

DIPLOMARBEIT
MASTER THESIS

**Holz-Glas-Verbundelemente:
Theoretische und experimentelle
Untersuchung des Langzeitverhaltens
von verklebten
Holz-Glas-Verbundscheiben**

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

unter der Leitung von

O.Univ.Prof. DDI Wolfgang Winter

und als verantwortlich mitwirkend

Assistant Prof. DI Dr.techn. Alireza Fadai

**E259 Institut für Architekturwissenschaften
Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau**

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Matthias Rinnhofer

0726267

Scheibenweg 1a

A - 8680 Mürzzuschlag

Wien, im März 2014

.....
(Matthias Rinnhofer)

Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus anderen Quellen stammenden Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Wien, am 9. März 2014

Matthias Rinnhofer

Vorwort

Für die fachkundige Betreuung und die Begutachtung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bei Herrn O.Univ.Prof. DDI Wolfgang Winter bedanken.

Ganz besonderer Dank gilt Assistant Prof. DI Dr.techn. Alireza Fadai, der mich während der gesamten Arbeitszeit intensiv betreute und mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Außerdem danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich auf meinem gesamten Lebensweg unterstützten und begleiteten und mich während des Studiums sowie beim Verfassen dieser Arbeit auch in schwierigen Zeiten bestärkten.

Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt das Langzeitverhalten von verklebten Holz-Glas-Verbundscheiben unter dauerhafter Schubbeanspruchung anhand von theoretischen und experimentellen Untersuchungen. Zu diesem Thema existiert bisher nur die Arbeit von *Neubauer* [1], der den Versuch wagte Modifikations- und Deformationsbeiwerte für den verwendeten Klebstoff herzuleiten.

Zu Beginn wird auf bisherige Forschungen eingegangen, auf denen diese Arbeit zum Teil basiert und ein kurzer Überblick über vorhandene Berechnungsmodelle gegeben. Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit der Auswertung der durchgeführten Versuche. Es wurden Versuchskörper in zwei unterschiedlichen Konfigurationen hergestellt und unter Dauerlast, zyklischer Beanspruchung und bezüglich Scherfestigkeit untersucht. Die kleinen Probekörper wurden in Anlehnung an die von *Edl* in [2] und von *Neubauer* in [1] verwendeten Versuchsproben produziert, um Vergleiche zwischen den Ergebnissen ziehen zu können. Die mittelgroßen Versuchskörper wurden als Scheibe ausgeführt und denselben Versuchen wie die Kleinproben unterzogen. Es wurde lediglich auf Untersuchungen unter zyklischer Beanspruchung verzichtet.

Anschließend werden die erzielten Ergebnisse mit jenen der Untersuchungen von *Neubauer* verglichen und nach denselben theoretischen Überlegungen Beiwerte zur Berechnung von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen unter Langzeitbeanspruchung hergeleitet. Die bekannten Beiwerte können dabei zum Teil bestätigt werden, sind jedoch trotz neuer Ergebnisse eher als riskant anzusehen. Es wird auch ein Vergleich zur ETAG 002-1 [3] gezogen, die weit höhere Verhaltensbeiwerte angibt, welche jedoch auch kritisch betrachtet werden müssen. Im Endeffekt werden die zu verwendenden Beiwerte zwischen den in [1] und [3] empfohlenen Werten liegen, genaue Angaben können allerdings erst nach Beenden der aktuellen Versuchsreihe getroffen werden. [4]

Zum Schluss wird noch auf aktuelle Entwicklungen eingegangen. Das Hauptaugenmerk wird hierbei auf mehrseitige Verklebungen und eine alternative Geometrie der Koppelstele gelegt und die Vor- und Nachteile solcher Ausführungsvarianten beleuchtet.

Abstract

This master thesis deals with the long-term behavior of bonded timber-glass-composite shear walls under constant shear stress on the basis of theoretical and experimental investigations. So far *Neubauer's* doctor thesis [1] is the only one that deals with this subject. He dared to derive modification and deformation factors for the used adhesives.

At first there is a short excursion to previous research activities and a brief overview of existing computational models. The main part of this thesis deals with the evaluation of the experiments. Specimens in two different configurations were produced and examined under continuous load and cycling load in question of the shear strength of the adhesive. The small specimens were assembled according to the specimens used by *Edl* in [2] and *Neubauer* in [1] in order to compare the results. The medium sized specimens were designed as a shear wall and they were investigated under the same experiments as the small specimens. Only the investigations under cycling load were omitted.

Subsequently the achieved results are compared with those of the studies by *Neubauer* and safety factors are derived for the calculation of timber-glass-composite structures under long-term stress according to the same theoretical considerations. The known coefficients could partially be confirmed, but they should be considered rather risky in spite of new results. A comparison to ETAG 002-1 [3] is conducted too, which declares far higher safety factors. But they should also be considered critical. Ultimately, the safety factors should be located between the previously recommended values. Accurate declarations can only be made after the end of the current series of experiments. [4]

Finally some current developments are discussed. The main emphasis is placed on bonding on more than one side and on an alternative geometry of the adapter frame. The advantages and disadvantages of such variants are examined.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Kurzfassung	IV
Abstract	V
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	1
2. Grundlagen im Holz-Glas-Verbundbau	3
2.1. Stand der Technik	3
2.2. Analytische Berechnungsmodelle	6
2.2.1. Das Federmodell für Schubfeldtheorie	6
2.2.2. Das Federmodell für Fachwerktheorie	7
2.2.3. Überlagerung und Verallgemeinerung der Federmodelle	7
3. Experimentelle Untersuchungen	10
3.1. Aufgabenstellung	10
3.2. Kleinproben	10
3.2.1. Herstellung der Versuchskörper	10
3.2.2. Methodik und Versuchsablauf	13
3.2.3. Auswertung	19
3.2.3.1. Kriechversuche	19
3.2.3.2. Scherversuch	25
3.2.3.3. Zyklische Belastung	42
3.3. Mittelgroße Versuchskörper	44
3.3.1. Aufbau der Versuchskörper	44
3.3.2. Versuchsablauf	46

3.3.3. Auswertung und Vergleich mit Kleinproben	47
3.3.3.1. Kriechversuche	47
3.3.3.2. Scherversuche	50
4. Vergleich der Experimente mit bekannten Bemessungskonzepten	54
4.1. Modifikationsbeiwert für Langzeitbeanspruchung	57
4.2. Deformationsbeiwert für Langzeitbeanspruchung	61
5. Ausblick auf zukünftige Entwicklungen	63
6. Zusammenfassung	70
A. Vorgegangene Arbeiten	72
B. Beilagen	74
B.1. Datenblatt Ottocoll [®] S660	74
B.2. Messblatt Kriechversuch	78
B.2.1. Kleinproben	78
B.2.2. Mittelgroße Versuchskörper	85
Abbildungsverzeichnis	90
Tabellenverzeichnis	93
Quellenverzeichnis	94

1. Einleitung

1.1. Motivation

Glas hat in der Architektur seit jeher eine große Bedeutung im Bereich der Gebäudehülle, um einerseits eine ausreichende Lichtdurchflutung des Gebäudeinneren zu gewährleisten und andererseits auch gestalterische Akzente zu setzen. Vor allem in den letzten Jahrzehnten besteht immer öfter der Wunsch nach möglichst filigranen und lichtdurchlässigen raumabschließenden Konstruktionselementen. Dies stellt Architekten, Konstrukteure und Planer vor große Herausforderungen. Daher liegt es nahe, Glas nicht nur als gestaltendes Element zu verwenden, sondern es auch zur Abtragung statischer Lasten heranzuziehen und ihm somit konstruktive Aufgaben zu übertragen.

Glas hat die Eigenschaft, sofern die Kräfte gleichmäßig und ohne Spannungsspitzen eingeleitet werden, große Druckkräfte aufnehmen zu können. Dies kann sowohl zur Abtragung von Vertikal- als auch von Horizontallasten genutzt werden. Da Glas ein spröder Werkstoff ist, muss der Lasteinleitung besondere Beachtung geschenkt werden. Durch ein elastisches Verbundsystem, welches durch eine Verklebung von Holz mit Glas realisiert werden kann, wird eine schonende Lasteinleitung gewährleistet.

Es bietet sich aus mehreren Gründen an, Holz als zusätzlichen Baustoff zu verwenden und nicht auf einen anderen Werkstoff zurückzugreifen. Holz besitzt ein dem Glas ähnliches Temperaturverhalten, wodurch Zwangsspannungen weitgehend vermieden werden und es ist im Stande, die vergleichsweise geringe Zugfestigkeit des Glases auszugleichen und die positive Eigenschaft der hohen Druckfestigkeit zu unterstützen.

1.2. Zielsetzung

Im Zuge vorangegangener Arbeiten wurden Berechnungsmodelle sowie Bemessungsverfahren entwickelt, um Holz-Glas-Verbundelemente effektiv einzusetzen. Auch erste Annahmen zum Langzeitverhalten von Holz-Glas-Verbundsystemen wurden getroffen, jedoch fehlte es bisher an experimentellen Untersuchungen, um diese Annahmen veri-

fizieren zu können. Diesem fehlenden Aspekt der sicheren Bemessung von Holz-Glas-Verbundelementen widmet sich nun diese Arbeit.

Anhand von experimentellen Studien des langfristigen Tragverhaltens solcher Bauteile werden Berechnungsbeiwerte abgeleitet. Versuchskörper mit verschiedenen Konfigurationen werden einer dauerhaften Beanspruchung unterworfen und das Kriech- und Setzungsverhalten analysiert. Daraus können Faktoren ermittelt werden, die die Berechnung und Bemessung sowie die anschließende Anwendung von Holz-Glas-Verbundscheiben ermöglichen und eine ausreichende Sicherheit bezüglich der Dauerhaftigkeit von Holz-Glas-Verbundelementen gewährleisten.

2. Grundlagen im Holz-Glas-Verbundbau

2.1. Stand der Technik

In den letzten Jahrhunderten wurde Glas in der Regel in Rahmen unterschiedlicher Materialien eingesetzt, welche Teil der Tragkonstruktion waren oder in Wand- beziehungsweise Deckenscheiben eingesetzt wurden. Die Verbindung zwischen Glas und Rahmen erfolgte meist verschieblich.

Im Zuge der Entwicklungen von Holz-Glas-Verbundelementen wurde jedoch die Variante einer Verklebung der beiden Bauteile aufgegriffen, was vor allem durch neuwertige Erfindungen in der Klebetechnik und der Entwicklung spezieller Klebstoffe möglich wurde. Zusätzlich soll der Lasteintrag ins Glas gleichmäßig entlang der gesamten Verbindung erfolgen, was durch eine Klebefuge ohne weiteres erreicht werden kann. Durch die Weichheit von Klebstoffen können Oberflächenbeschädigungen und Sprödbruch somit weitgehend ausgeschlossen werden.

Die Dichtungsfunktion und der Ausgleich von Verschiebungen, hervorgerufen durch thermische Einwirkung, sind weitere Vorteile elastischer Klebstoffe. Speziell im Fassadenbau erfüllen sie somit die gegebenen Anforderungen. Steifere Klebstoffe werden vor allem zur Übertragung größerer Lasten herangezogen. Für den Holz-Glas-Verbundbau bieten sich somit semi-elastische Klebstoffe an.

Holz bringt sowohl Vor- als auch Nachteile als Verbundpartner mit sich. Die positiven Eigenschaften liegen unter anderem in dem dem Glas ähnlichen thermodynamischen Verhalten, wodurch sich Holz als Bewehrung und Kantenschutz für Glas eignet. Als nachteilig kann das geringe Aussteifungspotential angesehen werden, doch genau diesem Schwachpunkt versucht man mit Holz-Glas-Verbundelementen entgegen zu wirken. [5]

Mit dem Thema der Holz-Glas-Verbundbauweise beschäftigen sich einige Universitäten und Forschungsinstitute in ganz Europa, wodurch mehrere Dissertationen und

Forschungsprojekte ausgeführt werden. Die wichtigsten sind in Anhang A kurz zusammengefasst.

Als einer der wichtigsten Entwicklungsschritte gilt bis heute das System der gezahnten Koppelleiste die *Edl* in [2] entwickelte. Mit Hilfe dieser Entwicklung können geringe Ansichtsbreiten der Riegel und Stiele sowie ein hoher Vorfertigungsgrad erreicht werden. Die Verklebung von Glasscheibe und Koppelleiste erfolgt dabei schon im Werk, wodurch auch eine konstant gute Qualität der Klebefuge garantiert werden kann. Diese Elemente können auf der Baustelle mit einer beliebigen Pfosten-Riegel-Konstruktion verschraubt werden. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, wird durch die Holz-Glas-Verbundkonstruktion somit eine Aussteifung realisiert, die nach dem selben Prinzip funktioniert wie eine herkömmliche OSB-Beplankung.

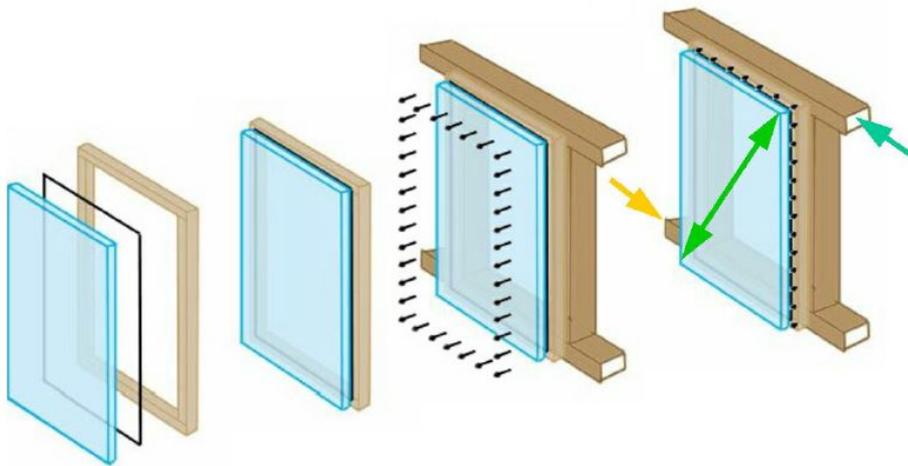


Abb. 2.1.: Aussteifung einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit Holz-Glas-Verbundelementen [2]

Neubauer führte 2008 in [6] ein System ein, in dem die Schubverklebung einen Lastabtrag ermöglicht, wodurch jedoch nur äußerst geringe horizontale Kräfte abgeleitet werden können.

Um diese Lasten steigern zu können, wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts des Instituts für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau an der Technischen Universität Wien der Tragmechanismus des Schubfeldes in der Klebefuge mit der Wirkung der Druckdiagonale im Glas überlagert [7]. Diese zwei Prinzipien sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Eine genauere Erklärung dieser beiden Tragmechanismen folgt in Abschnitt 2.2.

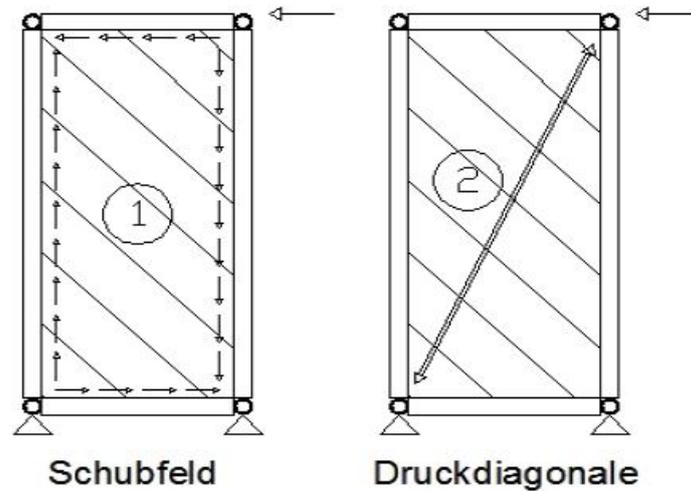


Abb. 2.2.: Überlagerung der Tragmechanismen *Schubfeld* und *Druckdiagonale* [7]

Um die Druckdiagonale im Glas zu aktivieren, sind Klötze zwischen der Glasscheibe und der Koppelleiste notwendig. Wichtig ist jedoch, dass diese Klötze ausschließlich Druckkräfte übertragen um keine Zugspannungen ins Glas zu leiten. Die Klotzung wird zwischen der Stirnseite der Glasscheibe und der Koppelleiste eingebracht, die Koppelleiste kann dafür nicht mehr als reine Flachleiste wie in [2] ausgeführt werden. Die beiden unterschiedlichen Ausführungsvarianten sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

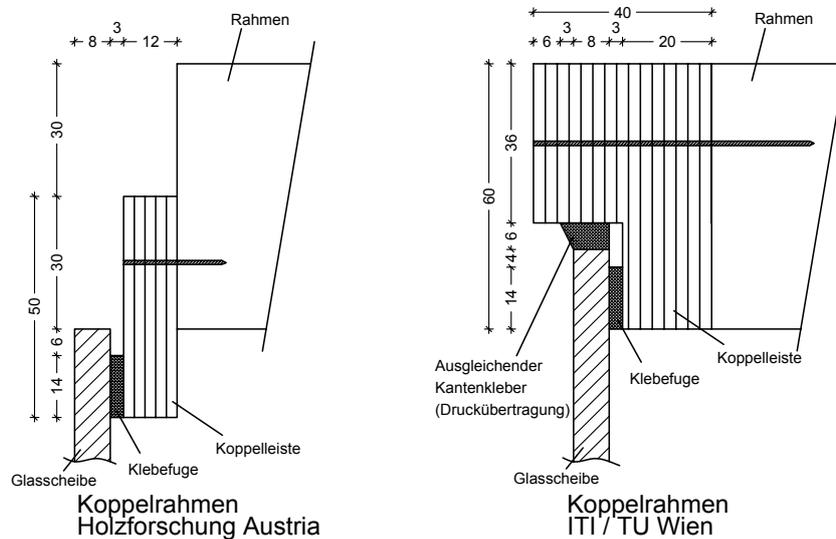


Abb. 2.3.: Unterschiedliche Anschlussdetails mit und ohne Klotzung [7]

2.2. Analytische Berechnungsmodelle

Die von *Heinrich Kreuzinger* und *Peter Niedermeier* in [8] entwickelten analytischen Berechnungsmethoden des Lastabtrags über Schubfeld und Druckdiagonale dienen der Berechnung einzelner Wandscheiben. Nachfolgend werden zugehörige Federmodelle vorgestellt, die eine separate Berechnung beider Tragmechanismen ermöglichen.

2.2.1. Das Federmodell für Schubfeldtheorie

Erstmals wurde das statisch unbestimmte Federmodell nach *Kreuzinger* und *Niedermaier* 2005 bei den Karlsruher Tagen vorgestellt [8]. Der Grundgedanke Glas zur Aussteifung von Wintergärten und Fassaden heranzuziehen, wurde aufgegriffen und ein Federmodell zur analytischen Berechnung von Holz-Glas-Verbundelementen entwickelt. Dabei wird von einer einseitig beplankten und mit einer hölzernen Unterkonstruktion elastisch verklebten Glasscheibe ausgegangen. Die Lasteinleitung der Horizontalbeanspruchung H erfolgt am Kopfriegel (siehe Abbildung 2.4).

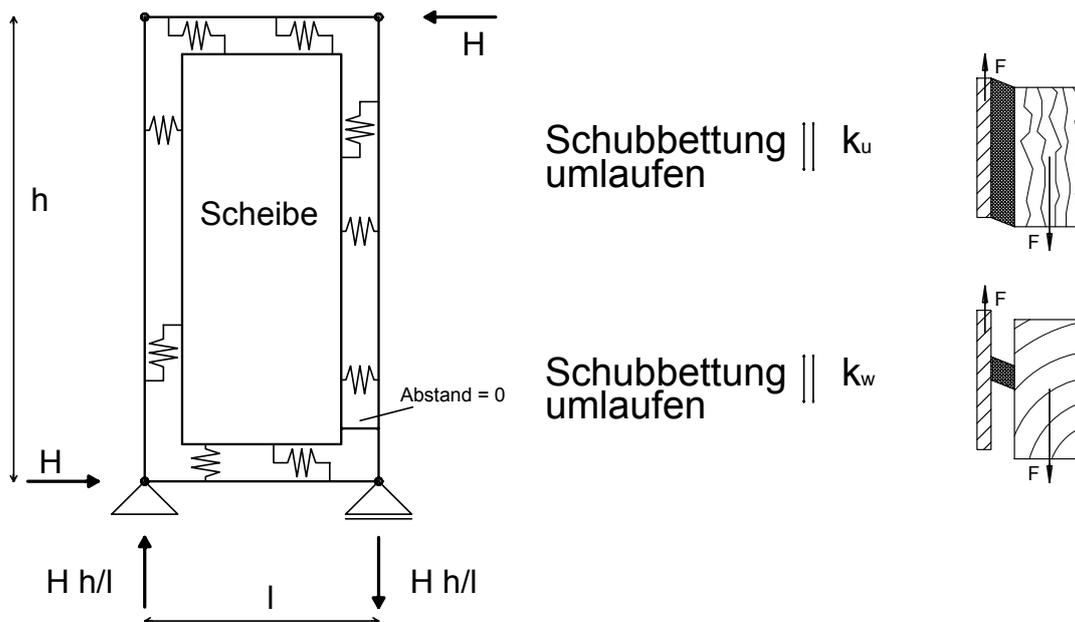


Abb. 2.4.: Federmodell für Schubfeldtheorie nach *Kreuzinger* und *Niedermaier* [8]

Die Horizontalkraft wird über die elastische Verklebung längs und quer der Glasscheibe in diese eingeleitet, wodurch Schub- und Zugspannungen entstehen. Da von einer Klebefugendicke von wenigen Millimetern und elastischem Materialverhalten ausgegangen wird, kann angenommen werden, dass die Deformationen der Scheibe und Randglieder

im Vergleich zu den Verformungen der Klebstoffuge vernachlässigbar sind. Zusätzlich ist eine ideal gelenkige Verbindung zwischen Riegel und Stiel für dieses Federmodell Voraussetzung. Deformationen aus der Scheibenebene werden nicht zugelassen. Diese vereinfachten Annahmen wurden in [1] bestätigt. [7]

2.2.2. Das Federmodell für Fachwerktheorie

Im Jahr 2005 wurde von Kreher erstmals der Einsatz von Glas als Druckdiagonale in Holzkonstruktionen vorgestellt. Hierzu wurde das in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Berechnungsmodell im Laufe eines Forschungsprojekts des Instituts für Architekturwissenschaften an der Technischen Universität Wien erweitert [7]. In Abbildung 2.5 ist das System einer herkömmlich geklotzten Scheibe dargestellt.

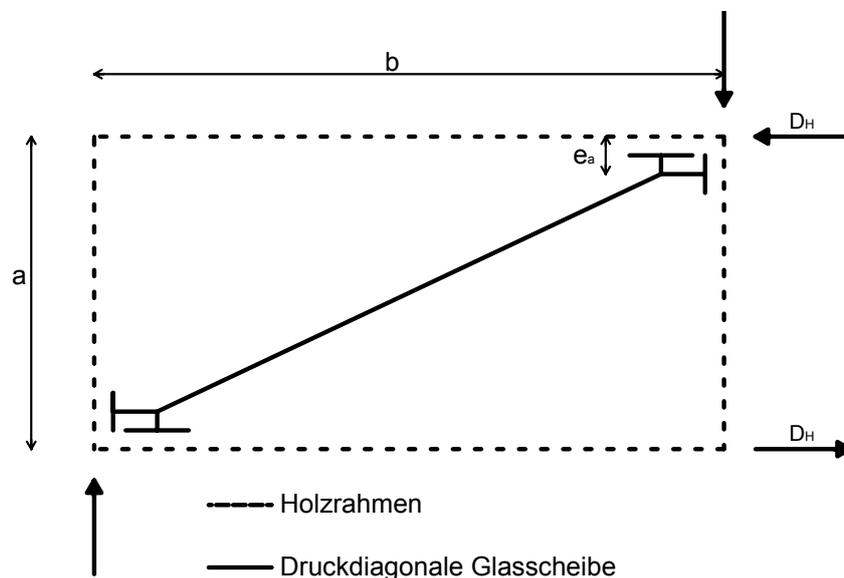


Abb. 2.5.: Fachwerktheorie für eine geklotzte Scheibe nach *Kreuzinger* und *Niedermaier* [8]

Die Ermittlung der Beanspruchung der Rahmenkonstruktion erfolgt dabei in Abhängigkeit der Exzentrizität e_a der Horizontal Komponente der Druckdiagonale D_H von der Stabachse des Kopfriegels.

2.2.3. Überlagerung und Verallgemeinerung der Federmodelle

Abschließend ist eine Überlagerung der beiden Systeme nach Schubfeldtheorie und Druckdiagonale notwendig, um die Lastverteilung auf beide Tragmechanismen zu errechnen und eine Aussage über den Kraftfluss treffen zu können. Dies kann über die horizontale

Kopfverschiebung erfolgen, wobei die Verformungen in Abhängigkeit von den Systemsteifigkeiten dargestellt werden. Somit können Aussagen zum inneren Kraftfluss des Systems getroffen werden. [7]

Im Federmodell für Schubfeldtheorie wird davon ausgegangen, dass sämtliche Verformungen aus der Verformung der Klebefuge hervorgehen. Die selbe Annahme betrifft das Federmodell für Druckdiagonale bezüglich der Stauchung der Klötze. Dies ist für sehr weiche Klebstoffsysteme richtig, ist jedoch für steifere Klebstoffe nicht mehr gültig. Daher müssen die vorangestellten Federsysteme verallgemeinert werden.

Das Federsystem wird für parallel- und seriell geschaltete Federn sowie für alle am Lastabtrag beteiligten Komponenten erweitert.

Folgende Bauteile beteiligen sich am Lastabtrag über Schubfelder:

- Schubverklebung
- Koppelleiste
- Verbindungsmittel
- Rahmenkonstruktion
- Glasscheibe

Beim Lastabtrag über Druckdiagonale kommen zwei weitere Komponenten hinzu:

- Verklotzung
- Rahmengelenk

Durch das Wirken zweier Tragmechanismen werden diese Bauteilkomponenten mehrfach belastet. *Hochhauser* hat dazu das in Abbildung 2.6 gezeigte Erstazfedermodell vorgestellt, in welches sämtliche Federsteifigkeiten einfließen. Somit wird aus einem innerlich mehrfach statisch unbestimmten Tragsystem ein statisch bestimmtes Federmodell, um Holz-Glas-Verbundscheiben vereinfacht zu berechnen. [7]

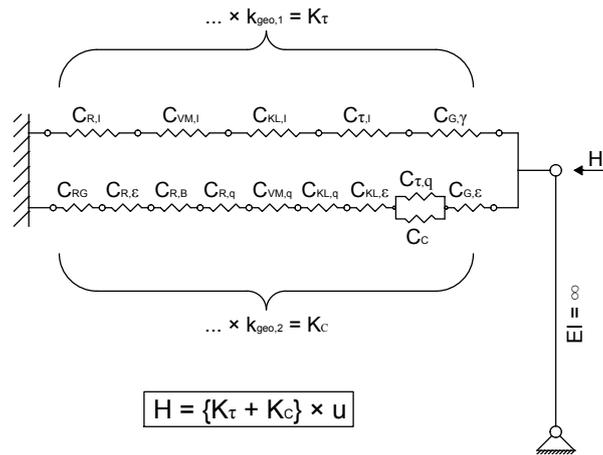


Abb. 2.6.: Ersatzfedermodell nach Hochhauser [7]

H	Angreifende Horizontalkraft am Kopfriegel
EI	Biegesteifigkeit
$k_{geo,1}$	Geometrischer Faktor für den Tragmechanismus Schubfeld
$k_{geo,2}$	Geometrischer Faktor für den Tragmechanismus Druckdiagonale
K_{τ}	Systemsteifigkeit des Tragmechanismus Schubfeld
K_C	Systemsteifigkeit des Tragmechanismus Druckdiagonale
u	Kopfverschiebung

Die wesentlichen Nachweise der beiden Tragmechanismen Schubfeld und Druckdiagonale können wie folgt zusammengefasst werden:

- Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Kopfverschiebung u der Holz-Glas-Verbundscheibe mit dem Grenzwert $u = \frac{h}{500}$, mit h als der Höhe Glasscheibe.
- Tragfähigkeitsnachweis der Schubspannung τ der umlaufenden Schubverklebung zufolge des Tragmechanismus Schubfeld.
- Tragfähigkeitsnachweis der Druckspannung σ_c der Klotzung zufolge des Tragmechanismus Druckdiagonale.

Auf Basis der beiden letztgenannten Nachweise können alle weiteren Nachweise der beteiligten Bauteilkomponenten geführt werden. [5]

Im Zuge dieser Arbeit wird lediglich die Schubspannung τ der umlaufenden Schubverklebung behandelt und mögliche Teilsicherheits- und Modifikationsbeiwerte sowohl für den Gebrauchstauglichkeits- als auch für den Tragfähigkeitsnachweis diskutiert.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1. Aufgabenstellung

In diesem Abschnitt werden die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen behandelt.

Kleinproben

Um das Verformungsverhalten und die Schubfestigkeit der Klebefuge einer Holz-Glas-Verbundkonstruktion nach Langzeitbeanspruchung zu überprüfen, wurden Kleinproben hergestellt und unter verschiedenen Lastniveaus Versuche durchgeführt. Diese Versuche dienten der Ermittlung der Festigkeitsabnahme der Silikonverklebung. Die hierbei erzielten Werte konnten anschließend mit den Versuchen aus [1] verglichen werden.

Mittelgroße Versuchskörper

Diese Versuchsreihe verfolgt die selben Ziele wie die Untersuchungen mit Kleinprobenkörpern. Es wird lediglich eine andere Geometrie der Klebefugen gewählt, die Lastniveaus bleiben gleich. Somit kann nach Ende der Versuche untersucht werden, ob sich die aufnehmbaren Spannungen mit einer größeren Klebefläche linear steigern lassen, oder ob weitere Effekte eine Rolle spielen.

3.2. Kleinproben

3.2.1. Herstellung der Versuchskörper

Die Geometrie der Versuchskörper wurde in Anlehnung an ETAG Nr. 002 [3] ähnlich dem Probenaufbau nach [2] gewählt. Die Fugegeometrie des Silikons betrug dabei eine Dicke von 3 mm , eine Breite von 12 mm und eine Länge von 50 mm . In Abbildung 3.1 ist ein Versuchskörper schematisch dargestellt. Durch Unregelmäßigkeiten in der Form der Schablonen, mit deren Hilfe die Versuchskörper hergestellt wurden, ergaben sich jedoch unterschiedliche Klebefugendicken. Deshalb wurde nach durchgeführtem Abscherversuch

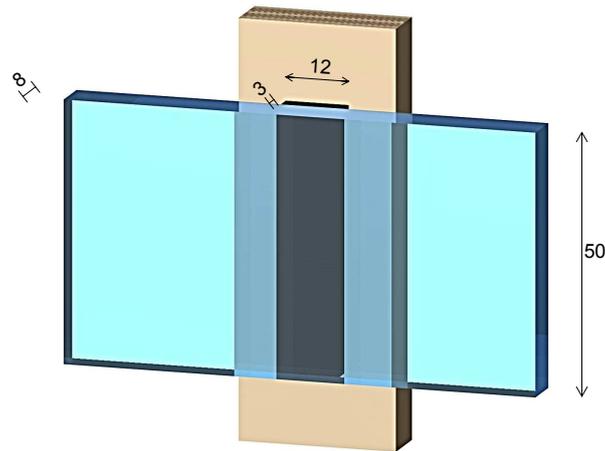


Abb. 3.1.: Kleinprobekörper für Langzeitversuche

jede Breite nachgemessen, um exakte Ergebnisse zu erhalten und diese miteinander vergleichen zu können. Es stellte sich heraus, dass keine Probe die vorgesehenen 12 mm erreichte. Die Breite der Klebefuge variierte zwischen $10,5\text{ mm}$ und $11,7\text{ mm}$, der Mittelwert betrug $11,2\text{ mm}$.

Die Herstellung der Kleinproben erfolgte bereits ein Monat vor Versuchsbeginn, da beim verwendeten Silikon OTTOCOLL[®] S 660 vom Hersteller eine Aushärtungszeit von 28 Tagen vorgegeben wurde. Das technische Datenblatt wird in Abschnitt B.1 beigelegt. Als Holzwerkstoff wurde 12 mm dickes Birkenfurnierschichtholz (BFU) verwendet, als Glasprodukt wurde einfaches 8 mm dickes Floatglas von der Firma Petschenig Glastec GmbH (A-2285 Leopoldsdorf) bezogen. In vorgefertigten Schablonen wurden die BFU-Leisten und die Glasscheiben fixiert und das Silikon mittels einer Druckluft-Kartuschenpresse in die dafür vorgesehene Fuge gepresst (Abbildung 3.2). Die Druckluft-Kartuschenpresse mit eingespanntem 2-Komponenten-Silikonkleber ist in Abbildung 3.3 dargestellt. An der Spitze der Presse wurde ein Statikmischer fixiert, um eine ausreichende Vermischung der beiden Komponenten sicherzustellen. Nach einem Tag wurden die Proben aus den Schablonen genommen und das überschüssige Silikon entfernt um störende Einflüsse zu verhindern.

