

Erarbeitung von Beurteilungsverfahren für angeklebte Fassadenbekleidungen

T 1279

T 1279

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

TU Berlin · Polymertechnik, Kunststofftechnikum
Kaiserin-Augusta-Allee 5, D-1000 Berlin 21
Sekretariat: (030) 314-4217
Betriebsbüro: (030) 314-5035

FACHBEREICH 17
WERKSTOFF-
WISSEN-
SCHAFTEN

Institut für
Nichtmetallische
Werkstoffe

Polymertechnik
Kunststofftechnikum

Prof. Dr. H. Käufer

"Erarbeitung von Beurteilungsverfahren
für angeklebte Fassadenbekleidungen"

Forschungsvorhaben Az.: IV/1-5-149/77

A b s c h l u ß b e r i c h t

Wissenschaftliche Leitung: o.Prof. Dr. H. Käufer

Wissenschaftliche Bearbeitung:

Dipl.-Ing. K.-D. Fischer

Dipl.-Chem. G. Grundmann

Dipl.-Chem. D. Nölte

Inhaltsverzeichnis	Seite
Häufig verwendete Zeichen	1
Häufig verwendete Indizes	1
1. Grundlagen	2
1.1 Aufgabenstellung	2
1.2 Die Unterkonstruktionshalter	3
1.2.1 Oberflächenvorbehandlung der Unterkonstruktionshalter	5
1.2.2 Einfluß der Halterklebfläche	8
1.3 Klebstoff und Verklebung	8
1.3.1 Der Klebstoff	8
1.3.1.1 Auftragen des Klebstoffes	9
1.3.2 Zugfestigkeit des Klebstoffes	9
1.3.3 Festigkeit der formschlußunterstützten Klebung	12
1.3.4 Festigkeit bei reinem Formschluß der Halterfügeflächen	14
1.3.5 Der Einfluß von Thixotropierungsmitteln	16
1.3.6 Einfluß der Art des Klebstoffauftrags	18
1.3.6.1 Ein- und beidseitiges Auftragen des Klebstoffes	18
1.3.6.2 Auftrag mit Zahnpachtel	20
1.3.7 Einfluß der Dicke der Klebstoffschicht	20
1.4 Der Untergrund	22
1.4.1 Klinkersteine	22
1.4.2 Grundwerte der Festigkeit der Steine	23
1.4.3 Einfluß von Staub auf der Steinoberfläche	25
1.4.4 Einfluß der Steinfeuchtigkeit	25
1.4.4.1 Einfluß einer Trocknung des Untergrundes	26
1.4.4.2 Einfluß bei Verwendung eines Primers	26
1.5 Fehlerbetrachtung	28

		Seite
2.	Stirnzugversuche	29
2.1	Durchführung der Stirnzugversuche	29
2.1.1	Festigkeit im Stirnzugversuch ohne Vorbeanspruchung	29
2.2	Festigkeit nach Vorbeanspruchung der Verklebung	32
2.2.1	Festigkeit nach einer Wasserlagerung der Verklebungen	32
2.2.2	UV-Bestrahlung	34
2.2.3	Vorbeanspruchung mit gezielten Temperaturwechseln	37
2.3	Festigkeit bei vorgegebenen Klimata während der Verklebung	41
2.4	Stirnzugversuche bei erhöhter Temperatur	46
3.	Scherversuche	47
3.1	Scherfestigkeit ohne Vorbeanspruchung	47
3.2	Scherfestigkeit nach Vorbeanspruchung der Verklebung	51
3.2.1	Festigkeit nach einer Wasserlagerung	51
3.2.2	Vorbeanspruchung mit gezielten Temperaturwechseln	52
3.3	Scherfestigkeit bei erhöhter Temperatur	54
3.4	Scherfestigkeit bei vorgegebenem Klima während der Verklebung	56
4.	Biegeversuche	58
4.1	Biegeversuche ohne Vorbelastung	60
4.2	Biegeversuche nach einer Vorbelastung	64
4.3	Biegeversuche bei erhöhter Temperatur	68

	Seite	
5.	Praxisnahe Überprüfung der Ergebnisse an einer Musterfassade auf Sichtbetonuntergrund	70
5.1	Standort der Versuchsfassaden	70
5.2	Musterfassade I aus Asbestzement- platten (Westseite)	72
5.3	Musterfassade II aus PVC-Platten (Ostseite)	75
5.4	Durchführung der Verklebung	77
5.5	Prüfung an den verklebten Haltern nach der Aushärtungszeit	77
5.6	Vergleich mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens	78
6.	Zusammenfassung und Folgerungen für die Praxis	80
6.1	Erstellung eines Klebsystems Halter/Klebstoff/Untergrundmaterial	80
6.2	Durchführung der Verklebung	83
6.3	Die erzielten Festigkeiten bei unter- schiedlichen Lastfällen und Bean- spruchungen	84
6.4	Gesichtspunkte der Qualitätssicherung	87
6.5	Hinweise für weitere Forschung	88
7.	Literaturverzeichnis	89
	Anhang	91

Häufig verwendete Zeichen

A	Fläche
F	Kraft
G	Gewicht
M	Moment
S	Standardabweichung
T	Temperatur
X _{5%}	5% Quantile
a	Hebelarm
d	mittlere Schichtdicke
t	Zeit
v	Variationskoeffizient
φ	rel. Luftfeuchtigkeit
δ	Spannung
τ	Scherspannung

Häufig verwendete Indizes

B	Bruch
K	Klebung
b	Biegung
m	Mittelwert
s	Scherung
z	Zug

Für die Tabellen gilt: Für die Spalte Bruch bedeutet

S	Bruch im Stein
S/K	Bruch in der Grenzfläche Stein/Klebstoff
K	Bruch im Klebstoff
K/H	Bruch in der Grenzfläche Klebstoff/Halter

1. Grundlagen

1.1 Aufgabenstellung

Das Kleben von Metallen und Kunststoffen hat heute durch seine hochentwickelte Technologie Eingang in die unterschiedlichsten Industriezweige gefunden. Es stellt bei gezielter Anwendung und unter Berücksichtigung der Randbedingungen ein optimales Fügeverfahren dar. Die beim Kleben sowohl zwischen Metallpartnern als auch verschiedenen Kunststoffmaterialien erzielte gute Haftung gestattet den Einsatz der Klebverbindungen auch bei tragenden Konstruktionen.

Gerade bei flächenhaft verklebten Elementen werden ausgezeichnete Festigkeiten erzielt. Es liegt daher nahe, das Kleben als Befestigungsverfahren für Fassadenbekleidungen anzuwenden. Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Ermittlung von Meßwerten und Parametern, die eine möglichst eindeutige Aussage über das Festigkeitsverhalten der Verklebung zulassen. Dazu sollen Prüfmethoden untersucht und gegebenenfalls neue entwickelt werden. Als Proben werden Stein- oder Betonuntergrundmaterialien mit Unterkonstruktionshaltern aus Aluminium verklebt. Als Klebstoff wird ein Epoxidharz - System verwendet.

Zuerst wird in grundlegenden Versuchen ein Klebsystem gewählt. Es werden u.a. Geometrieinfluß von Halter und Klebstoffschicht, der Einfluß von Zusätzen zum Klebstoff sowie die Vorbehandlung der Klebpartner untersucht.

Um das Festigkeitsverhalten bei verschiedenen Beanspruchungen zu untersuchen, werden Stirnzug-, Scher- und Biegeversuche durchgeführt. Dabei werden gezielte Vorbeanspruchungen wie Wasserlagerung, Frost- Wärme-Wechsel, UV-Bestrahlung und das Verhalten bei erhöhter Temperatur berücksichtigt.

Mit diesen Untersuchungen soll eine Grundlage geschaffen werden, Möglichkeiten und Grenzen des Gebietes Fassadenkleben beurteilen zu können und so eine Zulassung für den allgemeinen Bausektor zu ermöglichen.

1.2 Die Unterkonstruktionshalter

Die bei den Untersuchungen verwendeten Unterkonstruktionshalter sind Halter aus stranggepreßtem Aluminium. Die äußeren Abmessungen sind 50 x 100 mm. Zur Anbringung der Unterkonstruktion sind sie mit einer Führungsnut versehen, die bei den Prüfungen als Aufnahme für die Prüfapparatur verwendet wird. Es wurden zwei verschiedene Haltertypen erprobt: Ein Halter mit glatter, unprofilierter Klebfläche (Bild 1) und ein Halter mit profilierter Klebfläche und wesentlich steiferer Bauart (Bild 2).

Für die Versuche wurde der Halter mit der profilierten Klebfläche verwendet, da die Haftung des Klebstoffes auf dem Halter durch zusätzlichen Formschluß, d.h. größere Fügefläche, sowie mechanische Verankerung verbessert wird. Eine Ätzung der Halterfläche erweist sich dabei als nicht erforderlich, entfetten und schmirgeln reicht, im Gegensatz zum glatten Halter, aus (s. auch Kap. 1.2.1). Ein weiteres Plus für den profilierten Halter ist seine größere Steifigkeit im Vergleich zum glatten Halter. Die folgenden Ausführungen beziehen sich, falls nicht anders vermerkt, immer auf den Halter mit Formschluß nach Bild 2.

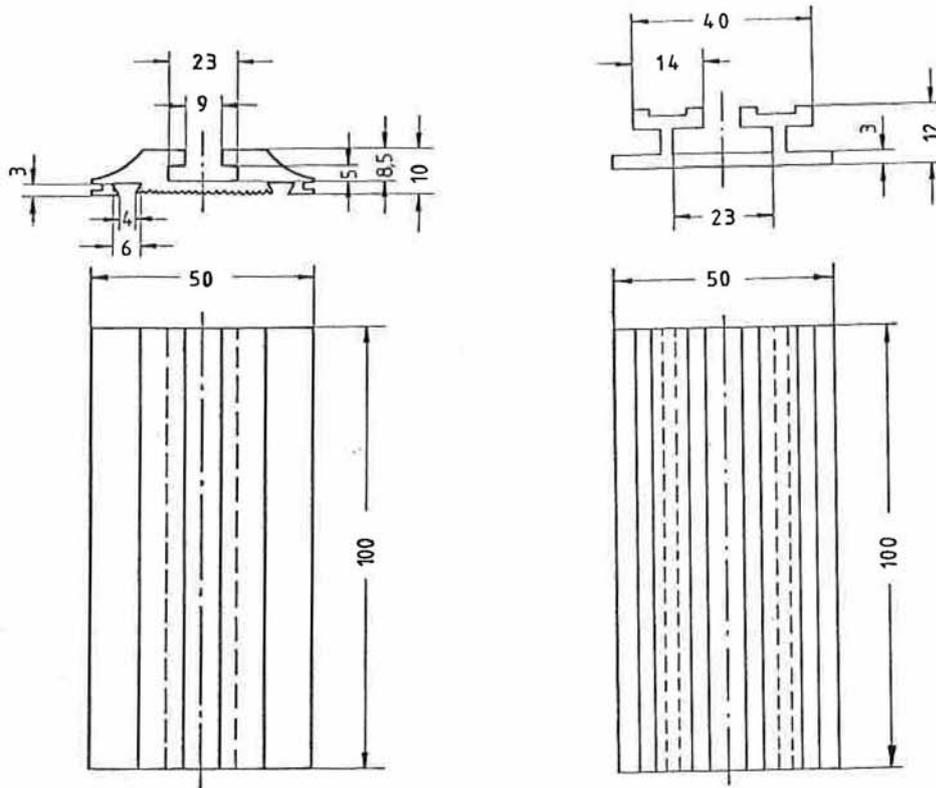


Bild 1: Skizze der Unterkonstruktionshalter mit glatter und profilierter Klebfläche

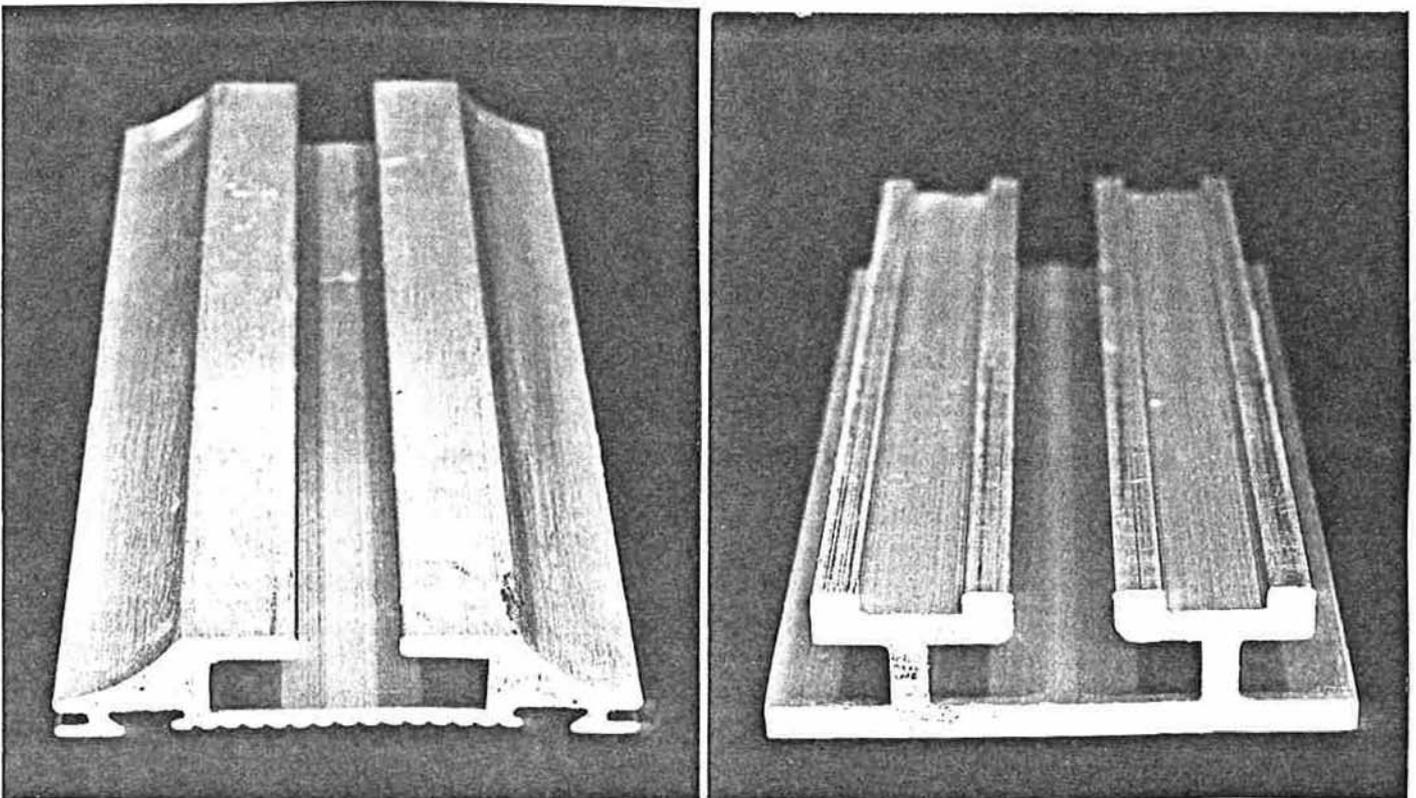


Bild 2: Unterkonstruktionshalter aus Aluminium, glatte und profilierte Klebfläche

1.2.1 Oberflächenvorbehandlung der Unterkonstruktionshalter

Um den Einfluß verschiedener Oberflächenvorbehandlungen der Fügeflächen der Alu-Halter festzustellen, wurden getrocknete und entstaubte Hochlochklinkersteine (s.Pkt. 1.4) mit unterschiedlich vorbehandelten Haltern mit profilierter Klebfläche verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Es wurden unbehandelte, entfettete, geätzte (2 Minuten in 2%ige NaOH gelegt) und nach dem Gebrauch gereinigte Halter(wieder verwendet) untersucht.

Die Verklebungen wurden einer Stirnzugprüfung (Bild 3) unterzogen (Tabelle 1).

Die mittleren Bruchkräfte unterscheiden sich wenig. Der Bruch erfolgte ausschließlich im Stein. Der Einfluß der Haltervorbehandlung auf die Festigkeit der Verklebung ist als gering anzusehen. Das trifft aber nur auf den Halter mit der profilierten Klebfläche (Bild 2) zu. Wie auch in / 2,3,4 / erwähnt, ist bei glatter Klebfläche entfetten und aufrauen unerläßlich und ein Ätzen der Klebfläche zu empfehlen.

	F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]	
	Halter un- behandelt	Bruch	Halter ent- fettet	Bruch	Halter ge- ätzt	Bruch	wiederverwen- dete Halter	Bruch
1	4370	S	4530	S	4760	S	4430	S
2	3090	S	4330	S	4140	S	4290	S
3	5100	S	4410	S	4840	S	4460	S
4	3460	S	3730	S	3580	S	5100	S
5	4400	S			3920	S	4420	S
$F_{B_{\text{mittel}}}$	4072		4250		4248		4540	
X 5% [N]	2443		3356		3076		3836	
σ [N/mm ²]	0,8		0,85		0,85		0,91	
t [mm]	---		1,0		1,36		---	

$$A_K = 50\text{cm}^2$$

Tabelle 1: Fügefestigkeit von Klebungen bei unterschiedlicher Vorbehandlung der profilierten Halterfläche

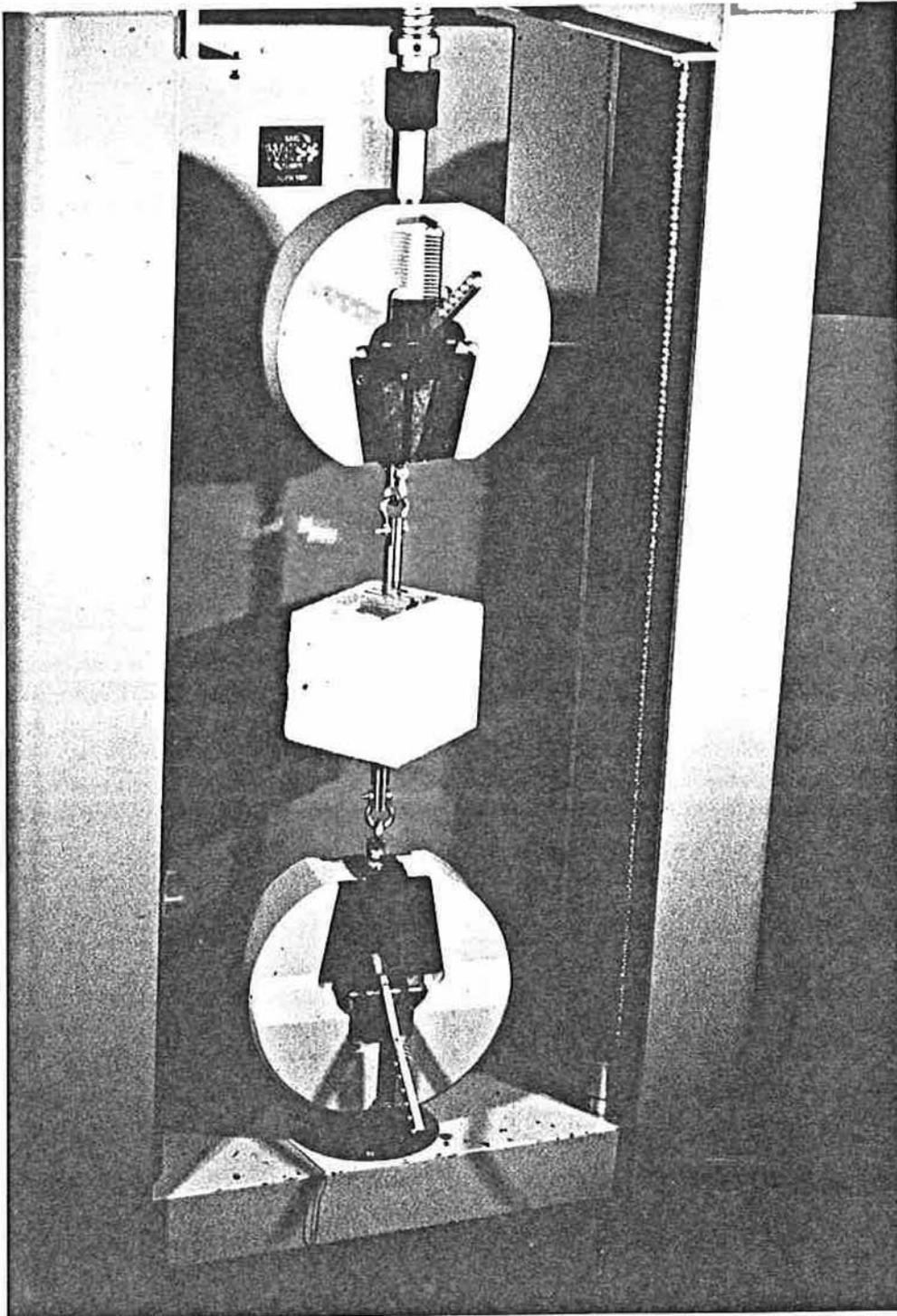


Bild 3: Stirnzugprüfapparatur

1.2.2 Einfluß der Halterklebfläche

Um den Einfluß der Größe der Halterklebfläche festzustellen, wurden glatte Halter verschiedener Größe im Rahmen von Vorversuchen untersucht. Bei Vorversuchen mit unterschiedlicher, glatter Halterfläche zeigte sich, daß die Bruchfestigkeit nicht proportional zur Fläche zunimmt. Der Zusammenhang zwischen Bruchkraft und Fläche ist nicht linear. Es läßt sich auf keinen Fall durch Verdoppelung der Klebfläche auch die Bruchfestigkeit verdoppeln. Diese liegt dann auf jeden Fall niedriger /2/.

Wegen der relativ geringen Anzahl der Versuche und der relativ großen Streubreite ist es leider nicht möglich, genauere Aussagen zu machen. Es wird daher auch nicht näher darauf eingegangen. Bei den folgenden Versuchen wurde deshalb die Klebfläche immer konstant gehalten (50 cm^2).

1.3 Klebstoff und Verklebung

1.3.1 Der Klebstoff

Als Klebstoff wurde ein Epoxidharz-System gewählt, weil diese für den Bausektor besonders geeignet sind. Es wurden Vorversuche mit verschiedenen Epoxidharz-Klebstoffen (Bostik 2916, Araldit AV 138 M, Araldit FRL) gemacht. Für die Verklebungen wurde dann der Klebstoff Bostik 2916 gewählt. Es handelt sich dabei um einen Zweikomponenten-Reaktionsklebstoff auf Epoxidharzbasis, geeignet für Außen- und Innverklebungen. Er besitzt eine gute Beständigkeit gegenüber Alterung, Wassereinwirkung und Chemikalien. Der Klebstoff hat ein spezifisches Gewicht von 1,72 und wird im Verhältnis 5 Teile Harz zu 1 Teil Härter gemischt. Nach Angaben des Herstellers beträgt die Aushärtzeit 4-6 Stunden und die Endhärte wird bei Auslagerung in Raumtemperatur nach 24 h erreicht.

