

# Beurteilung der Lebensdauer von langzeitig beanspruchten GF-UP- Bauteilen

**T 2067**

T 2067

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# INGENIEURBÜRO FRANKEN

## KUNSTSTOFFPRÜFSTELLE FRANKEN

Dipl.-Ing. Helmuth W. Franken  
BERATENDER INGENIEUR VBI

Gewerbestr. Süd 24 · 5140 Erkelenz · Tel. 0 24 31 - 7 36 51  
Röckertstr. 19 · 8702 Kleinrinderfeld · Tel. 0 93 66 - 3 12

Forschungsbericht: 11/88 F  
Schlußbericht

Forschungsthema: Beurteilung der Lebensdauer von langfristig  
beanspruchten GF-UP-Bauteilen

Auftraggeber: Institut für Bautechnik, Berlin

Der Bericht umfaßt 133 Seiten mit 4 Tabellen  
und 117 Bildern

Erkelenz, den 12. Dezember 1988



Dipl.-Ing. Helmuth W. Franken

## I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

		Seite
1	Kunststoffe im Bauwesen	1
2	Entwicklung der GF-UP-Silos	3
2.1	Bauaufsichtliche Genehmigungsverfahren	3
2.1.1	Rechtsgrundlagen	4
2.1.2	Richtlinien	6
2.1.3	Zulassungsprüfungen	7
2.1.4	Lastannahmen	16
2.1.5	Bemessungsverfahren	17
2.2	Typische Konstruktionsbeispiele	36
2.2.1	Geometrische Grundformen	36
2.2.2	Konstruktionsdetails	43
3	Baustoffkomponenten	71
3.1	Reaktionsharze	71
3.2	Verstärkungswerkstoffe	74
3.3	Zusatzstoffe	75
3.4	Reaktionsmittel	75
4	Herstellverfahren	76
4.1	Handlaminieren	76
4.2	Faserspritzen	76
4.3	Injektions- und Vakuumverfahren	78
4.4	Naßpressen	78
4.5	Schleuderverfahren	78
4.6	Wickelverfahren	78
5	Eigenschaften von GF-UP-Laminaten	80
5.1	Kennwertbestimmung durch Versuche	82
5.1.1	Kurzzeitversuche	82
5.1.2	Langzeitversuche	84
5.2	Berechnung von Kennwerten	89
5.3	Bezeichnungen nach Entwurf DIN 18820	92
6	Dauerverhalten	93
6.1	Witterungsbedingte Veränderungen	93
6.1.1	Stufe I	93
6.1.2	Stufe II	94
6.1.3	Stufe III	94
6.1.4	Stufe IV	94

# I

6.2	Äußerer Zustand, Typische Beispiele	102
6.3	Laminatoberfläche im Innern	108
6.4	Lastbedingte Schäden	109
6.5	Werkstoffprüfungen	109
6.5.1	Belastungsverlauf	114
6.5.2	Zustand der Laminatoberfläche	116
6.5.3	Verformungsverhalten	116
6.5.4	Bruchverhalten	120
6.6.	Lebensdauer	121
II	Vorwort	
III	Verzeichnis der Bezeichnungen	

## II

### Vorwort

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde dankenswerter Weise durch Mittel des Institut für Bautechnik, Berlin, ermöglicht.

Dank gilt auch den Firmen De Hollandsche Ijssel b.v., Gebr. Hiemstra Silobouw, Polem b.v. und Theodor Vanck KG für die Bereitstellung von Versuchsmaterial.

Gedankt sei auch Herrn Dipl.-Ing. M. Kurzmeier, SKZ-Würzburg, für anregende Diskussionsbeiträge.

Den Mitarbeitern der Kunststoffprüfstelle Franken, insbesondere den Herren J. Cremers und J. Heinze sowie Frau M. Kremers, die teilweise mit der Durchführung und Auswertung von Versuchen betraut waren, sei an dieser Stelle für Anregungen und Hilfe gedankt.

### III

#### Verzeichnis der Bezeichnungen

Die wesentlichen Bezeichnungen werden nachfolgend aufgeführt.

Nicht genannte Bezeichnungen sind im Text erläutert:

$A_1$	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Lastdauer
$A_2$	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen
$A_3$	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung erhöhter Temperaturen
$A_4$	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Fertigungsgenauigkeit
$A_{1I}, A_{2I}, A_{3I}, A_{4I}$	Abminderungsfaktoren für Stabilitätsnachweis und Verformungsberechnung
$A_{1B}, A_{2B}, A_{3B}, A_{4B}$	Abminderungsfaktoren für Dimensionierung gegen Bruchversagen
$A_I, A_{Ii}, A_B, A_{Bi}$	Produkt der Abminderungsfaktoren
$A_{1s}$	Abminderungsfaktor für Schneelast
$A_{1w}$	Abminderungsfaktor für kurzzeitige Last
$A_i$	Abminderungsfaktoren
$C$	Beiwert zur Erfassung der Randbedingungen nach /47/
$C_U$	$A_{2I}$
$C_\varphi$	$A_{3I}$
$E$	Elastizitätsmodul
$E_\perp$	E-Modul senkrecht zur Hauptverstärkungsrichtung
$E_{  }$	E-Modul in Hauptverstärkungsrichtung (bei Zylindern i.allg. in Umfangsrichtung)
$E_{1h}$	Verformungsmodul nach 1 h Lastdauer
$E_B$	E-Modul für Biegebeanspruchung (Kurzzeit-)
$E_{B  }, E_{B\perp}$	Kurzzeitmoduln für Biegebeanspruchung
$E_c$	Verformungsmodul nach $2 \cdot 10^5$ h Lastdauer
$E_{c/2 \cdot 10^5}$	Verformungsmodul nach $2 \cdot 10^5$ h Lastdauer
$E_{co}$	Vergleichswert für $E_0$ aus Kriechversuch
$E_l$	Elastizitätsmodul in Längsrichtung (Zylinder)
$E_{lB}, E_{uB}$	E-Moduln für Biegebeanspruchung
$E_{lZ}, E_{uZ}$	E-Moduln für Normalkraftbeanspruchung
$E_G$	E-Moduln der Glasfasern
$E_H$	E-Moduln der Matrix