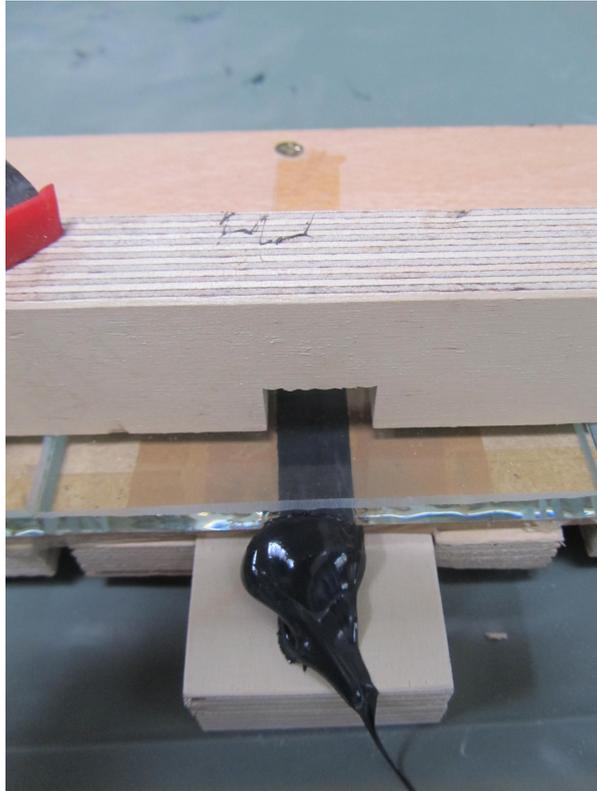


Abb. 3.2.: Eingespannter Kleinprobekörper



Abb. 3.3.: Druckluftpistole mit eingespannter Silikonkartusche

3.2.2. Methodik und Versuchsablauf

Die experimentellen Untersuchungen an den Kleinproben dienten vorrangig der Verifizierung der Festigkeitsabnahme unter Langzeitbeanspruchung sowie der Ermittlung der Schubfestigkeit des verwendeten Klebstoffes. Dafür wurden insgesamt 95 Probekörper hergestellt und unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Eine genaue Übersicht des Versuchsablaufes ist in Abbildung 3.4 ersichtlich. Die bereits durchgeführten Untersuchungen sind in der schwarzen Box markiert. Zusätzlich sind in Tabelle 3.1 alle Versuche detailliert aufgelistet.

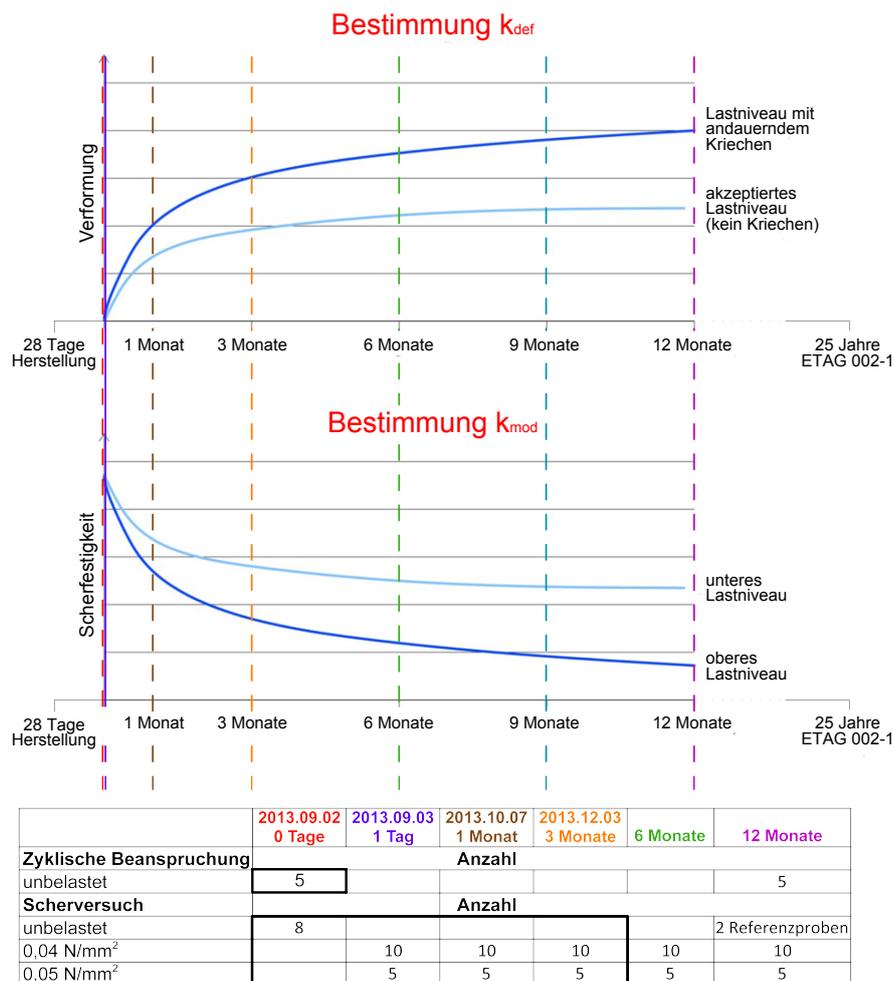


Abb. 3.4.: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

80 dieser Kleinprobekörper wurden in einem nicht klimatisierten Raum der Firma Petschenig an einer Wand fixiert und mittels Hantelgewichten zu 2,5 kg und 3 kg belastet, siehe Abbildung 3.5. Das entspricht bei einer Klebefugenfläche von 60 mm² einer Span-

Tab. 3.1.: Kleinproben Auflistung: Belastungsniveau und -dauer

Anzahl	Belastung		Versuchsart
	Last [N/mm^2]	Dauer	
5	0,00	0 Tage	zyklische Belastung
5	0,04	12 Monate	zyklische Belastung
8	0,00	0 Tage	Scherversuch
10	0,04	1 Tag	Scherversuch
10	0,04	1 Monat	Scherversuch
10	0,04	3 Monate	Scherversuch
10	0,04	6 Monate	Scherversuch
10	0,04	12 Monate	Scherversuch
5	0,05	1 Tag	Scherversuch
5	0,05	1 Monat	Scherversuch
5	0,05	3 Monate	Scherversuch
5	0,05	6 Monate	Scherversuch
5	0,05	12 Monate	Scherversuch
2	0,00	12 Monate	Scherversuch (Referenzprobe)

nung von $0,04 N/mm^2$ beziehungsweise $0,05 N/mm^2$. Fünf dieser Proben dienen nach zwölf Monaten der Durchführung von fünf zyklischen Belastungsversuchen. Zwei weitere Kleinprobekörper wurden unbelastet montiert um nach zwölf Monaten Referenzversuche der Scherfestigkeit durchführen zu können.

Zusätzlich wurden an den 15 Proben, welche für zwölf Monate belastet werden, Messuhren montiert, die der Verformungskontrolle dienen, wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist. In den ersten drei Monaten der Experimente wird die Deformation der Klebefuge täglich abgelesen und ausgewertet. Danach erfolgt die Messung einmal wöchentlich. Die zwei unbelasteten Kleinproben dienen als Referenzwert für die Schubfestigkeit zu den nicht gealterten Proben. Zwei weitere Messuhren wurden an einem Glaswinkel montiert, um die Genauigkeit der Messuhren zu überprüfen.

Des Weiteren wurde jeweils ein Klimadatenlogger an der Rauminnen bzw. -außenseite befestigt (in Abbildung 3.5 rechts und links zu erkennen), an dem zusätzlich zu jeder Deformationsmessung die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit abgelesen werden. Dies geschieht jedoch nur zur Kontrolle, da die Datenlogger halbstündlich automatische Messungen durchführen. Diese Daten werden mehrmals während der gesamten Versuchsdauer von zwölf Monaten ausgelesen. Dadurch kann jegliche Klimaveränderung im Raum genau verfolgt und ein etwaiger Zusammenhang mit der Verformung der Kle-

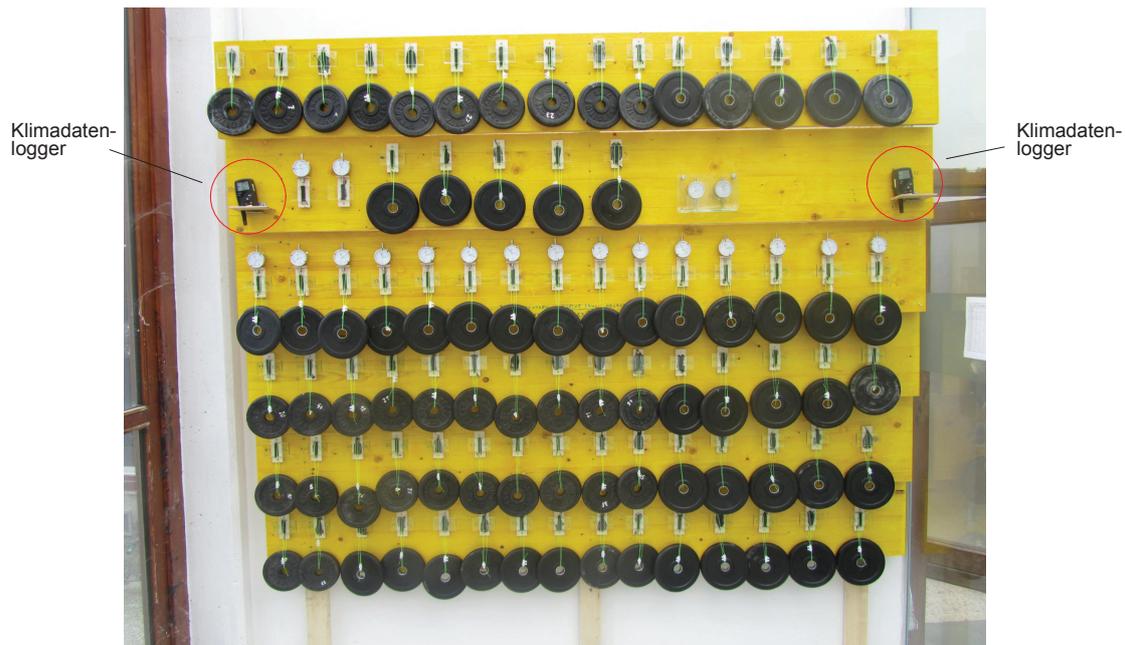


Abb. 3.5.: Montage und Anordnung der Kleinproben

befuge hergestellt werden.

Direkt nach der Entlastung der Kleinproben zum in Tabelle 3.1 ersichtlichen Zeitpunkt werden jene abgenommen und von der Holzforschung Austria bis zum Bruch auf Abscheren längs der Klebefuge getestet. Dabei wird sowohl die aufgebrachte Last sowie auch die Deformation während des Versuches gemessen. In Abbildung 3.7 ist eine Skizze des Versuchsstandes zu sehen. Hierbei wird der Probekörper eingeklemmt und mittels eines Stempels möglichst mittig auf die Glasscheibe gedrückt, um Exzentrizitäten zu vermeiden. Der Versuch wird mit einer Geschwindigkeit von $0,5 \text{ mm/min}$ durchgeführt. Die seitliche Führung dient der Vermeidung unerwünschter Exzentrizitäten. Anschließend wird das Bruchbild analysiert.

Durch die unterschiedlichen Versuche erhält man mehrere nützliche Daten als Ergebnis der Untersuchungen. Die 15 mit Messuhren versehenen Proben ergeben jeweils eine Verformungskurve, aus der auf das Kriechverhalten der Silikonklebefuge rückgeschlossen werden kann. Der Klimaeinfluss und dessen Zusammenhang mit der Geschwindigkeit der Deformation der Klebefuge werden in diesen Kurven sichtbar, siehe Abbildung 3.15.

Auch die Scherversuche mit unterschiedlicher Belastungsdauer können zusammengefasst werden. Aus der dadurch entstehenden Kurve lässt sich die Festigkeitsabnahme des Silikons unter langfristiger Belastung ablesen. Aus den Mittelwerten der Scherver-

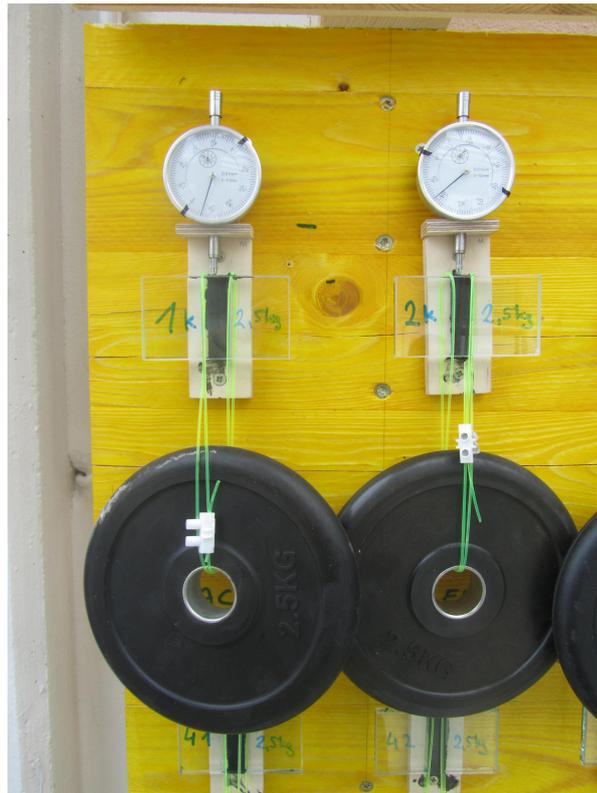


Abb. 3.6.: Kleinproben mit Messuhr

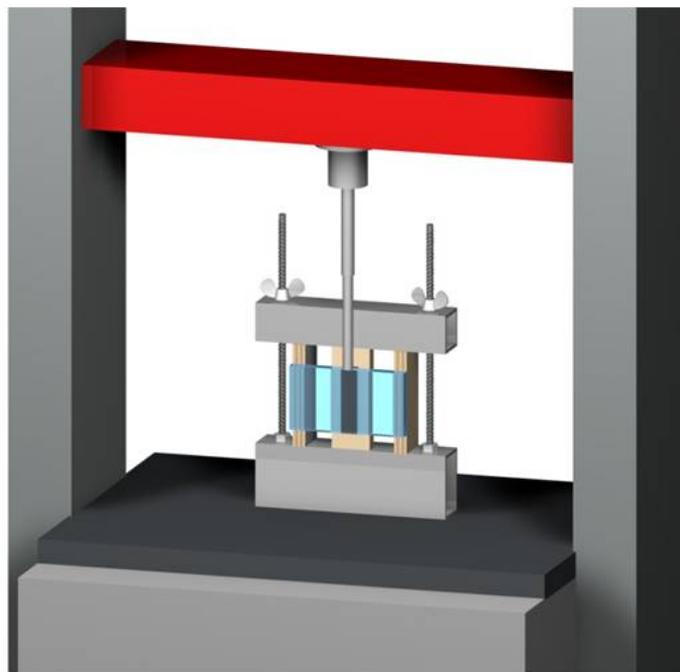


Abb. 3.7.: Versuchsaufbau Scherversuch

suche wird gemäß Eurocode [9] die sogenannte 5%-Quantile des Festigkeitswertes mit Gleichung 3.1 errechnet [1]:

$$R_{u,5} = m_x - s_x \cdot k_n \quad (3.1)$$

$R_{u,5}$	5%-Quantile des Festigkeitswertes
m_x	Mittelwert der Festigkeitswerte
s_x	Standardabweichung der Festigkeitswerte
k_n	Faktor für charakteristische Werte gem. EN 1990, Tabelle D.1 (siehe Tabelle 3.2)
n	Anzahl der Prüfkörper

Tab. 3.2.: Faktor für charakteristische Werte gem. EN 1990, Tabelle D.1 [9]

n	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
k_n	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Diese Tabelle beruht laut [9] auf der Normalverteilung, unter der Annahme, dass der Variationskoeffizient V_x unbekannt ist. Diese Annahme wurde getroffen, da mit den in [1] durchgeführten Versuchen zwar vergleichbare Experimente vorliegen, diese jedoch unter anderen Bedingungen durchgeführt wurden. Würde man V_x als bekannt annehmen, schlägt [9] deutlich geringere Werte für k_n vor. Diese würde weitaus höhere Ergebnisse für $R_{u,5}$ mit sich bringen. Für diese Arbeit wurde die Berechnung der Ergebnisse auf der sicheren Seite gewählt.

Nach [3] werden andere, größere Sicherheitsbeiwerte angegeben (siehe Tabelle 3.3). Allerdings ist dort festgehalten, dass die angeführten Werte und Berechnungsmethoden lediglich für Silikonklebstoffe mit einer Mindestklebefugendicke von 6 mm und Haftflächen aus Glas und anodisiertem Aluminium oder nichtrostendem Stahl vorgesehen sind.

Die Berechnung der charakteristischen Werte nach EN-1990 wird aus diesen Gründen bevorzugt.

$$R_{u,5} = X_{mean} - \tau_{\alpha\beta} \cdot s \quad (3.2)$$

$R_{u,5}$	Charakteristische Bruchspannung mit einer 75 %igen Wahrscheinlichkeit, dass 95 % der Versuchsergebnisse über diesem Wert liegen
X_{mean}	mittlere Bruchspannung
$\tau_{\alpha\beta}$	Exzentrizität von 5 % mit 75 %iger Wahrscheinlichkeit (siehe Tabelle 3.3)
s	Standardabweichung der jeweils betrachteten Versuchsreihe

Tab. 3.3.: Die Variable $\tau_{\alpha\beta}$ in Abhängigkeit von der Zahl der Prüfkörper [3]

Zahl der Prüfkörper	5	6	7	8	9	10	15	30	∞
Variable $\tau_{\alpha\beta}$	2,46	2,33	2,25	2,19	2,14	2,10	1,99	1,87	1,64

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse nach Gleichung 3.1 und Gleichung 3.2 erfolgt in den Tabellen in Abschnitt 3.2.3.2.

Wie in Abbildung 3.4 und Tabelle 3.1 angeführt, werden auch Scherversuche nach zyklischer Belastung an fünf Kleinproben zu Beginn und fünf Kleinproben am Ende der Untersuchungen bezüglich Langzeitverhalten von Holz-Glas-Verbundelementen durchgeführt. Aus terminlichen Gründen verschoben sich jedoch die ersten Versuche mit zyklischer Beanspruchung um fünf Monate, was jedoch keine Auswirkung auf die Ergebnisse haben sollte.

Bei diesen Versuchen wurde nach ETAG 002-1 [3] vorgegangen. Hierbei wurden auf jede Probe 5350 Lastzyklen aufgebracht. Diese Lastzyklen sind wie folgt gegliedert:

- 100 Zyklen von $0,1 \cdot \tau_{des}$ bis zum Bemessungswert der Spannung τ_{des}
- 250 Zyklen von $0,1 \cdot \tau_{des}$ bis zum 0,8 fachen Bemessungswert der Spannung τ_{des}
- 5000 Zyklen von $0,1 \cdot \tau_{des}$ bis zum 0,6 fachen Bemessungswert der Spannung τ_{des}

τ_{des} bezieht sich dabei auf das Belastungsniveau $\tau_{des} = \frac{Ru,5}{3}$ nach dem Handbuch für Klebstoffe der Holzforschung Austria [6] im Gegensatz zu dem laut ETAG 002-1 empfohlenen Wert von $\frac{Ru,5}{6}$. Dieses Spannungsniveau wird in der Dauer von zwei Sekunden aufgebracht, zwei Sekunden gehalten und anschließend wieder innerhalb von zwei Sekunden auf $0,1 \cdot \tau_{des}$ entlastet. Auch diese Spannung wird für zwei Sekunden aufrecht erhalten, bevor der nächste Zyklus beginnt. Die genaue Übersicht ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Lastzyklen sollen die Belastungsgeschichte der Klebstoffverbindung innerhalb der gesamten Lebensdauer simulieren.

Anschließend wurden auch diese Kleinproben auf Abscheren getestet und ausgewertet.

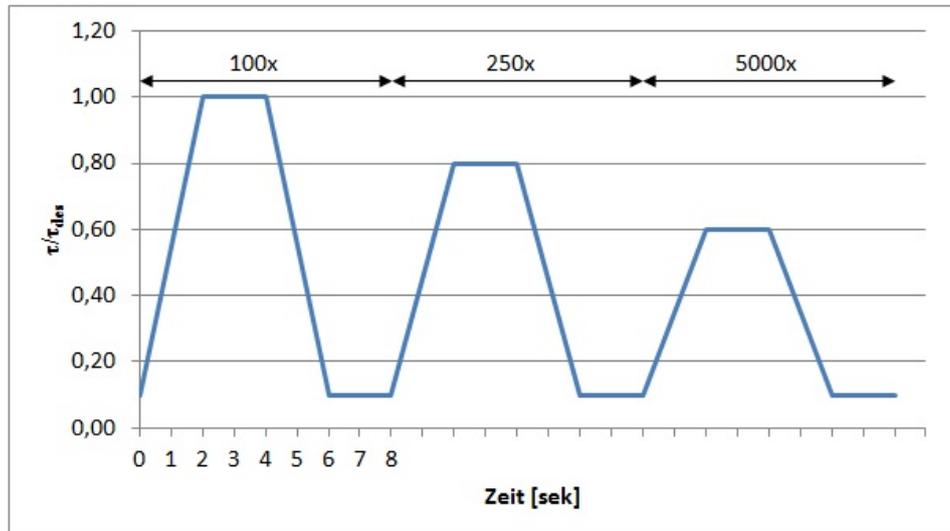


Abb. 3.8.: Spannungszyklus des Ermüdungsversuches

3.2.3. Auswertung

3.2.3.1. Kriechversuche

Die Untersuchungen zum Langzeitverhalten wurden, wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert, durchgeführt und anschließend ausgewertet. Es wurden zehn Prüfkörper mit einem Lastniveau von $0,04 \text{ N/mm}^2$ und fünf Prüfkörper unter der Belastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ beobachtet. Zwei weitere Proben wurden unbelastet montiert, um nach 12 Monaten Referenzscherversuche zu den zu Beginn des Langzeitversuchs getesteten unbelasteten Kleinproben durchführen zu können und auf etwaige Alterungseinflüsse schließen zu können. Die Versuchsobjekte waren während des Herstellungs- und Versuchsvorganges niemals klimatisiert gelagert, sondern zu jeglicher Zeit den Einflüssen eines natürlichen Innenklimas ausgesetzt. Nach Lastaufbringung auf die Probekörper wurde sofort eine erste Deformationsmessung durchgeführt, um die elastische Verformung bestimmen zu können. Dieser Wert ist in Abbildung 3.9 als Startwert erkennbar. Auf der rechten Seite ist die Dehnung $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ aufgetragen, wobei ΔL die links dargestellte Verformung und L_0 die Klebefugenlänge zu Beginn des Kriechversuchs sind. Danach wurden die Proben während der gesamten Versuchsdauer nicht mehr berührt und auch kein weiterer Eingriff in den Versuchsablauf mehr vorgenommen. Die genauen Messergebnisse der täglichen Ablesungen sind in Abschnitt B.2 beigefügt.

Wie in Abbildung 3.9 des Weiteren zu erkennen ist, weicht jeweils eine Probe der beiden Serien mit einer Belastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ und $0,05 \text{ N/mm}^2$ von den anderen deutlich ab. Diese beiden Proben werden von der folgenden Auswertung ausgenommen,

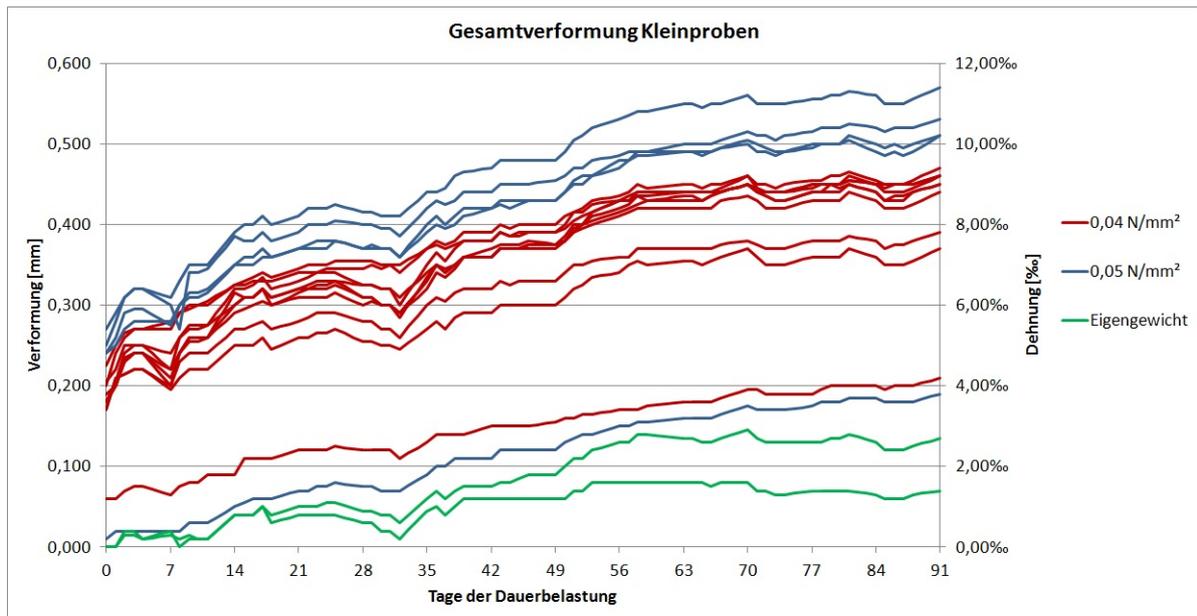


Abb. 3.9.: Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

da ein Fehler bei der Installation der Messuhren vermutet wird. Alle für die Versuchsauswertung herangezogenen Kleinproben sind in Abbildung 3.10 zu Mittelwerten zusammengefasst um eine einfachere Anschauung zu gewährleisten.

Erkennbar ist außerdem, dass die Kleinproben unter größerer Last nicht nur eine höhere elastische Anfangsverformung, sondern auch ein ausgeprägteres Kriechverhalten zeigen. Jedoch scheint es, als würden alle Kurven annähernd parallel verlaufen. Zu Beginn der Untersuchungen verdeutlicht sich ein steiler Anstieg der Deformation, was einem sehr raschen Kriechen entspricht. Bereits nach einigen Tagen flachen die Kurven jedoch ab, noch deutlicher wird dieser Effekt, wenn man die Steigung der Kurven nach mehreren Monaten betrachtet. Gut zu erkennen ist dies ebenfalls in Abbildung 3.10.

Nähert man nun die Deformationskurven logarithmisch an, ist der typische Kriechverlauf, wie in Abbildung 3.11, eindeutig zu erkennen. Die Deformationsdifferenz zwischen den beiden Lastniveaus verhält sich, nach einer anfänglichen Steigerung, annähernd konstant, mit einem weiteren Abklingen des Kriechverhaltens ist in Zukunft also bei beiden Lastniveaus zu rechnen. Vorangegangene Versuche in [1] haben jedoch gezeigt, dass lediglich bei einem Belastungsniveau von $0,04 \text{ N/mm}^2$ die Kriechverformungen vollständig abklingen. Ob diese Aussage richtig zu bewerten ist, wird sich im Laufe des weiteren Versuches zeigen. [4]

Auch die unbelasteten Kleinproben erleiden geringfügige Verformungen. Diese resultieren aus den ständig wechselnden klimatischen Verhältnissen im Versuchsraum. Vor

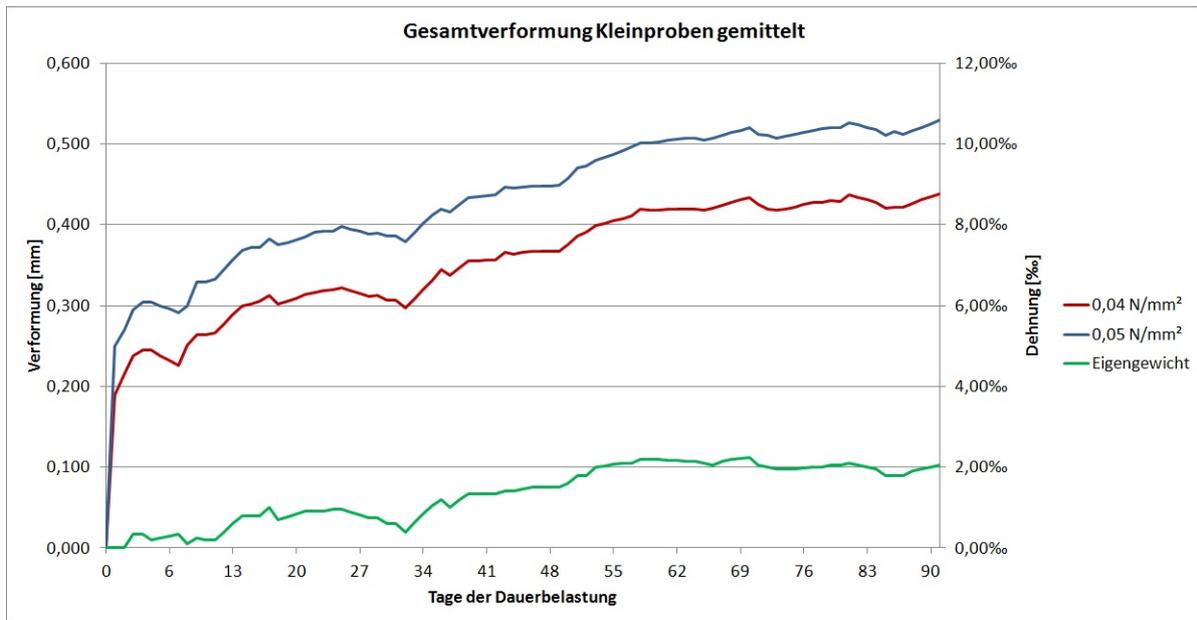


Abb. 3.10.: Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge (gemittelt)

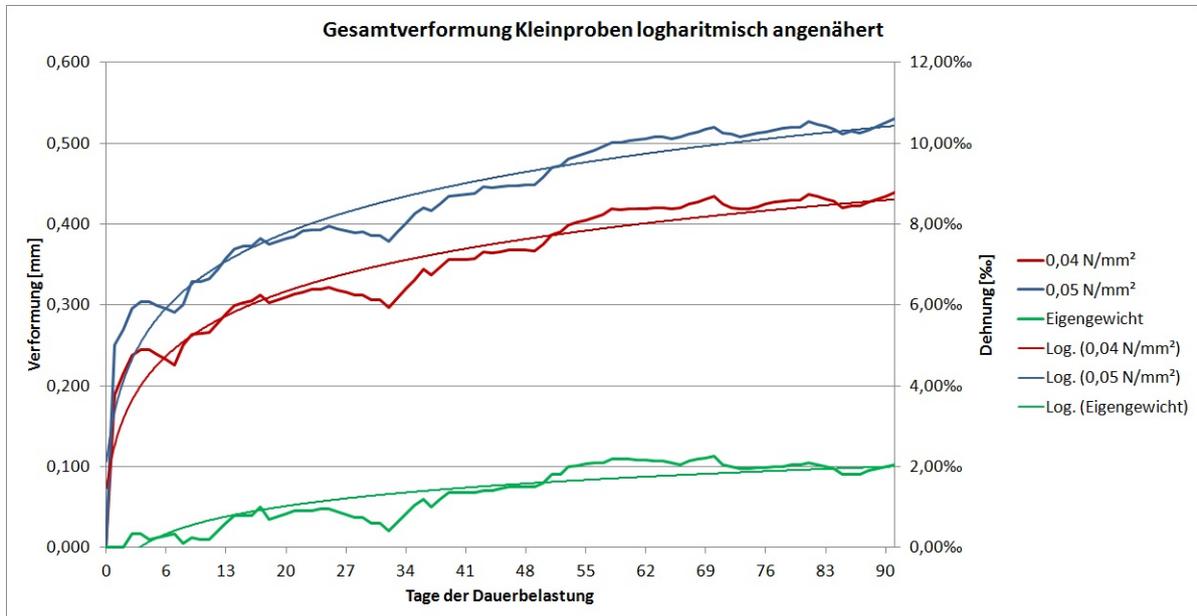


Abb. 3.11.: Verformung in den ersten zwei Wochen

allein die hölzernen Bereiche der Versuchskörper schwinden und quellen bei sich ändernder Feuchtigkeit, woraus gewisse Verformungen entstehen.

Zur deutlicheren Anschauung werden in Abbildung 3.12 nur die Kriechverformungen gezeigt. Die elastische Anfangsverformung wird hier ausgeblendet und der Start des Verlaufs somit zum Zeitpunkt unmittelbar nach Lastaufbringung festgelegt. In Abbildung 3.12 wird die Differenz des Verformungszuwachses unter Dauerbelastung bei unterschiedlichen Lastniveaus verdeutlicht.

Vergleicht man Abbildung 3.12 mit Abbildung 3.10 erkennt man, dass nach 90 Belastungstagen die Kriechverformung ungefähr den selben Anteil an der Gesamtverformung hat, wie die elastische Verformung. Somit sind direkt nach Lastaufbringung bereits fast 50 % der Gesamtverformung abgeschlossen.