1.3.1.1 Auftragen des Klebstoffes

Das Auftragen des Klebstoffes erfolgte zweckmäßigerweise mit einer Klebpistole und Klebstoff-Härter-Kartuschen (Bild 4). Die am Institut getestete Klebpistole, ausgerüstet mit einem statischen Mischrohr für Harz und Härter, garantiert gute Handhabung und saubere Klebungen mit konstantem Mischungsverhältnis Harz/Härter. Auch die Gefahr einer vorzeitigen Aushärtung des Klebstoffes besteht nicht.

1.3.2 Zugfestigkeit des Klebstoffes

Für die festigkeitsmäßige Charakterisierung der Klebstoffe geben die Hersteller nur die Zugscherfestigkeiten bzw. Abschälfestigkeiten an, ermittelt an einfachen oder doppelten Überlappungsverbindungen.

Diese sind für das Forschungsprojekt Fassadenkleben nur bedingt geeignet, weil sie die unterschiedlichen Klebpartner und die vorkommenden Belastungen nicht erfassen. Es wurde daher die Zugfestigkeit des Klebstoffes untersucht, um geeignete Werkstoffkennwerte zu erhalten. Dazu wurden Prüfstäbe mit einer Querschnittsfläche von $1,2 \text{ cm}^2$ aus gefülltem und ungefülltem Klebstoff gegossen. Bei den gefüllten Stäben wurde 1% Sylodex als Thixotropierungsmittel zugegeben. Es wurde dazu eine Metallform verwendet, die aus drei Platten aufgebaut ist. Durch diese Platten wird ein Formnest mit den Abmessungen $20 \times 6 \times 150 \text{ mm}$ gebildet, das mit Klebstoff ausgegossen wurde. Nach der Aushärtung wurden die so entstandenen Prüfstäbe (in Anlehnung an DIN 53 457) einer Zugprüfung (in Anlehnung an DIN 53 455) unterworfen. Dieser Versuch wurde für gefüllten und ungefüllten Klebstoff durchgeführt (Tab. 2).

Die Festigkeit des ungefüllten Klebstoffes ist ungefähr dreimal so hoch wie die des mit einem Thixotropierungsmittel gefüllten Klebstoffes. Aus verarbeitungstechnischen Gründen läßt sich auf ein Thixotropierungsmittel nicht verzichten. Die geringere Festigkeit des gefüllten Klebstoffes erscheint aber als ausreichend, da die Festigkeit des Steinmaterials wesentlich niedriger ist.

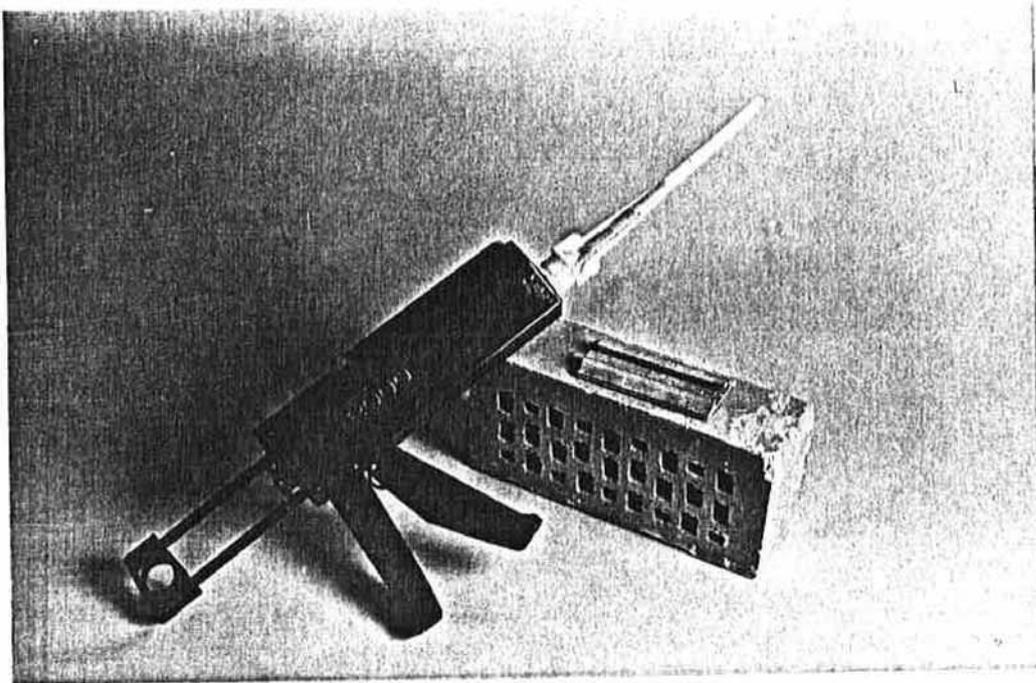


Bild 4: Handhabung der Klebung mit Klebpistole und angeschraubtem statischem Mischrohr

	F_B [N] Bostik 2916 + 1% Sylodex	F_B [N] ungefüllt
1	838	2585
2	837	2110
3	735	2050
4	840	2525
5	816	
6	759	
7	730	
$F_{B_{\text{mittel}}}$	794	2317
X 5% [N]	686	1673
σ [N/mm ²]	6,6	19,3
A_K [mm] ²	120	120

Tabelle 2: Zugfestigkeit des Klebstoffes

1.3.3 Festigkeit der formschlußunterstützten Klebung

Um die Festigkeit der formschlußunterstützten Klebung zu untersuchen, wurden je zwei geätzte, profilierte Halter miteinander verklebt (Bild 5).

Durch die Profilierung vergrößert sich die Klebfläche, durch die Schwalbenschwanznuten kommt es noch zu einem zusätzlichen Formschluß. Leider ist ein Vergleich mit zwei Haltern mit glatter Klebfläche nicht möglich, da solche Versuche im Rahmen des Arbeitsprogrammes nicht durchgeführt wurden.

Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex als Thixotropierungsmittel (dazu siehe Pkt. 1.3.5) verwendet. Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen einer Stirnzugprüfung unterzogen (Tab. 3). Der Bruch erfolgte erwartungsgemäß im Klebstoff, es erfolgte also reiner Kohäsionsbruch.

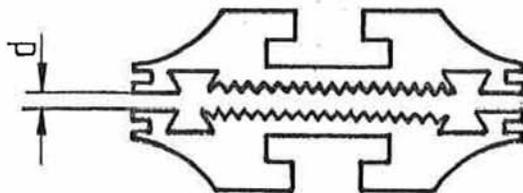


Bild 5: Skizze der Verklebung

Es wurde für die Verklebung ein Grundwert der Festigkeit von $1,3 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Es wird im folgenden eine Prüfung durchgeführt, die versucht, die Auswirkung des reinen Formschlusses zu ermitteln.

	F_B [N]	Bruch
1	7170	K
2	6900	K
3	6850	K
4	7740	K
5	7050	K
6	6200	K
7	5720	K
8	5780	K
9	6670	K
10	5710	K
$F_{B_{\text{mittel}}}$	6500	
X 5% [N]	5232	
σ [N/mm ²]	1,30	
d [mm]	1,3	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 3: Formschlußunterstützte Festigkeit

1.3.4 Festigkeit bei reinem Formschluß der Halterfügeflächen

Dazu wurden die Halterfügeflächen der zu verklebenden Halter mit Formtrennmittel besprüht, um eine Adhäsion zu vermeiden. Dann wurden zwei Halter miteinander vergossen (Bild 7). Als Gießharz wurde der Klebstoff Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach der Aushärtung wurden die Formschlußverbindungen, wie im vorhergehenden Kapitel die formschlußunterstützten Klebungen, einer Stirnzugprüfung unterzogen. Der Bruch erfolgte in den schmalen Stegen der Schwalbenschwanznuten im Klebstoff. Die Ergebnisse zeigen, daß eine Unterstützung durch den Formschluß bei dieser Fügeflächengestaltung erreicht wird.

Die errechnete Spannung bei einer Klebfläche von 800 mm^2 beträgt im Mittel $3,63 \text{ N/mm}^2$. Es fällt allerdings auf, daß bei einem normal verklebten System ohne Trennmittel nur eine Spannung von $1,3 \text{ N/mm}^2$ erreicht wird. Daraus ist der Schluß zu ziehen, daß das Trennmittel die Adhäsion zwischen Klebstoff und restlicher Halterfläche nicht vollständig verhindert hat, so daß in Wirklichkeit eine größere Klebfläche als die bei der Berechnung zugrunde gelegten 800 mm^2 vorhanden war. Zum Vergleich dazu: bei Zugversuchen mit aus Klebstoff gegossenen Zugstäben (siehe Kapitel 1.3.2) wurde eine Zugspannung von $6,6 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Die unterschiedlichen Werte liegen zum Teil auch darin begründet, daß sich an Normprüfkörpern ermittelte Materialkennwerte nicht unbedingt auf Bauteilversuche übertragen lassen /1/. Außerdem ist zu bedenken, daß nach dem Abriß einer der beiden Klebstoffstege in den Schwalbenschwanznuten kurzzeitig bis zum vollständigen Bruch die Bruchkraft nur an der halben Klebfläche, dem zweiten Klebstoffsteg, wirkt. Diese Problematik kennt man auch bei der Prüfung von sogenannten zweiseitigen verklebten Überlappungen, wo nie die doppelten Bruchkräfte wie bei einer einschneitigen Überlappung erreicht werden (bei gleicher Überlapplänge).

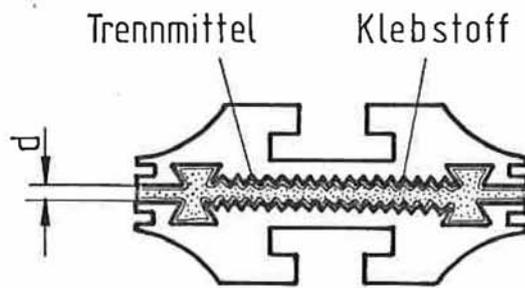


Bild 7: Schematische Darstellung der reinen Formschlußverbindung

	F_B [N]	Bruch	Spannung [N/mm ²]
1	2982	K	3,66
2	3004	K	3,76
3	2739	K	3,42
4	2930	K	3,66
$F_{B_{\text{mittel}}}$	2914		3,63
X 5% N	2600		
d [mm]	1,3		

$$A_K = 800 \text{ mm}^2$$

Tabelle 4: Festigkeit beim reinen Formschluß

1.3.5 Der Einfluß von Thixotropierungsmitteln

Bei der Durchführung der Verklebung hat sich gezeigt, daß der verwendete handelsübliche Klebstoff Bostik 2916 ohne Zumischung eines Füllstoffes zu dünnflüssig ist um eine Verklebung bei senkrechter Lage der Klebfläche durchzuführen. Deshalb mußte dem Klebstoff ein Thixotropierungsmittel zugesetzt werden. Dabei wurden zwei verschiedene Mittel getestet. Einmal Aerosil, ein hochaktives Siliciumdioxid (Kieselsäure) und zum anderen Sylodex, eine spezial behandelte Mineralfaser.

Um den Einfluß dieser notwendigen Zumischung auf die Fügefestigkeit zu untersuchen (s. auch Pkt. 1.3.2), wurden getrocknete und entstaubte Steine mit entfetteten und geschmirgelten, profilierten Haltern verklebt. Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen einer Stirnzugprüfung unterzogen. Die erhaltenen Stirnzugfestigkeiten sind in Tabelle 5 im Vergleich zum ungefüllten Klebstoff aufgeführt.

	F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]	
	Bostik 2916	Bruch	Bostik 2916 + 1% Sylodex	Bruch	Bostik 2916 + 1% Aerosil	Bruch
1	5990	S	4850	S	5100	S
2	5620	S	4310	S	4700	S
3	5060	S	5170	S	5090	S
4	4950	S	4080	S	4780	S
5	5310	S	4948	S	5380	S
6	4540	S				
7	4720	S				
8	5330	S				
9	5350	S				
10	4290	S				
F_B mittel	5116		4670		5010	
X 5% [N]	4127		3642		4374	
σ [N/mm ²]	1,02		0,93		1,0	
d [mm]	3,4		1,8		3,2	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 5: Einfluß von Thixotropierungsmitteln

Der Bruch erfolgte immer im Stein. Schwerwiegende Unterschiede im Vergleich zu Verklebungen mit ungefülltem Klebstoff sind nicht festzustellen.

Die in Kap. 1.3.1 ermittelte Festigkeitsminderung durch den Füllstoff bei gegossenen Prüfstäben kommt hier nicht zum Tragen. Die Steinfestigkeit stellt hier den entscheidenden Faktor dar. Aufgrund dieser Ergebnisse und der besseren Verarbeitbarkeit wurde für alle folgenden Versuche (falls nicht anders erwähnt) 1% Sylodex als Thixotropierungsmittel festgelegt.

1.3.6 Einfluß der Art des Klebstoffauftrags

1.3.6.1 Ein- und beidseitiges Auftragen des Klebstoffes

Um zu prüfen, ob das einseitige oder beidseitige Auftragen der Klebstoffschicht einen Einfluß auf die Festigkeit der Verklebung hat, wurden getrocknete und entstaubte Steine mit Haltern mit glatter Klebfläche verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 verwendet. Der Klebstoffauftrag erfolgte sowohl auf dem Halter als auch auf dem Stein (also beidseitig), sowie nur auf dem Halter (einseitig). Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen einer Stirnzugprüfung unterzogen (Tab. 6).

In beiden Versuchsreihen trat der Bruch immer im Stein auf. Ein wesentlicher Unterschied bei den Bruchwerten beider Versuchsreihen konnte nicht festgestellt werden. Ein beidseitiger Klebstoffauftrag erscheint daher nicht als notwendig. Im weiteren werden die Verklebungen immer mit einseitigem Klebstoffauftrag auf den Unterkonstruktionshalter ausgeführt.

	F_B [N] einseitiger Klebstoffauftrag	Bruch	F_B [N] beidseitiger Klebstoffauftrag	Bruch	F_B [N] Auftrag mit Zahnpachtel	Bruch
1	5100	S	5600	S	5640	S
2	4700	S	4590	S	4730	S
3	5090	S	5270	S	4680	S
4	4780	S	5630	S	5480	S
5	5380	S	5010	S	4780	S
			5090	S		
$F_{B\text{mittel}}$	5010		5198		5262	
X 5% [N]	4374		4336		4049	
σ [N/mm ²]	1,0		1,04		1,05	
d [mm]	3,2		1,3		1,4	

Tabelle 6: Einfluß der Art des Klebstoffauftrags

1.3.6.2 Auftrag mit Zahnpachtel

Anschließend wurde untersucht, ob der Auftrag mit Hilfe eines Zahnpachtels einen Einfluß auf die Festigkeit der Verklebung hat. Dazu wurden wieder getrocknete und entstaubte Steine mit Haltern mit glatter Klebfläche verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 verwendet.

Der Klebstoff wurde einseitig mit einem Zahnpachtel auf der Halterfläche aufgetragen. Die Klebschichtdicke betrug nach dem Andrücken durchschnittlich 1,4 mm.

Nach dem Aushärten wurden die Verklebungen einer Stirnzugprüfung unterworfen. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 6 den Ergebnissen für ein- und beidseitigen Klebstoffauftrag gegenüber gestellt.

Auch hier trat der Bruch stets im Stein auf. Ein wesentlicher Unterschied bei den Bruchwerten konnte nicht festgestellt werden. Ein Auftragen mit dem Zahnpachtel ist daher nicht erforderlich.

1.3.7 Einfluß der Dicke der Klebstoffschicht

Um den Einfluß der Schichtdicke des Klebstoffes auf das Festigkeitsverhalten der Verklebung zu untersuchen, wurden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlicher, aber konstanter Klebschichtdicke geprüft. Es wurde einmal eine Klebschichtdicke von 1,5 mm und einmal eine von 5 mm vorgegeben.

Dazu wurden getrocknete und entstaubte Steine mit geätzten Haltern verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen einer Stirnzugprüfung unterworfen (Tabelle 7).

Der Bruch trat wiederum immer im Stein auf. Große Unterschiede im Bruchverhalten konnten nicht festgestellt werden. Die in vielen Literaturstellen festgestellte Abhängigkeit der Festigkeit von der Dicke der Klebstoffschicht /8, 9/ konnte hier nicht festgestellt werden. Auch die Tendenz einer abnehmenden Festigkeit mit wachsender Klebschichtdicke läßt sich nicht erkennen. Der Grund hierfür

liegt wohl in der niedrigen Festigkeit des Steinmaterials, die ein Eindringen in die Grenzwerte der Klebstofffestigkeit nicht zuläßt.

	F_B [N] Schichtdicke 1,5 mm	Bruch	F_B [N] Schichtdicke 5 mm	Bruch
1	4760	S	4980	S
2	4140	S	4100	S
3	4840	S	4530	S
4	3580	S		
5	3920	S		
$F_{B_{\text{mittel}}}$	4248		4537	
X 5% [N]	3075		3332	
σ [N/mm ²]	0,85		0,9	

Tabelle 7: Einfluß der Klebstoffschichtdicke

1.4 Der Untergrund

1.4.1 Klinkersteine

Zur Ermittlung eines optimalen Untergrundmaterials für die Versuche wurden Vorversuche mit Gasbeton- Betonverbund, Bimsvoll- und Hochlochklinkersteinen durchgeführt. Dazu wurden die erwähnten Steine mit Haltern verklebt und einer Stirnzugprüfung unterzogen. Der Bruch erfolgte wie erwartet immer im Stein. Von dem geprüften Material wiesen die Hochlochklinkersteine die höchste Festigkeit aus, und somit ist auch die Wahrscheinlichkeit für einen Bruch im Klebstoff bei späteren Versuchen nach diversen Vorbeanspruchungen hier am größten. Deshalb wurden als Versuchsmaterial Hochlochklinkersteine B 240/115/75 (DF) (Bild 8) der Firma Jakobi Tonwerke verwendet. Die Abmessungen der Steine sind 240 x 115 x 75 mm. Wenn im folgenden von Steinen gesprochen wird, sind immer diese Hochlochklinkersteine gemeint.

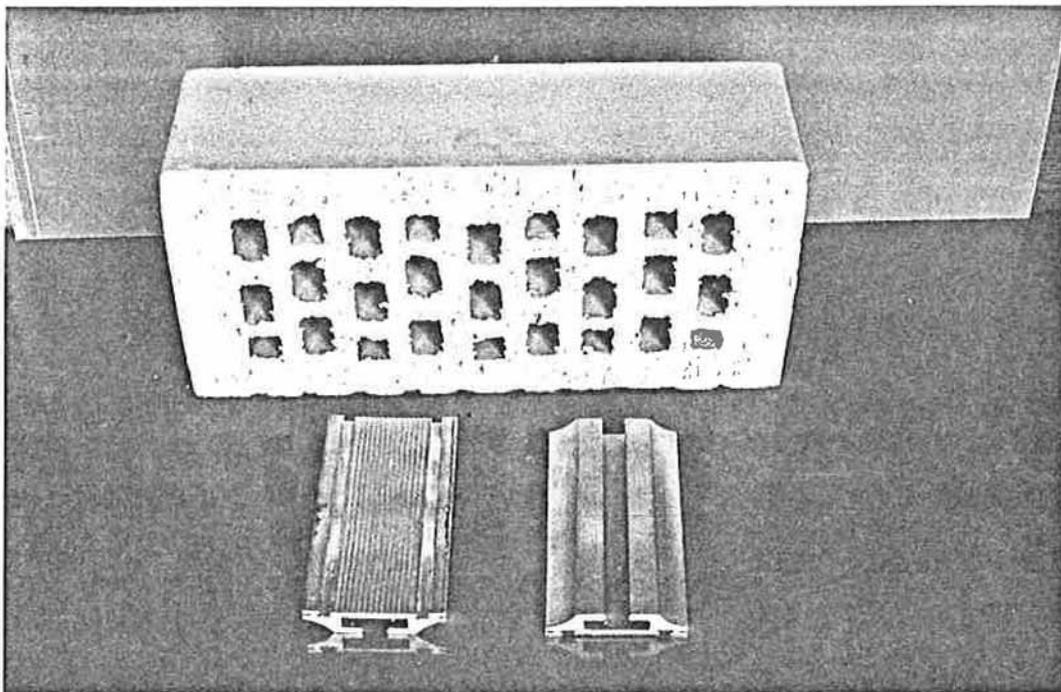


Bild 8: Das Untergrundmaterial

1.4.2 Grundwerte der Festigkeit der Steine

Um die Festigkeit des Steinmaterials genau zu untersuchen, wurden getrocknete und entstaubte Steine mit Haltern verklebt. Um eine definierte Bruchfläche zu schaffen, wurden mit einer Trennscheibe 5mm tiefe Nuten in den Stein geschnitten, die die Bruchfläche auf 5 x 10cm (genau die Halterfläche) begrenzten (Bild 9). In Vorversuchen hatte sich gezeigt, daß bei Stirnzugversuchen an Verklebungen ohne Vorbeanspruchung der Bruch ausschließlich im Stein auftrat. Dieses wurde zur Bestimmung der Steinfestigkeit ausgenutzt. Es wurde eine Versuchsreihe mit 10 Proben untersucht. Der Bruch trat wie erwartet immer im Stein auf (Tab. 8).

Es wurde eine mittlere Steinfestigkeit von $0,7 \text{ N/mm}^2$ festgestellt. Der Wert liegt niedriger als bei Versuchen ohne Bruchflächenbegrenzung. Das liegt zum einen an der kleineren wirklichen Klebfläche zum anderen an einem nicht auszuschließenden Kerbwirkungseinfluß durch die in den Stein geschnittenen Begrenzungsnuten.

Bei einer Gesamtauswertung aller Versuche mit Brüchen im Stein ohne Bruchflächenbegrenzung und Vorbelastung ergibt sich eine mittlere Steinfestigkeit von $0,92 \text{ N/mm}^2$, ermittelt aus Stirnzugversuchen. Die 5% Quantile liegt bei $0,74 \text{ N/mm}^2$.