$E_M$	E-Moduln von Wirrfaserschichten
$E_0$	Kurzzeitmoduln für Normalkraftbeanspruchung ohne Umgebungseinflüsse
$E_u$	Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung
$E_v$	Vergleichsmodul
$E_{W  }, E_{W\perp}$	E-Modul von Gewebeschichten
$E_Z$	E-Modul für Normalkraftbeanspruchung (Kurzzeit-)
$E_{Z  }, E_{Z\perp}$	Kurzzeitmodul für Normalkraftbeanspruchung
$F_i$	Verhältnis der Glas-Volumenanteile von Laminatschichten
$f_{1h}$	Durchbiegung nach 1 h Lastdauer
$f_{24h}$	Durchbiegung nach 24 h Lastdauer
$G_{1u}$	Schubmodul bezogen auf Längs- und Umfangsrichtung (Zylinder)
$h_D$	Dachhöhe
$h_K$	Kegelhöhe
$h_T$	Trichterhöhe
$h_Z$	Zylinderhöhe
$k_1; k_2, k_2^*, k_2^{**}$	Beulkoeffizienten
$K_i$	$A_{Bi}$
$K_t$	$A_{1B}$
$K_U$	$A_{2B}$
$K_\theta$	$A_{3B}$
$K_W$	Traganteil in Gewebeschichten
$m_G$	flächenbezogene Glasmasse
$m_i$	Biegemomente
$n_e$	Beulkraft
$n_{ke}$	Beulkraft des Zylinders unter Axialdruck
$p_i$	Drücke
$p_k$	Beullast des Zylinders unter Manteldruck
$p_{ki}$	kritischer Beuldruck
$R$	Widerstand des Laminates
$R_D$	Radius des Daches (Kalotte)
$r_D$	Radius des Daches (Krempe)
$R_0$	Widerstand des Laminates gegen kurzzeitige Belastung bei Raumtemperatur ohne Umgebungseinflüsse
$S_B$	globaler Sicherheitsbeiwert für Festigkeitsnachweise
$S_I$	globaler Sicherheitsbeiwert für Stabilitätsnachweise



$S_{\varepsilon}$	globaler Sicherheitsbeiwert für Grenzdehnungsnachweise
$t_L$	Laminatdicke
$t_Z$	Wanddicke des Zylinders
$V$	Silorauminhalt
$V_G$	Glas-Volumenanteil
$W$	Aussagewahrscheinlichkeit
$x_{5\%}$	5%-Quantile (Fraktile)
$\alpha$	Abminderungsfaktor nach /47/ auch Neigung der Trichterwand
$\beta_{F  }, \beta_{F\perp}$	Zugfestigkeit unidirektional verstärkter Laminatschichten
$\beta_M$	Zugfestigkeit wirrfaserverstärkter Laminatschichten
$\beta(t)$	Zeitstandfestigkeit
$\beta_{2 \cdot 10^5}$	Zeitstandfestigkeit nach $2 \cdot 10^5$ h Lastdauer
$\beta_{W  }, \beta_{W\perp}$	Zugfestigkeit gewebeverstärkter Laminatschichten
$\beta_Z$	Kurzzeitzugfestigkeit bei Normalklima
$\varepsilon$	Gesamtverformung des Laminates
$\varepsilon_I$	Verformung infolge ständig wirkender Last
$\varepsilon_{II}$	Verformung infolge kurzzeitig wirkender Last
$\varepsilon_F$	werkstoffbedingte Grenzdehnung
$\varepsilon_K$	Kriechanteil der Verformung
$\eta_K$	Kriechabminderung für Beulnachweis axial gedrückter Zylinderschalen
	$\eta_K = \frac{1}{\sqrt{A_{1I}}}$
$\Lambda$	logarithmisches Dekrement der mechanischen Dämpfung
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\nu_H$	Querkontraktionszahl der Matrix
$\nu_{ul}, \nu_{lu}$	Querkontraktionszahl in Umfangsrichtung infolge Beanspruchung in Längsrichtung bzw. umgekehrt für Normalkraftbeanspruchung
$\nu_{ulB}, \nu_{luB}$	entsprechende Querkontraktionszahlen für Biegebeanspruchung
$\rho_G$	Dichte der Glasfasern
$\rho_H$	Dichte des Harzes
$\rho_L$	Dichte des Laminates
$\sigma_I$	Spannung infolge ständig wirkender Last

### III

$\sigma_{II}$	Spannung infolge kurzzeitig wirkender Last
$\sigma_{Bi}$	Spannungen aus Biegebeanspruchungen
$\sigma_e$	abgeminderte Beulspannung
$\sigma_K$	Beulspannung
$\sigma_{Ki}$	kritische Beulspannung
$\sigma_{KiR}$	kritische Beulspannung für Ringbeulen
$\sigma_{KiS}$	kritische Beulspannung für Schachbrettbeulen
$\sigma_{Zi}$	Spannungen aus Zugbeanspruchung
$\varphi_t$	Kriechzahl $(1 + \varphi_t) \cong A_{1I}$
$\varphi_t^*$	Vergleichswert für Kriechzahl $\varphi_t$
$\psi$	Glas-Masseanteil

Erst seit dem dritten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts werden technische Produkte in größeren Mengen aus synthetisch entstandenen, hochmolekularen, organisch aufgebauten Werkstoffen - den Kunststoffen - hergestellt /1/.