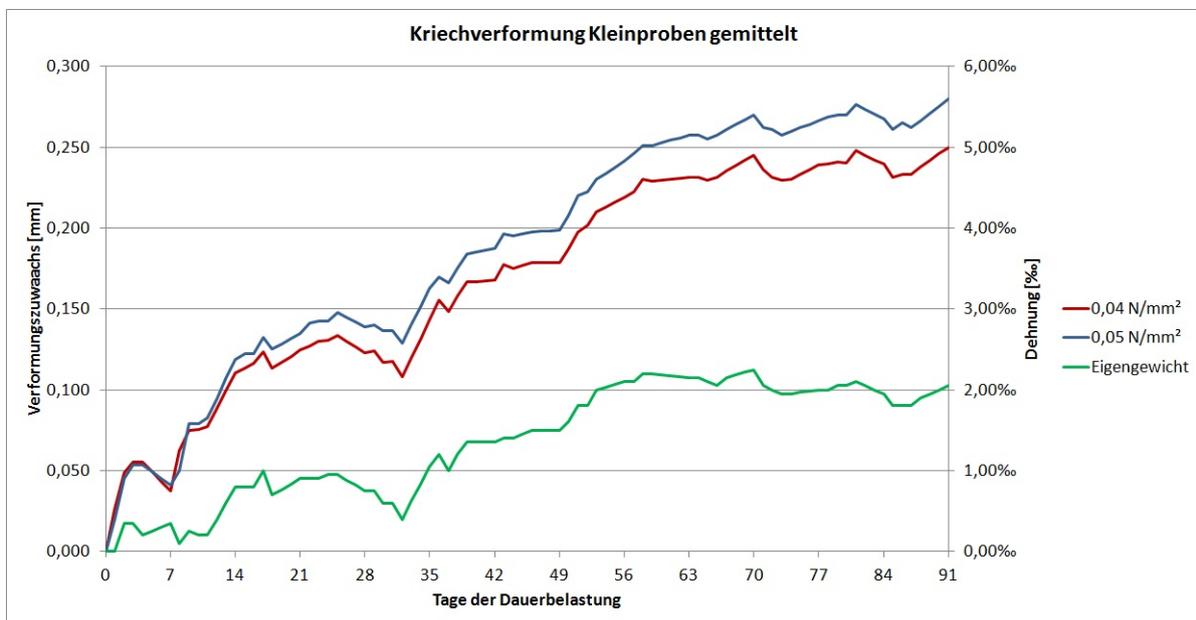


Abb. 3.12.: Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

Bereits am Ende der ersten Woche des Langzeitversuches ist erstmals ein Rückgang in den Verformungen zu erkennen. Auch zu späteren Zeitpunkten kommt es immer wieder zu geringfügigen Rückverformungen. Um diese Vorgänge erklären zu können, ist eine genauere Betrachtung des Klimas im Versuchsraum von Nöten. Durch die automatischen halbstündlichen Messungen der Luftfeuchte und der Temperatur durch Klimadatenlogger kann das Klima genau beobachtet werden. Die genauen Verläufe der Temperatur und des Klimas sind in Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 zu sehen. Deutlich zu erkennen ist in diesen Diagrammen auch, dass die links- und rechtsseitigen Messungen

zu Beginn übereinstimmen. Erst ab dem Einschalten der Heizung am 50. Belastungstag wird ein Unterschied erkennbar, wobei die linksseitige Messung der Messung an der Außen- und die rechtsseitige Messung der Messung an der Innenseite des Versuchsraums entspricht. Auch zu erkennen ist, dass die Temperatur durch das Beheizen über einen längeren Zeitraum nahezu konstant bleibt sowie die Schwankungen zwischen Tag und Nacht viel geringer ausfallen als zuvor. Die relative Luftfeuchtigkeit unterliegt jedoch weiterhin einer gewissen Schwankungsbreite. Die maximale Schwankung der Temperatur beträgt $26,0^{\circ}\text{C}$, die maximale Schwankung der relativen Luftfeuchtigkeit $57,6\%$.

Betrachtet man nun die Tage genauer, an denen Knicke in den Deformationslinien auftreten, wird klar, dass diese Rückverformungen vor allem mit der Verminderung der Luftfeuchtigkeit zusammenhängen. Als wahrscheinlich gilt, dass diese Rückverformung durch Schwinden des Holzes möglich wird, was bei einer Luftfeuchtedifferenz zwischen Tag und Nacht von bis zu 20% durchaus logisch erscheint. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Feuchtigkeitsaufnahme und-abgabe des Silikons. Ob dies jedoch auch in einem Ausmaß stattfindet, welches zu Volumenänderungen führen kann, kann vom Hersteller weder bestätigt noch ausgeschlossen werden [10]. Nach einer Versuchsdauer von ungefähr einem Monat zeigt sich ein langsamerer Rückgang der Verformungen bei ähnlicher Verminderung der Luftfeuchte, der sich jedoch über eine Woche hinzieht (siehe Abbildung 3.9). Im Gegensatz zum Beginn des Versuchs reagieren die Kleinproben hier bei weitem nicht mehr so sensibel auf diesen äußeren Einfluss.

Zur genaueren Anschauung und zur detaillierteren Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Deformation und Klima werden in Abbildung 3.15 der Verformungsverlauf und das Klima der ersten 35 Tage nach Versuchsbeginn übereinandergelegt.

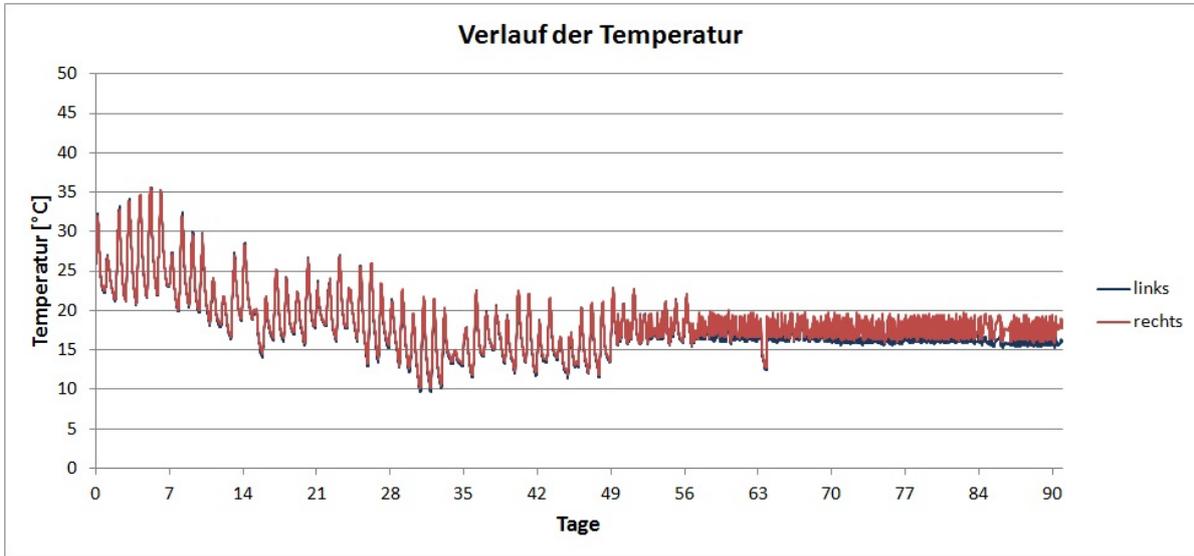


Abb. 3.13.: Temperaturverlauf

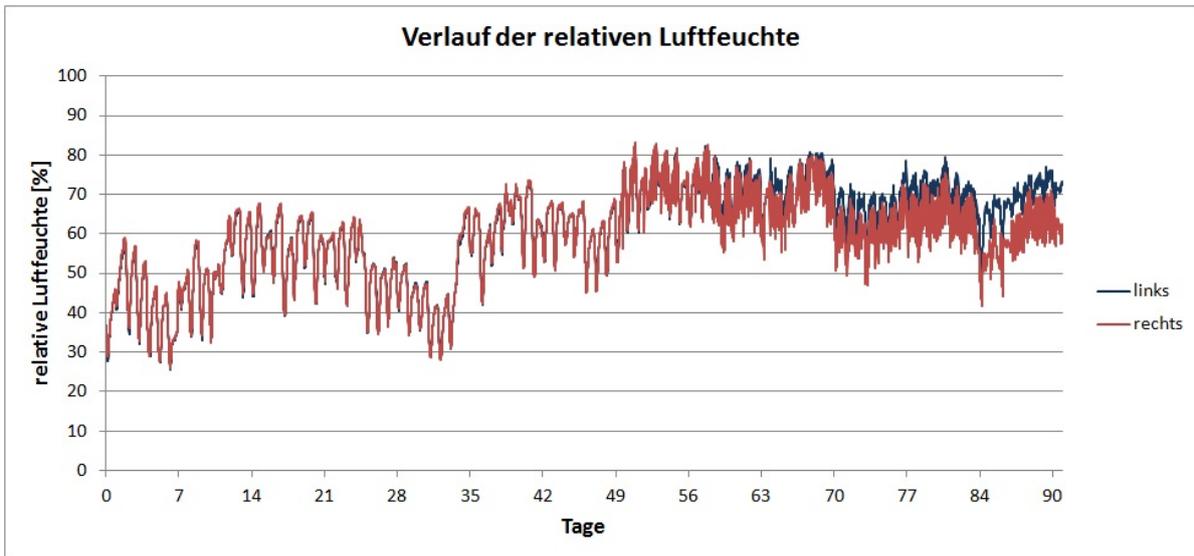


Abb. 3.14.: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit

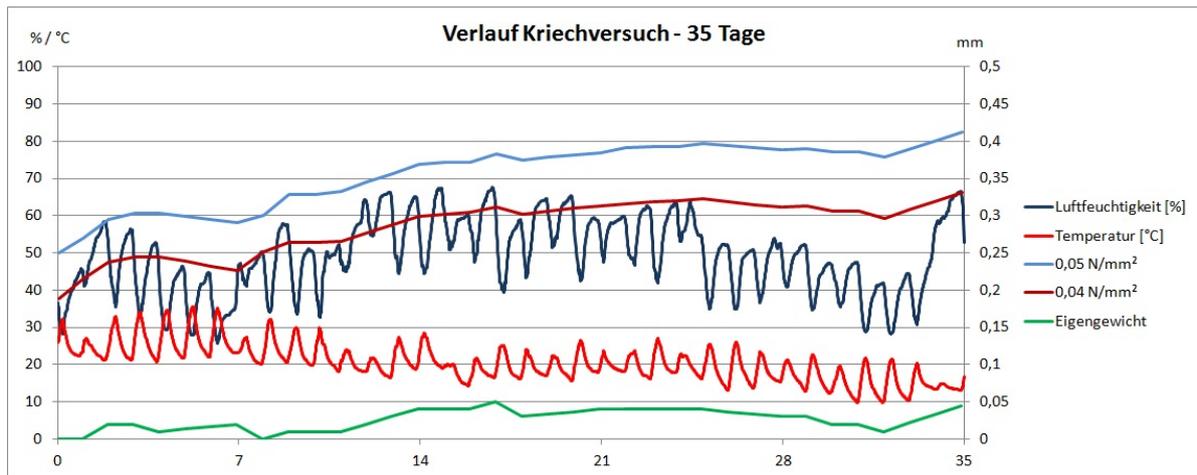


Abb. 3.15.: Verformung und Klima der ersten 35 Tage

Im Zuge der von [1] durchgeführten Untersuchungen, fanden die Versuche durchgängig in einer Klimakammer statt. Das Klima betrug konstant 20°C und 65% relative Luftfeuchte. Im Gegensatz dazu wirken bei der aktuellen Versuchsreihe Temperaturdifferenzen von $9,6^{\circ}\text{C}$ bis $35,6^{\circ}\text{C}$ beziehungsweise Unterschiede in der relativen Luftfeuchtigkeit von $25,6\%$ bis zu $83,2\%$ auf die Versuchskörper. Das entspricht im Vergleich zu den Verhältnissen in der Klimakammer einer maximalen Temperaturdifferenz von $15,6^{\circ}\text{C}$ und einer maximalen Differenz der Luftfeuchte von $39,4\%$.

Durch diese zusätzliche Beanspruchung würde man beim selben Lastniveau höhere Deformationen erwarten, jedoch zeigt sich, dass die Verformungen zwischen Sperrholz und Glas nach 90 Tagen annähernd die selbe Größe erreichen. Das ist auch darauf zurückzuführen, dass bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit Schwinden des Sperrholzes eintritt, was positive Auswirkungen auf die Deformationen mit sich bringt. In [1] betrug die mittlere Verformung nach 90 Tagen unter einer Dauerspannung von $0,04\text{ N/mm}^2$ in etwa $0,46\text{ mm}$, in der aktuellen Versuchsreihe beträgt dieser Wert $0,43\text{ mm}$.

3.2.3.2. Scherversuch

Beim Scherversuch entlang der Klebefuge wurde die BFU-Leiste eingeklemmt und an der Glasoberkante die Last mittels eines Stempels mit $0,5\text{ mm/min}$ aufgetragen. Somit ergibt sich eine steigende Schubbeanspruchung in der Silikon-Fuge. Eine Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 3.7 ersichtlich. Alle Proben waren bis zum Zeitpunkt der Prüfung zu keiner Zeit klimatisiert gelagert. In Abbildung 3.17 bis Abbildung 3.23 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven der jeweiligen Serie dargestellt. Durch diese Dia-

gramme kann auch sehr gut das Bruchverhalten der einzelnen Probekörper miteinander verglichen werden. Anschließend wurden aus den Ergebnissen statistische Werte errechnet und ausgewertet. Für die Berechnung des Verformungsmoduls ist nach [3] die Spannung bei relativer Verschiebung zur Dicke des Untergrundes von Nöten. Dieser Wert wird mit d bezeichnet. Eine genaue Darstellung der Berechnung ist in Abbildung 3.16 ersichtlich. Der mittlere Verformungsmodul berechnet sich demnach nach Gleichung 3.3. Dieser wird allerdings nur für unbelastete Proben errechnet, da für den Verformungsmodul unter Dauerlast weitere Berechnungen notwendig sind, siehe Gleichung 3.4.

$$G = \frac{m_{med}}{d} \quad (3.3)$$

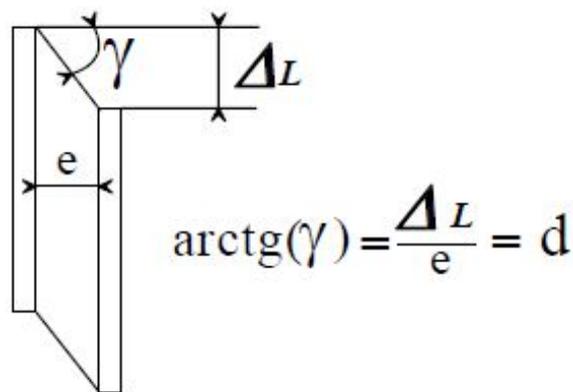


Abb. 3.16.: Messung der Verschiebung unter Schubbeanspruchung [3]

ΔL	Verformung unter Kurzzeitbelastung
e	Dicke der Klebefuge
d	Verschiebung relativ zur Dicke des Untergrundes
m_{med}	Median der Bruchspannung
G	Mittlerer Verformungsmodul

Die ersten Scherversuche wurden nach 28-tägiger Aushärtungszeit der Klebstoffuge durchgeführt, von zehn dafür vorgesehenen Proben waren jedoch zwei schadhaft, weshalb nur die restlichen acht Kleinprobekörper zur Versuchsauswertung herangezogen wurden. Diese acht Versuchskörper unterlagen keiner Vorbelastung. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Abbildung 3.17 und Tabelle 3.4 ersichtlich. Dabei zeigt sich ein durchaus unterschiedliches Bruchverhalten der einzelnen Versuchskörper. Vier der Proben brechen nach Maximalbelastung abrupt, wohingegen die vier anderen Proben ein verlaufendes Bruchverhalten zeigen beziehungsweise nach einem ersten Spannungsabfall

nochmals kurzfristig Last aufnehmen können.

Im Vergleich zu [1] ergeben sich in dieser Versuchsreihe durchwegs bessere Ergebnisse. Die mittlere Bruchspannung betrug in [1] $m_x = 0,987 \text{ N/mm}^2$ und der mittlere Verformungsmodul $G = 0,37 \text{ N/mm}^2$.

Im folgenden sind in allen Tabellen, wo bekannte Ergebnisse aus [1] vorliegen, diese zum Vergleich eingetragen.

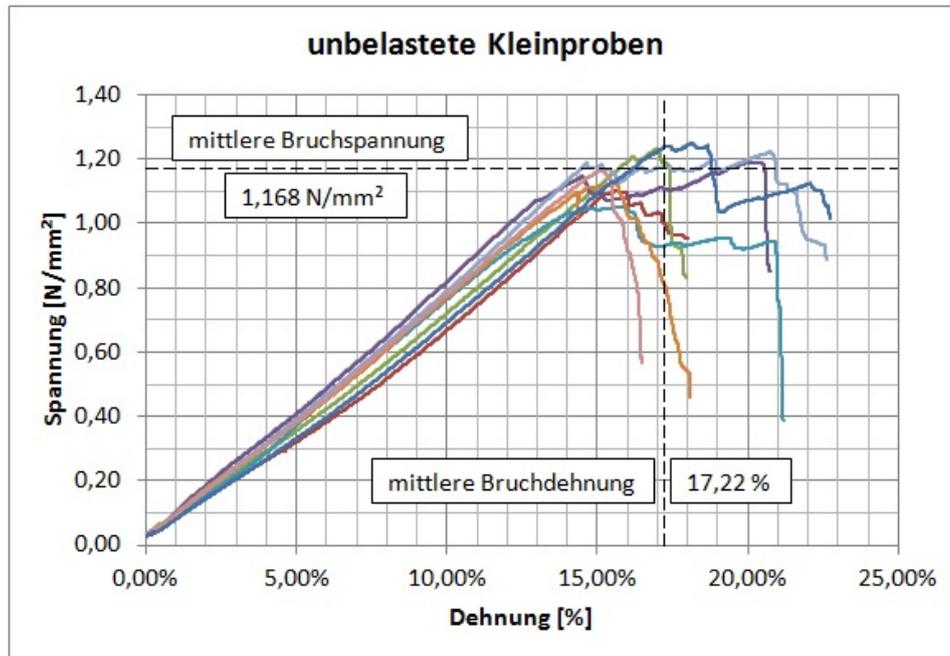


Abb. 3.17.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben ohne Vorbelastung

Tab. 3.4.: Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben ohne Vorbelastung

Ergebnisse der aktuellen Versuchsreihe		bzw. nach [1]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 8$	5
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 1,168 \text{ N/mm}^2$	$1,001 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 1,180 \text{ N/mm}^2$	$0,987 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,070 \text{ N/mm}^2$	$0,076 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 1,028 \text{ N/mm}^2$	$0,824 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.2)	$R_{u,5} = 1,015 \text{ N/mm}^2$	-
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 17,22 \%$	-
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 287,08 \%$	261 %
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,41 \text{ N/mm}^2$	$0,37 \text{ N/mm}^2$

Nach nur einem Tag Vorbelastung wurden zehn Kleinprobekörper mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ und fünf mit $0,05 \text{ N/mm}^2$, wie in Tabelle 3.1 aufgelistet, entlastet und anschließend

auf Abscheren bis zum Bruch beansprucht. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19 sowie in Tabelle 3.5 und Tabelle 3.6 ersichtlich.

Bei den Kleinproben, welche mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet wurden, ist eine sehr große Streuung erkennbar. Auffällig ist, dass bei den meisten Proben vor dem endgültigen Versagen offenbar kleinere Risse auftreten. Bei einer Probe tritt der erste Spannungsabfall schon bei nur 7% der Dehnung auf, die Spannungs-Dehnungs-Kurve steigt später jedoch noch auf eine Bruchfestigkeit an, die im Mittelmaß der übrigen Versuchsergebnisse liegt.

Die Proben, welche vor den Scherversuchen eine Vorbelastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ erfahren haben, erreichen bei weitem nicht mehr dieselbe maximale Spannung wie die Versuchskörper der zuvor beschriebenen Versuchsreihen, jedoch ist die Streuung gering, woraus durchaus hohe $R_{u,5}$ -Werte resultiert.

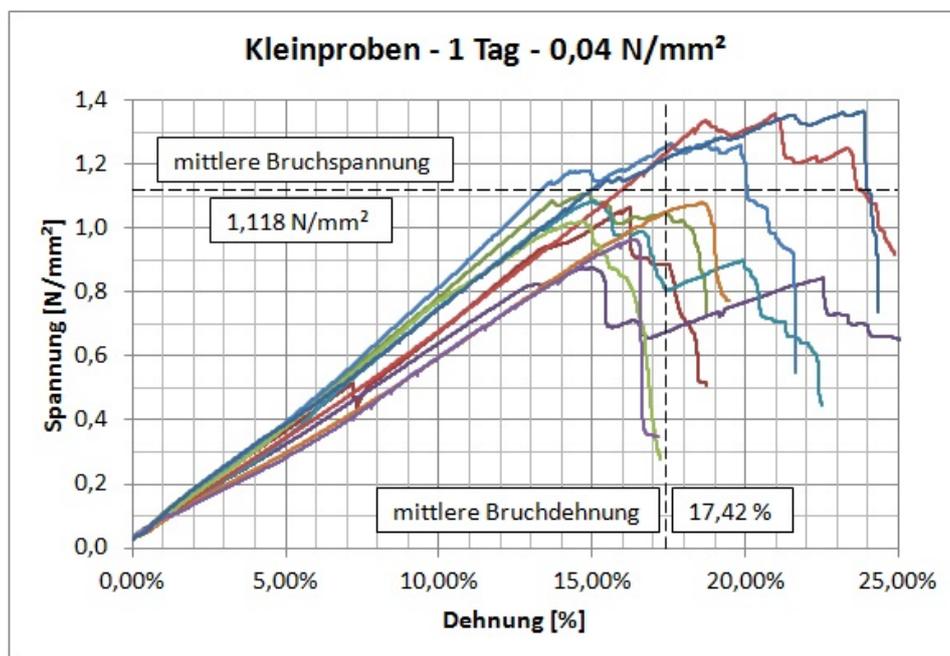
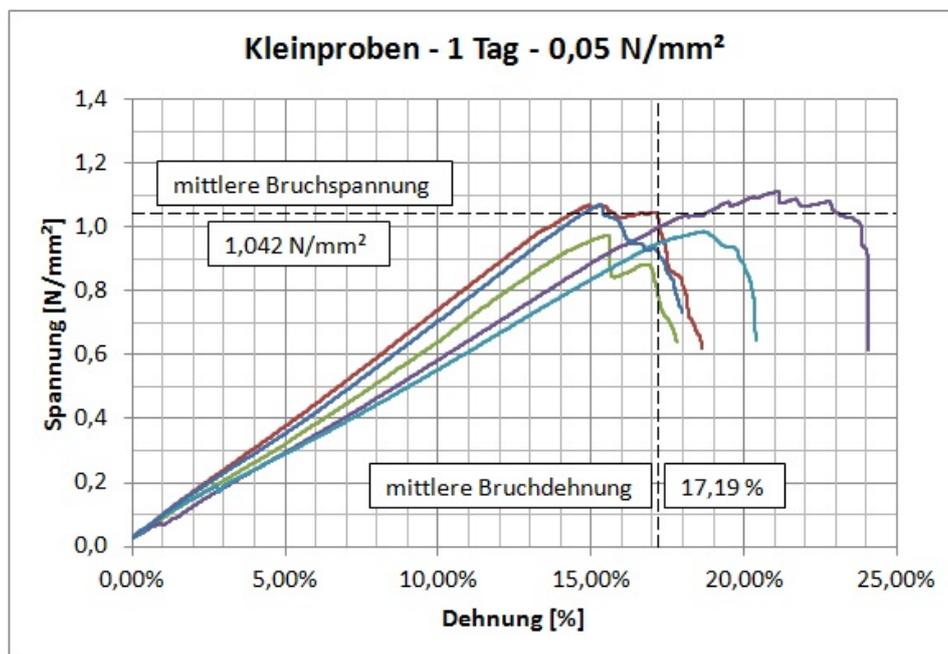


Abb. 3.18.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 1 Tag mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Tab. 3.5.: Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 1 Tag mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 1,118 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 1,081 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,163 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,805 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.2)	$R_{u,5} = 0,776 \text{ N/mm}^2$
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 17,42 \%$
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 290,35 \%$
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,37 \text{ N/mm}^2$

Abb. 3.19.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 1 Tag mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Tab. 3.6.: Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 1 Tag mit $0,05 N/mm^2$ vorbelastet

Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 1,042 N/mm^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 1,069 N/mm^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,059 N/mm^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,904 N/mm^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.2)	$R_{u,5} = 0,896 N/mm^2$
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 17,19 \%$
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 286,44 \%$
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,37 N/mm^2$

Nach insgesamt 35 Tagen Vorbelastung wurden die nächsten 15 Versuchskörper (siehe Tabelle 3.1) entlastet und der Scherprüfung unterzogen. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Abbildung 3.20 und Abbildung 3.21 sowie in Tabelle 3.7 und Tabelle 3.8 ersichtlich.

In Abbildung 3.20 zeigt sich wiederum eine große Streuung der maximalen Spannungen. Bei diesen zehn Kleinproben tritt jedoch durchwegs ein Bruchverhalten ohne zusätzliche nachträgliche Spannungsaufnahme auf. Das heißt, die Spannung-Dehnungs-Kurve fällt direkt nach ihrem Maximalwert meist stark ab.

Bei den Versuchsproben der in Abbildung 3.21 abgebildeten Ergebnisse ist der nahezu idente Anstieg der Spannung-Dehnungs-Kurven, also ein sich deckender Verformungsmodul, ersichtlich. Erst beim Bruch treten wieder unterschiedliche Verhaltensmuster auf. Der Mittelwert der Bruchspannung liegt bei dieser Versuchsreihe über dem Mittelwert der mit $0,04 N/mm^2$ vorbelasteten Kleinproben. Das spricht für eine äußerst hohe Qualität der Klebefuge bei diesen fünf Versuchskörpern.

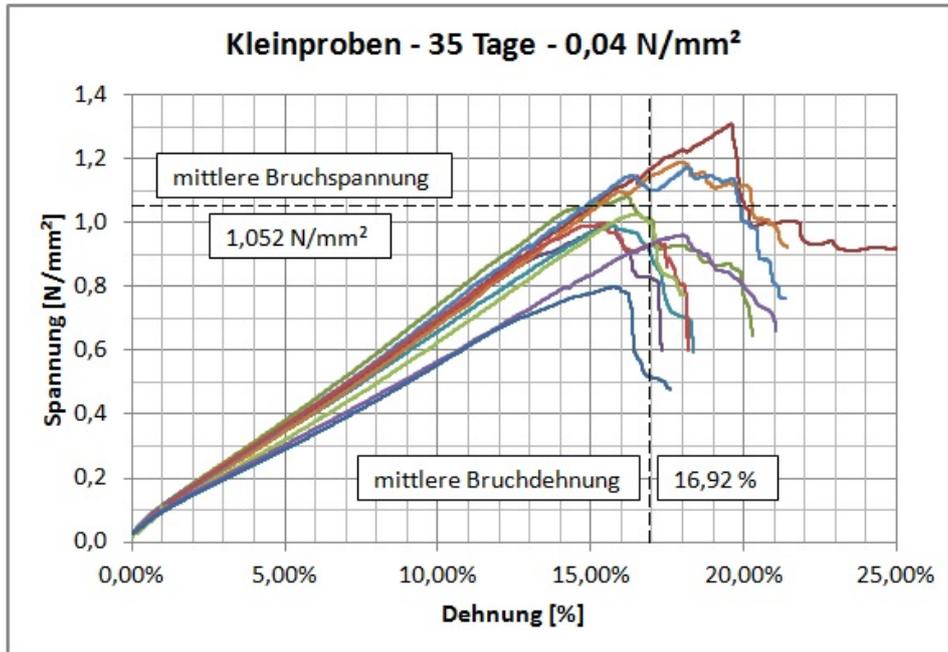


Abb. 3.20.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 35 Tage mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Tab. 3.7.: Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 35 Tage mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 1,052 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 1,012 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,143 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,777 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.2)	$R_{u,5} = 0,751 \text{ N/mm}^2$
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 16,92 \%$
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 281,95 \%$
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,36 \text{ N/mm}^2$

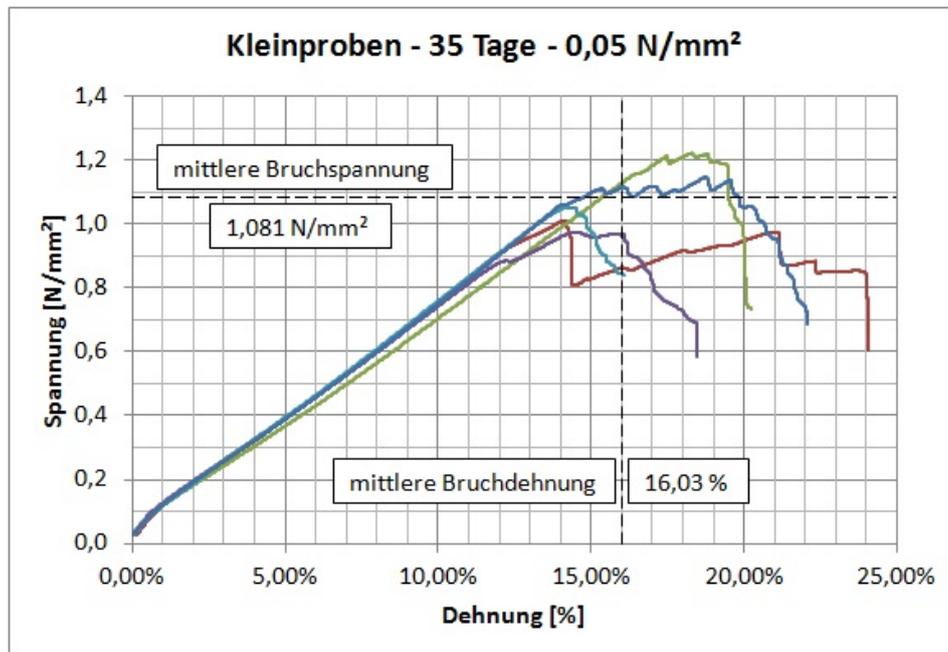


Abb. 3.21.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 35 Tage mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Tab. 3.8.: Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 35 Tage mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 1,081 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 1,051 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,102 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,843 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.2)	$R_{u,5} = 0,830 \text{ N/mm}^2$
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 16,03 \%$
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 267,22 \%$
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,39 \text{ N/mm}^2$

Nach drei Monaten, beziehungsweise genau 92 Tagen, Vorbelastung erfolgte die nächste Untersuchung bezüglich Scherfestigkeit. Neuerlich wurden 15 Probekörper (siehe Tabelle 3.1) entlastet und anschließend auf Abscheren bis zum Bruch belastet. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Abbildung 3.22 und Abbildung 3.23 sowie in Tabelle 3.9 und Tabelle 3.10 ersichtlich.

In Abbildung 3.22 sieht man die bereits bekannten Besonderheiten bezüglich Bruchverhalten, jedoch ist die Streuung bei dieser Versuchsreihe gering. Lediglich eine Probe zeigt Unregelmäßigkeiten im Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve, was auf mehrere sehr kleine Risse in der Klebefuge hindeutet. Doch selbst diese Probe kann eine beachtliche maximale Spannung aufnehmen.

Bei den Versuchsproben, welche 92 Tage mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet wurden, werden deutlich niedrigere Festigkeiten als bei allen anderen Versuchsreihen erzielt. Auch die Streuung der Maximalwerte ist verhältnismäßig groß, woraus dementsprechend geringe $R_{u,5}$ -Werte resultieren. Die im Gegensatz dazu außerordentlich guten Ergebnisse der Scherprüfungen nach 35 Tagen dürften daher als Ausnahme anzusehen sein.

