auszugleichen und muss behoben werden. Die HGV-Scheiben

werden in dieser Fallstudie ständigen (Eigengewicht) und veränderlichen Einwirkungen (Wind) ausgesetzt. Damit die Materialsicherheitsbeiwerte mit den heute üblichen Sicherheitsbetrachtungen der Eurocodes identisch sind, ergibt sich für beide Klebstoffe $\gamma_M = 4,2$ bei ständiger und veränderlicher Last, indem $\gamma_{tot} = 6,0$ durch den Mittelwert der Teilsicherheitsfaktoren $\frac{1,35+1,5}{2} = 1,43$ dividiert wird.

Die angepassten Nachweise der analytischen Berechnungsmethode werden in den folgenden Abschnitten nacheinander abgearbeitet. Alle Nachweise, die den konventionellen Holzbau betreffen, bleiben aufgrund des Themenschwerpunkts unberücksichtigt. An der Konstruktionsvariante A im „Verband“ wurden die Modellierung und Auswertung des FE-Rechenmodells mit Grundrissverhältnis 1:2 verdeutlicht. Dies soll auch beim Nachweisverfahren als Beispiel dienen. Die notwendigen Materialeigenschaften für die Nachweise der Bauteilkomponenten wurden bereits in Abschnitt 4.2.1 zusammengefasst. Gemäß Tab. 4.5 beträgt die kurzfristige Bemessungshorizontallast zufolge Wind für das HGV-Element $H_{d, kurz, vorh} = 70,74 kN$. Mit der zugehörigen Verformung $u_{vorh} = 8,7 mm$. Die Ergebnisse sämtlicher Nachweisverfahren finden sich gesammelt in Abschnitt 4.3.1, wo auch eine Zusammenfassung und Gegenüberstellung erfolgt.

4.2.5.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis H/300

$$u_{zul} = \frac{H_{GeschoSS}}{300} = \frac{3250}{300} = 10,8 mm \quad (4.1)$$

$$\frac{u_{vorh}}{u_{zul}} = \frac{8,7}{10,8} = 0,81 < 1 \quad (4.2)$$

Der Nachweis wird erfüllt.

4.2.5.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis H/500

$$u_{zul} = \frac{H_{GeschoSS}}{500} = \frac{3250}{500} = 6,5 mm \quad (4.3)$$

$$\frac{u_{vorh}}{u_{zul}} = \frac{8,7}{6,5} = 1,35 > 1 \quad (4.4)$$

Der Nachweis wird nicht erfüllt.

4.2.5.3 Tragsicherheitsnachweis der Schubverklebung für Kurzzeitlast

$$\begin{aligned} H_{d, kurz, \tau} &= H_{d, kurz, vorh} * \frac{K_{\tau}}{K_{\tau} + K_C} = \\ &= 70740 * \frac{997,9}{997,9 + 7088,35} = 8730N \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$S_{d, kurz, \tau} = \frac{H_{d, kurz, \tau}}{l * b_{\tau}} = \frac{8730}{2100 * 14} = 0,30N/mm^2 \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} V_d &= 1,35 * \rho_G * t_G * h * l = \\ &= 1,35 * 2500 * 10^{-8} * 12 * 2800 * 2100 = 2381N \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$S_{d, EG, \tau} = \frac{V_{d, \tau}}{2 * h * b_{\tau}} = \frac{6,2}{2 * 2800 * 14} \approx 0,0 \quad (4.8)$$

$$S_{d, Gesamt, \tau} = S_{d, kurz, \tau} + S_{d, EG, \tau} = 0,30 + 0,0 = 0,30N/mm^2 \quad (4.9)$$

$$R_{d, kurz, \tau} = \frac{k_{\tau, mod, kurz} * \tau_k}{\gamma_{\tau, M}} = \frac{0,9 * 0,60}{3,5} = 0,154N/mm^2 \quad (4.10)$$

$$\frac{S_{d, Gesamt, \tau}}{R_{d, kurz, \tau}} = \frac{0,30}{0,154} = 1,93 > 1 \quad (4.11)$$

Der Nachweis wird nicht erfüllt.

4.2.5.4 Tragsicherheitsnachweis der Verklotzung für Kurzzeitlast

$$\begin{aligned} H_{d, kurz, c} &= H_{d, kurz, vorh} * \frac{K_C}{K_{\tau} + K_C} = \\ &= 70740 * \frac{7088}{997,9 + 7088,35} = 62014N \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} S_{d, kurz, c} &= \frac{2 * H_{d, kurz, c}}{l_c * b_{c, G}} * \frac{1}{1 - 2 * \frac{e_c}{l}} = \\ &= \frac{2 * 62014}{200 * 8} * \frac{1}{1 - 2 * \frac{250}{2100}} = 101,74N/mm^2 \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$S_{d, EG, c} = \frac{V_{d, c}}{2 * l_c * b_{c, G}} = \frac{2375}{2 * 200 * 8} = 0,74N/mm^2 \quad (4.14)$$

$$S_{d, Gesamt, c} = S_{d, kurz, c} + S_{d, EG, c} = 101,74 + 0,74 = 102,48N/mm^2 \quad (4.15)$$

$$R_{d, kurz, c} = \frac{k_{c, mod, kurz} * \sigma_{c, k}}{\gamma_{c, M}} = \frac{0,9 * 86}{4,2} = 18,43N/mm^2 \quad (4.16)$$

$$\frac{S_{d, Gesamt, c}}{R_{d, kurz, c}} = \frac{102,48}{18,43} = 5,56 > 1 \quad (4.17)$$

Der Nachweis wird nicht erfüllt.

4.2.5.5 Beulnachweis der Glasscheibe unter Scheibenbeanspruchung

$$S_{d,Beulen} = D_{kurz} = H_{d,kurz,c} * \frac{\sqrt{1 + \frac{h^2}{l^2}}}{1 - 2 * \frac{e_c}{l}} = \quad (4.18)$$

$$= 62014 * \frac{\sqrt{1 + \frac{2800^2}{2100^2}}}{1 - 2 * \frac{250}{2100}} = 135657N$$

$$S_{d,\tau} = \frac{H_{d,kurz,\tau}}{l * b_\tau} * \frac{1}{1 + \frac{k_w}{k_u} * \frac{l}{3 * h}} = \quad (4.19)$$

$$= \frac{8730}{2100 * 14} * \frac{1}{1 + \frac{1,67}{1,67} * \frac{2100}{3 * 2800}} = 0,24N/mm^2$$

$$\kappa = 3,85 + (5,59 - 3,85) * (1 - \frac{K_c}{K_\tau + K_c}) = \quad (4.20)$$

$$= 3,85 + (5,59 - 3,85) * (1 - \frac{7088,35}{997,9 + 7088,35}) = 4,065$$

$$R_{k,Beulen} = D_{crit} = \frac{E_G * t_G^3 * h * \kappa * f_{tV} * \pi^2}{12 * (1 - \nu_G^2) * l^2} = \quad (4.21)$$

$$= \frac{70000 * 12^3 * 2800 * 4,065 * 0,5282 * \pi^2}{12 * (1 - 0,23^2) * 2100^2} = 143196N$$

$$R_{d,Beulen} = \frac{R_{k,Beulen}}{\gamma_B} = \frac{143196}{1,5} = 95467N \quad (4.22)$$

$$\tau_{zul} = 0,8 * \tau_{krit} = 0,8 * \kappa * f_{tV} * E_G * (\frac{t_G}{l})^2 = \quad (4.23)$$

$$= 0,8 * 4,065 * 0,5282 * 70000 * (\frac{12}{2100})^2 = 3,93N/mm^2$$

$$\frac{S_{d,Beulen}}{R_{d,Beulen}} + \frac{S_{d,\tau}}{\tau_{zul}} = \frac{135657}{95467} + \frac{0,24}{3,93} = 1,48 > 1 \quad (4.24)$$

Der Nachweis wird nicht erfüllt.

In Abschnitt 4.1 wurden zwei Untersuchungsschwerpunkte identifiziert, die im Folgenden kritisch betrachtet und ergänzt werden sollen:

1. Gemäß [15] ist als maßgebendes Versagenskriterium von HGV-Elementen generell die „kritische Beullast“ H_{crit} heranzuziehen.
2. In [18] konnte eine Erhöhung der Glasstärke keine Verbesserung von dem Beulwiderstand des HGV-Elements mit sich führen.

Um die dargelegten Sachverhalte ausführlicher zu schildern, folgt die Berechnung der „kritischen Beullast“ H_{crit} für ein HGV-Element aus Weissensteiner [15] „VAR 01 Schubverklebung und Verklotzung – Einzelscheibe“. Die Abmessungen der 8mm (2x4mm VSG) dicken Glasscheibe betragen 1,25m x 2,50m. Detaillierte Parameter werden hier nicht explizit angeführt und sind [15] zu entnehmen. $H_{crit} = 35,07kN$ ergibt sich nach Glg. (4.26). Dabei wird die Glasscheibenimperfection durch eine Abminderung der Glasscheibendicke berücksichtigt: $t_G = t_{G,imp} = 7,7mm$. Den Beulwert der Glasscheibe $\kappa = 5,255$ und den Faktor für den teilweisen Verbund $f_{tV} = 0,4422$ (aufgrund der PVB-Folie) setzt Weissensteiner gemeinsam als Produkt der beiden an: $\kappa * f_{tV} = 2,324$.

$$\begin{aligned}
R_{k,Beulen} = D_{crit} &= \frac{E_G * t_G^3 * h * \kappa * f_{tV} * \pi^2}{12 * (1 - \nu_G^2) * l^2} = \\
&= \frac{70000 * 7,7^3 * 2500 * 2,324 * \pi^2}{12 * (1 - 0,23^2) * 1250^2} = 103193N = 103,19kN
\end{aligned} \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}
H_{crit} = H_{k,kurz,c} &= R_{k,Beulen} * \frac{1 - 2 * \frac{e_c}{l}}{\sqrt{1 + \frac{h^2}{l^2}}} = \\
&= 103193 * \frac{1 - 2 * \frac{150}{1250}}{\sqrt{1 + \frac{2500^2}{1250^2}}} = 35073N = 35,07kN
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Würde man den Rechenvorgang über H_{crit} hinaus weiterführen, ergäbe sich $H_{k,kurz,zul}$ mit Glg. (4.29) erst über den Lastanteil der Systemsteifigkeiten in Glg. (4.28) und man erkennt, dass $H_{crit} = H_{k,kurz,c}$ lediglich jene Druckkraft darstellt, die im Klotz auftreten muss bevor es zum Beulversagen der Glasscheibe kommen kann. Dies soll vor allem darlegen, dass $H_{crit} \neq H_{k,kurz,zul}$ und somit keine Horizontalkraft H ist, die auf ein HGV-Element einwirken müsste, damit diese infolge Beulen versagen würde. Weshalb H_{crit} nicht als Bruchlast eines HGV-Elements angesetzt werden sollte.

$$H_{d,kurz,c} = \frac{R_{k,Beulen}}{\gamma_B} * \frac{1 - 2 * \frac{e_c}{l}}{\sqrt{1 + \frac{h^2}{l^2}}} \tag{4.27}$$

$$H_{d,kurz,zul} = H_{d,kurz,c} * \frac{K_\tau + K_C}{K_C} \tag{4.28}$$

$$H_{k,kurz,zul} = \frac{H_{d,kurz}}{\gamma_Q} \tag{4.29}$$

Um die Traglast eines HGV-Elements für Beulversagen $H_{zul,Beulen}$ bei reiner Scheibenbeanspruchung zu berechnen, ist Glg. (4.32) heranzuziehen. Dabei kann im Stabilitätsnachweis für die Superposition von Schub- und Druckbeulen die Beulwertbestimmung über die Dunkerley'sche Gerade erfolgen. Dass diese auch ausreichend genau ist, hielt Hochhauser [14] fest. Die Grenzfälle bilden dabei der Beulwert zufolge Schubbeulen $k_\tau = 5,59$ (oberer Grenzwert) und jener zufolge Druckbeulen $k_c = 3,85$ (unterer Grenzwert). Für $H_{zul,Beulen}$ tritt der ungünstigste Fall infolge vollständigem Lastabtrag über die Druckdiagonale ein. Für diesen Sonderfall wird $\frac{K_c}{K_\tau + K_c} = \frac{1,0}{0,0 + 1,0} = 1,0$ und aus Glg. (4.20) folgt schließlich $k_c = 3,85$. Die vollständige Formel zur Ermittlung von $H_{k,kurz,Beulen,Druck}$ zeigt Glg. (4.30), wo neben der Beulwertreduktion für VSG infolge nachgiebigen Verbunds von PVB-Folien (Faktor für teilweisen Verbund f_{tV} [14]) auch die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Material- und Einwirkungsseite berücksichtigt sind. Durch die Anpassung von Glg. (4.24) zu $S_{d,Beulen} = R_{d,Beulen}$ und über Glg. (4.18) beziehungsweise Glg. (4.22) ergibt sich der untere Grenzwert der Traglast eines HGV-Elements für Druckbeulen zu:

$$H_{k,kurz,Beulen,Druck} = \frac{R_{k,Beulen}}{\gamma_B} * \frac{1 - 2 * \frac{e_c}{l}}{\sqrt{1 + \frac{h^2}{l^2}}} * \frac{K_\tau + K_C}{K_C} * \frac{1}{\gamma_Q} \tag{4.30}$$

Durch die Anpassung von Glg. (4.24) zu $S_{d,\tau} = \tau_{zul}$ und über Glg. (4.19) beziehungsweise Glg. (4.23) ergibt sich der obere Grenzwert der Traglast eines HGV-Elements für Schubbeulen. Für diesen Sonderfall wird $\frac{K_c}{K_\tau + K_c} = \frac{0,0}{1,0+0,0} = 0,0$ und aus Glg. (4.20) folgt schließlich $k_\tau = 5,59$.

$$H_{k,kurz,Beulen,Schub} = \tau_{zul} * l * b_\tau * \left(1 + \frac{k_w}{k_u} * \frac{l}{3*h}\right) * \frac{K_\tau + K_c}{K_\tau} * \frac{1}{\gamma_Q} \quad (4.31)$$

Es lässt sich erkennen, dass bei Betrachtung dieser beiden Grenzsituationen die Systemsteifigkeiten eines HGV-Elements (Steifigkeitsanteil der Schubverklebung K_τ und der Verklotzung K_C aus Abb. 2.4) gänzlich unberücksichtigt bleiben können. In erster Linie spielen also geometrische Faktoren (Scheibenlänge, Scheibenhöhe, Scheibendicke, Elastizitätsmodul etc.) die entscheidende Rolle für den Beulwiderstand des gesamten HGV-Elements. Erst durch eine Überlagerung der beiden Gleichungen Glg. (4.30) beziehungsweise Glg. (4.31) wird es möglich, das Beulverhalten infolge gekoppelter Tragmechanismen in Glg. (4.32) darzustellen. So, wie es auch in der Realität bei schubverklebten und geklotzten HGV-Elementen der Fall sein wird.

$$H_{zul,Beulen} = H_{k,kurz,Beulen} = \frac{1}{\frac{\frac{K_c}{K_\tau + K_c} * \sqrt{1 + \frac{h^2}{l^2}}}{1 - 2 * \frac{e_c}{l}} + \frac{\frac{K_\tau}{K_\tau + K_c} * \frac{1}{1 + \frac{k_w}{k_u} * \frac{l}{3*h}}}{l * b_\tau * \tau_{zul}}} * \frac{1}{\gamma_Q} \quad (4.32)$$

Glg. (4.30) sowie Glg. (4.31) und Glg. (4.32) werden nun angewendet auf das konkrete Fallbeispiel „VAR 01 Schubverklebung und Verklotzung – Einzelscheibe“ aus [15]. $H_{zul,Beulen} = H_{k,kurz,Beulen} = 40,20kN$ ergibt sich mit Glg. (4.25). Wie erwartet liegt die Traglast des HGV-Elements für Beulversagen bei reiner Scheibenbeanspruchung realistischerweise zwischen dem unteren Grenzwert $H_{k,kurz,Beulen,Druck} = 11,42kN$ und dem oberen Grenzwert $H_{k,kurz,Beulen,Schub} = 61,28kN$ – der Einfluss der Systemsteifigkeit auf das Beulverhalten von HGV-Elementen durch Superposition von Schub- und Druckbeulen nach Hochhauser [14] bildet sich ab.

$$R_{d,Beulen,Druck} = \quad (4.33)$$

$$= \frac{70000 * 7,7^3 * 2500 * 3,85 * 0,4422 * \pi^2}{12 * (1 - 0,23^2) * 1250^2} * \frac{1}{1,5} = 50400N = 50,40kN$$

$$\tau_{zul,Schub} = 0,8 * 5,59 * 0,4422 * 70000 * \left(\frac{0,77}{125}\right)^2 = 5,25N/mm^2 \quad (4.34)$$

$$H_{k,kurz,Beulen,Druck} = 50,40 * \frac{1 - 2 * \frac{15}{125}}{\sqrt{1 + \frac{250^2}{125^2}}} * 1,0 * \frac{1}{1,5} = 11,42kN \quad (4.35)$$

$$H_{k,kurz,Beulen,Schub} = \quad (4.36)$$

$$= 5,25 * 1250 * 12 * \left(1 + \frac{0,1399}{0,1399} * \frac{1250}{3 * 2500}\right) * 1,0 * \frac{1}{1,5} = 61280N = 61,28kN$$

$$R_{d,Beulen} = \frac{103,193}{1,5} = 68,79kN \quad (4.37)$$

$$\tau_{zul} = 0,8 * 2,324 * 7000 * \left(\frac{0,77}{125}\right)^2 = 0,49kN/cm^2 \quad (4.38)$$

$$H_{zul,Beulen} = H_{k,kurz,Beulen} = \quad (4.39)$$

$$= \frac{1}{\frac{0,7238}{3,781+0,7238} * \frac{\sqrt{1 + \frac{250^2}{125^2}}}{1 - 2 * \frac{15}{125}} + \frac{3,781}{125 * 1,2 * 0,49} * \frac{1}{1 + \frac{0,1399}{0,1399} * \frac{125}{3 * 250}}} * \frac{1}{1,5} = 40,20kN$$

Erst die Gegenüberstellung der „kritischen Beullast“ $H_{crit} = 35kN$ nach [15] und der Traglast für Beulversagen $H_{k,kurz,Beulen} = 40,20kN$ zeigt, dass der Beulwiderstand von HGV-Elementen höher ist als von Weissensteiner angenommen. Zusätzlich wird mit diesem Rechenbeispiel klar, dass mit $H_{zul,Beulen}$ keine Widerstandsgröße berechnet wird, sondern eine Kraftgröße. Dabei werden bei der Berechnung auch Teilsicherheitsfaktoren beaufschlagt. Soll heißen: $H_{zul,Beulen} = H_{d,kurz,Beulen} = 1,5 * H_{k,kurz,Beulen} = 1,5 * 40,20 = 60,30kN$ könnte als Horizontalkraft in Design auf das HGV-Element angesetzt werden, damit sich mit dem Beulnachweis der Glasscheibe unter Scheibenbeanspruchung eine Auslastung zu 100% ergäbe. Stellt man nun erneut $H_{crit} = 35kN$ und $H_{d,kurz,Beulen} = 60,30kN$ gegenüber, zeigt sich, dass der tatsächliche Beulwiderstand von HGV-Elementen weit über dem bisher angesetzten liegt.

Dem zweiten Untersuchungsschwerpunkt wird die Annahme zugrunde gelegt, dass in erster Linie die Erhöhung der Glasstärke von 8mm VSG (2x4mm) auf 12mm VSG (2x6mm) eine Verbesserung von dem Beulwiderstand eines HGV-Elements mit sich führen sollte. Um dieser Annahme genauer auf den Grund zu gehen, wird $H_{zul,Beulen}$ für alle Konstruktions- und Kopplungsvarianten dieser Arbeit ebenfalls ermittelt. Im Anhang B.4 sind die Ergebnisse dargestellt. Einschließlich jener der oberen Grenzwerte $H_{k,kurz,Beulen,Druck}$ und unteren Grenzwerte $H_{k,kurz,Beulen,Schub}$, die aufgrund der beschriebenen Unabhängigkeit von den Systemsteifigkeiten nur zwischen den Konstruktionsvarianten variieren. Für die Konstruktionsvariante A – die als Referenzsystem für das in [18] untersuchte HGV-Element dient – ist die Traglast für Beulversagen beim „Einzelelement“ mit $H_{d,kurz,Beulen} = 160,77kN$ nahezu das Fünffache der in [18] angesetzten „kritischen Beullast“ $H_{crit} = 34kN$. Eine Unstimmigkeit in der Berechnung von H_{crit} nach Glg. (4.26) wird für diese Diskrepanz in [18] verantwortlich gemacht. Es wurde lediglich $t_G = 7,7mm$ als Glasstärke in Rechnung gestellt. Mit diesem Rechenbeispiel wird die Annahme bestätigt, dass

eine Erhöhung der Glasstärke auch einen deutlich höheren Beulwiderstand eines HGV-Elements mit sich führt.

Mit den Erkenntnissen dieses Abschnitts können die Behauptungen der beiden Untersuchungsschwerpunkte entkräftet werden. Dies wird damit begründet, dass in [15, 18] drei Punkte außer Acht gelassen wurden:

- H_{crit} – berechnet nach Glg. (4.26) – ist keine Horizontalkraft, die auf ein HGV-Element einwirken müsste, damit die Glasscheibe infolge Beulen versagen würde. Weshalb H_{crit} nicht als Bruchlast eines HGV-Elements angesetzt werden sollte: $H_{crit} \neq H_{k, kurz, zul}$.
- Um $H_{zul, Beulen}$ als Traglast eines HGV-Elements für Beulversagen bei reiner Scheibenbeanspruchung (Superposition von Schub- und Druckbeulen) zu berechnen, ist Glg. (4.32) heranzuziehen. Angewendet an Fallbeispielen konnte schließlich festgestellt werden, dass der Beulwiderstand von HGV-Elementen wesentlich höher ist als bisher angenommen.
- Eine Erhöhung der Glasstärke führt auch einen deutlich höheren Beulwiderstand des HGV-Elements mit sich.

Als Abschluss dieses Abschnitts wird erneut die Konstruktionsvariante A im „Verband“ betrachtet. Hier würden die bisherigen Erkenntnisse bedeuten, dass $H_{d, kurz, vorh} = H_{d, kurz, Beulen} = 1,5 * H_{k, kurz, Beulen} = 1,5 * 31,83 = 47,75kN$ als Horizontalkraft auf das HGV-Element anzusetzen wären, damit der Beulnachweis am Beginn dieses Abschnitts gerade nicht erfüllt werden würde. Das erkennt man beispielsweise auch beim Nachweisverfahren des dreigeschossigen Gebäudemodells mit Grundrissverhältnis 1:2 der Konstruktionsvariante A im „Verband“. Mit der kurzfristigen Bemessungshorizontallast von $H_{d, kurz, vorh} = 50,53kN$ aus Tab. 4.4 kann der Beulnachweis in Tab. 4.10 nur knapp nicht eingehalten werden. Den Ergebnissen in Anhang B.4 kann zusätzlich abgelesen werden, dass sich vor allem eine Kopplung negativ auf den Beulwiderstand eines HGV-Elements auswirkt. Mit zunehmendem Lastanteil der Verklotzung wird das Druckbeulen als ungünstigster Fall maßgebend und $H_{zul, Beulen}$ nähert sich dem unteren Grenzwert $H_{k, kurz, Beulen, Druck}$ an. Hingegen kann durch die Erhöhung der Glasstärke der Beulwiderstand enorm gesteigert werden, was aus dem Vergleich der Kopplungsvarianten B und B.1 hervorgeht. Diese hohen Beulwiderstände der HGV-Elemente und die Nachweisverfahren dieses Abschnitts bezeugen hingegen auch, dass hauptsächlich ein Versagen anderer Bauteilkomponenten maßgebend wird. Eine Überbeanspruchung der Schubverklebung beziehungsweise das Erreichen der maximalen Druckspannung im Klotz können ebenso vorzeitig eintreten wie etwa das Versagen der Koppelleiste. Besonders dann, wenn auf Seiten der Materialparameter die Sicherheitsbeiwerte in Rechnung gestellt werden. Dadurch wird der zulässige Widerstand der Bauteilkomponenten noch deutlich abgemindert und es kommt zum Versagen, noch bevor ein Beulversagen der Glasscheibe eintreten kann. Das führt zu einem weiteren sehr wesentlichen Punkt:

- Als Bruchlast eines HGV-Elements unter reiner Scheibenbeanspruchung generell die Traglast für Beulversagen $H_{zul, Beulen}$ heranzuziehen, ist unzureichend.

Wie die Grenztragfähigkeit $H_{d, kurz, zul}$ von HGV-Elementen bestimmt wird und wovon diese abhängig ist, damit setzt sich Abschnitt 4.3.1 auseinander. Vorab wird jedoch noch die Querpressung der Koppelleiste analytisch untersucht.

4.2.5.6 Nachweis der Querpressung der Koppelleiste

$$S_{d,KL,Querpress.,kurz} = \frac{2 * H_{d,kurz,c}}{l_c * b_{c,H}} * \frac{1}{1 - 2 * \frac{\epsilon_c}{t}} = \quad (4.40)$$

$$= \frac{2 * 62014}{200 * 11} * \frac{1}{1 - 2 * \frac{250}{2100}} = 73,99 N/mm^2$$

$$S_{d,EG,KL,c} = \frac{V_{d,c}}{2 * l_c * b_{c,H}} = \frac{2375}{2 * 200 * 11} = 0,54 N/mm^2 \quad (4.41)$$

$$S_{d,KL,Querpress.,Gesamt} = S_{d,KL,Querpress.,kurz} + S_{d,EG,KL,c} = \quad (4.42)$$

$$= 73,99 + 0,54 = 74,53 N/mm^2$$

$$R_{d,KL,Querpress.,kurz} = \frac{k_{k,elast.} * k_{mod} * f_{c,II,11}}{\gamma_{M,BFSH}} = \quad (4.43)$$

$$= \frac{0,50 * 0,9 * 27,7}{1,2} = 10,38 N/mm^2$$

$$\frac{S_{d,KL,Querpress.,Gesamt}}{R_{d,KL,Querpress.,kurz}} = \frac{74,53}{10,38} = 7,18 > 1 \quad (4.44)$$

Der Nachweis wird nicht erfüllt.

4.3 Ergebnis der Fallstudie

Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse der Fallstudie angeführt. Unterschieden wird hierbei zwischen den Konstruktions- und Kopplungsvarianten aus Abschnitt 4.2.1 beziehungsweise Abschnitt 4.2.2. Für den Lastfall zufolge kurzfristiger Windbeanspruchung gemäß Abschnitt 4.2.3 soll die Gesamtausnutzung der HGV-Elemente dargestellt werden. Dazu ist es notwendig, die Ausnutzung einzelner Bauteilkomponenten zu betrachten. In diesem Zusammenhang wurden Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise in Anlehnung an Abschnitt 4.2.5 geführt, woraus schließlich die Grenztragfähigkeit abgeleitet werden kann. Darauf aufbauend wird in einem weiteren Schritt ein Bemessungsdiagramm entwickelt, das die Auswahl der statisch notwendigen HGV-Elemente zur Gebäudeaussteifung bei kurzfristiger Lasteinwirkung infolge Wind vereinfachen soll. Dieser Abschnitt wird mit einem Anwendungsbeispiel abgerundet. Am Ende wird anhand der Konstruktionsvariante B in einem Optimierungsverfahren untersucht, welche Voraussetzungen notwendig sind, um zukünftig eine Aussteifung von bis zu viergeschossigen Holzskelettbauten gegen Windbeanspruchung zu gewährleisten. Hier wird vor allem die Komplexität des Ersatzfedermodells [12] klarer.

4.3.1 Ausnutzung und Grenztragfähigkeit

Aus dem Nachweisverfahren, dem als Beispiel das Gebäudemodell mit Grundrissverhältnis 1:2 und der Konstruktionsvariante A im „Verband“ diente, ging folgendes eindeutig hervor: Je nach Steifigkeitsverteilung im HGV-Element, kann ein Versagen der Schubverklebung, Verklotzung beziehungsweise der Koppelleiste maßgebend werden. Der hohe Beulwiderstand macht ein Beulversagen unwahrscheinlich. Dies bestätigen auch die Berechnungsergebnisse aller anderen Konstruktions- und Kopplungsvarianten, die nun gegenübergestellt und analysiert werden: Konstruktionsvariante A in Tab. 4.10 sowie Konstruktionsvariante B in Tab. 4.11 und Kon-

struktionsvariante B.1 in Tab. 4.12. In chronologischer Reihenfolge, wie im vorangegangenen Abschnitt abgearbeitet, sind die Gebrauchstauglichkeitsnachweise „H/300“ und „H/500“ sowie die Tragsicherheitsnachweise der Schubverklebung „ τ “, der Verklotzung „C“, der Glasscheibe „G“ und der Koppelleiste „KL“ angegeben. Und jene Werte rot hervorgehoben, wo die Nachweise überschritten werden.