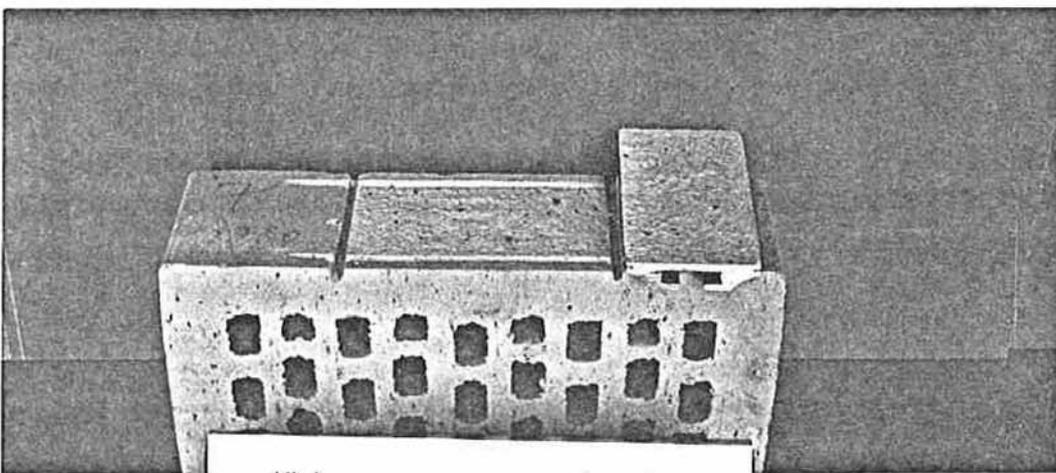


Bild 9: Bruchflächenbegrenzung des Steines

	Hochlochklinker F_B [N]
Bruchflächen- begrenzung	$A_K = 50 \text{ cm}^2$
1	3630
2	3590
3	3270
4	3790
5	3520
6	3570
7	3780
8	3360
9	3220
10	3880
$F_{B\text{mittel}}$	3561
X 5% N	3112
σ [N/mm ²]	0,7

Tabelle 8: Steinfestigkeit mit Bruchflächenbegrenzung

1.4.3 Einfluß von Staub auf der Steinoberfläche

Als wesentliche Einflußfaktoren auf die Festigkeit der Verklebung erweisen sich Staub oder Verunreinigungen auf der Steinoberfläche. Es ist daher unbedingt erforderlich, die zu verklebenden Steinflächen gründliche zu entstauben und zu säubern. Bei dem hier beschriebenen Forschungsprojekt erfolgte dies immer mit einer Stahlbürste.

Dieses erscheint eigentlich als selbstverständlich, da auf der gesamten Klebfläche eine gute Benetzung des Steines durch den Klebstoff erwünscht ist /5, 6, 7/. Ein Versäumnis dessen kann zu erheblicher Festigkeitsminderung der Verklebung führen. Der Bruch erfolgt dann nicht mehr im Stein, sondern in der Grenzfläche Stein/Klebstoff (s. auch Kap. 3.3 u. 4.3).

1.4.4 Einfluß der Steinfeuchtigkeit

Ein weiterer wichtiger Einflußfaktor bei der Verklebung ist die Feuchtigkeit des Steines. Nasse Steinoberflächen oder auch Steine, die längere Zeit einer Feuchtigkeit ausgesetzt waren, bewirken nach ihrer Verklebung einen Abfall der Festigkeit. Außerdem treten die Brüche nicht mehr im Stein sondern an der Grenzfläche Stein/Klebstoff auf. Eine ausreichende Trocknung des Untergrundes unmittelbar vor der Verklebung deshalb sehr empfehlenswert /6,7/ (s. dazu auch Kap. 2.2.1 und 3.2.1).

1.4.4.1 Einfluß einer Trocknung des Untergrundes

Um diesen Sachverhalt gründlicher zu durchleuchten wurden Steine bis zur Gewichtskonstanz (d.h. keine Feuchtigkeitsaufnahme mehr) in Wasser gelagert (ca. 70 h).

Fünf Steine wurden sofort mit Haltern verklebt, fünf weitere wurden mit einem Propangasbrenner getrocknet (trockene Oberfläche) und dann mit Haltern verklebt.

Die restlichen Steine wurden in einen Trockenschrank gelegt.

Nach einiger Zeit wurden vier Steine dem Schrank entnommen. Mit einem Thermoelement wurde eine Steintemperatur von 70° C gemessen. Nach der Temperaturmessung wurden die Steine mit Haltern verklebt.

Die restlichen fünf Steine wurden bis zur völligen Trockenheit gelagert und anschließend ebenfalls mit Haltern verklebt.

Nach der Aushärtung wurden alle Verklebungen einer Stirnzugprüfung unterzogen (Tabelle 9).

Es zeigt sich deutliche der positive Einfluß einer Trocknung des Untergrundes auf die Festigkeit der Verklebung. Sie steigt von $0,49 \text{ N/mm}^2$ bei Maximalfeuchte verklebten Steinen auf $0,93 \text{ N/mm}^2$ (Mittelwerte) bei völlig trockenen Steinen. Bei den getrockneten Steinen gibt es nur Materialbrüche im Stein während bei den naß verklebten Steinen auch Adhäsionsbrüche an der Grenzfläche Stein/Klebstoff auftreten.

1.4.4.2 Einfluß bei der Verwendung eines Primers

Eine Möglichkeit den negativen Einfluß der Steinoberflächenfeuchtigkeit zu beseitigen, ist die Vorbehandlung des Steinmaterials mit einem Primer. Primer sind Haftvermittler. Es handelt sich meist um Lösungen des Klebstoffes, die die Fügefläche optimal vorbenetzen und bis zu mehreren Tagen schützen /10/.

Es wurden zwei verschiedene, von der Firma Bostik empfohlene Primer erprobt: Bostik 5031 und Bostik 5017.

	nasse Steine, nur entstaubt (6% Feuchtigkeit)		entstaubt, mit Brenner getrocknet		entstaubt, bei 70° C Oberflächentemperatur geprüft		entstaubt, völlig getrocknet (110° C)	
	F _B [N]	Bruch	F _B [N]	Bruch	F _B [N]	Bruch	F _B [N]	Bruch
1	2210	S/K	3590	S	4000	S	4850	S
2	1850	S/K	3790	S	4150	S	4310	S
3	2510	S/K	4320	S	—		5170	S
4	2420	S/K	4980	S	4040	S	4080	S
5	3340	S/K	3860	S	4000	S	4940	S
F _B mittel	2466		4108		4078		4670	
X 5% [N]	1425		2961		3863		3643	
σ [N/mm ²]	0,49		0,82		0,82		0,93	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 9: Einfluß der Trocknung des Untergrundes

Dazu wurden Steine mit einem Feuchtigkeitsgehalt von ca. 6% mit einem Primer bestrichen und dann mit Haltern verklebt (Klebstoff Bostik 2916 + 1% Sylodex). Es wurden zu jedem Primer drei Proben hergestellt und einer Stirnzugprüfung unterzogen.

Beim Primer 5031 ergab sich keine Verbesserung des Festigkeitsverhaltens ; mit dem Primer 5017 ergibt sich eine geringfügige Verbesserung.

Es läßt sich aber nicht ausschließen, daß sich durch einen speziell auf die vorhandene Problemstellung zugeschnittenen, anderen Primer bessere Resultate erzielen lassen.

Der Bruch trat bei den Versuchen immer an der Grenzfläche zwischen Stein und Primer bzw. Primer und Kleber auf.

1.5 Fehlerbetrachtung

Um die zufälligen Fehler bei den Meßwerten zu berücksichtigen, wird für die Meßreihen die 5% Quantile für eine Aussagewahrscheinlichkeit von $P_a = 75\%$ nach (14)

$$\begin{aligned}y_i &= \ln x_i \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum y_i \\ S_y &= \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \\ y_{5\%} &= \bar{y} - k \cdot S_y \\ x_{5\%} &= e^{y_{5\%}}\end{aligned}$$

mit

$x_{5\%}$ = 5% Quantile

n = Anzahl der Meßwerte

x_i = Einzelmeßwert

\bar{y} = Mittelwert

S_y = Standardabweichung

k = Faktor in Abhängigkeit von der Probenzahl

berechnet.

2. Stirnzugversuche

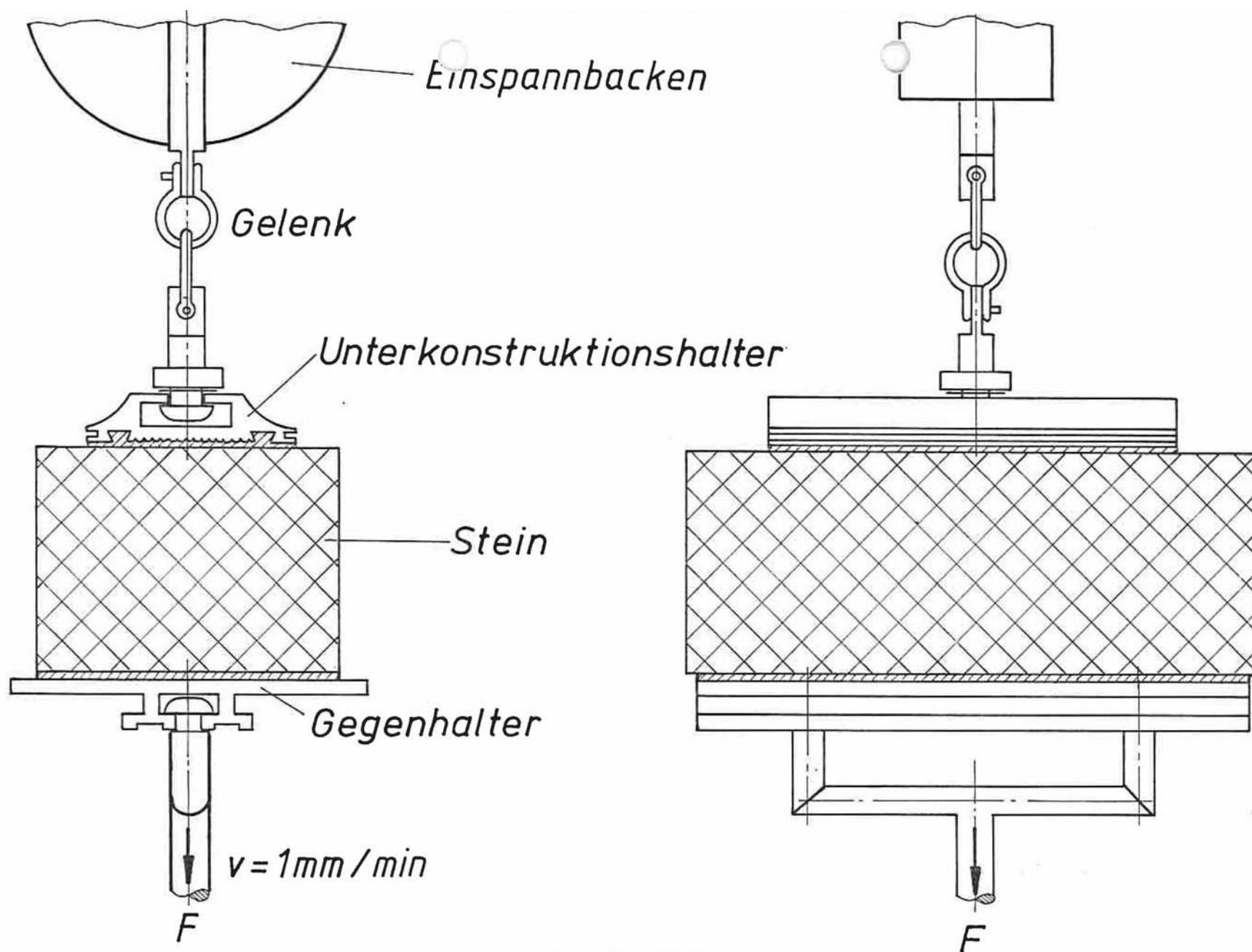
2.1 Durchführung der Stirnzugversuche

Da Fassadenbefestigungen, besonders bei mehrstöckigen Gebäuden, einer hohen Abzugbelastung durch den Windsog ausgesetzt sind, wird das Verhalten der Verklebungen bei einer zügigen Beanspruchung untersucht. Dazu werden die Steine auf einer Seite mit dem Unterkonstruktionshalter und auf der gegenüberliegenden Seite mit einem Gegenhalter mit wesentlich größerer Klebfläche verklebt.

Die Verklebungen werden nun mit einer Vorrichtung (Bild 10) zwischen die Spannbacken einer Universalprüfmaschine gespannt und auseinandergezogen. Dabei bewirkt das Gelenk einen kraftfreien Zugversuch. Gemessen wird die Bruchkraft, die auch in den Tabellen aufgeführt ist.

2.1.1 Festigkeit im Stirnzugversuch ohne Vorbeanspruchung

Getrocknete und entstaubte Steine wurden mit entfetteten und geschmirgelten bzw. in NaOH geätzten Haltern verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen einer Stirnzugprüfung unterzogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Ohne Vorbelastungen und bei Raumtemperatur geprüft, erfolgte der Bruch immer im Stein. Die mittleren Bruchkräfte schwanken stark. Obwohl sie aus der gleichen Lieferung stammen, haben die Steine teilweise ein sehr unterschiedliches Festigkeitsverhalten. Das kann an unterschiedlichen Herstellungsbedingungen (z.B. lokale Brenntemperaturunterschiede im Brennofen) und/oder an Beimengungsunterschieden zwischen den einzelnen Chargen liegen.



- 3 0 -



Bild 10

Vorrichtung zur Stirn-Zugprüfung

6.4.83.0053.4

Fischer

8 / 83

	F_B [N]	Bruch
1	4850	S
2	4310	S
3	5170	S
4	4080	S
5	4940	S
6	3600	S
7	2540	S
8	4030	S
9	4400	S
10	3710	S
11	4760	S
12	4140	S
13	4840	S
14	3580	S
15	3920	S
$F_{B\text{mittel}}$	4184	
$X_{5\%}$ [N]	2893	
σ [N/mm ²]	0,84	
d [mm]	1,6	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 10: Festigkeit beim Stirnzugversuch ohne Vorbeanspruchung

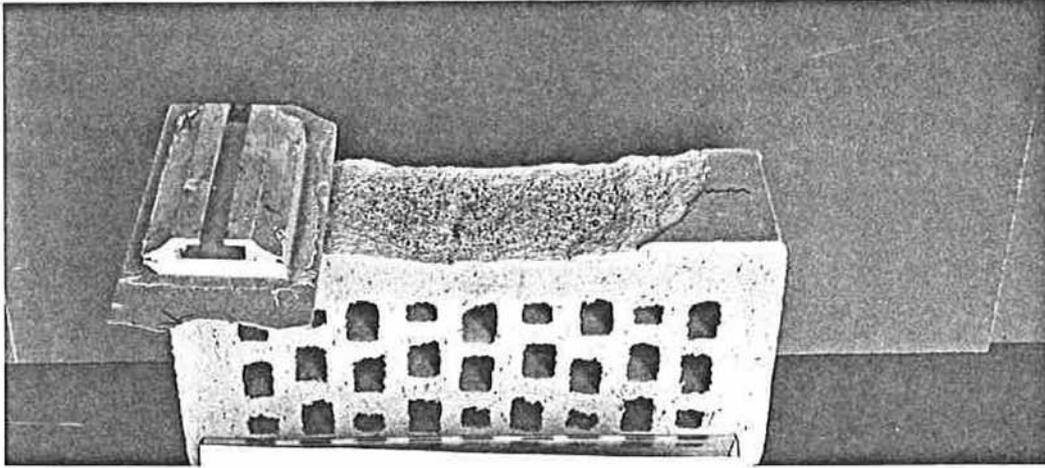


Bild 11: Bruchbild der stirnzuggeprüften Verklebung ohne Vorbeanspruchung

2.2. Festigkeit nach Vorbeanspruchung der Verklebung

2.2.1 Festigkeit nach einer Wasserlagerung der Verklebungen

Um das Verhalten der Verklebungen bei Feuchtigkeit zu untersuchen, wurde als Vorbelastung eine längere Wasserlagerung vorgesehen. Dazu wurden getrocknete und entstaubte Steine mit geschmirgelten und entfetteten Haltern verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen 11 Monate unter Wasser gelagert. Danach wurden sie einer Stirnzugprüfung unterzogen. Die Versuchsergebnisse wurden einer Versuchsreihe ohne Vorbeanspruchung gegenübergestellt (Tabelle 11).

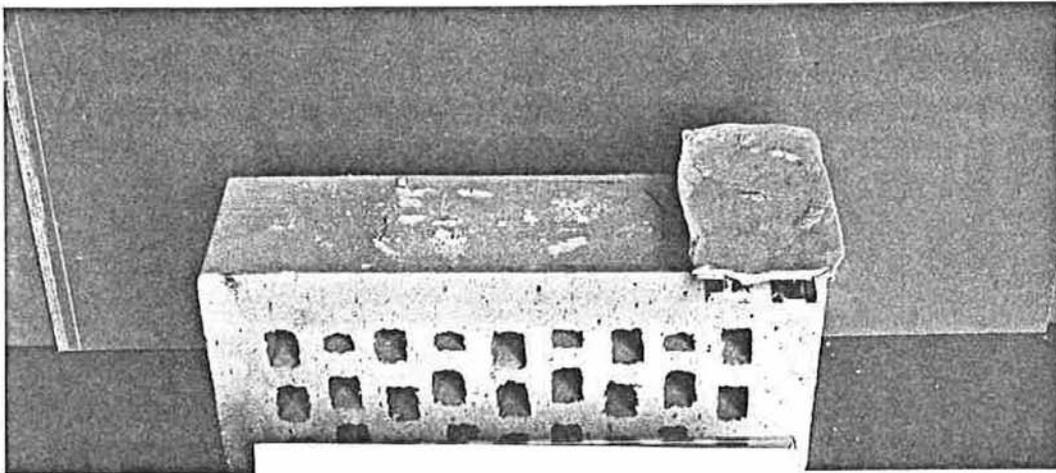


Bild 12: Bruchbild der Verklebung nach 11monatiger
Wasserlagerung und anschließender Stirnzugprüfung

Vergleiche mit Verklebungen, die 11 Monate in Raumklima gelagert waren, sind nicht möglich, da sie im Versuchsprogramm nicht vorgesehen waren.

Es zeigte sich eine geringe Festigkeitsabnahme und eine Veränderung des Bruchverhaltens. Während bei Versuchen ohne Vorbeanspruchung ausschließlich Brüche im Stein auftraten, gab es nach der Wasserlagerung auch Brüche in der Grenzfläche Stein/Klebstoff (Bild 12). Die Ergebnisse werden in Bild 13a graphisch dargestellt. Dabei sind als Streubereich jeweils die aus der 5% Quantile errechneten Spannungen, sowie der Mittelwert (gestrichelt) angegeben.

2.2.2 UV-Bestrahlung

Um das Verhalten der Verklebung bei Sonneneinstrahlung zu untersuchen, wurden mehrere Verklebungen einer UV-Bestrahlung ausgesetzt. Dazu wurden die Verklebungen in einem Bestrahlungsschrank gelagert (Bild 13) dessen Wände mit Aluminiumfolie ausgekleidet waren.

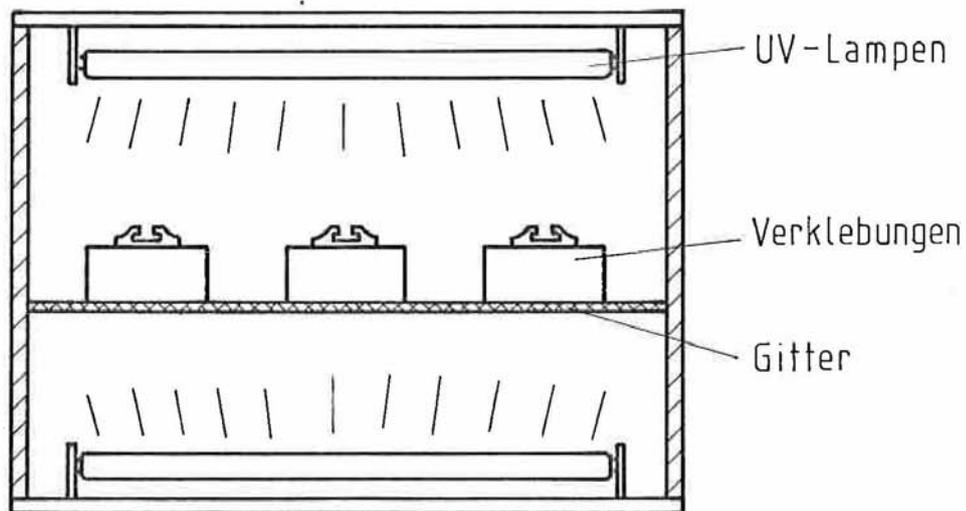


Bild 13: UV-Bestrahlung der Verklebungen

Die aufgebrachte Strahlendosis entspricht pro Tag etwa der UV-Bestrahlung von 10 Sonnentagen bei staubfreier Luft. Für die Verklebungen wurden getrocknete und entstaubte Steine mit in NaOH geätzten Haltern verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen wie oben beschrieben einer 17-tägigen UV-Strahlung ausgesetzt und dann einer Stirnzugprüfung unterworfen (Tabelle 11). Der Bruch erfolgte immer im Stein. Die Steinfestigkeit liegt etwas niedriger als bei der Referenzversuchsreihe ohne Vorbeanspruchung.