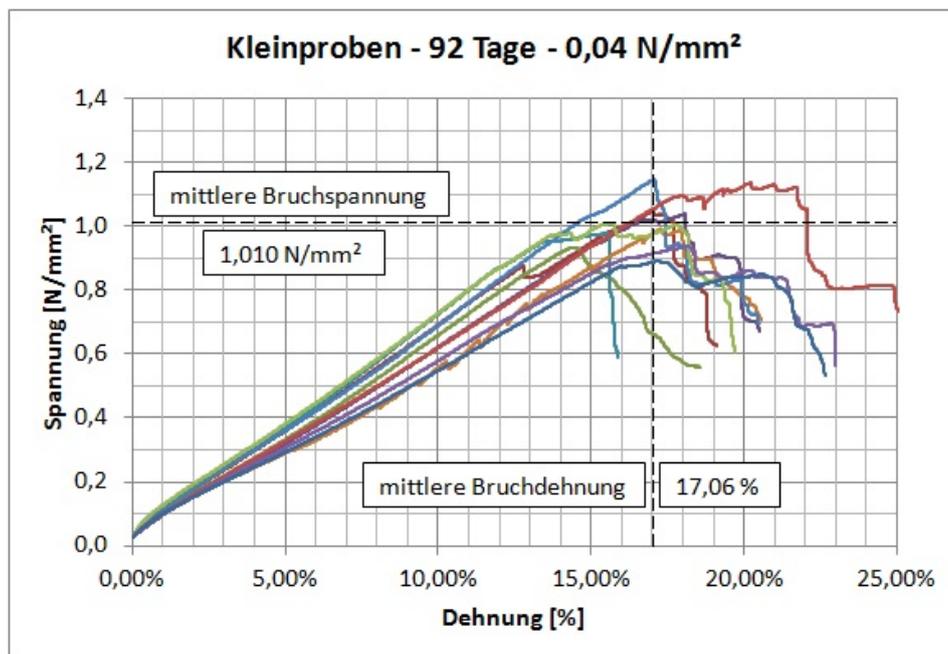
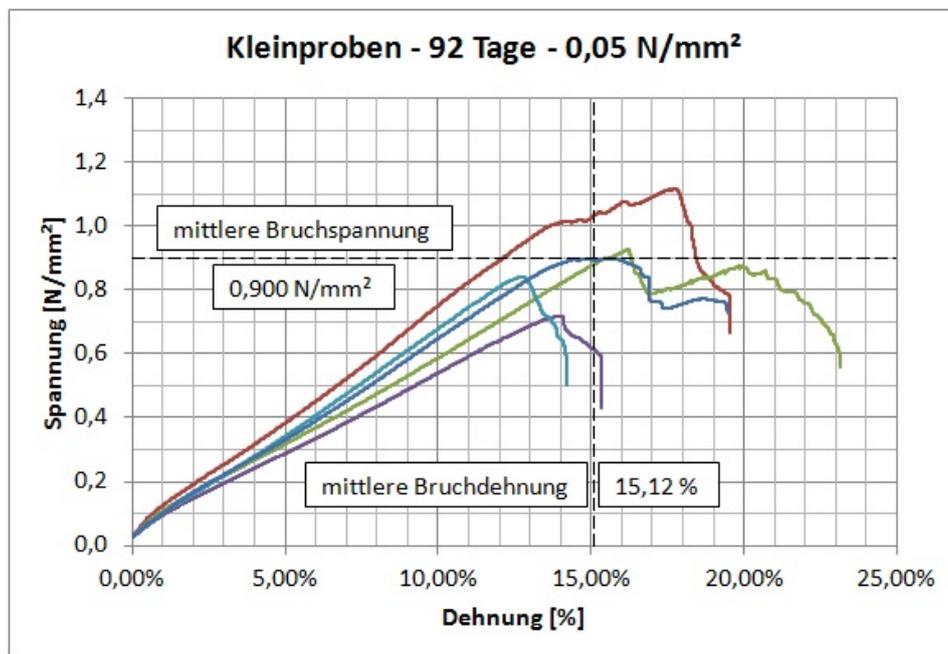


Abb. 3.22.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 92 Tage mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Tab. 3.9.: Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 92 Tage mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Ergebnisse der aktuellen Versuchsreihe		bzw. nach [1]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$	10
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 1,010 \text{ N/mm}^2$	$0,969 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 1,001 \text{ N/mm}^2$	$0,970 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,083 \text{ N/mm}^2$	$0,069 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,850 \text{ N/mm}^2$	$0,832 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.2)	$R_{u,5} = 0,835 \text{ N/mm}^2$	-
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 17,06 \%$	-
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 284,41 \%$	276 %
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,35 \text{ N/mm}^2$	$0,37 \text{ N/mm}^2$

Abb. 3.23.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 92 Tage mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Tab. 3.10.: Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 92 Tage mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ vorbelastet

Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 0,900 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 0,898 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,145 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,562 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.2)	$R_{u,5} = 0,543 \text{ N/mm}^2$
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 15,12 \%$
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 252,07 \%$
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,36 \text{ N/mm}^2$

In [3] ist des Weiteren festgelegt, dass in einer Versuchsreihe mehr als 90 % kohäsiver Bruch im Klebstoff vorliegen muss. Dies wurde im Rahmen der für diese Arbeit durchgeführten Versuche ausnahmslos erreicht. Als Beispiel ist in Abbildung 3.24 ein Bruchbild zu sehen

Abb. 3.24.: Bruchbild einer Probe 92 Tage belastet mit $0,04 \text{ N/mm}^2$

Betrachtet man das Verformungsverhalten der unterschiedlichen Versuchsreihen genauer, wird deutlich, dass sich hier kaum Veränderungen ergeben. Lediglich die unbelasteten Proben zeigen etwas steifere Eigenschaften im Gegensatz zu den Versuchskörpern mit vorangegangener Belastung. Die Dauer der Langzeitbeanspruchung hat hingegen offenbar kaum Auswirkungen auf die Steifigkeit der Silikonfuge. Zur Veranschaulichung dieses Effekts wird pro Versuchsreihe eine Probe ausgewählt, die am ehesten dem Festigkeitsmittelwert jeder Serie entspricht. Die jeweiligen Kurven werden in Abbildung 3.25

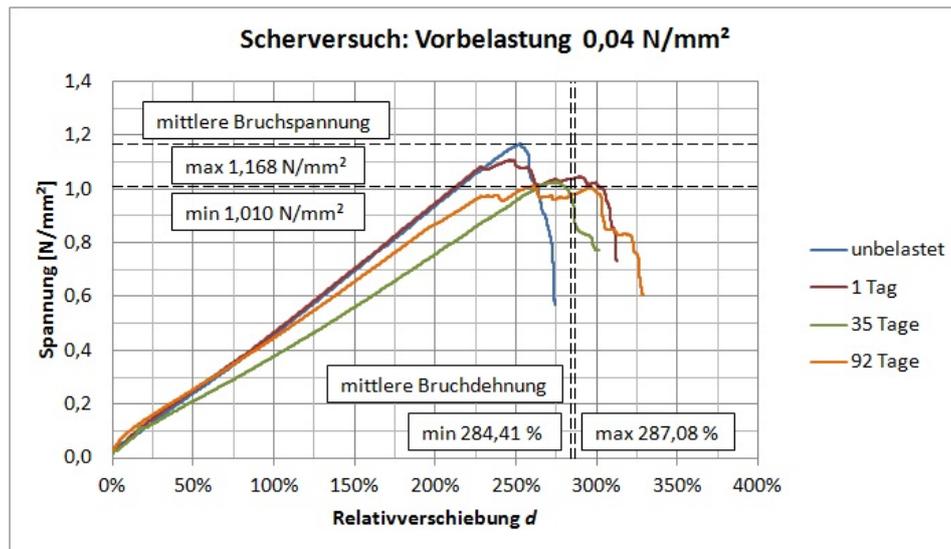


Abb. 3.25.: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven nach Dauer der Vorbelastung unter $0,04 \text{ N/mm}^2$

und Abbildung 3.26 miteinander verglichen. Auch hier wurde bei jedem Lastniveau die Spannungs-Dehnungs-Kurve einer Kleinprobe ohne vorheriger Dauerlast hinzugefügt, um einen Vergleich zu unbelasteten Versuchskörpern ziehen zu können. Auf der x-Achse wird hier anstatt der ansonst üblichen Dehnung ε die relative Verschiebung zur Dicke des Klebstoffs d angegeben, die für die Berechnung des Verformungsmoduls notwendig ist. Dies dient der besseren Anschauung des Verformungsmoduls nach Gleichung 3.3, der in dieser Darstellung gleich der Steigung der einzelnen Spannungs-Dehnungs-Kurven ist.

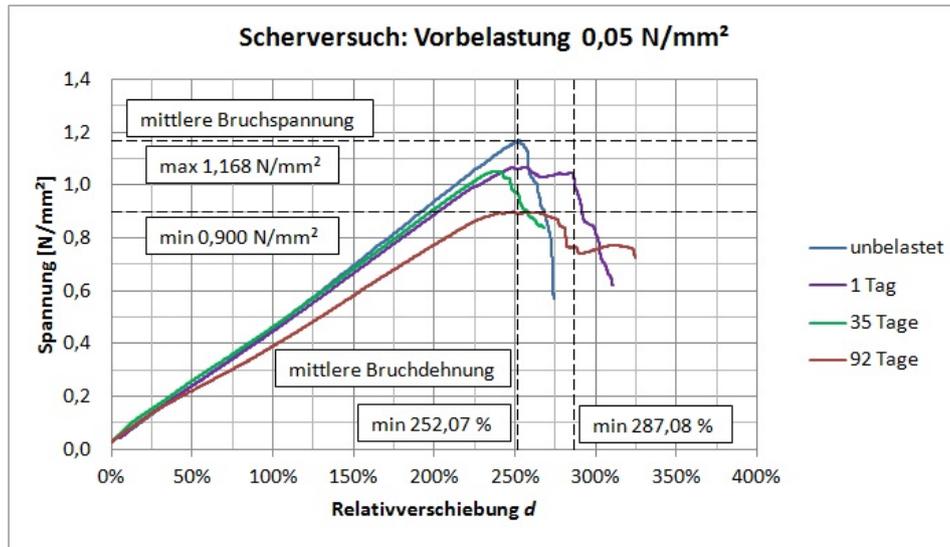


Abb. 3.26.: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven nach Dauer der Vorbelastung unter $0,05 \text{ N/mm}^2$

In den nachfolgenden Diagrammen werden die vorangegangenen Ergebnisse miteinander verglichen. In Abbildung 3.27 und Abbildung 3.28 ist die Gegenüberstellung der erreichten Mittelwerte aller Scherversuche nach Dauer der Vorbelastung mit einem Lastniveau von $0,04 \text{ N/mm}^2$, beziehungsweise $0,05 \text{ N/mm}^2$, dargestellt. Als Referenzwert ist der Mittelwert der Scherfestigkeit der Versuche ohne Vorbelastung als erster Balken eingetragen. Dabei ist ein deutlicher Abfall der Scherfestigkeit zu erkennen.

Auffallend ist vor allem der rasante Verlust der Festigkeit zwischen den Versuchen ohne Vorbelastung und den Versuchen nach einem Tag Vorbelastung. Bezugnehmend auf die Versuchsreihe unter $0,04 \text{ N/mm}^2$ Vorbelastung beträgt diese Differenz $0,050 \text{ N/mm}^2$. Im gesamten weiteren Versuchsverlauf, also einer Dauer von zusätzlichen 91 Tagen unter Last, beträgt der Verlust $0,108 \text{ N/mm}^2$. Somit verliert das Silikon in den ersten 24 Stunden unter Vorbelastung schon beinahe 32% der Festigkeit bezogen auf den Gesamtverlust nach 92 Tagen.

Unter einer Vorbelastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ beträgt dieser Verlust bereits 47% . Das bedeutet, dass fast die Hälfte der Festigkeitsabminderung über 92 Tage bereits nach einem Tag unter Last stattgefunden hat. Bis zu den Messungen nach 35 Tagen tritt hingegen kein Verlust der Festigkeit mehr auf. Im Gegenteil, es zeigt sich sogar ein kleiner Anstieg. Dies ist jedoch vermutlich auf unterschiedliche Herstellungsqualität der Silikonfugen zurückzuführen.

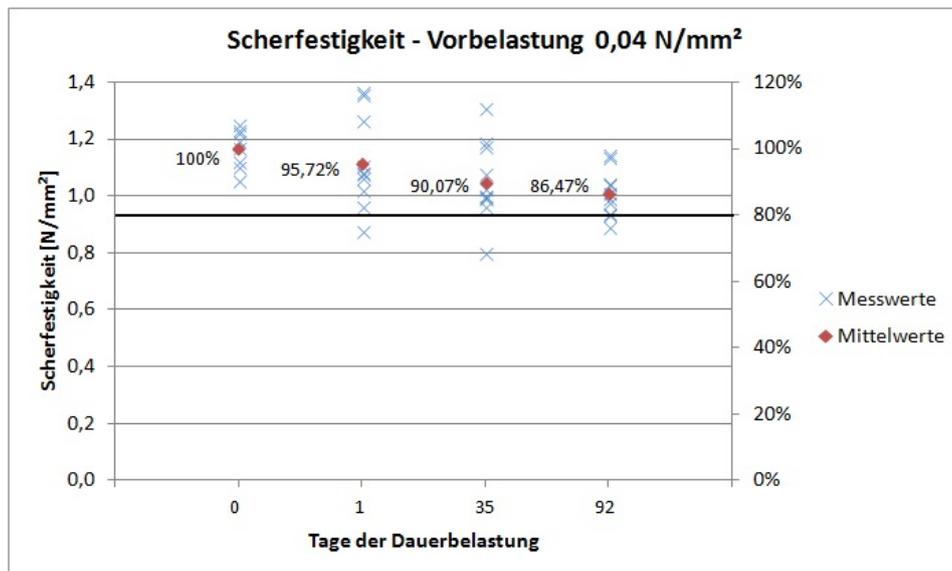


Abb. 3.27.: Vergleich der Scherfestigkeiten nach unterschiedlicher Langzeitbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ zu Messwerten unbelasteter Kleinproben

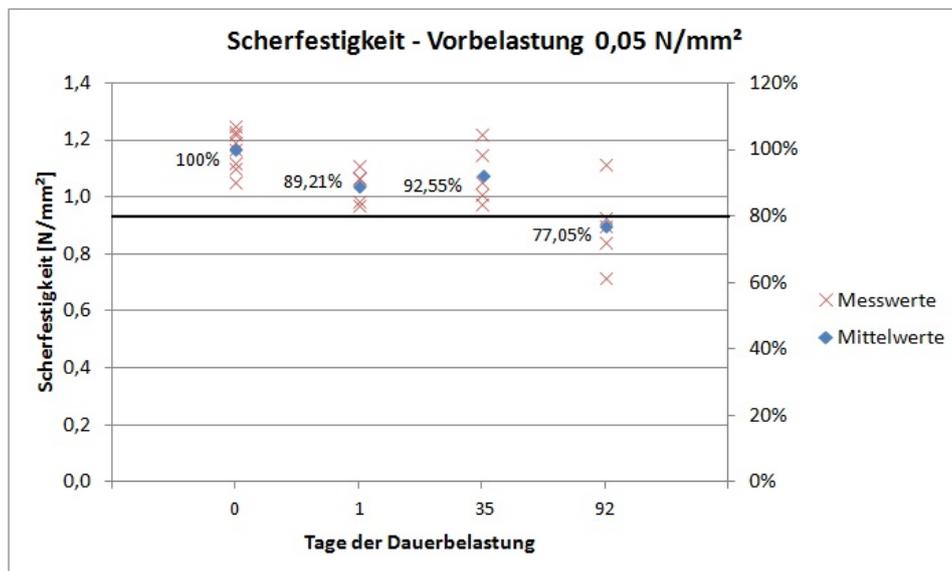


Abb. 3.28.: Vergleich der Scherfestigkeiten nach unterschiedlicher Langzeitbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ zu Messwerten unbelasteter Kleinproben

Noch deutlicher wird der Verlauf der Festigkeiten, wenn man die gesammelten Daten entlang einer Zeitachse aufträgt und mit einer logarithmischen Kurve annähert, siehe Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30. In diesen Diagrammen sind alle Messergebnisse sowie die Mittelwerte jeder Serie verzeichnet. Als 100 % der Festigkeit wird der Mittelwert der Scherfestigkeitsprüfungen der unbelasteten Kleinproben definiert. Deutlich zu erkennen ist der rasche Festigkeitsverlust nach bereits einem Tag unter Vorbelastung. Weiters fällt auf, dass die Annäherung durch eine logarithmische Kurve bei den Ergebnissen in Abbildung 3.29 weitaus genauer ausfällt als in Abbildung 3.30. Daraus kann man schließen, dass lediglich fünf Kleinproben pro Serie unter Umständen zu wenig sind um zuverlässige Ergebnisse zu erlangen. Mit zehn Proben werden jedoch die erwarteten Ergebnisse erzielt. Auch die hohe Festigkeit nach 35 Tagen bei einer Vorbelastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ deutet auf den Umstand hin, dass sich durch unterschiedliche Herstellungsqualität eine große Streuung der Messergebnisse ergibt und somit eine größere Anzahl an Probekörpern wünschenswert wäre um zuverlässigere Ergebnisse zu erhalten. Bei Klebstoffverbindungen für tragende Holzbauteile müssen zum Beispiel laut [11] mindestens zehn gültige Ergebnisse vorliegen, um eine Aussage über die Eigenschaften treffen zu können.

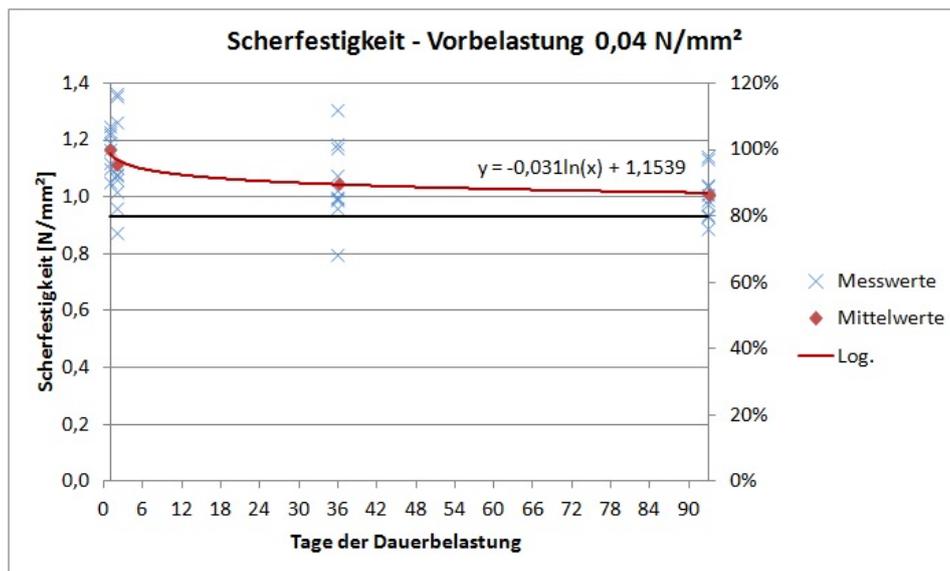


Abb. 3.29.: Vergleich des Scherfestigkeitsverlaufs unter einer Dauerlast von $0,04 \text{ N/mm}^2$

Beide Kurven liegen jedoch nach 92 Tagen noch über den von [1] geforderten 80 % der Festigkeit, allerdings liegt der Mittelwert in Abbildung 3.30 schon darunter. Eine Auswertung der in Abbildung 3.29 errechneten Formel ergibt nach einem Jahr allerdings nur mehr eine Scherfestigkeit von $\tau_{x,m} = 0,971 \text{ N/mm}^2$, was 83,17 % der Festigkeit der Klein-

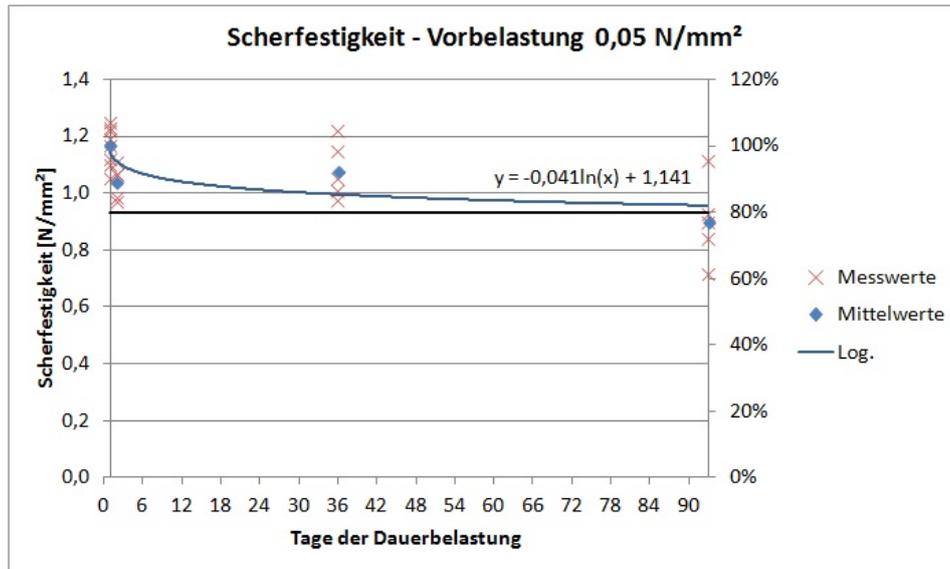


Abb. 3.30.: Vergleich des Schersfestigkeitsverlaufs unter einer Dauerlast von $0,05 N/mm^2$

proben ohne Vorbelastung entspricht. In ETAG 002-1 [3] wird von einer Nutzungsdauer von 25 Jahren ausgegangen. Nach dieser Zeit liegt die Festigkeit nach Abbildung 3.29 nur noch bei $\tau_{x,m} = 0,871 N/mm^2$, also 74,62%. Der Eurocode [9] bezieht sich im Hochbau auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahren, bei Brücken sogar auf 100 Jahre. Dieser Unterschied beruht auf der Tatsache, dass im Eurocode von statisch relevanten Systemen ausgegangen wird, sich die ETAG 002-1 [3] hingegen auf austauschbare Bauteile bezieht. Für ein Dauerspannungsniveau von $0,05 N/mm^2$ ergeben sich demnach noch schlechtere Werte. Die errechnete Festigkeit nach einem Jahr liegt bei $0,899 N/mm^2$ (77,01%) und nach 25 Jahren bei $0,767 N/mm^2$ (65,71%).

Die Forderung aus [1] 80% der Festigkeit zu erreichen, gilt zwar nur für die Dauer von 91 Tagen unter Belastung, es ist trotzdem als negativ zu bewerten, dass bei keinem der beiden Lastniveaus dieser Wert auch nach 25 Jahren noch gehalten wird, da daher eine ausreichende Festigkeit des Silikons über den gesamten Lebenszyklus bezweifelt werden muss. Eine genauere Erklärung dieser Grenze und der Auswirkung auf Deformations- und Modifikationsbeiwert findet sich in Kapitel 4.

Um einen kombinierten Schubmodul errechnen zu können, muss untersucht werden, ob ein linearer Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dauerlast und der Dehnung bezogen auf die Dicke der Klebstofffuge zufolge Kriechen beobachtet werden kann. Dieser kombinierte Schubmodul kann für die Berechnung der Verformungen unter Dauerlast herangezogen werden. In Abbildung 3.31 wird der lineare Zusammenhang deutlich ge-

macht. Im Gegensatz zu [1] wird der lineare Bereich allerdings nicht bei einer Dauerbelastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ begrenzt, sondern auf einer Dauerlastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$ erweitert. In Abbildung 3.31 sind die Dehnungen aller 15 gemessenen Proben eingezeichnet, dieselben zwei Proben wie bereits in Abschnitt 3.2.3.1 werden auch hier von der Auswertung ausgenommen und sind in der folgenden Abbildung rot markiert. Die restlichen Ergebnisse werden durch eine Gerade angenähert, die Steigung dieser Geraden ergibt den Kehrwert des Verformungsmoduls zufolge Kriechen, also $\frac{1}{G_{kriech}} = 1,95 \text{ N/mm}^2$.

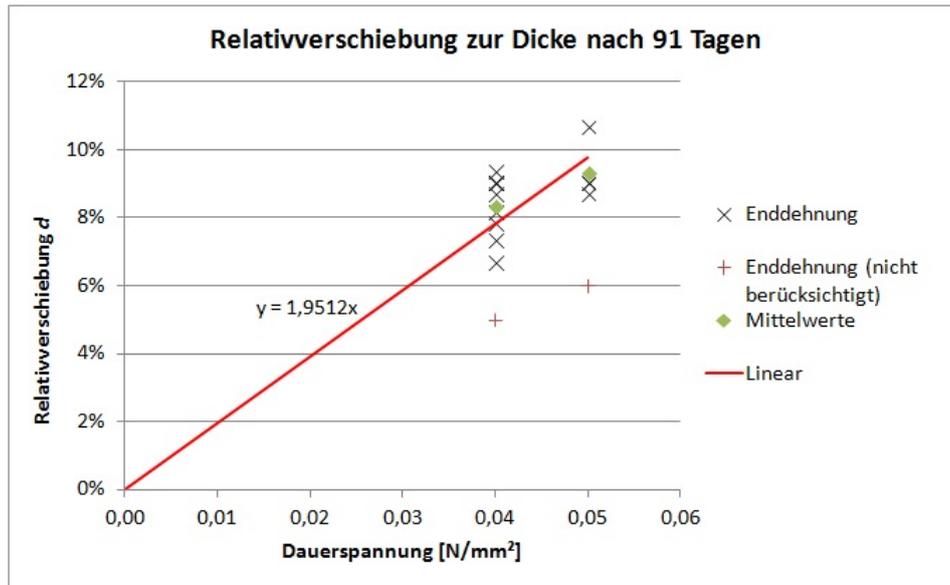


Abb. 3.31.: Relativverschiebung der Klebefuge nach 91-tägiger Schubbelastung längs der Klebefuge

Der kombinierte Schubmodul kann laut [1] folgendermaßen berechnet werden:

$$\frac{1}{G_{ges}} = \frac{1}{G_{kurz}} + \frac{1}{G_{kriech}} \quad (3.4)$$

$$G_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{G_{kurz}} + \frac{1}{G_{kriech}}}$$

Für den Verformungsmodul zufolge Dauerschubbelastung längs der Klebstoffuge ergibt sich somit nach Gleichung 3.4:

$$G_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{G_{kurz}} + \frac{1}{G_{kriech}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,41} + 1,95} = 0,23 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5)$$

In Gleichung 3.5 werden die Werte aus Tabelle 3.4 und Abbildung 3.31 verwendet.

Auch hier kann wieder der Vergleich zu [1] angestellt werden. Wie nach Kurzzeitbelastung in Tabelle 3.4 zeigt sich auch nach einer Dauerbeanspruchung ein steiferes Verformungsverhalten als in [1]. Dort betrug der berechnete Werte für den Verformungsmodul unter Schubbelastung längs der Klebefuge $G_{ges} = 0,20 N/mm^2$.

3.2.3.3. Zyklische Belastung

Wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert, werden zehn Prüfkörper zuerst zyklisch beansprucht und danach bis zum Bruch auf Abscheren geprüft. Fünf dieser Prüfungen wurden bereits durchgeführt, die Auswertung der Scherversuche ist in Abbildung 3.32 und Tabelle 3.11 dargestellt.

Zuerst erfolgte jedoch die zyklische Beanspruchung dieser fünf Kleinprobekörper. Zur Berechnung von τ_{des} wird der $R_{u,5}$ -Wert der Scherversuche an Kleinproben ohne Vorbelastung benötigt. Laut Tabelle 3.4 wäre dieser Wert mit $1,028 N/mm^2$ anzunehmen. Es wurde jedoch bei der Berechnung von $R_{u,5}$ für das Lastniveau der zyklischen Untersuchungen die theoretische Klebefugenbreite der Kleinproben von $12 mm$ anstelle der exakt gemessenen Fugenbreite angesetzt. Somit wurde die Berechnung von τ_{des} mit $R_{u,5} = 0,984 N/mm^2$ durchgeführt. Dadurch ergibt sich für den Bemessungswert der Spannung

$$\tau_{des} = \frac{R_{u,5}}{3} = \frac{0,984}{3} = 0,328 N/mm^2.$$

Hätte man die tatsächliche Breite der Klebefugen zur Berechnung des mittlere Bemessungswert herangezogen, würde sich $\tau_{des} = 0,343 N/mm^2$ ergeben. Die Differenz dieser Lastniveaus ist allerdings vernachlässigbar, wodurch auch die hier berechneten Ergebnisse durchaus zur Auswertung herangezogen werden können.

Auch bei der zyklischen Belastung der Kleinproben wurde die exakte Breite der Klebefuge erst nach Abschluss der Scherprüfung und nicht bereits vor der dynamischen Beanspruchung gemessen. Somit wurde bei allen Kleinproben die selbe Fläche von $600 mm^2$ angesetzt und dadurch auch die selbe Last von $196,8 N/mm^2$ für $\frac{\tau}{\tau_{des}} = 1$ aufgebracht.

In Abbildung 3.32 ist deutlich zu erkennen, dass eine Probe deutlich von den anderen abfällt, wodurch angenommen werden kann, dass die Klebefuge dieser Kleinprobe, bedingt durch die schlechte Herstellung, fehlerhaft war. Aus diesem Grund wird diese Kleinprobe von der Auswertung ausgenommen.

Wie auch schon bei den in [1] durchgeführten Experimenten zeigt sich auch hier kein

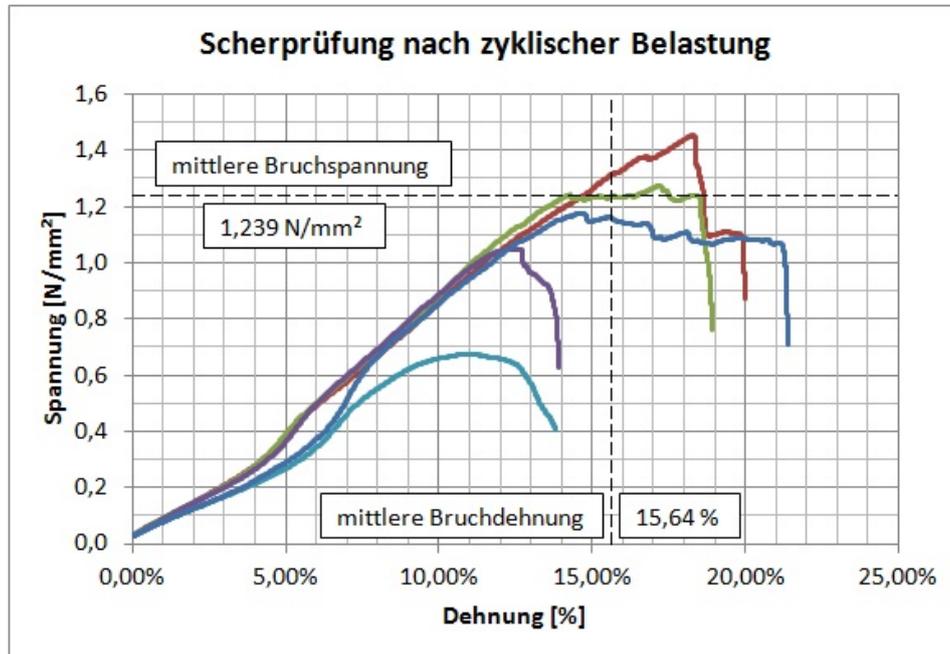


Abb. 3.32.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben nach zyklischer Belastung

Tab. 3.11.: Ergebnisse der Scherversuche von Kleinproben nach zyklischer Vorbelastung

Ergebnisse der aktuellen Versuchsreihe		bzw. nach [1]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$	5
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 1,239 \text{ N/mm}^2$	$1,108 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 1,226 \text{ N/mm}^2$	$1,120 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,170 \text{ N/mm}^2$	$0,047 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,791 \text{ N/mm}^2$	$0,998 \text{ N/mm}^2$
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 15,64 \%$	-
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 260,66 \%$	291 %
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,47 \text{ N/mm}^2$	$0,35 \text{ N/mm}^2$

Festigkeitsverlust nach zyklischer Beanspruchung. Das Verformungsverhalten wird jedoch etwas steifer, was auf die Ausrichtung der Klebstoffmoleküle nach der wiederkehrenden gleichgerichteten Belastung zurückgeführt werden kann.

3.3. Mittelgroße Versuchskörper

3.3.1. Aufbau der Versuchskörper

Die mittelgroßen Versuchskörper wurden bezüglich ihrer Geometrie an die Kleinproben angepasst. Die vorgesehene Dicke der Klebefuge beträgt ebenfalls 3 mm und die Breite 12 mm . Die Länge der Verklebung wurde allerdings auf 1000 mm erhöht. Auch hier ergaben sich jedoch herstellungsbezogene Unregelmäßigkeiten der Fugenbreite, weshalb auch bei den mittelgroßen Probekörpern nach jedem Bruchversuch die exakte Klebefugenbreite bestimmt wurde. Der gesamte Aufbau der Versuchskörper unterscheidet sich aber grundsätzlich vom Aufbau der Kleinproben. Eine Glasscheibe mit der Dicke von 8 mm , einer Breite von 500 mm und einer Höhe von 1000 mm wurde an beiden Seiten mit den von *Etl* in [2] entwickelten gezahnten Koppelleisten verklebt. Als Abstandhalter wurde, wie in Abbildung 3.33 ersichtlich, ein Teflonband verwendet. Das hat im Gegensatz zu herkömmlichen Abstandhaltern den Vorteil, dass es nach dem Verkleben wieder entfernt und somit jeglicher Einfluss, wie zum Beispiel größere Haftung durch ein Klebeband, ausgeschlossen werden kann.

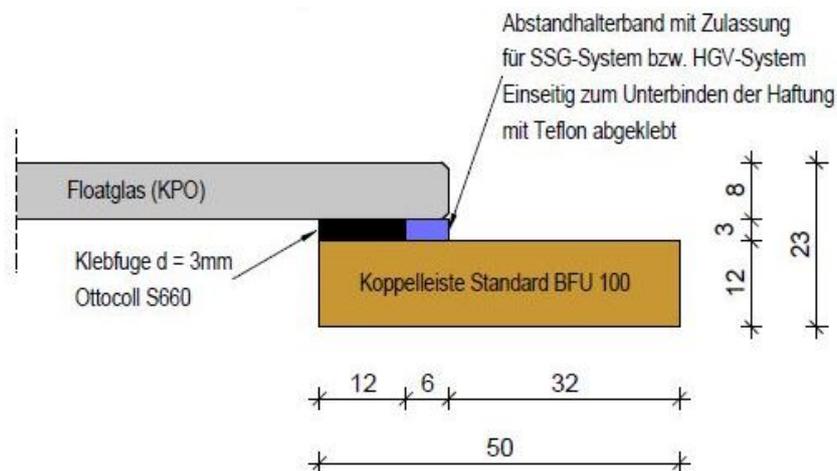


Abb. 3.33.: Detailschnitt durch die Klebefuge

Die Koppelleisten wurden für die Kriechversuche anschließend an vorgefertigte Boxen

geschraubt. Eine noch unbelastete Box ohne montierte Glasscheibe ist in Abbildung 3.34 dargestellt.