Tab. 4.10: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von Konstruktionsvariante A

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,31	0,46	0,61	0,05	0,08	0,12	0,02	0,04	0,05
	H/500	0,51	0,76	1,02	0,08	0,13	0,19	0,04	0,06	0,09
	τ	0,76	1,12	1,48	0,11	0,19	0,28	0,05	0,08	0,13
	C	0,06	0,08	0,09	0,37	0,58	0,83	0,40	0,63	0,92
	G	0,02	0,03	0,04	0,09	0,14	0,21	0,10	0,16	0,24
	KL	0,08	0,10	0,12	0,48	0,74	1,07	0,52	0,82	1,19
2	H/300	0,92	1,37	1,83	0,14	0,24	0,35	0,06	0,11	0,16
	H/500	1,53	2,29	3,05	0,24	0,39	0,58	0,11	0,18	0,26
	τ	2,20	3,29	4,38	0,34	0,56	0,83	0,15	0,25	0,38
	C	0,12	0,16	0,20	1,02	1,65	2,41	1,12	1,82	2,69
	G	0,07	0,10	0,13	0,26	0,43	0,63	0,29	0,48	0,71
	KL	0,15	0,21	0,26	1,32	2,13	3,10	1,44	2,35	3,47
3	H/300	1,53	2,29	3,05	0,24	0,39	0,58	0,11	0,18	0,26
	H/500	2,54	3,82	5,09	0,40	0,65	0,96	0,18	0,29	0,44
	τ	3,65	5,46	7,27	0,57	0,94	1,38	0,26	0,42	0,63
	C	0,17	0,24	0,31	1,68	2,73	3,98	1,84	3,01	4,45
	G	0,11	0,17	0,22	0,44	0,72	1,06	0,48	0,80	1,19
	KL	0,22	0,31	0,40	2,17	3,52	5,14	2,37	3,88	5,74
4	H/300	2,14	3,20	4,27	0,34	0,55	0,81	0,15	0,25	0,37
	H/500	3,56	5,34	7,12	0,56	0,92	1,35	0,25	0,41	0,61
	τ	5,10	7,63	10,16	0,80	1,31	1,93	0,36	0,59	0,88
	C	0,23	0,33	0,42	2,34	3,80	5,56	2,55	4,20	6,21
	G	0,16	0,23	0,31	0,62	1,01	1,48	0,68	1,12	1,67
	KL	0,29	0,42	0,55	3,01	4,90	7,18	3,29	5,41	8,02

Um vorab bereits einen ersten Hinweis zu bekommen, für welche Bauteilkomponenten hohe Ausnutzungen zu erwarten sind, können die prozentuellen Steifigkeitsanteile der Schubverklebung K_τ und Verklotzung K_C in Tab. 4.3 einen ersten Hinweis liefern. Dass bei den „Einzelementen“ der Tragmechanismus „Schubfeld“ überwiegt, ist auch der Grund dafür weshalb hier unabhängig von der jeweiligen Konstruktionsvariante die Tragsicherheitsnachweise der Schubverklebung nicht erfüllt werden konnten. Je nach verwendetem Klebstoff und dessen Festigkeit wird die Grenztragfähigkeit nach einem Geschoss, spätestens jedoch ab zwei Geschosse erreicht. Da zudem die Kopplungsvariante A eine relativ geringe Wandsteifigkeit aufweist, werden auch die Gebrauchstauglichkeitsnachweise maßgebend. Ganz anders sieht es bei den Kopplungen „Verband“ und „Fassade“ der Konstruktionsvariante A aus. Durch den nachgiebigen Silikonklebstoff OTTOCOLL® S660 stellt sich fast ausschließlich der Tragmechanismus „Druckdiagonale“ ein – zum Vorteil der Wandsteifigkeit und Gebrauchstauglichkeit, die nun beinahe durchgehend erfüllt wird. Hingegen wird der Tragsicherheitsnachweis der Verklotzung und damit einhergehend die Querpressung der Koppelleiste ab zwei Geschosse ausschlaggebend. Diese Beobachtung trifft ebenfalls für die Konstruktionsvarianten B und B.1 bei der „Fassade“ mit den beiden ungünstigeren Grundrissverhältnissen zu.

Tab. 4.11: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von Konstruktionsvariante B

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
	H/500	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03
	τ	0,32	0,46	0,59	0,22	0,34	0,47	0,17	0,27	0,37
	C	0,01	0,01	0,01	0,12	0,16	0,20	0,19	0,27	0,36
	G	0,02	0,03	0,04	0,03	0,05	0,07	0,05	0,07	0,10
	KL	0,01	0,01	0,01	0,15	0,20	0,26	0,24	0,35	0,47
2	H/300	0,05	0,07	0,09	0,03	0,05	0,07	0,03	0,04	0,06
	H/500	0,08	0,12	0,16	0,06	0,09	0,12	0,04	0,07	0,10
	τ	0,86	1,26	1,66	0,66	1,01	1,39	0,51	0,80	1,11
	C	0,01	0,01	0,02	0,27	0,40	0,54	0,48	0,74	1,01
	G	0,06	0,08	0,11	0,09	0,15	0,20	0,14	0,21	0,30
	KL	0,01	0,02	0,02	0,35	0,52	0,69	0,62	0,95	1,31
3	H/300	0,08	0,12	0,16	0,06	0,09	0,12	0,04	0,07	0,10
	H/500	0,13	0,20	0,26	0,10	0,15	0,20	0,07	0,12	0,16
	τ	1,40	2,07	2,74	1,09	1,69	2,31	0,84	1,32	1,85
	C	0,01	0,02	0,02	0,43	0,64	0,87	0,78	1,20	1,67
	G	0,09	0,14	0,18	0,16	0,24	0,33	0,23	0,35	0,49
	KL	0,02	0,02	0,03	0,55	0,83	1,12	1,01	1,55	2,15
4	H/300	0,11	0,17	0,22	0,08	0,12	0,17	0,06	0,10	0,14
	H/500	0,18	0,28	0,37	0,13	0,21	0,28	0,10	0,16	0,23
	τ	1,93	2,87	3,81	1,53	2,36	3,24	1,18	1,85	2,59
	C	0,02	0,02	0,03	0,59	0,88	1,20	1,08	1,67	2,32
	G	0,13	0,19	0,26	0,22	0,34	0,47	0,32	0,50	0,69
	KL	0,02	0,03	0,03	0,76	1,14	1,55	1,39	2,15	2,99

Tab. 4.12: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von Konstruktionsvariante B.1

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02
	H/500	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04
	τ	0,31	0,44	0,57	0,22	0,34	0,47	0,19	0,29	0,40
	C	0,01	0,01	0,01	0,10	0,14	0,18	0,15	0,22	0,30
	G	0,04	0,06	0,07	0,08	0,12	0,16	0,11	0,17	0,23
	KL	0,01	0,01	0,01	0,13	0,18	0,23	0,20	0,29	0,39
2	H/300	0,05	0,07	0,10	0,04	0,06	0,08	0,03	0,05	0,07
	H/500	0,08	0,12	0,16	0,06	0,09	0,13	0,05	0,08	0,11
	τ	0,84	1,24	1,65	0,67	1,03	1,41	0,55	0,86	1,20
	C	0,01	0,01	0,01	0,24	0,36	0,49	0,40	0,62	0,85
	G	0,11	0,17	0,22	0,23	0,35	0,48	0,32	0,50	0,70
	KL	0,01	0,01	0,02	0,31	0,47	0,63	0,52	0,79	1,09
3	H/300	0,08	0,12	0,16	0,06	0,09	0,13	0,05	0,08	0,11
	H/500	0,14	0,20	0,27	0,10	0,15	0,21	0,08	0,13	0,18
	τ	1,38	2,05	2,72	1,11	1,71	2,34	0,92	1,44	2,00
	C	0,01	0,02	0,02	0,39	0,59	0,79	0,66	1,01	1,39
	G	0,18	0,28	0,37	0,38	0,58	0,79	0,54	0,84	1,16
	KL	0,02	0,02	0,02	0,50	0,76	1,02	0,85	1,30	1,80
4	H/300	0,11	0,17	0,23	0,08	0,13	0,18	0,07	0,11	0,15
	H/500	0,19	0,29	0,38	0,14	0,22	0,30	0,12	0,18	0,25
	τ	1,91	2,85	3,79	1,56	2,40	3,28	1,29	2,01	2,79
	C	0,01	0,02	0,03	0,53	0,81	1,10	0,91	1,40	1,94
	G	0,26	0,39	0,51	0,53	0,81	1,11	0,75	1,17	1,62
	KL	0,02	0,03	0,03	0,69	1,04	1,42	1,17	1,81	2,50

Dass die Querpressung der Koppelleiste mehr und mehr maßgebend wird hat auch damit zu tun, dass ihre Auslastung mit der Druckkraft im Klotz verknüpft ist. Mit zunehmendem Tragmechanismus „Druckdiagonale“ (bei „Verband“ und „Fassade“) ist es also selbsterklärend,

wohin der Kraftfluss verläuft. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit [16]. Hier zeigte sich bei Versuchskörpern, dass bei kurzer Lasteinwirkungsdauer ebenfalls der Bruch des Fügepartners Holz zum maßgebenden Versagenskriterium wurde.

Zwar wirkt der Tragmechanismus „Druckdiagonale“ zu einem nicht unerheblichen Teil mit, dennoch überwiegt der Tragmechanismus „Schubfeld“ aufgrund des steiferen Klebstoffs nolax C44.8508. Dies führt bei den beiden Konstruktionsvarianten auch dazu, dass die Schubverklebung mehr Last an sich zieht, relativ bald ausgelastet und somit überbeansprucht wird. Dafür profitiert die Wandsteifigkeit enorm von dem wesentlich höheren Schubmodul des silantermierten Zwei-Komponenten Epoxid nolax C44.8508. Im direkten Vergleich zum Referenzsystem (Konstruktionsvariante A) spielen die Gebrauchstauglichkeitsnachweise zufolge kurzfristiger Windbeanspruchung sogar nur mehr eine untergeordnete Rolle. Das Problem der neuen Konstruktionsvarianten ist also primär nicht mehr die geringe Wandsteifigkeit der HGV-Elemente, sondern zunehmend die Tragfähigkeit der einzelnen Bauteilkomponenten – und hier im Speziellen jene der Schubverklebung, Verklotzung und Koppelleiste. Wie Abschnitt 4.2.5 ausreichend schildert und ebenfalls dem Nachweisverfahren abgeleitet werden kann, ist ein Beulversagen vorerst auszuschließen.

Der nächste Schritt besteht darin, mit diesen Ergebnissen die Grenztragfähigkeit $H_{d, kurz, zul}$ der HGV-Elemente zufolge kurzfristiger Horizontallast zu eruiieren. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge ist jedoch jede Konstruktions- und Kopplungsvariante einzeln zu betrachten und der Kraftfluss individuell nachzuverfolgen. Dies erfolgte im Zuge der Bearbeitung dieser Arbeit parallel zu den Nachweisverfahren. Sehr anschaulich wird das Thema der Traglast mit Tab. 4.4 sowie Tab. 4.6 und Tab. 4.8, in denen die Bemessungshorizontallasten $H_{d, kurz, vorh}$ der FE-Rechenmodelle aufgelistet sind. Erneut rot hervorgehoben sind jene Werte, wo mindestens ein Tragsicherheitsbeziehungswise Gebrauchstauglichkeitsnachweis nicht erfüllt werden konnte. Relativ schnell wird klar, welche Traglast $H_{d, kurz, zul}$ als Grenztragfähigkeit heranzuziehen ist. Beispielsweise sind für das „Einzelelement“ der Konstruktionsvariante A mit $H_{d, kurz, vorh} = 3,59kN$ noch alle Nachweise erfüllt. Dies kann auch in Anhang 4.2.5 überprüft werden. Mit $H_{d, kurz, vorh} = 5,39kN$ wird der Tragsicherheitsnachweis der Schubverklebung nicht mehr eingehalten. Demzufolge ergibt sich mit $H_{d, kurz, vorh} = H_{d, kurz, zul} = 4,80kN$ jene Traglast, bei der ein Versagen der Schubverklebung gerade noch vermieden wird. Der Quotient aus Traglast und Wandsteifigkeit (Tab. 4.3) stellt zusätzlich noch die zulässige Grenzverformung dieser HGV-Konstruktion dar: $u_{zul} = \frac{H_{d, kurz, zul}}{K_{kurz}} = \frac{4,80}{10,87} = 0,44cm$. Womit auch gezeigt sei, dass die „aufnehmbare Horizontalkraft“ H weit über der Traglast $H_{d, kurz, zul}$ liegen kann. Die Begriffsdefinition hierzu findet sich in Abschnitt 4.2.2.

In Tab. 4.13 sind abschließend die wesentlichsten Parameter der untersuchten HGV-Elemente für kurzfristige Lasteinwirkung zusammengefasst: Die Wandsteifigkeit K_{kurz} nach Tab. 4.3 sowie die Traglast $H_{d, kurz, zul}$ mit zugehöriger Grenzverformung u_{zul} und die Angabe jener Bauteilkomponente, bei der als Erstes Versagen festgestellt werden konnte. Unter kritischer Betrachtung fällt auf, dass bei der Konstruktionsvariante A die Traglast der Kopplungsvariante „Verband“ über jener der „Fassade“ liegt. Dass das „Einzelelement“ sowie die „Fassade“ der Konstruktionsvariante B.1 trotz reduzierter Glasstärke widerstandsfähiger sind als selbige bei Konstruktionsvariante B, scheint vorerst auch fragwürdig. Hinter diesen Fällen steckt eine sehr relevante Erkenntnis: Am Beginn dieses Abschnitts wurde ausführlich erläutert, dass je nach Verhältnis der Moduli der verwendeten Klebstoffe unterschiedliche Lastanteile auf die Schubverklebung und Verklotzung anfallen. Bei HGV-Konstruktionen mit überwiegendem Tragmechanismus „Schubfeld“ wird deshalb natürlich der Tragsicherheitsnachweis der Schubverklebung maßgebend werden. Selbiger Zusammenhang gilt auch für den Tragmechanismus „Druckdiagonale“. Hier wird der Tragsicherheitsnachweis der Verklotzung und damit einhergehend die Querpressung der Koppelleiste zum Grenzkriterium. Abgesehen vom Verhältnis der Moduli spielt jedoch auch das

Verhältnis der Festigkeiten der jeweiligen Bauteilkomponenten eine Rolle für die Traglast eines HGV-Elements. Diese komplexen Zusammenhänge zeigen sich beispielsweise bei der „Fassade“ von Konstruktionsvariante B beziehungsweise B.1. Gemäß Tab. 4.3 beträgt der Lastanteil der Schubverklebung bei der Konstruktionsvariante B 57,4% und ist somit geringer als jener der Konstruktionsvariante B.1 mit 63,4%. Das erklärt auch, weshalb in Tab. 4.13 für die Traglast der „Fassade“ von Konstruktionsvariante B die Koppelleiste zum maßgebenden Versagenskriterium wird. Erst durch den höheren Lastanteil der Schubverklebung kann die Festigkeit des Klebstoffs weiter ausgenutzt werden. Schließlich überschreitet Konstruktionsvariante B.1 auch die Traglast der Konstruktionsvariante B. Die stärkere Auslastung der höher beanspruchten Schubverklebungen kann auch Tab. 4.11 beziehungsweise Tab. 4.12 direkt abgelesen werden. Das selbe Prinzip trifft auch bei den beiden anderen oben erwähnten Fällen zu.

Tab. 4.13: Wandsteifigkeit K_{kurz} in [kN/cm] sowie Grenztragfähigkeit $H_{d,kurz,zul}$ in [kN] und Grenzverformung u_{zul} in [mm] bei kurzfristiger Lasteinwirkung

		Einzelement	Verband	Fassade
Variante A	$K_{kurz} =$	10,87kN/cm	80,86kN/cm	183,88kN/cm
	$H_{d,kurz} =$	4,80kN	9,37kN	8,70kN
	$u_{zul} =$	4,4mm	1,1mm	0,5mm
	Versagen	Schubverklebung	Koppelleiste	Koppelleiste
Variante B	$K_{kurz} =$	209,84kN/cm	305,59kN/cm	408,83kN/cm
	$H_{d,kurz} =$	12,60kN	17,30kN	19,40kN
	$u_{zul} =$	0,6mm	0,6mm	0,5mm
	Versagen	Schubverklebung	Schubverklebung	Koppelleiste
Variante B.1	$K_{kurz} =$	203,51kN/cm	289,21kN/cm	357,59kN/cm
	$H_{d,kurz} =$	12,90kN	16,95kN	20,95kN
	$u_{zul} =$	0,6mm	0,6mm	0,6mm
	Versagen	Schubverklebung	Schubverklebung	Schubverklebung

Mit den Grenztragfähigkeiten $H_{d,kurz,zul}$ und den kurzfristigen Bemessungshorizontallasten $H_{d,kurz,vorh}$ aus Abschnitt 4.2.4 lässt sich schließlich die Gesamtausnutzung der Konstruktionsvarianten je nach Kopplungsvariante beziehungsweise Grundrissverhältnis und Geschosszahl errechnen. Die Ergebnisse von Tab. 4.14 sowie Tab. 4.15 und Tab. 4.16 stimmen relativ genau mit den Maximalwerten aus Tab. 4.10 beziehungsweise Tab. 4.11 und Tab. 4.12 überein, liegen jedoch überschlagsmäßig auf der sicheren Seite. Das kommt daher, weil erst durch die Anwendung des Ersatzfedermodells [12] diese Bemessungshorizontallasten auf die Tragmechanismen „Schubfeld“ beziehungsweise „Druckdiagonale“ aufgeteilt werden, wodurch nicht mehr die volle Last auf eine Bauteilkomponente anfällt und ein realistischeres Ausnutzungsbild entsteht. Dennoch wurde die Darstellungsart in den folgenden Tabellen gewählt, weil diesen einfacher zu entnehmen ist, in welcher Größenordnung sich die Gesamtausnutzung bewegt.

Zusammengefasst geht aus den Ergebnissen hervor, dass lediglich das HGV-Element der Konstruktionsvariante B.1 in Tab. 4.16 mit der Kopplungsvariante „Fassade“ die Aussteifung eines dreigeschossigen Holzskelettbaus unter Windbelastung ermöglicht. Beim Grundrissverhältnis 1:1 ergibt sich dabei die notwendige Länge der gesamten aussteifenden HGV-Scheibe mit 30m. In Übereinstimmung mit Konstruktionsvariante B in Tab. 4.15 sind für zwei Geschosse nur die günstigeren Grundrissverhältnisse zulässig. Bei einem Geschoss können diese Konstruktionsvarianten sehr flexibel eingesetzt werden. Betrachtet man hingegen die Ergebnisse der Konstruktionsvariante A (Referenzsystem zu [18]), ist in Tab. 4.14 leicht ersichtlich, dass die Belastung bereits bei zwei

Geschossen teils deutlich zu hoch ist und Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise nicht mehr erfüllt werden können. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist diese Konstruktionsvariante deshalb nur für eingeschossige Holzskelettbauten zu empfehlen.

Tab. 4.14: Gesamtausnutzung der Konstruktionsvariante A in [%]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	75%	112%	149%	45%	73%	108%	49%	81%	120%
2	224%	337%	449%	134%	220%	324%	147%	243%	361%
3	374%	562%	749%	224%	367%	539%	245%	405%	602%
4	524%	786%	1048%	314%	514%	755%	343%	567%	843%

Tab. 4.15: Gesamtausnutzung der Konstruktionsvariante B in [%]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	28%	43%	57%	22%	34%	46%	20%	32%	44%
2	86%	128%	171%	66%	101%	139%	61%	95%	133%
3	143%	214%	285%	109%	169%	232%	101%	158%	221%
4	199%	299%	399%	153%	237%	325%	141%	222%	309%

Tab. 4.16: Gesamtausnutzung der Konstruktionsvariante B.1 in [%]

Geschoss	Einzelement			Verband			Fassade		
	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	28%	42%	56%	22%	34%	47%	18%	29%	40%
2	84%	125%	167%	67%	103%	141%	55%	86%	120%
3	139%	209%	279%	112%	172%	235%	92%	144%	200%
4	195%	293%	390%	156%	240%	329%	129%	202%	281%

Allerdings ist ein sehr positiver Aspekt in den Vordergrund getreten: Durch die Kopplung, aber auch durch die Verwendung des steiferen und höherfesten Klebstoffs nolax C44.8508, ist eine enorme Erhöhung der Wandsteifigkeit einhergegangen. Zum Einen gelingt es den HGV-Elementen somit, eine ausreichende „aufnehmbare Horizontalkraft“ H (Definition siehe Abschnitt 4.2.2) für die Gebäudeaussteifung zu aktivieren. Womit zum Anderen schließlich ihre Verformungen derartig reduziert werden, dass das Materialversagen der Bauteilkomponenten zum maßgebenden Versagenkriterium wird. Um die „maximal zulässige Horizontalkraft“ der HGV-Elemente – hier auch als Grenztragfähigkeit $H_{d, kurz, zul}$ bezeichnet – weiter steigern zu können, ist fortan in erster Linie also die Traglast einzelner Bauteilkomponenten zu erhöhen. Erste Ansätze diesbezüglich finden sich in [18], wo eine Steigerung von 50-100% empfohlen wird. Um herauszufinden welche Adaptionen für eine solche Steigerung notwendig wären, wird in Abschnitt 4.3.3 folgende Zielsetzung verfolgt: Die Konstruktionsvariante B wird dahingehend optimiert, eine Aussteifung von viergeschossigen Gebäuden zu ermöglichen.

4.3.2 Bemessungsdiagramm zur Gebäudeaussteifung

Dass zwischen Wandsteifigkeit und Grenztragfähigkeit komplexe Zusammenhänge bestehen, wurde in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich dargelegt. Bei Baubeteiligten, die über kein fundiertes mechanisches Wissen verfügen, kann dies gleich zu Beginn eine eher abschreckende Wirkung erzielen. Die Entscheidung gegen den baupraktischen Einsatz der HGV-Elemente könnte sogar das Resultat daraus sein. In weiterer Folge würde die wirtschaftliche Akzeptanz der HGV-Elemente als aussteifende Wandscheiben nicht gerade vorangetrieben. Ziel dieses Abschnitts ist es deshalb, die Auswahl der statisch notwendigen HGV-Elemente zur Gebäudeaussteifung bei kurzfristiger Lasteinwirkung zu vereinfachen. Aus diesem Grund wird eine grafische Bemessungshilfe für die Vorbemessung erarbeitet.

Den Bemessungsdiagrammen liegen die Annahmen dieser Fallstudie zu Grunde. Im Sinne der Klarheit werden diese nochmals ergänzend aufgelistet:

1. Das Ersatzfedermodell [12] wurde in Abschnitt 4.2.2 dahingehend angepasst, dass bei der Kopplung von HGV-Elementen gewisse Federn keine Nachgiebigkeit ($C = \infty$) ausbilden und somit entfallen konnten.
2. Für die Ermittlung der Grenztragfähigkeit von HGV-Elementen nach Abschnitt 4.3.1 trifft grundsätzlich das Berechnungs- und Bemessungskonzept [12] zu. Außerdem gelten nach Abschnitt 4.2.5 folgende Grundannahmen:
 - a) Es tritt ausschließlich eine reine Scheibenbeanspruchung infolge kurzfristiger Horizontallast auf. Eine Plattenbeanspruchung wird ausgeschlossen. Die Klebstoffe haben nur das Eigengewicht der Glasscheibe abzutragen und keine allfälligen Vertikallasten aus der Deckenebene.
 - b) Es gibt keine Zusatzbelastung durch Gebäudeschrägstellung beziehungsweise Zwangsbeanspruchung bei Temperaturänderung.
 - c) Das zeitabhängige Materialverhalten (langfristige Einwirkungsdauer) der Bauteilkomponenten bleibt unberücksichtigt.
3. Die maximal zulässige kurzfristige Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ in Design, die den Bemessungsdiagrammen abgelesen werden kann, gilt für symmetrische und statisch bestimmte Aussteifungssysteme bei denen die HGV-Elemente gleichmäßig angeordnet werden. Mit den ergänzenden Annahmen nach Abschnitt 4.2.4:
 - a) In den FE-Rechenmodellen wurden „starre Deckenscheiben“ und „starre Deckenschlüsse“ der HGV-Scheiben modelliert. Dadurch kommt es zu einer gleichmäßigen und vollständigen Verteilung der resultierenden Horizontalkräfte zufolge Wind auf die HGV-Elemente. Und zwar nach dem Verhältnis ihrer jeweiligen Wandsteifigkeiten.
 - b) Ungleichmäßige Anordnungen der HGV-Elemente beziehungsweise ein statischer Ausfall derselben wird ausgeschlossen.
 - c) Es wird lediglich das Aussteifungspotential der HGV-Scheiben abgebildet und nicht jenes, das sich möglicherweise durch andere mitwirkenden Tragwerksteilen ergeben könnte.

Listenpunkt drei legt nahe, das statisch bestimmte Aussteifungssystem in einer Handrechnung aufzulösen. Mit den oben genannten Annahmen ist es also möglich, die kurzfristige Bemessungshorizontallast je HGV-Element ohne FE-Rechenmodell zu eruiieren. Dass sich die resultierende Windlast je nach Wandsteifigkeit der einzelnen HGV-Elemente prozentual auf

diese aufteilt, soll im folgenden Rechenbeispiel deutlich werden. Wie üblich wird Konstruktionsvariante A im „Verband“ betrachtet, angeordnet im viergeschossigen Gebäude mit Grundrissverhältnis 1:2 aus Abb. 4.14. Die resultierende Horizontalkraft zufolge Wind für eine der beiden Fassadenebenen wurde mit $W_d = 302kN$ in Abschnitt 4.2.4 bereits ermittelt. Die resultierende Wandsteifigkeit der gesamten HGV-Scheibe im Erdgeschoss (sechs HGV-Elemente) ergibt sich unter Zuhilfenahme von Tab. 4.13 ebenfalls sehr rasch. Berücksichtigt werden müssen die vier HGV-Elemente im „Verband“ und zwei „Einzelemente“ als äußere Abgrenzungen: $K_{kurz,Scheibe} = 2 * K_{kurz,Einzelement} + 4 * K_{kurz,Verband} = 2 * 10,87 + 4 * 80,86 = 345,18kN/cm$. Die Verformung, die sich bei dieser HGV-Scheibe einstellen wird, zeigt der Quotient: $u_{vorh,Scheibe} = \frac{W_d}{K_{kurz,Scheibe}} = \frac{302}{345,18} = 0,87cm$. Abschließend lässt sich die kurzfristige Bemessungshorizontallast für das HGV-Element im „Verband“ über dessen Wandsteifigkeit ableiten: $H_{d,kurz,vorh} = K_{kurz,Verband} * u_{vorh,Scheibe} = 80,86 * 0,87 = 70,74kN$. Die Plausibilität der Ergebnisse bestätigt das FE-Rechenmodell in Abb. 4.14 sowie die Ergebnistabellen Tab. 4.4 und Tab. 4.5.

Dementsprechend ist es auch möglich, über eine Rückrechnung die maximal zulässige Horizontallast, die eine HGV-Scheibe aufnehmen kann, zu eruieren. Diesbezüglich sind lediglich die zulässigen Traglasten $H_{d,kurz,zul}$ der entsprechenden HGV-Elemente dieser Wandscheibe nach Tab. 4.13 aufzusummieren um die gesamte Scheibentraglast zu erhalten. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die kleinste Grenzverformung bei einer Anordnung der HGV-Elemente im „Verband“ oder „Fassade“ auch für die Kopplungsvariante „Einzelement“ maßgebend wird ($u_{zul} = u_{vorh,Scheibe}$). Beispielsweise trifft dies für Konstruktionsvariante A „Einzelement“ zu. Ein solches HGV-Element darf nur eine Verformung von $u_{zul} = 1,1mm$ erfahren, damit seine Traglast nicht überschritten wird. Nach Abb. 4.13 haben die Verformungen aller HGV-Elemente der HGV-Scheibe ident zu sein, damit Gleichgewicht herrscht. Womit ein äußeres HGV-Element statt $H_{d,kurz,zul} = 4,80kN$ also nur $H_{d,kurz} = K_{kurz} * u_{vorh,Scheibe} = 10,87 * 0,11 = 1,26kN$ aufnimmt und zur Aussteifung beisteuert. Je geringer die Wandsteifigkeit der äußeren „Einzelemente“ beziehungsweise die Grenzverformung der Wandscheibe wird, umso mehr Last fällt bei den gekoppelten HGV-Elementen an. So erklären sich endlich die Abweichungen der kurzfristigen Bemessungshorizontallasten $H_{d,kurz,vorh}$ zwischen der Konstruktionsvariante A (Tab. 4.4) und Konstruktionsvariante B (Tab. 4.6).

Führt man das Rechenbeispiel fort, so kann diese HGV-Scheibe – bestehend aus sechs HGV-Elementen mit jeweils 2,10m breite, wovon vier im „Verband“ angeordnet sind – schließlich maximal eine Horizontalkraft $H_{d,kurz,max} = 2 * 1,26 + 4 * 9,37 = 40,00kN$ aufnehmen, bevor einzelne Bauteilkomponenten versagen. Die beiden äußeren HGV-Elemente sind lediglich zu $\frac{H_{d,kurz}}{H_{d,kurz,zul}} = \frac{1,26}{4,80} * 100 \approx 27\%$ ausgelastet. Die Scheibentraglast kann auch bezogen auf ihre Gesamtlänge dargestellt werden: $\frac{H_{d,kurz,max}}{6*2,10} \frac{40,00}{6*2,10} = 3,17kN/lfm$. Wie angesprochen, stellt sich am Beispiel dieser HGV-Scheibe die Grenzverformung $u_{vorh,Scheibe} = 1,1mm$ ein.