	F_B [N] ohne Vorbelastung	Bruch	F_B [N] 11 Monate Wasserlagerung	Bruch	F_B [N] UV-Bestrahlung	Bruch
1			4080	S	3500	S
2			4340	S	4080	S
3			4360	S	3380	S
4			4400	S		
5			5030	S		
6			4980	S		
7	siehe Tabelle 10	S	4630	S/K		
8			3280	S/K		
9			3230	S/K		
$F_{B\text{mittel}}$	4194		4259		3647	
X 5% N	2893		2983		2657	
σ_B	0,84		0,84		0,73	
d	1,6		---		---	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 11: Festigkeit nach verschiedenen Vorbeanspruchungen der Verklebung

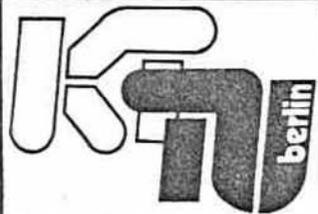
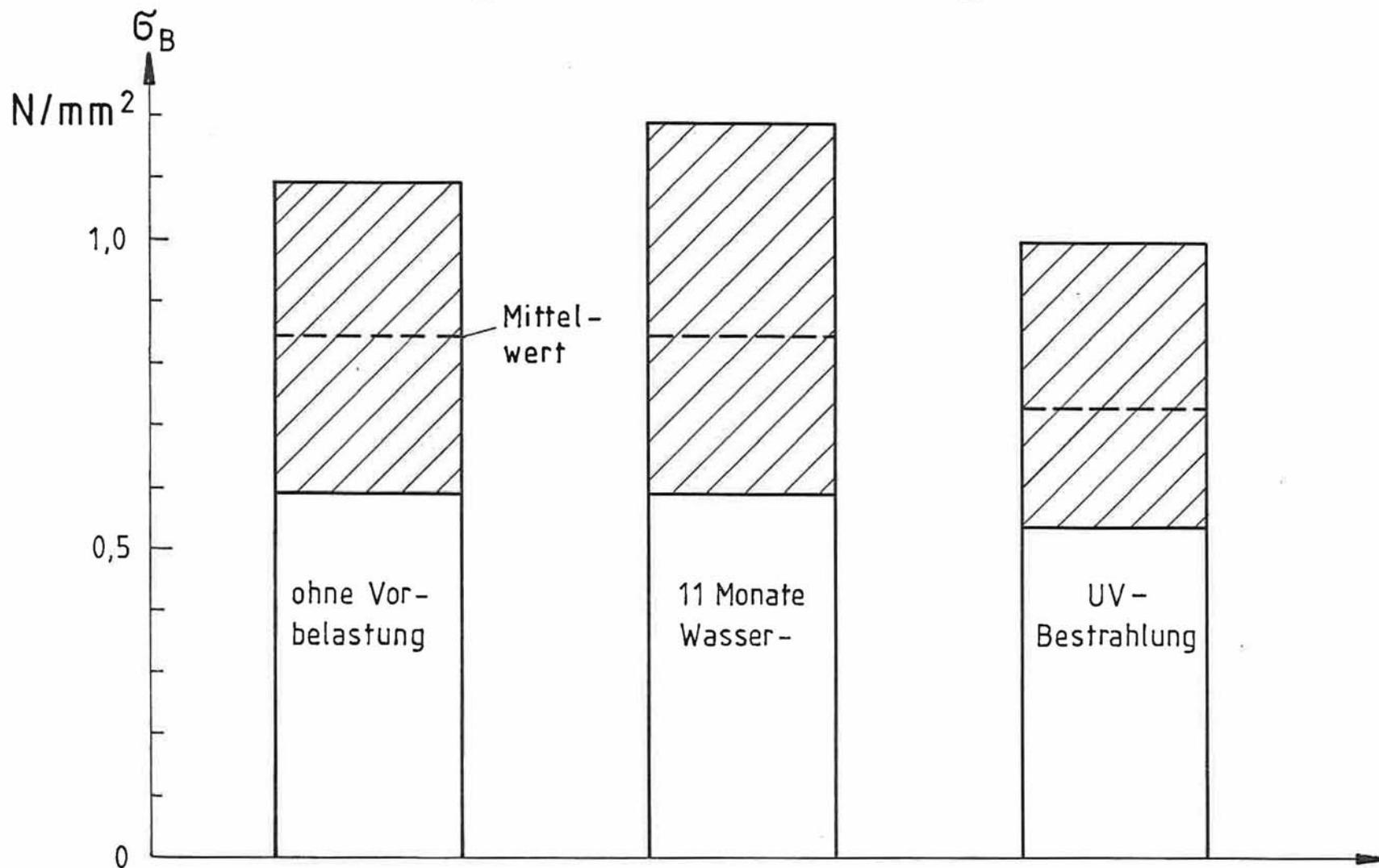


Bild 13 a

Festigkeit nach einer Vorbeanspruchung der Klebung

6.4.84.0215 .4

Fischer / Fi

5.84

Allerdings könnten die geringen Differenzen auch in der unterschiedlichen Qualität des Steinmaterials begründet liegen (siehe Kapitel 1.4.2). Die Ergebnisse werden in Bild 13a grafisch dargestellt.

2.2.3 Vorbeanspruchung mit gezielten Temperaturwechseln

Um den Einfluß von Frost - Wärme - Wechseln auf die Festigkeit von Verklebungen zu untersuchen, wurden sie gezielten Frost - Wärme - Wechseln zwischen -20°C und $+60^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt. Dabei sollen Temperatursprünge, wie sie z.B. nach einem Nachtfrost und darauf folgender direkter Sonneneinstrahlung auftreten können, simuliert werden. Die Bedingungen werden dabei bewußt extrem ausgelegt, um die Grenzen des Klebsystems zu erkennen. Es wurde folgender Zyklus gewählt:

1. Aufheizen auf 60°C (ca. 15 min.)
2. Lagerung bei 60°C (1 h)
3. Abkühlen auf -20°C (ca. 15 min.)
4. Lagerung bei -20°C (1 h)
5. wie 1., etc.

Es wurden Versuchsreihen mit 20, 30, 40 und 200 Zyklen durchgeführt. Dazu wurden getrocknete und entstaubte Steine mit NaOH geätzten Haltern verklebt (Klebstoff Bostik 2916 + 1% Sylodex). Nach der Aushärtung wurden sie in einem Klimaschrank dem oben angegebenen Temperaturwechsel ausgesetzt. Direkt nach der Entnahme wurden die Verklebungen einer Stirnzugprüfung unterzogen (Tabelle 12). Der Bruch erfolgte ausschließlich im Stein (Bild 14).

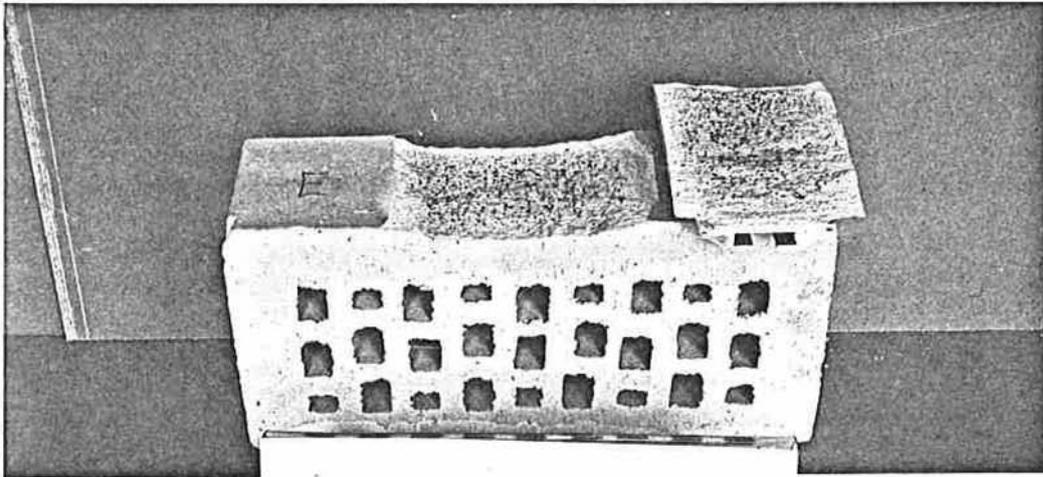


Bild 14: Bruchbild nach der Beanspruchung durch
Frost - Wärme - Wechsel

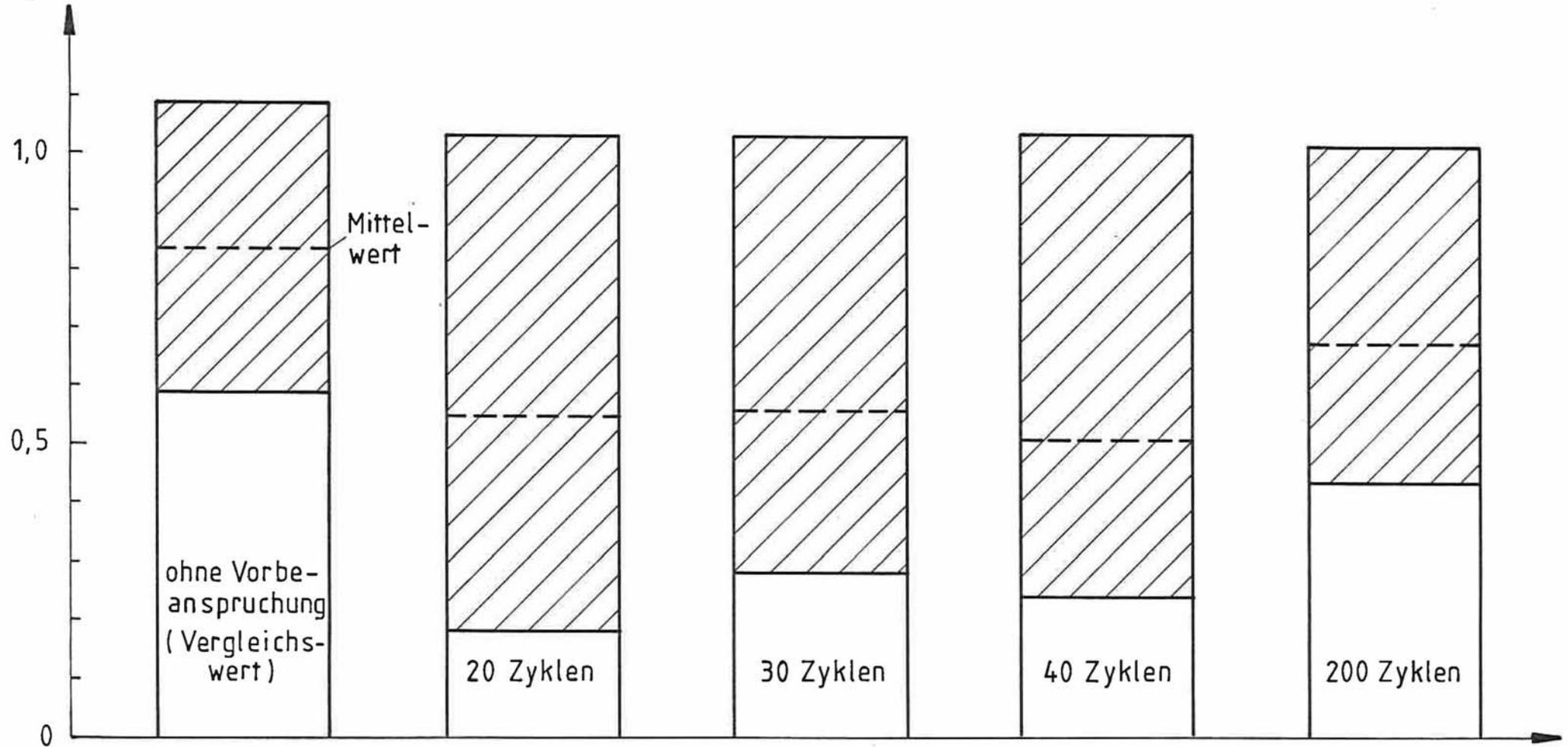
Es konnte eine Abnahme der mittleren Steifigkeit festgestellt werden. Der Streubereich der Werte ist sehr groß. Eine Untersuchung von sehr hohen Zyklenzahlen erscheint nicht erforderlich. Für Versuche kann eine Zyklenzahl von etwa 30 Zyklen empfohlen werden.

	F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]	
	ohne Vorbeanspruchung	Bruch	2o Zyklen	Bruch	3o Zyklen	Bruch	4o Zyklen	Bruch	2oo Zyklen	Bruch
1	siehe Tabelle 10	S	3150	S	2650	S	2710	S	3540	S
2			3300	S	3450	S	2930	S	2710	S
3			3050	S	1990	S	1640	S	3390	S
4			1500	S	3050	S	2920	S	3960	S
5										
$F_{Bmittel}$	4184		2750		2785		2550		3400	
$X_{5\%}$ [N]	2893		927		1446		1175		2198	
σ_B	0,85		0,55		0,56		0,51		0,68	
d	1,6		-		-		-		-	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 12: Festigkeit nach Frost- Wärme - Wechseln mit verschiedenen Zyklenzahlen im Vergleich zu Verklebungen ohne Vorbeanspruchung.

σ_B in N/mm²



- 40 -



Festigkeit nach Frost-Wärme-Wechseln mit verschiedenen Zyklenzahlen

Bild 15

6.4.84.0214.4

Fischer / Fi

5.84

2.3. Festigkeit bei vorgegebenen Klimata während der Verklebung

Um zu prüfen, bei welchen Klimabedingungen Verklebungen noch durchführbar sind, wurden Steine in unterschiedlichen Klimata gelagert und mit Haltern verklebt. Die Aushärtung erfolgte ebenfalls im gewählten Klima. Variiert wurden die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit. Im einzelnen wurden folgende Klimata untersucht:

- | | |
|---------------------|------------------------------------|
| 1. warm und trocken | (T = 40 ⁰ C; f = 20%) |
| 2. warm und feucht | (T = 40 ⁰ C; f = 98%) |
| 3. kalt und feucht | (T = 10 ⁰ C; f = 98%) |
| 4. kalt und trocken | (T = 10 ⁰ C; f = 16%) |
| | (T = 5 ⁰ C; f = 28%) |

Dabei wurden getrocknete und entstaubte Steine bei den unterschiedlichen, aber konstanten Klimabedingungen in einem Klimaprüfschrank (System Weiß) gelagert. Sie wurden dann mit in Na OH geätzten Haltern verklebt (ca. 1 min) und dann zum Aushärten wieder in den Klimaschrank gelegt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach einer Aushärtezeit von ca. 48 Stunden wurden die Verklebungen dem Schrank entnommen und dann direkt einer Stirnzugprüfung unterworfen (Tabellen 13.1 u. 13.2). Der Bruch erfolgte stets im Stein (Bild 16), doch im Unterschied zu Proben, die bei Raumklima verklebt wurden, war die Bruchmulde bei den Klimaversuchen flacher. Bei unter Normalbedingungen verklebten Proben lag die Dicke der herausgebrochenen Steinschicht zwischen 1 mm und 5 mm, bei den Klimaversuchen zwischen 0,6 mm und 1 mm.

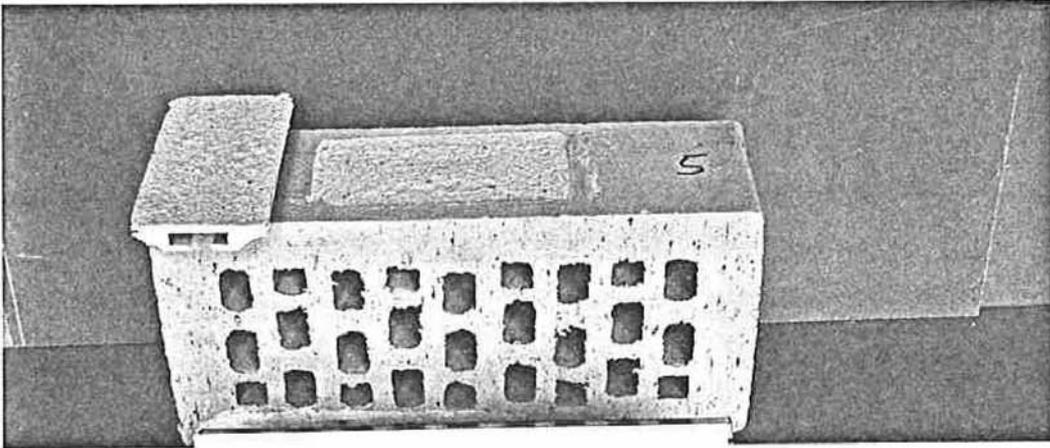


Bild 16: Bruchbild nach der Durchführung der Verklebung bei unterschiedlichen Klimata

Die Ergebnisse sind in Bild 17 graphisch dargestellt. Dabei zeigt sich, daß der Einfluß der Luftfeuchtigkeit während der Verklebung relativ gering ist. Bei konstanter Feuchte sinkt die Festigkeit mit wachsender Temperatur. Dabei muß man aber wohl die Streubreite der Meßwerte berücksichtigen. Auffallend ist noch die Bruchform, die bei den Klimaversuchen einen atypisch flach verlaufenden Bruch parallel zur Halterklebfläche zeigt. Hier wäre einer der Ansatzpunkte zu sehen, um im anschließenden Forschungsvorhaben die Problematik eingehender zu durchleuchten.

	F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]	
	ohne Vorbehandlung	Bruch	$T=40^{\circ}\text{C}; \rho=20\%$	Bruch	$T=40^{\circ}\text{C}; \rho=98\%$	Bruch	$T=10^{\circ}\text{C}; \rho=98\%$	Bruch
1	siehe Tabelle 10	S	3510	S	3325	S	3420	S
2			3290	S	3040	S	3910	S
3			3470	S	2945	S	3620	S
4			3400	S	3230	S	3600	S
5			3280	S	3590	S	3360	S
$F_{B\text{mittel}}$	4184		3390		3226		3582	
$X_{5\%}$ [N]	2893		3146		2659		3094	
σ [N/mm ²]	0,84		0,68		0,65		0,72	
d [mm]	1,6		0,8		0,8		0,9	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

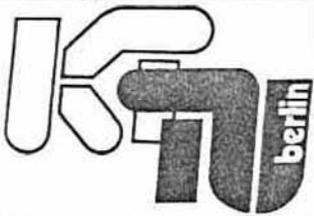
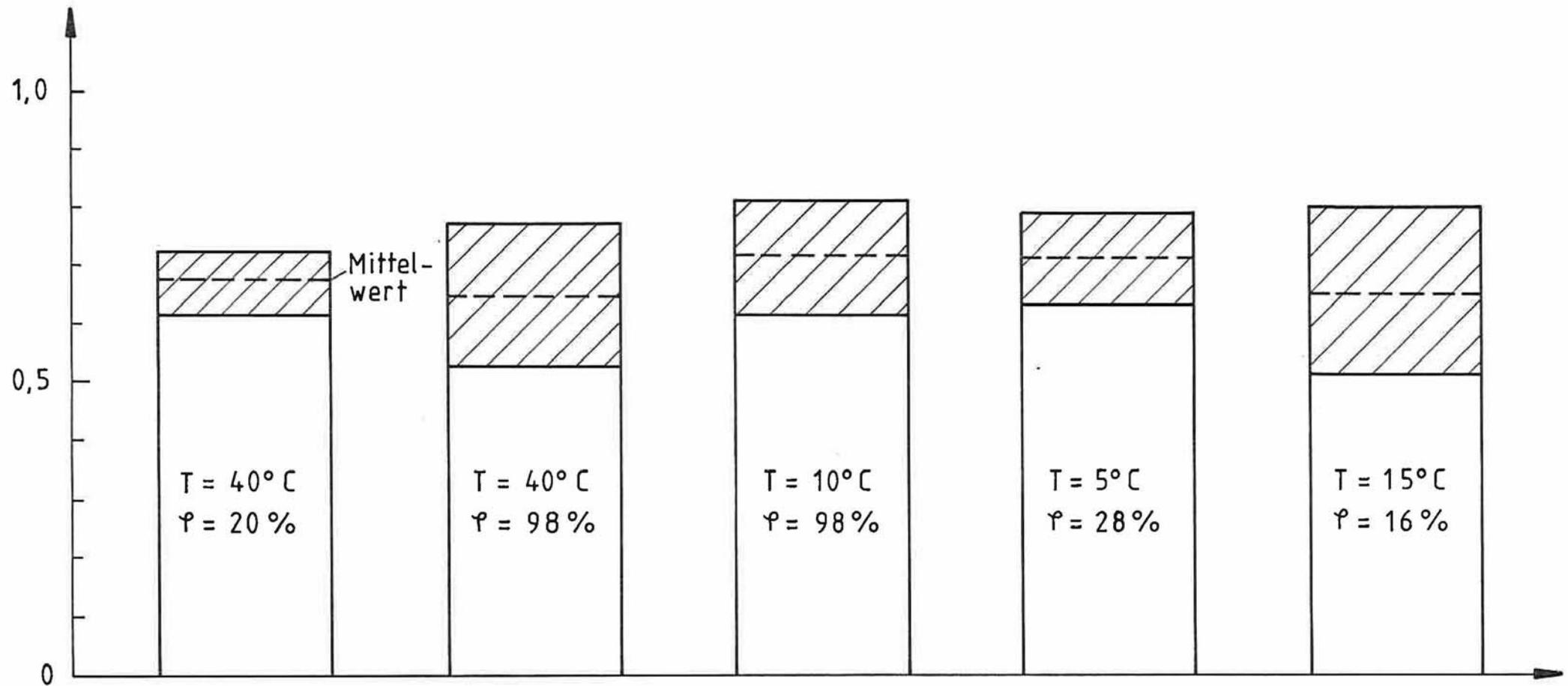
Tabelle 13.1: Festigkeit bei vorgegebenen Klimata während der Verklebung I

	F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]	
	ohne Vorbehandlung	Bruch	$T=5^{\circ}\text{C}; \varphi=28\%$	Bruch	$T=15^{\circ}\text{C}; \varphi=16\%$	Bruch
1	siehe Tabelle 10	S	3541	S	3616	S
2			3680	S	3576	S
3			3337	S	2965	S
4			3803	S	3028	S
5			3516	S	3130	S
$F_{B\text{mittel}}$	4184		3575		3263	
$X_{5\%}$ [N]	2893		3214		2582	
σ [N/mm ²]	0,84		0,72		0,65	
d [mm]	1,6		1,5		1,2	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 13.2: Festigkeit bei vorgegebenen Klimata während der Verklebung II

σ_B in N/mm^2



Festigkeit bei vorgegebenen Klimata während der Verklebung

Bild 17

6.4.84.0216.4

Fischer / Fi

5.84

2.4 Stirnzugversuche bei erhöhter Temperatur

Da sich bei direkter, längerer Sonneneinstrahlung die Fassadenbekleidungsplatten erwärmen, wird durch Wärmeleitung auch die Klebfuge einer erhöhten Temperatur ausgesetzt. Deshalb wurde die Festigkeit der Verklebung bei erhöhten Temperaturen untersucht. Dazu wurden getrocknete und entstaubte Steine mit entfetteten Haltern bei Raumtemperatur verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet.

Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen 2h bei 95°C in einem Trockenschrank gelagert. Nach der Entnahme wurden sie sofort einer Stirnzugprüfung unterworfen (Tabelle 14). Der Bruch erfolgte immer in der Grenzfläche Stein/Klebstoff.

F_B [N]	Bruch	σ [N/mm ²]
2455	s/k	0,49
2274	s/k	0,45
2274	s/k	0,45
2688	s/k	0,54

Vergleichswert bei Raumtemperatur (20°C):			
F_B [N]	Bruch	σ [N/mm ²]	T [°C]
4250	s	0,85	20

Tabelle 14: Festigkeit der Verklebung bei erhöhter Temperatur

Nach zweistündiger Erwärmung verlagerte sich also der Bruch aus dem Stein in die Grenzfläche Stein/Klebstoff. Es ist eine Schädigung der Verklebung durch die erhöhte Temperatur festzustellen. Die Festigkeit sinkt auf ungefähr die Hälfte der Steinfestigkeit.

3. Scherversuche

3.1 Scherfestigkeit ohne Vorbeanspruchung

Ergänzend zu den Stirnabzugsversuchen wurden Scherfestigkeitsprüfungen durchgeführt (Bild 18). Um Einflüsse der Haltergeometrie (eventuell zusätzliches Biegemoment beim Scherversuch) abzuschätzen, wurden zuerst Versuche mit Aluminiumplatten (Abmaße: 5 x 10 x 1 cm) anstelle der Halter durchgeführt. Als Vorbehandlung wurden die Aluminiumplatten etwa 2 Minuten in NaOH geätzt. Außerdem wurde bei einer Versuchsreihe am Stein eine Bruchflächenbegrenzung auf 10 x 5 cm vorgenommen. Dazu wurden etwa 5 mm tiefe Nuten mit einer Trennscheibe in den Stein geschnitten.