Sieht man von Kunststoffen, die durch chemische Umwandlung von Naturprodukten seit etwa Mitte des 19. Jahrhunderts gezielt gewonnen wurden, wie z.B. Celluloid, Caseinharze oder Naturkautschuk ab, so waren Polyvinylchlorid (PVC) und Phenolharze (PF), deren Erfindung auf den Beginn dieses Jahrhunderts zurückgeht, die ersten synthetischen Kunststoffe, die technische Bedeutung anfangs insbesondere als Isolationswerkstoff in der Elektroindustrie erhielten.

Die Entdeckung der Härtung von ungesättigtem Polyester mit monomerem Styrol und Peroxiden durch C. Ellis im Jahre 1936 erfolgte vergleichsweise spät /2,3/. Durch die kriegsbedingte Notwendigkeit, einen für Radarstrahlen durchlässigen Kunststoff mit mechanischen Festigkeiten entsprechend Stahl zu finden, wurden die glasfaserverstärkten ungesättigten Polyesterharze entwickelt /4/. Ihre Verwendung als Konstruktionswerkstoff nahm seit Ende des 2. Weltkrieges ständig zu. Heute werden weltweit mehr als 1 Million t UP-Harze jährlich für die verschiedensten Anwendungen im Flugzeug-, Schiff- und Automobilbau sowie im Bauwesen verbraucht. Lange Zeit wurde allgemein unter der Abkürzung GFK glasfaserverstärktes UP-Harz verstanden, obwohl es auch schon glasfaserverstärktes Epoxidharz (EP) gab. Erst in den letzten Jahren wird GFK in der Bedeutung "glasfaserverstärkter Kunststoff" verwendet, da immer mehr der verschiedensten Kunststoffe mit Glasfasern und anderen Fasern, wie z.B. Kohlenstofffasern (CFK) verstärkt werden.

Im Vergleich zu Holz, Stein, Stahl und Beton sind Kunststoffe die jüngsten Baustoffe. Seit Mitte des Jahrhunderts werden sie ständig zunehmend im Bauwesen verwendet, doch erstreckt sich die Anwendung in erster Linie auf nichttragende Funktionen, wie z.B. Boden- und Wandbeläge, Rohre, Dämmstoffe, Fensterprofile, Rolläden und Türen. Der Anteil der Kunststoffe, der für tragende Baukonstruktionen heute eingesetzt wird, ist trotz steigender Tendenz immer noch sehr gering. Typische Einsatzbeispiele sind Dachkonstruktionen, Lichtwände, Fassadenbekleidungen, Großrohre, Sandwichelemente für Wand und Dach, Kühltürme, Kamine, Antennenträger, Behälter, Silos, Membrankonstruktionen, Hallen, Häuser, Lager, Dübel, Kleber, Schraubverbindungselemente und die Sanierung von Holzkonstruktionen.

Die erste tragende Bauart aus Kunststoffen, die in der Bundesrepublik Deutschland allgemein bauaufsichtlich zugelassen wurde, waren Silos aus GF-UP.

Fast zehn Jahre blieb GF-UP der einzige Kunststoff als Baustoff für zugelassene Bauteile, meist Silos und nur wenige Wand- und Dachelemente, die zum Teil als Sandwichkonstruktionen mit Reaktionsharzschäumen ausgeführt wurden. Erst danach wurden auch tragende Bauteile aus anderen Kunststoffen allgemein bauaufsichtlich zugelassen, z.B. Oberlichtbänder aus schlagzähem PVC, PVC-beschichtete Polyesterweben und Polyäthylen (PE) - Folien für Traglufthallen, Behälter aus PE, Reaktionsharzmörtel und -betone (Bindemittel: UP-, EP-Harz) für Abwasserrohre und die Sanierung von Holzkonstruktionen, Acrylglas (PMMA) für Lichtwände und Polyesterweben für Silos. Da über GF-UP-Silos die umfangreichsten und ältesten Daten aus bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren vorliegen, wird folgend an ihrem Beispiel die Entwicklung von Genehmigungsverfahren, Zulassungsprüfungen und Bemessungsverfahren dargestellt. Typische Konstruktionsbeispiele, verwendete Laminataufbauten und Harztypen sowie die wichtigsten Fertigungsverfahren werden erfaßt.

Die Ergebnisse von stichprobenartigen, optischen Begutachtungen ausgeführter Bauteile nach mehrjährigem Einsatz (bis zu 19 Jahren) und Untersuchungen an daraus entnommenen Probekörpern werden zur Beurteilung der Lebensdauer von langfristig beanspruchten GF-UP-Bauteilen diskutiert und ausgewertet.

## 2 Entwicklung der GF-UP-Silos

Soweit bekannt wurde das erste Silo aus GF-UP 1967 allgemein bauaufsichtlich zugelassen für die Lagerung von Schüttgut. Doch schon einige Jahre zuvor wurde in der Bundesrepublik GF-UP für die Herstellung von Silos verwendet. Die ersten Silos in Europa wurden, soweit festgestellt werden konnte, 1962 in der Schweiz (Gärfutter) und in den Niederlanden (Schüttgut) errichtet, wenig später folgten die ersten GF-UP-Silos in der Bundesrepublik Deutschland /5/. Ihren ersten größeren Einsatzbereich fanden die GF-UP-Silos in der Landwirtschaft, anfangs für Kraftfutter, Getreide (auch Feuchtgetreide), Mehl und Gärfutter, später dann auch für Düngemittel. Mit größer werdenden Silovolumina wurden sie zunehmend in der Nahrungsmittelindustrie zur Lagerung von Mehl, Zucker, Gewürze etc. und in der allgemeinen Industrie zur Lagerung von rieselfähigen Vorprodukten, Rohstoffen und Chemikalien eingesetzt. Oft stand und steht dabei im Vordergrund der Entscheidung für ein Silo aus GF-UP die relativ gute Beständigkeit gegen aggressive Schüttgüter. Deswegen werden z.B. oft GF-UP-Silos in den Kommunen für die Vorratshaltung von Streusalz oder Mischungen aus Streusalz und Sand eingesetzt.