In Übereinstimmung mit diesem Rechenbeispiel werden grafische Bemessungsdiagramme entwickelt, denen die Scheibentraglast je nach Konstruktions- und Kopplungsvarianten bis zu einer Länge der Wandscheibe von 50m abgelesen werden kann. Indem weitere HGV-Elemente hinzugefügt werden, steigt auch die Grenztragfähigkeit der HGV-Scheibe je Fassadenebene. Der unterschiedliche Aufbau der drei HGV-Konstruktionen ist Tab. 4.1 zu entnehmen. In den folgenden Seiten stellen Abb. 4.15 sowie Abb. 4.17 und Abb. 4.19 die maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallasten $H_{d,kurz,max}$ als Designwerte pro Laufmeter Wandscheibe dar. Hingegen können Abb. 4.16 sowie Abb. 4.18 und Abb. 4.20 die maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallasten $H_{d,kurz,max}$ als Designwerte direkt abgelesen werden. Auch die Grenzverformungen $u_{vorh,Scheibe}$, die sich bei den Wandscheiben einstellen werden, sind diesen Bemessungsdiagrammen zu entnehmen.

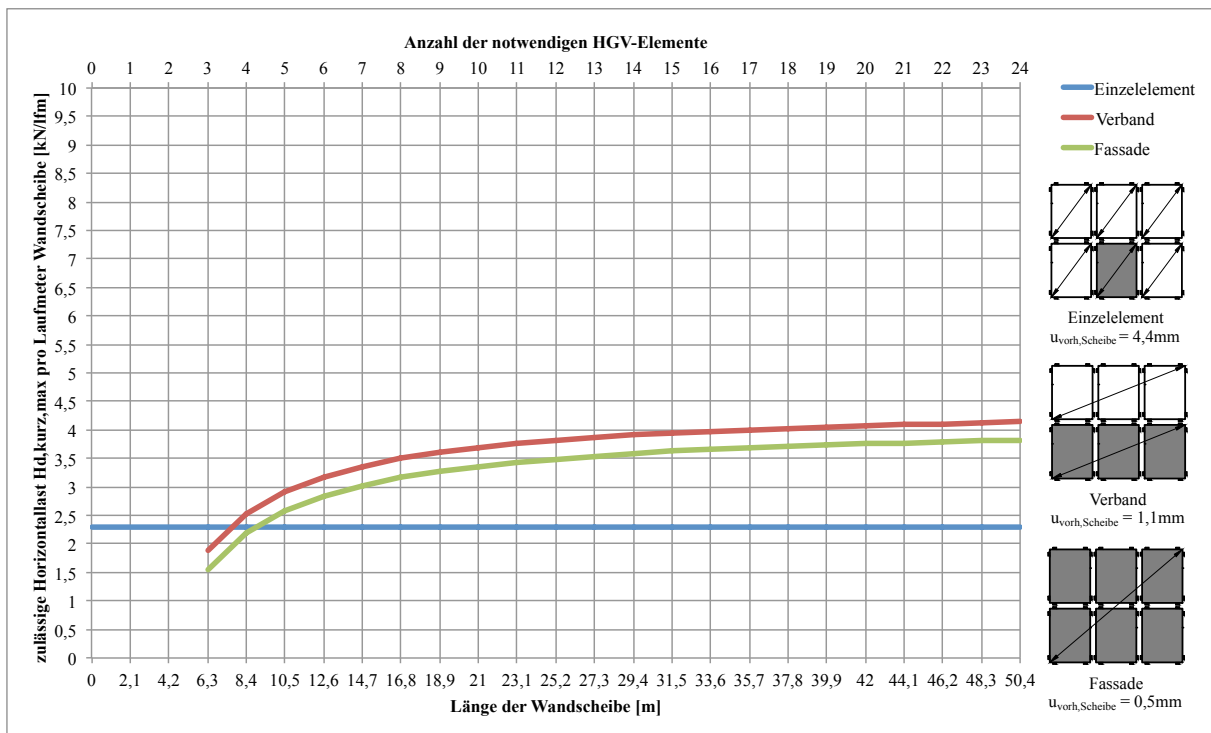


Abb. 4.15: Maximal zulässige kurzfristige Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ als Designwert pro Lauflmeter Wandscheibe – Konstruktionsvariante A

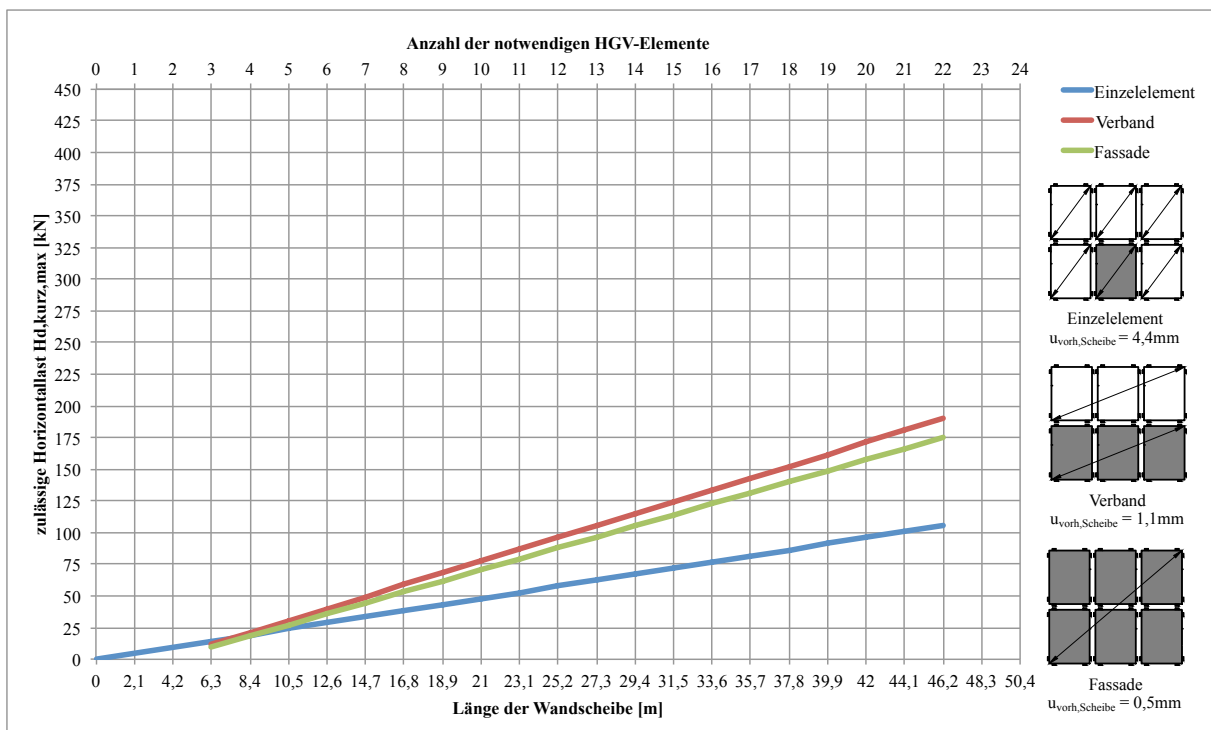


Abb. 4.16: Maximal zulässige kurzfristige Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ als Designwert – Konstruktionsvariante A

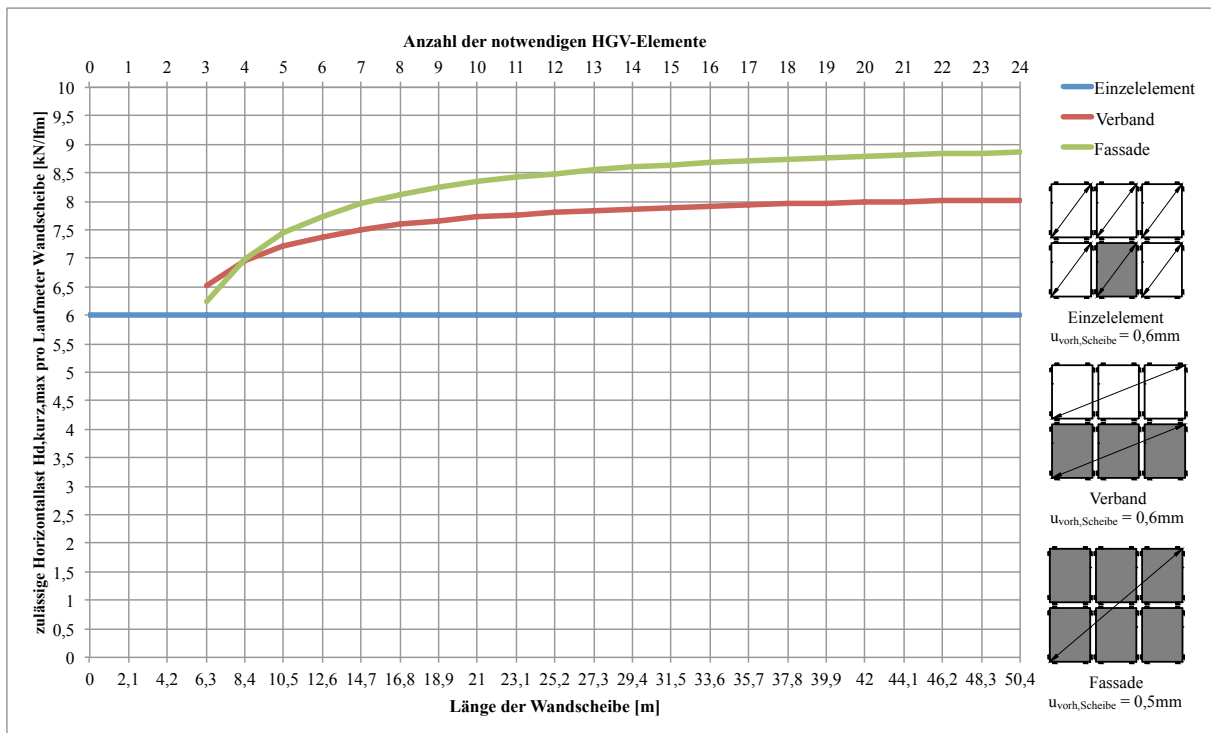


Abb. 4.17: Maximal zulässige kurzfristige Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ als Designwert pro Laufmeter Wandscheibe – Konstruktionsvariante B

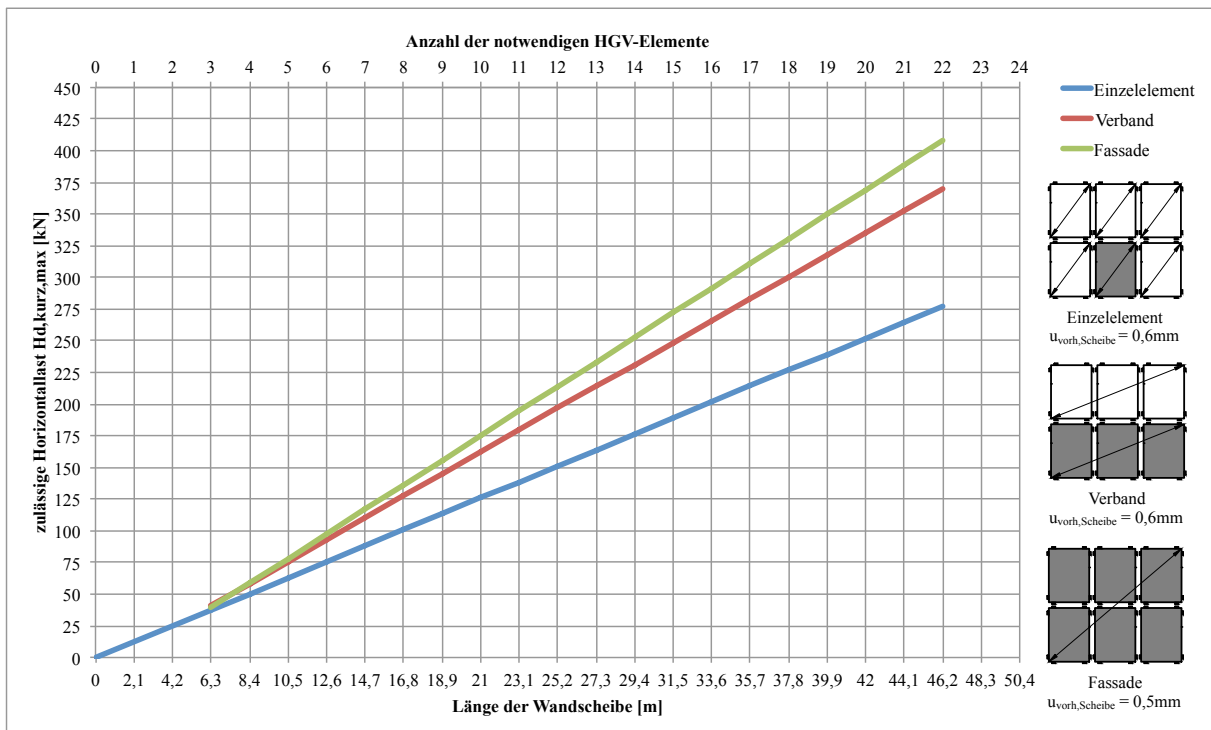


Abb. 4.18: Maximal zulässige kurzfristige Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ als Designwert – Konstruktionsvariante B

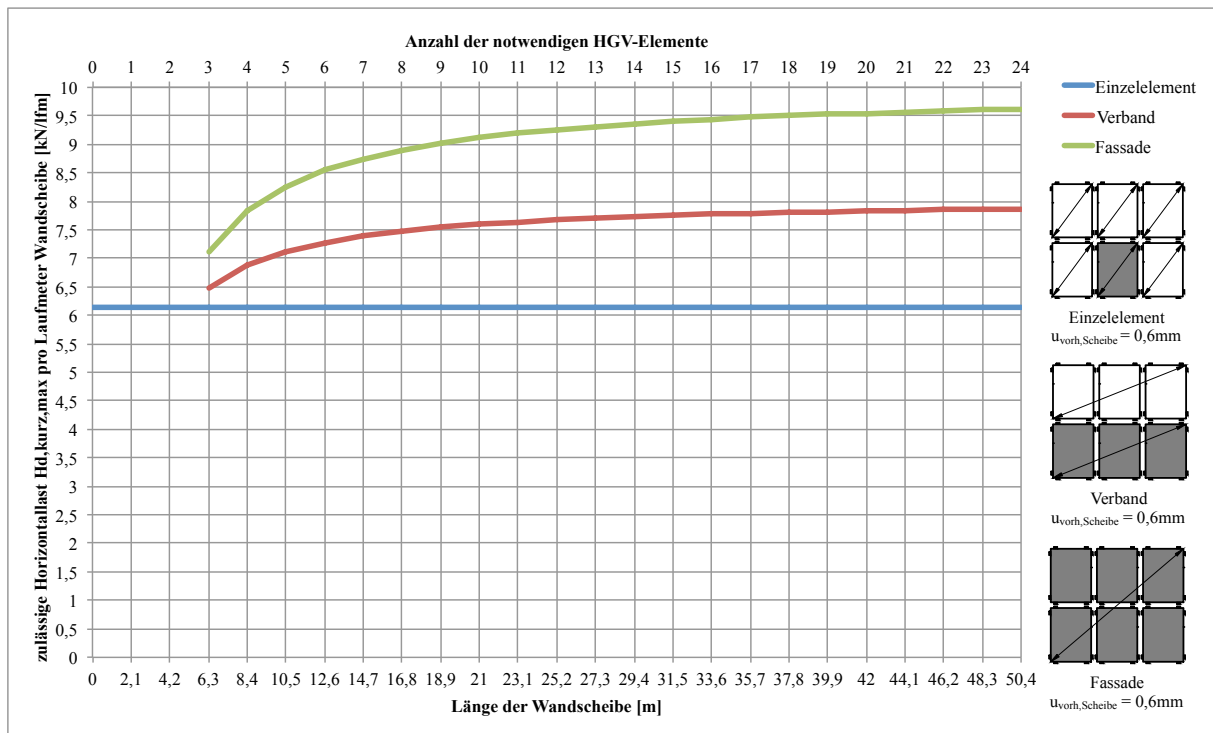


Abb. 4.19: Maximal zulässige kurzfristige Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ als Designwert pro Laufmeter Wandscheibe – Konstruktionsvariante B.1

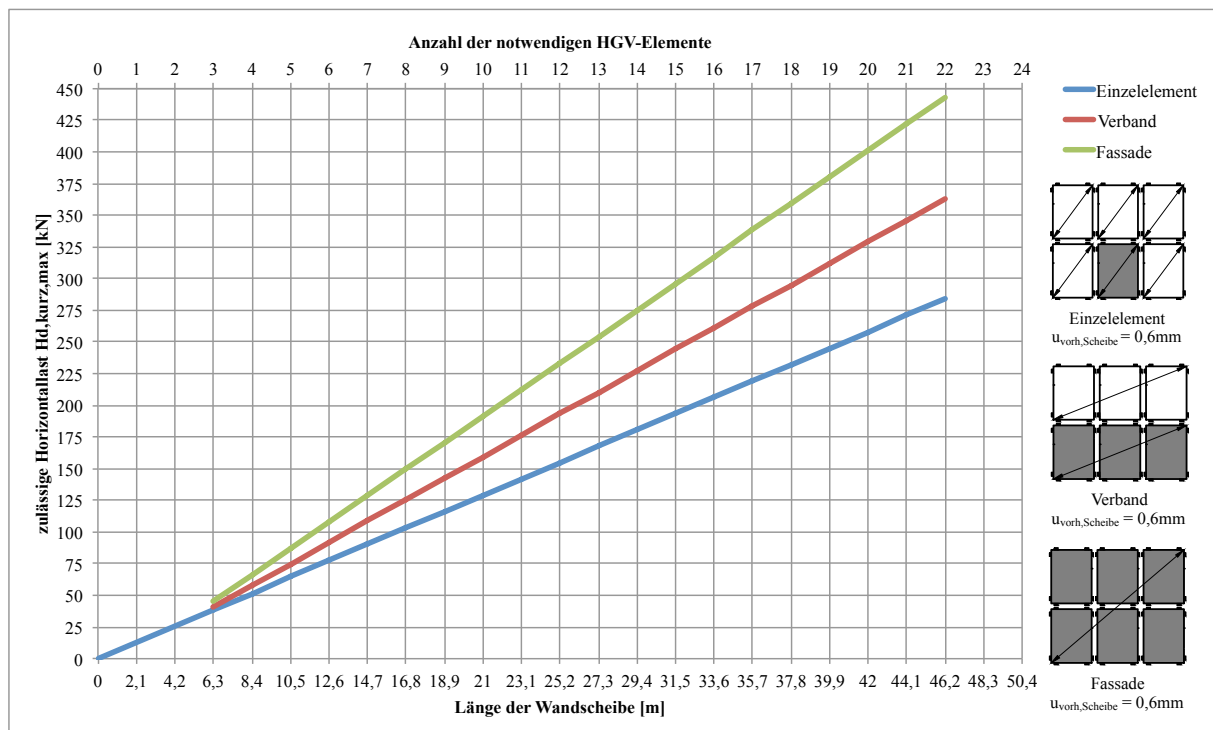


Abb. 4.20: Maximal zulässige kurzfristige Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ als Designwert – Konstruktionsvariante B.1

Bei allen Bemessungsdiagrammen fällt auf, dass die Bemessungskurven der Kopplungsvarianten „Verband“ und „Fassade“ erst ab einer Wandscheibenlänge von 6,3m beginnen. Das hat mit dem Ersatzfedermodell [12] und der Nachgiebigkeit von Federn zu tun, wie Abschnitt 4.2.2 beschreibt. Diese Kopplungsvarianten müssen dabei mindestens von zwei HGV-Elementen am äußeren Rand begrenzt werden, um ihre Wirkung entfalten zu können. Sofort ins Auge sticht auch der exponentielle Verlauf der Bemessungskurven in Abb. 4.15 sowie Abb. 4.17 und Abb. 4.19. Wirft man nochmal einen Blick auf die Herleitung, die den Bemessungsdiagrammen zugrunde liegt, erkennt man den Zusammenhang sehr rasch. Mit zunehmender Anzahl der HGV-Elemente n in einer HGV-Scheibe, wird der Grenzwert der maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ bezogen auf die Länge der Wandscheibe erreicht bei $n \rightarrow \infty$ mit $\frac{H_{d, kurz, max}}{2,10}$. Beispielsweise stellt sich dieser bei der Konstruktionsvariante B im „Verband“ mit $\frac{17,30}{2,10} = 8,24 kN/lfm$ ein. Womit schließlich den Bemessungsdiagrammen auch entnommen werden kann, ab welcher Wandscheibenlänge keine signifikante Zunahme des Aussteifungspotentials zu erwarten ist. Um bei dem Beispiel zu bleiben, würde sich bei Konstruktionsvariante B im „Verband“ ab etwa 40m kaum noch eine Verbesserung im Aussteifungspotential ergeben.

Außerdem bemerkt man bei der Konstruktionsvariante A auf Seite 86, dass die Wandscheiben „Verband“ und „Fassade“ bis zu einer Wandscheibenlänge von etwa 8m weniger Tragvermögen aufweisen, als eine Wandscheibe aus „Einzelelementen“. Wie bereits mehrfach erwähnt, steckt folgendes Prinzip dahinter: Es kommt zu einer gleichmäßigen und vollständigen Verteilung der resultierenden Horizontalkräfte zufolge Wind auf die einzelnen HGV-Elemente der HGV-Scheibe, und zwar nach dem Verhältnis ihrer jeweiligen Wandsteifigkeiten. Damit Gleichgewicht herrscht, haben die Verformungen der einzelnen HGV-Elemente ident zu sein (Abb. 4.13). Aufgrund der relativ geringen Wandsteifigkeit des „Einzelelements“ der Konstruktionsvariante A ist hier jedoch mehr Verformung notwendig ($u_{zul} = 4,4mm$ gemäß Tab. 4.13), um eine volle Mitwirkung dieses HGV-Elements zu erzielen. Es wird aber vorausgesetzt, dass keines der einzelnen HGV-Elemente einer HGV-Scheibe versagen darf. Aus diesem Grund stellt sich bei der Anordnung im „Verband“ beispielsweise die Grenzverformung $u_{zul} = u_{vorh, Scheibe} = 1,1mm$ für alle HGV-Elemente ein. Was schließlich erklärt, weshalb die beiden äußeren HGV-Elemente nur zu einem Bruchteil ihrer Grenztragfähigkeit ausgelastet werden. Dies geht jedoch auch zu Lasten der maximal zulässigen Horizontalkraft $H_{d, kurz, max}$ einer Wandscheibe, was die Bemessungsdiagramme ebenfalls abbilden.

Zu guter Letzt sei noch unbedingt ein weiteres Phänomen erläutert, welches die Bemessungsdiagramme ansonsten in ein kritisches Licht rücken würde. Es geht um Abb. 4.15, wo die Scheibentraglast der Wandscheibe im „Verband“ über jener der „Fassade“ liegt. Ein ähnliches Bild erkennt man auch im direkten Vergleich zwischen Abb. 4.17 und Abb. 4.19, wo die Scheibentraglast von Konstruktionsvariante B.1 trotz der reduzierten Glasstärke jene der Konstruktionsvariante B übersteigt. Das trifft hier auf das „Einzelelement“ und „Fassade“ zu. Die komplexen Zusammenhänge zwischen den Tragmechanismen „Schubfeld“ beziehungsweise „Druckdiagonale“ und den Versagenskriterien sind auf Seite 81 im Zusammenhang mit Tab. 4.13 ausführlich dargelegt und werden hier nicht erneut bearbeitet.

Zum Abschluss dieses Abschnitts sind noch zwei Bemessungsbeispiele anhand der Konstruktionsvariante B.1 in Abb. 4.21 und Abb. 4.22 angeführt, die zeigen, wie die Bemessungsdiagramme praktisch Anwendung finden können.

4.3.2.1 Bemessungsbeispiel zur Ermittlung der maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallast als Designwert pro Laufmeter Wandscheibe

Dieses Bemessungsbeispiel gilt für Abb. 4.15 sowie Abb. 4.17 und Abb. 4.19, denen die maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallasten $H_{d, kurz, max}$ als Designwerte pro Laufmeter Wandscheibe abgelesen werden können. Es sind die Annahmen auf Seite 84 zu beachten, die diesen Bemessungsdiagrammen zu Grund liegen.

1. Die Wandscheibenlänge beträgt 31,5m und findet sich auf der horizontalen Achse unten (Abszisse unten).
2. Mit diesem Wert ergibt sich nun ein Schnittpunkt mit einer der drei Bemessungskurven. Man wählt etwa Kopplungsvariante „Verband“.
3. Schließlich erhält man in der vertikalen Achse links (Ordinate) das Verhältnis der maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ als Designwert pro Laufmeter Wandscheibe zu $7,75kN/lfm$.
4. Über den Schnittpunkt mit der gewählten Bemessungskurve ergibt sich auch die Gesamtanzahl der notwendigen HGV-Elemente dieser HGV-Scheibe. Und zwar auf der horizontalen Achse oben (Abszisse oben). Es sind hier 15 HGV-Elemente mit einer Breite von 2,10m nebeneinander anzuordnen.
5. Die Grenzverformung, die sich bei dieser Wandscheibe einstellen wird, ist der Legende zu entnehmen: $u_{vorh, Scheibe} = 0,6mm$.

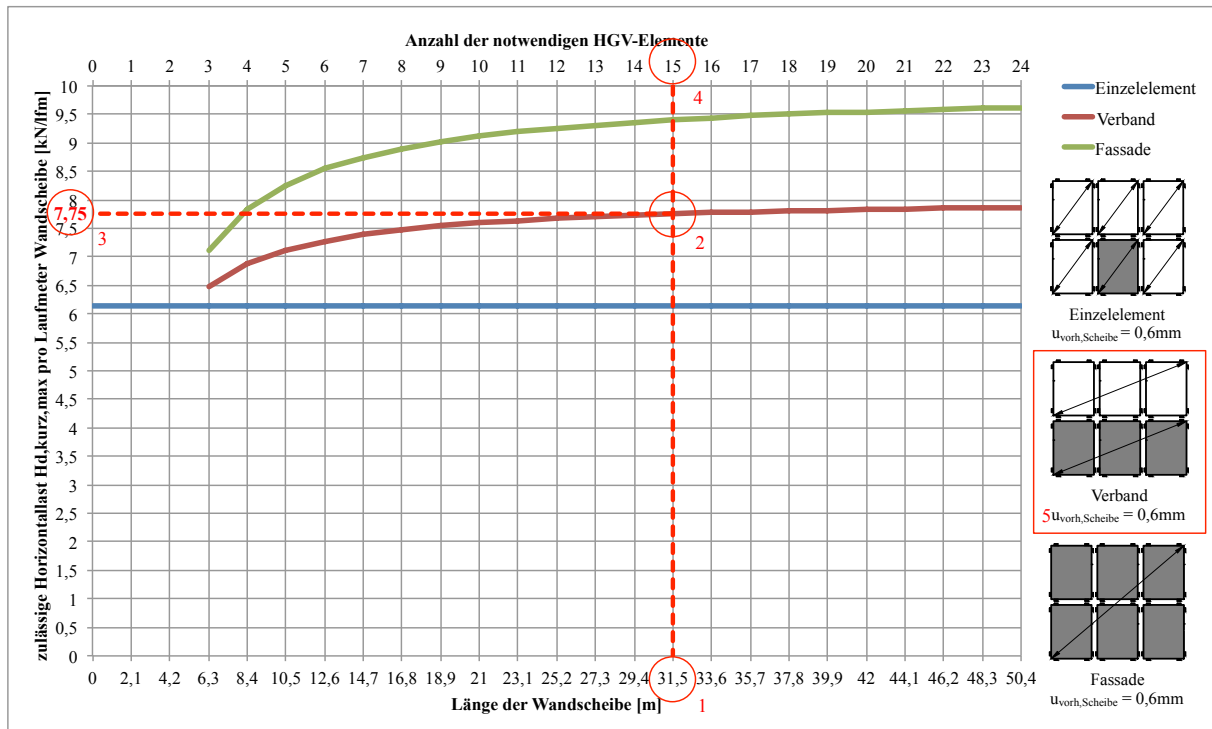


Abb. 4.21: Bemessungsbeispiel 1

4.3.2.2 Bemessungsbeispiel zur Ermittlung der maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallast als Designwert

Dieses Bemessungsbeispiel gilt für Abb. 4.16 sowie Abb. 4.18 und Abb. 4.20, denen die maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallasten $H_{d, kurz, max}$ als Designwerte direkt abgelesen werden können. Es sind die Annahmen auf Seite 84 zu beachten, die diesen Bemessungsdiagrammen zu Grund liegen.

1. Die Wandscheibenlänge beträgt 31,5m und findet sich auf der horizontalen Achse unten (Abszisse unten).
2. Mit diesem Wert ergibt sich nun ein Schnittpunkt mit einer der drei Bemessungskurven. Man wählt etwa Kopplungsvariante „Verband“.
3. Schließlich erhält man in der vertikalen Achse links (Ordinate) direkt den Designwert der maximal zulässigen kurzfristigen Horizontallast $H_{d, kurz, max} = 244kN$.
4. Über den Schnittpunkt mit der gewählten Bemessungskurve ergibt sich auch die Gesamtanzahl der notwendigen HGV-Elemente dieser HGV-Scheibe. Und zwar auf der horizontalen Achse oben (Abszisse oben). Es sind hier 15 HGV-Elemente mit einer Breite von 2,10m nebeneinander anzuordnen.
5. Die Grenzverformung, die sich bei dieser Wandscheibe einstellen wird, ist der Legende zu entnehmen: $u_{vorh, Scheibe} = 0,6mm$.