Dem wird eine Versuchsreihe mit verklebten Haltern (vorher entfettet) gegenübergestellt (Tabelle 15). Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1 % Sylodex verwendet. $A_K = 50 \text{ cm}^2$.

Der Bruch trat bei allen Verklebungen hauptsächlich im Stein auf. In geringem Maße trat auch Mischbruch im Stein und in der Grenzfläche Stein/Klebstoff auf.

Auffallend ist die etwas höhere Festigkeit der Verklebung mit einer Aluminiumplatte ohne Bruchflächenbegrenzung. Die Versuchsanordnung war bei Halter und Alu-Platte gleich (beide sind 10 mm dick). Ein Grund für die höhere Festigkeit könnte in der viel größeren Steifigkeit der Platte gesehen werden. Auch darf man den relativ großen Streubereich der Meßwerte nicht außer Acht lassen.

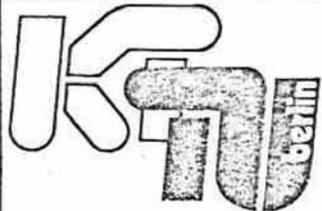
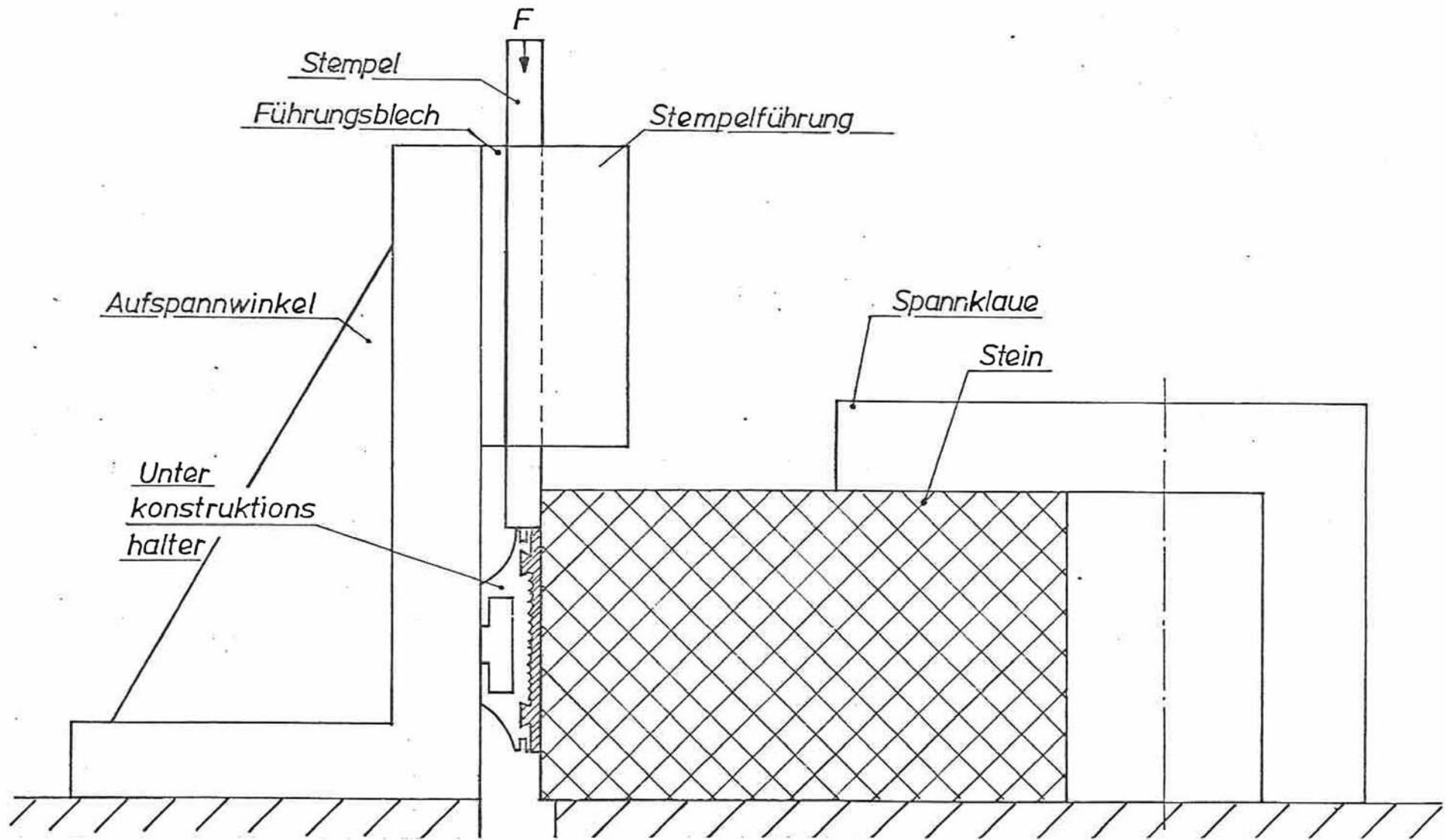


Bild 18

Vorrichtung zur Scherprüfung

	AL-Platte		Halter B		AL Platte mit Bruchflächenbegrenzung	
	F_B [N]	Bruch	F_B [N]	Bruch	F_B [N]	Bruch
1	37700	S	20000	S	31300	S,(S/K)
2	32700	S	26450	S	17900	S
3	24200	S	15450	S	29400	S,(S/K)
4	42600	S	-			
5	40000	S,(S/K)	20200	S		
6	21630	S				
7	25320	S				
F_B mittel	32021		20525		26200	
X 5% N	16869		11235		9702	
τ_w [N/mm ²]	6,4		4,1		5,24	
t [mm]	6,6		-		5,5	

$$A_K = 50\text{cm}^2$$

Tabelle 15 : Bruchkräfte bei Scherbeanspruchung

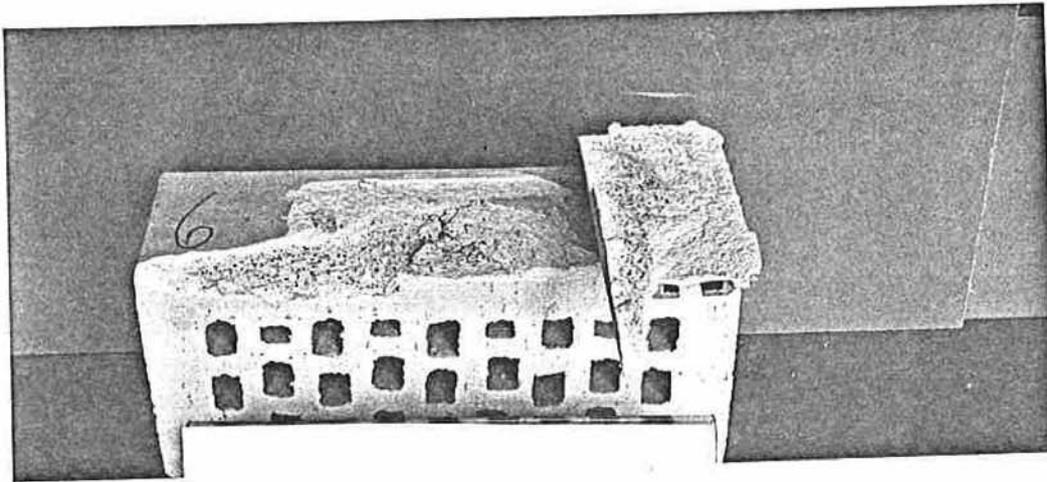


Bild 19: Bruchbild der Verklebung ohne Vorbeanspruchung nach einer Scherprüfung

3.2 Scherfestigkeit nach Vorbeanspruchung der Verklebung

3.2.1 Festigkeit nach einer Wasserlagerung

Getrocknete und entstaubte Steine wurden mit in NaOH geätzten Haltern verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach Aushärtung lagerten die Steine und Halter 11 Monate in Wasser bei Raumtemperatur. Nach der Lagerung wurden sie einer Scherprüfung unterzogen (Tabelle 16). Die Werte streuen sehr stark, daher wurde auf eine Berechnung der Standardabweichung verzichtet. Die Versuchsergebnisse werden den Grundwerten der Scherfestigkeit gegenübergestellt.

Der Vergleich zeigt eine starke Abnahme der Scherfestigkeit bei Wasserlagerung und eine Veränderung des Bruchverhaltens. Der Bruch trat stets in der Grenzfläche Stein/Klebstoff auf. Die Wasseraufnahme und der Feuchtigkeitsgehalt von Stein und Klebfuge haben großen Einfluß auf die Scherfestigkeit / 8 /.

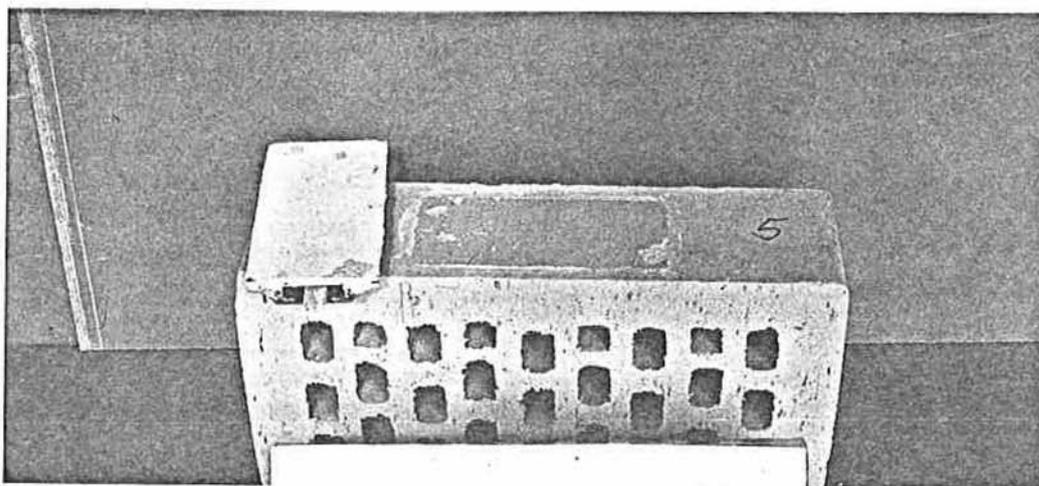


Bild 20: Bruchbild der Verklebung nach 11-monatiger Wasserlagerung und anschließender Scherprüfung

3.2.2 Vorbeanspruchung mit gezielten Temperaturwechseln

Getrocknete und entstaubte Steine wurden mit geätzten Haltern verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen Temperaturwechseln ausgesetzt.

Zyklus:

1. Aufheizen auf 60°C (ca. 15 min)
2. 1 h lagern bei $+60^{\circ}\text{C}$
3. Abkühlen auf -20°C (ca. 15 min)
4. 1 h lagern bei -20°C
5. Aufheizen auf 60°C etc.

Nach den Temperaturwechseln wurden die Steine einer Scherprüfung unterzogen (Tabelle 16).

Es wurden Versuche mit 40 und 200 Zyklen durchgeführt. Der Bruch erfolgte stets im Stein. Die mittlere Bruchkraft liegt nach 200 Zyklen höher als nach 20 Zyklen. Dabei muß aber wieder der große Streubereich der Steinfestigkeit berücksichtigt werden.

	F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]		F_B [N]	
	nach 11-monatiger Wasserlagerung	Bruch	nach Temperaturwechsel 40 Zyklen	Bruch	nach Temperaturwechsel 200 Zyklen	Bruch	ohne Vorbelastung	Bruch
1	21500	S/K	6250*	S	18920	S	20000	S
			17730	S	35850	S	26450	S
2	7900	S/K	16160	S	25030	S	15450	S
3	5050	S/K	19690	S	20120	S	20200	
4	2300	S/K						S
$F_{Bmittel}$	9188		17860		24980		20525	
\bar{X} 5% N	549		13028		11145		12109	
σ_m [N/mm ²]	1,84		3,57		5,0		4.1	
d [mm]	1		1		1,1		-	

*nicht brücksichtigt, da der Stein beim Versuch zerbrach

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 16: Scherfestigkeit bei vorbeanspruchten Verklebungen

3.3 Scherfestigkeit bei erhöhter Temperatur

Um den Einfluß von erhöhter Temperatur (z.B. durch Sonneneinstrahlung) auf die Scherfestigkeit zu untersuchen, wurden mit Haltern verklebte Steine bei 95°C in einem Trockenschrank gelagert und direkt nach der Entnahme einer Scherprüfung unterzogen. Dabei wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt:

Reihe I mit sorgfältig gereinigten Steinen

Reihe II mit stark verstaubten Steinen

Die Steine wurden mit entfetteten Haltern verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet (Tabelle 17).

Bei der Versuchsreihe I trat der Bruch im Klebstoff auf. Die Festigkeit sinkt aufgrund der Schädigung durch die hohe Temperatur im Trockenschrank auf etwa die Hälfte ab. Auch wurde hier zum ersten Mal ein reiner Kohäsionsbruch im Klebstoff festgestellt.

In der Versuchsreihe II erfolgte der Bruch in der Grenzfläche Stein/Klebstoff. Die Temperaturabhängigkeit der Scherfestigkeit ist hier stark ausgeprägt. Auffallend ist der starke Einfluß der Beschaffenheit der Steinoberfläche. Die Staubschicht wirkt sich negativ auf die Scherfestigkeit der Klebverbindung aus (s. auch Kap. 1.4.3).

	<u>Reihe I (Steine entstaubt)</u>			<u>Reihe II</u>			
	F_{B_m} [N]	Bruch	τ_S [N/mm ²]	F_{B_m} [N]	Bruch	τ_S [N/mm ²]	
1	23150	K	4,63	4640	S/K	0,93	
2	13270	K	2,65	1900	S/K	0,38	
3	10540	K	2,11	3790	S/K	0,76	
4	12150	K	2,43	2008	S/K	0,4	
5				3930	S/K	0,77	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 17: Scherfestigkeit bei erhöhter Temperatur

3.4 Scherfestigkeit bei vorgegebenem Klima während der Verklebung

Abschließend wurde nach das Verhalten bei unterschiedlicher, aber konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit untersucht.

Als Klima wurde kalt und trocken ($T = 5^{\circ}\text{C}$; $\varphi = 28\%$) ($T = 10^{\circ}\text{C}$; $\varphi = 16\%$) untersucht.

Entstaubte und getrocknete Steine wurden unter den oben genannten Bedingungen in einem Klimaschrank bis zur Gewichtskonstanz gelagert und mit Haltern verklebt. Die Aushärtung (ca. 48 h) der Verklebung erfolgte wieder unter den oben genannten Bedingungen im Klimaschrank. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet.

Anschließend wurden die Verklebungen einer Scherprüfung unterzogen (Tabelle 18).

Der Bruch erfolgte im Stein, in den Grenzflächen Stein/Klebstoff und Halter/Klebstoff.

Zu sehr ähnlichen Ergebnissen kommt Czerny /11/ bei der Untersuchung von mit Schmelzklebstoffen verklebten Aluminiumteilen.

	F_B [N] bei $T = 5^\circ\text{C}$ $\varphi = 28\%$	F_B [N] bei $T = 10^\circ\text{C}$ $\varphi = 16\%$	F_B [N] bei ohne Vorbeanspruchung (Kap. 3.1)
1	20870 S/K	22620 K	20000 S
2	33790 K	25440 S	26450 S
3	18110 S	10450 K/H	15450 S
4	31050 K	21200 S/K	-
5	17720 S/K	-	20200 S
F_B mittel	24308	22428	26280
X 5% N	11056	t 6436	11184
τ_{S_m} [N/mm ²]	4,86	4,49	4,1
d [mm]	1,5	1,25	5,5

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 18: Scherfestigkeit bei vorgegebenen Klimata

4. Biegeversuche

Ergänzend wurden mit den Verklebungen Halter/Stein noch Biegeversuche gemacht. Da die Fassadenplatten in der Praxis nicht direkt an den Haltern befestigt werden, sondern auf einer Unterkonstruktion, wird die Verklebung auch auf Biegung beansprucht (Bild 21).



Bild 21: Biegebelastung der Unterkonstruktionshalter

Man kann das System Stein/Halter/Verbindungsstück als einen eingespannten Biegebalken ansehen (Bild 22). Wegen der Klebfuge ist der Balken nicht homogen. Der spröde und harte Biegebalken wird durch eine weiche und elastische Klebfuge mit dem Stein verbunden.

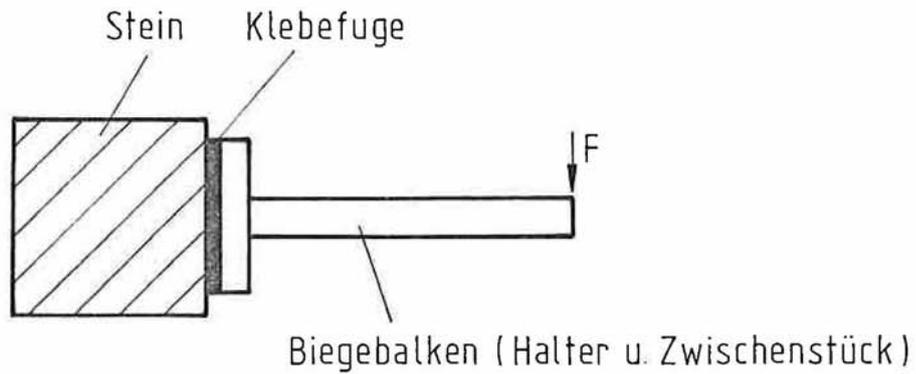


Bild 22: Prinzip der Versuchsanordnung (idealisiert)

Deshalb gilt die herkömmliche Biegetheorie nicht. Es kann deshalb auch keine Biegespannung als Quotient aus Biegemoment und Widerstandsmoment ausgerechnet werden. Unter Belastung verformt sich das System ungefähr nach Bild 23. Die Verformung findet überwiegend in der Klebfuge statt.

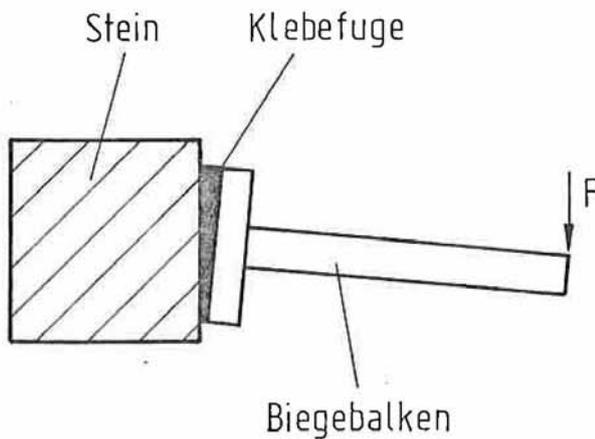


Bild 23: System unter Biegebelastung (idealisiert)

4.1 Biegeversuche ohne Vorbelastung

Es wurden getrocknete und entstaubte Steine mit entfetteten Haltern verklebt. Als Klebstoff wurde Bostik 2916 + 1% Sylodex verwendet. Nach dem Aushärten wurden die Verklebungen einer Biegeprüfung (Bild 24) unterworfen. Dabei wurden drei verschiedene Hebelarme mit Längen von 40, 70 und 100mm untersucht. Gemessen wurde die Bruchlast F_{bB} (Tabelle 19). Der Bruch erfolgte immer im Stein.

Bei der Versuchsanordnung stellt sich eine gemischte Belastung aus Biegung und Schub ein. Die Versuche zeigen nicht das erwartete Resultat, daß die Verbindung bei kleiner Querkraft eine größere Momentenbelastung, bzw. bei großer Querkraft eine kleine Momentenbelastung zuläßt. Ein für die Analyse des Festigkeitsverhaltens notwendiges Interaktionsdiagramm zwischen Biegung und Schubbeanspruchung läßt sich mit den vorhandenen drei Versuchsreihen nicht zeichnen. Die Ergebnisse scheinen dem bekannten Zusammenhang entgegenzulaufen. Um diese Tendenz zu erhärten, müßten aber noch weitere Versuche gemacht werden. Außerdem muß für die Darstellung eines Interaktionsdiagrammes der Bruchwert für eine reine Biegebelastung ohne Querkrafteinfluß ermittelt werden. Die Biegebelastung könnte dabei z.B. durch ein Kräftepaar aufgebracht werden.

Bei einer weiterführenden Erforschung der Problematik dieses Berichtes muß auf die Probleme der Biegebelastung besonderer Wert gelegt werden.