Abb. 3.34.: Mittelgroßer Probekörper für Langzeitversuche

Die Lasteinleitung erfolgt über zwei an der Glasoberkante aufliegende kleine Bolzen nahe der Klebefuge, welche lediglich mittels Klebeband an der Konstruktion befestigt wurden. In Abbildung 3.35 sind die gelben Klebebänder gut zu erkennen. Die Belastung wird durch einen mit Kies gefüllten Behälter, welcher an einem Holzbalken hängt, erzeugt. Dieser Holzbalken ist wiederum auf zwei Leisten gelagert, die die Last auf die Glasscheibe übertragen. Zur Messung der Verformung wurde eine Messuhr mittig am Versuchskörper appliziert. Dazu wurde in mittlerer Höhe beidseitig ein Nagel in die Koppelleiste eingeschlagen, auf welche dann horizontal eine Aluminiumleiste gelegt wurde. Die Messuhr wurde in ein Loch in der Aluminiumleiste eingesetzt und mit einer Schraube fixiert. An der Glasscheibe wurde im Vorhinein ein Stahlwinkel angeklebt, auf welchem die Messuhr aufsitzt und somit die Verformung zwischen Glasscheibe und Koppelleiste messen kann. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.35 zu sehen.

Auch hier wurde die erforderliche Aushärtungszeit von 28 Tagen zwischen Herstellung und Belastungsbeginn des verwendeten Silikons OTTOCOLL[®] S 660 berücksichtigt.



Abb. 3.35.: Versuchsaufbau der mittelgroßen Probekörper

3.3.2. Versuchsablauf

Mit den mittelgroßen Versuchskörpern wird dasselbe Ziel verfolgt wie mit den Kleinprobekörpern. Es wurden insgesamt 19 Scheiben hergestellt, drei davon dienten als Vorbeziehungsweise Referenzversuche, die anderen 16 wurden wie zuvor beschrieben mit dem Rahmen der Boxen verschraubt. Je Box werden zwei Scheiben montiert und der Behälter in der Mitte mit 245 kg beziehungsweise 196 kg befüllt. Das entspricht bei einer ungefähren Klebefläche von $4 \cdot 12 \cdot 1000 = 48000\text{ mm}^2$ einer Dauerschubspannung von $0,05\text{ N/mm}^2$ beziehungsweise $0,04\text{ N/mm}^2$ und somit den selben Lastniveaus wie bei den Kleinproben. Je Lastniveau werden acht Scheiben untersucht.

Zu Versuchsbeginn wurden auf alle 16 Scheiben die entsprechende Last aufgetragen. Danach wurde sofort die Anfangsverformung mit Hilfe von installierten Messuhren abgelesen. Die weitere Verformung wurde in der ersten Woche täglich gemessen, danach einmal wöchentlich. Jeweils vier Scheiben pro Lastniveau werden nach drei Monaten entlastet, von den Boxen abgenommen und einer Scherprüfung unterzogen. Die weiteren acht Scheiben werden für insgesamt zwölf Monate belastet, bevor auch sie auf Abscheren bis zum Bruch geprüft werden.

Die drei Referenzversuche wurden bereits vor Beginn der Kriechversuche von der Holzforschung Austria für Vorversuche benutzt. Dabei wurde die Installation der Prüfma-

schine getestet und die ersten Bruchfestigkeiten gemessen. Die Koppelleisten wurden dazu auf einen vorgefertigten Rahmen geschraubt und anschließend bis zum Bruch einer Klebefuge belastet. Die Prüfvorrichtung ist in Abbildung 3.36 dargestellt.

Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt $0,5\text{ mm/min}$, die Verschiebung wird mittels vier Wegaufnehmern gemessen. Jeweils zwei der Wegaufnehmer messen links beziehungsweise rechts die Verschiebung zwischen Glas und Koppelleiste. Die zwei weiteren dienen der Dokumentation der Verschiebung zwischen Koppelleiste und Rahmen.

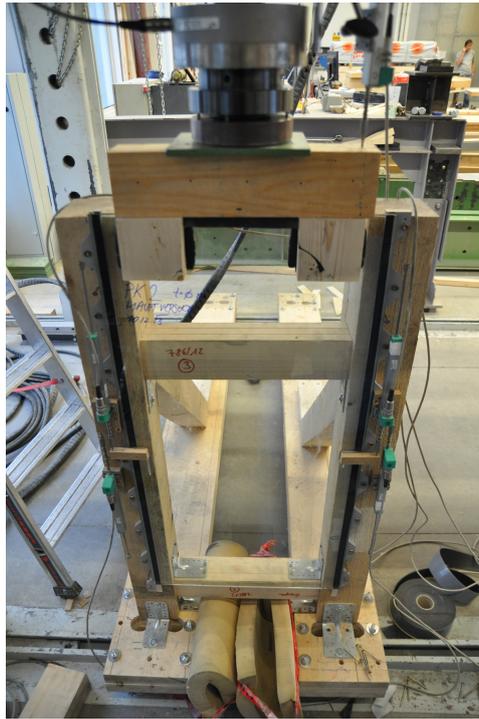


Abb. 3.36.: Scherversuch an einem mittelgroßen Versuchskörper

Die Auswertung der Kriech- und Scherversuche erfolgt nach denselben Berechnungsmethoden wie bei den Kleinprobekörpern, siehe hierzu Abschnitt 3.2.2.

3.3.3. Auswertung und Vergleich mit Kleinproben

3.3.3.1. Kriechversuche

Dem Ablauf der Versuche mit den Kleinproben folgend wurde auch bei den mittelgroßen Versuchsständen unmittelbar nach Lastaufbringung die sofortige Verformung gemessen. Die Versuchsstände befinden sich im selben Raum wie die Kleinproben, sind also ebenso dem Naturklima ausgesetzt. Bis zum Zeitpunkt des Verfassens der Arbeit liegen die Messergebnisse der ersten fünf Wochen vor. Die Gesamtverformung der Klebefugen ist

in Abbildung 3.37 dargestellt. Bei einer Scheibe fehlt auf Grund eines Messfehlers der Wert der sofortigen Verformung, daher beginnt diese Verformungskurve im Ursprung des Diagramms.

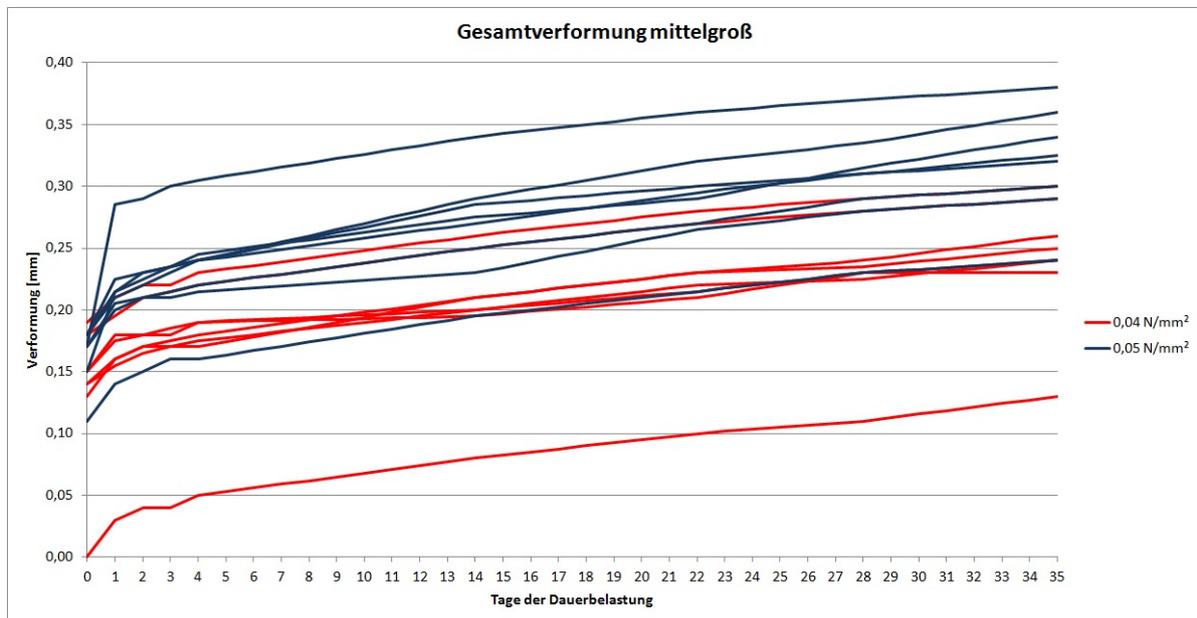


Abb. 3.37.: Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

Zur besseren Vergleichbarkeit der Kriechverformung kann die sofortige Deformation gleich Null gesetzt werden, das entspricht einem Start der Deformationsmessung unmittelbar nach Lastaufbringung. In Abbildung 3.38 ist deutlich zu erkennen, dass die Scheiben mit dem geringeren Lastniveau geringere Kriechverformungen erleiden, als jene mit der höheren Belastung.

Interessant ist nun der Vergleich der Messergebnisse der Kleinprobekörper mit jenen der mittelgroßen Versuchsstände. In Abbildung 3.39 werden die gemittelten Deformationskurven bezüglich Kriechverformung übereinandergelegt. Der Unterschied in der Genauigkeit der Messkurven resultiert daraus, dass bei den Kleinproben für die ersten 90 Tage tägliche Messungen durchgeführt wurden. Bei den mittelgroßen Scheiben wurde lediglich in der ersten Woche jeden Tag die Verformung abgelesen, danach erfolgte die Messung einmal wöchentlich.

Die Differenz der Verformungen ist zu ausgewählten Zeitpunkten eingetragen. Dabei zeigt sich grundsätzlich ein ähnliches Kriechverhalten unabhängig von der Länge der Klebefuge, wobei die Verformung unter einem Lastniveau von $0,04 \text{ N/mm}^2$ bei den größeren Probekörpern durchschnittlich geringer ausfällt, als bei den Kleinprobekörpern.

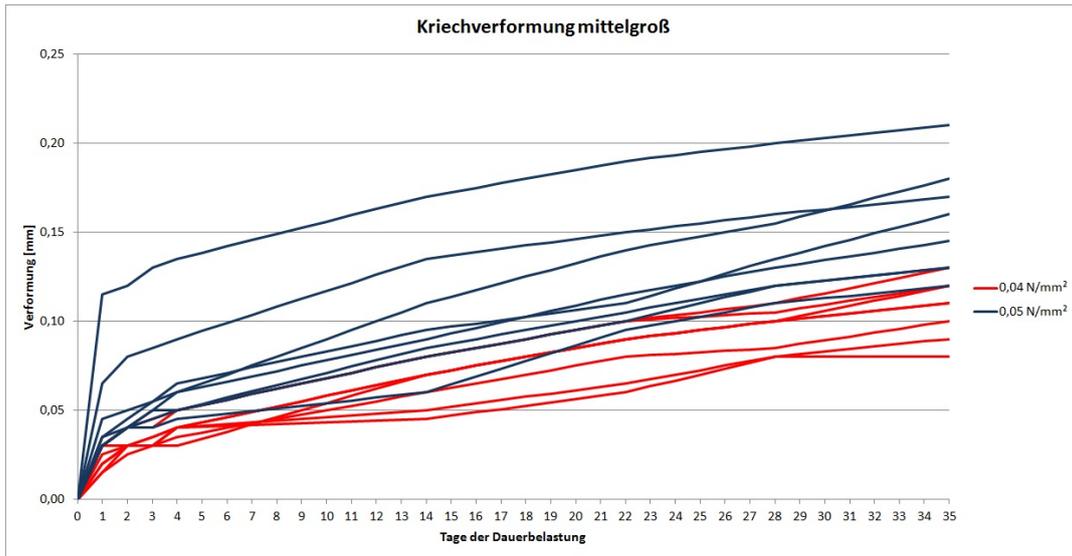


Abb. 3.38.: Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

Zu berücksichtigen ist jedoch der Unterschied im Klima zum jeweiligen Startzeitpunkt der Versuche. Während die Kleinproben im Sommer zu Beginn der Messungen teils heißen Temperaturen und großen Differenzen der relativen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt waren, herrschte bei den mittelgroßen Versuchskörpern seit Beginn im Dezember beinahe konstante Temperatur von 16°C. Die Luftfeuchte schwankt jedoch auch zu dieser Jahreszeit.

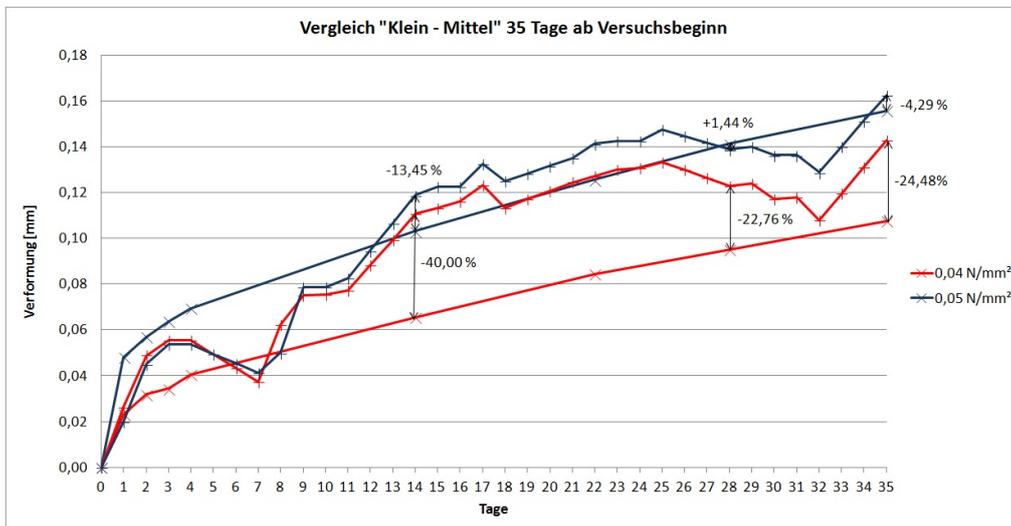


Abb. 3.39.: Vergleich der mittleren Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

3.3.3.2. Scherversuche

In den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Zeitraum fallen nur die Scherversuche an unbelasteten Versuchskörpern. Diese wurden von der Holzforschung Austria zu Beginn der Kriechversuche durchgeführt und ausgewertet. Der Versuchsaufbau ist in Abschnitt 3.3.2 erläutert. Die Messergebnisse der drei durchgeführten Versuche sind in Abbildung 3.40 und Tabelle 3.12 dargestellt.

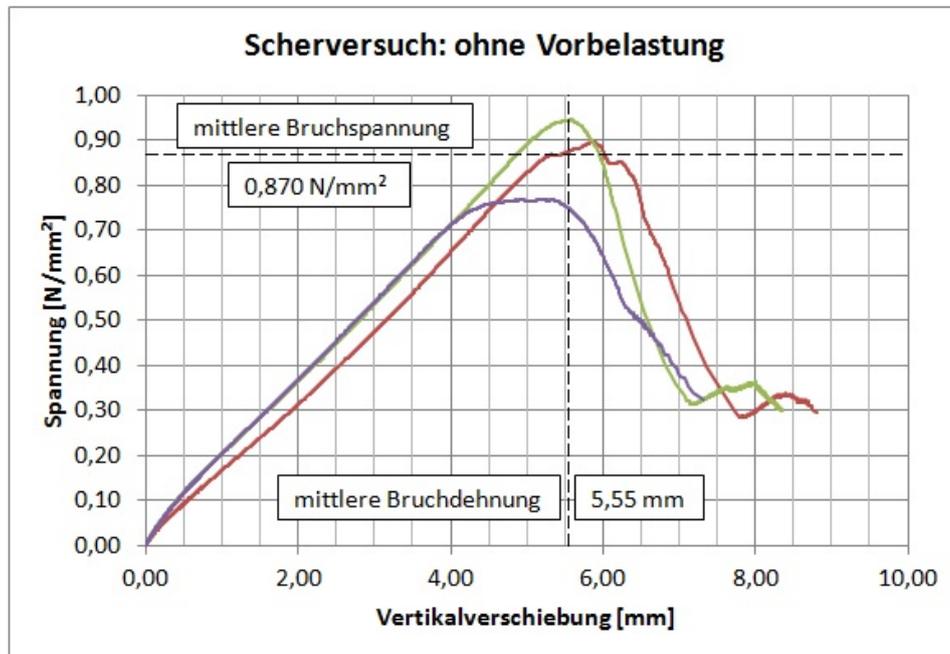


Abb. 3.40.: Spannungs-Verschiebungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefugen an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung

Tab. 3.12.: Ergebnisse der Scherversuche mit mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung

Anzahl der Prüfkörper	$n = 3$
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 0,870 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 0,896 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,092 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,562 \text{ N/mm}^2$
Mittlere Vertikalverschiebung bei Bruch	$\Delta L = 5,55 \text{ mm}$
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 185,10 \%$
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,48 \text{ N/mm}^2$

Auch hier werden die Ergebnisse erst interpretierbar, wenn man die durchgeführten

Versuche mit jenen der Kleinproben vergleicht. In Abbildung 3.41 sind dieselben drei Spannungs-Verschiebungskurven wie in Abbildung 3.40 abgebildet, zusätzlich ist jedoch jene Verformungslinie einer Kleinprobe ohne vorangegangene Belastung zu sehen, die möglichst nahe am Mittelwert dieser Versuchsserie liegt.

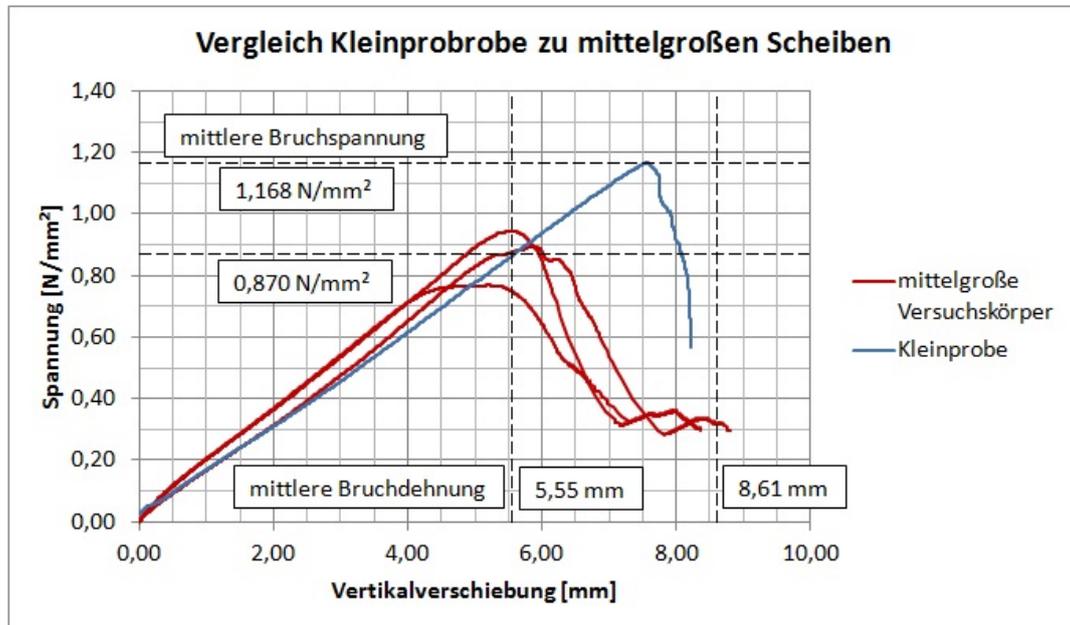


Abb. 3.41.: Spannungs-Verschiebungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefugen an einer Kleinprobe und mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung

Es fällt sofort auf, dass bei den Kleinproben weit höhere Scherfestigkeiten erzielt wurden als bei den mittelgroßen. Der Verformungsmodul ist bei beiden Serien ähnlich, die Bruchspannung und -dehnung fallen bei den Kleinprobekörpern jedoch weitaus höher aus (mittlere Bruchspannung der Kleinprobekörper ohne Vorbelastung $m_x = 1,168 \text{ N/mm}^2$ - siehe Tabelle 3.4).

Es stellt sich die Frage, welche Gründe diese deutlichen Unterschiede verursachen. Ein möglicher Grund liegt in der Asymmetrie des geometrischen Aufbaus der mittelgroßen Scheiben. Da die Koppelleiste gezahnt ist, ist zwar die Anzahl der Schrauben je Seite rechts und links der Glasscheibe dieselbe, die Lage der Schrauben variiert jedoch. Schematisch ist das in Abbildung 3.42 dargestellt. Hier wäre zum Beispiel die erste Schraube auf der rechten Seite höher als auf der linken.

Daraus könnte eine unterschiedliche Aktivierung der Verbindung zwischen Koppelleiste und Rahmen resultieren. Bei allen drei Referenzversuchen ist zuerst die in Abbil-

dung 3.42 links dargestellte Seite gebrochen, auf der die erste Schraube in Kraftflussrichtung tiefer liegt und somit womöglich „später“ beansprucht wird als jene auf der gegenüberliegenden Seite. Das lässt die Annahme zu, dass eine geringfügige Rotation der Scheibe entstanden ist, wodurch die Verklebung auf einer Seite früher als jene auf der anderen Seite versagt hat.



Abb. 3.42.: Schematische Darstellung der mittelgroßen Versuchskörper

Um diesen Effekt zu überprüfen, werden derzeit neue Scheiben mit nicht gezahnten Koppelleisten hergestellt, die anschließend einer Scherprüfung unterzogen werden. Alle anderen Parameter werden so belassen, wie sie für die aktuelle Versuchsreihe gewählt wurden [4]. Wenn bei den neuen Versuchskörpern ähnliche Ergebnisse auftreten wie bei den Scheiben, die derzeit in Verwendung sind, müssen weitere Theorien zur Erklärung dieses Resultats verfolgt werden.

Eine andere Erklärung wäre, dass bedingt durch die Lasteinleitung entlang der gesamten Glasoberkante, nicht von Beginn an die gesamte Last auf die Verklebung wirkt. Somit würde der oberste Teil der Verklebung nicht zu 100% ausgenutzt werden, was eine Erklärung dafür wäre, dass sich die aufnehmbare Schubkraft nicht linear zur Länge der Klebefuge steigern lässt.

Gegen diese Theorie spricht allerdings, dass Glas um ein vielfaches steifer ist als das Silikon und dieser Effekt daher als vernachlässigbar klein angenommen werden kann. Würde man dieser Theorie allerdings nachgehen wollen, müsste, wie bei den Kleinproben, eine konzentrierte Lasteinleitung direkt ins Glas, möglichst nahe an der Klebefuge, ermöglicht werden. Hier ist allerdings darauf zu achten, Sprödbruch im Glas zu vermeiden.

Trotzdem ist die Ausprägung von Spannungsspitzen am Ende der Klebefuge wahrscheinlich, was die nicht lineare Steigerung der Last bezogen auf die Länge der Klebefuge erklären würde, da die Tragfähigkeit der Klebefuge dort als erstes überschritten wird und somit ein Versagen der gesamten Verklebung initiieren würde.

4. Vergleich der Experimente mit bekannten Bemessungskonzepten

Zur Bemessung von Holz-Glas-Verbundelementen soll das in allen modernen Normen übliche semiprobabilistische Sicherheitskonzept zur Anwendung kommen. Für den Tragfähigkeitsnachweis der Silikonfuge werden dabei nach Gleichung 4.1 auf Einwirkungsseite der Teilsicherheitsfaktor γ_f und auf Widerstandsseite der Modifikationsbeiwert k_{mod} sowie der Teilsicherheitsfaktor γ_M verwendet.

$$\{S_k \cdot \gamma_f\} \mathbf{S}_d \leq \mathbf{R}_d \left\{ = \frac{R_k \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \right\} \quad (4.1)$$

Der Teilsicherheitsfaktor für Einwirkungen γ_f kann dabei aus der ÖNORM EN 1990 [9] entnommen werden, die Beiwerte k_{mod} und γ_M werden in der ETAG 002-1 [3] angegeben. Diese werden im folgenden Kapitel näher betrachtet und auf ihre Plausibilität überprüft.

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wird analog zum Nachweis der Tragfähigkeit geführt, siehe Gleichung 4.2, jedoch werden die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen und des Materialwiderstands mit 1,0 angenommen.

$$\{E_k \cdot (1 + k_{def})\} \mathbf{E}_d \leq \mathbf{C}_d \{ = C_k \} \quad (4.2)$$

Für k_{def} existieren wie für k_{mod} und γ_M bereits erste Annahmen, die hier verifiziert werden sollen. Grundsätzlich ist aber anzunehmen, dass für jeden einzelnen Klebstoff gesonderte Beiwerte zu verwenden sind.

Bisher wurden in unterschiedlichen Publikationen diverse Verfahren aufgezeigt, mit denen Sicherheitsbeiwerte für das Langzeitverhalten von Holz-Glas-Verbundelementen hergeleitet werden können. Auf diese Varianten soll in diesem Kapitel näher eingegangen und ein Vergleich zu den durchgeführten Versuchen gezogen werden.

Die Grundlage stellt die ETAG 002-1 [3] dar. In dieser Leitlinie ist die Verwendung von geklebten Glaskonstruktionen in Fassaden und Dächern in einem Winkel zwischen

der Vertikalen und 7° Neigung zur Horizontalen geregelt. Es werden die grundsätzlichen Anforderungen von gestützten und ungestützten Systemen aufgezeigt, bei denen eine Verklebung zwischen unbeschichtetem oder anorganisch beschichtetem Glas und anodisiertem Aluminium oder nichtrostendem Stahl hergestellt wird. Geklebte Glaskonstruktionen können derzeit auf vier verschiedene Arten konstruiert werden (siehe Abbildung 4.1), in Österreich sind jedoch lediglich Typ I und Typ III zur Ausführung zugelassen.

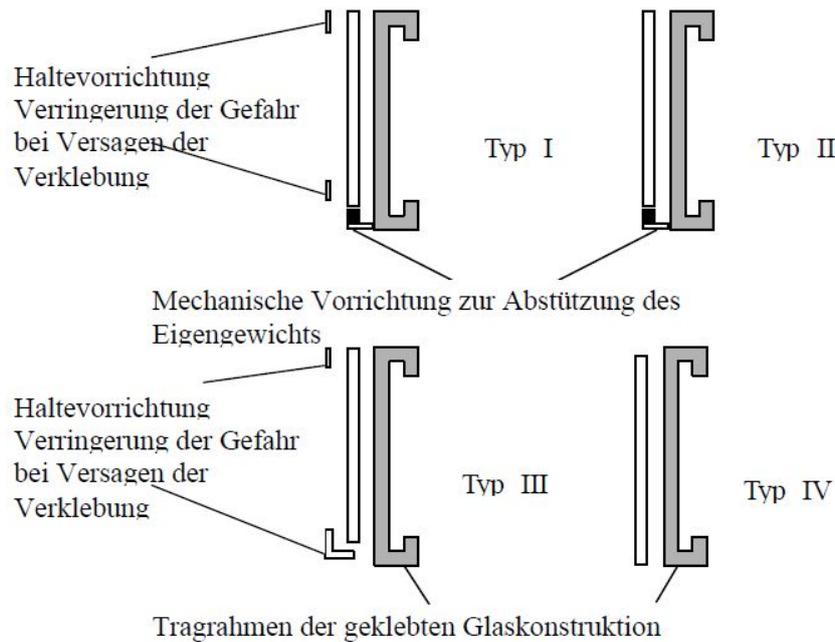


Abb. 4.1.: Schematische Darstellung von Beispielen der verschiedenen Arten von geklebten Glaskonstruktionen [3]

Die Typen I und III sehen mechanische Haltevorrichtungen vor, die im Falle des Versagens der Verklebung alle einwirkenden Lasten auf den Tragrahmen übertragen können. Um auf solche Vorrichtungen zu verzichten, ist eine genaue Studie des Langzeitverhaltens von Verklebungen unabdingbar. Derzeit reicht der Wissensstand jedoch noch nicht aus, um auch nach langfristiger Belastung ausreichende Sicherheiten gewährleisten zu können. Ein erster Schritt in diese Richtung wird jedoch mit der erhöhten Aufmerksamkeit auf Typ III gesetzt, da hier die Verklebung alle einwirkenden Lasten einschließlich des Eigengewichts aufnimmt und auf die Rahmenkonstruktion überträgt. Hier dient im Gegensatz zu Typ I die mechanische Haltevorrichtung ausschließlich als Absturzsicherung und kommt somit nur im Notfall bei Versagen der Verklebung zum Tragen, wird aber in der statischen Bemessung der Lastabtragung nicht berücksichtigt. Könnte man nun ein

Versagen der Verklebung auch unter langfristiger Beanspruchung definitiv ausschließen, wäre ein Verzicht auf diese Art der Sicherung möglich. Laut OIB-Richtlinie 4 [12] gilt jedoch:

„Vor- und abgehängte Bauteile und Fassadensysteme sind gegen Herabfallen zu sichern. Dies gilt jedenfalls als erfüllt, wenn diese Bauteile und Fassadensysteme entsprechend einer europäisch technischen Zulassung oder einer harmonisierten europäischen Norm ausgeführt sind.“ [12]

Da die ETAG 002-1 [3] jedoch keine Gültigkeit für Verbundsysteme aus Holz und Glas besitzt, sondern für Glaskonstruktionen mit Aluminium- oder Stahlstrukturen entwickelt wurde, müssen Die Holz-Glas-Verbundelemente mit Absturzsicherung entsprechend Typ I und III ausgeführt werden.

Das laufende Forschungsprojekt bezieht sich im Gegensatz zur ETAG 002-1 auf tragende Verklebungen zwischen Glas und Holz beziehungsweise Holzwerkstoffen, jedoch fehlt für diese Art des Verbundsystems jegliche normative Grundlage. Daher bedarf es besonderer Untersuchungen, um spezifische Kennwerte zu ermitteln und somit eine Bemessung solcher Holz-Glas-Verbundelemente zu ermöglichen. In [3] wird zur Berücksichtigung der möglichen Streuungen der Klebefugenwiderstände pauschal ein Materialsicherheitsfaktor von 6 und zur Berücksichtigung der zeitlichen Abnahme der Festigkeit ein zusätzlicher Abminderungsfaktor der Festigkeitswerte der Kurzzeitversuche der Verklebung von 10 eingeführt. Das entspricht bei Langzeitbeanspruchung einem Ausnutzungsgrad von $\frac{1}{60}$ der Kurzzeitfestigkeit. Dieser Wert kann auf Grund neuer Untersuchungen und größerer Erfahrung mit dem Einsatz von Silikon im Verbundbau als zu hoch angesehen werden.

Daher führt die Holzforschung Austria in [1] nach ersten experimentellen Untersuchungen zum Verhalten von Verklebungen unter dauerhafter Beanspruchung eine pauschale Reduktion der Kurzzeitfestigkeitswerte von $\frac{1}{15}$ ein. Der Materialsicherheitsfaktor wird hier auf 3 verringert und auch der Abminderungsfaktor zufolge Langzeitbeanspruchung wird mit 5 nur halb so groß angesetzt wie in ETAG 002-1.

Im Rahmen des Forschungsprojekts [7] der Technischen Universität Wien wurde ein Gesamtabminderungsfaktor von $\frac{1}{30}$ gewählt, wobei der Materialsicherheitsfaktor im Gegensatz zu [1] wieder auf 6 erhöht wurde. Bei dem in [7] untersuchten System, handelt es sich um eine gleichzeitig schubverklebte und geklotzte L-Leiste, bei der zwei Lastabtragungsmechanismen parallel wirken, die Verteilung der Lasten auf diese jedoch nicht eindeutig vorherbestimmt werden kann. Daher wurde ein Faktor gewählt, der zwischen dem als konservativ angesehenen Wert der ETAG 002-1 und dem durchaus gewagten Weg der Holzforschung Austria liegt. Im folgenden sollen nun Ansätze zur Herleitung

realitätsnaher Abminderungsfaktoren diskutiert werden. [7]

4.1. Modifikationsbeiwert für Langzeitbeanspruchung

Zuerst soll der von *Neubauer* in [1] eingeschlagene Weg überprüft und mit den Versuchen des laufenden Forschungsprojekts verglichen werden [4]. Theoretisch müsste sich der Modifikationsbeiwert für Langzeitbeanspruchungen $k_{mod,lang}$ aus dem Verhältnis der 5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubspannung nach Langzeitbelastung und der 5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubspannung nach Kurzzeitbelastung ergeben. Diese Annahme ist in Gleichung 4.3 dargestellt.

$$k_{mod,lang} = \frac{\tau_{\infty}}{\tau_k} \quad (4.3)$$

$k_{mod,lang}$	Modifikationsbeiwert für Langzeitbeanspruchungen
τ_{∞}	5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubspannung nach Langzeitbeanspruchung
τ_k	5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubspannung nach Kurzzeitbeanspruchung

Um τ_{∞} in guter Näherung bestimmen zu können, sind Versuche über eine große Versuchsdauer von Nöten. Derzeit existieren Untersuchungen bis zu dem von der ETAG 002-1 vorgegebenen Zeitraum von 91 Tagen. Die aktuellen Experimente haben unter anderem zum Ziel τ_{∞} besser bestimmen zu können und laufen aus diesem Grund über die Dauer von einem Jahr [4]. Zum Zeitpunkt der Auswertung für diese Arbeit liegen jedoch wie in [1] lediglich Ergebnisse nach 91 Tagen vor, was diese beiden Arbeiten vergleichbar macht. Die Ergebnisse der Untersuchungen über die Dauer von zwölf Monaten werden in [4] veröffentlicht. *Neubauer* führte seine Versuche jedoch in einem vordefinierten Klima durch. Bei der aktuellen Versuchsreihe sind die Kleinprobekörper dem Naturklima ausgesetzt, was vorab vermuten lässt, dass sich höhere Modifikations- und Teilsicherheitsbeiwerte ergeben müssten.