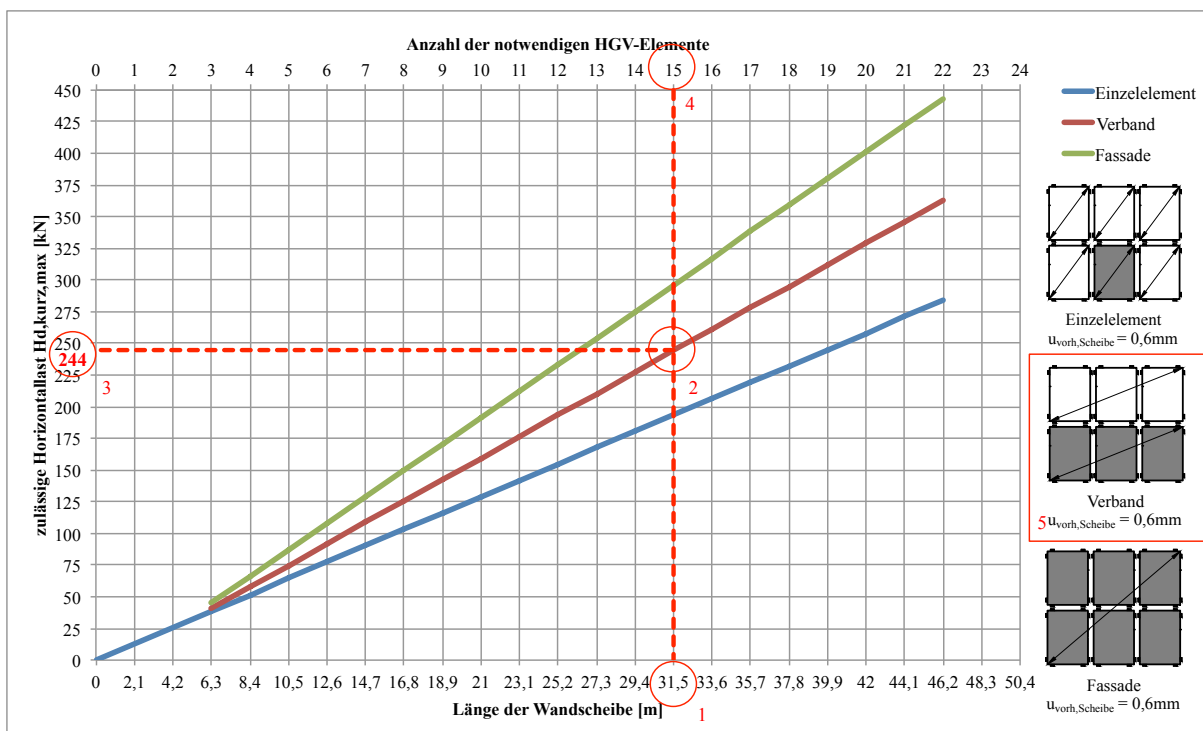


Abb. 4.22: Bemessungsbeispiel 2

4.3.3 Optimierungsverfahren

Die wesentlichen Ergebnisse der Fallstudie (Abschnitt 4.3.1) seien hier nochmal zusammengefasst: Durch die Kopplung aber auch durch die Verwendung des steiferen und höherfesten Klebstoffs nolax C44.8508, ist eine enorme Erhöhung der Wandsteifigkeit einhergegangen. Zum Einen gelingt es den HGV-Elementen somit, eine ausreichende „aufnehmbare Horizontalkraft“ H (Definition siehe Abschnitt 4.2.2) für die Gebäudeaussteifung zu aktivieren. Womit zum Anderen schließlich ihre Verformungen derartig reduziert werden, dass das Materialversagen der Bauteilkomponenten zum maßgebenden Versagenskriterium wird. Um die „maximal zulässige Horizontalkraft“ der HGV-Elemente – hier auch als Grenztragfähigkeit $H_{d, kurz, zul}$ bezeichnet – weiter steigern zu können, ist fortan in erster Linie also die Traglast einzelner Bauteilkomponenten zu erhöhen.

Dieser Abschnitt veranschaulicht die komplexen Zusammenhänge des Ersatzfedermodells [12] und verschafft Klarheit, die es immerhin braucht, um bei der Optimierung von HGV-Scheiben zur Gebäudeaussteifung an den richtigen Punkten ansetzen zu können. Dabei wird auch deutlich, welchen Einfluss diese Adaptionen einzelner Bauteilkomponenten aufeinander haben. Folgende Modifikationen sind notwendig, um eine Aussteifung von viergeschossigen Hochbauten aus Holz zu ermöglichen:

1. **Erhöhung der Klebstofffestigkeiten und Adaption der Klebstoffsteifigkeiten**
2. **Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte von den Klebstoffen**
3. **Adaption der Klebstoffgeometrien**

Konkret wird Konstruktionsvariante B (Tab. 4.1) optimiert, da hier mit einer Glasstärke von 12mm VSG (2x6mm) ein Beulversagen bei hoher Beanspruchung ausgeschlossen werden konnte. Die Ausnutzung der einzelnen Bauteilkomponenten findet sich in Tab. 4.11. Auf eine erneute Interpretation der Ergebnisse wird verzichtet und auf Abschnitt 4.3.1 verwiesen. Eine Übersicht der Materialeigenschaften des Regelbausystems zeigt außerdem Abschnitt 4.2.1 auf Seite 51. Nun wird lediglich ergänzend angegeben, an welcher Bauteilkomponente welche Modifikation durchgeführt wird:

- **Koppelleiste:** BFU
 - Druckfestigkeit parallel zur Faser (für eine Nenndicke von $b_{C,H} = 18mm$)
 $f_{c,||,18} = 27,20N/mm^2$
- **Schubverklebung:** optimiert
 - Verklebungsbreite $b_\tau = 18mm$
 - Schubfestigkeit $\tau_{k,\perp} = 5,44N/mm^2$
 - Schubmodul $G_\tau = 9,10N/mm^2$
- **Verklotzung:** optimiert
 - Klotzlänge $l_C = 300mm$
 - Klotzbreite glasseitig $b_{C,G} = 12mm$
 - Klotzbreite holzseitig $b_{C,H} = 18mm$
 - Druckfestigkeit $\sigma_{c,k} = 100N/mm^2$
 - Elastizitätsmodul $E_c = 2500N/mm^2$

Hinter diesen Annahmen liegen mehrere Grundgedanken. Die Ausnutzung der Bauteilkomponenten von Konstruktionsvariante B in Tab. 4.11 – die es nun zu optimieren gilt – zeigt dies sehr deutlich. Der Tragmechanismus „Schubfeld“ überwiegt beim Einzelelement, weshalb der Tragsicherheitsnachweis der Schubverklebung maßgebend wird. Angefangen von links oben beim „Einzelelement“ nimmt jedoch der Tragmechanismus „Druckdiagonale“ nach rechts unten über „Verband“ und „Fassade“ stetig zu. Damit einhergehend werden der Tragsicherheitsnachweis der Verklotzung und aufgrund der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Verknüpfung auch die Querverpressung der Koppelleiste ausschlaggebend. Da steifere Bauteile mehr Last an sich ziehen, sind also die Moduli der Klebstoffe anzupassen, damit einer der beiden Tragmechanismen Entlastung erfahren kann. In diesem Zusammenhang spielen wiederum die Erkenntnisse aus [16, 18] eine wesentliche Rolle: Die Festigkeit kann nicht in gleichem Maße gesteigert werden, wie die Steifigkeit. Dies spiegelt das Wissen der Festigkeitslehre wieder, die besagt, dass die Materialfestigkeit mit der Materialsteifigkeit verknüpft ist. Der Erfahrungsschatz und das Wissen über den Einsatz von Klebstoffen im Glasbau ist bei Weitem noch nicht ausgeschöpft und es besteht auf diesem Gebiet wohl noch großer Untersuchungsbedarf. Aus diesen Gründen liegt dem Optimierungsverfahren auch ein Gedankenspiel zugrunde, dem gleichzeitig ein Appell an Firmen und Forschungseinrichtungen folgt: Höherfeste Klebstoffe sind im Hinblick auf deren Festigkeit, Steifigkeit, Langzeitverhalten und daraus abzuleitende Materialsicherheitsbeiwerte kontinuierlich zu untersuchen.

Da in Anlehnung an Tab. 4.13 großteils ein Versagen der Schubverklebung für die Grenztragfähigkeit der untersuchten HGV-Konstruktionen festgestellt wurde, liegt hier der Fokus auch vorerst darauf, die Schubverklebung weiter zu entlasten. Aus diesem Grund werden für die Schubverklebung nolax C44.8505 [16] statt der Schubfestigkeit $\tau_{k,\perp} = 2,12\text{N/mm}^2$ und des Schubmoduls $G_\tau = 33,5\text{N/mm}^2$ die Ergebnisse des kleinen Scherprüfkörpers [16] verwendet, es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, Fußnote 1 auf Seite 53 zu beachten. Mit $\tau_{k,\perp} = 5,44\text{N/mm}^2$ wird die Schubfestigkeit um den Faktor 2,6 erhöht, der Schubmodul hingegen um den Faktor 3,7 auf $G_\tau = 9,10\text{N/mm}^2$ reduziert. Für das Verklotzungsmaterial brachte die Literaturrecherche nur bedingt ein Ergebnis, aber einen Anhaltspunkt für realistische Zusammenhänge zwischen Festigkeit und Steifigkeit, weshalb letztendlich der Injektionsmörtel HILTI HIT-RE 500 aus [12] etwas modifiziert wurde: Die Druckfestigkeit wird um etwa 16% von $\sigma_{c,k} = 86\text{N/mm}^2$ auf $\sigma_{c,k} = 100\text{N/mm}^2$ angehoben, der Elastizitätsmodul um etwa 56% von $E_c = 5700\text{N/mm}^2$ auf $E_c = 2500\text{N/mm}^2$ abgemindert. Betrachtet man nun das Verhältnis zwischen den Steifigkeiten der beiden Klebstoffe vor und nach dieser Modifikation wird klar, dass die Schubverklebung im direkten Vergleich weicher ist als zuvor: $\frac{5700}{33,50} \approx 170 < \frac{2500}{9,10} \approx 275$. Indem die Steifigkeit der Verklotzung jene der Schubverklebung um das 275-fache übersteigt, wird der Kraftfluss auch zugunsten des Tragmechanismus „Schubfeld“ in Richtung Tragmechanismus „Druckdiagonale“ verlaufen und man kann in weiterer Folge davon ausgehen, dass die Schuerverklebung die gewünschte Entlastung erfährt.

Hier sei erstmals angemerkt, dass dies lediglich für diesen konkreten Fall gilt. Sollte zusätzlich zu den Materialfestigkeiten und Materialsteifigkeiten gleichzeitig auch eine andere Modifikation erfolgen und diese beiden überlagert werden, ist aufgrund der komplexen Zusammenhänge des Ersatzfedermodells [12] zuvor keine eindeutige Aussage über den zu erwartenden Kraftfluss möglich.

Der Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 3,5$ wird für beide Klebstoffe in Anlehnung an [11] gewählt und beträgt etwa 83% von $\gamma_M = 4,2$ (Abschnitt 4.2.5). Auch diese Abminderung um 17% stellt lediglich eine Annahme dar. Es sei angemerkt, dass im Falle des in [11] behandelten Silikonklebstoff OTTOCOLL® S660 hierfür umfangreiche Langzeitstudien zur Verfügung standen. Wie Rinnhofer anmerkte, sind für Epoxidharze weitreichende Untersuchungen notwendig und die Bemessungswerte können nicht einfach übernommen werden.

Über die Tragsicherheitsnachweise in Abschnitt 4.2.5 konnte darauf geschlossen werden, welche geometrischen Randbedingungen die entscheidende Rolle für die Ausnutzung einzelner Bauteilkomponenten spielen. Die Verbreiterung der Schubverklebung von $b_\tau = 14\text{mm}$ auf $b_\tau = 18\text{mm}$ erlaubt noch die selben Koppelleistengeometrien wie beim Regelbausystem in Abschnitt 4.2.1. Indem die Klotzlänge von $l_C = 200\text{mm}$ auf $l_C = 300\text{mm}$ erhöht und dessen Breite glas- und holzseitig etwa um den Faktor 1,5 verstärkt wird, soll ebenfalls eine Steigerung der Traglast erzielt werden. Die Zunahme der beeinflussten Furnierzahl in der BFU-Koppelleiste bedingt lediglich einen Abfall der mechanischen Kennwerte und wirkt sich mit $f_{c,\parallel,18} = 27,20\text{N/mm}^2$ statt $f_{c,\parallel,18} = 27,70\text{N/mm}^2$ zwangsläufig negativ auf die Druckfestigkeit parallel zur Faser aus.

Tab. 4.17: Optimierte Konstruktionsvarianten mit Unterscheidungsmerkmalen

Konstruktionsvariante	B	C.1	C.2	C.2-1	C.3	C.3-1	C.3-2	C
$f_{c,\parallel,18} [N/mm^2] =$	27,70	27,70	27,70	27,70	27,20	27,20	27,20	27,20
$b_\tau [mm] =$	14	14	14	14	18	18	18	18
$\tau_{k,\perp} [N/mm^2] =$	2,12	5,44	2,12	5,44	2,12	5,44	2,12	5,44
$G_\tau [N/mm^2] =$	33,5	9,10	33,50	9,10	33,50	9,10	33,50	9,10
$\gamma_M [-] =$	4,2	4,2	3,5	3,5	4,2	4,2	3,5	3,5
$l_C [mm] =$	200	200	200	200	300	300	300	300
$b_{C,G} [mm] =$	8	8	8	8	12	12	12	12
$b_{C,H} [mm] =$	11	11	11	11	18	18	18	18
$\sigma_{c,k} [N/mm^2] =$	86	100	86	100	86	100	86	100
$E_c [N/mm^2] =$	5700	2500	5700	2500	5700	2500	5700	2500
$\gamma_M [-] =$	4,2	4,2	3,5	3,5	4,2	4,2	3,5	3,5

Die Optimierung der Konstruktionsvariante B erfolgt schrittweise, damit die Auswirkungen noch deutlicher werden. In Tab. 4.17 sind alle Adaptionsschritte grau hervorgehoben, die einen Unterschied zur Konstruktionsvariante B darstellen. Im Wesentlichen handelt es sich in der Gegenüberstellung bei der Konstruktionsvariante C um die vollständig optimierte HGV-Konstruktion. Von ihr wird naturgemäß das höchste Steigerungspotential erwartet. Konstruktionsvariante C.1 setzt lediglich auf die Erhöhung der Klebstofffestigkeiten und Adaption der Klebstoffsteifigkeiten. In Konstruktionsvariante C.2 wird untersucht, welchen Einfluss ausschließlich eine Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte auf die Grenztragfähigkeit von HGV-Elementen hat. Konstruktionsvariante C.2-1 kombiniert diese beiden Modifikationen. Erst mit Konstruktionsvariante C.3 wird die Geometrieadaption der Schubverklebung und Verklotzung durchgeführt. Bei den beiden weiteren Konstruktionsvarianten C.3-1 und C.3-2 erfolgt wiederum eine Überlagerung. Es wird die Geometrieadaption mit der Erhöhung der Klebstofffestigkeiten und Adaption der Klebstoffsteifigkeiten beziehungsweise mit der Reduzierung der Materialsicherheitsbeiwerte kombiniert.

Es ist zu beachten, dass diese Modifikationen auch eine Auswirkung auf die Nachgiebigkeit der Federn aus Tab. 4.2 haben, wodurch es zu einer Steifigkeitsänderung des Systems und zu einer Änderung des Kraftflusses kommt. Ausschließlich die Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte bewirkt noch keine Veränderung der Wandsteifigkeiten. Aus diesem Grund können für Konstruktionsvariante C.2 die Werte aus Tab. 4.3 übernommen werden. Das heißt auch, dass die Belastung und Verformung infolge Windbeanspruchung, die auf ein HGV-Element entfällt, gleich bleibt. Hierfür gelten die kurzfristigen Bemessungshorizontlasten $H_{d, kurz, vorh}$ der Konstruktionsvariante B in Tab. 4.6 sowie die zugehörigen Verformungen u_{vorh} in Tab. 4.7, die zuvor jeweils den FE-Rechenmodellen abgelesen wurden. Grundsätzlich wird darauf verzichtet, diese für alle Konstruktionsvarianten extra darzustellen. Ein kurzer Vorgriff auf die Ergebnisse

der resultierenden Wandsteifigkeiten K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung kombiniert mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 4.2.4 und Abschnitt 4.3.2 liefert die Erklärung. Die resultierende Horizontalkraft zufolge Wind ist bei diesen optimierten HGV-Konstruktionen wegen den durchwegs sehr hohen Wandsteifigkeiten beinahe identisch. Die HGV-Elemente sind somit im Vergleich zwischen den Gebäudemodellen beziehungsweise Konstruktions- und Kopplungsvarianten einer ähnlichen Belastung ausgesetzt. Um die Größenordnung der kurzfristigen Bemessungshorizontallasten $H_{d,kurz,vorh}$ und den zugehörigen Verformungen u_{vorh} abschätzen zu können, sind die Ergebnisse von Konstruktionsvariante B in Tab. 4.6 sowie Tab. 4.7 ausreichend genau.

Die detaillierten Berechnungen der Steifigkeitsanteile K_τ beziehungsweise K_C und der resultierenden Wandsteifigkeiten K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung aller optimierten Konstruktionsvarianten sind Anhang B.3 zu entnehmen. In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Ergebnisse jenen der Konstruktionsvariante B anschaulich gegenübergestellt und ein Vergleich erfolgt. Schwarz ist dabei wieder der prozentuale Steifigkeitsanteil der Schubverklebung, weiß der prozentuale Steifigkeitsanteil der Verklotzung. Anschließend werden ebenfalls die Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise gemäß Abschnitt 4.2.5 geführt. Der Ablauf wurde in den vorangegangenen Abschnitten jedoch bereits sehr ausführlich erläutert, weshalb hier lediglich eine Analyse und Bewertung erfolgt. Und zwar wird wieder die Ausnutzung der einzelnen Bauteilkomponenten betrachtet. In den Tabellen sind rot hervorgehoben jene Werte, wo die Nachweise nicht erfüllt werden können.

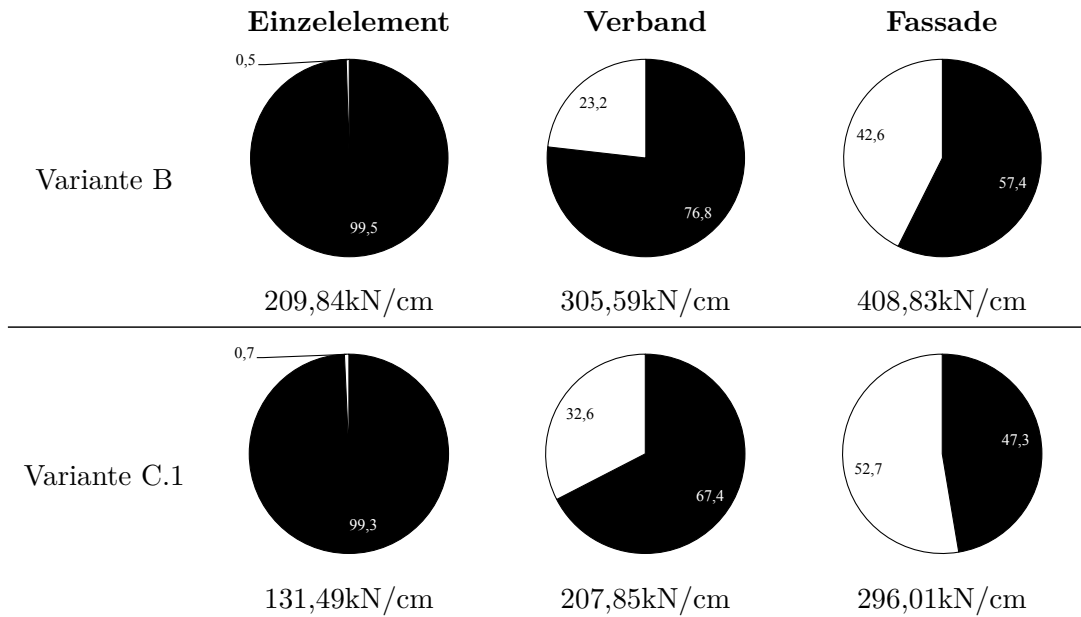
4.3.3.1 Erhöhung der Klebstofffestigkeiten und Adaption der Klebstoffsteifigkeiten

Indem die Materialfestigkeiten und Moduli der Schubverklebung und Verklotzung mit den vorangegangenen Überlegungen nach Tab. 4.17 entsprechend adaptiert werden, zeichnet sich in Tab. 4.18 bei der optimierten Konstruktionsvariante C.1 das erwartete Bild ab. Der Kraftfluss verläuft zugunsten des Tragmechanismus „Schubfeld“ in Richtung Tragmechanismus „Druckdiagonale“ und die Schubverklebung wird wie gewünscht entlastet. Bei der „Fassade“ überwiegt mit 52,7% sogar der Steifigkeitsanteil der Verklotzung. Da beide Klebstoffe weicher sind als zuvor, ist es auch naheliegend, dass die Wandsteifigkeiten K_{kurz} im Durchschnitt um etwa 35% abnehmen.

Eine Änderung der Materialfestigkeiten hat im Ersatzfedermodell [12] keine Auswirkungen auf die Wandsteifigkeiten, sehr wohl jedoch bei den Nachweisverfahren. Während bei der Konstruktionsvariante B in Tab. 4.11 die Schubverklebung größtenteils ausgenutzt war, können bei der optimierten Konstruktionsvariante C.1 in Tab. 4.19 die Tragsicherheitsnachweise der Schubverklebung beinahe zur Gänze eingehalten werden. Die Entlastung des Tragmechanismus „Schubfeld“ und die höheren Materialfestigkeiten machen sich bezahlt. Beispielsweise wird bei der Kopplungsvariante „Fassade“ beim viergeschossigen Gebäude mit Grundrissverhältnis 1:2 die Ausnutzung der Schubverklebung um 66% von 2,59 auf 0,86 gesenkt. Auch die Erkenntnis aus Abschnitt 4.3.1 wird erneut bestätigt: Mit zunehmendem Tragmechanismus „Druckdiagonale“ werden die Tragsicherheitsnachweise der Verklotzung und damit einhergehend die Querpressung der Koppelleiste ausschlaggebend. In diesem konkreten Fall betrifft es besonders die Koppelleiste, da noch keine Modifikation durchgeführt wurde. Diese steigt, um beim Beispiel zu bleiben, um 26% von 2,99 auf 3,78. Die Auslastung der Verklotzung erfährt nur eine geringe Änderung, da eine höhere Materialfestigkeit in Rechnung gestellt wird.

Zusammengefasst könnte die optimierte Konstruktionsvariante C.1 als „Einzelelement“ bei günstigstem Grundrissverhältnis 1:1 bereits eine Aussteifung von viergeschossigen Gebäuden ermöglichen.

Tab. 4.18: Wandsteifigkeit K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung in [kN/cm] sowie Steifigkeitsanteil der Schubverklebung (schwarz) und Verklotzung (weiß) in [%]



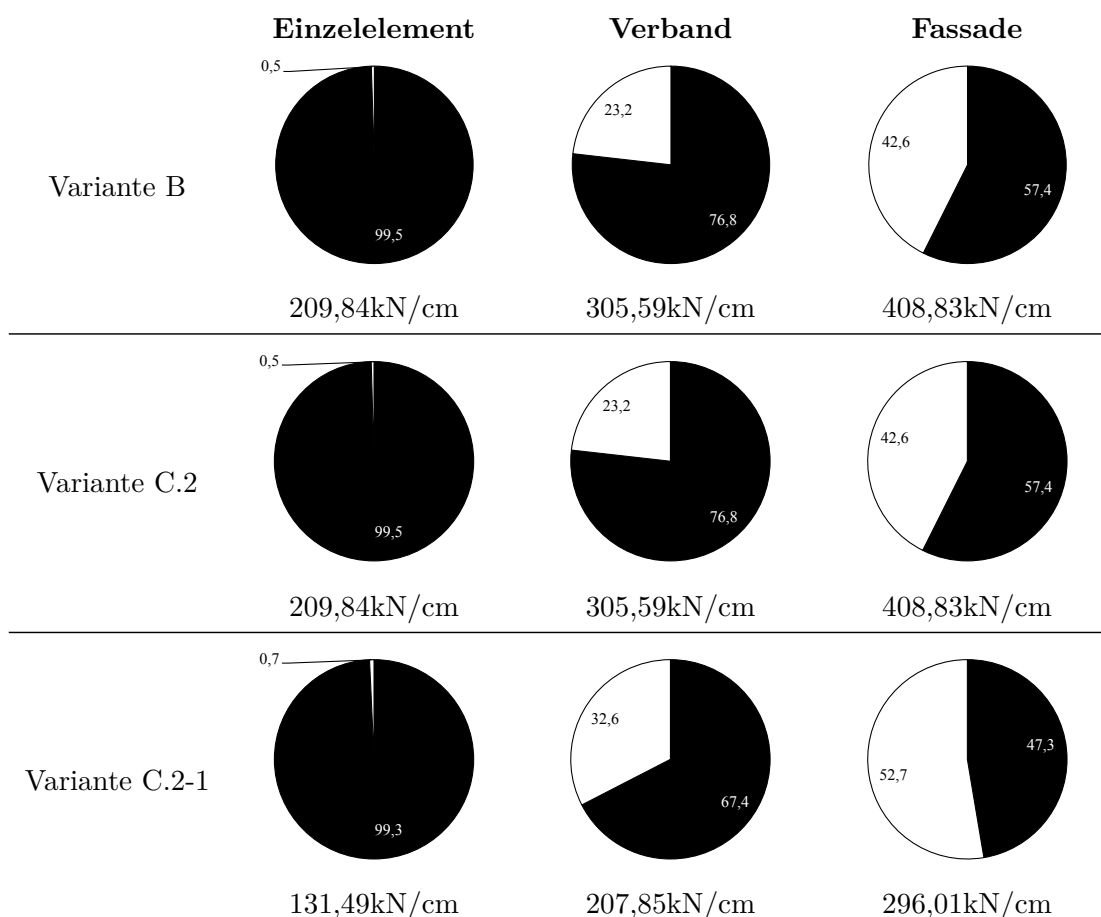
Tab. 4.19: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von der Konstruktionsvariante C.1

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03
	H/500	0,04	0,06	0,08	0,03	0,04	0,06	0,02	0,03	0,05
	τ	0,12	0,18	0,23	0,08	0,12	0,16	0,06	0,09	0,12
	C	0,01	0,01	0,01	0,13	0,18	0,24	0,19	0,28	0,39
	G	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,08	0,05	0,08	0,12
	KL	0,02	0,02	0,02	0,19	0,27	0,35	0,29	0,43	0,58
2	H/300	0,08	0,11	0,15	0,05	0,08	0,11	0,04	0,06	0,08
	H/500	0,13	0,19	0,25	0,09	0,13	0,18	0,06	0,10	0,14
	τ	0,33	0,49	0,64	0,23	0,35	0,49	0,17	0,26	0,37
	C	0,01	0,02	0,02	0,32	0,48	0,64	0,51	0,79	1,10
	G	0,06	0,08	0,11	0,11	0,17	0,24	0,16	0,25	0,35
	KL	0,02	0,03	0,03	0,48	0,71	0,97	0,77	1,18	1,65
3	H/300	0,13	0,19	0,25	0,09	0,13	0,18	0,06	0,10	0,14
	H/500	0,21	0,32	0,42	0,14	0,22	0,30	0,10	0,16	0,23
	τ	0,54	0,80	1,06	0,38	0,59	0,81	0,28	0,43	0,61
	C	0,02	0,02	0,03	0,51	0,77	1,05	0,83	1,29	1,81
	G	0,09	0,14	0,18	0,19	0,29	0,40	0,26	0,42	0,59
	KL	0,03	0,04	0,04	0,76	1,16	1,58	1,25	1,94	2,72
4	H/300	0,18	0,27	0,35	0,12	0,18	0,25	0,09	0,14	0,19
	H/500	0,29	0,44	0,59	0,20	0,31	0,42	0,14	0,23	0,32
	τ	0,75	1,11	1,48	0,53	0,82	1,13	0,39	0,61	0,86
	C	0,02	0,03	0,04	0,70	1,07	1,46	1,15	1,80	2,52
	G	0,13	0,19	0,26	0,26	0,41	0,56	0,37	0,59	0,82
	KL	0,03	0,04	0,05	1,05	1,60	2,19	1,73	2,70	3,78

4.3.3.2 Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte von den Klebstoffen

Werden nur die Materialsicherheitsbeiwerte beider Klebstoffe nach Tab. 4.17 entsprechend modifiziert, führt dies wie erwartet und bereits erwähnt keine Änderung der Wandsteifigkeit mit sich. Zwischen Konstruktionsvariante B und C.2 sind deshalb auch die prozentualen Steifigkeitsanteile der Schubverklebung und Verklotzung in Tab. 4.20 vollkommen ident.

Tab. 4.20: Wandsteifigkeit K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung in [kN/cm] sowie Steifigkeitsanteil der Schubverklebung (schwarz) und Verklotzung (weiß) in [%]



Eines wird im Vergleich zwischen der Ausnutzung der Bauteilkomponenten von Konstruktionsvariante B (Tab. 4.11) und Konstruktionsvariante C.2 (Tab. 4.21) sofort deutlich: Aufgrund der linearen Zusammenhänge hat die Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte um 17% wie erwartet auch nur eine Auswirkung auf die Nachweisverfahren in genau dieser Größenordnung.