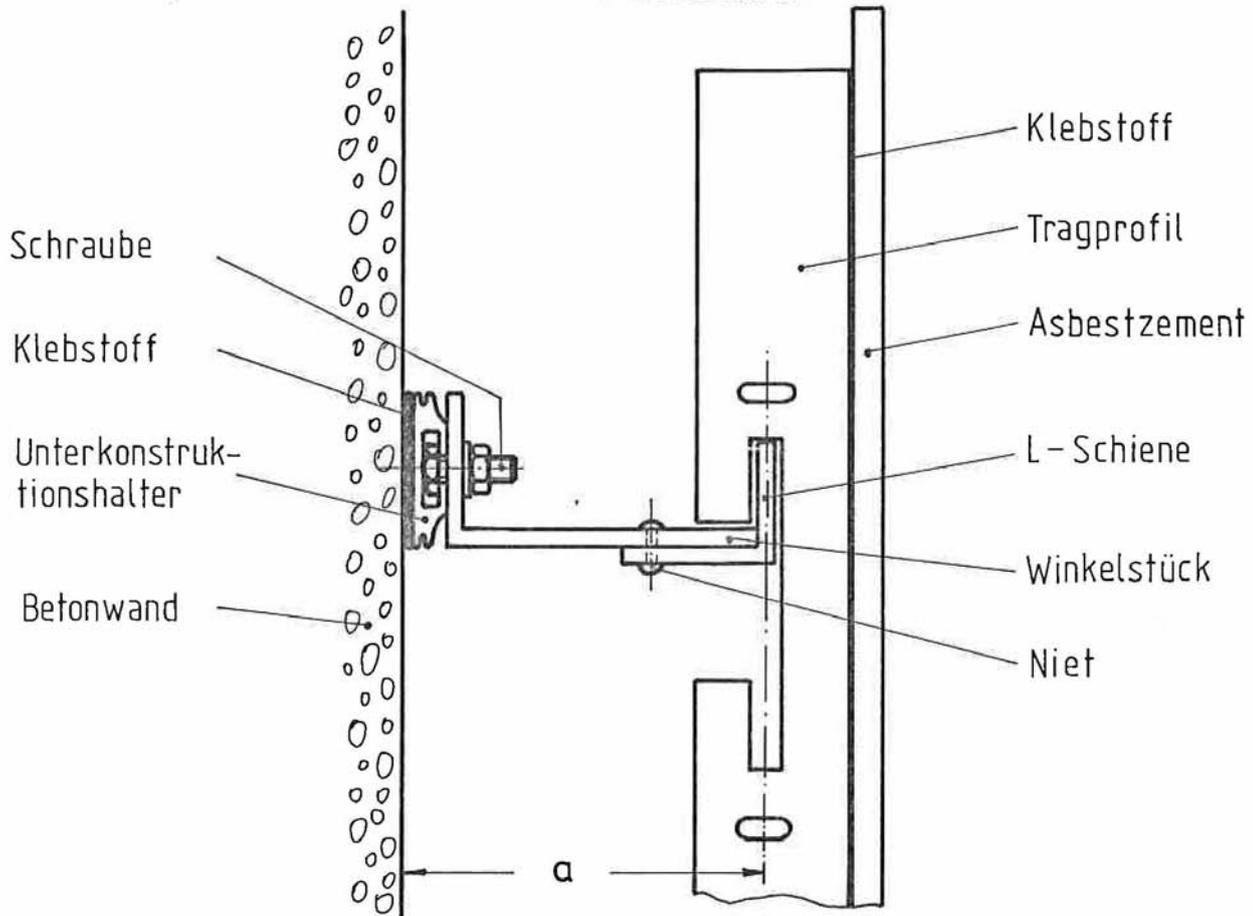
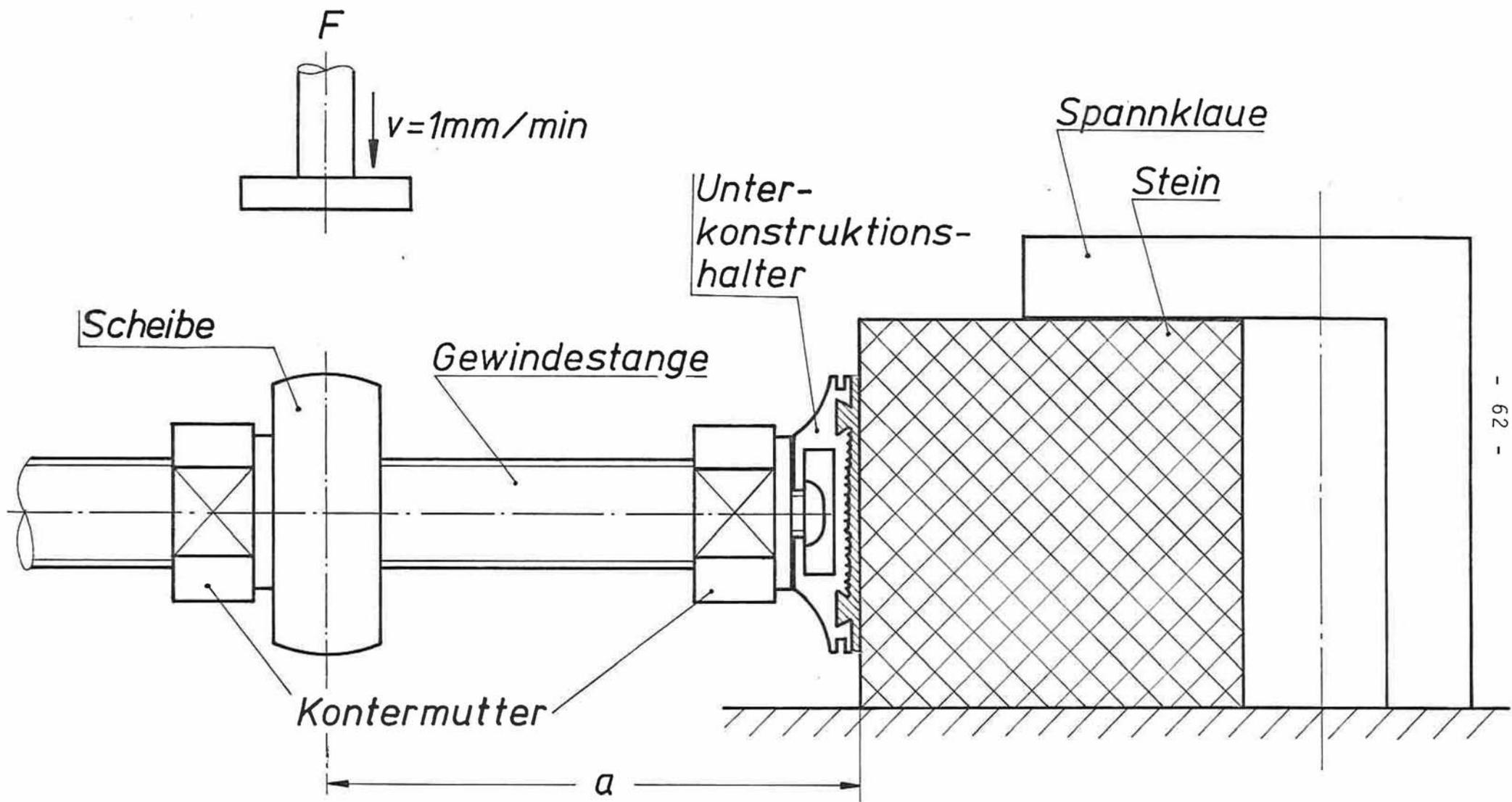


Bild 24 .: Biegebeanspruchung der Verklebung



	profilierter Halter					
a [mm]	4o		7o		1oo	
	F _{bB} [N]	Bruch	F _{bB} [N]	Bruch	F _{bB} [N]	Bruch
1	144o	S	74o	S	36o	S
2	146o	S	7oo	S	39o	S
3	155o	S	77o	S	44o	S
4	149o	S	71o	S	51o	S
5	159o	S	7oo	S	41o	S
F _{bB} mittel	15o6		724		422	
X _{5%} [N]	1295		653		327	
M _b [Nm]	6o,2		51,7		42,2	
d [mm]	1,1		1,o		1,1	

Tabelle 19: Biegeversuche ohne Vorbelastung bei unterschiedlichem Hebelarm

4.2 Biegeversuche nach einer Vorbelastung

Um den Einfluß von einer Dauerbiegebelastung auf die Verklebung zu überprüfen, wurden mit Haltern verklebte Steine (Klebstoff Bostik 2016 + 1% Sylodex) einer Dauerbiegevorbelastung unterworfen. (Bild 26). Dabei wurden die Verklebungen einer bestimmten Zeit (6m, 1y) einer Dauerbiegebelast von 10 Nm ausgesetzt. Während dieser Zeit wurde überprüft, ob sich die Lasten absenkten. Diese Belastungstests sind ein gutes Maß für die Lebensdauer einer Verbindung /1/.

Eine Absenkung und damit ein Kriechen des Klebstoffes konnte im Rahmen der Meßgenauigkeit nicht festgestellt werden (gemessen wurde mit einem Metermaßstab). Anschließend wurden die Verklebungen entlastet und direkt danach einer Biegeprüfung unterzogen. Bei einer Versuchsreihe bei Raumtemperatur und 6-monatiger Dauerbelastung (Steine getrocknet und entstaubt, Halter entfettet und geätzt) wurde eine Abnahme der Bruchlast um 30% festgestellt (Tabelle 20). Der Bruch erfolgte immer im Stein. Bei einer Reihe, die 1 Jahr lang der gleichen Dauerbiegebelastung ausgesetzt war, wurde fast die gleiche mittlere Bruchlast ermittelt wie bei Versuchen ohne Vorbelastung (Tabelle 20).

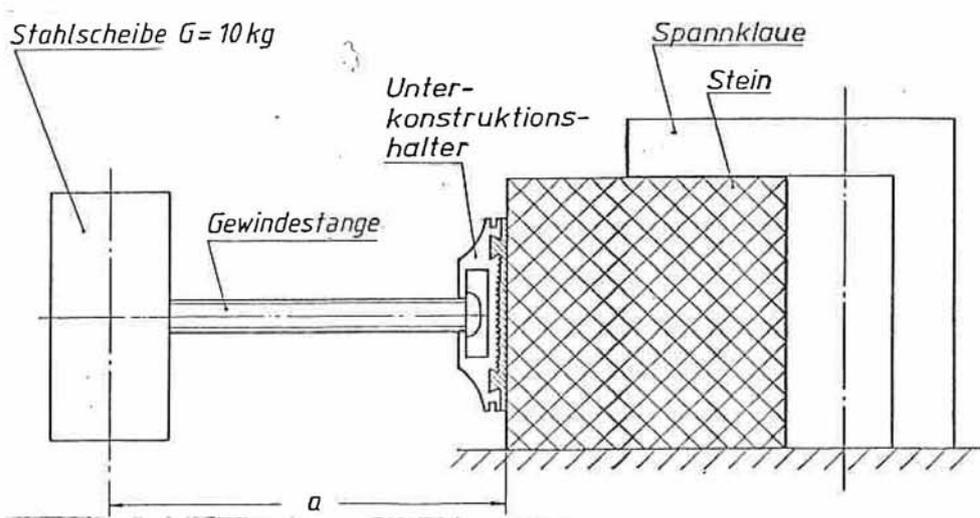


Bild 26: Aufbau des Dauerbiegebelastversuches

Die Festigkeit steigt hier also wieder leicht an. Man muß dabei die Möglichkeit von unterschiedlichen Steinqualitäten, die selbst innerhalb einer Charge auftreten, in Betracht ziehen, sowie den großen Streubereich der Steinfestigkeit. Der Bruch erfolgte immer im Stein.

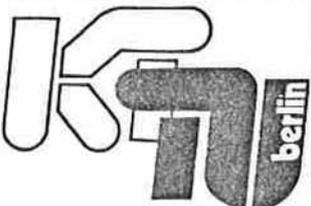
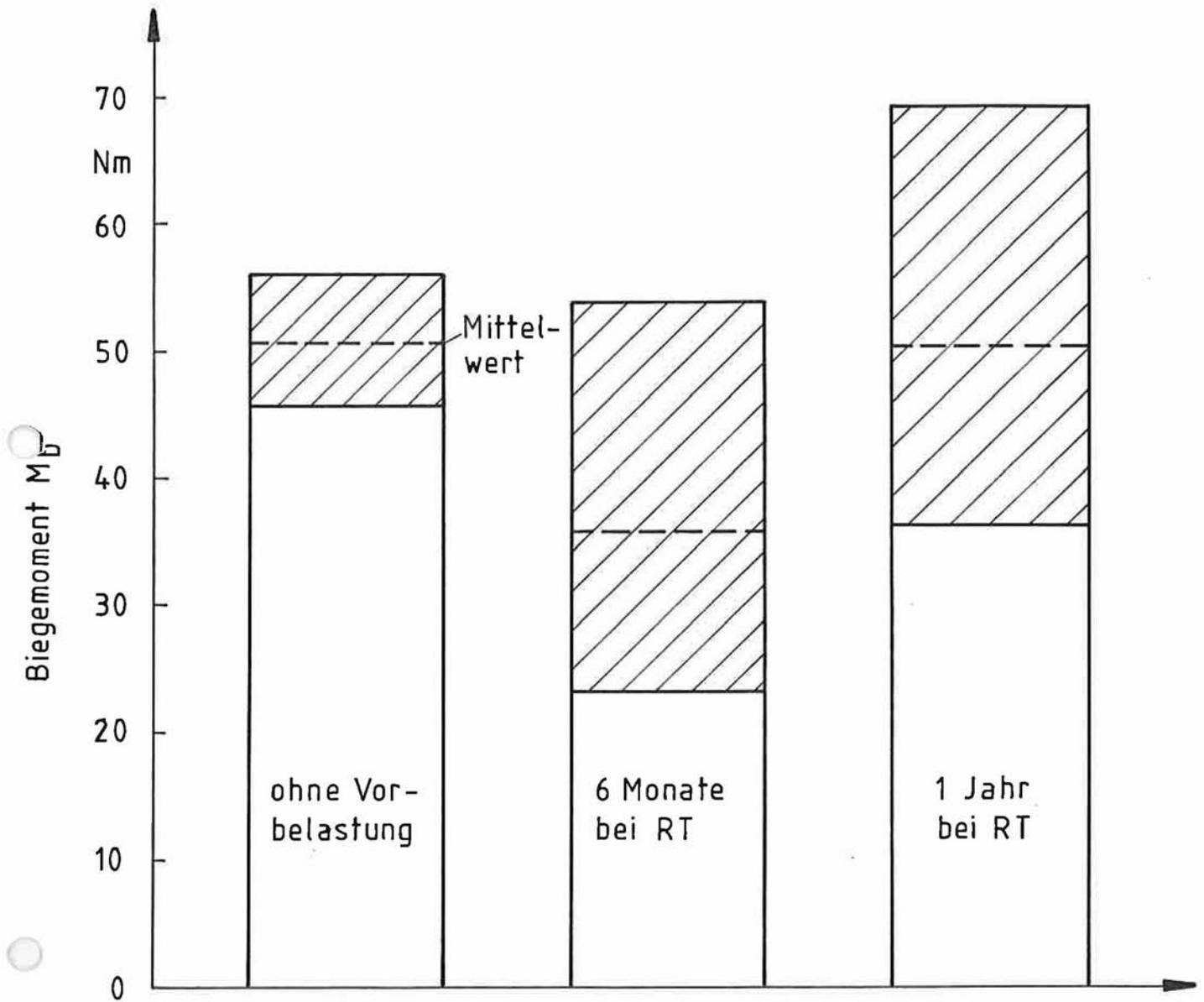
Dem wird noch eine Versuchsreihe mit einer Dauerbelastung bei einer Temperatur von 60°C, auch über 6 Monate, gegenübergestellt (Tabelle 20). Die Proben wurden direkt nach der Entnahme aus dem Trockenschrank einer Biegeprüfung nach Bild 26 unterzogen. Die Festigkeit fällt etwas ab. Der Bruch erfolgte hierbei auch in der Grenzfläche Stein/Klebstoff und einmal im Klebstoff. Das deutet wiederum auf die starke Temperaturabhängigkeit der Klebstofffestigkeit hin.

Die Ergebnisse werden in Bild 27 graphisch dargestellt.

	F_{bB} [N]		F_{bB} [N]		F_{bB} [N]		F_{bB} [N]	
	ohne Vorbelastung	Bruch	mit Vorbelastung 6 Monate, RT	Bruch	mit Vorbelastung 6 Mon. 60°C	Bruch	mit Vorbelastung 1 Jahr, RT	Bruch
Dauerbiegemoment [Nm]	-		9,81		9,81		9,81	
1	740	S	410	S	473	S/K	690	S
2	700	S	566	S	599	S	616	S
3	770	S	575	S	610	K	815	S
4	710	S	493	S	530	S/K	758	S
5	700	S						
$F_{bBmittel}$	724		511		553		719	
$X_{5\%}$ [N]	653		333		401		517	
a [mm]	70		70		70		70	
M_b [Nm]	50,7		35,8		38,7		50,3	
d [mm]	1,0		0,8		0,8		1,1	

RT = Raumtemperatur

Tabelle 20: Biegeversuche nach Vorbelastung



Bruchmoment in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bei Raumtemperatur
Bild 27

6.4.84.0217.4

Fischer / Fi

5.84

4.3 Biegeversuche bei erhöhter Temperatur

Um das Verhalten der Verklebung bei erhöhter Temperatur (z.B. durch die Sonneneinstrahlung) zu untersuchen, wurden Biegeversuche bei erhöhter Temperatur durchgeführt. Dabei wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Eine mit sorgfältig gesäuberten Steinen (getrocknet und gebürstet) (Reihe I) und eine mit unbehandelten Steinen.

Die Steine wurden mit entfetteten Haltern verklebt (Klebstoff Bostik 2916 + 1% Sylodex). Nach der Aushärtung wurden die Verklebungen 2h bei 95°C in einem Trockenschrank gelagert und anschließend direkt einer Biegeprüfung unterzogen.

Bei der Versuchsreihe mit entstaubten Steinen trat der Bruch immer in der Grenzfläche Stein/Klebstoff auf. Bei der anderen Reihe läßt sich keine bevorzugte Bruchstelle feststellen. Wie schon bei den Scherversuchen liegen die Bruchkraftwerte bei unbehandelten Steinen deutlich niedriger (siehe dazu auch Kap. 1.4.3 und 3.3) (Tabelle 21).

Die Werte werden mit dem Wert bei Raumtemperatur verglichen.

Es zeigt sich ein deutlicher Abfall der Festigkeit. Außerdem zeigt sich eine Änderung des Bruchverhaltens vom Materialbruch bis zum Adhäsionsbruch.

profilierter Halter						
	Steine entstaubt			Steine nicht entstaubt		
	F_B [N]	Bruch		F_B [N]	Bruch	
a [mm]	40			40		
1	813	S/K		-		
2	-			241	K/H	
3	886	S/K		137	K/H	
4	411	S/K		161	S/K	
5	495	S/K		221	S	

$$A_K = 50 \text{ cm}^2$$

Tabelle 21: Bruchlast nach Lagerung bei erhöhter Temperatur

5. Praxisnahe Überprüfung der Ergebnisse an einer Musterfassade auf Sichtbetonuntergrund

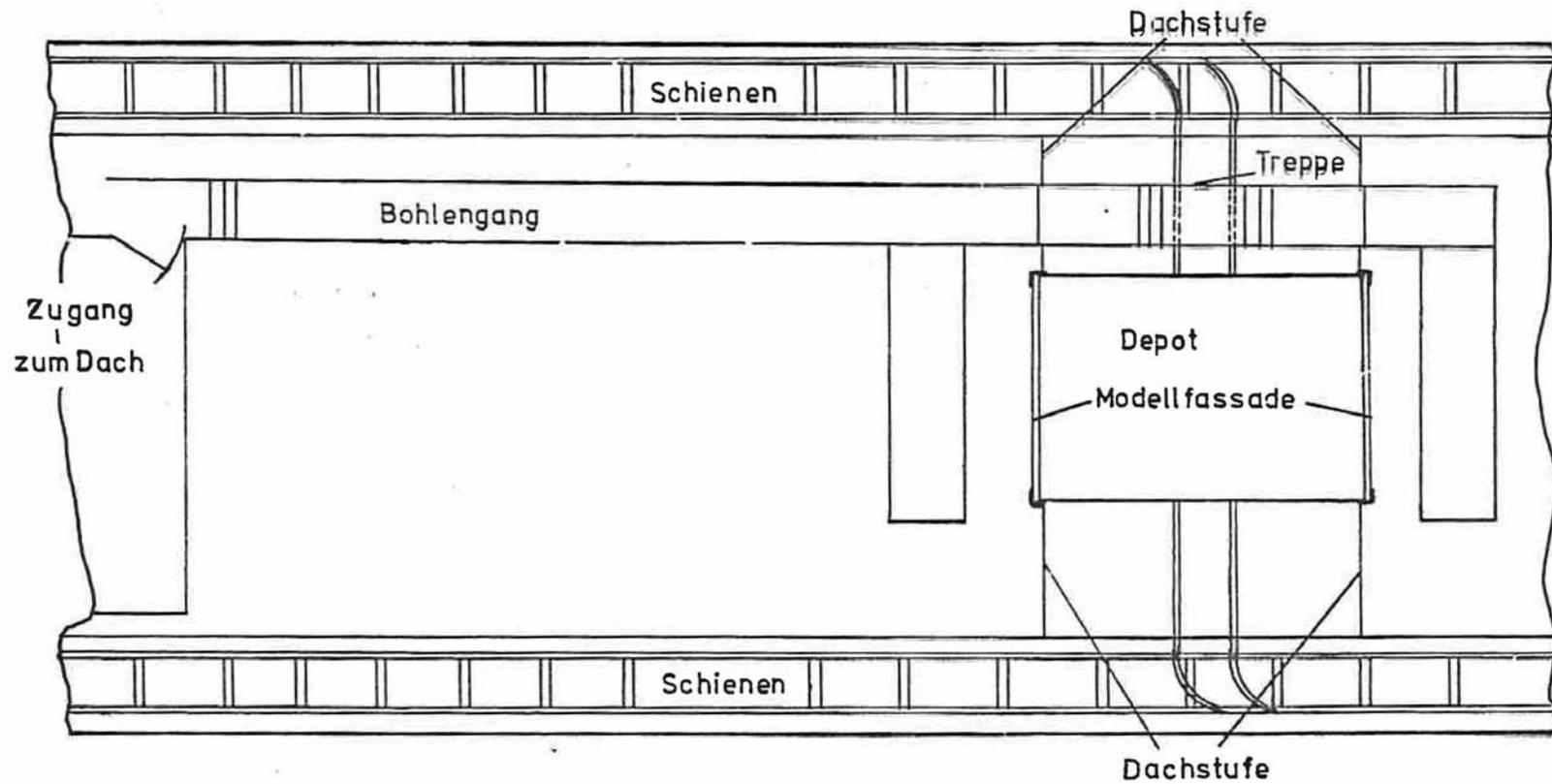
Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche sollten nun mit einem Praxisversuch untermauert werden. Daher wurden parallel zu den Untersuchungen des Forschungsvorhabens zwei Musterfassaden an exponierter Stelle unter erschwerten klimatischen Bedingungen durch Kleben angebracht. Dabei wurden in Kurzzeit- und Langzeituntersuchungen die erreichbaren Festigkeiten ermittelt und den Ergebnissen des Forschungsvorhabens gegenübergestellt.

5.1 Standort der Versuchsfassaden

Als Standort wurde ein zugänglicher Aufbau auf dem Dach des Hauptgebäudes der TU Berlin ausgewählt, da ein Standort mit einer Fassade aus dem selben Untergrundmaterial, wie es bei den Laborversuchen benutzt wurde, nicht zur Verfügung stand.

Er befindet sich in ca. 45 m Höhe, wo die Verklebungen ungeschützt den klimatischen Belastungen durch Sonne, Wind, Regen und Temperaturwechseln ausgesetzt sind. Der Untergrund für die Verklebungen besteht aus Sichtbeton in schlechtem Zustand. Die Ost- und die Westfront des Aufbaus wurden mit verklebten Fassaden bekleidet (Bild 28).

Zugang zur Modellfassade



Dach; Draufsicht

Bild 28

6.4.83.0133.4

9.83

5.2 Musterfassade I aus Asbestzementplatten (Westseite)

Bei der Musterfassade I wurden profilierte Unterkonstruktionshalter aus Aluminium auf die Wand geklebt. Nach der Aushärtung wurden diese mit der Unterkonstruktion verschraubt (Bilder 29, 30). Die Unterkonstruktion besteht aus L-förmigen Distanzstücken, die mit den Tragschienen (winkelstahlförmig) vernietet sind. In diese Tragschienen werden die Asbestzementplatten mit Hilfe der vertikal auf ihnen verklebten T-förmigen Halterschienen eingehangen (Bild 31).