### 2.1 Bauaufsichtliche Genehmigungsverfahren

Im ersten Zulassungsbescheid /6/ wurde das Schüttgut noch ohne Angabe eines Reibungswinkels durch die genaue Bezeichnung und das Berechnungsgewicht eingeschränkt: "als Füllgüter sind zulässig Mehl, Kraftfutter u. dgl. mit einem maximalen Berechnungsgewicht von  $600 \text{ kp/m}^3$  entsprechend den Bestimmungen des Normblattes DIN 1055, Bl. 1."

In den beiden folgenden Zulassungsbescheiden wird das Schüttgut dann schon allgemein mit der Angabe des Berechnungsgewichtes und des Reibungswinkels beschrieben, in /7/ (1968) noch unter dem einschränkenden Anwendungsbereich "Kraftfutterbehälter für die Landwirtschaft", in /8/ (1968) ohne Einschränkung des Anwendungsbereiches.

Der erste Zulassungsbescheid für ein Gärfuttersilo aus GF-UP wurde 1970 erteilt /9/. Während in diesem Bescheid Untenentnahme nur für Silos der Klasse II nach DIN 1055 Bl. 6 gestattet und für Silos der Klasse III Obenentnahme vorgeschrieben wurde, war im folgenden Bescheid /10/ schon für beide Siloklassen Untenentnahme erlaubt (1971).

Diese Gärfuttersilos erreichten Volumina  $V = 100 \text{ m}^3$  bei einem maximalen Durchmesser von  $d = 3,35 \text{ m}$ . Die Schüttgutsilos waren zu diesem Zeitpunkt noch auf maximale Werte  $V = 32 \text{ m}^3$  und  $d = 2,50 \text{ m}$  beschränkt bei einer Höchstwichte  $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$ . Ein Silovolumen von  $100 \text{ m}^3$  bei  $d = 3,35 \text{ m}$  und  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$  wurde bei Schüttgutsilos 1971 erreicht /11/.

Die bisher größten Abmessungen allgemein bauaufsichtlich zugelassener Schüttgutsilos betragen  $V = 120 \text{ m}^3$  und  $d = 3,40 \text{ m}$ . die größte Wichte  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ .

Bei Gärfuttersilos wurden bisher Abmessungen bis zu  $V = 250 \text{ m}^3$  und  $d = 5,00 \text{ m}$  zugelassen.

### 2.1.1 Rechtsgrundlagen

Das Bauaufsichtsrecht ist als Ordnungsrecht in der Bundesrepublik Deutschland durch die Gesetzgebung der Bundesländer in den Landesbauordnungen sowie durch Rechtsverordnungen geregelt. Seit Ende der fünfziger Jahre wurden die Landesbauordnungen auf Grundlage einer Musterbauordnung (MBO) vereinheitlicht /12/, die ständig überarbeitet und weiterentwickelt wird. Nach diesen Bauordnungen /13/ sind Kunststoffe und die mit ihnen hergestellten Faserverbundwerkstoffe sowie Bauteile und Bauarten aus diesen Baustoffen

als "neue Baustoffe, Bauteile und Bauarten" zu betrachten, die noch nicht "allgemein gebräuchlich und bewährt" sind. Es bestehen noch keine allgemein anerkannten Regeln der Technik, um ihre "Brauchbarkeit" im Sinne, daß "die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere Leben oder Gesundheit nicht gefährdet wird", nachzuweisen. "Als allgemein anerkannte Regeln der Technik gelten auch die von der obersten Bauaufsichtsbehörde-"eines Landes-" oder der von ihr bestimmten Behörde durch öffentliche Bekanntmachung eingeführten technischen Baubestimmungen"

Der Nachweis der Brauchbarkeit solcher neuen Baustoffe, Bauteile und Bauarten ist daher entweder über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall durch die oberste Bauaufsichtsbehörde oder eine von ihr bestimmte Behörde zu führen.

An diesem Rechtszustand /14, 15, 16/ und seinen Auswirkungen auf GF-UP-Silos hat sich bis heute nichts geändert, obwohl sie schon seit 20 Jahren bauaufsichtlich genehmigt eingesetzt werden. Am ehesten ist damit zu rechnen, daß der Baustoff GF-UP in nicht allzuferner Zukunft nach allgemein anerkannten Regeln der Technik (DIN 18820 /79/) beurteilt werden kann. Für die Bauart GF-UP-Silos oder dafür verwendete Bauteile ist es unwahrscheinlich, daß in absehbarer Zeit solche Regeln vorliegen werden, dagegen spricht schon die große Zahl unterschiedlicher Konstruktionen, die bisher ausgeführt wurden (siehe Abschnitt 3).

Die ersten Zulassungsbescheide für GF-UP-Silos wurden noch von den einzelnen Ländern erteilt /z.B. 6 bis 11/. Diese Bescheide galten erst nach Anerkennung und Bekanntgabe durch die jeweilige oberste Bauaufsichtsbehörde auch in den anderen Ländern auf Grund einer Verwaltungsvereinbarung vom 14.2.1951.