Interessant wird es erst bei der Überlagerung von Konstruktionsvariante C.2 und C.1 zu Konstruktionsvariante C.2-1 (Tab. 4.22). An den Klebstoffen werden die Materialfestigkeiten, -steifigkeiten und -sicherheitsbeiwerte optimiert, was sich entscheidend auf deren Materialwiderstand auswirkt. So könnte schließlich die optimierte Konstruktionsvariante C.2-1 als „Einzelement“ auch bei dem ungünstigerem Grundrissverhältnis 1:1,5 eine Aussteifung von viergeschossigen Gebäuden ermöglichen. Im Vergleich dazu war bei der optimierten Konstruktionsvariante C.1 (Tab. 4.19) nur das günstige Grundrissverhältnis 1:1 möglich. Natürlich treffen nun auch ergänzend die Beobachtungen aus Abschnitt 4.3.3.1 zu. Aufgrund des entlasteten Tragmechanismus „Schubfeld“ spielen die Tragsicherheitsnachweise der Schubverklebung eine untergeordnete Rolle. Der Kraftfluss verläuft zwar zugunsten des Tragmechanismus „Druckdiagonale“, in erster Linie

hat jedoch die Querpressung der Koppelleiste in Tab. 4.22 das nachsehen. Das geht sogar so weit, dass das Versagen der Koppelleiste allmählich zum maßgebenden Kriterium wird. Hingegen wurde das Verklotzungsmaterial wie erwähnt modifiziert – es war erwünscht, auch hier eine Entlastung zu erzielen. Beachtenswert sind auch die Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsnachweise. Beim viergeschossigen Gebäude werden bereits Auslastungen bis zu 60% erreicht.

Tab. 4.21: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von der Konstruktionsvariante C.2

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
	H/500	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03
	τ	0,27	0,38	0,49	0,19	0,28	0,39	0,14	0,22	0,31
	C	0,01	0,01	0,01	0,10	0,13	0,17	0,16	0,23	0,30
	G	0,02	0,03	0,04	0,03	0,05	0,07	0,05	0,07	0,10
	KL	0,01	0,01	0,01	0,15	0,20	0,26	0,24	0,35	0,47
2	H/300	0,05	0,07	0,09	0,03	0,05	0,07	0,03	0,04	0,06
	H/500	0,08	0,12	0,16	0,06	0,09	0,12	0,04	0,07	0,10
	τ	0,72	1,05	1,39	0,55	0,84	1,16	0,42	0,66	0,93
	C	0,01	0,01	0,01	0,23	0,33	0,45	0,40	0,61	0,85
	G	0,06	0,08	0,11	0,09	0,15	0,20	0,14	0,21	0,30
	KL	0,01	0,02	0,02	0,35	0,52	0,69	0,62	0,95	1,31
3	H/300	0,08	0,12	0,16	0,06	0,09	0,12	0,04	0,07	0,10
	H/500	0,13	0,20	0,26	0,10	0,15	0,20	0,07	0,12	0,16
	τ	1,16	1,72	2,28	0,91	1,41	1,93	0,70	1,10	1,54
	C	0,01	0,01	0,02	0,36	0,54	0,72	0,65	1,00	1,39
	G	0,09	0,14	0,18	0,16	0,24	0,33	0,23	0,35	0,49
	KL	0,02	0,02	0,03	0,55	0,83	1,12	1,01	1,55	2,15
4	H/300	0,11	0,17	0,22	0,08	0,12	0,17	0,06	0,10	0,14
	H/500	0,18	0,28	0,37	0,13	0,21	0,28	0,10	0,16	0,23
	τ	1,61	2,39	3,17	1,28	1,97	2,70	0,98	1,54	2,16
	C	0,01	0,02	0,02	0,49	0,74	1,00	0,90	1,39	1,93
	G	0,13	0,19	0,26	0,22	0,34	0,47	0,32	0,50	0,69
	KL	0,02	0,03	0,03	0,76	1,14	1,55	1,39	2,15	2,99

Auf die Wandsteifigkeiten hat die Überlagerung der beiden Modifikationen keine zusätzliche Auswirkung für die Konstruktionsvariante C.2-1. Es stellt sich in Tab. 4.20 lediglich jener Kraftfluss ein, den bereits Konstruktionsvariante C.1 in Tab. 4.18 zeigte. Trotz der komplexen Zusammenhänge beim Ersatzfedermodell [12] ist eine Erkenntnis hervorzuheben: Aufgrund der Linearität macht sich eine Verdopplung der Materialwiderstände als Halbierung in der Ausnutzung bemerkbar.

Tab. 4.22: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von der Konstruktionsvariante C.2-1

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03
	H/500	0,04	0,06	0,08	0,03	0,04	0,06	0,02	0,03	0,05
	τ	0,10	0,15	0,19	0,06	0,10	0,14	0,05	0,07	0,10
	C	0,01	0,01	0,01	0,11	0,15	0,20	0,16	0,24	0,32
	G	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,08	0,05	0,08	0,12
	KL	0,02	0,02	0,02	0,19	0,27	0,35	0,29	0,43	0,58
2	H/300	0,08	0,11	0,15	0,05	0,08	0,11	0,04	0,06	0,08
	H/500	0,13	0,19	0,25	0,09	0,13	0,18	0,06	0,10	0,14
	τ	0,28	0,41	0,54	0,19	0,29	0,40	0,14	0,22	0,31
	C	0,01	0,01	0,02	0,27	0,40	0,54	0,43	0,66	0,92
	G	0,06	0,08	0,11	0,11	0,17	0,24	0,16	0,25	0,35
	KL	0,02	0,03	0,03	0,48	0,71	0,97	0,77	1,18	1,65
3	H/300	0,13	0,19	0,25	0,09	0,13	0,18	0,06	0,10	0,14
	H/500	0,21	0,32	0,42	0,14	0,22	0,30	0,10	0,16	0,23
	τ	0,45	0,67	0,88	0,32	0,49	0,67	0,23	0,36	0,51
	C	0,02	0,02	0,02	0,42	0,64	0,88	0,69	1,08	1,51
	G	0,09	0,14	0,18	0,19	0,29	0,40	0,26	0,42	0,59
	KL	0,03	0,04	0,04	0,76	1,16	1,58	1,25	1,94	2,72
4	H/300	0,18	0,27	0,35	0,12	0,18	0,25	0,09	0,14	0,19
	H/500	0,29	0,44	0,59	0,20	0,31	0,42	0,14	0,23	0,32
	τ	0,62	0,93	1,23	0,44	0,68	0,94	0,32	0,51	0,71
	C	0,02	0,02	0,03	0,58	0,89	1,22	0,96	1,50	2,10
	G	0,13	0,19	0,26	0,26	0,41	0,56	0,37	0,59	0,82
	KL	0,03	0,04	0,05	1,05	1,60	2,19	1,73	2,70	3,78

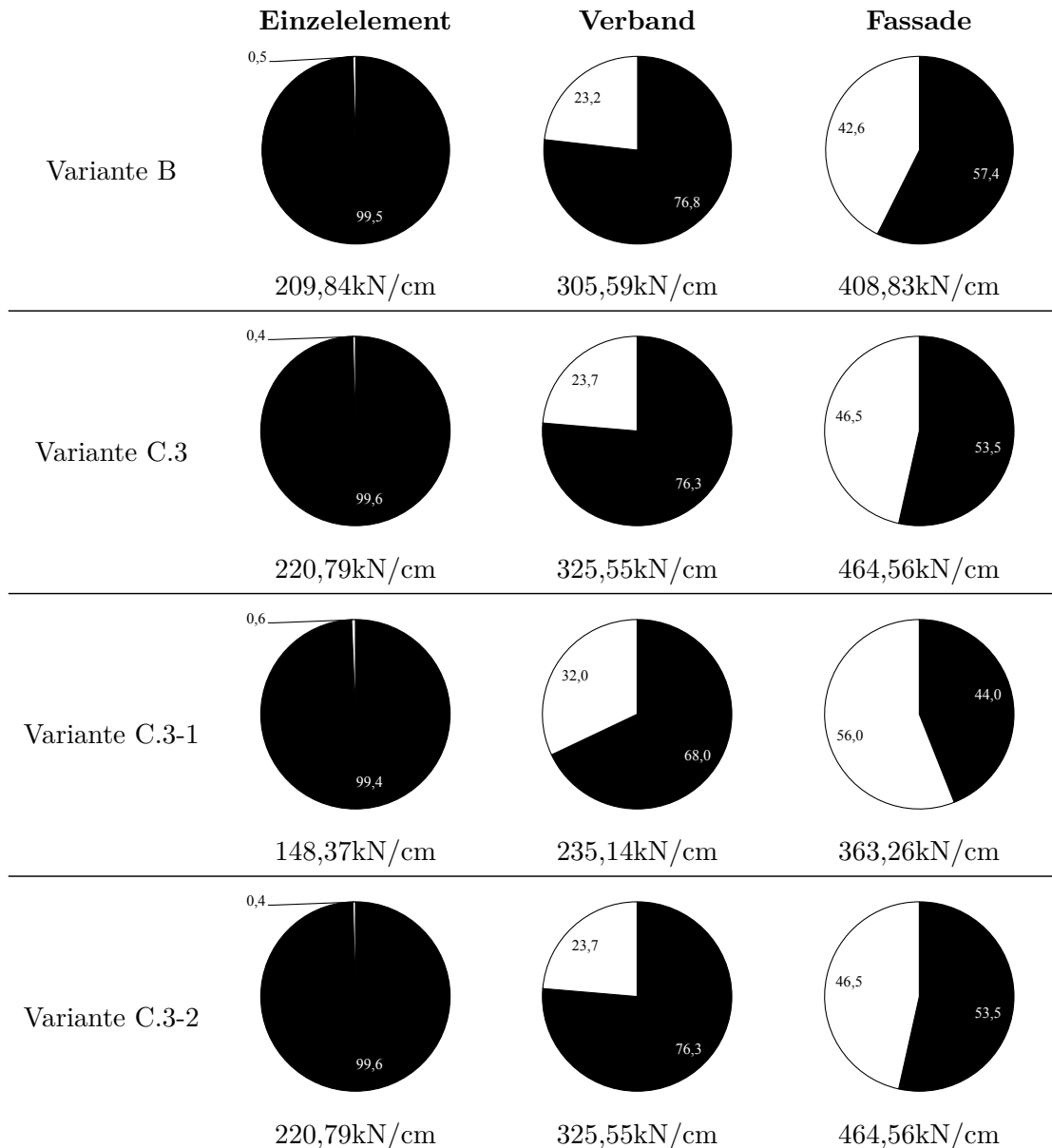
4.3.3.3 Adaption der Klebstoffgeometrien

Wird eine Geometrieadaptation bei der Schubverklebung und Verklotzung nach Tab. 4.17 entsprechend durchgeführt (Konstruktionsvariante C.3) beziehungsweise diese Modifikation mit den bisherigen Konstruktionsvarianten überlagert, ergeben sich nach Tab. 4.23 folgende Wandsteifigkeiten und prozentuale Steifigkeitsverteilungen im Vergleich zur Konstruktionsvariante B: Konstruktionsvariante C.3 zeigt, dass eine Verbreiterung der Klebefugen bei allen Kopplungsvarianten überschaubare Veränderungen mit sich bringt. Im Mittel etwa eine Steigerung der Wandsteifigkeiten um 8%. Den prozentualen Steifigkeitsverteilungen kann ein mäßig veränderter Kraftfluss in Richtung Tragmechanismus „Druckdiagonale“ abgelesen werden. Die Schubverklebung erfährt dabei kaum eine Entlastung.

Eine vollkommen neue Verteilung stellt sich bei der Überlagerung von Geometrieadaptation (Konstruktionsvariante C.3) beziehungsweise Erhöhung der Klebstofffestigkeiten und Adaption der Klebstoffsteifigkeiten (Konstruktionsvariante C.1) ein. Die Wandsteifigkeiten der Konstruktionsvariante C.3-1 sind zwar geringer als jene der Konstruktionsvariante C.3, liegen aber über denen von Konstruktionsvariante B und C.1 (Tab. 4.18). Außerdem erkennt man bei der Gegenüberstellung zur Konstruktionsvariante B, dass diese Modifikationen am selben Punkt ansetzen: Die Schubverklebung zu entlasten. Bei Konstruktionsvariante C.3-1 „Verband“ ist der Lastanteil der Verklotzung mit 32% wieder relativ hoch und überwiegt sogar mit 56% bei der „Fassade“. Im Vergleich zur Konstruktionsvariante C.3 erkennt man, dass der Anteil, der zuvor der Schubverklebung zugeteilt wurde, nun in etwa der Verklotzung entspricht (53,5% \approx 56,0%).

Nach Abschnitt 4.3.3.2 führt eine Reduktion der Material Sicherheitsbeiwerte (Konstruktionsvariante C.2) keine Änderung der Wandsteifigkeit mit sich. Konstruktionsvariante C.3-2 kann also nur dem Kraftfluss von Konstruktionsvariante C.3 entsprechen.

Tab. 4.23: Wandsteifigkeit K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung in [kN/cm] sowie Steifigkeitsanteil der Schubverklebung (schwarz) und Verklotzung (weiß) in [%]



Die interessanten Auswirkungen der Geometrieadaptation zeigen sich erst bei den Nachweisverfahren. Um daraus schlau zu werden sind wieder die Ausnutzungen der einzelnen Bauteilkomponenten zu betrachten. Bei Konstruktionsvariante C.3 in Tab. 4.24 passiert im Vergleich zu Konstruktionsvariante B (Tab. 4.11) folgendes: Werden ausschließlich die Klebefugen verbreitert, hat dies eine sehr günstige Auswirkung auf die Tragsicherheitsnachweise. Die Auslastung der Schubverklebung kann im Schnitt um etwa 25% gesenkt werden. Da der Tragmechanismus „Druckdiagonale“ bei der Konstruktionsvariante C.3 nur marginal zugenommen hat, ist auch die Halbierung der Auslastung der Verklotzung enorm hoch. Indem bei dieser Optimierung mehr Fläche zur Verfügung steht, um die Klotzdruckkraft in die Koppelleiste einzuleiten, hat sogar die Querverpressung der Koppelleiste eine untergeordnete Bedeutung eingenommen. Erneut macht sich der überwiegende Tragmechanismus „Schubfeld“ und damit einhergehend das Versagen der Schubverklebung

bemerkbar. Außerdem fällt erstmals wieder auf, dass bei dem viergeschossigen Gebäude mit ungünstigem Grundrissverhältnis 1:2 das Beulen der Glasscheibe langsam wieder eine entscheidende Rolle für die Grenztragfähigkeit der HGV-Scheiben einnimmt. Die Ausnutzung von 70% bei der Kopplungsvariante „Fassade“ ist relativ hoch und auf jeden Fall im Auge zu behalten. Dass die Tragsicherheitsnachweise der Schubverklebung bei der „Fassade“ zum Teil eingehalten werden und beim „Einzelement“ beziehungsweise „Verband“ nicht, hängt ausschließlich damit zusammen, dass dort der Tragmechanismus „Schubfeld“ bei weitem überwiegt.

Tab. 4.24: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von der Konstruktionsvariante C.3

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
	H/500	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03
	τ	0,25	0,36	0,46	0,17	0,26	0,36	0,12	0,19	0,27
	C	0,00	0,00	0,00	0,05	0,07	0,09	0,09	0,13	0,18
	G	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05	0,07	0,10
	KL	0,00	0,00	0,01	0,06	0,09	0,11	0,11	0,16	0,21
2	H/300	0,05	0,07	0,09	0,03	0,05	0,07	0,02	0,04	0,05
	H/500	0,08	0,11	0,15	0,05	0,08	0,11	0,04	0,06	0,09
	τ	0,67	0,98	1,29	0,51	0,78	1,08	0,37	0,58	0,82
	C	0,01	0,01	0,01	0,12	0,18	0,24	0,23	0,36	0,50
	G	0,04	0,06	0,09	0,09	0,13	0,18	0,14	0,21	0,30
	KL	0,01	0,01	0,01	0,15	0,22	0,29	0,28	0,43	0,60
3	H/300	0,08	0,11	0,15	0,05	0,08	0,11	0,04	0,06	0,09
	H/500	0,13	0,19	0,25	0,09	0,14	0,19	0,07	0,10	0,14
	τ	1,09	1,61	2,13	0,85	1,31	1,79	0,62	0,97	1,36
	C	0,01	0,01	0,01	0,20	0,29	0,39	0,38	0,59	0,82
	G	0,07	0,11	0,14	0,14	0,22	0,30	0,23	0,36	0,50
	KL	0,01	0,01	0,01	0,24	0,35	0,47	0,46	0,71	0,99
4	H/300	0,11	0,16	0,21	0,08	0,12	0,16	0,05	0,09	0,12
	H/500	0,18	0,26	0,35	0,13	0,19	0,27	0,09	0,14	0,20
	τ	1,50	2,23	2,96	1,18	1,83	2,51	0,86	1,36	1,90
	C	0,01	0,01	0,01	0,27	0,40	0,55	0,52	0,82	1,14
	G	0,10	0,15	0,20	0,20	0,31	0,42	0,32	0,50	0,70
	KL	0,01	0,01	0,01	0,32	0,48	0,66	0,63	0,98	1,37

Zusammengefasst könnte als nur die optimierte Konstruktionsvariante C.3 als „Fassade“ bei günstigstem Grundrissverhältnis 1:1 eine Aussteifung von viergeschossigen Gebäuden ermöglichen. Und man bekommt ein Gefühl dafür, an welchen Punkten im Wesentlichen anzusetzen ist: An der Entlastung der Schubverklebung. Dass Konstruktionsvariante C.3-1 genau da ansetzt wurde anfangs beziehungsweise in Abschnitt 4.3.3.1 ausführlich erläutert. Dennoch ist es erstaunlich zu sehen, welchen Einfluss die Überlagerung dieser Konstruktionsvarianten auf die Ausnutzung der Schubverklebung in Tab. 4.25 hat. Mit der höheren Klebstofffestigkeit nach Tab. 4.17 könnten zum ersten Mal auch viergeschossige Gebäude mit ungünstigen Grundrissverhältnissen 1:2 ausschließlich durch HGV-Scheiben ausgesteift werden. Beim günstigen Grundrissverhältnis 1:1 liegt sogar die Wahl zwischen den drei Kopplungsvarianten offen. Dass in Tab. 4.25 rechts unten die Verklotzung und Koppelleiste hingegen mehr ausgelastet sind als in Tab. 4.24, ist dem überwiegenden Tragmechanismus „Druckdiagonale“ bei der Konstruktionsvariante C.3-1 „Fassade“ geschuldet (Tab. 4.23).

Mit dem Vorwissen aus Abschnitt 4.3.3.2 überrascht es zudem nur wenig, dass sich die Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte um 17% auch in der Ausnutzung zwischen den optimierten Konstruktionsvarianten C.3-2 in Tab. 4.26 beziehungsweise C.3 in Tab. 4.24 entsprechend bemerkbar macht. Außerdem lässt sich bereits vermuten, dass diese Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte in Tab. 4.25 noch mehr Optimierungspotential birgt. Mit der Überlagerung

der drei optimierten Konstruktionsvarianten C.1 beziehungsweise C.2 und C.3 zur vollständig optimierten Konstruktionsvariante C, befasst sich der folgende Abschnitt.

Tab. 4.25: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von der Konstruktionsvariante C.3-1

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02
	H/500	0,04	0,06	0,07	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04
	τ	0,10	0,14	0,18	0,06	0,09	0,13	0,04	0,06	0,09
	C	0,00	0,01	0,01	0,06	0,08	0,10	0,09	0,14	0,19
	G	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,07	0,05	0,08	0,12
	KL	0,01	0,01	0,01	0,08	0,11	0,15	0,13	0,19	0,26
2	H/300	0,07	0,10	0,13	0,05	0,07	0,10	0,03	0,05	0,07
	H/500	0,11	0,17	0,22	0,08	0,12	0,16	0,05	0,08	0,11
	τ	0,26	0,38	0,50	0,18	0,28	0,38	0,12	0,19	0,27
	C	0,01	0,01	0,01	0,14	0,21	0,28	0,24	0,38	0,53
	G	0,04	0,06	0,09	0,10	0,16	0,22	0,16	0,25	0,36
	KL	0,01	0,01	0,01	0,20	0,29	0,40	0,34	0,53	0,74
3	H/300	0,11	0,17	0,22	0,08	0,12	0,16	0,05	0,08	0,11
	H/500	0,19	0,28	0,37	0,13	0,19	0,27	0,08	0,13	0,19
	τ	0,42	0,62	0,83	0,30	0,46	0,63	0,20	0,32	0,45
	C	0,01	0,01	0,01	0,22	0,34	0,46	0,39	0,62	0,87
	G	0,07	0,11	0,14	0,17	0,26	0,36	0,27	0,42	0,60
	KL	0,01	0,01	0,02	0,31	0,47	0,65	0,55	0,87	1,22
4	H/300	0,16	0,23	0,31	0,11	0,16	0,23	0,07	0,11	0,16
	H/500	0,26	0,39	0,52	0,18	0,27	0,38	0,12	0,19	0,27
	τ	0,58	0,87	1,15	0,41	0,64	0,89	0,28	0,44	0,63
	C	0,01	0,01	0,01	0,31	0,47	0,64	0,55	0,86	1,21
	G	0,10	0,15	0,20	0,24	0,37	0,51	0,37	0,59	0,84
	KL	0,01	0,02	0,02	0,43	0,66	0,90	0,77	1,20	1,69

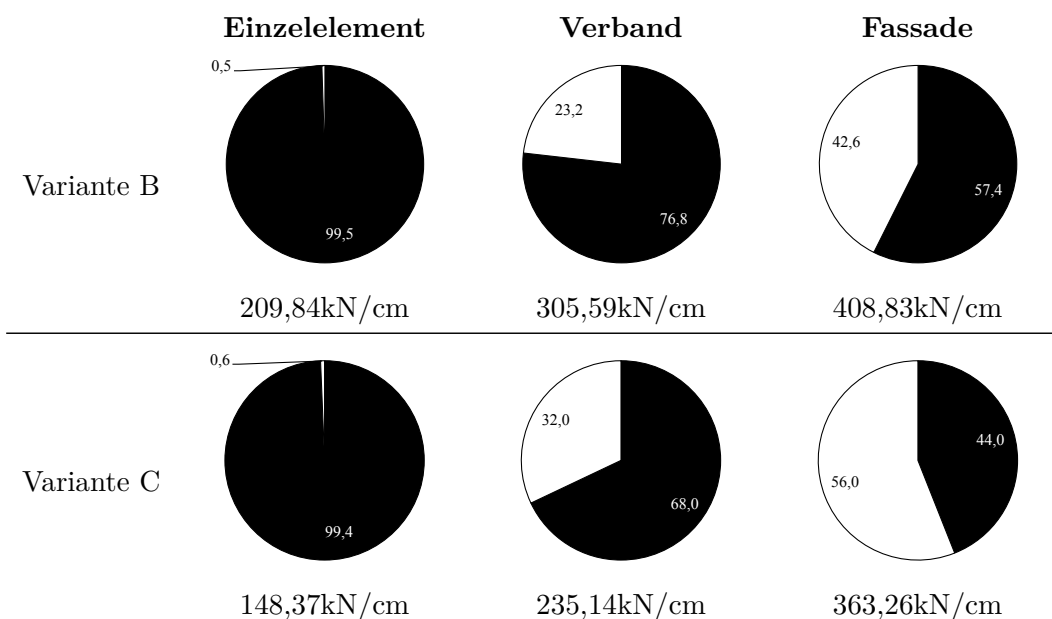
Tab. 4.26: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von der Konstruktionsvariante C.3-2

Geschoss	Nachweis	Einzelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
	H/500	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03
	τ	0,21	0,30	0,38	0,14	0,22	0,30	0,10	0,16	0,23
	C	0,00	0,00	0,00	0,04	0,06	0,08	0,07	0,11	0,15
	G	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05	0,07	0,10
	KL	0,00	0,00	0,01	0,06	0,09	0,11	0,11	0,16	0,21
2	H/300	0,05	0,07	0,09	0,03	0,05	0,07	0,02	0,04	0,05
	H/500	0,08	0,11	0,15	0,05	0,08	0,11	0,04	0,06	0,09
	τ	0,56	0,82	1,08	0,42	0,65	0,90	0,31	0,48	0,68
	C	0,00	0,00	0,01	0,10	0,15	0,20	0,20	0,30	0,42
	G	0,04	0,06	0,09	0,09	0,13	0,18	0,14	0,21	0,30
	KL	0,01	0,01	0,01	0,15	0,22	0,29	0,28	0,43	0,60
3	H/300	0,08	0,11	0,15	0,05	0,08	0,11	0,04	0,06	0,09
	H/500	0,13	0,19	0,25	0,09	0,14	0,19	0,07	0,10	0,14
	τ	0,90	1,34	1,77	0,71	1,09	1,49	0,51	0,81	1,13
	C	0,01	0,01	0,01	0,16	0,24	0,33	0,32	0,49	0,68
	G	0,07	0,11	0,14	0,14	0,22	0,30	0,23	0,36	0,50
	KL	0,01	0,01	0,01	0,24	0,35	0,47	0,46	0,71	0,99
4	H/300	0,11	0,16	0,21	0,08	0,12	0,16	0,05	0,09	0,12
	H/500	0,18	0,26	0,35	0,13	0,19	0,27	0,09	0,14	0,20
	τ	1,25	1,86	2,47	0,99	1,52	2,09	0,72	1,13	1,59
	C	0,01	0,01	0,01	0,22	0,33	0,45	0,44	0,68	0,95
	G	0,10	0,15	0,20	0,20	0,31	0,42	0,32	0,50	0,70
	KL	0,01	0,01	0,01	0,32	0,48	0,66	0,63	0,98	1,37

4.3.3.4 Optimierte Konstruktionsvariante C

Bei der Konstruktionsvariante C handelt es sich um eine vollständig optimierte HGV-Konstruktion, bei der die Adaptionsschritte der Klebstoffe (Materialfestigkeit, -steifigkeit, -sicherheitsbeiwert und -geometrie) von Konstruktionsvariante C.1 beziehungsweise C.2 und C.3 nach Tab. 4.17 gleichzeitig durchgeführt und überlagert werden. Die Wandsteifigkeiten und prozentualen Steifigkeitsverteilungen im Vergleich zur Konstruktionsvariante B zeigt Tab. 4.27. Gegenübergestellt zum Referenzsystem dieser Arbeit (Konstruktionsvariante A in Tab. 4.3) sind die Wandsteifigkeiten der Kopplungsvarianten von Konstruktionsvariante C immer noch sehr hoch, liegen jedoch im Durchschnitt etwa 22% unter den Werten von Konstruktionsvariante B. In den vorangegangenen Abschnitten wurde mehrfach erwähnt, dass eine Reduktion der Material sicherheitsbeiwerte keine Änderung der Wandsteifigkeit mit sich führt. Somit stellt sich für diese Konstruktionsvariante der Kraftfluss auch ident zu Konstruktionsvariante C.3-1 nach Tab. 4.23 ein. Eine ausführlichere Analyse diesbezüglich erfolgte bereits in Abschnitt 4.3.3.3. Das ist auch der Grund, warum die Ausnutzung der Bauteilkomponenten in Tab. 4.28 an jene von Konstruktionsvariante C.3-1 in Tab. 4.25 erinnert. Den einzigen Unterschied machen die um 17% reduzierten Material sicherheitsbeiwerte der Klebstoffe aus.

Tab. 4.27: Wandsteifigkeit K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung in [kN/cm] sowie Steifigkeitsanteil der Schubverklebung (schwarz) und Verklotzung (weiß) in [%]



Zusammengefasst geht für die vollständig optimierte Konstruktionsvariante C hervor, dass eine Aussteifung von viergeschossigen Holzskelettbauten unter Windbelastung möglich werden würde – sogar ohne Kopplung der HGV-Elemente. Im Gegensatz dazu waren bei der optimierten Konstruktionsvariante C.3-1 (Tab. 4.25) beim „Einzelelement“ nur die günstigen Grundrissverhältnisse möglich. Da die Wandsteifigkeiten durch die steifen Klebstoffe sehr hoch angesetzt sind, stellen die Gebrauchstauglichkeitsnachweise mit 50% Auslastung noch kein Problem dar. Die Belastungen bei der „Fassade“ beim ungünstigsten Grundrissverhältnis 1:2 scheinen der Verklotzung beziehungsweise der Koppelleiste ab drei Geschosse jedoch immer noch zu hoch zu sein. Das ist wiederum dem überwiegenden Tragmechanismus „Druckdiagonale“ geschuldet (Tab. 4.27). Dafür können jedoch die Tragsicherheitsnachweise der Schubverklebung zur Gänze eingehalten werden. Auch das Beulversagen der Glasscheibe spielt mit Glasstärken um 12mm VSG (2x6mm)

noch eine untergeordnete Rolle. Die Ausnutzung erreicht bei vier Geschossen jedoch immerhin schon 84%. Im Vergleich dazu zeigt Tab. 4.11 die Ausnutzung der Bauteilkomponenten der Konstruktionsvariante B. Den Beobachtungen in Abschnitt 4.3.1 ist zu entnehmen, dass hier lediglich die Aussteifung von höchstens zweigeschossigen Gebäuden möglich ist.