Neubauer ermittelte die Dauerschubspannung τ_{∞} , die nach 91-tägiger Beanspruchung zu keinem Anwachsen der Verformungen führt und legte diesen Wert mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ fest. Wenn man aber Abbildung 3.12 und Abbildung 3.31 betrachtet, sind keine Unterschiede im Verhalten der Kriechproben mit einer Dauerschubbelastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ und jenen unter einer Spannung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ zu erkennen.

Es gibt somit keinen offensichtlichen Grund zwischen diesen beiden Lastniveaus eine Grenze zu ziehen, weshalb hier die maximale Dauerschubspannung τ_{∞} , bei der nach

91 Belastungstagen keine Kriechverformungen mehr auftreten, vorerst mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ festgelegt wird.

Neubauer bediente sich zur Bestimmung des Modifikationsbeiwerts für Langzeitbeanspruchungen eines Verformungskriteriums und geht zu dessen Bestimmung nach Gleichung 4.4 vor. [7]

$$k_{mod,lang} = \frac{\tau_{\infty} \cdot \gamma_M}{\tau_k} \quad (4.4)$$

$k_{mod,lang}$	Modifikationsbeiwert für Langzeitbeanspruchungen
τ_{∞}	Dauerschubspannung, bei der die Verformungen nach 91 Tagen konstant bleiben
τ_k	5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubspannung nach Kurzzeitbeanspruchung
γ_M	Teilsicherheitsfaktor für Materialwiderstand

Wie hier zu erkennen, führt *Neubauer* bereits vor der Bestimmung von $k_{mod,lang}$ einen Teilsicherheitsfaktor für den Materialwiderstand ein. Diesen ermittelte er zuvor empirisch anhand von zyklischen Beanspruchungen, die die Materialermüdung simulieren sollten. Im Rahmen dieses Projekts wurden die zyklischen Belastungsversuche so wie in [1] mit dem Lastniveau $\tau_{des} = \frac{R_{u,5}}{3}$ durchgeführt. Es trat, wie in Abschnitt 3.2.3.3 gezeigt, keine Verminderung der Festigkeit und eine Versteifung des Klebstoffes auf. Damit wurden alle geforderten Kriterien erfüllt und der Materialsicherheitsbeiwert von $\gamma_M = 3$ aus [1] kann bestätigt werden.

Der Wert für τ_k wird aus Tabelle 3.4 abgelesen. [7]

Somit lässt sich der Modifikationsbeiwert $k_{mod,lang}$ nach Gleichung 4.4 berechnen:

$$k_{mod,lang} = \frac{0,05 \cdot 3}{1,015} = 0,148$$

In Summe würde sich für

$$R_{d,lang} = \frac{R_k \cdot k_{mod,lang}}{\gamma_M} \quad (4.5)$$

ein Gesamtsicherheitsfaktor für Langzeitbeanspruchung von

$$\frac{k_{mod,lang}}{\gamma_M} = \frac{0,148}{3} = 0,049 \approx \frac{1}{20}$$

ergeben. [7]

Der hier berechnete Sicherheitsfaktor ist nur geringfügig höher, als der von *Neubauer* in [1] errechnete. Dies resultiert jedoch zu einem Großteil aus dem Unterschied der 5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubspannung nach Kurzzeitbeanspruchung τ_k , der von *Neubauer* mit $0,600 \text{ N/mm}^2$ deutlich niedriger angenommen wurde, als der tatsächliche Wert dieser Versuchsreihe. Die Annahme von $\tau_k = 0,600 \text{ N/mm}^2$ ist jedoch laut *Neubauer* [13] lediglich fiktiv und in keiner Weise durch Versuche bestätigt. Allerdings liegt dieser Festigkeitsparameter nahe den tatsächlichen Versuchsergebnissen aus [1], sodass trotzdem Vergleiche gezogen werden können.

Im Forschungsprojekt der Technischen Universität Wien [7] wurde, wie zuvor erwähnt, ein Gesamtsicherheitsfaktor von 30 gewählt. Die Aufteilung auf $k_{mod} = 0,2$ und $\gamma_M = 6$ wurde aus Überlegungen zum Verhalten und zur Gleichmäßigkeit von Klebstoffen festgelegt. Da die Qualitätssicherung nicht mit jener bekannter üblicher Baustoffe vergleichbar ist, weil Unstetigkeiten in der Klebefuge jederzeit auftreten können, wurde der Material-sicherheitsbeiwert für Klebstoffe wie in [3] mit 6 angesetzt.

Im Merkblatt für Klebstoffsysteme, veröffentlicht in [7], wurde versucht, den Modifikationsbeiwert für Langzeitbeanspruchung $k_{mod,lang}$ im Zuge eines allgemeingültigen Bemessungskonzepts zu ermitteln. Es wird der Abklingbeiwert α nach Gleichung 4.6 eingeführt, der sich aus dem Verhältnis der 5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubspannung nach einer Dauerschubbelastung über die geplante Lebensdauer $\tau_{k,\infty,def}$ und der Dauerschubbeanspruchung τ_{def} , bei der kein Anwachsen der Verformungen feststellbar ist, zusammensetzt. [7]

$$\alpha = \frac{\tau_{k,\infty,def}}{\tau_{def}} \quad (4.6)$$

Da $\tau_{k,\infty,def}$ nicht bekannt ist, wird die 5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubspannung nach 91-tägiger Belastung mit der Schubspannung τ_{def} und einem Tag im unbelasteten Zustand $\tau_{k,91+1}$ zur Ermittlung des Abklingbeiwerts α herangezogen. Der Abklingbeiwert α darf mit $\alpha = 6$ festgelegt werden, wenn Gleichung 4.7 erfüllt ist.

$$\frac{\tau_{k,91+1}}{\tau_k} \geq 0,8 \Rightarrow \alpha = 6,0 \quad (4.7)$$

Gilt allerdings Gleichung 4.8

$$\frac{\tau_{k,91+1}}{\tau_k} < 0,8 \quad (4.8)$$

scheidet der Klebstoff für die Verwendung als tragende Schubverklebung aus. Um diesen Klebstoff trotzdem zu verwenden, besteht die Möglichkeit $\tau_{k,91+1}$ durch Verringerung von τ_{def} zu erhöhen.

Der Grenzwert von 0,8 wurde in [1] durch Versuche empirisch festgelegt und dient als Sicherheitsschranke zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit und kann gleichzeitig als Anforderung an Klebstoffhersteller verstanden werden, Klebstoffe von ausreichender Qualität herzustellen.

Der Abklingbeiwert $\alpha = 6$ resultiert aus vorangegangener Überlegung, $\gamma_M = 6$ festzulegen. [14]

Wenn alle vorangestellten Bedingungen erfüllt sind, berechnet sich der Modifikationsbeiwert für langfristige Beanspruchung nach Gleichung 4.9. Die Grenze für $k_{mod,lang}$ mit 0,2 wird nach [1] definiert. [7]

$$k_{mod,lang} = \frac{\tau_{def} \cdot \alpha}{\tau_k} \leq 0,2 \quad (4.9)$$

Für die aktuellen experimentellen Untersuchungen wurde zuvor $\tau_{def} = 0,05 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Die 5%-Fraktile der aufnehmbaren Schubbeanspruchung nach 91-tägiger Belastung $\tau_{k,91+1}$ ergibt sich dadurch aus Tabelle 3.10 mit $0,543 \text{ N/mm}^2$. τ_k ist wie zuvor $1,015 \text{ N/mm}^2$ nach Tabelle 3.4. Setzt man diese Werte nun in Gleichung 4.7 ein, erhält man:

$$\frac{\tau_{k,91+1}}{\tau_k} = \frac{0,543}{1,015} = 0,535 < 0,8$$

Somit zeigt sich, dass eine Dauerbeanspruchung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ zu hoch angesetzt ist.

Die Dauerschubspannung, bei der nach 91 Tagen kein tertiäres Kriechen mehr auftritt, wird somit auf $\tau_{def} = 0,04 \text{ N/mm}^2$ verringert. Daraus ergibt sich $\tau_{k,91+1} = 0,835 \text{ N/mm}^2$ aus Tabelle 3.9 und $\tau_k = 1,015 \text{ N/mm}^2$ identisch zur vorherigen Berechnung. Gleichung 4.7 kann somit wie folgt formuliert werden:

$$\frac{\tau_{k,91+1}}{\tau_k} = \frac{0,835}{1,015} = 0,823 > 0,8 \Rightarrow \alpha = 6,0$$

Anschließend kann man $k_{mod,lang}$ gemäß Gleichung 4.9 berechnen:

$$k_{mod,lang} = \frac{0,04 \cdot 6}{1,015} = 0,236 > 0,2 \Rightarrow k_{mod,lang} = 0,2$$

Mit einer Dauerschubbelastung von $\tau_{def} = 0,04 N/mm^2$ wurden alle Bedingungen erfüllt und der Modifikationsbeiwert mit $k_{mod,lang} = 0,2$ ermittelt.

4.2. Deformationsbeiwert für Langzeitbeanspruchung

Zusätzlich zur Berechnung des Modifikationsbeiwerts ist auch die Bestimmung des Deformationsbeiwerts für langfristige Schubbeanspruchung notwendig. Ein Verfahren dazu wird in [7] im Merkblatt für Klebstoffe erläutert. An den durch das Lastniveau τ_{def} beanspruchten Versuchskörpern sind die Verformungen unmittelbar nach Lastaufbringung w_0 , sowie die Verformungen nach 91-tägiger Dauerbelastung w_{91} zu ermitteln. Anschließend kann der Deformationsbeiwert für langfristige Schubbeanspruchung $k_{\tau,def}$ nach Gleichung 4.10 rechnerisch ermittelt werden. [7]

$$k_{\tau,def} = \frac{w_{91}}{w_0} - 1 \quad (4.10)$$

Die Werte für w_0 und w_{91} sind in Abbildung 3.10 dargestellt, werden jedoch genauer aus Abschnitt B.2 abgelesen. Für ein Dauerlastniveau $\tau_{def} = 0,04 N/mm^2$ ist $w_0 = 0,189 mm$ und $w_{91} = 0,439 mm$. Somit errechnet sich der Deformationsbeiwert für langfristige Schubbeanspruchung $k_{\tau,def}$ nach Gleichung 4.10 zu:

$$k_{\tau,def} = \frac{0,439}{0,189} - 1 = 1,32$$

Auch für diese Berechnung hat Gleichung 4.8 Gültigkeit.

Neubauer hat in [1] $k_{\tau,def}$ für langfristige Lasten unter normalen Temperaturbedingungen mit 1,00 angegeben. Vergleicht man diesen Wert nun mit den Ergebnissen dieser Versuchsreihe, bei der die Untersuchungen in Naturklima durchgeführt wurden, stellt sich der Wert als zu niedrig heraus. Um ausreichend Sicherheiten zu haben, ist der Deformationsbeiwert für langfristige Lasten unter 55°C mit $k_{\tau,def} = 1,60$ heranzuziehen, der auch in [7] für die Berechnungen verwendet wurde.

Neubauer führt den Deformationsbeiwert von $k_{\tau,def} = 1,00$ auf einen Vergleich des Verformungsmoduls an Kleinprobekörpern ohne vorangegangene Dauerbelastung G_0 und

dem Verformungsmodul nach einer Dauerbeanspruchung τ_{def} für 91 Tage G_{91} zurück. Er berechnet den Deformationsbeiwert für langfristige Belastungen unter normalen Temperaturbedingungen nach Gleichung 4.11:

$$k_{\tau,def} = \frac{G_0}{G_{91}} \quad (4.11)$$

Die Werte für G_0 und G_{91} sind aus Tabelle 3.4 und Tabelle 3.9 abzulesen. Gleichung 4.11 ergibt sich dann zu:

$$k_{\tau,def} = \frac{0,41}{0,35} = 1,17$$

Dieser Betrag übersteigt noch immer klar den von *Neubauer* in [1] angesetzten Wert von $k_{\tau,def} = 1,00$, liegt aber auch unter dem in Gleichung 4.10 berechneten Wert. Somit ergeben sich für dieselbe Versuchsreihe nach den unterschiedlichen Berechnungsverfahren zwei differenzierte Deformationsbeiwerte $k_{\tau,def,1} = 1,32$ und $k_{\tau,def,2} = 1,17$. Prinzipiell ist auf Grund mehrerer Unsicherheiten der größere Wert zu wählen, um bei der Bemessung von Holz-Glas-Verbundelementen auf der sicheren Seite zu liegen und etwaige Unstetigkeiten in der Klebstoffuge zu berücksichtigen. Der in [7] verwendete Deformationsbeiwert $k_{\tau,def} = 1,6$ stellt vermutlich eine gute Näherung des anzusetzenden Beiwerts dar und kann für weitere Bemessungsverfahren verwendet werden. Genauere Aussagen dazu können nach Abschluss der Untersuchungen in [4] getroffen werden.

5. Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Derzeit werden einige Überlegungen bezüglich Verbesserungen des von *Hochhauser* in [7] vorgestellten Systems angestellt. *Hochhauser* gibt ein Berechnungs- und Bemessungsbeispiel für einen Großprobekörper mit einer Höhe von $2,5\text{ m}$ und einer Breite von $1,25\text{ m}$ an. Die angenommenen Horizontallasten entsprechen jedoch nicht jenen Einwirkungen, die in der Realität zu erwarten sind, da es mit dem System nach damaligen Entwicklungsstand noch nicht möglich war, Lasten in diesem Ausmaß abzutragen. Gründe dafür sind die Weichheit des Rahmengelenks sowie die Biegung der Pfosten-Riegel-Konstruktion. Es spielen jedoch auch viele weitere Parameter eine Rolle, die im gegenseitigen Zusammenspiel ideal aufeinander abgestimmt werden müssen, um ein besseres Resultat zu erreichen.

Um die lastabtragende Wirkung von Holz-Glas-Verbundelementen zu erhöhen und sie somit auch wirtschaftlich als aussteifende Elemente nutzbar zu machen, ist eine genaue Untersuchung jedes einzelnen Parameters sowie deren gegenseitige Wirkung aufeinander nötig.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Langzeitverhalten von Holz-Glas-Verbundelementen unter Schubbeanspruchung behandelt und diskutiert. Aus diesem Grund wird nun dieser Parameter gesondert behandelt und mögliche Verbesserungsvorschläge und Entwicklungsmöglichkeiten vorgestellt.

Um die Aufnahme einer höheren Schubkraft in der Klebstofffuge zu ermöglichen, ist es naheliegend, die Klebefläche zu erhöhen und somit bei derselben Kraft geringere Spannungen zu erhalten. Da der nicht verglaste Raum einer Fassade zwischen den einzelnen Scheiben möglichst gering gehalten werden soll, ist es nicht möglich, lediglich die Breite der Klebefuge zu erhöhen, da dies zu viel Platz in Anspruch nehmen würde.

Daher wurden Gedanken angestellt, anstelle einer flachen Koppelleiste eine Leiste in L-Form zu verwenden und eine umlaufende Verklebung zu realisieren. Eine derartige

Leiste wurde bereits von *Hochhauser* in [7] entwickelt, jedoch wurde hier lediglich eine einfache Schubverklebung ausgeführt. Die besondere L-Form diente dazu, um mittels eines Klotzes die Druckkräfte aus der Glasscheibe in die Koppelleiste zu übertragen. Die neue Idee wäre nun, den vorhandenen Raum zwischen Koppelleiste und Glasscheibe zu nutzen und diesen zwischen den Klötzen mit Silikon auszufüllen. Dabei wäre die Glasscheibe zusätzlich zur Flach- auch auf der Stirnseite verklebt. Die vorangegangenen Systeme, entwickelt von der Holzforschung Austria und von der Technischen Universität Wien, sind zum Vergleich in Abbildung 2.3 dargestellt. Ein weiterer Vorteil neben der größeren Klebefläche ist auch die Verstärkung der Koppelleiste sowie die Möglichkeit Druckkräfte aus dem Glas in die Koppelleiste übertragen zu können. Es wurden bereits erste Kleinprobekörper zu Versuchszwecken hergestellt und auf Schub getestet. Ein solcher ist schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt.

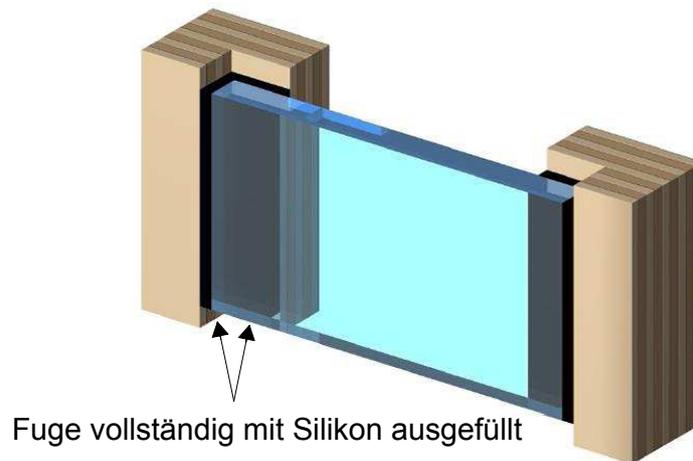


Abb. 5.1.: Schematische Darstellung eines Kleinprobekörpers mit L-Leiste

Die Geometrie der Klebefuge wurde in Anlehnung an die ursprünglichen Kleinprobekörper mit 50 mm Länge und 12 mm Breite gewählt. Zusätzlich entsteht bei diesem Versuchskörper eine weitere Klebefläche mit der selben Länge und der Dicke der Glasscheibe, hier 8 mm . Somit wird die verklebte Fläche um 66% erhöht.

Die Versuchskörper wurden nach nur 5 Tagen Aushärtungszeit der Scherprüfung unterworfen, wobei der in Abschnitt 3.2.2 erklärte Versuchsaufbau gewählt wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2 und Tabelle 5.1 ersichtlich.

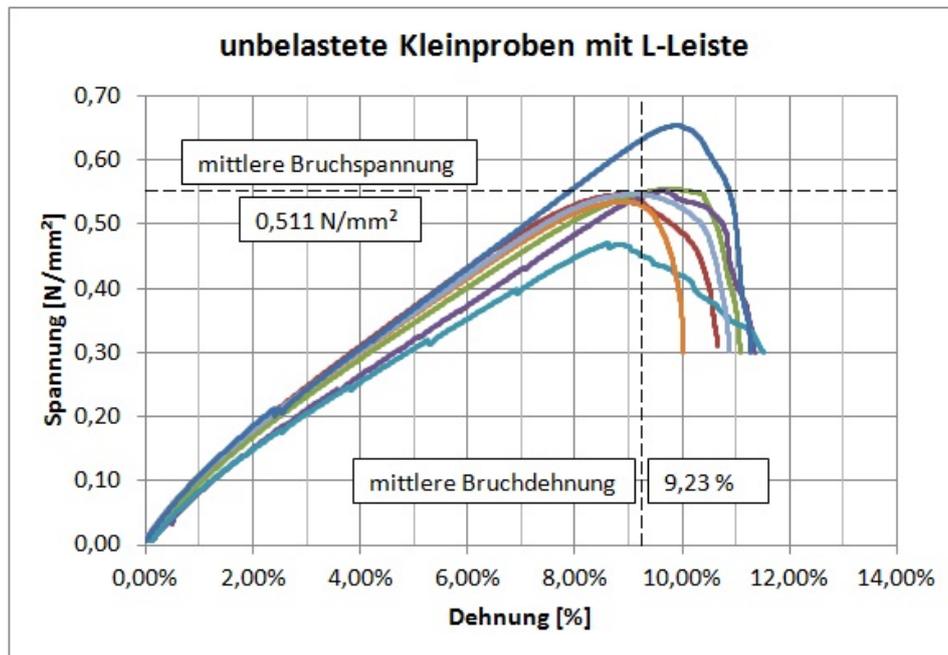


Abb. 5.2.: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben ohne Vorbelastung mit L-Leiste

Tab. 5.1.: Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben ohne Vorbelastung mit L-Leiste

Anzahl der Prüfkörper	$n = 7$
Mittlere Bruchspannung	$m_x = 0,551 \text{ N/mm}^2$
Median der Bruchspannung	$m_{med} = 0,547 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung	$s_x = 0,054 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.1)	$R_{u,5} = 0,439 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Bruchspannung (Gleichung 3.2)	$R_{u,5} = 0,430 \text{ N/mm}^2$
Mittlere Bruchdehnung	$\varepsilon = 9,23 \%$
Verschiebung unter Schubbeanspruchung nach [3]	$d = 153,92 \%$
Mittlerer Verformungsmodul	$G = 0,36 \text{ N/mm}^2$

Betrachtet man nun die Ergebnisse der unbelasteten Kleinproben aus Tabelle 3.4, so erkennt man, dass die Versuchskörper mit L-Leiste im Vergleich nur eine mittlere Bruchspannung von etwa 50 % erreichen.

Ein Grund für das schlechte Abschneiden der Versuchskörper mit umlaufender Schubverklebung kann in der geringen Aushärtungszeit von 5 Tagen vermutet werden. Der Hersteller des Silikonklebstoffs erklärte nach Rücksprache jedoch, dass vermutet wird, dass der Klebstoff nach dieser Zeit bereits 80–90 % seiner Festigkeit erreicht haben sollte. Dies würde diese Theorie widerlegen, da die Ergebnisse deutlich unter dem Wert der in Abschnitt 3.2.3.2 durchgeführten Versuche liegen. Der Hersteller bemerkte aber auch, dass keine fundierten Untersuchungen zur Festigkeit nach dieser Zeit existieren und die Annahme von 80–90 % auf Erfahrungen und theoretische Überlegungen zurückzuführen sei. [10]

Positiv zu erwähnen ist aber die äußerst geringe Standardabweichung der Bruchspannung, die in keiner Versuchsreihe der standardmäßigen Kleinprobekörper erreicht wurde. Würde man die beiden in Abbildung 5.2 ersichtlichen Ausreißer nicht beachten, würde man sogar eine Standardabweichen der Bruchspannung von nur $s_x = 0,007 \text{ N/mm}^2$ erhalten. Das einheitliche Bruchbild und die geringe Streuung der Festigkeiten sind somit sicher als Vorteil der umlaufenden Schubverklebung zu sehen.

Um mit Gewissheit feststellen zu können, ob die geringe Bruchspannung tatsächlich der Wirklichkeit entspricht und als realistisch einzuschätzen ist, sind definitiv weitere Untersuchungen mit der für Silikon üblichen Aushärtungszeit von 28 Tagen sinnvoll.

Vorteile würden sich auch auf Herstellungsseite ergeben. Die L-Leiste kann mit einer Silikonraupe ausgefüllt und die Glasscheibe in das Silikon gedrückt werden. Dafür sind lediglich Abstandhalter an Anfang und Ende der Leiste notwendig, die nach der Verklebung wieder entfernt werden müssen. Anschließend kann das noch nicht ausgehärtete Silikon einfach abgetragen werden, siehe Abbildung 5.3.

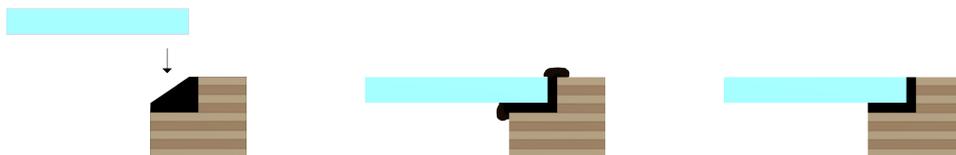


Abb. 5.3.: Einlegen der Glasscheibe ins Silikonbett

Die bereits zuvor erwähnten Abstandhalter könnten in einem weiteren Entwicklungsschritt direkt als Klotz vor Ausführung der Schubverklebung hergestellt werden. Solche Klötze können aus Acrylat hergestellt werden und dürfen nach der Verklebung im Gegensatz zum vorherigen Beispiel nicht mehr entfernt werden. Diese Entwicklung basiert grundsätzlich auf dem von *Hochhauser* in [7] angewandten System aus Abbildung 2.3, wobei Druckkräfte über Klötze in die Glasscheibe eingeleitet werden. Somit könnte man die Abstandhalter auch zur Abtragung der Druckkräfte vom Glas in die Koppelleiste nutzen. Es ergeben sich zwei Ausführungsvarianten, siehe Abbildung 5.4, wobei Variante 2 im Gegensatz zu Variante 1 zusätzlich nach unten ragt und somit eine größere Kontaktfläche zur Koppelleiste aufweist. In Variante 2 würden somit die Lasteinleitung in die Koppelleiste verbessert und lokale Spannungsspitzen vermieden werden.

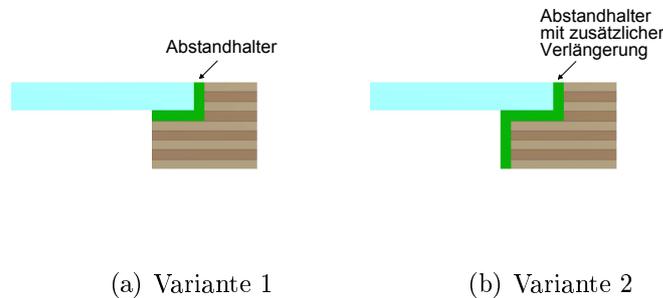


Abb. 5.4.: Unterschiedliche Varianten für Abstandhalter

An der Universität in Växjö wird derzeit auch an der Ausführung einer 3-seitigen Verklebung geforscht. Dabei wird die Leiste in U-Form ausgebildet, die Fuge mit der notwendigen Menge Silikon befüllt und die Glasscheibe in die Fuge gedrückt. Erste Versuche an Trägern wurden bereits durchgeführt. Ein Gummiband wird als Abstandhalter in die Fuge gelegt und eine Silikonraupe in der Fuge appliziert. Anschließend wird das Glas mittels Pressen eingedrückt. Diese Ausführungsvariante ist schematisch in Abbildung 5.5 dargestellt. Die einzelnen Arbeitsschritte sind in Abbildung 5.6 zu sehen.

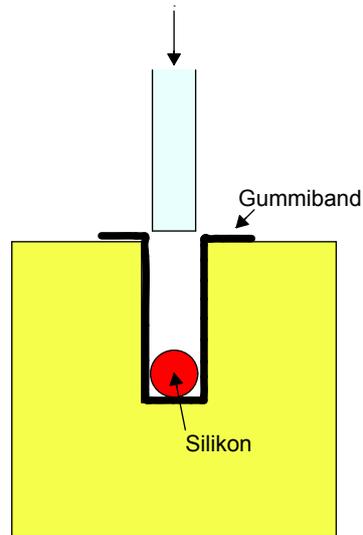
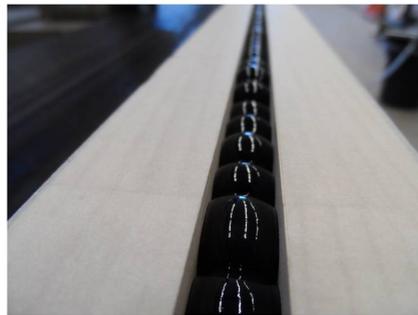


Abb. 5.5.: Schematische Darstellung eines HGV-Elements mit U-Leiste [15]



(a) U-Leiste



(b) Silikonraupe



(c) Einpressen der Glasscheibe

Abb. 5.6.: Arbeitsschritte der Herstellung eines Trägers mit U-Leiste [15]

Eine mehrseitige Verklebung bringt aber auch Probleme mit sich. Bei einer elastischen Verklebung ist immer zu bedenken, dass der Klebstoff möglichst beweglich bleibt. Wenn mehrere Haftflächen existieren und der Klebstoff gleichzeitig in verschiedene Richtungen beansprucht wird, dann besteht die Gefahr, dass der Klebstoff in sich reißt. Durch die Trennung in mehrere Klebstoffebenen bleibt die Beweglichkeit des Klebstoffes und damit seine spannungsausgleichende Wirkung erhalten. Somit wird eine Vermeidung der sogenannten Dreiflankenhaftung empfohlen, ist aber nicht zwingend vorausgesetzt. [10]

Durch die Breite der L-Leiste entstehen auch Probleme in der Ansichtsbreite der Pfosten-Riegel-Konstruktion. Es kann nicht die selbe kleine Fugenbreite zwischen den Elementen erreicht werden, wie dies durch die von Edl in [2] entwickelte gezahnte Koppelleiste möglich ist. Mit dieser wird eine abdichtende Fuge von etwa 20 mm erreicht,

mit einer L-Leiste würde sich dieses Maß auf 45 mm erhöhen, was vor Abnehmer dieses Systems nur schwer zu verteidigen sein wird. Anzudenken wäre eine Alternative, in der auch die L-Leiste gezahnt und somit platzsparend ausgeführt werden kann. Dies bedarf allerdings noch einiger Entwicklungsarbeit und ist derzeit Bestandteil des Forschungsprojekts an der Technischen Universität Wien [4].

6. Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde das Langzeitverhalten von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen unter dauerhafter Schubbeanspruchung genauer betrachtet und beurteilt. Dafür wurden Probekörper in unterschiedlichen Ausführungsvarianten hergestellt. Zum einen wurden Kleinprobekörper auf Basis der in [1] verwendeten Versuchsproben hergestellt, zum anderen wurden mittelgroße Probekörper untersucht, um einen besseren Vergleich der Kleinproben auf das reale Verhalten im Bauwerk ziehen zu können.

An den Kleinprobekörpern wurden drei verschiedene Versuche durchgeführt. Das Verformungsverhalten unter Dauerbeanspruchung wurde beobachtet sowie Untersuchungen unter zyklischer Beanspruchung angestellt und Bruchversuche abgehalten. Aus den Untersuchungsergebnissen wurden anschließend versucht, Modifikations- und Deformationsbeiwerte zur Bemessung von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen herzuleiten und ein Vergleich zu den in [1] getroffenen Annahmen sowie zu den normativ in [3] festgelegten Faktoren zu ziehen. Dabei zeigte sich, dass trotz der Klimabeanspruchung unter Naturklima keine Verschlechterung der Ergebnisse im Gegensatz zu den Versuchen in der Klimakammer in [1] eintrat. Teilweise konnten die Bemessungsbeiwerte zwar bestätigt werden, trotzdem ist nach derzeitigem Stand der Technik das Ansetzen tendenziell höherer Sicherheitsbeiwerte zu empfehlen. Um eine fundierte Aussage treffen zu können, ist allerdings das Ende der Versuche nach einem Jahr noch abzuwarten. [4]

Im Gegensatz zu den Kleinproben wurden bei den mittelgroßen Versuchskörpern keine Versuche unter zyklischer Beanspruchung durchgeführt. Die beiden anderen Versuchsarten wurden an die Methodik der Kleinversuche angepasst und unter denselben Randbedingungen abgehalten. Zum Abschluss dieser Arbeit waren aber erst wenige Ergebnisse bekannt. Trotzdem haben sich schon einige Unterschiede zu den Kleinproben abgezeichnet. Das Verformungsverhalten unter Dauerlast ist deutlich besser zu beurteilen, die Verformungen fallen durchwegs geringer aus. Hier ist jedoch auch zu beachten, dass die Versuche zu einer anderen Jahreszeit und somit unter anderen klimatischen Bedingungen gestartet wurden als die Kleinversuche. Bei den Scherversuchen ohne vorangegangene Dauerlast ergeben sich schlechtere Bruchspannungen, die Lasten sind demnach

nicht linear zur Klebefugenlänge steigerbar. Die Gründe dafür werden derzeit genauer untersucht, um den auftretenden Größeneffekt zu quantifizieren.

Zum Abschluss wird noch ein kurzer Überblick über derzeitige Entwicklungen mit mehrseitiger Verklebung gegeben. Diese sollen die Übertragung größerer Schubspannungen ermöglichen, die Streuung der Festigkeitswerte ausgleichen und die Voraussetzungen für höhere Sicherheiten und effektivere Verbundsysteme schaffen.

Zu diesen Entwicklungsschritten existieren derzeit noch keine Versuchsergebnisse, die die sich bietenden Möglichkeiten aufzeigen. Deshalb wäre es wünschenswert, auf diesem Gebiet weitere Forschungsarbeit durchzuführen und Alternativen zu den aktuellen Konstruktionsmethoden von Holz-Glas-Verbundsystemen zu entwickeln. Des Weiteren müssen auch die aktuellen Bemessungskonzepte an die neuen Gegebenheiten angepasst werden. Durch diese Entwicklungsarbeit könnten die Sicherheitsbeiwerte bezüglich Langzeitverhalten unter Umständen reduziert werden, wodurch sich ein größeres Einsatzgebiet eröffnen würde, welches wiederum ein erhöhtes wirtschaftliches Interesse nach sich ziehen könnte. Somit sind weitere Forschungen unabdingbar, um das Ziel auch große Gebäude mit Holz-Glas-Verbundkonstruktionen auszusteifen, erreichen zu können.