Die Zulassungsanträge wurden beraten im 1966 gegründeten Arbeitskreis AK "Kunststoffe" des Ländersachverständigenausschusses (LSA). Nachdem die Länder und die Bundesrepublik Deutschland am 9.7.1968 das "Abkommen über die Errichtung und Finanzierung des Instituts für Bautechnik" /12/ geschlossen hatten, erfolgte ab 1970 die Beratung von Anträgen im Sachverständigenausschuß (SVA) "Verstärkte Kunststoffe für tragende Bauteile und Bauarten" des Instituts für

Bautechnik (IfBt). Nach und nach übertrugen die Länder (inzwischen alle) dem IfBt die Befugnis zur unmittelbaren Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen für die Länder der Bundesrepublik Deutschland und Berlin.

Der erste Zulassungsbescheid des IfBt für GF-UP-Silos wurde 1971 erteilt /17/. Noch bis Ende 1973 wurden nach Beratung im SVA des IfBt GF-UP-Silos durch Bescheide einzelner Länder zugelassen. Bis heute, 2 Jahrzehnte nach der ersten Zulassung, wurden von den Ländern und dem IfBt insgesamt 38 Zulassungsbescheide für Silos aus GF-UP ausgestellt, widerruflich für Fristen, die fünf Jahre nicht überschreiten sollen /13/.

### 2.1.2 Richtlinien

Aufbauend auf Richtlinien von 1967, die der AK "Kunststoffe" des LSA 1969 als Gemeinschaftsentwurf übernahm /18/, wurde die erste Fassung der Richtlinien des IfBt's 1972 vom zuständigen SVA verabschiedet. Nach regelmäßigen Anpassungen liegen sie in dritter, bisher letzter Fassung als "Vorläufige Richtlinien für die Kennwertbestimmung, Zulassungsprüfung, Bemessung und Güteüberwachung von zulassungspflichtigen Bauteilen aus glasfaserverstärktem ungesättigtem Polyesterharz (GF-UP-Richtlinie) - Fassung Dez. 1983 - vor /19/. Diese Richtlinien sind nicht veröffentlicht.

Der für GF-UP-Bauteile zuständige Sachverständigenausschuß des IfBt, heute der SVA "Kunststoffe" "GFK" -B- wendet die vorläufigen Richtlinien bei der Beratung von Zulassungsanträgen an, um eine Beurteilung nach einheitlichen Gesichtspunkten zu gewährleisten. Er behält sich aber vor, die geforderten Prüfungen je nach Erfordernissen des Materials, der Konstruktion oder der Anwendung abzuwandeln oder zu ergänzen /20/. Die Richtlinien beschreiben

- Art, Umfang und Auswertung von Baustoff-, Bauteil oder Bauartprüfungen an nach DIN 18200 /21/ entnommenen Proben in Instituten, die vom IfBt dafür anerkannt sind.
- Wie unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Prüfungen zulässige Spannungen oder Dehnungen für Standsicherheitsnachweise zu bestimmen sind.
- Art und Umfang von Überwachungsprüfungen zur Sicherung gleichbleibender Beschaffenheit bei der Herstellung des Zulassungsgegenstandes.



### 2.1.3 Zulassungsprüfungen

Sieht man von genaueren Festlegungen der Prüfbedingungen (z.B. Probekörperabmessungen) und der statistischen Auswerteverfahren ab, so haben sich Art und Umfang der für die Beurteilung von GF-UP-Silos notwendigen Baustoffprüfungen seit dem ersten Entwurf einer Richtlinie /18/ nicht grundlegend geändert.

Auf Versuche zur Ermittlung des Temperatureinflusses aus Freibewitterung, die anfangs obligatorisch waren, wurde schon nach wenigen Jahren verzichtet. Hierzu trugen wesentlich die Untersuchungen in /22/ bei.

Ebenso ist das Verfahren zur Festlegung zulässiger Bemessungswerte im Grunde gleich geblieben (siehe 2.1.6) bis auf eine sehr wichtige Änderung:

Bedingt durch die bisherigen Erfahrungen mit dem Baustoff GF-UP, die im Bereich des Bauwesens vorwiegend an GF-UP-Silos gewonnen wurden (siehe Abschnitt 6), ist es seit 1983 /19/ möglich, die in Langzeitversuchen mit einer Versuchsdauer bis zu  $10^3$ h (etwa 6 Wochen) ermittelten Kurven auf  $2 \cdot 10^5$ h (etwa 25 Jahre) zu extrapolieren. Vorher wurde nur eine Extrapolation bis zu  $10^5$ h (etwa 12 Jahre) anerkannt.

Die Forderungen, den rechnerischen Standsicherheitsnachweis der Silos durch Bauteilversuche zu bestätigen, wurde schrittweise verringert und auf Ausnahmefälle beschränkt. Bis 1974 /20/ wurden Beulversuche an Zylindern, Berstversuche am gesamten Silo und Brückeneinsturzversuche in den Zulassungsverfahren durchgeführt, ebenso Belastungsversuche an den Dächern zur Erfassung des Beulverhaltens unter Flächenlast (Schnee) und Einzellasten (z.B. Begehbarkeit).

Die Bauteilprüfungen sollen in Anlehnung an den späteren Einsatz die kritischen Belastungsfälle herbeiführen und Konstruktions- oder Werkstoffschwächen auffinden helfen.

Die Bilder 1 bis 12 zeigen einige Beispiele derartiger Versuche.