Tab. 4.28: Ausnutzung der Bauteilkomponenten von der Konstruktionsvariante C

Geschoss	Nachweis	Einzelelement			Verband			Fassade		
		1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
1	H/300	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02
	H/500	0,04	0,06	0,07	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04
	τ	0,08	0,11	0,15	0,05	0,08	0,11	0,03	0,05	0,08
	C	0,00	0,00	0,00	0,05	0,07	0,09	0,08	0,11	0,15
	G	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,07	0,05	0,08	0,12
	KL	0,01	0,01	0,01	0,08	0,11	0,15	0,13	0,19	0,26
2	H/300	0,07	0,10	0,13	0,05	0,07	0,10	0,03	0,05	0,07
	H/500	0,11	0,17	0,22	0,08	0,12	0,16	0,05	0,08	0,11
	τ	0,22	0,32	0,42	0,15	0,23	0,32	0,10	0,16	0,22
	C	0,01	0,01	0,01	0,12	0,17	0,24	0,20	0,31	0,44
	G	0,04	0,06	0,09	0,10	0,16	0,22	0,16	0,25	0,36
	KL	0,01	0,01	0,01	0,20	0,29	0,40	0,34	0,53	0,74
3	H/300	0,11	0,17	0,22	0,08	0,12	0,16	0,05	0,08	0,11
	H/500	0,19	0,28	0,37	0,13	0,19	0,27	0,08	0,13	0,19
	τ	0,35	0,52	0,69	0,25	0,38	0,53	0,17	0,26	0,37
	C	0,01	0,01	0,01	0,19	0,28	0,38	0,33	0,51	0,72
	G	0,07	0,11	0,14	0,17	0,26	0,36	0,27	0,42	0,60
	KL	0,01	0,01	0,02	0,31	0,47	0,65	0,55	0,87	1,22
4	H/300	0,16	0,23	0,31	0,11	0,16	0,23	0,07	0,11	0,16
	H/500	0,26	0,39	0,52	0,18	0,27	0,38	0,12	0,19	0,27
	τ	0,49	0,72	0,96	0,35	0,54	0,74	0,23	0,37	0,52
	C	0,01	0,01	0,01	0,26	0,39	0,53	0,46	0,72	1,01
	G	0,10	0,15	0,20	0,24	0,37	0,51	0,37	0,59	0,84
	KL	0,01	0,02	0,02	0,43	0,66	0,90	0,77	1,20	1,69

4.3.3.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Zum Abschluss dieses Abschnitts werden die maximal ausgelasteten Bauteilkomponenten beim viergeschossigen Gebäude mit ungünstigem Grundrissverhältnis 1:2 aller optimierten Konstruktionsvarianten und Kopplungsvarianten den Ergebnissen der Konstruktionsvariante B gegenübergestellt. Damit soll das Ziel erreicht werden, welches das Optimierungsverfahren verfolgt hat: Die komplexen Zusammenhänge des Ersatzfedermodells [12] zu veranschaulichen und Klarheit zu schaffen, die es immerhin braucht, um bei der Optimierung von HGVScheiben zur Gebäudeaussteifung an den richtigen Punkten ansetzen zu können. Es sei jedoch an dieser Stelle unbedingt angemerkt, dass alle optimierten Konstruktionsvarianten nur Gedankenmodelle sind, denen die Untermauerung durch Laborkennwerte fehlt. Um die folgenden Abbildungen nicht falsch zu interpretieren, noch eine weitere Anmerkung: Liegt die Ausnutzung einer Bauteilkomponente über 1,0 bedeutet das nicht automatisch, dass eine Aussteifung des viergeschossigen Gebäudes überhaupt nicht möglich wäre. Hier werden nur die maximalen Auslastungen gegenübergestellt. Für die günstigeren Grundrissverhältnisse könnte eine Aussteifung sehr wohl möglich werden. Darauf gehen die vorangegangenen Abschnitte sehr detailliert ein.

Abb. 4.23 zeigt die maximal ausgelasteten Bauteilkomponenten beim „Einzelelement“. Es ist ratsam in diesem Zusammenhang Tab. 4.17 zur Hand zu nehmen, da hier alle Adaptionsschritte grau hervorgehoben sind, die einen Unterschied zur Konstruktionsvariante B darstellen. Auf einen Blick erkennt man, dass durchgehend die Tragsicherheitsnachweise der Schubverklebung (rot) nicht eingehalten werden können. Das beginnt bereits bei der Konstruktionsvariante B, wo

ein Versagen der Schubverklebung mit 381% Auslastung aufgrund des überwiegenden Tragmechanismus „Schubfeld“ das maßgebende Versagenskriterium ist. Werden die Klebstofffestigkeiten gesteigert (Konstruktionsvariante C.1) wird bereits an der richtigen Stelle angesetzt und die Auslastung um 61% gesenkt – die Adaption der Klebstoffsteifigkeiten ändert den Kraftfluss etwas in Richtung Tragmechanismus „Druckdiagonale“ (Tab. 4.18). Die um 17% reduzierten Materialsicherheitsbeiwerte der Klebstoffe (Konstruktionsvariante C.2) senken auch die hohe Auslastung von 381% aufgrund der linearen Zusammenhänge (Abschnitt 4.3.3.2) um 17%. Die Überlagerung dieser beiden Modifikationen (Konstruktionsvariante C.2-1) ist sehr günstig (68% Reduktion der Auslastung), da in beiden Fällen der Widerstand der Schubverklebung erhöht wird. Werden ausschließlich die Klebstoffgeometrien verbreitert (Konstruktionsvariante C.3), sinkt die Auslastung um 25%. Interessant ist die gleichzeitige Überlagerung der modifizierten Klebstofffestigkeiten, -steifigkeiten, -sicherheitsbeiwerte und -geometrien. Konstruktionsvariante C.3-1 bedingt eine Reduktion der Auslastung um 70% und ermöglicht beinahe die Aussteifung des viergeschossigen Gebäudes mit Grundrissverhältnis 1:2. Weniger Optimierungspotential zeigt Konstruktionsvariante C.3-2. Die breiteren Klebstoffugen und reduzierten Materialsicherheitsbeiwerte machen noch zu wenig aus. In Kombination mit den höheren Materialfestigkeiten könnte die Aussteifung jedoch übernommen werden. Die Reduktion der Auslastung beträgt dann 75%.

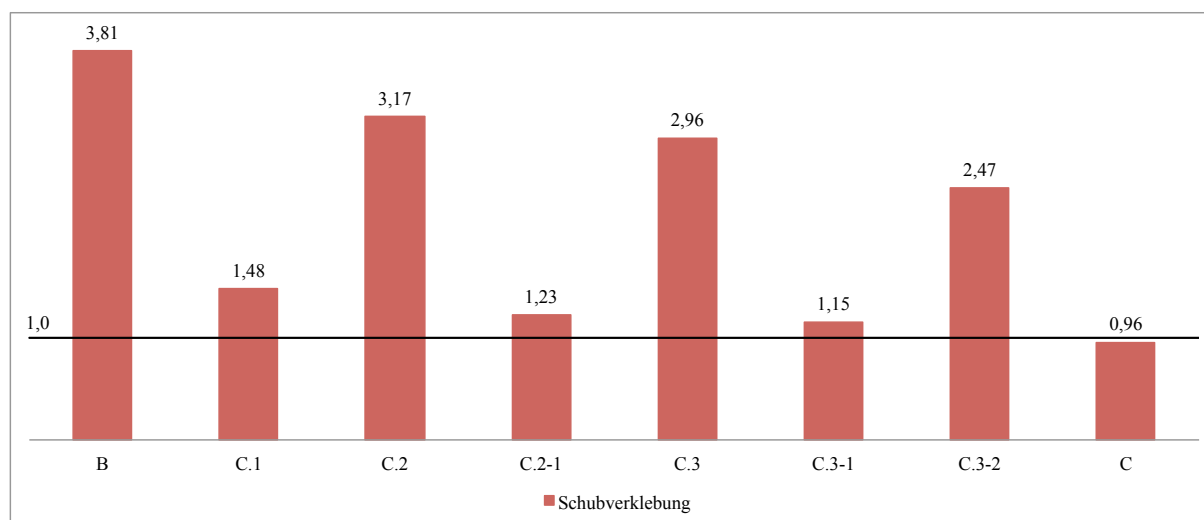


Abb. 4.23: Maximal ausgelastete Bauteilkomponente je Konstruktionsvariante beim „Einzelelement“ vom viergeschossigen Gebäude mit Grundrissverhältnis 1:2

Abb. 4.24 zeigt die maximal ausgelasteten Bauteilkomponenten beim „Verband“. Mit 324% Auslastung der Schubverklebung (rot) ist bei der Konstruktionsvariante B wieder der überwiegende Tragmechanismus „Schubfeld“ verantwortlich. Durch die Adaption der Klebstoffsteifigkeiten (Konstruktionsvariante C.1) verläuft der Kraftfluss eher in Richtung Tragmechanismus „Druckdiagonale“, weshalb beim Tragsicherheitsnachweis sogar die Querpressung der Koppelleiste (grün) zum maßgebenden Versagenskriterium wird. Durch die höhere Materialfestigkeit der Verklotzung, kann hier ein vorzeitiges Versagen vermieden werden. Die um 17% reduzierten Materialsicherheitsbeiwerte der Klebstoffe (Konstruktionsvariante C.2) machen sich aufgrund der Linearität wieder in der Auslastung bemerkbar. Dennoch tritt ein Versagen der Schubverklebung ein, da diese Modifikation keine Änderung der Wandsteifigkeit mit sich führt. Konstruktionsvariante C.2-1 hat bei dieser Kopplungsvariante weniger Effekt als beim „Einzelelement“. Alleine schon deshalb, weil Konstruktionsvariante C.1 ein Versagen der Koppelleiste bedingt, Konstruktionsvariante C.2 hingegen ausschließlich die Materialsicherheitsbeiwerte der Klebstoffe reduziert. Die Auslastung

kann hier bereits um etwa 33% gesenkt werden. Die Verbreiterung der Klebefugen (Konstruktionsvariante C.3) bringt einen mäßig veränderten Kraftfluss in Richtung Tragmechanismus „Druckdiagonale“ und somit eine überschaubare Entlastungen der Schubverklebung mit sich. Die Größenordnung von 23% entspricht in etwa dem Optimierungspotential beim „Einzelement“. Konstruktionsvariante C.3-1 setzt durch die gleichzeitige Überlagerung der modifizierten Klebstoffestigkeiten, -steifigkeiten, und -geometrien sehr stark an der Entlastung der Schubverklebung an. Die Steifigkeitsanteile der Schubverklebung (68%) und der Verklotzung (32%) in Tab. 4.23 ermöglichen eine relativ gleichmäßige Auslastung aller Bauteilkomponenten. Da einerseits die Querpressung der Koppelleiste maßgebend wird (Konstruktionsvariante C.1) und andererseits mehr Fläche zur Einleitung der Klotzdruckkraft zur Verfügung steht (Konstruktionsvariante C.3), können alle Tragsicherheitsnachweise gleichzeitig eingehalten werden. Der Optimierungsschritt ist erstaunlich und liegt im Vergleich zur Konstruktionsvariante B bei 72%. Von Konstruktionsvariante C.3-2 kann eine solch enorme Steigerung nicht erwartet werden, da der Tragmechanismus „Schubfeld“ den Hauptanteil am Lastabtrag zu übernehmen hat. Die Reduktion der Material Sicherheitsbeiwerte um 17% scheint zu gering zu sein. Der Grund, warum sich bei der Überlagerung aller optimierten Konstruktionsvarianten (Konstruktionsvariante C) nichts weiter verändert, ist folgender: Für Konstruktionsvariante C.3-1 ist die Koppelleiste maximal ausgelastet, eine Reduktion der Material Sicherheitsbeiwerte der Klebstoffe setzt also an der falschen Stelle an.

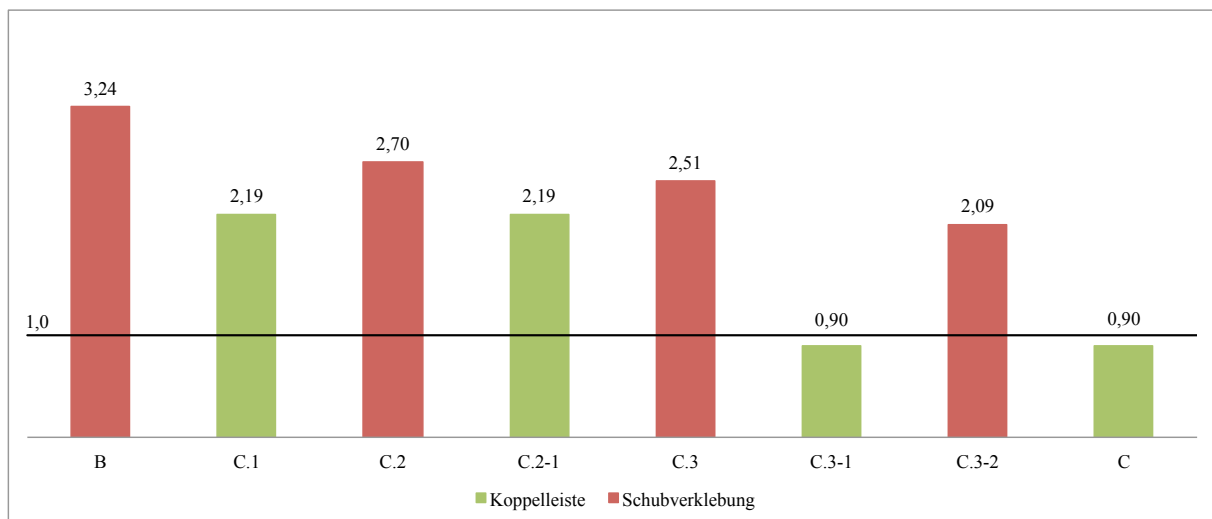


Abb. 4.24: Maximal ausgelastete Bauteilkomponente je Konstruktionsvariante beim „Verband“ vom viergeschossigen Gebäude mit Grundrissverhältnis 1:2

Zu guter Letzt zeigt Abb. 4.25 die maximal ausgelasteten Bauteilkomponenten bei der „Fassade“. Gegenüber Abb. 4.23 wird hier auf den ersten Blick festgestellt, dass großteils die Querpressung der Koppellesite (grün) nicht eingehalten werden kann. Das beginnt bereits bei der Konstruktionsvariante B, wo ein Versagen der Koppelleiste mit 299% Auslastung aufgrund des überwiegenden Tragmechanismus „Druckdiagonale“ das maßgebende Versagenskriterium ist. Durch die Adaption der Klebstoffsteifigkeiten (Konstruktionsvariante C.1) wird im Gegensatz zum „Einzelement“ und „Verband“ – überwiegender Tragmechanismus „Schubfeld“ – sogar an der vollkommen falschen Stelle angesetzt und die Auslastung steigt um 26%. Das hängt damit zusammen, dass hierbei der Tragmechanismus „Druckdiagonale“ ungünstig gefördert wird (Tab. 4.20). Durch die Adaption der Klebstoffestigkeiten kann ein vorzeitiges Versagen der Verklotzung vermieden werden. Auch Konstruktionsvariante C.2 setzt mit der Reduktion der Material Sicherheitsbeiwerte von den Klebstoffen an der falschen Stelle an. Es überrascht nicht, dass die Überlagerung

der beiden optimierten Konstruktionsvarianten nichts weiter verändert. Die Verbreiterung der Klebefugen (Konstruktionsvariante C.3) bringt zwar einen mäßig veränderten Kraftfluss in Richtung Tragmechanismus „Druckdiagonale“ mit sich (Tab. 4.23), indem aber mehr Fläche zur Verfügung steht, um die Klotzdruckkraft in die Koppelleiste einzuleiten, nimmt die Querverpresung der Koppelleiste eine untergeordnete Bedeutung ein. Die Auslastung kann im Vergleich zur Konstruktionsvariante B bereits um etwa 37% gesenkt werden. Richtig interessant ist der Optimierungsschritt von Konstruktionsvariante C.3-1. Da die Schubverklebung – wie bereits erwähnt – hierbei eine enorme Entlastung erfährt, überwiegt sogar erstmals der Tragmechanismus „Druckdiagonale“ und der Steifigkeitsanteil der Verklotzung beträgt nach Tab. 4.23 56%. Aufgrund der höheren Klebstofffestigkeiten (Konstruktionsvariante C.1) wird die Koppelleiste schließlich wieder zum schwächsten Glied. Dennoch bringt dieser Optimierungsschritt 43%. Die Adaptionsschritte von Konstruktionsvariante C.3-2 lassen sich gut miteinander kombinieren. Die breitere Schubverklebung und ihr reduzierter Materialsicherheitsbeiwert senken die Auslastung um 47% fast zur Hälfte. Die gleichzeitige Überlagerung der modifizierten Klebstofffestigkeiten, -steifigkeiten, -sicherheitsbeiwerte und -geometrien (Konstruktionsvariante C) macht wie schon beim „Verband“, auch hier bei der „Fassade“, weniger Sinn. Es stellt sich für Konstruktionsvariante C.3-1 ebenfalls die maximale Auslastung bei der Koppelleiste ein. Die Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte der Klebstoffe ist als also auch fehl am Platz.

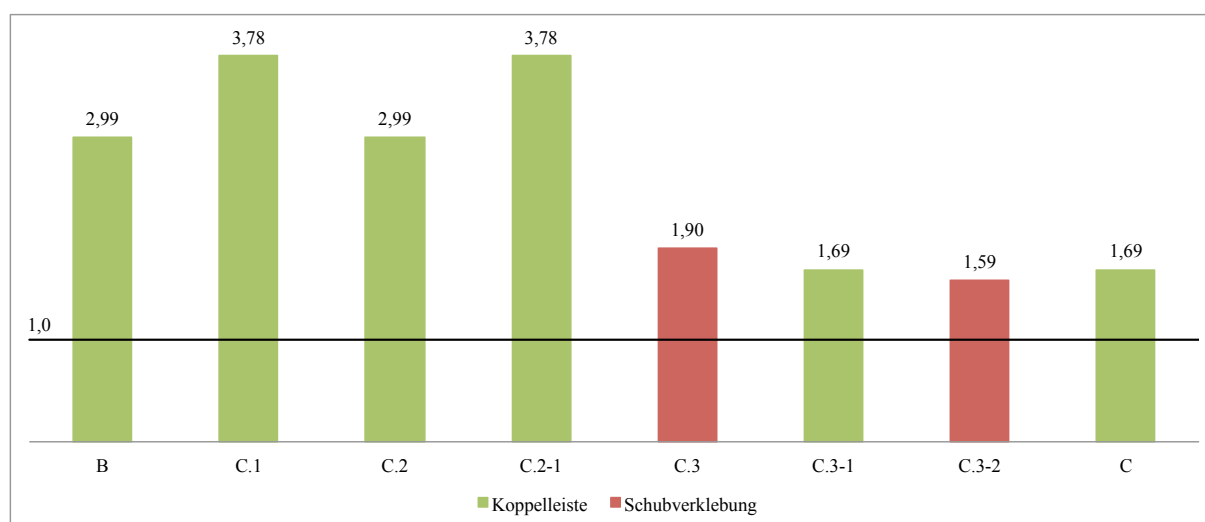


Abb. 4.25: Maximal ausgelastete Bauteilkomponente je Konstruktionsvariante bei der „Fassade“ vom viergeschossigen Gebäude mit Grundrissverhältnis 1:2

Als Resultat der Ergebnisse dieses Optimierungsverfahrens wird abgeleitet, dass die Entwicklung in eine höhere Traglast von HGV-Elementen zu aller Erst eine Analyse der Steifigkeitsverteilung bedingt. Immerhin kann ein Versagen der Schubverklebung, Verklotzung beziehungsweise der Koppelleiste maßgebend werden, unabhängig davon, ob HGV-Elemente untereinander gekoppelt werden oder nicht. Erst wenn klar und offensichtlich wird, welchen Beitrag die Tragmechanismen „Schubfeld“ beziehungsweise „Druckdiagonale“ am Kraftfluss leisten, kann an den entsprechenden Stellen angesetzt werden. Die komplexen Zusammenhänge des Ersatzfedermodells [12] wurden in diesem Abschnitt sehr deutlich und auch klarer. Bei der Optimierung von HGV-Konstruktionen sind die angestellten Überlegungen (Modifikation der Materialfestigkeiten, -steifigkeiten, -sicherheitsbeiwerte und -geometrien) auf jeden Fall richtungweisend. Sie zeigen auf, welche Entwicklungen zukünftig notwendig sind, damit die Aussteifung von viergeschossige Hochbauten aus Holz bei Windbeanspruchung vollständig durch HGV-Scheiben erfolgen kann.

4.4 Resümee

Im Zuge dieser Fallstudie wurde die HGV-Konstruktion mit der L-förmigen Koppelleiste [13] aus Abb. 2.2b im Hinblick auf ihr Aussteifungspotential als HGV-Scheibe in mehrgeschossigen Holzskelettbauten untersucht. Das grundlegende Vorgehen bei der Bearbeitung und die Zielsetzung der Fallstudie sind in Abb. 4.1 dargestellt. Am Regelbausystem – die 2,10m breite und 2,80m hohe HGV-Konstruktion aus [18] – wurden in Abschnitt 4.2.1 drei Konstruktionsvarianten durchgespielt, die sich hauptsächlich durch die verwendeten Klebstoffe und die Glasstärke unterscheiden. Zusätzlich lag ein wesentlicher Schwerpunkt auch darin, den Einfluss der Kopplung von HGV-Elementen darzulegen wie Abschnitt 4.2.2 detailliert beschreibt. Mit dem Ersatzfedermodell [12] wurden anschließend die Wandsteifigkeiten K_{kurz} bei kurzfristiger Lasteinwirkung für alle Konstruktions- und Kopplungsvarianten ermittelt. Eine anschauliche Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt Tab. 4.3. Mit dem alternativen und steiferen Klebstoff nolax C44.8508 ergaben sich Wandsteifigkeiten von bis zu $K_{kurz} = 408,83kN/cm$ bei der Kopplungsvariante „Fassade“. Das entspricht einer Steifigkeitserhöhung um das 38-fache im Bezug auf das bisher üblicherweise analysierte Referenzsystem (Konstruktionsvariante A) mit $K_{kurz} = 10,87kN/cm$. Als interessante Erkenntnis wurde in Abschnitt 4.2.2 festgestellt, dass die Reduktion der Glasstärke kaum eine Auswirkung auf die Wandsteifigkeit hat. Weil die Glasstärke sehr klein ist im Vergleich zu den Scheibenabmessungen variiert die Nachgiebigkeit der betroffenen Federn kaum.

In weitere Folge sollten ausschließlich HGV-Scheiben dieser Konstruktions- und Kopplungsvarianten die Aussteifung von ideellen Gebäuden, die einer Windbeanspruchung von $w_d = 1,77kN/m^2$ gemäß ÖNORM B 1991-1-4 [31] ausgesetzt sind, übernehmen. Die Belastungen und Verformungen verteilen sich je nach Verhältnis der Wandsteifigkeiten auf die einzelnen HGV-Elemente einer HGV-Scheibe und wurden in Abschnitt 4.2.3 mittels FE-Rechenmodellen eruiert. Nach Tab. 4.4 bis Tab. 4.9 ergaben sich je HGV-Element kurzfristige Bemessungshorizontlasten von bis zu $H_{d,kurz,vorh} = 73,33kN$ und maximale Verformungen von $u_{vorh} = 46,3mm$ bei dem viergeschossigen Gebäude.

Um Aussagen zum inneren Kraftfluss treffen beziehungsweise einzelne Bauteilkomponenten analytisch nachweisen zu können, wurden in Abschnitt 4.2.5 Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise in Anlehnung an das Berechnungs- und Bemessungskonzepts [12] geführt. Die Ergebnisse beschreibt Abschnitt 4.3.1 sehr ausführlich. Die Ausnutzung der untersuchten Bauteilkomponenten zeigen Tab. 4.10 bis Tab. 4.12. Hier sind jene Werte rot hervorgehoben, wo gewisse Nachweise nicht erfüllt werden konnten. Da bei den „Einzelelementen“ der Tragmechanismus „Schubfeld“ überwiegt (siehe Tab. 4.3) werden auch die Tragsicherheitsnachweise der Schubverklebung ab einem Geschoss maßgebend. Durch die Kopplung der HGV-Elemente zeichnete sich hingegen ein anderes Bild ab. Da damit ein Anstieg des Tragmechanismus „Druckdiagonale“ einhergeht, können ab zwei Geschossen die Tragsicherheitsnachweise der Verklotzung und die Querpressung der Koppelleiste (aufgrund der beschriebenen Verknüpfung) nicht mehr erfüllt werden. Gemeinsam mit dem Inhalt aus Abschnitt 4.2.5 geht zudem hervor, dass es unzureichend ist, generell das Beulversagen als Grenztragfähigkeit von HGV-Elementen heranzuziehen. Und bestätigt wird außerdem die Erwartung, wonach eine Erhöhung der Glasstärke eine deutlich höheren Beulwiderstand des HGV-Elements mit sich führen sollte. Wie die Traglast eines HGV-Elements für Beulversagen bei reiner Scheibenbeanspruchung zu berechnen ist beschreibt Abschnitt 4.2.5 ebenfalls sehr ausführlich. Es müsste beispielsweise ein Horizontalkraft von $H_{d,kurz,vorh} = 160,77kN$ auf das Referenzsystem einwirken, damit die Glasscheibe infolge Beulen versagen würde. Dieser Widerstand entspricht nahezu dem Fünffachen der bisher in [15, 18] angesetzten „kritischen Beullast“ $H_{crit} \approx 35kN$.

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge, musste schließlich über die maßgebenden Versagenskriterien die Grenztragfähigkeit $H_{d,kurz,zul}$ für jeden Einzelfall aller Konstruktions- und Kopplungs-

varianten extra abgeleitet werden (siehe Tab. 4.13). Die Traglast reicht von $H_{d, kurz, zul} = 4,80 kN$ beim „Einzelement“ des Referenzsystems bis hin zu $H_{d, kurz, zul} = 20,95 kN$ bei der Konstruktionsvariante B.1 mit dem alternativen und höherfesten Klebstoff nolax C44.8508. So war es schließlich möglich, die Gesamtausnutzung der HGV-Elemente infolge der zuvor eruierten kurzfristige Bemessungshorizontallasten $H_{d, kurz, vorh}$ darzustellen. Womit Tab. 4.14 bis Tab. 4.16 schließlich entnommen werden kann, dass im optimalsten Fall eine Aussteifung von dreigeschossigen Holzskelettbauten bei der angegebenen Windbeanspruchung möglich ist. Bei zwei Geschossen und ungünstigeren Grundrissverhältnissen 1:1,5 beziehungsweise 1:2 ist die Aussteifung im Bereich des Machbaren. Aufgrund der enorm hohen Gesamtausnutzung der HGV-Elemente von bis zu 1048% sind vier Geschosse mit den untersuchten Systemen nicht möglich.

Mit den Resultaten der Fallstudie und dem ihr zugrunde liegenden Wissen, wurden in Abschnitt 4.3.2 mehrere Bemessungsdiagramme entwickelt (Abb. 4.15 bis Abb. 4.20). Sie sollen Baubeteiligten die Auswahl der statisch notwendigen HGV-Elemente zur Gebäudeaussteifung bei kurzfristiger Lasteinwirkung erleichtern und somit die wirtschaftliche Akzeptanz und das Vertrauen, das HGV-Konstruktionen entgegengebracht wird, vorantreiben. Sehr rasch und einfach kann je nach Länge der zur Verfügung stehenden Wandscheibe die maximal zulässige kurzfristige Horizontallast $H_{d, kurz, max}$ – die diese Wandscheibe aufnehmen kann – als Designwert direkt abgelesen werden. Aber auch der Verhältniswert der Horizontallast pro Laufmeter Wandscheibe findet sich wieder. Zusätzlich sind die Grenzverformungen $u_{vorh, Scheibe}$ diesen Bemessungsdiagrammen zu entnehmen, die sich bei den Wandscheiben einstellen werden. Die zwei Bemessungsbeispiel in Abb. 4.21 beziehungsweise Abb. 4.22 zeigen außerdem, wie die Bemessungsdiagramme praktisch Anwendung finden können. Dabei sind in jedem Fall die Annahmen auf Seite 84 zu beachten, die ihnen zu Grunde liegen.

Ein anderer sehr positiver Aspekt ist im Zuge der Bearbeitung in den Vordergrund getreten: Durch die Kopplung aber auch durch die Verwendung des steiferen und höherfesten Klebstoffs nolax C44.8508, ist eine enorme Erhöhung der Wandsteifigkeit einhergegangen. Zum Einen gelingt es den HGV-Elementen somit, eine ausreichende „aufnehmbare Horizontalkraft“ H (Definition siehe Abschnitt 4.2.2) für die Gebäudeaussteifung zu aktivieren. Womit zum Anderen schließlich ihre Verformungen derartig reduziert werden, dass das Materialversagen der Bauteilkomponenten Schubverklebung, Verklotzung und Koppelleiste zum maßgebenden Versagenkriterium wird. Um die „maximal zulässige Horizontalkraft“ der HGV-Elemente – hier auch als Grenztragfähigkeit $H_{d, kurz, zul}$ bezeichnet – weiter steigern zu können, ist fortan in erster Linie also die Traglast einzelner Bauteilkomponenten zu erhöhen. Dazu dient Abschnitt 4.3.3. Er veranschaulicht die komplexen Zusammenhänge des Ersatzfedermodells [12] und verschafft Klarheit, die es immerhin braucht, um bei der Optimierung von HGV-Scheiben zur Gebäudeaussteifung an den richtigen Punkten ansetzen zu können. Die Resultate: Im Zuge eines Optimierungsverfahrens ist unbedingt eine Analyse der Steifigkeitsverteilung durchzuführen, um qualitative Aussagen über den Kraftfluss treffen zu können. Die angestellten Überlegungen (Modifikation der Materialfestigkeiten, -steifigkeiten, -sicherheitsbeiwerte und -geometrien) sind hierfür auf jeden Fall richtungweisend. Sie zeigen auf, welche Entwicklungen zukünftig notwendig sind, damit die Aussteifung von viergeschossigen Hochbauten aus Holz bei Windbeanspruchung vollständig durch HGV-Scheiben erfolgen kann. Eine Entlastung der Schubverklebung spielt dabei eine enorme Rolle.