A. Vorangegangene Arbeiten [16]

„1999: HAMM Jan: „Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas.“ (Dissertation EPF Lausanne, 1999. Erstbegutachter: Prof. Julius Natterer) SCHWERPUNKT: Erststudien zum statischen Verbund zwischen Holz und Glas

2004: KREHER Klaus: „Tragverhalten und Bemessung von Hol-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas.“ (Dissertation EPF Lausanne, 2004. Erstbegutachter: Prof. Julius Natterer) SCHWERPUNKT: Bemessung von HGV-Trägern und Bau des Hotel Palafitte

2005: NIEDERMAIER Peter: „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holztragwerken.“ (Dissertation TU München, 2005. Unter der Leitung von: Prof. Heinrich Kreuzinger) SCHWERPUNKT: Aussteifung mittels HGV-Scheiben im Wintergarten und Fassadenbau

2007: WEINAND Yves: „Holz-Glas-Verbund als großflächige Scheibensysteme zur Gebäudeaussteifung.“ (Schlussbericht 06/07, Forschungsprojekt BUWAL an der EPF Lausanne, Projektnr. 2005.05, in Zusammenarbeit mit Dr.-Ing. Klaus Kreher) SCHWERPUNKT: Gebäudeaussteifung mittels HGV-Scheiben

2008: EDL Thomas: „Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe.“ (Forschungsprojekt an der HFA, 2008.) SCHWERPUNKT: Produktentwicklung Koppelleiste – baupraktisch umsetzbare Konstruktionslösung

2008: NEUBAUER Georg, SCHOBER Klaus-Peter: „Weiterentwicklung und Herstellung von Holz-Glas Verbundkonstruktionen durch statisch wirksames Verkleben von Holz und Glas zum Praxiseinsatz im Holzhausbau.“ (Endbericht zum Impulsprojekt V2 des Kind Holz Technologie. Wien: Dezember 2008) SCHWERPUNKT: Beanspruchungsklassen für System EDL, experimentelle bauphysikalische und statische Studien zu HGV-Scheiben

2011: HOCHHAUSER, Werner: „Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz- Glas- Verbundscheiben.“ (Dissertation 2011) SCHWER-

PUNKT: Forschungsprojekt der Technischen Universität über Holz- Glas- Verbundkonstruktionen, kombinierte Lastabtragung über Schubverklebung und Klotzung“

2011: HOCHHAUSER, Werner; WINTER, Wolfgang; KREHER, Klaus: „Holz- Glas- Verbundkonstruktionen, State of Art, Forschungsbericht, Studentische Arbeiten.“ (Forschungsendbericht 2011) SCHWERPUNKT: Forschungsprojekt der Technischen Universität über Holz- Glas- Verbundkonstruktionen: Berechnungs- und Bemessungskonzepte, Ausgewählte Arbeiten aus den Fachbereichen Architektur und Bauingenieurwesen, Leitfäden zur Berechnung und Bemessung von Scheiben, Trägern und Platten.“

B. Beilagen

B.1. Datenblatt Ottocoll[®]S660

Siehe nächste 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/cm ³]	~ 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>

B.2. Messblatt Kriechversuch

B.2.1. Kleinproben

		Kriechproben [mm]									
Datum	Uhrzeit	1k-2,5kg	2k-2,5kg	3k-2,5kg	4k-2,5kg	5k-2,5kg	6k-2,5kg	7k-2,5kg	8k-2,5kg	9k-2,5kg	10k-2,5kg
Startwert		1,8	8,9	0,6	9,0	8,3	0,5	9,0	9,3	9,9	1,0
Start		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
elastische Verformung	11:25	0,060	0,180	0,170	0,180	0,180	0,205	0,200	0,190	0,170	0,225
03.09.2013	10:15	0,060	0,200	0,210	0,205	0,200	0,220	0,240	0,200	0,210	0,250
04.09.2013	09:45	0,070	0,230	0,215	0,240	0,235	0,250	0,260	0,230	0,215	0,265
05.09.2013	09:30	0,075	0,240	0,220	0,250	0,240	0,250	0,270	0,240	0,220	0,270
06.09.2013	09:00	0,075	0,240	0,220	0,250	0,240	0,250	0,270	0,240	0,220	0,270
07.09.2013		0,072	0,227	0,213	0,240	0,230	0,247	0,273	0,233	0,212	0,270
08.09.2013		0,068	0,213	0,207	0,230	0,220	0,243	0,277	0,227	0,203	0,270
09.09.2013	09:00	0,065	0,200	0,200	0,220	0,210	0,240	0,280	0,220	0,195	0,270
10.09.2013	09:00	0,075	0,240	0,230	0,260	0,240	0,260	0,290	0,240	0,210	0,290
11.09.2013	09:00	0,080	0,260	0,240	0,275	0,260	0,270	0,300	0,255	0,220	0,295
12.09.2013	09:00	0,080	0,260	0,240	0,275	0,260	0,270	0,300	0,255	0,220	0,300
13.09.2013	09:00	0,090	0,260	0,240	0,275	0,260	0,275	0,305	0,260	0,220	0,300
14.09.2013		0,090	0,278	0,250	0,290	0,273	0,283	0,312	0,270	0,230	0,308
15.09.2013		0,090	0,297	0,260	0,305	0,287	0,292	0,318	0,280	0,240	0,317
16.09.2013	09:00	0,090	0,315	0,270	0,320	0,300	0,300	0,325	0,290	0,250	0,325
17.09.2013	09:00	0,110	0,310	0,270	0,320	0,310	0,310	0,325	0,295	0,250	0,330
18.09.2013	09:00	0,110	0,310	0,275	0,325	0,310	0,310	0,330	0,300	0,250	0,335
19.09.2013	09:00	0,110	0,320	0,280	0,335	0,320	0,320	0,330	0,305	0,260	0,340
20.09.2013	09:00	0,110	0,310	0,270	0,320	0,300	0,310	0,330	0,300	0,245	0,335
21.09.2013		0,113	0,313	0,273	0,323	0,305	0,313	0,333	0,303	0,250	0,338
22.09.2013		0,117	0,317	0,277	0,327	0,310	0,317	0,337	0,307	0,255	0,342
23.09.2013	09:00	0,120	0,320	0,280	0,330	0,315	0,320	0,340	0,310	0,260	0,345
24.09.2013	09:00	0,120	0,320	0,285	0,335	0,320	0,325	0,340	0,310	0,260	0,350
25.09.2013	09:00	0,120	0,325	0,290	0,340	0,320	0,330	0,340	0,310	0,265	0,350
26.09.2013	09:00	0,120	0,325	0,290	0,340	0,320	0,330	0,345	0,310	0,265	0,350
27.09.2013	09:00	0,125	0,330	0,290	0,340	0,325	0,330	0,345	0,315	0,270	0,355
28.09.2013		0,123	0,323	0,287	0,335	0,320	0,328	0,345	0,310	0,265	0,355
29.09.2013		0,122	0,317	0,283	0,330	0,315	0,327	0,345	0,305	0,260	0,355
30.09.2013	09:00	0,120	0,310	0,280	0,325	0,310	0,325	0,345	0,300	0,255	0,355
01.10.2013	08:45	0,120	0,310	0,280	0,325	0,310	0,325	0,350	0,305	0,255	0,355
02.10.2013	09:00	0,120	0,300	0,270	0,320	0,300	0,320	0,345	0,300	0,250	0,350
03.10.2013	08:45	0,120	0,300	0,270	0,320	0,300	0,320	0,350	0,300	0,250	0,350
04.10.2013	09:00	0,110	0,285	0,260	0,300	0,290	0,310	0,340	0,290	0,245	0,350
05.10.2013		0,117	0,302	0,273	0,317	0,303	0,320	0,350	0,300	0,253	0,357
06.10.2013		0,123	0,318	0,287	0,333	0,317	0,330	0,360	0,310	0,262	0,363
07.10.2013	09:00	0,130	0,335	0,300	0,350	0,330	0,340	0,370	0,320	0,270	0,370
08.10.2013	09:00	0,140	0,350	0,310	0,365	0,350	0,350	0,375	0,340	0,280	0,380
09.10.2013	09:00	0,140	0,340	0,305	0,355	0,340	0,345	0,370	0,335	0,270	0,375
10.10.2013	09:00	0,140	0,350	0,315	0,370	0,350	0,350	0,375	0,345	0,285	0,380
11.10.2013	09:00	0,140	0,360	0,320	0,380	0,360	0,360	0,380	0,360	0,290	0,390
12.10.2013		0,143	0,363	0,320	0,380	0,360	0,360	0,380	0,360	0,290	0,390
13.10.2013		0,147	0,367	0,320	0,380	0,360	0,360	0,380	0,360	0,290	0,390
14.10.2013	09:00	0,150	0,370	0,320	0,380	0,360	0,360	0,380	0,360	0,290	0,390
15.10.2013	10:30	0,150	0,375	0,330	0,390	0,370	0,370	0,390	0,370	0,300	0,400
16.10.2013	09:00	0,150	0,375	0,325	0,385	0,370	0,370	0,385	0,370	0,300	0,395
17.10.2013	09:00	0,150	0,375	0,330	0,390	0,370	0,370	0,385	0,370	0,300	0,400

Datum	Kriechproben [mm]					Referenz [mm]		Datenlogger links		Datenlogger rechts	
	11k-3kg	12k-3kg	13k-3kg	14k-3kg	15k-3kg	151	152	Temp. [°C]	rel. Luftf. [%]	Temp. [°C]	rel. Luftf. [%]
Startwert	0,6	9,4	0,1	1,9	1,8	0,8	1,0				
Start	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
elastische Verformung	0,250	0,240	0,240	0,010	0,270	0,000	0,000	26,5	34,5	26,3	36,0
03.09.2013	0,280	0,260	0,250	0,020	0,290	0,000	0,000	23,5	44,9	23,6	45,3
04.09.2013	0,310	0,290	0,270	0,020	0,310	0,020	0,015	23,6	53,1	23,6	53,6
05.09.2013	0,320	0,295	0,280	0,020	0,320	0,020	0,015	25,6	47,6	25,9	47,2
06.09.2013	0,320	0,295	0,280	0,020	0,320	0,010	0,010	24,1	41,8	24,1	41,4
07.09.2013	0,317	0,288	0,280	0,020	0,313	0,013	0,012	23,8	41,5	23,8	41,7
08.09.2013	0,313	0,282	0,280	0,020	0,307	0,017	0,013	23,4	41,3	23,5	41,9
09.09.2013	0,310	0,275	0,280	0,020	0,300	0,020	0,015	23,1	41,0	23,2	42,2
10.09.2013	0,330	0,300	0,300	0,020	0,270	0,000	0,010	21,8	49,2	22,0	49,2
11.09.2013	0,350	0,315	0,310	0,030	0,340	0,010	0,015	22,2	54,2	22,3	53,7
12.09.2013	0,350	0,315	0,310	0,030	0,340	0,010	0,010	22,6	44,9	23,0	44,2
13.09.2013	0,350	0,320	0,315	0,030	0,345	0,010	0,010	20,4	48,2	20,7	47,8
14.09.2013	0,363	0,330	0,327	0,037	0,358	0,020	0,020	20,5	52,2	20,7	52,1
15.09.2013	0,377	0,340	0,338	0,043	0,372	0,030	0,030	20,7	56,3	20,8	56,3
16.09.2013	0,390	0,350	0,350	0,050	0,385	0,040	0,040	20,8	60,3	20,8	60,6
17.09.2013	0,400	0,360	0,350	0,055	0,380	0,040	0,040	19,4	60,2	19,5	60,0
18.09.2013	0,400	0,360	0,350	0,060	0,380	0,040	0,040	16,0	56,6	16,4	56,1
19.09.2013	0,410	0,370	0,360	0,060	0,390	0,050	0,050	18,2	58,9	18,7	57,7
20.09.2013	0,400	0,360	0,360	0,060	0,380	0,030	0,040	17,9	55,3	18,1	54,8
21.09.2013	0,403	0,363	0,363	0,063	0,383	0,033	0,043	18,4	55,2	18,6	54,9
22.09.2013	0,407	0,367	0,367	0,067	0,387	0,037	0,047	19,0	55,2	19,1	55,0
23.09.2013	0,410	0,370	0,370	0,070	0,390	0,040	0,050	19,5	55,1	19,6	55,1
24.09.2013	0,420	0,375	0,370	0,070	0,400	0,040	0,050	18,7	58,0	18,9	58,4
25.09.2013	0,420	0,380	0,370	0,075	0,400	0,040	0,050	18,3	55,9	18,5	55,4
26.09.2013	0,420	0,380	0,370	0,075	0,400	0,040	0,055	19,0	61,1	19,2	61,1
27.09.2013	0,425	0,380	0,380	0,080	0,405	0,040	0,055	17,5	50,7	17,7	50,2
28.09.2013	0,422	0,377	0,377	0,078	0,403	0,037	0,052	17,0	50,6	17,3	50,1
29.09.2013	0,418	0,373	0,373	0,077	0,402	0,033	0,048	16,5	50,6	16,8	50,1
30.09.2013	0,415	0,370	0,370	0,075	0,400	0,030	0,045	16,0	50,5	16,4	50,0
01.10.2013	0,415	0,375	0,370	0,075	0,400	0,030	0,045	13,5	50,4	13,8	50,1
02.10.2013	0,410	0,370	0,370	0,070	0,395	0,020	0,040	13,6	45,3	14,1	44,5
03.10.2013	0,410	0,370	0,370	0,070	0,395	0,020	0,040	10,5	45,8	11,0	44,9
04.10.2013	0,410	0,360	0,360	0,070	0,385	0,010	0,030	11,3	39,5	12,0	38,4
05.10.2013	0,420	0,373	0,370	0,077	0,397	0,022	0,040	12,2	47,4	12,7	46,9
06.10.2013	0,430	0,387	0,380	0,083	0,408	0,033	0,050	13,0	55,4	13,3	55,4
07.10.2013	0,440	0,400	0,390	0,090	0,420	0,045	0,060	13,9	63,3	14,0	63,9
08.10.2013	0,440	0,410	0,400	0,100	0,430	0,050	0,070	12,7	61,4	13,0	61,6
09.10.2013	0,445	0,400	0,395	0,100	0,425	0,040	0,060	14,6	62,5	14,8	61,0
10.10.2013	0,460	0,410	0,400	0,110	0,430	0,050	0,070	15,5	65,8	15,6	66,6
11.10.2013	0,465	0,420	0,410	0,110	0,440	0,060	0,075	13,9	66,0	14,0	66,0
12.10.2013	0,467	0,420	0,413	0,110	0,440	0,060	0,075	13,3	64,4	13,5	64,2
13.10.2013	0,468	0,420	0,417	0,110	0,440	0,060	0,075	12,7	62,9	13,0	62,4
14.10.2013	0,470	0,420	0,420	0,110	0,440	0,060	0,075	12,1	61,3	12,5	60,6
15.10.2013	0,480	0,430	0,425	0,120	0,450	0,060	0,080	15,9	61,0	16,0	61,0
16.10.2013	0,480	0,430	0,420	0,120	0,450	0,060	0,080	13,8	66,9	14,3	66,7
17.10.2013	0,480	0,430	0,425	0,120	0,450	0,060	0,085	12,3	63,2	12,7	62,3

Datum	Uhrzeit	Kriechproben [mm]									
		1k-2,5kg	2k-2,5kg	3k-2,5kg	4k-2,5kg	5k-2,5kg	6k-2,5kg	7k-2,5kg	8k-2,5kg	9k-2,5kg	10k-2,5kg
18.10.2013	09:00	0,150	0,380	0,330	0,390	0,370	0,375	0,390	0,375	0,300	0,400
19.10.2013		0,152	0,378	0,330	0,390	0,370	0,375	0,390	0,375	0,300	0,400
20.10.2013		0,153	0,377	0,330	0,390	0,370	0,375	0,390	0,375	0,300	0,400
21.10.2013	09:00	0,155	0,375	0,330	0,390	0,370	0,375	0,390	0,375	0,300	0,400
22.10.2013	09:00	0,160	0,385	0,340	0,400	0,380	0,380	0,395	0,380	0,310	0,410
23.10.2013	09:00	0,160	0,400	0,350	0,415	0,395	0,390	0,405	0,390	0,320	0,415
24.10.2013	09:00	0,165	0,400	0,350	0,415	0,400	0,395	0,410	0,400	0,325	0,420
25.10.2013	09:15	0,165	0,415	0,355	0,425	0,410	0,400	0,415	0,405	0,335	0,430
26.10.2013		0,167	0,420	0,357	0,427	0,413	0,403	0,420	0,408	0,337	0,432
27.10.2013		0,168	0,425	0,358	0,428	0,417	0,407	0,425	0,412	0,338	0,433
28.10.2013	09:00	0,170	0,430	0,360	0,430	0,420	0,410	0,430	0,415	0,340	0,435
29.10.2013	09:00	0,170	0,430	0,360	0,435	0,425	0,415	0,430	0,420	0,350	0,440
30.10.2013	09:00	0,170	0,440	0,370	0,440	0,435	0,420	0,435	0,425	0,355	0,450
31.10.2013	09:00	0,175	0,440	0,370	0,440	0,430	0,420	0,435	0,430	0,350	0,445
01.11.2013		0,176	0,440	0,370	0,440	0,431	0,420	0,436	0,430	0,351	0,446
02.11.2013		0,178	0,440	0,370	0,440	0,433	0,420	0,438	0,430	0,353	0,448
03.11.2013		0,179	0,440	0,370	0,440	0,434	0,420	0,439	0,430	0,354	0,449
04.11.2013	09:00	0,180	0,440	0,370	0,440	0,435	0,420	0,440	0,430	0,355	0,450
05.11.2013	09:00	0,180	0,440	0,370	0,440	0,435	0,420	0,440	0,430	0,355	0,450
06.11.2013	09:00	0,180	0,440	0,370	0,440	0,430	0,420	0,440	0,430	0,350	0,445
07.11.2013	09:15	0,180	0,440	0,370	0,440	0,435	0,420	0,440	0,435	0,355	0,450
08.11.2013	09:15	0,185	0,445	0,375	0,440	0,440	0,430	0,440	0,440	0,360	0,450
09.11.2013		0,188	0,450	0,377	0,443	0,443	0,432	0,443	0,443	0,363	0,453
10.11.2013		0,192	0,455	0,378	0,447	0,447	0,433	0,447	0,447	0,367	0,457
11.11.2013	09:00	0,195	0,460	0,380	0,450	0,450	0,435	0,450	0,450	0,370	0,460
12.11.2013	09:00	0,195	0,445	0,375	0,440	0,440	0,430	0,445	0,440	0,360	0,450
13.11.2013	09:00	0,190	0,440	0,370	0,435	0,435	0,420	0,440	0,440	0,350	0,450
14.11.2013	08:30	0,190	0,440	0,370	0,430	0,430	0,420	0,440	0,440	0,350	0,445
15.11.2013	09:00	0,190	0,440	0,370	0,430	0,430	0,420	0,440	0,440	0,350	0,450
16.11.2013		0,190	0,442	0,373	0,433	0,433	0,423	0,443	0,443	0,353	0,452
17.11.2013		0,190	0,443	0,377	0,437	0,437	0,427	0,447	0,447	0,357	0,453
18.11.2013	09:00	0,190	0,445	0,380	0,440	0,440	0,430	0,450	0,450	0,360	0,455
19.11.2013	09:00	0,195	0,450	0,380	0,440	0,440	0,430	0,450	0,450	0,360	0,455
20.11.2013	09:00	0,200	0,450	0,380	0,450	0,440	0,430	0,450	0,450	0,360	0,460
21.11.2013	09:00	0,200	0,450	0,380	0,445	0,440	0,430	0,450	0,450	0,360	0,460
22.11.2013	09:00	0,200	0,460	0,385	0,450	0,450	0,440	0,455	0,455	0,370	0,465
23.11.2013		0,200	0,457	0,383	0,447	0,447	0,437	0,453	0,453	0,367	0,462
24.11.2013		0,200	0,453	0,382	0,443	0,443	0,433	0,452	0,452	0,363	0,458
25.11.2013	09:00	0,200	0,450	0,380	0,440	0,440	0,430	0,450	0,450	0,360	0,455
26.11.2013	09:00	0,195	0,440	0,370	0,430	0,430	0,420	0,445	0,450	0,350	0,450
27.11.2013	09:00	0,200	0,440	0,375	0,430	0,435	0,420	0,450	0,450	0,350	0,450
28.11.2013	09:00	0,200	0,440	0,375	0,430	0,435	0,420	0,450	0,450	0,350	0,450
29.11.2013	09:00	0,200	0,445	0,380	0,440	0,440	0,425	0,450	0,450	0,355	0,455
30.11.2013		0,203	0,450	0,383	0,443	0,443	0,430	0,453	0,453	0,360	0,460
01.12.2013		0,207	0,455	0,387	0,447	0,447	0,435	0,457	0,457	0,365	0,465
02.12.2013	09:00	0,210	0,460	0,390	0,450	0,450	0,440	0,460	0,460	0,370	0,470

Datum	Kriechproben [mm]					Referenz [mm]		Datenlogger links		Datenlogger rechts	
	11k-3kg	12k-3kg	13k-3kg	14k-3kg	15k-3kg	151	152	Temp.	rel. Luftf.	Temp.	rel. Luftf.
18.10.2013	0,480	0,430	0,430	0,120	0,450	0,060	0,090	13,5	65,8	13,7	66,1
19.10.2013	0,480	0,430	0,430	0,120	0,452	0,060	0,090	13,6	66,4	13,8	66,8
20.10.2013	0,480	0,430	0,430	0,120	0,453	0,060	0,090	13,6	67,1	13,8	67,6
21.10.2013	0,480	0,430	0,430	0,120	0,455	0,060	0,090	13,7	67,7	13,9	68,3
22.10.2013	0,490	0,440	0,440	0,130	0,460	0,060	0,100	16,1	74,2	16,5	74,0
23.10.2013	0,505	0,455	0,450	0,135	0,470	0,070	0,110	16,4	79,4	16,6	80,5
24.10.2013	0,510	0,460	0,450	0,140	0,470	0,070	0,110	16,1	74,6	16,3	75,5
25.10.2013	0,520	0,460	0,460	0,140	0,480	0,080	0,120	16,5	81,1	16,8	82,4
26.10.2013	0,523	0,467	0,463	0,143	0,482	0,080	0,123	16,6	78,5	16,9	79,7
27.10.2013	0,527	0,473	0,467	0,147	0,483	0,080	0,127	16,7	76,0	16,9	77,0
28.10.2013	0,530	0,480	0,470	0,150	0,485	0,080	0,130	16,8	73,4	17,0	74,3
29.10.2013	0,535	0,480	0,480	0,150	0,490	0,080	0,130	15,9	77,0	16,0	78,0
30.10.2013	0,540	0,490	0,485	0,155	0,490	0,080	0,140	17,3	77,2	18,6	71,2
31.10.2013	0,540	0,490	0,485	0,155	0,490	0,080	0,140	17,1	73,2	19,5	62,6
01.11.2013	0,543	0,490	0,486	0,156	0,493	0,080	0,139	17,1	71,7	19,3	62,1
02.11.2013	0,545	0,490	0,488	0,158	0,495	0,080	0,138	17,2	70,2	19,1	61,6
03.11.2013	0,548	0,490	0,489	0,159	0,498	0,080	0,136	17,2	68,7	18,9	61,0
04.11.2013	0,550	0,490	0,490	0,160	0,500	0,080	0,135	17,2	67,2	18,7	60,5
05.11.2013	0,550	0,490	0,490	0,160	0,500	0,080	0,135	16,3	72,3	16,6	69,1
06.11.2013	0,545	0,485	0,490	0,160	0,500	0,080	0,130	16,4	72,4	17,8	66,7
07.11.2013	0,550	0,490	0,490	0,160	0,500	0,075	0,130	16,3	71,9	16,5	71,3
08.11.2013	0,550	0,495	0,495	0,165	0,505	0,080	0,135	16,5	77,5	16,7	77,4
09.11.2013	0,553	0,497	0,498	0,168	0,508	0,080	0,138	16,5	75,3	16,9	73,6
10.11.2013	0,557	0,498	0,502	0,172	0,512	0,080	0,142	16,6	73,0	17,2	69,8
11.11.2013	0,560	0,500	0,505	0,175	0,515	0,080	0,145	16,6	70,8	17,4	66,0
12.11.2013	0,550	0,490	0,500	0,170	0,510	0,070	0,135	16,3	62,8	17,5	58,2
13.11.2013	0,550	0,490	0,495	0,170	0,510	0,070	0,130	16,2	65,6	17,6	59,0
14.11.2013	0,550	0,485	0,490	0,170	0,505	0,065	0,130	15,7	65,6	16,5	62,8
15.11.2013	0,550	0,490	0,490	0,170	0,510	0,065	0,130	16,3	57,5	16,9	51,2
16.11.2013	0,552	0,492	0,493	0,172	0,512	0,067	0,130	16,3	61,7	17,1	56,0
17.11.2013	0,553	0,493	0,497	0,173	0,513	0,068	0,130	16,3	65,8	17,2	60,9
18.11.2013	0,555	0,495	0,500	0,175	0,515	0,070	0,130	16,3	70,0	17,4	65,7
19.11.2013	0,555	0,500	0,500	0,180	0,520	0,070	0,130	16,7	70,1	17,6	64,2
20.11.2013	0,560	0,500	0,500	0,180	0,520	0,070	0,135	15,9	71,1	16,3	68,7
21.11.2013	0,560	0,500	0,500	0,180	0,520	0,070	0,135	17,1	73,2	19,4	58,8
22.11.2013	0,565	0,505	0,510	0,185	0,525	0,070	0,140	16,7	71,4	18,4	62,9
23.11.2013	0,563	0,500	0,507	0,185	0,523	0,068	0,137	16,6	68,2	18,1	60,5
24.11.2013	0,562	0,495	0,503	0,185	0,522	0,067	0,133	16,5	65,1	17,9	58,0
25.11.2013	0,560	0,490	0,500	0,185	0,520	0,065	0,130	16,4	61,9	17,6	55,6
26.11.2013	0,550	0,485	0,495	0,180	0,515	0,060	0,120	15,7	66,2	16,8	58,4
27.11.2013	0,550	0,490	0,500	0,180	0,520	0,060	0,120	16,6	65,4	19,4	51,0
28.11.2013	0,550	0,485	0,495	0,180	0,520	0,060	0,120	16,1	66,6	18,0	55,5
29.11.2013	0,555	0,490	0,500	0,180	0,520	0,065	0,125	16,2	66,1	18,3	57,0
30.11.2013	0,560	0,497	0,503	0,183	0,523	0,067	0,128	16,2	68,0	18,2	58,8
01.12.2013	0,565	0,503	0,507	0,187	0,527	0,068	0,132	16,3	69,9	18,2	60,5
02.12.2013	0,570	0,510	0,510	0,190	0,530	0,070	0,135	16,3	71,8	18,1	62,3

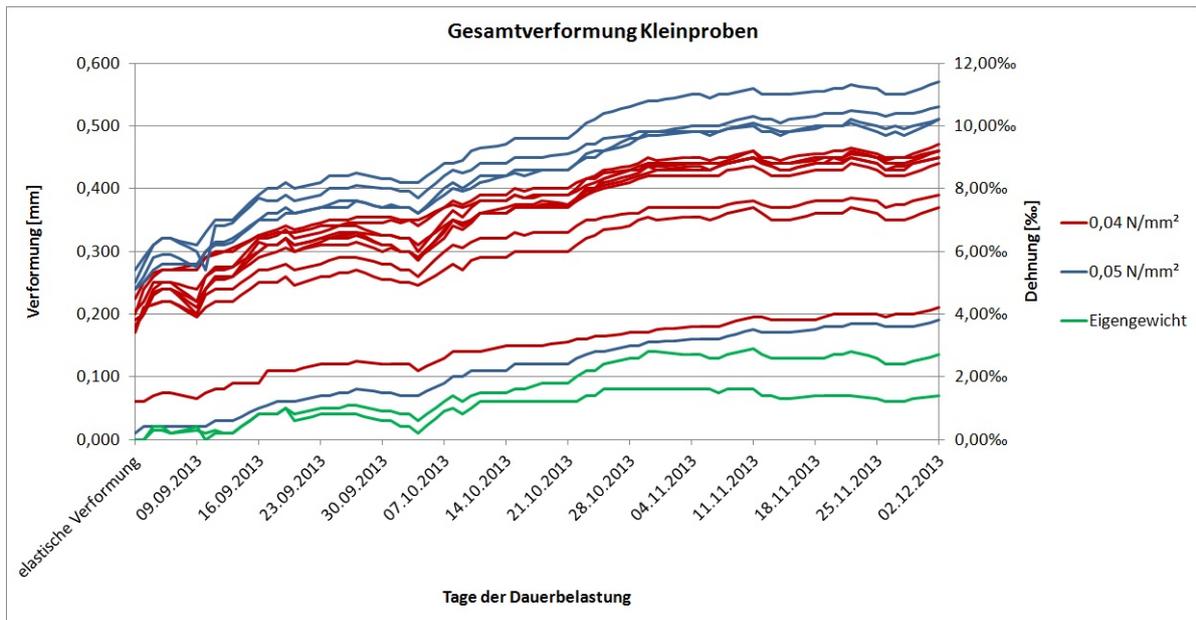


Abb. B.1.: Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

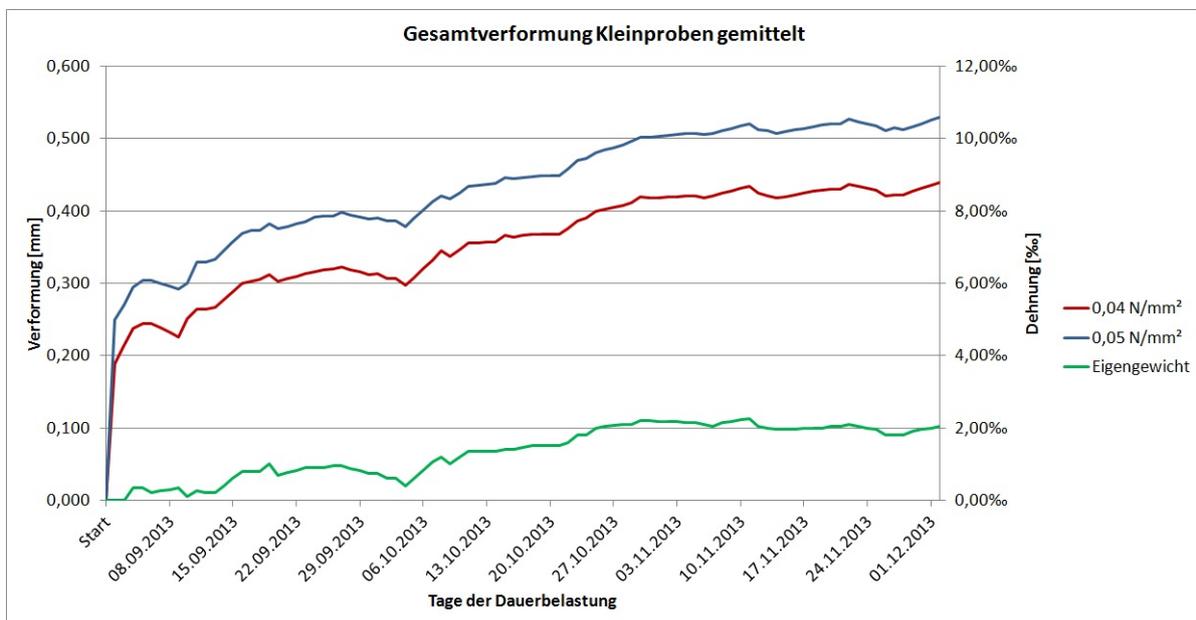


Abb. B.2.: Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge (gemittelt)