Neben der Kontrolle des rechnerischen Ansatzes für die Beulbemessung der Zylinder unter Axiallast sollten die Beulversuche auch dazu dienen, den Einfluß der Lasteinleitung auf das Beul-

verhalten zu erfassen (Bilder 1 und 2 /23/). Teilweise sind die Zylinder vor dem eigentlichen Beulversuch, bei dem die Last kurzzeitig bis zum Durchschlagen gesteigert wurde, mit der vorgesehenen rechnerischen Gebrauchslast über die Dauer von bis zu 100 h beansprucht worden. Das Beulverhalten von aus Einzelsegmenten zusammengeschaubten Zylinderschalen wurde ebenfalls im Versuch überprüft. (Bild 3 /24/).

Nachdem das Verhalten von orthotrop verstärkten Zylinderschalen aus GF-UP unter axialer Druckbelastung in grundlegenden Arbeiten untersucht worden war /25 bis 27/, erfolgte der Stabilitätsnachweis der Zylinder nur noch rechnerisch.

Das Tragverhalten der Silodächer unter Schneelast wurde meist nur rechnerisch erfaßt, außer bei Sonderkonstruktionen wie z.B. einem aus Einzelsegmenten zusammengeschaubten kegelförmigen Dach (Bild 4 /24/). Zur Prüfung des Verhaltens unter Einzellast wurde die Last auf einer Fläche von 5 x 5 cm<sup>2</sup> aufgebracht und bis zum Versagen gesteigert (Bild 5 /28/). Auf diese Versuche bezüglich der Begehbarkeit wurde später bei Silodächern i.A. verzichtet. Bei Einleitung von Einzellasten z.B. aus Arbeitsbühnen sind je nach Ausführung der Konstruktion weiterhin Bauteilversuche notwendig.

Die Prüfung der Silos unter rechnerischer Gesamtlast über mindestens 1000 h mit anschließender Laststeigerung bis zum Bruch - Berstdruckversuch - wurde zusätzlich zum Beulnachweis gefordert.

Die Versuchssilos wurden mit Kies oder Wasser in Stufen von etwa 1/10 der rechnerischen Gesamtbeanspruchung gefüllt. Die Dehnungen wurden an statisch interessanten Punkten last- und zeitabhängig gemessen. Nach 1000 h Beanspruchung unter rechnerischer Gebrauchslast wurde die Last meist mit Wasserdruck bis zum Versagen gesteigert (Bilder 6, 7 /29/ und 8 /30/). Die Silos versagten bei diesen Versuchen praktisch immer an Bauteilen (z.B. Zylinder oder Dach), die im Gebrauchseinsatz keiner dem hydrostatischen Druck vergleichbaren Beanspruchung ausgesetzt sind. Die Tragfähigkeit des interessierenden Be-

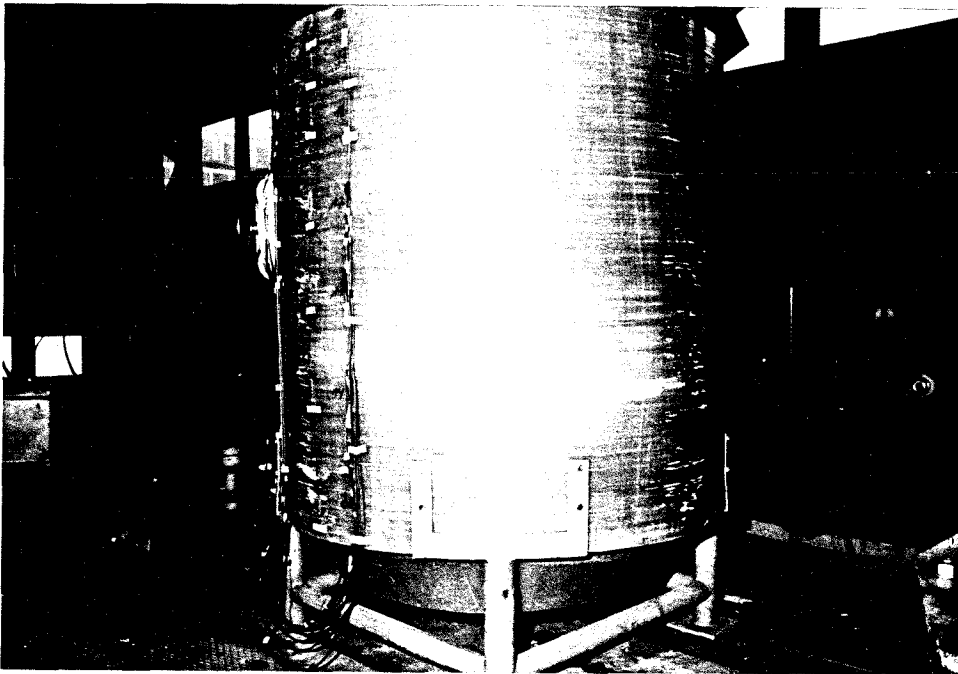


Bild 1 Beulversuch (1969) an einer längsgedrückten GF-UP-Zylinderschale für Schüttgutsilos mit abschnittweiser Auflagerung an 4 gleichmäßig am Umfang verteilten Stützpunkten nach dem Durchschlagen /23,39 /