Kapitel 5

Interpretation und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit werden die beiden unterschiedlichen HGV-Systeme nach Abb 2.2 behandelt. Kapitel 3 wertet diesbezüglich eine derzeit bei der HFA laufende experimentelle Langzeituntersuchung an zwei „UNIGLAS | FACADE Holz-Glas-Verbundelementen“ [24] mit der gezahnten Koppelleiste und umlaufender Schubverklebung [7] (Typ III nach ETAG 002-1 [19]) aus. Anhand der L-förmigen Koppelleiste der TU Wien [13], welche die umlaufende Schubverklebung um die Komponente einer Druckdiagonale in der Glasscheibe ergänzt, wird in Kapitel 4 das Aussteifungspotential von HGV-Scheiben in viergeschossigen Hochbauten aus Holz analytisch untersucht. Beide HGV-Systeme haben trotz der differenzierten Wirkungsweise dennoch eines gemeinsam: Durch den Einsatz im tragenden Bereich befinden sie sich in einem technisch ungeregelten Bereich. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, das grundlegende Vertrauen und die Akzeptanz, welche diesen HGV-Systemen entgegengebracht wird, weiter zu stärken. Außerdem sollen neue Anreize, besonders für die Wirtschaft aber auch für die Forschung geboten werden.

Die Ergebnisse des Monitoring – also die Beobachtungen der Verformungsmechanismen der beiden Großprüfkörper – sind in Abschnitt 3.6 ausführlich zusammengefasst. Neben dem Kriechverhalten der Silikonklebefugen, bei denen sich unter Eigengewicht ein Dauerlastniveau von $0,043N/mm^2$ einstellt, wurde auch das Verformungsverhalten der anderen Bauteilkomponenten (BFU-Koppelleiste, ESG, Klebefuge des tragenden Randverbunds im MIG und VSG) beobachtet. Offensichtlich wurde, dass beide HGV-Elemente und ihre Systemkomponenten durchwegs ein konsistentes Verhalten zeigen, obwohl sie unabhängig voneinander an der Unterkonstruktion befestigt sind. Es wird vermutet, dass es zu einer Rotation durch die nachgiebigere Brettsperrholz-Wandscheibe zwischen den beiden HGV-Elementen kommt. Dieser Anhaltspunkt ist mit Fortschreiten der Versuchsdauer unbedingt weiter zu überprüfen. Des Weiteren konnte ein direkter Zusammenhang mit der relativen Luftfeuchte bei den BFU-Koppelleisten (Quellen und Schwinden) beziehungsweise den Klebefugen des tragenden Randverbunds im MIG festgestellt werden. Auf die verhältnismäßig stabilen Temperaturbedingungen zwischen Innenraum (Büroräume) und Außenraum (Werkshalle), scheinen alle Systemkomponenten sehr neutral zu reagieren. Um die Klimazusammenhänge besser zu verstehen, wird vorgeschlagen, im Versuchsstand neben dem Außenklima zukünftig auch das Innenklima (relative Luftfeuchte und Temperatur) mit einem Klimadatenlogger kontinuierlich zu erfassen. Zusätzlich wird es als wichtig erachtet, an den Versuchsständen weitere Messuhren zu applizieren. Damit kann das Verformungsverhalten der etwa 2,5m breiten und 3,5m hohen HGV-Elemente punktuell besser analysiert werden.

Um das Aussteifungspotential der HGV-Scheiben beurteilen zu können, war eine intensive Auseinandersetzung mit dem Ersatzfedermodell [12] – das die Tragmechanismen „Schubfeld“ beziehungsweise „Druckdiagonale“ kombiniert – unumgänglich. Das grundlegende Vorgehen bei der Bearbeitung und die Zielsetzung der durchgeführten Fallstudie sind in Abb. 4.1 dargestellt. Die wesentlichen Resultate daraus werden in Abschnitt 4.4 ausführlich zusammengefasst. Die derzeit marktüblichen Konzepte, wie beispielsweise jenes in Kapitel 3, weisen eine zu geringe

Steifigkeit gegenüber horizontal in Scheibenebene wirkenden Kräften auf, um eine Aussteifung mehrgeschossiger Gebäude zu realisieren. Aus diesem Grund wurde in Anlehnung an [18] ein Regelbausystem als HGV-Konstruktion gewählt, das in weiterer Folge als HGV-Scheibe die Aussteifung von viergeschossigen Gebäuden bei Windbeanspruchung vollständig übernehmen sollte: Eine 2,1m breite und 2,8m hohe HGV-Konstruktion mit dem Zwei-Komponenten Silikonklebstoff OTTOCOLL[®] S660 (Anhang A.1) als Schubverklebung und dem bisher üblicherweise eingesetzten Injektionsmörtel HILTI HIT-RE 500 (Anhang A.3) als Verklotzungsmaterial. Indem die einzelnen HGV-Elemente zusätzlich horizontal und vertikal kraftschlüssig aneinander gereiht (Kopplung nach Abschnitt 4.2.2) werden, lässt sich die Steifigkeit noch weiter steigern. Dennoch war für diese Konstruktionsvariante die Belastung je HGV-Element bei zwei Geschossen bereits deutlich zu hoch. Aus den analytischen Nachweisen (Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit) ging hervor, dass eine Aussteifung von bis zu dreigeschossigen Gebäuden möglich werden würde, wenn stattdessen der steifere und höherfeste silanterminierte Zwei-Komponenten Epoxid n-lax C44.8508 [16] (Anhang A.2) als Schubverklebung eingesetzt wird und ebenfalls eine Kopplung erfolgt. Diesen Erkenntnissen wurden in Abschnitt 4.3.2 Bemessungsdiagramme abgeleitet. Sie sollen Baubeteiligten die Auswahl der statisch notwendigen HGV-Elemente zur Gebäudeaussteifung bei kurzfristiger Lasteinwirkung erleichtern und somit die wirtschaftliche Akzeptanz und das Vertrauen, das HGV-Konstruktionen entgegengebracht wird, vorantreiben.

Bei der Analyse wurden durchwegs sehr hohe Wandsteifigkeiten erreicht. Die Verformungen konnten sogar derartig reduziert werden, dass schließlich ein Materialversagen der Bauteilkomponenten Schubverklebung, Verklotzung und Koppelleiste zum maßgebenden Versagenskriterium wurde. Der Beulwiderstand der Glasscheibe ist wesentlich höher als bisher angenommen und nimmt eine untergeordnete Bedeutung ein. Gemeinsam mit den Erkenntnissen des Optimierungsverfahrens in Abschnitt 4.3.3, wo eine Modifikation erfolgte, um das Ersatzfedermodell sehr genau unter die Lupe nehmen zu können, wird Folgendes festgehalten: Um die Grenztragfähigkeit der HGV-Elemente weiter steigern zu können, ist in erster Linie die Traglast der drei oben genannten Bauteilkomponenten zu erhöhen. Eine Entlastung der Schubverklebung spielt dabei eine enorme Rolle. Werden Adaptionen durchgeführt, ist zu beachten, dass damit immer eine Änderung des Kraftflusses einhergeht. Zukünftige Forschungsvorhaben sollten sich also damit auseinandersetzen, die Steifigkeit durch Anordnung spezifischer Klebstoffe entsprechend zu steuern. Um eine gleichmäßige Auslastung der einzelnen Bauteilkomponenten zu erreichen, kann man sich auf die im Rahmen dieser Arbeit generierten Versuchsdaten stützen.

Zur Erforschung und Optimierung des Aussteifungspotentials braucht es außerdem noch weitere Laborversuche (wie in [11]) und technische Entwicklungen. Zum Einen sind Kriech- und Relaxationsversuche zwar zeitintensiv, der Erfahrungsschatz ist allerdings immer noch sehr begrenzt. Dem folgt ein Appell an Firmen und Forschungseinrichtungen: Klebstoffe sind im Hinblick auf deren Festigkeit, Steifigkeit, Langzeitverhalten und daraus abzuleitende Materialsicherheitsbeiwerte kontinuierlich zu untersuchen. Diesbezüglich sind auch langfristige Studien an realen Bauwerken unter den unterschiedlichsten äußeren Einflüssen notwendig. An Großprüfkörpern lässt sich das tatsächliche Aussteifungspotential besser nachvollziehen. Kapitel 3 gibt für das Monitoring eine Richtung vor. Zum Anderen kann beispielsweise die Fragestellung auch lauten, wie sich die horizontale und vertikale kraftschlüssige Aneinanderreihung (Kopplung) der HGV-Elemente mit dem bisherigen Wissen aus [15] baupraktisch umsetzen oder erweitern lässt.

Auch die folgenden Punkte könnten im Zuge eines weiteren Forschungsvorhabens eine Vertiefung darstellen: Welche Auswirkungen hat eine ungleichmäßige Anordnung beziehungsweise ein Ausfall von HGV-Elementen. Wegen der hohen Brandschutzanforderungen stellt dieses Thema eine besondere Relevanz für mehrgeschossige Hochbauten aus Holz dar. Es ist auch unrealistisch, die

vollständige Fassadenebene zum Aussteifen der Gebäude zu nutzen. Immerhin werden Bereiche für Öffnungen erforderlich sein.

Ein wichtiger Schritt wäre, ebenso die Nachgiebigkeit von Deckenscheiben, Stützen oder Wänden in FE-Rechenmodellen zu berücksichtigen, und deren Einfluss auf die Lastverteilung im Gebäude beziehungsweise auf die aussteifenden HGV-Scheiben zu eruieren. Genauso wie die Nachgiebigkeit von Verbindungsmitteln zwischen den HGV-Elementen und benachbarten Bauteilen (Wand- und Deckenanschlüsse) einen Einfluss auf die endgültige Steifigkeit einer HGV-Scheibe haben. Auch in dieser Hinsicht kann diese Arbeit als Grundlage dienen.

Offen bleibt auch, wie sich ein HGV-Element infolge Scheiben- und Plattenbeanspruchung verhält. Nicht zuletzt sollte auch auf das zeitabhängige Materialverhalten der Bauteilkomponenten bei langfristiger Lasteinwirkung ein Hauptaugenmerk gelegt werden. Die Forschungsergebnisse [18] aus dem Lastfall Erdbeben sind mit dem neuen Wissen dieser Arbeit zu ergänzen. Zu guter Letzt sind für solche Situationen ebenfalls Bemessungsdiagramme zu entwickeln, um der Bauwirtschaft weitere statisch sinnvolle Lösungen anbieten zu können. In diesem Zusammenhang sind jedenfalls Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise gemäß Berechnungs- und Bemessungskonzepts [12] zu führen, um qualitative Ergebnisse zu erhalten.

Die Entwicklungsarbeit im Holz-Glas-Verbundbau ist in den letzten Jahren weit fortgeschritten. Dennoch bedürfen diese offenen Punkte einer Klärung, damit planende und ausführende Firmen den HGV-Konstruktionen mehr Vertrauen entgegen bringen können. In weiterer Folge bedingt die wirtschaftliche Akzeptanz dann auch einen vermehrten Einsatz an Bauwerken.

Anhang A

Datenblätter der Klebstoffe

A.1 OTTOCOLL[®] S660

Siehe ab nächster Seite.

OTTOCOLL®**S 660****Technisches Datenblatt****Eigenschaften:**

- Neutraler, kondensationsvernetzender 2K-Silicon-Klebstoff auf Alkoxy- Basis
- Extrem UV-beständig, rei- und kerbfest
- Nicht korrosiv
- Sehr gute Haftung auf Glas und Holz
- Hoher Dehn-Spannungswert gewährleistet eine hohe Stabilität der Klebung
- Hrtet bei Raumtemperatur
- Minimale Geruchsbelästigung
- Reduzierte Zykluszeiten – aufgrund der schnellen Aushärtung können geklebte Teile extrem schnell weiterverarbeitet werden
- Hohe mechanische Belastbarkeit
- Geringer Volumenschwund während der Aushärtung (ca. 4%)
- Sehr gute Temperaturbeständigkeit
- Hervorragende Beständigkeit gegenüber Wasser und Feuchtigkeit

Anwendungsgebiete:

- Kleben von Holz-Glas-Verbundelementen
- Spannungsausgleichendes Kleben und Dichten unterschiedlicher Werkstoffe wie Glas, Holz, Metall und Kunststoffe

Normen und Prüfungen:

- Zertifiziert nach GOS

Besondere Hinweise:

Vor dem Einsatz des Produktes hat der Anwender sicherzustellen, dass die Werkstoffe/Materialien in dem Kontaktbereich mit diesem und miteinander verträglich sind und sich nicht schädigen oder verändern (z. B. verfärben). Bei Werkstoffen/Materialien, die in der Folge im Bereich des Produktes verarbeitet werden, hat der Anwender im Vorfeld abzuklären, dass deren Inhaltsstoffe bzw. Ausdunstungen zu keiner Beeinträchtigung oder Veränderung (z. B. Verfärbung) des Produktes führen können. Gegebenenfalls hat der Anwender Rücksprache mit dem jeweiligen Hersteller der Werkstoffe/Materialien zu nehmen.

Die konstruktiven Details der Klebung müssen mit unserer Anwendungstechnik abgestimmt werden, insbesondere die Verträglichkeit mit Kontaktmaterialien wie Isolierglasrandverbund, Dichtungen etc.

Bei der Aushärtung werden allmählich geringe Mengen Alkohol frei.

Während der Verarbeitung und Aushärtung für gute Belüftung sorgen.

Nach erfolgter Aushärtung ist das Produkt völlig geruchlos, physiologisch unbedenklich und indifferent. Verarbeitung mit Druckluftpistole P TS 460 XH

Technische Daten:**Einzelkomponenten:****Komponente A**

Farbe	weiß
Viskosität bei 23 °C	pastös
Dichte bei 23 °C nach ISO 1183-1 [g/cm³]	~ 1,31
Lagerstabilität bei 23 °C/50 % rLf [Monate]	8

OTTOCURE S-CA 2010

Farbe	schwarz
Viskosität bei 23 °C	pastös, standfest
Dichte bei 23 °C nach ISO 1183-1 [g/cm ³]	~ 1,17
Mischungsverhältnis nach Gewicht (Grundmasse A : Härter B)	11,0 : 1
Mischungsverhältnis nach Volumen (Grundmasse A : Härter B)	10 : 1
Lagerstabilität bei 23 °C/50 % rLf [Monate]	8

**Unvulkanisierte Masse:
mit OTTOCURE S-CA 2010**

Farbe	schwarz
Viskosität bei 23 °C	pastös, standfest
Dichte bei 23 °C nach ISO 1183-1 [g/cm ³]	~ 1,3
Verarbeitungstemperatur von/bis [°C]	+ 5 / + 30
Shore-A-Härte nach 4 h	~ 25 - 30
Shore-A-Härte nach 24 h	~ 38 - 42
Shore-A-Härte nach 3 d	~ 45
Topfzeit bei 23 °C/50 % rLf [min]	~ 15 - 35
Volumenschwund nach ISO 10563 [%]	~ 4

Vulkanisat:

Dichte bei + 23 °C [g/cm ³]	~ 1,3
Shore-A-Härte nach ISO 868	~ 45
Temperaturbeständigkeit von/bis [°C]	- 40 / + 150
Zugfestigkeit nach ISO 37, S3A [N/mm ²]	~ 2,9
Reißdehnung nach ISO 37, S3A [%]	~ 350
Dehnspannungswert bei 100 % nach ISO 37, S3A [N/mm ²]	~ 1,0

Diese Werte sind nicht zur Erstellung von Spezifikationen bestimmt. Bitte wenden Sie sich vor der Erstellung von Spezifikationen an OTTO-CHEMIE.

Vorbehandlung:

Die Haftflächen müssen gereinigt und jegliche Verunreinigungen, wie Trennmittel, Konservierungsmittel, Fett, Öl, Staub, Wasser, alte Kleb-/Dichtstoffe sowie andere die Haftung beeinträchtigende Stoffe entfernt werden. Reinigen von nicht-porösen Untergründen: Reinigung mit OTTO Cleaner T (Ablüfzeit ca. 1 Minute) und sauberem, flusenfreiem Tuch. Reinigen von porösen Untergründen: Oberflächen mechanisch, z.B. mit einer Stahlbürste oder einer Schleifscheibe, von losen Partikeln säubern. Die Haftflächen müssen sauber, fettfrei, trocken und tragfähig sein.

Grundierungstabelle:

Die Anforderungen an elastische Abdichtungen und Klebungen sind abhängig von den jeweiligen äußeren Einflüssen. Extreme Temperaturschwankungen, Dehn- und Scherkräfte, wiederholter Kontakt mit Wasser etc. stellen hohe Ansprüche an eine Haftverbindung. In solchen Fällen ist bei Empfehlungen (z.B. +/OTTO Primer 1216) die Verwendung des genannten Primers ratsam, um eine möglichst belastbare Verbindung zu erzielen.

Glas	+
Holz, unbehandelt	+ (1)
GFK	1101

1) Bei starker Wasserbelastung bitten wir um Rücksprache mit unserer Anwendungstechnik.

+ = ohne Grundierung gute Haftung

- = nicht geeignet

T = Test/Vorversuch empfohlen

Anwendungshinweise:

Maximale Abweichung vom Mischungsverhältnis: Das angegebene Mischungsverhältnis kann um maximal +/- 10 % variiert werden, um die Aushärtezeit zu beeinflussen.

Verarbeitung 2K-Kleb- und Dichtstoffe aus side-by-side Kartusche:

Zuerst werden die Verschlussstöpfe der beiden Komponenten entfernt. Kartusche in die Pistole einlegen. Material ausdrücken, bis bei beiden Komponenten Material austritt. Material abwischen und Statikmischer mit Überwurfmutter befestigen. Homogenität der Mischung prüfen.

Für Dichtungen der Misch- und Dosieranlage, die in direktem Kontakt mit dem Kleb-/ Dichtstoff stehen, empfehlen wir (weichmacherfreie) EPDM-Dichtungen zu verwenden. Bei Einsatz anderer Dichtungsmaterialien bitten wir um Rücksprache mit der Anwendungstechnik.

Luft einschließen während des Mischens sind zu vermeiden. Dazu empfehlen wir die Verwendung einer Mischanlage.
Die Umgebungstemperatur während der Aushärtung darf maximal 60 °C betragen.
Die Komponente A reagiert nicht mit Luftfeuchtigkeit und ist unter Normalbedingungen (23° C, 50 % rLF) stabil.
Die Komponente B ist empfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeit und muss deshalb vor Feuchtigkeit geschützt werden.
Um optimale Haftung und gute mechanische Eigenschaften zu erzielen, muss der Einschluß von Luft in der Klebfuge vermieden werden.
Verarbeiten/Glätten: Der Kleb-/Dichtstoff muss innerhalb seiner Topfzeit geglättet werden, um den innigen Kontakt mit der Haftfläche und den Flanken zu gewährleisten. Es darf kein Glättmittel verwendet werden.
Wegen der Vielzahl möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung und der Anwendung ist vom Verarbeiter stets eine Probeverarbeitung und -anwendung vorzunehmen.
Das konkrete Aufbrauchsdatum ist dem Gebindeaufdruck zu entnehmen und zu beachten.
Wir empfehlen, unsere Produkte in den ungeöffneten Originalgebinden trocken (< 60 % rLF) im Temperaturbereich von + 15° C bis + 25° C zu lagern. Werden die Produkte über längere Zeiträume (mehrere Wochen) bei höherer Temperatur/ Luftfeuchtigkeit gelagert und / oder transportiert, kann eine Verringerung der Haltbarkeit bzw. eine Veränderung der Materialeigenschaften nicht ausgeschlossen werden.
Zur Sicherstellung der korrekten Mischung sind vom Anwender verarbeitungsbegleitende Qualitätskontrollen durchzuführen. Die jeweils erforderlichen Prüfungen sind dem Dokument "Verarbeitungsbegleitende Qualitätskontrollen 2K-Silicone" zu entnehmen, das über die Anwendungstechnik erhältlich ist.

Lieferform: Gebinde und Farben auf Anfrage

Sicherheitshinweise: Bitte das Sicherheitsdatenblatt beachten.

Entsorgung: Hinweise zur Entsorgung siehe Sicherheitsdatenblatt.

Mängelhaftung: Alle Angaben in dieser Druckschrift basieren auf derzeitigen technischen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verarbeiter wegen der Vielzahl möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung und Anwendung nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Die Angaben in dieser Druckschrift und Erklärungen der Otto-Chemie im Zusammenhang mit dieser Druckschrift stellen keine Übernahme einer Garantie dar. Garantieerklärungen bedürfen zu ihrer Wirksamkeit der gesonderten ausdrücklichen schriftlichen Erklärung der Otto-Chemie. Die in diesem Datenblatt angegebenen Beschaffenheiten legen die Eigenschaften des Liefergegenstandes umfassend und abschließend fest. Verwendungsvorschläge begründen keine Zusicherung der Eignung für den empfohlenen Einsatzzweck. Wir behalten uns das Recht zur Anpassung des Produktes an den technischen Fortschritt und an neue Entwicklungen vor. Für Anfragen stehen wir gerne zur Verfügung, auch bezüglich etwaiger spezieller Anwendungsproblematiken. Unterliegt die Anwendung, für die unsere Produkte herangezogen werden, einer behördlichen Genehmigungspflicht, so ist der Anwender für die Erlangung dieser Genehmigungen verantwortlich. Unsere Empfehlungen befreien den Anwender nicht von der Verpflichtung, die Möglichkeit der Beeinträchtigung von Rechten Dritter zu berücksichtigen und, wenn nötig, zu klären. Im Übrigen verweisen wir auf unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen, insbesondere auch bezüglich einer etwaigen Mängelhaftung. Sie finden unsere AGB unter <http://www.otto-chemie.de>

A.2 nolax C44.8505

Siehe ab nächster Seite.

nolax C44.8505

Hochwertiger, elastischer 2K Klebstoff mit langer offener Zeit

Produktdaten

Beschreibung:

Das Produkt ist frei von Isocyanat, Silikonöl, Phthalat-Weichmacher und Lösungsmittel

Basis:

Komp. A: Silanterminiertes Polymer, formuliert

Komp. B: Epoxid Harz, formuliert

Farbe:

Komp. A: Hellbeige

Komp. B: Schwarz

Mischung: Dunkelgrau

Feststoffgehalt:

100%

Mischverhältnis:

Komp. A:B = 2:1 nach Volumenteilen

Viskosität:

Komp. A: ca. 120 Pa·s bei 20 °C (Brookfield RVT 7/20)

Komp. B: ca. 50 Pa·s bei 20 °C (Brookfield RVT 7/10)

Dichte:

Komp. A: 1.04 g/cm³ bei 20 °C

Komp. B: 1.16 g/cm³ bei 20 °C

Lagerung:

Kühl und trocken bei 5 °C bis 25 °C in ungeöffneten

Originalgebinden 9 Monate.

Transport: Kann bei Temperaturen bis zu -26 °C transportiert werden. Wir empfehlen jedoch keine über längere Zeit anhaltende Transportwege unter dem Gefrierpunkt.

Verpackung:

Doppelte Kartuschen zu 400 ml

Mischer MFH 10-24T

Für industrielle Anlagen in getrennten Gebinden erhältlich.

Verarbeitungsdaten

Vorbehandlung:

Klebeflächen müssen trocken, sauber, staub- und fettfrei sein.

Entfetten mit Reiniger z.B. Aceton.

Mit dem Washprimer nolax C49.8502 können leicht verschmutzte Metalloberflächen gereinigt und zugleich aktiviert werden.

Verarbeitungstemperatur:

+5 °C bis +40 °C (Bauteiltemperatur)

+18 °C bis +25 °C (Ideale Temperatur)

Gelzeit:

Ca. 60 Minuten bei 20 °C (interne Prüfmethode 915.2)

Anfangsfestigkeit:

1,5 MPa nach 24 Stunden bei 20 °C (DIN 53283 / EN 1465)

Überstreichbarkeit:

Mit Acryl-Dispersionsfarben und Einbrennlacken

Reinigung:

Nicht ausgehärtete Klebstoffresten mit Ethanol. Ausgehärteter Klebstoff durch mechanische Bearbeitung

Anwendung

Als standfester, elastischer Klebstoff im Metall-, GFK und Kunststoffbereich.

- Metallbau und Blechverarbeitung

- Karosserie-, Fahrzeug- und Schiffsbau

- Fassadenelemente / Paneelen

- Eckverbindungen von Alu-Fensterprofilen

- Kleben von Glas und Kunststoff in Kombination mit Holz, Metall und mineralischen Baustoffen.

Das Produkt ist nicht geeignet für bituminöse Untergründe, PE, PP und Teflon.

Verarbeitung

Der Klebstoff in doppelter Kartusche kann mit der 2K Hand- oder Druckluftpistole aufgetragen werden. Die beiden Komponenten werden durch einen statischen Mischer MFH 10-24T homogen gemischt. Die ersten 10g müssen verworfen werden.

Arbeitssicherheit:

Bei der Verarbeitung wird das Tragen von Schutzbrille und Schutzhandschuhen empfohlen. Kontakt mit Augen, Haut und Kleidung vermeiden. Dämpfe nicht einatmen. Bei Handhabung für gute Ventilation sorgen.

Bitte beachten Sie die Hinweise auf dem Sicherheitsdatenblatt.

Beanspruchung

Zugfestigkeit:

(DIN EN ISO 527-1), 8.5 MPa (nach 4 Wochen bei 20 °C)

Bruchdehnung:

Ca. 250% bei Raumtemperatur

Zugscherfestigkeit:

Aluminium (DIN 53283 / EN1465) nach 4 Wochen bei 20 °C

- 45°C : 25 MPa

RT : 8 MPa

70°C : 3.3 MPa

Medienbeständigkeit:

(Lagerdauer 28 Tage) Grundsätzlich geeignet für Alu- und CNS-Verklebungen in Kontakt mit Ethanol techn., Benzin bleifrei 95, Ethylacetat, Toluol, MEK, Motorenöl 23 °C und 50 °C

Gefrierbeständigkeit:

Bei - 20° C / 24 h auf Alu/CNS. Nur sehr geringer Festigkeitsabfall

Shore-A-Härte:

Ca. 87 (DIN 53505 / ISO R 868) nach 4 Wochen bei 20 °C

Kontakt

nolax AG

T +41 41 545 98 98

F +41 41 545 98 99

info@nolax.com

Garantie

Wir garantieren für die gleichmässig einwandfreie Qualität dieses nach Qualitätsnormen von ISO hergestellten Produktes, das aufgrund unserer langjährigen Erfahrungen für die empfohlenen Anwendungen und angegebenen Bedingungen entwickelt worden ist. Material, Verarbeitung und Verarbeitungsbedingungen können die Produkteigenschaften massgeblich beeinflussen. Daher sind vor dem Einsatz Versuche beim Verarbeiter unerlässlich. Für andere Anwendungen sowie bei abweichenden Verarbeitungsbedingungen empfehlen wir, vorgängig den anwendungstechnischen Dienst von nolax AG zu kontaktieren. Es gelten die allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen von nolax AG.

A.3 HILTI HIT-RE 500

Siehe ab nächster Seite.

LEISTUNGSERKLÄRUNG

No. Hilti HIT-RE 500 rebar 1343-CPR-M500-4/07.14
1. Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:

Injektionsmörtel Hilti HIT-RE 500 für Bewehrungsanschlüsse

2. Typen-, Chargen- oder Seriennummer oder ein anderes Kennzeichen zur Identifikation des Bauprodukts gemäß Artikel 11 Absatz 4:

Siehe ETA-08/0105 (30.04.2014); Anhang 1, 4, 6.

Chargennummer: Siehe Verpackung des Produkts.