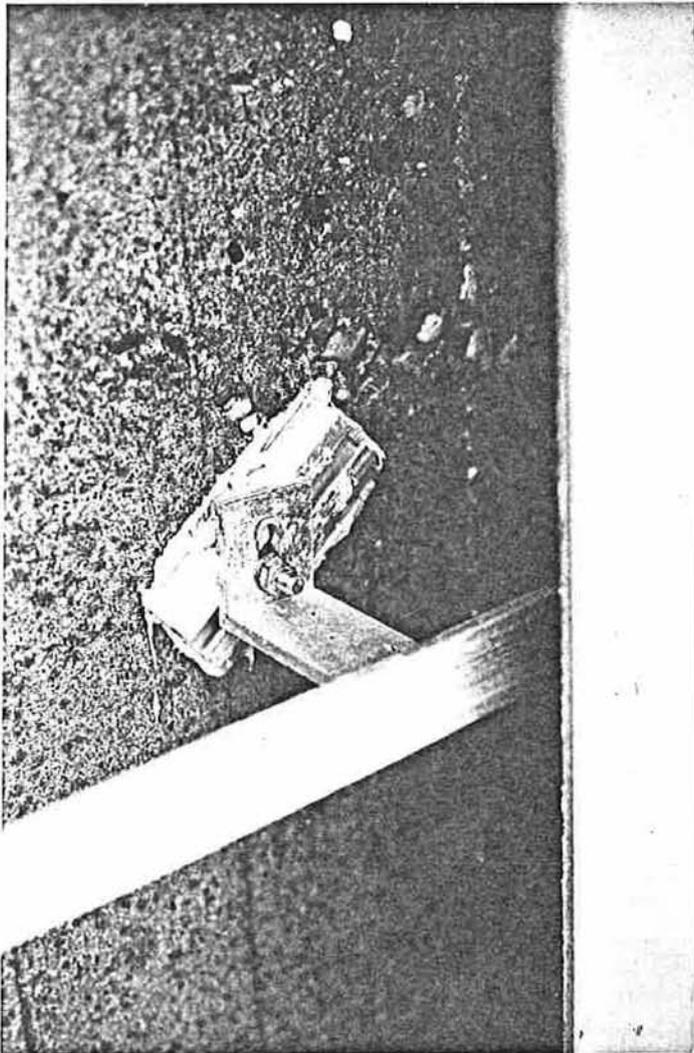


Bild 29 : Anbringung der Unterkonstruktion

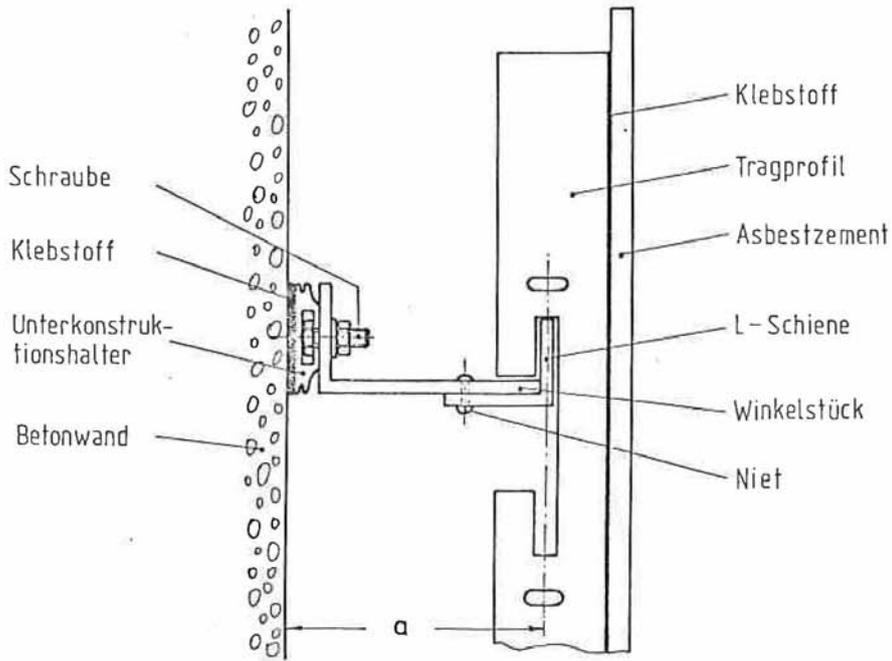


Bild 30: Schemazeichnung der Unterkonstruktion

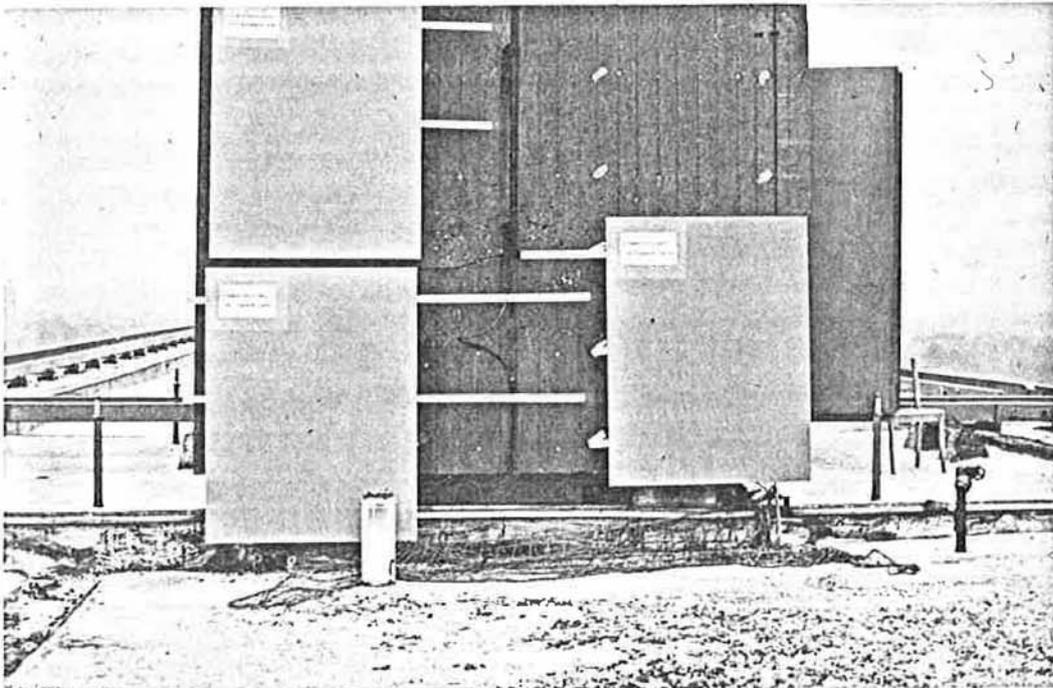


Bild 31: Anbringung der Fassadenplatten

Die Fassade I hat die Abmessungen 2,73 x 3,48 m, und auf ihr sind 20 Unterkonstruktionshalter verklebt (Bild 32).

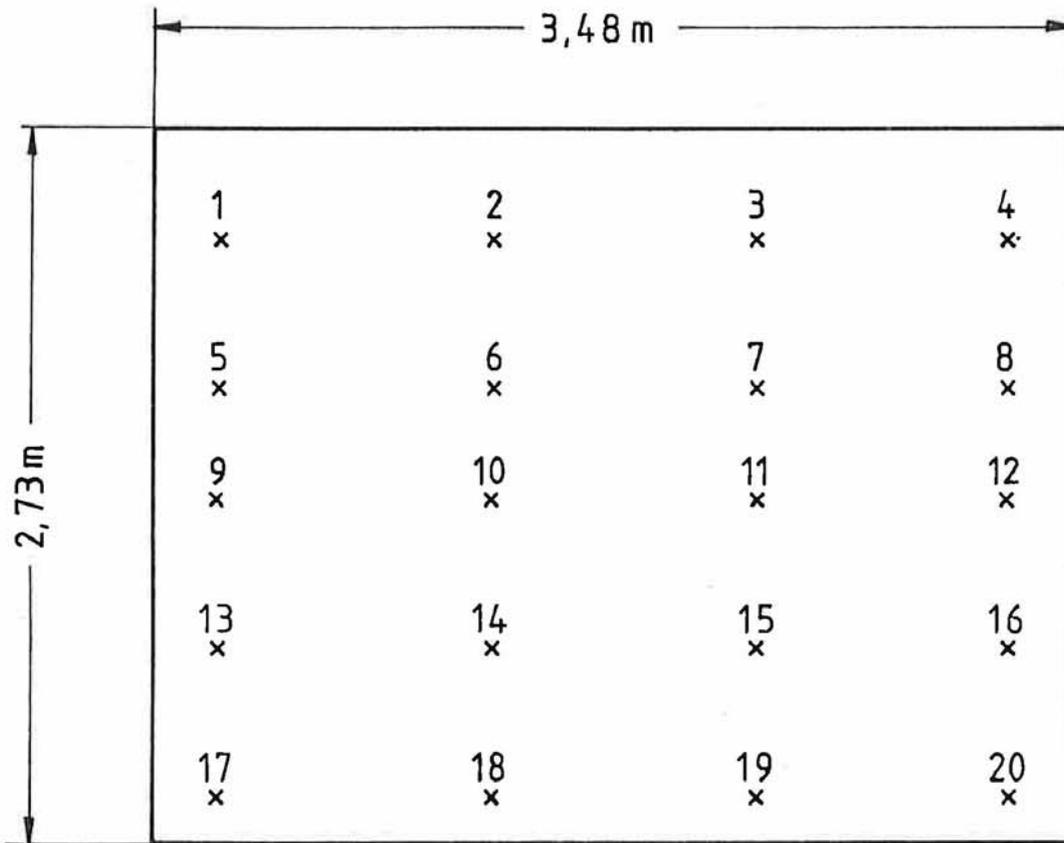


Bild 32: Maßskizze der Fassade I (Westseite)

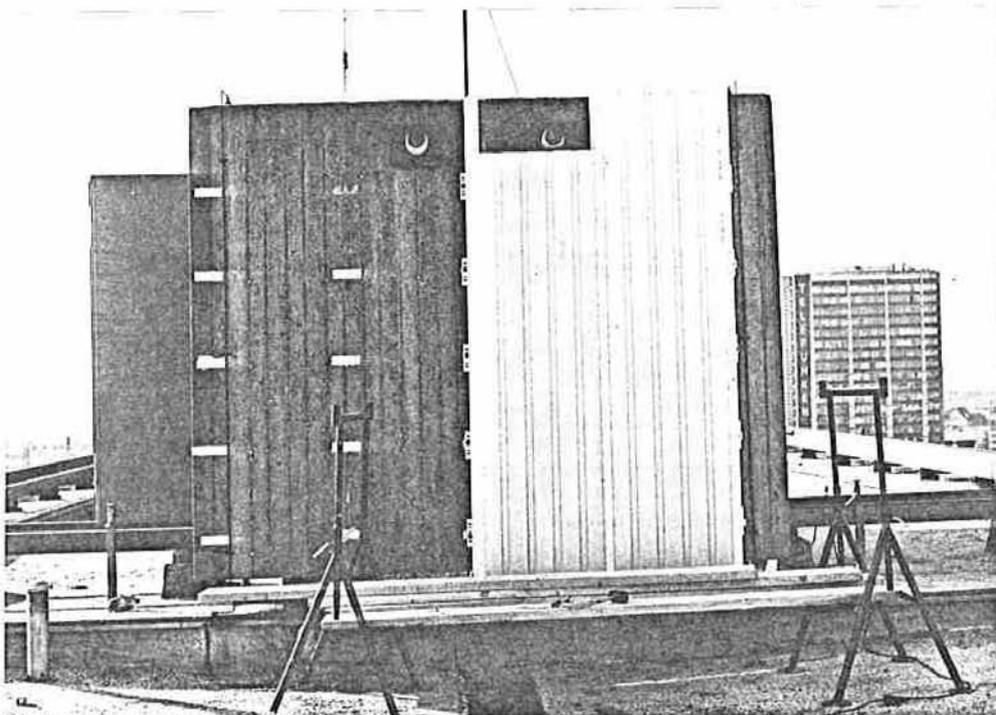


Bild 33: Musterfassade II

5.3 Musterfassade II aus PVC-Platten (Ostseite)

Auf der Ostseite des Dachaufbaus wurde eine Fassade aus Kunststoffelementen errichtet. Es wurden auch hier profilierte Unterkonstruktionshalter auf die Wand geklebt. Diese wurden mit einer Unterkonstruktion aus PVC-Tragprofilen verschraubt, in die dann die PVC-Platten eingeschnappt wurden (Bild 34).

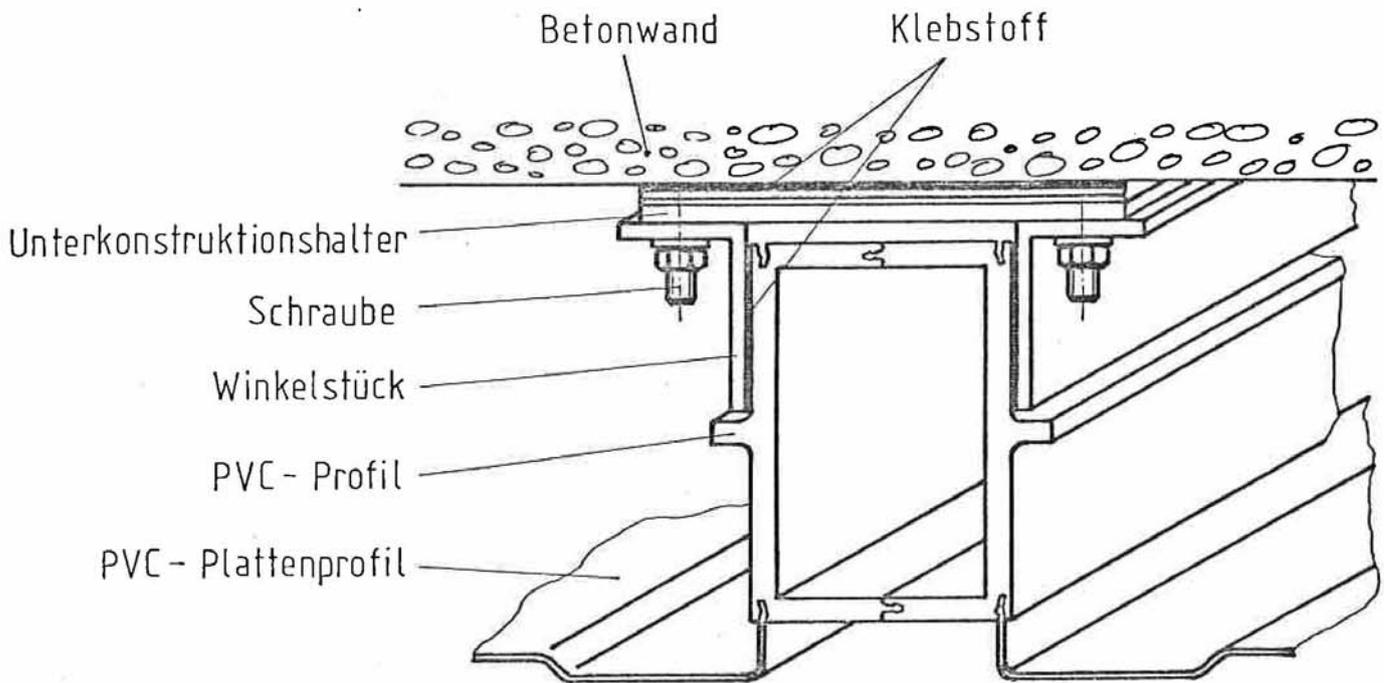


Bild 34: Unterkonstruktion für die Fassade II (Draufsicht)

Die Abmessungen der Fassade II sind ebenfalls 2,73 x 3,48 m. Auf dieser Fläche wurden 25 Halter verklebt (Bild 35).

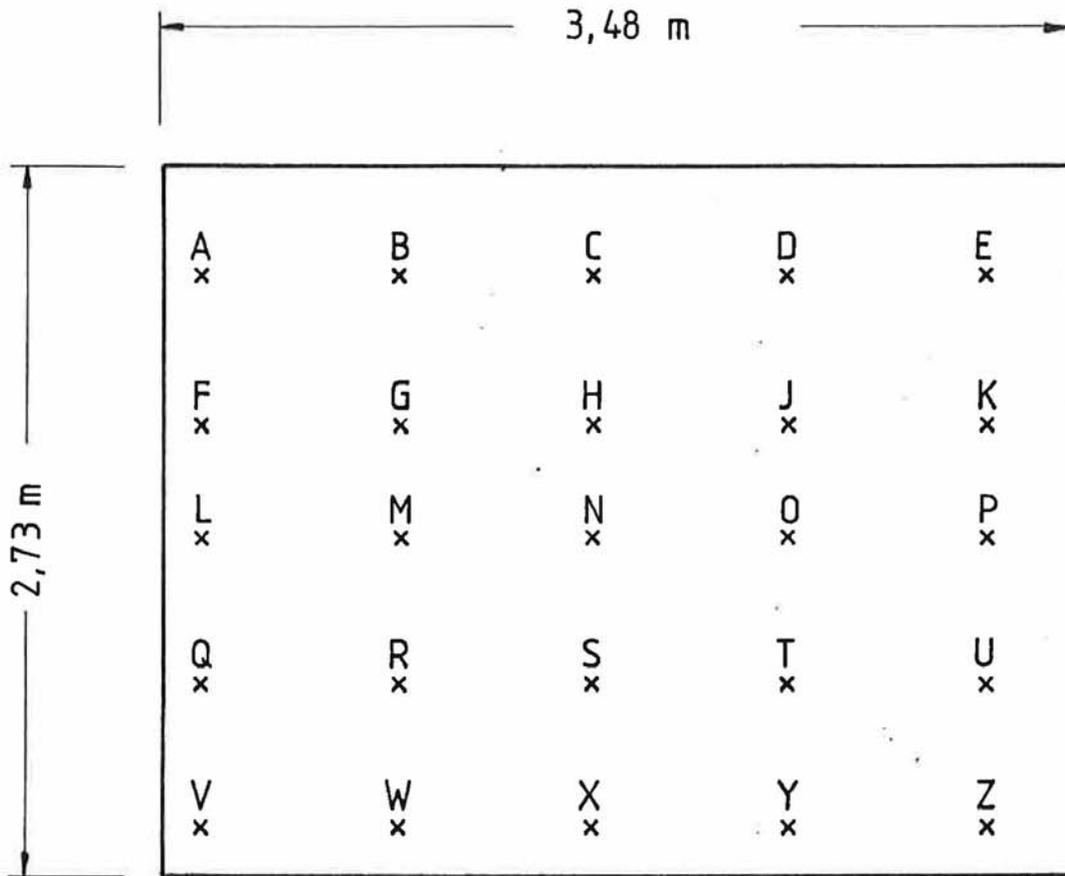


Bild 35: Maßskizze der Fassade II (Ostseite)

5.4 Durchführung der Verklebung

Die Verklebungen wurden vor Ort durchgeführt. (Zur Beschreibung von Klebstoff und Unterkonstruktionshaltern siehe Kapitel 1.3.1 und 1.2). Bei der Verklebung herrschte eine Temperatur von 8°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von ca 96% (leichter Nieselregen). Während der folgenden Tage lagen die Tageshöchsttemperaturen bei maximal 13°C und näherten sich nachts dem Gefrierpunkt. Die relative Luftfeuchtigkeit lag im Durchschnitt bei 80%.

Der Klebstoff wurde im Labor gemischt und dann zur Baustelle gefahren und während der Vorbereitungszeit im Hauptgebäude gelagert. Dies war notwendig, weil die tiefen Außentemperaturen eine Viskositätserhöhung des Klebstoffes und damit eine erschwerte Handhabung befürchten ließen.

Anschließend wurden die Halter verklebt und nach einer Aushärtungszeit von ca. 6 Stunden wurden die Fassadenplatten eingehängt, bzw. eingeschnappt. Die Fassade wurde dann mit einem Netz gesichert, welches ein Herabfallen der Fassadenplatten verhindern sollte, falls sich die Elemente lösen.

5.5 Prüfungen an den verklebten Haltern nach der Aushärtungszeit

Nach einem Jahr wurden die Halter 1 bis 10 auf der Westseite und A, F, G, L, R, W auf der Ostseite einer Stirnzugprüfung (Bild 36) unterzogen. Die Zugkraft wird dabei mit Hilfe eines Hebels mechanisch aufgebracht. Es wurde ein Mittelwert der Bruchkraft von 6000 N (das entspricht einer Spannung von $1,2 \text{ N/mm}^2$) festgestellt. Der Bruch erfolgte immer im Untergrundmaterial.

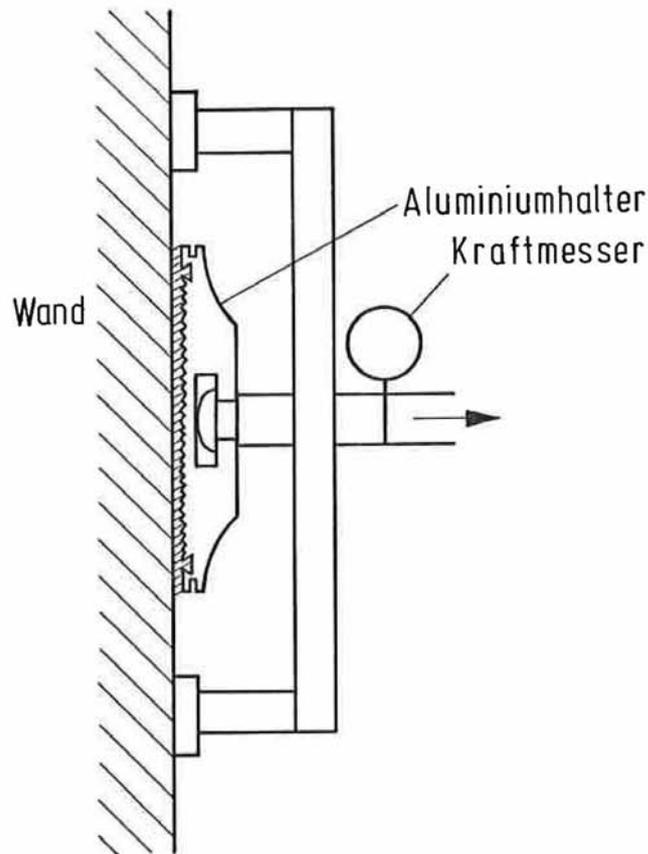


Bild 36: Zugprüfapparatur für die Musterfassade

Anschließend wurden die geprüften Halter durch neue ersetzt und die Fassadenplatten wieder eingehängt. Ein Versagen konnte bis heute nicht festgestellt werden.