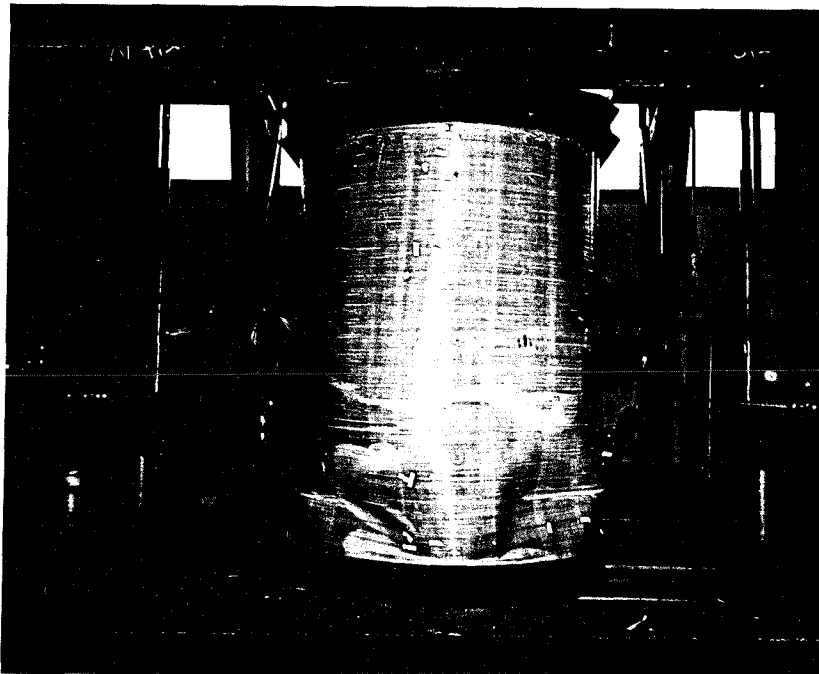


Bild 2 Beulversuch (1969) an einer längsgedrückten GF-UP-Zylinderschale für Schüttgutsilos mit Auflagerung am gesamten Umfang nach dem Durchschlagen /11, 24/



Bild 3 . Beulversuch (1971) an einer längsgedrückten Zylinderschale aus in axialer Richtung miteinander verschraubten Einzelsegmenten für Gärfuttersilos nach dem Durchschlagen /24, 39/



Bild 4 Bauteilversuch (1971) zur Ermittlung des Tragverhaltens eines kegelförmigen Daches aus miteinander verschraubten Einzelsegmenten für Gärfuttersilos /24, 39/

Bild 5 Versuch (1966) zur Prüfung  
des Verhaltens unter Ein-  
zellast (Begehbarkeit) /10, 28/

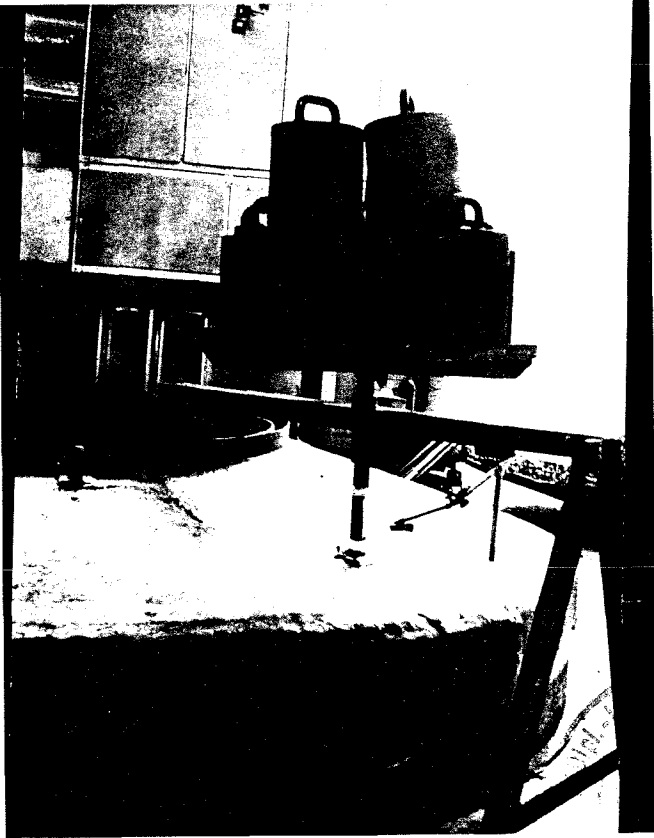


Bild 6 Gärfutter- und Schüttgut-  
silos (1971) beim Dauer-  
versuch (1000 h) mit  
rechnerischer Gebrauchs-  
last /11, 29, 39/

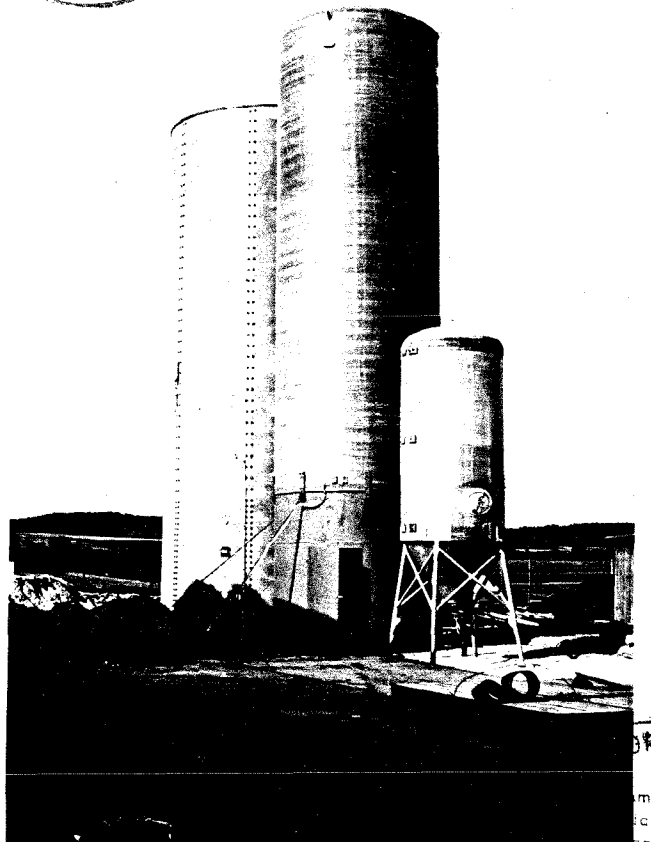


Bild 7 Berstversuch (1971) an einem Schüttgutsilo, Versagen im Bereich der Einstiegsöffnung /12, 29/