3. Vom Hersteller vorgesehener Verwendungszweck oder vorgesehene Verwendungszwecke des Bauprodukts gemäß der anwendbaren harmonisierten technischen Spezifikation:

Allgemeine Bauart	Injektionssystem, nachträglich eingemörtelter Bewehrungsanschluss durch Verankerung oder Übergreifungsstoß in vorhandene Stahlbetonbauwerken
für Verwendung in	<u>Beton (C12/15 bis C50/60)</u> nicht karbonatisiert, maximaler Chloridgehalt 0,40 %, Bohrlocherstellung durch Hammerbohren, Hohlbohren, Pressluftbohren oder Diamantbohren (trocken oder nass)
Option/Kategorie	-
Belastung	überwiegend statisch (HZA Zuganker Nur für Übertragung von Zugkräften in Richtung der Stabachse)
Werkstoff	<u>Betonstahl Klasse B oder C:</u> Siehe EN 1992-1-1 Anhang C, Tabellen C.1 und C.2N HIT-RE 500 + Betonstahl: Ø 8, Ø 10, Ø 12, Ø 14, Ø 16, Ø 20, Ø 25, Ø 26, Ø 28, Ø 30, Ø 32, Ø 34, Ø 36, Ø 40 <u>Nichtrostender Stahl A4 + Bewehrungsstab:</u> für Innen- und Außenanwendungen ohne spezielle aggressive Bedingungen HIT-RE 500 + HZA-R (Zuganker) : M12, M16, M20, M24
Temperaturbereich (sofern zutreffend)	-40 °C bis +80 °C (kurz), +50 °C (lang)

4. Name, eingetragener Handelsname oder eingetragene Marke und Kontaktanschrift des Herstellers gemäß Artikel 11 Absatz 5:

Hilti Aktiengesellschaft, Feldkircherstrasse 100, 9494 Schaan, Liechtenstein

5. Gegebenenfalls Name und Kontaktanschrift des Bevollmächtigten, der mit den Aufgaben gemäß Artikel 12 Absatz 2 beauftragt ist: -
6. System oder Systeme zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit des Bauprodukts gemäß Anhang V:
System 1

7. Im Falle der Leistungserklärung, die ein Bauprodukt betrifft, das von einer harmonisierten Norm erfasst wird: -
8. Im Falle der Leistungserklärung, die ein Bauprodukt betrifft, für das eine Europäische Technische Bewertung ausgestellt worden ist:

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) als Herausgeber der Europäischen Technischen Zulassung ETA-08/0105 (30.04.2014) auf Basis der ETAG 001 Teil 1, 5; EOTA TR 023. Die notifizierte Stelle 1343-CPR-M500-4/07.14 als Überwacher gemäss Annex V unter dem System 1 und als Herausgeber des EG-Konformitätszertifikats 1343-CPR-M500-4/07.14.

9. Erklärte Leistung:

Wesentliche Eigenschaften	Bemessungsverfahren	Leistung	Harmonisierte technische Spezifikation
Mindestbetondeckung	EN 1992-1-1 ETA-08/0105 Punkt 4.3 ETA-08/0105 Anhang 2, 5, 6, 7	ETA-08/0105, Anhang 8	ETAG 001 Teil 1, 5; EOTA TR 023
Minimale Verankerungstiefe		ETA-08/0105, Anhang 8	
Versagens- Verbundfestigkeit		ETA-08/0105, Anhang 9	

10. Die Leistung des Produkts gemäß den Nummern 1 und 2 entspricht der erklärten Leistung nach Nummer 9. Verantwortlich für die Erstellung dieser Leistungserklärung ist allein der Hersteller gemäß Nummer 4.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:



Raimund Zaggl
Leiter Geschäftsfeld
Geschäftsfeld Anker-/Dübeltechnik



Seppo Perämäki
Leiter Qualität
Geschäftsfeld Anker-/Dübeltechnik

Hilti Aktiengesellschaft
Schaan, Juli 2014



LEISTUNGSERKLÄRUNG

No. Hilti HIT-RE 500 0756-CPD-0045

1. Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:

Injektionsmörtel Hilti HIT-RE 500

2. Typen-, Chargen- oder Seriennummer oder ein anderes Kennzeichen zur Identifikation des Bauprodukts gemäß Artikel 11 Absatz 4:

Siehe: ETA-04/0027 (26.06.2013), Anhang 1.

Chargennummer: Siehe Verpackung des Produkts.

3. Vom Hersteller vorgesehener Verwendungszweck oder vorgesehene Verwendungszwecke des Bauprodukts gemäß der anwendbaren harmonisierten technischen Spezifikation:

Allgemeine Bauart	Verbunddübel, Injektionsmörtel
für Verwendung in	<u>Beton (C20/25 bis C50/60)</u> : Bohrlocherstellung durch Hammerbohren, Hilti Hohlbohren, oder Diamantbohren <ul style="list-style-type: none"> • ungerissenen: M8-M30, Ø8-32mm
Option/Kategorie	Option 7
Belastung	Statisch, quasi-statisch
Werkstoff	<p><u>Verzinkter Stahl</u>: nur für trockene Innenräume</p> <ul style="list-style-type: none"> • HIT-RE 500 + HIT-V (F) (Gewindestange): M8, M10, M12, M16, M20, M24, M27, M30 • HIT-RE 500 + HAS(-E) (Gewindestange): M8, M10, M12, M16, M20, M24, M27, M30 • HIT-RE 500 + HIS-N (Innengewindehülse): M8, M10, M12, M16, M20 <p><u>Nichtrostender Stahl A4</u>: für Innen- und Außenanwendungen ohne spezielle aggressive Bedingungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • HIT-RE 500 + HIT-V-R (Gewindestange): M8, M10, M12, M16, M20, M24, M27, M30 • HIT-RE 500 + HAS(-E)-R (Gewindestange): M8, M10, M12, M16, M20, M24, M27, M30 • HIT-RE 500 + HIS-RN (Innengewindehülse): M8, M10, M12, M16, M20 • HIT-RE 500 + HZA-R (Zuganker): M12, M16, M20, M24 <p><u>Hochkorrosionsbeständiger Stahl</u>: für Innen- und Außenanwendungen unter speziellen aggressiven Bedingungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • HIT-RE 500 + HIT-V-HCR (Gewindestange): M8, M10, M12, M16, M20, M24, M27, M30 • HIT-RE 500 + HAS(-E)-HCR (Gewindestange): M8, M10, M12, M16, M20, M24, M27, M30 <p><u>Betonstahl Klasse B oder C</u>: EN 1992-1-1 Anhang C, Tabellen C.1 und C.2N für Bewehrungseigenschaften (nachträglich eingemörtelter Bewehrungsstäbe nur gemäß EOTA TR 029 verwenden)</p> <ul style="list-style-type: none"> • HIT-RE 500 + Betonstahl Ø8, Ø10, Ø12, Ø14, Ø16, Ø20, Ø25, Ø26, Ø28, Ø30, Ø32
Temperaturbereich (sofern zutreffend)	Bereich I: -40° bis +40°C (kurz), +24°C (lang) Bereich II: -40° bis +58°C (kurz), +35°C (lang) Bereich III: -40° bis +70°C (kurz), +43°C (lang)

4. Name, eingetragener Handelsname oder eingetragene Marke und Kontaktanschrift des Herstellers gemäß Artikel 11 Absatz 5: *Hilti Aktiengesellschaft, Geschäftsfeld Anker-/Dübeltechnik, 9494 Schaan, Fürstentum Liechtenstein*

5. Gegebenenfalls Name und Kontaktanschrift des Bevollmächtigten, der mit den Aufgaben gemäß Artikel 12 Absatz 2 beauftragt ist: -

6. System oder Systeme zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit des Bauprodukts gemäß Anhang V: *System 1*

7. Im Falle der Leistungserklärung, die ein Bauprodukt betrifft, das von einer harmonisierten Norm erfasst wird: -

8. Im Falle der Leistungserklärung, die ein Bauprodukt betrifft, für das eine Europäische Technische Bewertung ausgestellt worden ist:

- Technischen Bewertungsstelle: *Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)*
- Europäische Technische Zulassung: *ETA-04/0027 (26.06.2013)*
- Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung: *ETAG 001 Teil 1, 5*
- Konformitätsbescheinigung: *0756-CPD-0045*

9. Erklärte Leistung:

Wesentliche Eigenschaften	Bemessungsverfahren	Leistung	Harmonisierte technische Spezifikation
Charakteristische Werte der Zugtragfähigkeit	EOTA TR 020 029	ETA-04/0027 Anhang 14, 17, 20, 23	<i>ETAG 001 Teil 1, 5</i>
Charakteristische Werte der Quertragfähigkeit	EOTA TR 020 029	ETA-04/0027 Anhang 15, 18, 21, 24	
minimale Achs- und Randabstände	EOTA TR 020 029	ETA-04/0027 Anhang 3 - 6	
Verschiebung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	EOTA TR 020 029	ETA-04/0027 Anhang 16, 19, 22, 25	

10. Die Leistung des Produkts gemäß den Nummern 1 und 2 entspricht der erklärten Leistung nach Nummer 9. Verantwortlich für die Erstellung dieser Leistungserklärung ist allein der Hersteller gemäß Nummer 4.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:



Raimund Zaggl
Leiter Geschäftsfeld
Geschäftsfeld Anker-/Dübeltechnik



Seppo Perämäki
Leiter Qualität
Geschäftsfeld Anker-/Dübeltechnik



Anhang B

Ergänzende Tabellen

B.1 Verformungsprotokoll

Siehe ab nächster Seite.

B.2 Differenztafel

Siehe ab nächster Seite.

				HGV-Element SÜD					HGV-Element NORD				
Messuhrbezeichnung: Messuhrnummer / Messpunktposition	MP3/MP2	MP2/MP1	MP3/MP2	MP2/MP1	MP3/MP2	MP2/MP1	MP3/MP2	MP2/MP1	MP3/MP2	MP2/MP1	MP3/MP2	MP2/MP1	
	108/106	106/107	110/104	104/105	111/102	102/103	119/99	99/100	Rand-verbund links	Rand-verbund links	Rand-verbund rechts	Rand-verbund rechts	
Bezeichnung orientiert sich an der Ansichtsfäche von außen													
Anmerkung	Tag ab Montage	Datum	Zeit	Vorzeichen negativ bedeutet Absenkung nach unten									
Montage von MP1 bzw. MP2 und Nullmessung	0	08.03.16	16:00	-	0,000	-	0,000	-	0,000	-	0,000	0,000	
Montage MP3 und Nullmessung; erste Ablesung von MP1 bzw. MP2	1	09.03.16	08:00	0,030	-0,010	0,020	0,000	0,000	0,000	-0,020	0,010	0,000	
Klotzung entfernt; erste gemeinsame Ablesung aller Messuhren	1	09.03.16	09:00	0,070	-0,030	-0,020	0,000	0,000	-0,120	0,030	0,005	-0,055	
	3	11.03.16	07:30	0,015	-0,040	0,015	0,010	0,010	-0,045	-0,125	-0,025	-0,065	
	6	14.03.16	09:30	0,015	-0,035	0,015	0,005	0,005	-0,045	-0,120	-0,020	-0,065	
	13	21.03.16	10:00	0,005	-0,050	0,005	0,015	0,015	-0,055	-0,130	-0,035	-0,075	
	21	29.03.16	10:00	-	-0,045	-0,015	0,040	0,040	-0,070	-0,115	-0,055	-0,065	
MAS entfernt bzw. gelockert	21	29.03.16	15:00	-	-0,050	-0,030	0,030	0,030	-0,090	-0,115	-0,065	-0,075	
	22	30.03.16	08:15	-	-0,055	-0,020	0,035	0,035	-0,075	-0,135	-0,050	-0,070	
Metallwinkel von 108/3 am Tag 24 neu montiert	23	31.03.16	08:00	-	-0,060	-0,015	0,035	0,035	-0,075	-0,135	-0,045	-0,075	
Messung von 108/3 wieder aufgenommen; Ausgangswert von Tag 13 übernommen	27	04.04.16	09:30	0,020	-0,050	-0,020	0,025	0,025	-0,080	-0,140	-0,045	-0,070	
	34	11.04.16	09:45	0,055	-0,045	0,010	0,000	0,000	-0,050	-0,165	-0,020	-0,075	
	36	13.04.16	16:30	0,050	-0,040	0,010	0,000	0,000	-0,050	-0,165	-0,025	-0,080	
	41	18.04.16	11:30	0,085	-0,060	0,030	-0,006	-0,006	-0,030	-0,195	0,000	-0,075	
	55	02.05.16	14:30	0,000	-0,060	-0,035	0,010	0,010	-0,090	-0,160	-0,065	-0,070	
	86	02.06.16	11:00	0,000	-0,020	0,010	-0,050	-0,050	-0,065	-0,230	-0,015	-0,015	
	118	04.07.16	10:00	0,35	-0,025	0,075	-0,110	-0,110	-0,050	-0,270	0,030	-0,005	
	146	01.08.16	09:30	0,115	-0,020	0,030	-0,110	-0,110	-0,050	-0,340	0,000	0,000	
	181	05.09.16	09:30	0,070	-0,020	0,005	-0,120	-0,120	-0,100	-0,295	-0,035	-0,005	
	209	03.10.16	11:00	0,060	-0,030	0,000	-0,110	-0,110	-0,100	-0,285	-0,025	-0,005	
	239	02.11.16	10:00	0,135	-0,095	0,085	-0,135	-0,135	-0,065	-0,270	0,055	-0,065	
	268	01.12.16	-	0,040	-0,120	-0,010	-0,100	-0,100	-0,120	-0,240	-0,030	-0,080	
	300	02.01.17	10:00	-0,140	-0,140	-0,155	-0,030	-0,030	-0,335	-0,190	-0,185	-0,065	
	329	31.01.17	09:30	-0,330	-0,180	-0,385	0,050	0,050	-0,235	-0,095	-0,310	-0,065	
	363	06.03.17	17:00	-0,240	-0,170	-0,300	0,000	0,000	-0,330	-0,080	-0,240	-0,080	
	391	03.04.17	17:15	-0,160	-0,140	-0,250	-0,030	-0,030	-0,330	-0,080	-0,200	-0,070	
	420	02.05.17	10:40	-0,130	-0,140	-0,220	-0,050	-0,050	-0,290	-0,090	-0,140	-0,090	
	450	01.06.17	17:40	-0,170	0,060	-0,190	-0,090	-0,090	-0,200	-0,240	-0,150	-0,030	

B.3 Wandsteifigkeit

Siehe ab nächster Seite.

Konstruktionsvariante A		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	0,17	0,17	0,17
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	0,17	0,17	0,17
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	0,36	0,36	0,36
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	3,45	3,45	3,45
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	6730,13	6730,13	6730,13
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	18050,00	18050,00	18050,00
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	462,28	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	462,58	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	637,50	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,04	678,40	1664,44
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,72	678,40	1664,44	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	3,77	254,40	624,17	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	2,89	254,40	624,17	
K_{τ} [kN/cm] =	9,93	9,98	9,98	
	91,29%	12,34%	5,43%	
K_c [kN/cm] =	0,95	70,89	173,92	
	8,71%	87,66%	94,57%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	10,87	80,86	183,89	

Konstruktionsvariante B		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	15,63	15,63	15,63
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	3,50	3,93	3,93
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	7,50	8,42	8,42
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	312,67	312,67	312,67
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	6730,13	6730,13	6730,13
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	18050,00	18050,00	18050,00
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	462,28	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	462,58	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	637,50	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,04	678,83	1667,03
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,72	678,83	1667,03	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	3,77	254,56	625,14	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	2,89	254,56	625,14	
K_{τ} [kN/cm] =	208,90	234,66	234,66	
	99,55%	76,79%	57,40%	
K_c [kN/cm] =	0,95	70,93	174,19	
	0,45%	23,21%	42,60%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	209,84	305,58	408,84	

Konstruktionsvariante B.1		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	15,63	15,63	15,63
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	37,33	37,33	37,33
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	3,39	3,80	3,80
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	7,27	8,14	8,14
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	312,67	312,67	312,67
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	6730,13	6730,13	6730,13
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	18050,00	18050,00	18050,00
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	462,28	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	462,58	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1680,00	1680,00	1680,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	637,50	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,02	598,25	1252,69
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,71	598,25	1252,69	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	3,76	224,34	469,76	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	2,89	224,34	469,76	
K_{τ} [kN/cm] =	202,57	226,70	226,70	
	99,54%	78,39%	63,40%	
K_c [kN/cm] =	0,94	62,51	130,89	
	0,46%	21,61%	36,60%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	203,51	289,21	357,59	

Konstruktionsvariante C		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	5,46	5,46	5,46
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	2,47	2,68	2,68
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	4,12	4,46	4,46
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	163,80	163,80	163,80
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	15679,44	15679,44	15679,44
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	18750,00	18750,00	18750,00
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	545,80	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	539,68	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	956,25	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,17	721,10	1947,29
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,79	721,10	1947,29	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	1,69	120,18	324,55	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	1,30	120,18	324,55	
K_{τ} [kN/cm] =	147,41	159,79	159,79	
	99,35%	67,96%	43,99%	
K_c [kN/cm] =	0,96	75,35	203,47	
	0,65%	32,04%	56,01%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	148,37	235,14	363,26	

Konstruktionsvariante C.1		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	4,25	4,25	4,25
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	2,19	2,35	2,35
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	4,69	5,03	5,03
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	84,93	84,93	84,93
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	6730,13	6730,13	6730,13
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	7916,67	7916,67	7916,67
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	462,28	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	462,58	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	637,50	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,04	647,80	1491,54
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,71	647,80	1491,54	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	3,76	242,92	559,33	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	2,89	242,92	559,33	
K_{τ} [kN/cm] =	130,54	140,16	140,16	
	99,28%	67,43%	47,35%	
K_c [kN/cm] =	0,95	67,69	155,85	
	0,72%	32,57%	52,65%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	131,49	207,85	296,01	

Konstruktionsvariante C.2		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	15,63	15,63	15,63
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	3,50	3,93	3,93
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	7,50	8,42	8,42
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	312,67	312,67	312,67
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	6730,13	6730,13	6730,13
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	18050,00	18050,00	18050,00
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	462,28	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	462,58	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	637,50	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,04	678,81	1666,86
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,72	678,81	1666,86	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	3,77	254,55	625,07	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	2,89	254,55	625,07	
K_{τ} [kN/cm] =	208,90	234,66	234,66	
	99,55%	76,79%	57,40%	
K_c [kN/cm] =	0,95	70,93	174,17	
	0,45%	23,21%	42,60%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	209,84	305,59	408,83	

Konstruktionsvariante C.2-1		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	4,25	4,25	4,25
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	2,19	2,35	2,35
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	4,69	5,03	5,03
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	84,93	84,93	84,93
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	6730,13	6730,13	6730,13
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	7916,67	7916,67	7916,67
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	462,28	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	462,58	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	637,50	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,04	647,80	1491,54
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,71	647,80	1491,54	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	3,76	242,92	559,33	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	2,89	242,92	559,33	
K_{τ} [kN/cm] =	130,54	140,16	140,16	
	99,28%	67,43%	47,35%	
K_c [kN/cm] =	0,95	67,69	155,85	
	0,72%	32,57%	52,65%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	131,49	207,85	296,01	

Konstruktionsvariante C.3		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	20,10	20,10	20,10
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	3,68	4,16	4,16
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	6,14	6,94	6,94
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	603,00	603,00	603,00
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	15679,44	15679,44	15679,44
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	42750,00	42750,00	42750,00
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	545,80	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	539,68	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	956,25	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,17	736,93	2067,27
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,79	736,93	2067,27	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	1,70	122,82	344,55	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	1,30	122,82	344,55	
K_{τ} [kN/cm] =	219,83	248,55	248,55	
	99,57%	76,35%	53,50%	
K_c [kN/cm] =	0,96	77,00	216,01	
	0,43%	23,65%	46,50%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	220,79	325,55	464,56	

Konstruktionsvariante C.3-1		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	5,46	5,46	5,46
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	2,47	2,68	2,68
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	4,12	4,46	4,46
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	163,80	163,80	163,80
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	15679,44	15679,44	15679,44
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	18750,00	18750,00	18750,00
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	545,80	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	539,68	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	956,25	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,17	721,10	1947,29
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,79	721,10	1947,29	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	1,69	120,18	324,55	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	1,30	120,18	324,55	
K_{τ} [kN/cm] =	147,41	159,79	159,79	
	99,35%	67,96%	43,99%	
K_c [kN/cm] =	0,96	75,35	203,47	
	0,65%	32,04%	56,01%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	148,37	235,14	363,26	

Konstruktionsvariante C.3-2		Einzelement	Verband	Fassade
	$C_{\tau,l}$ [kN/cm ²] =	20,10	20,10	20,10
	$C_{KL,l}$ [kN/cm ²] =	55,50	55,50	55,50
	$C_{G,v}$ [kN/cm ²] =	56,00	56,00	56,00
	$C_{VM,l}$ [kN/cm ²] =	6,47	6,47	6,47
	$C_{R,l}$ [kN/cm ²] =	31,88	∞	∞
	$C_{ges} = k_u = k_w$ [kN/cm ²] =	3,68	4,16	4,16
	$G_{\dot{a}q,ges}$ [N/mm ²] =	6,14	6,94	6,94
	$C_{\tau,q}$ [kN/cm] =	603,00	603,00	603,00
	$C_{KL,\varepsilon}$ [kN/cm] =	15679,44	15679,44	15679,44
	$C_{R,B-Riegel}$ [kN/cm] =	14,17	∞	∞
	$C_{R,B-Pfosten}$ [kN/cm] =	9,94	∞	∞
	C_c [kN/cm] =	42750,00	42750,00	42750,00
	$C_{KL,q}$ [kN/cm] =	545,80	∞	∞
	$C_{VM,q}$ [kN/cm] =	539,68	∞	∞
	$C_{G,\varepsilon}$ [kN/cm] =	2520,00	2520,00	2520,00
	$C_{R,q}$ [kN/cm] =	956,25	∞	∞
	$C_{R,\varepsilon}$ [kN/cm] =	1145,14	1145,14	∞
	C_{RG} [kN/cm] =	46,26	∞	∞
	$K_v = C_{ges,v}$ [kN/cm] =	10,17	736,93	2067,27
$K_h = C_{ges,h}$ [kN/cm] =	7,79	736,93	2067,27	
$E_{\dot{a}q,ges,v}$ [N/mm ²] =	1,70	122,82	344,55	
$E_{\dot{a}q,ges,h}$ [N/mm ²] =	1,30	122,82	344,55	
K_{τ} [kN/cm] =	219,83	248,55	248,55	
	99,57%	76,35%	53,50%	
K_c [kN/cm] =	0,96	77,00	216,01	
	0,43%	23,65%	46,50%	
$K_{kurz} = K_{\tau} + K_c$ [kN/cm] =	220,79	325,55	464,56	

B.4 Traglast für Beulversagen

Siehe ab nächster Seite.

Konstruktionsvariante A		Einzelement	Verband	Fassade
	$\kappa c [] =$	5,439	4,065	3,944
	$Di = D1 = D2 [Nmm] =$	1330376,94	1330376,94	1330376,94
	$Ds [Nmm] =$	10132505,54	10132505,54	10132505,54
	$D [Nmm] =$	12793259,42	12793259,42	12793259,42
	$A [N/mm] =$	24,05	24,05	24,05
	$f_{iV} [] =$	0,5282	0,5282	0,5282
	$R_{d,Beulen} [kN] =$	127,73	95,46	92,64
	$\tau_{zul} [N/mm^2] =$	5,25	3,93	3,81
	$H_{d,kurz,Beulen} [kN] =$	160,77	47,75	44,02
	$H_{k,kurz,Beulen} [kN] =$	107,18	31,83	29,34
	$H_{k,kurz,Beulen,Druck} [kN] =$	27,56		
	$H_{k,kurz,Beulen,Schub} [kN] =$	132,28		

Konstruktionsvariante B		Einzelement	Verband	Fassade
	$\kappa c [] =$	5,582	5,186	4,849
	$Di = D1 = D2 [Nmm] =$	1330376,94	1330376,94	1330376,94
	$Ds [Nmm] =$	10132505,54	10132505,54	10132505,54
	$D [Nmm] =$	12793259,42	12793259,42	12793259,42
	$A [N/mm] =$	24,05	24,05	24,05
	$f_{iV} [] =$	0,5282	0,5282	0,5282
	$R_{d,Beulen} [kN] =$	131,10	121,80	113,88
	$\tau_{zul} [N/mm^2] =$	5,39	5,01	4,68
	$H_{d,kurz,Beulen} [kN] =$	196,11	119,91	86,81
	$H_{k,kurz,Beulen} [kN] =$	130,74	79,94	57,88
	$H_{k,kurz,Beulen,Druck} [kN] =$	27,56		
	$H_{k,kurz,Beulen,Schub} [kN] =$	132,28		

Konstruktionsvariante B.1		Einzelement	Verband	Fassade
	$\kappa c [] =$	5,582	5,214	4,953
	$Di = D1 = D2 [Nmm] =$	394185,76	394185,76	394185,76
	$Ds [Nmm] =$	3349238,73	3349238,73	3349238,73
	$D [Nmm] =$	4137610,25	4137610,25	4137610,25
	$A [N/mm] =$	11,93	11,93	11,93
	$f_{iV} [] =$	0,5989	0,5989	0,5989
	$R_{d,Beulen} [kN] =$	44,04	41,14	39,08
	$\tau_{zul} [N/mm^2] =$	2,72	2,54	2,41
	$H_{d,kurz,Beulen} [kN] =$	98,05	50,26	36,17
	$H_{k,kurz,Beulen} [kN] =$	65,36	33,50	24,12
	$H_{k,kurz,Beulen,Druck} [kN] =$	9,26		
	$H_{k,kurz,Beulen,Schub} [kN] =$	66,66		

Literaturverzeichnis

- [1] J. Hamm. „Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas“. Dissertation. EPF Lausanne, 1999.
- [2] P. Niedermaier. „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen – Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holztragwerken“. Dissertation. Technische Universität München, 2005.
- [3] H. Kreuzinger und P. Niedermaier. „Glas als Schubfeld“. In: Tagungsband Ingenieurholzbau; Karlsruher Tage, 2005.
- [4] K. Kreher und W. Hochhauser. „Berechnung von nachgiebigem Verbund, von der exakten zur Näherungslösung – Theorie und Praxis.“ Forschungsbericht. Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, 2009.
- [5] T. Edl und K. P. Schober. „Statisch wirksame Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zur Aussteifung von Holzbauten“. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2005.
- [6] T. Edl. „Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas- Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2008.
- [7] Österreichische Gesellschaft für Holzforschung. „Verbundelement aus Glas“. Patent AT 502 470 B1. Registriert am: 06.07.2005. Veröffentlicht am: 15.08.2007.
- [8] G. Neubauer und K. P. Schober. „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen“. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2008.
- [9] G. Neubauer. „Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2011.
- [10] G. Neubauer und K. P. Schober. „Handbuch für den Einsatz von Holz-Glas-Verbundelementen; für Lizenznehmer des HFA-Patents Nr. 502470“. 2008.
- [11] M. Rinnhofer. „Tragende Verklebung von Glas mit Holz unter besonderer Berücksichtigung der Bemessungsansätze für das Langzeitverhalten von Silikonfugen“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2017.
- [12] W. Hochhauser, W. Winter und K. Kreher. „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: State of the Art, Forschungsbericht, Studentische Arbeiten“. Endbericht zum Forschungsprojekt: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept. Technische Universität Wien, 2011.
- [13] Technische Universität Wien. „Verbundkonstruktion aus einer Glasscheibe und einer Rahmenkonstruktion“. Patent AT 511 373 B1. Registriert am: 27.04.2011. Veröffentlicht am: 15.05.2013.
- [14] W. Hochhauser. „Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2011.
- [15] F. Weissensteiner. „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen im Einsatz an thermischen Pufferzonen Prototypischer Einsatz am Beispiel eines Anbaus“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2013.

- [16] F. Nicklisch. „Ein Beitrag zum Einsatz von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas-Verbundelementen“. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2016.
- [17] „Holz-Glas-Verbundfassaden | Verhalten im Brandfall | Brandschutzkonzepte“. Projektnummer: 1122338, Forschungsvorhaben gefördert von der Wirtschaftsagentur der Stadt Wien. Technische Universität Wien, 2016.
- [18] A. Fadaei, M. Rinnhofer und W. Wolfgang. „Stiffening multistory timber-glass composites facades in tall buildings“. In: Engineered Transparency 2016, 2016.
- [19] *ETAG Nr. 002-1: Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen. Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme*. OIB-467-011/13. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2013.
- [20] *OIB – Richtlinie 4: Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit*. OIB-330.4-20/15. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015.
- [21] *Verordnung des österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) über die Baustoffliste ÖA*. OIB-095.1-015/15. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015.
- [22] *Konsolidierte Fassung der Liste der Bauprodukte und der Anlagen A und B der Baustoffliste ÖE*. OIB-095.2-026/13. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2013.
- [23] *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung*. Z-70.1-226. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2016.
- [24] „Handbuch für die Planung und Erstellung von UniGlas | FACADE – Holz-Glas-Verbundelement“. www.uniglas.de. Zugegriffen am 23.03.2017. URL: www.uniglas.de/service_downloads_broschueren.
- [25] *ift-Richtlinie VE-08/3 – Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme*. Rosenheim: ift Rosenheim, 2014.
- [26] K. P. Schober, T. Anderl und G. Grüll. „Grundlagen zur Entwicklung einer neuen Holzfenstergeneration – 2. Forschungsjahr“. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2007.
- [27] A. Schleicher. „Fire Protection Concepts for Timber Glass Composite Facades“. In: MATEC Web of Conferences 46 (2016). URL: DOI:%2010.1051/mateconf/20164605003.
- [28] *ÖNORM EN 15434: Glas im Bauwesen – Produktnorm für lastübertragende und/oder UV-beständige Dichtstoffe (für geklebte Verglasungen und/oder Isolierverglasungen mit exponierten Dichtungen)*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2010.
- [29] N. Graf. „Materialorientierte experimentelle Untersuchung und statistische Auswertung einer real gealterten ift-Fassade in Anlehnung an die EOTA ETAG 002-1“. Bachelorarbeit. Hochschule Rosenheim, 2012.
- [30] ift Rosenheim. „Abschlussbericht Nr. 13-003500-PR01 (PB-K09-11-de-02)“. Forschungsbericht. Rosenheim: ift Rosenheim, 2015.
- [31] *ÖNORM B 1991-1-4:2013 05 01: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-4 und nationale Ergänzungen*. Wien: Austrian Standards, Mai 2013.