5.6 Vergleich mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens

Auffallend ist beim Vergleich der Ergebnisse an der Musterfassade mit denen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens im Labor ermittelten, die hohe Festigkeit an der Musterfassade. Bei Laborversuchen nach 11-monatiger Wasserlagerung wurde eine Festigkeit von $0,85 \text{ N/mm}^2$ festgestellt.

Die Prüfungen an der Musterfassade ergaben höhere Festigkeiten.

Man muß dabei aber berücksichtigen, daß die Musterfassade auf ein anderes Untergrundmaterial geklebt war und daß die Laborbedingung 11 Monate Lagerung unter Wasser ein etwas schärferes Kriterium als die Freibewitterung der Musterfassade war.

Das deutet darauf hin, daß bei Untergründen mit hoher Oberflächenrauigkeit, wie an der Musterfassade, eine bessere mechanische Verankerung in den makroskopischen Poren erfolgt. Der Bruch erfolgte immer im Beton, nie in der Grenzfläche Stein/Klebstoff. Auch der Einfluß der Feuchtigkeit und von Frost-Wärme-Wechseln erscheint hier nicht so gravierend zu sein. Die Ergebnisse sind Überraschend positiv, da die Verklebungen ein Jahr lang den widrigen Klimabedingungen hier in Berlin schutzlos preisgegeben waren. Dieser praxisnahe Versuch hat die positiven Ergebnisse der Laboruntersuchungen vollauf bestätigt.

6. Zusammenfassung und Folgerungen für die Praxis und die Forschung

Um die Voraussetzungen für die Anwendung des Fassadenklebens in der Praxis zu klären, werden nun die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zusammengefaßt und ihre Folgerungen für die Praxis aufgezeigt. Dazu werden die Fülle der Ergebnisse in vier Bereiche aufgegliedert: Das Klebsystem, die Durchführung, die Beanspruchung sowie die Qualitätssicherung.

6.1 Erstellung eines Klebsystems Halter/Klebstoff/Untergrundmaterial

Sachverhalt	Ergebnisse	Kapitel
Auswahl geeigneter Konstruktionshalter	Halter mit profilierter Klebfläche, um formschlußunterstützte Klebung zu erreichen.	Kapitel 1.2 1.3.3

Für die Befestigung der Unterkonstruktion empfiehlt sich ein Halter zum Beispiel aus Aluminium mit einer profilierten Klebfläche mit Hinterschneidung, so daß bei der Klebung ein Formschluß entsteht.

Die im Rahmen dieses Vorhabens erprobten profilierten Halter erwiesen sich durch ihre zusätzliche, im Formschluß begründete mechanische Verankerung und durch ihre wesentlich größere Fügefläche als wesentlich festere Verbindung mit dem Untergrund.

Vorbehandlung der Klebflächen der Unter- konstruktionshalter	Entfetten und anschließendes Aufrauhern (z.B. mit Schmirgel)	Kapitel 1.2.1
--	---	---------------

Als Oberflächenvorbehandlung der Klebfläche des Unterkonstruktionshalters erweist sich Entfetten und anschließendes Schmirgeln als ausreichend. Ein Ätzen der Klebfläche ist bei einem Halter mit profilierter Klebfläche nicht erforderlich.

Wahl des Klebstoffes	Epoxid-Harz- Reaktionskleb- stoff mit Thixo- tropierungsmit- tel	Kapitel 1.3 - 1.3.5
-------------------------	--	------------------------

Als Klebstoff wurde ein Epoxid-Harz-Reaktionsklebstoff gewählt. Ihm wurde ein Thixotropierungsmittel zugesetzt, da der ungefüllte Klebstoff für die Durchführung von Klebungen mit senkrechten Fügeflächen zu dünnflüssig ist.

Der Klebstoff muß eine gute Beständigkeit gegen Alterung und Wassereinwirkung mitbringen. Um die bautechnischen Vorschriften zu erfüllen, ist eine genügende Festigkeit bei erhöhter Temperatur erforderlich.

Für diese Untersuchungen fiel die Wahl auf den Zweikomponenten-Epoxid-Harz-Klebstoff Bostik 2916, dem als Thixotropierungsmittel 1% Sylodex (Firma Grace) zugesetzt wurde. Durch den Zusatz von Sylodex ergab sich keine nennenswerte Änderung der Festigkeit der Verklebungen.

Das Untergrundmaterial und dessen Vorbehandlung	Der Untergrund muß möglichst fest, trocken und staubfrei sein	Kapitel 1.4 2.2.1 3.2.1
---	---	-------------------------------

Als Untergrundmaterial wurden Hochlochklinkersteine (240 x 115 x 75 mm) untersucht. An der Musterfassade konnten auch auf sehr porösem Betonuntergrund akzeptable Festigkeiten erzielt werden, da hier eine bessere Verankerung des Klebstoffes im Untergrund durch Eindringen in Poren und Spalten des Betons möglich war. Als Vorbehandlung für das Steinmaterial ist ein Trocknen des feuchten Steines unerläßlich. Es zeigte sich, daß sich die Haftung des Klebstoffes durch die Oberflächenfeuchtigkeit erheblich vermindert. Es wurden daher bei diesen Versuchen auch Adhäsionsbrüche festgestellt, während bei getrockneten Steinen nur Materialbrüche im Stein auftraten. Eine eventuell notwendige Trocknung kann z.B. mit der Flamme eines Brenners durchgeführt werden. Um auf ein solches Trocknen verzichten zu können, wurde die Vorbehandlung der feuchten Steine mit einem Haftvermittler (Primer) untersucht. Mit den verwendeten Primern Bostik 5017 und Bostik 5031 konnte keine Verbesserung des Festigkeitsverhaltens erzielt werden. Das scheint aber mit einem speziell auf die Verhältnisse des Fassadenklebens zugeschnittenen Primers möglich zu sein. Ein gründliches Entfernen von Staub und Verunreinigungen von der Klebfläche ist erforderlich.

Sandige und staubige Steinoberflächen verhindern eine gute Benetzung durch den Klebstoff. Es kommt dann auch zu Adhäsionsbrüchen und einer Abnahme der Festigkeit der Verklebung. Das zeigte sich besonders deutlich bei Scherversuchen (Kap.3.3).

6.2 Durchführung der Verklebung

Das Auftragen des Klebstoffes	Auftrag mit einer Kleb- pistole oder Auftrag von Hand mit Spachtel, ein- seitig auf Stein oder Halter	Kapitel 1.3.1:1 1.3.6.8
-------------------------------	---	----------------------------

Der Klebstoff wurde mit gutem Erfolg von Hand gemischt und mit dem Spachtel aufgetragen.

Um mögliche Fehler zu vermeiden, empfiehlt es sich, den Auftrag mittels einer Klebpistole und Klebstoff-Härter-Kartuschen vorzunehmen. Die dazu getestete Klebpistole "Hit-System" der Firma Hilti, ausgerüstet mit einem statischen Mischrohr, ermöglichte sauberen Klebstoffauftrag mit konstantem Mischungsverhältnis Harz/Härter und garantierte einen Schutz vor vorzeitigem Aushärten des Klebstoffes. Die Mischung der Klebstoffkomponenten erfolgte erst im Augenblick des Auftragens.

Der Klebstoffauftrag kann einseitig auf Halter oder Stein erfolgen. Ein beidseitiges Aufbringen oder ein Verteilen mit einem Zahnspachtel erwies sich als nicht erforderlich.

Die Dicke der Klebstoffschicht	Schichtdicke minimal 1 mm	Kapitel 1.3.7
--------------------------------	------------------------------	---------------

Ein Einfluß der Dicke der Klebstoffschicht, abgesehen von einer gewissen Mindestdicke (vollständige Benetzung), wurde nicht festgestellt. Es wurden dazu Schichtdicken zwischen 1mm und 5 mm untersucht. Der Bruch erfolgte immer im Stein. Deshalb ist ein Mindestauftrag ab 1 mm bis mehrere mm Schichtdicke vorzusehen.

6.3 Die erzielten Festigkeiten bei unterschiedlichen Lastfällen und Beanspruchungen

Beanspruchung der Verklebung durch das Gewicht der Unterkonstruktion und der Fassadenplatten (Lastfall Scherung und Biegebeanspruchung)	Scherfestigkeit ohne Vorbelastung $\tau = 4,1 \text{ N/mm}^2$; Festigkeitsabfall nach einer Lagerung bei 95°C auf $\tau = 2,11 \text{ N/mm}^2$, sowie nach 11-monatiger Wasserlagerung auf $\tau = 1,4 \text{ N/mm}^2$	Kapitel 3 Kapitel 4
---	--	------------------------

In der Praxis muß die Verklebung das Gewicht der Unterkonstruktion und der Fassadenplatten aufnehmen. Die Beanspruchung ist statisch. Im Idealfall werden die Fassadenplatten direkt an den Unterkonstruktionshaltern befestigt. Der Hebelarm der Gewichtskraft ist dann sehr klein, und die Klebefuge wird auf Scherung beansprucht. Bei den im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Scherprüfungen erwies sich die Belastung nach einer Lagerung bei hoher Temperatur als scharfes Prüfungskriterium. Die Festigkeit sinkt von $4,1 \text{ N/mm}^2$ ohne Vorbelastung auf $2,11 \text{ N/mm}^2$. Der Bruch verlagert sich hier in die Grenzfläche Stein/Klebstoff bzw. in den Klebstoff, im Gegensatz zu den Versuchen ohne Vorbelastung, bei denen der Bruch ausschließlich im Stein auftrat.

Nach einer 11-monatigen Wasserlagerung fiel die mittlere Festigkeit der Verklebungen auf $\tau = 1,4 \text{ N/mm}^2$ ab. Das sind 34 % des Wertes ohne Vorbelastung. Auch hier trat der Bruch nicht mehr im Stein, sondern in der Grenzfläche Stein/Klebstoff auf.

Bei den durchgeführten Biegeversuchen kommt es zu einer Überlagerung von Biege- und Schubbeanspruchung.

Die Erwartungen, daß die Verklebung bei einer kleinen Querkraft eine große Momentenbelastung zuläßt, bzw. bei einer großen Querkraft eine kleine Momentenbelastung, wurden durch die Versuche nicht bestätigt. Um diese Tendenz zu erhärten, sind weitere Versuche unbedingt erforderlich.

Ein für die Festigkeitsanalyse notwendiges Interaktionsdiagramm zwischen Biege- und Schubbeanspruchung konnte nicht erstellt werden.

Dazu ist auch noch ein Versuch zur Ermittlung des Bruchwertes bei einer Biegebelastung ohne Querkrafteinfluß erforderlich. Bei einem anschließenden Forschungsvorhaben sollten diese Punkte unbedingt berücksichtigt werden.

Im weiteren konnte bei den Versuchen nach einer Lagerung bei 95°C wieder die Tendenz des Festigkeitsabfalls durch den Einfluß der Temperatur festgestellt werden. Das Bruchverhalten änderte sich wie bei den Stirnzug- und Scherversuchen vom Steinbruch ohne Vorbeanspruchung zum Adhäsionsbruch zwischen Stein und Klebstoff bzw. Halter und Klebstoff. Vereinzelt kam es auch zu Kohäsionsbrüchen im Klebstoff.

Beanspruchung der Verklebung durch Windumströmung und den dadurch auftretenden Windsog (Lastfall Stirnzug)	Zugfestigkeit ohne Vorbelastung $\sigma = 0,84$; Festigkeitsabfall auf $\sigma = 0,45 \text{ N/mm}^2$ nach einer Lagerung bei 95°C im Trockenschrank und direkt anschließender Prüfung	Kap. 2
--	---	--------

Außerdem werden in der Praxis die verklebten Fassadenplatten durch den bei der Gebäudeumströmung auftretenden Windsog auf Stirnzug belastet.

Diesem wurde bei den Untersuchungen durch Stirnzugprüfungen der Verklebungen Rechnung getragen. Dabei zeigte sich als schärfstes Belastungskriterium die Beanspruchung nach einer Lagerung bei 95°C . Hier sinkt die Festigkeit der Verklebung auf $0,45 \text{ N/mm}^2$, das sind 54% des Wertes ohne Vorbelastung.

Der Bruch tritt hier nicht mehr im Steinmaterial auf sondern verlagert sich in die Grenzfläche Stein/Klebstoff.

Im weiteren ist auf den Festigkeitsabfall nach gezielten Frost-Wärme-Wechseln hinzuweisen. Hier sinkt die Festigkeit nach 40 Zyklen auf $\sigma = 0,51 \text{ N/mm}^2$ das sind 61% des Wertes ohne Vorbelastung. Allerdings trat hier der Bruch immer im Stein auf.

Weniger Bedeutung ist den Vorbelastungen durch UV-Bestrahlung und durch vorgegebene besonders trockene oder feuchte Klimate beizumessen. Ein großer Einfluß auf die Festigkeit konnte hier nicht festgestellt werden. Der Bruch erfolgt immer im Stein.

6.4 Gesichtspunkte der Qualitätssicherung

Qualitätssicherung	Bestimmung eines optimalen Klebsystems mit reproduzierbaren Klebfestigkeiten	Kap. 6.4
--------------------	--	----------

Hierzu sind mehrere Gesichtspunkte zu beachten. Voraussetzung für reproduzierbare Klebfestigkeiten ist ein möglichst standardisiertes Verarbeitungssystem, wie zum Beispiel eine Klebpistole, und genau definierte Materialvorbehandlungen. Auch für die Auswahl eines für die auftretenden Beanspruchungen geeigneten Klebstoffes ist zu sorgen. Mit einem so bestimmten optimalen Klebsystem sind die Voraussetzung für eine reproduzierbar hochqualitative Klebung gegeben.

Es ist außerdem sehr wichtig, evtl. Schwächen des Systems zu erkennen und durch speziell auf sie abgestimmte Versuchsprogramme, diese genauer zu beleuchten. Bei diesem Vorhaben zeigten sich Schwachstellen der Festigkeit bei erhöhter Temperatur und nach mehrmonatiger Wasserlagerung.

Anders sieht es bei hohen Temperaturen aus, wie sie z.B. durch einen Brand auftreten können. Hier ist wohl das größte Problem des Fassadenklebens zu sehen. Eine Lösungsmöglichkeit wäre in einem speziell für diese Beanspruchung geeigneten Klebstoff zu sehen, der auch noch bei den bei einem Brand auftretenden Temperaturen über eine ausreichende Festigkeit verfügt.

6.5 Hinweise für weitere Forschung

Im weiteren soll noch darauf hingewiesen werden, welche Gesichtspunkte bei diesem Forschungsvorhaben nicht berücksichtigt wurden, oder nur unzureichend bearbeitet werden konnten und die bei einem weiteren Forschungsprojekt berücksichtigt werden sollten. Noch weitaus eingehender sollte das Verhalten der Verklebung bei Temperaturbelastung untersucht werden. Dazu sollten Versuche in einer Temperatorkammer durchgeführt werden, die zu einem Zusammenhang zwischen Klebfestigkeit und Temperatur führen. Bei der gemischten Belastung aus Scherung und Biegung sollte für die Bestimmung einer Dunkerley-Gerade der Wert für reine Biegung ermittelt werden. Auch sind weitere Versuche zum Einfluß von Moment und Querkraft erforderlich. Die innerhalb des Forschungsvorhabens ermittelten Werte reichen für eine abgesicherte Aussage nicht aus.

Auch die Ursachen für die unterschiedliche Bruchform bei den Klimaversuchen müßten noch näher beleuchtet werden.

Zum Vergleich zu den Versuchen nach einer 11-monatigen Wasserlagerung wären auch Versuche nach 11-monatiger Lagerung in Raumklima interessant. Auch wäre es denkbar, daß bei Verwendung eines speziell für diese Problematik geeigneten Primers die Feuchtigkeitsempfindlichkeit des Klebesystems verringert werden kann.

Um Aussagen über das Zeitstandverhalten der Verklebungen machen zu können, sind Langzeitversuche über mindestens 5 Jahre erforderlich.

Für die weitere Forschung wäre auch eine Untersuchung mit einem anderen Klebstoffsystem (z.B. Polyurethan) sicher wünschenswert.

7. Literaturverzeichnis

- / 1 / H. Käufer: Arbeiten mit Kunststoffen Bd. II, Verarbeitung, 2. Auflage
Springer-Verlag, 1981
- / 2 / M. Michel: Theorie der Klebe- und Dichttechnik,
in: Kleben und Dichten im Innenausbau
Klebtechnische Seminare Rosenheim, Seminar 2/81
- / 3 / E. Jenkel, Das Verkleben von Aluminium mit carboxyl-
H. Huhn : substituiertem Polystyrolen
Forschungsbericht des Wirtschafts- und
Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen
Nr. 656
- / 4 / M. Michel: Adhäsion und Klebtechnik
C. Hanser-Verlag 1969
- / 5 / G. Scherer: Fußbodenklebstoffe
in / 2 /
- / 6 / W. Teepe: Vorläufige Richtlinien für das Verkleben
von unbewehrten und bewehrten Betonbauteilen
mittels Reaktionsharzen
VDI-Berichte Nr. 122 1968 S. 37/41
- / 7 / M. Krieg: Kraftübertragende Verklebungen im Bauwesen
Kunststoffe im Bau 7/8 1982 S. 77/79
- / 8 / F. Mang: Geklebte Verbindungen von Stahl- und Leicht-
metall-Konstruktionen
Rohre - Rohrleitungsbau - Rohrleitungstrans-
port 2/1976 S. 92/99

- / 9/ E.H. Ranisch Zur Tragfähigkeit von Verklebungen
zwischen Baustahl und Beton -
Geklebte Bewehrung -
Dissertation TU Braunschweig 1982
- /10/ Fauner/
Endlich Angewandte Klebtechnik
C. Hanser-Verlag 1979
- /11/ R. Czerny Neue Schmelzklebverbindungen in
Fertigung und Montage,
in / 2 /
- /12/ E. Zuber Einfluß nachgiebiger Fassadenunter-
konstruktionen auf Bekleidung und
Befestigung
Mitteilung Institut für Bautechnik
(10) 1979, Heft 2, S. 45-50
- /13/ K. Martin,
E. Zuber Fassaden im Mauerwerksbau
Mauerwerk-Kalender 1979, S. 173-239
- /14/ Vorläufige Richtlinie für die statische
Auswertung von Prüfergebnissen bei Zulas-
sungs- und Überwachungsprüfungen von Bau-
teilen und Bauarten aus Kunststoff
Institut für Bautechnik (1982)
- /15/ Richtlinien für Fassadenbekleidungen mit
und ohne Unterkonstruktion
Ausgabe August 1975
- /16/ DIN 18 516 Teil 1 (Entwurf) Juli 1982
Außenwandbekleidungen, Bekleidung, Unter-
konstruktion und Befestigung. Allgemeine
Anforderungen.

Anhang: Zusammenstellung der Versuche

1. Grundlagen

	Versuchsart	Kapitel	Proben- zahl
1	Variation der Haltervorbehandlung; glatte Klebefläche	1.2	6
2	Variation der Haltervorbehandlung; profilierete Klebefläche	1.2.1	19
3	Einfluß der Größe der Halterklebfläche	1.2.2	3
4	Festigkeit des Klebstoffs,ungefüllt	1.3.2	4
5	Festigkeit des Klebstoffs,gefüllt	1.3.2	7
6	Formschlußunterstützte Klebung	1.3.3	10
7	Festigkeit bei reinem Formschluß	1.3.4	4
8	Viskosität des Klebstoffs	1.3.5	20
9	Kleberauftrag ein- und beidseitig	1.3.6.1	11
10	Kleberauftrag mit Zahnspachtel	1.3.6.2	5
11	Schichtdicke der Klebefuge	1.3.7	8
12	Bruchflächenbegrenzung bei der Prüfung	1.4.2	10
13	Staub auf der Steinoberfläche	1.4.3	8
14	Oberflächentrocknung eines Steines mit Maximalfeuchte mit Propangasbrennern	1.4.4.1	19
15	Verwendung von Primern bei Steinen mit Maximalfeuchte	1.4.4.2	6

2. Stirnzug

Versuchsart		Kapitel	Probenzahl
16	Festigkeit ohne Vorbeanspruchung	2.1.1	15
17	Wasserlagerung nach der Verklebung, mit Thixotropierungsmittel	2.2.1	9
18	UV-Bestrahlung nach der Verklebung	2.2.2	3
19	Temperaturwechsel nach Verklebung (-20°C)-(+60°C) 1 Zyklus (heizen/kühlen) = 150 min, mit Thixotropierungsmittel, 20, 30, 40 und 200 Zyklen	2.2.3	12
20	Klima 16 %// 10°C	2.3	5
21	Klima 28 %// 5°C	2.3	5
22	Klima 98 %// 10°C	2.3	5
23	Klima 98 %// 40°C	2.3	5
24	Klima 20 %// 40°C	2.3	5
25	Feuchtigkeit während der Verklebung; Klinker	2.3	25
26	Erhöhte Prüftemperatur, Stein entstaubt	2.4	4

3. Scherung

Versuchsart		Kapitel	Proben- zahl
27	Mit und ohne Bruchflächenbegrenzung, Platte statt Halter	3.1	7
28	Normaler Halter	3.1	4
29	Wasserlagerung	3.2.1	4
30	Temperaturwechsel nach Verklebung (-20°C)-(+60°C) 1 Zyklus = 150 min	3.2.2	8
31	40 und 200 Zyklen mit Thixotropierungs- mittel.	3.2.2	8
32	Erhöhte Temperatur bei der Prüfung, Stein entstaubt	3.3	4
33	Erhöhte Temperatur bei der Prüfung, Stein nicht entstaubt	3.3	5
34	Klima 16 %// 10°C	3.4	4
35	Klima 28 %// 5°C	3.4	5

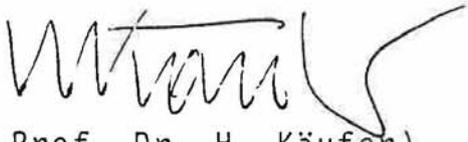
4. Biegung

Versuchsart		Kapitel	Probenzahl
36	Einfluß des Hebelarms	4.1	15
37	Dauerlast bei RT 11 Nm; Überlastungstest	4.2	4
38	Dauerlast bei 60°C 8 Nm; Überlastungstest	4.2	4
39	Dauerlast bei 60°C 11 Nm	4.2	4
40	Erhöhte Prüftemperatur, Stein nicht entstaubt	4.3	4
41	Erhöhte Prüftemperatur; Steine entstaubt	4.3	4

5. Musterfassade

Versuchsart		Kapitel	Probenzahl
42	Feuchtigkeit während der Verklebung; Beton	5.4	

Berlin 21, den 30. Mai 1984

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'H. Käufer', with a long horizontal stroke extending to the right.

(o.Prof. Dr. H. Käufer)

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'K.-D. Fischer', with a long horizontal stroke extending to the right.

(Dipl.-Ing. K.-D. Fischer)

Be. 13.07.84.