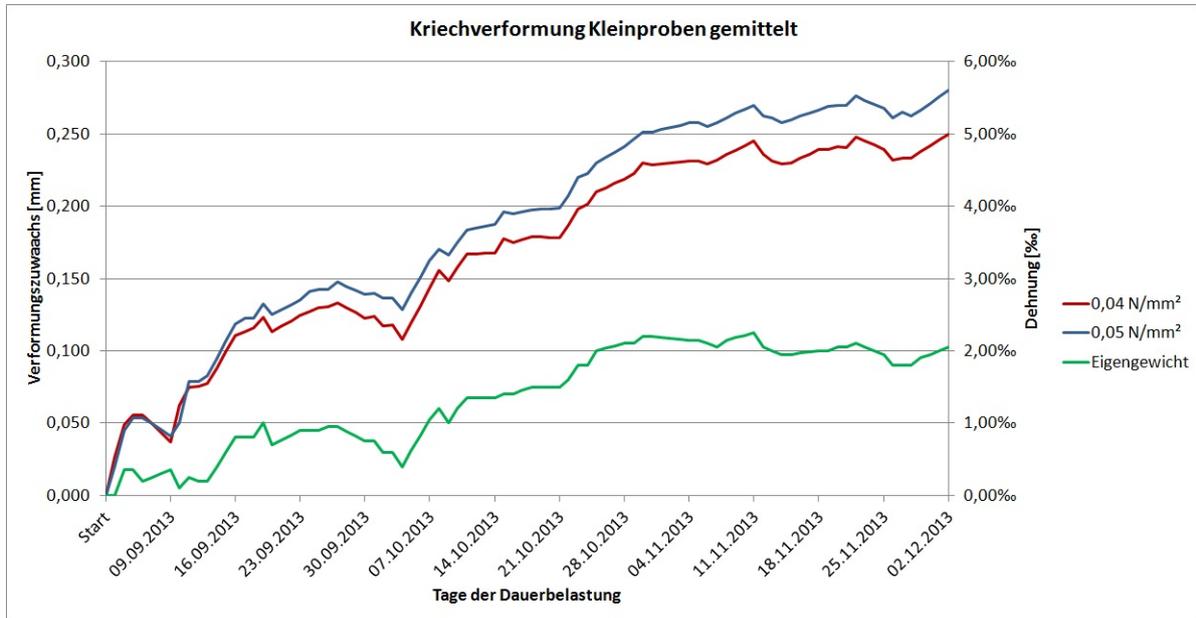


Abb. B.3.: Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

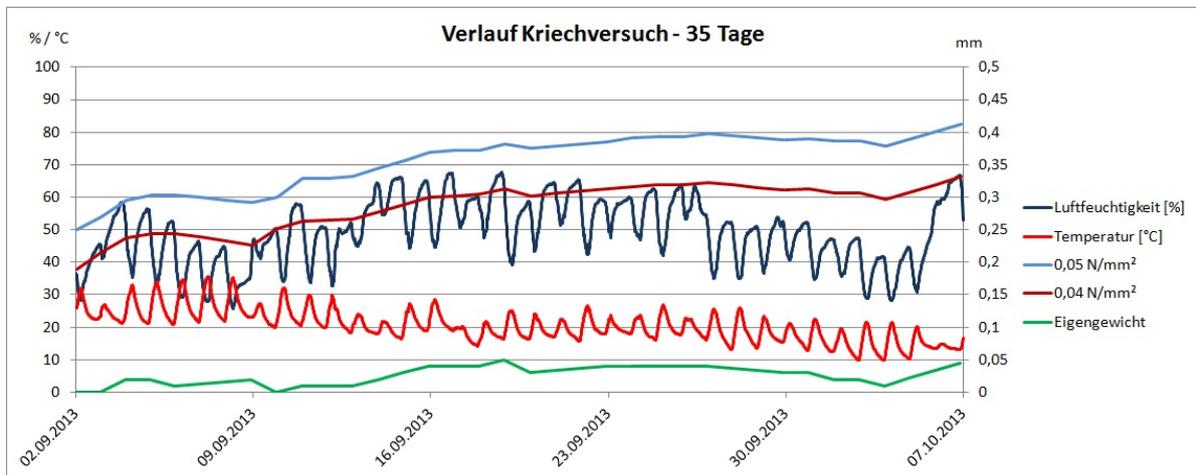


Abb. B.4.: Verformung und Klima der ersten 35 Tage

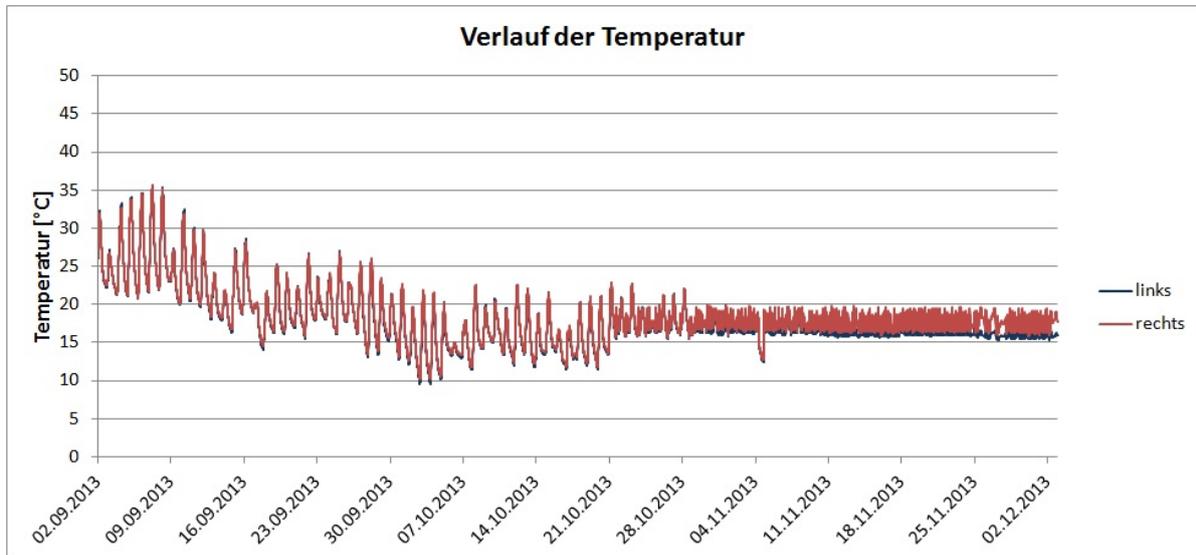


Abb. B.5.: Temperaturverlauf

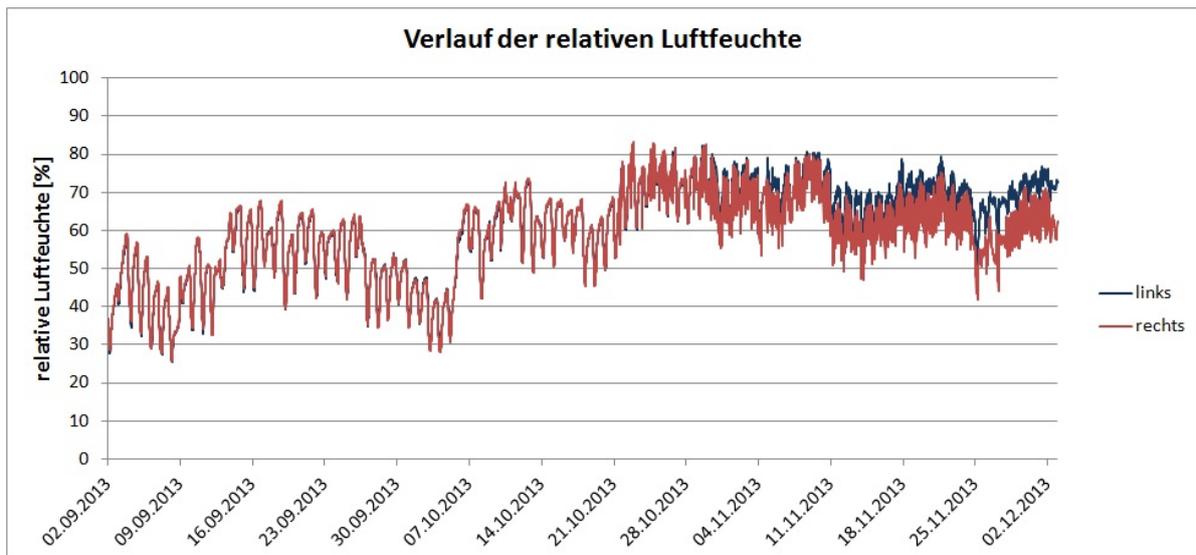


Abb. B.6.: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit

B.2.2. Mittelgroße Versuchskörper

		Kriechproben [mm]							
Datum	Uhrzeit	M 1.1-245kg		M 1.2-245kg		M 2.1-245kg		M 2.2-245kg	
		Messwert	Verformung	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung
Startwert		7,820		3,600		7,900		8,250	
elastische Verformung	17:00	0,970	0,150	0,780	0,180	0,070	0,170	0,430	0,180
17.12.2013	09:00	1,035	0,215	0,815	0,215	0,185	0,285	0,460	0,210
18.12.2013	09:00	1,050	0,230	0,825	0,225	0,190	0,290	0,470	0,220
19.12.2013	09:00	1,055	0,235	0,835	0,235	0,200	0,300	0,480	0,230
20.12.2013	09:00	1,060	0,240	0,845	0,245	0,205	0,305	0,490	0,240
21.12.2013		1,065	0,245	0,848	0,248	0,209	0,309	0,495	0,245
22.12.2013		1,069	0,249	0,851	0,251	0,212	0,312	0,500	0,250
23.12.2013		1,074	0,254	0,854	0,254	0,216	0,316	0,505	0,255
24.12.2013		1,078	0,258	0,857	0,257	0,219	0,319	0,510	0,260
25.12.2013		1,083	0,263	0,860	0,260	0,223	0,323	0,515	0,265
26.12.2013		1,087	0,267	0,863	0,263	0,226	0,326	0,520	0,270
27.12.2013		1,092	0,272	0,866	0,266	0,230	0,330	0,525	0,275
28.12.2013		1,096	0,276	0,869	0,269	0,233	0,333	0,530	0,280
29.12.2013		1,101	0,281	0,872	0,272	0,237	0,337	0,535	0,285
30.12.2013	09:15	1,105	0,285	0,875	0,275	0,240	0,340	0,540	0,290
31.12.2013		1,107	0,287	0,877	0,277	0,243	0,343	0,544	0,294
01.01.2014		1,109	0,289	0,879	0,279	0,245	0,345	0,548	0,298
02.01.2014		1,111	0,291	0,881	0,281	0,248	0,348	0,551	0,301
03.01.2014		1,113	0,293	0,883	0,283	0,250	0,350	0,555	0,305
04.01.2014		1,114	0,294	0,884	0,284	0,253	0,353	0,559	0,309
05.01.2014		1,116	0,296	0,886	0,286	0,255	0,355	0,563	0,313
06.01.2014		1,118	0,298	0,888	0,288	0,258	0,358	0,566	0,316
07.01.2014	09:15	1,120	0,300	0,890	0,290	0,260	0,360	0,570	0,320
08.01.2014		1,122	0,302	0,894	0,294	0,262	0,362	0,573	0,323
09.01.2014		1,123	0,303	0,898	0,298	0,263	0,363	0,575	0,325
10.01.2014		1,125	0,305	0,903	0,303	0,265	0,365	0,578	0,328
11.01.2014		1,127	0,307	0,907	0,307	0,267	0,367	0,580	0,330
12.01.2014		1,128	0,308	0,911	0,311	0,268	0,368	0,583	0,333
13.01.2014	09:45	1,130	0,310	0,915	0,315	0,270	0,370	0,585	0,335
14.01.2014		1,131	0,311	0,919	0,319	0,271	0,371	0,589	0,339
15.01.2014		1,133	0,313	0,922	0,322	0,273	0,373	0,592	0,342
16.01.2014		1,134	0,314	0,926	0,326	0,274	0,374	0,596	0,346
17.01.2014		1,136	0,316	0,929	0,329	0,276	0,376	0,599	0,349
18.01.2014		1,137	0,317	0,933	0,333	0,277	0,377	0,603	0,353
19.01.2014		1,139	0,319	0,936	0,336	0,279	0,379	0,606	0,356
20.01.2014	09:15	1,140	0,320	0,940	0,340	0,280	0,380	0,610	0,360

Datum	Kriechproben [mm]							
	M 3.1-196kg		M 3.2-196kg		M 4.1-196kg		M 4.2-196kg	
	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung
Startwert	9,600		0,130		7,630		9,440	
elastische Verformung	0,740	0,140	0,310	0,180	0,760	0,130	0,590	0,150
17.12.2013	0,755	0,155	0,325	0,195	0,790	0,160	0,620	0,180
18.12.2013	0,765	0,165	0,340	0,210	0,800	0,170	0,620	0,180
19.12.2013	0,770	0,170	0,345	0,215	0,805	0,175	0,625	0,185
20.12.2013	0,775	0,175	0,350	0,220	0,810	0,180	0,630	0,190
21.12.2013	0,778	0,178	0,353	0,223	0,813	0,183	0,631	0,191
22.12.2013	0,780	0,180	0,356	0,226	0,816	0,186	0,631	0,191
23.12.2013	0,783	0,183	0,359	0,229	0,819	0,189	0,632	0,192
24.12.2013	0,785	0,185	0,362	0,232	0,822	0,192	0,632	0,192
25.12.2013	0,788	0,188	0,365	0,235	0,825	0,195	0,633	0,193
26.12.2013	0,790	0,190	0,368	0,238	0,828	0,198	0,633	0,193
27.12.2013	0,793	0,193	0,371	0,241	0,831	0,201	0,634	0,194
28.12.2013	0,795	0,195	0,374	0,244	0,834	0,204	0,634	0,194
29.12.2013	0,798	0,198	0,377	0,247	0,837	0,207	0,635	0,195
30.12.2013	0,800	0,200	0,380	0,250	0,840	0,210	0,635	0,195
31.12.2013	0,803	0,203	0,383	0,253	0,843	0,213	0,637	0,197
01.01.2014	0,805	0,205	0,385	0,255	0,845	0,215	0,639	0,199
02.01.2014	0,808	0,208	0,388	0,258	0,848	0,218	0,641	0,201
03.01.2014	0,810	0,210	0,390	0,260	0,850	0,220	0,643	0,203
04.01.2014	0,813	0,213	0,393	0,263	0,853	0,223	0,644	0,204
05.01.2014	0,815	0,215	0,395	0,265	0,855	0,225	0,646	0,206
06.01.2014	0,818	0,218	0,398	0,268	0,858	0,228	0,648	0,208
07.01.2014	0,820	0,220	0,400	0,270	0,860	0,230	0,650	0,210
08.01.2014	0,821	0,221	0,402	0,272	0,861	0,231	0,653	0,213
09.01.2014	0,822	0,222	0,403	0,273	0,862	0,232	0,657	0,217
10.01.2014	0,823	0,223	0,405	0,275	0,863	0,233	0,660	0,220
11.01.2014	0,823	0,223	0,407	0,277	0,863	0,233	0,663	0,223
12.01.2014	0,824	0,224	0,408	0,278	0,864	0,234	0,667	0,227
13.01.2014	0,825	0,225	0,410	0,280	0,865	0,235	0,670	0,230
14.01.2014	0,827	0,227	0,411	0,281	0,867	0,237	0,670	0,230
15.01.2014	0,829	0,229	0,413	0,283	0,869	0,239	0,670	0,230
16.01.2014	0,831	0,231	0,414	0,284	0,871	0,241	0,670	0,230
17.01.2014	0,834	0,234	0,416	0,286	0,874	0,244	0,670	0,230
18.01.2014	0,836	0,236	0,417	0,287	0,876	0,246	0,670	0,230
19.01.2014	0,838	0,238	0,419	0,289	0,878	0,248	0,670	0,230
20.01.2014	0,840	0,240	0,420	0,290	0,880	0,250	0,670	0,230

Datum	Kriechproben [mm]							
	M 5.1-245kg		M 5.2-245kg		M 6.1-245kg		M 6.2-245kg	
	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung
Startwert	1,810		1,150		9,920		8,750	
elastische Verformung	0,920	0,110	0,320	0,170	0,100	0,180	0,920	0,170
17.12.2013	0,950	0,140	0,355	0,205	0,145	0,225	0,950	0,200
18.12.2013	0,960	0,150	0,360	0,210	0,150	0,230	0,960	0,210
19.12.2013	0,970	0,160	0,365	0,215	0,155	0,235	0,960	0,210
20.12.2013	0,970	0,160	0,370	0,220	0,160	0,240	0,965	0,215
21.12.2013	0,974	0,164	0,373	0,223	0,163	0,243	0,967	0,217
22.12.2013	0,977	0,167	0,376	0,226	0,166	0,246	0,968	0,218
23.12.2013	0,981	0,171	0,379	0,229	0,169	0,249	0,970	0,220
24.12.2013	0,984	0,174	0,382	0,232	0,172	0,252	0,971	0,221
25.12.2013	0,988	0,178	0,385	0,235	0,175	0,255	0,973	0,223
26.12.2013	0,991	0,181	0,388	0,238	0,178	0,258	0,974	0,224
27.12.2013	0,995	0,185	0,391	0,241	0,181	0,261	0,976	0,226
28.12.2013	0,998	0,188	0,394	0,244	0,184	0,264	0,977	0,227
29.12.2013	1,002	0,192	0,397	0,247	0,187	0,267	0,979	0,229
30.12.2013	1,005	0,195	0,400	0,250	0,190	0,270	0,980	0,230
31.12.2013	1,008	0,198	0,403	0,253	0,193	0,273	0,984	0,234
01.01.2014	1,010	0,200	0,405	0,255	0,196	0,276	0,989	0,239
02.01.2014	1,013	0,203	0,408	0,258	0,199	0,279	0,993	0,243
03.01.2014	1,015	0,205	0,410	0,260	0,203	0,283	0,998	0,248
04.01.2014	1,018	0,208	0,413	0,263	0,206	0,286	1,002	0,252
05.01.2014	1,020	0,210	0,415	0,265	0,209	0,289	1,006	0,256
06.01.2014	1,023	0,213	0,418	0,268	0,212	0,292	1,011	0,261
07.01.2014	1,025	0,215	0,420	0,270	0,215	0,295	1,015	0,265
08.01.2014	1,028	0,218	0,423	0,273	0,218	0,298	1,018	0,268
09.01.2014	1,030	0,220	0,427	0,277	0,220	0,300	1,020	0,270
10.01.2014	1,033	0,223	0,430	0,280	0,223	0,303	1,023	0,273
11.01.2014	1,035	0,225	0,433	0,283	0,225	0,305	1,025	0,275
12.01.2014	1,038	0,228	0,437	0,287	0,228	0,308	1,028	0,278
13.01.2014	1,040	0,230	0,440	0,290	0,230	0,310	1,030	0,280
14.01.2014	1,041	0,231	0,441	0,291	0,232	0,312	1,031	0,281
15.01.2014	1,043	0,233	0,443	0,293	0,234	0,314	1,033	0,283
16.01.2014	1,044	0,234	0,444	0,294	0,236	0,316	1,034	0,284
17.01.2014	1,046	0,236	0,446	0,296	0,239	0,319	1,036	0,286
18.01.2014	1,047	0,237	0,447	0,297	0,241	0,321	1,037	0,287
19.01.2014	1,049	0,239	0,449	0,299	0,243	0,323	1,039	0,289
20.01.2014	1,050	0,240	0,450	0,300	0,245	0,325	1,040	0,290

Datum	Kriechproben [mm]							
	M 7.1-196kg		M 7.2-196kg		M 8.1-196kg		M 8.2-196kg	
	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung	Messwert	Verformung
Startwert	ungültig		7,220		9,510		0,090	
elastische Verformung	0,950	0,000	0,360	0,140	0,660	0,150	0,280	0,190
17.12.2013	0,980	0,030	0,380	0,160	0,685	0,175	0,300	0,210
18.12.2013	0,990	0,040	0,390	0,170	0,690	0,180	0,310	0,220
19.12.2013	0,990	0,040	0,390	0,170	0,690	0,180	0,310	0,220
20.12.2013	1,000	0,050	0,390	0,170	0,700	0,190	0,320	0,230
21.12.2013	1,003	0,053	0,394	0,174	0,701	0,191	0,323	0,233
22.12.2013	1,006	0,056	0,398	0,178	0,702	0,192	0,326	0,236
23.12.2013	1,009	0,059	0,402	0,182	0,703	0,193	0,329	0,239
24.12.2013	1,012	0,062	0,406	0,186	0,704	0,194	0,332	0,242
25.12.2013	1,015	0,065	0,410	0,190	0,705	0,195	0,335	0,245
26.12.2013	1,018	0,068	0,414	0,194	0,706	0,196	0,338	0,248
27.12.2013	1,021	0,071	0,418	0,198	0,707	0,197	0,341	0,251
28.12.2013	1,024	0,074	0,422	0,202	0,708	0,198	0,344	0,254
29.12.2013	1,027	0,077	0,426	0,206	0,709	0,199	0,347	0,257
30.12.2013	1,030	0,080	0,430	0,210	0,710	0,200	0,350	0,260
31.12.2013	1,033	0,082	0,433	0,213	0,712	0,202	0,353	0,263
01.01.2014	1,035	0,085	0,435	0,215	0,714	0,204	0,355	0,265
02.01.2014	1,038	0,087	0,438	0,218	0,716	0,206	0,358	0,268
03.01.2014	1,040	0,090	0,440	0,220	0,718	0,208	0,360	0,270
04.01.2014	1,043	0,092	0,443	0,223	0,719	0,209	0,363	0,273
05.01.2014	1,045	0,095	0,445	0,225	0,721	0,211	0,365	0,275
06.01.2014	1,048	0,097	0,448	0,228	0,723	0,213	0,368	0,278
07.01.2014	1,050	0,100	0,450	0,230	0,725	0,215	0,370	0,280
08.01.2014	1,052	0,102	0,452	0,232	0,728	0,218	0,372	0,282
09.01.2014	1,053	0,103	0,453	0,233	0,730	0,220	0,373	0,283
10.01.2014	1,055	0,105	0,455	0,235	0,733	0,223	0,375	0,285
11.01.2014	1,057	0,107	0,457	0,237	0,735	0,225	0,377	0,287
12.01.2014	1,058	0,108	0,458	0,238	0,738	0,228	0,378	0,288
13.01.2014	1,060	0,110	0,460	0,240	0,740	0,230	0,380	0,290
14.01.2014	1,063	0,113	0,463	0,243	0,741	0,231	0,381	0,291
15.01.2014	1,066	0,116	0,466	0,246	0,743	0,233	0,383	0,293
16.01.2014	1,069	0,119	0,469	0,249	0,744	0,234	0,384	0,294
17.01.2014	1,071	0,121	0,471	0,251	0,746	0,236	0,386	0,296
18.01.2014	1,074	0,124	0,474	0,254	0,747	0,237	0,387	0,297
19.01.2014	1,077	0,127	0,477	0,257	0,749	0,239	0,389	0,299
20.01.2014	1,080	0,130	0,480	0,260	0,750	0,240	0,390	0,300

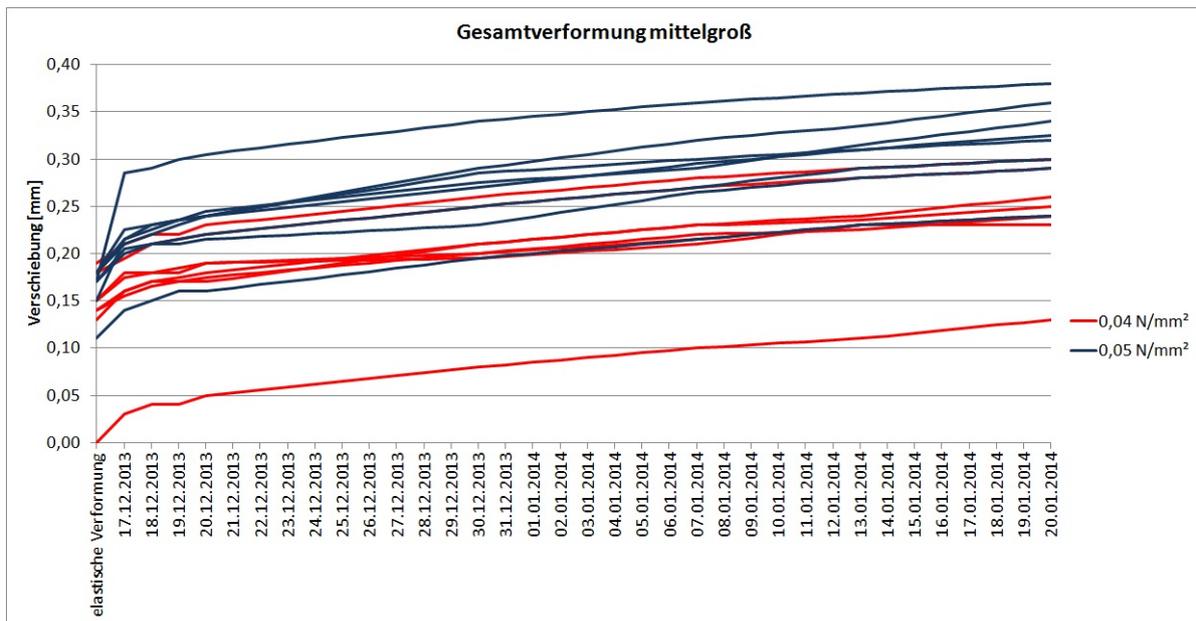


Abb. B.7.: Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

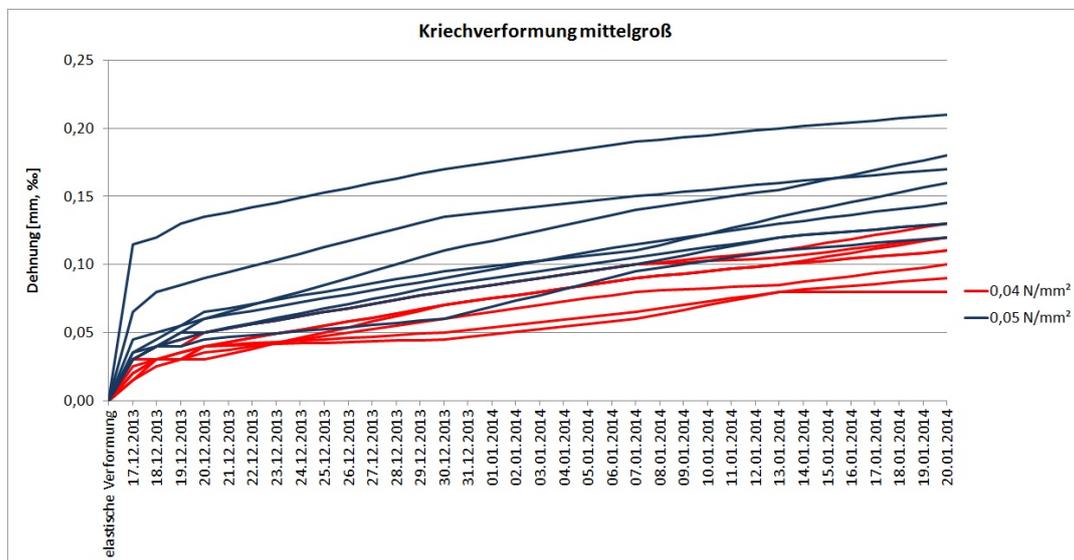


Abb. B.8.: Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge

Abbildungsverzeichnis

2.1. Aussteifung einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit Holz-Glas- Verbund- elementen	4
2.2. Überlagerung der Tragmechanismen <i>Schubfeld</i> und <i>Druckdiagonale</i> . . .	5
2.3. Unterschiedliche Anschlussdetails mit und ohne Klotzung	5
2.4. Federmodell für Schubfeldtheorie nach <i>Kreuzinger</i> und <i>Niedermaier</i> . . .	6
2.5. Fachwerktheorie für eine geklotzte Scheibe nach <i>Kreuzinger</i> und <i>Niedermaier</i>	7
2.6. Ersatzfedermodell nach <i>Hochhauser</i>	9
3.1. Kleinprobekörper für Langzeitversuche	11
3.2. Eingespannter Kleinprobekörper	12
3.3. Druckluftpistole mit eingespannter Silikonkartusche	12
3.4. Schematische Darstellung des Versuchsablaufs	13
3.5. Montage und Anordnung der Kleinproben	15
3.6. Kleinproben mit Messuhr	16
3.7. Versuchsaufbau Scherversuch	16
3.8. Spannungszyklus des Ermüdungsversuches	19
3.9. Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge . . .	20
3.10. Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge (ge- mittelt)	21
3.11. Verformung in den ersten zwei Wochen	21
3.12. Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge	22
3.13. Temperaturverlauf	24
3.14. Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit	24
3.15. Verformung und Klima der ersten 35 Tage	25
3.16. Messung der Verschiebung unter Schubbeanspruchung	26
3.17. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben ohne Vorbelastung	27

3.18. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 1 Tag mit $0,04 N/mm^2$ vorbelastet	28
3.19. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 1 Tag mit $0,05 N/mm^2$ vorbelastet	29
3.20. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 35 Tage mit $0,04 N/mm^2$ vorbelastet	31
3.21. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 35 Tage mit $0,05 N/mm^2$ vorbelastet	32
3.22. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 92 Tage mit $0,04 N/mm^2$ vorbelastet	33
3.23. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben, 92 Tage mit $0,05 N/mm^2$ vorbelastet	34
3.24. Bruchbild einer Probe 92 Tage belastet mit $0,04 N/mm^2$	35
3.25. Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven nach Dauer der Vorbelastung unter $0,04 N/mm^2$	36
3.26. Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven nach Dauer der Vorbelastung unter $0,05 N/mm^2$	37
3.27. Vergleich der Scherfestigkeiten nach unterschiedlicher Langzeitbelastung mit $0,04 N/mm^2$ zu Messwerten unbelasteter Kleinproben	38
3.28. Vergleich der Scherfestigkeiten nach unterschiedlicher Langzeitbelastung mit $0,05 N/mm^2$ zu Messwerten unbelasteter Kleinproben	38
3.29. Vergleich des Scherfestigkeitsverlaufs unter einer Dauerlast von $0,04 N/mm^2$	39
3.30. Vergleich des Scherfestigkeitsverlaufs unter einer Dauerlast von $0,05 N/mm^2$	40
3.31. Relativverschiebung der Klebefuge nach 91-tägiger Schubbelastung längs der Klebefuge	41
3.32. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben nach zyklischer Belastung	43
3.33. Detailschnitt durch die Klebefuge	44
3.34. Mittelgroßer Probekörper für Langzeitversuche	45
3.35. Versuchsaufbau der mittelgroßen Probekörper	46
3.36. Scherversuch an einem mittelgroßen Versuchskörper	47
3.37. Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge . . .	48
3.38. Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge	49
3.39. Vergleich der mittleren Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge	49

3.40. Spannungs-Verschiebungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefugen an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung	50
3.41. Spannungs-Verschiebungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefugen an einer Kleinprobe und mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung	51
3.42. Schematische Darstellung der mittelgroßen Versuchskörper	52
4.1. Schematische Darstellung von Beispielen der verschiedenen Arten von geklebten Glaskonstruktionen	55
5.1. Schematische Darstellung eines Kleinprobekörpers mit L-Leiste	64
5.2. Spannungs-Dehnungsdiagramm: Schubbelastung längs der Klebefuge an Kleinproben ohne Vorbelastung mit L-Leiste	65
5.3. Einlegen der Glasscheibe ins Silikonbett	66
5.4. Unterschiedliche Varianten für Abstandhalter	67
5.5. Schematische Darstellung eines HGV-Elements mit U-Leiste	68
5.6. Arbeitsschritte der Herstellung eines Trägers mit U-Leiste	68
B.1. Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge . . .	82
B.2. Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge (gemittelt)	82
B.3. Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge	83
B.4. Verformung und Klima der ersten 35 Tage	83
B.5. Temperaturverlauf	84
B.6. Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit	84
B.7. Gesamtverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge . . .	89
B.8. Kriechverformung unter Dauerschubbelastung längs der Klebefuge	89

Tabellenverzeichnis

3.1. Kleinproben Auflistung: Belastungsniveau und -dauer	14
3.2. Faktor für charakteristische Werte gem. EN 1990, Tabelle D.1	17
3.3. Die Variable $\tau_{\alpha\beta}$ in Abhängigkeit von der Zahl der Prüfkörper	18
3.4. Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben ohne Vorbelastung	27
3.5. Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 1 Tag mit $0,04 N/mm^2$ vorbelastet	29
3.6. Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 1 Tag mit $0,05 N/mm^2$ vorbelastet	30
3.7. Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 35 Tage mit $0,04 N/mm^2$ vorbelastet	31
3.8. Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 35 Tage mit $0,05 N/mm^2$ vorbelastet	32
3.9. Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 92 Tage mit $0,04 N/mm^2$ vorbelastet	34
3.10. Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben für 92 Tage mit $0,05 N/mm^2$ vorbelastet	35
3.11. Ergebnisse der Scherversuche von Kleinproben nach zyklischer Vorbelastung	43
3.12. Ergebnisse der Scherversuche mit mittelgroßen Probekörpern ohne Vor- belastung	50
5.1. Ergebnisse der Scherversuche mit Kleinproben ohne Vorbelastung mit L- Leiste	65

Quellenverzeichnis

- [1] NEUBAUER, Georg ; SCHOBER, Klaus P.: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen / Holzforschung Austria. Wien, 2008. – Forschungsbericht
- [2] EDL, Thomas ; SCHOBER, Klaus P.: Statisch wirksame Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zur Aussteifung von Holzbauten / Holzforschung Austria. Wien, 2005. – Forschungsbericht
- [3] *ETAG Nr. 002-1 - Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen.* Brüssel : Österreichisches Institut für Bautechnik, 1998
- [4] TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN, TRAGWERKSPLANUNG UND INGENIEURHOLZBAU (ITI): Entwicklung und Langzeituntersuchungen von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen mit gleichzeitiger Verklebung und Verklotzung, in Bearbeitung. Wien, 2014. – Forschungsbericht
- [5] HOCHHAUSER, Werner: *Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben.* Wien, Technische Universität Wien, Dissertation, 2011
- [6] NEUBAUER, Georg ; SCHOBER, Klaus P.: *Handbuch für den Einsatz von Holz-Glas-Verbundelementen; für Lizenznehmer des HFA-Patents Nr. 502470.* 2008
- [7] HOCHHAUSER, Werner ; WINTER, Wolfgang ; KREHER, Klaus: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen / Technische Universität Wien. Wien, 2011. – Forschungsbericht
- [8] KREUZINGER, Heinrich ; NIEDERMEIER, Peter: Glas als Schubfeld / Tagungsband Ingenieurholzbau; Karlsruher Tage. 2005. – Forschungsbericht
- [9] *ÖNORM EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung.* Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2013
- [10] KRÄTSCHMER, Thomas: *Interview.* 2014

- [11] *ÖNORM EN 302-1: Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit.* Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2011
- [12] *OIB - Richtlinie 4.* Wien : Österreichisches Institut für Bautechnik, 2007
- [13] NEUBAUER, Georg: *Interview.* 2014
- [14] HOCHHAUSER, Werner: *Interview.* 2014
- [15] MARCIN, Kozłowski ; SERRANO, Erik ; ENQUIST, Bertil: Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference. In: *Experimental investigations on timber-glass composite I-beams*, 2014
- [16] WEISSENSTEINER, Franz: *Holz-Glas-Verbundkonstruktionen im Einsatz an thermischen Pufferzonen. Prototypischer Einsatz am Beispiel eines Anbaus.* Wien, Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 2013