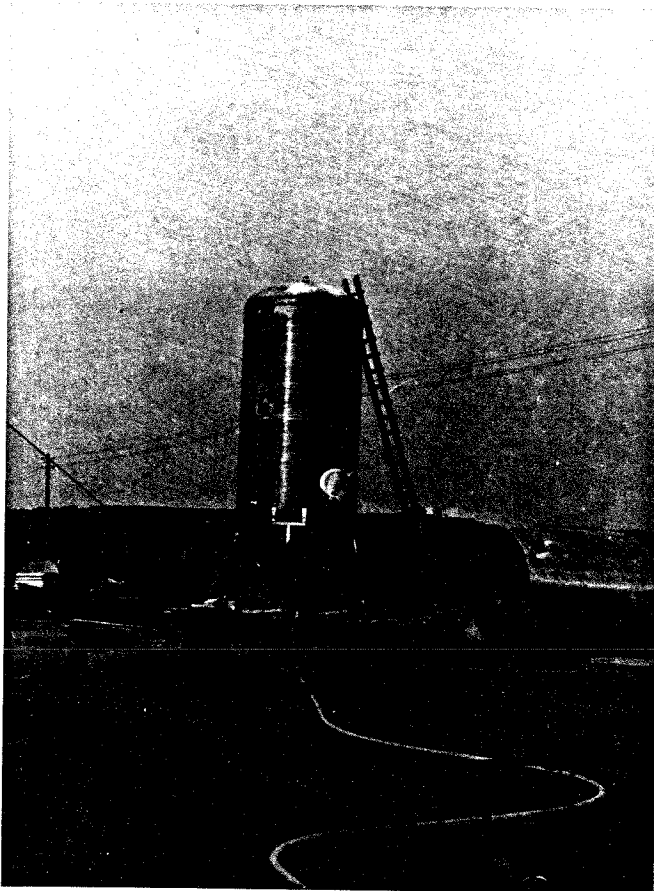
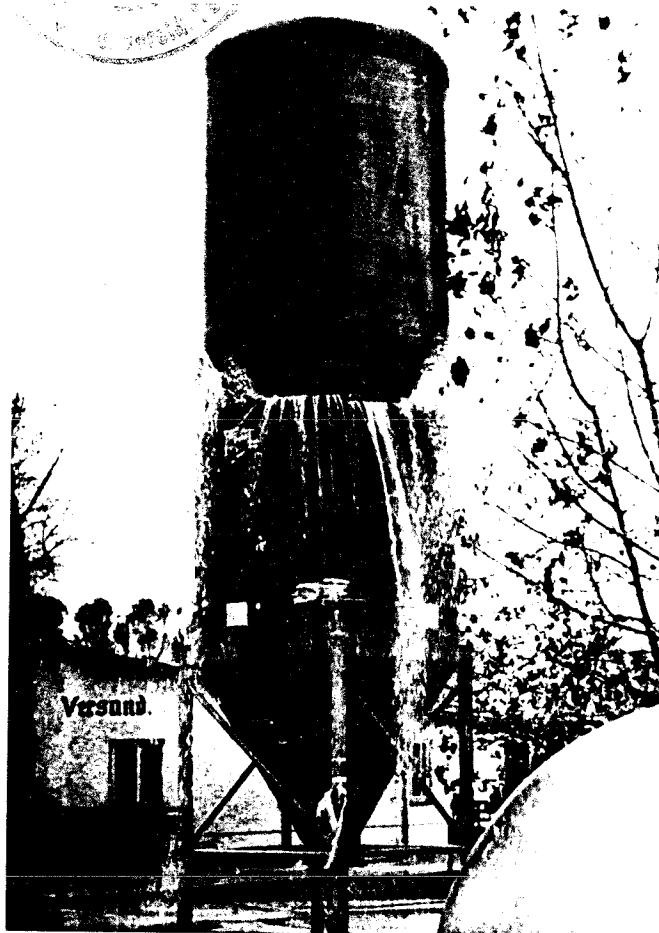


Bild 8 Berstversuch (1967) an einem Schüttgutsilo nach Dauerbeanspruchung mit rechnerischer Gebrauchslast, Versagen im Zylinderbereich /8, 30/



reiches der Verbindung Zylinder/Trichter/Auflagerung konnte nicht festgestellt werden. Seit 1974 wurden daher nur noch Bauteilversuche verlangt an kurzen Zylinderstücken mit anschließenden Auslauftrichtern.

Dabei sollte durch entsprechende Versuchseinrichtungen versucht werden, eine möglichst praxisnahe Belastung zu erreichen, um die Tragfähigkeit des Trichters, der Verbindung Trichter/Zylinder, die Beanspruchung im Zylinder durch Randstörungen und Lasteinleitung sowie die Auswirkungen ungleichmäßiger Auflagerung zu erfassen.

Es wurden z.B. zwei Trichter an einem kurzen Zylinder, deren Auflager über Stahlbänder verbunden waren, mit Wasser unter Innendruck geprüft (Bild 9 /31/) oder ein Trichter mit Zylinderstück nach Füllung mit Kies oder Sand über eine Stahlplatte mittels einer hydraulischen Presse belastet (Bild 10 /32/). Bei diesen Versuchen mußten die Stahlunterkonstruktionen mit Ausnahme des Lasteinteilungsbereiches verstärkt werden, da die Normalausführung nicht für die hohen Versuchslasten ausgelegt war.

Nachdem eine ausreichende Zahl von Silos geprüft und beurteilt worden war, wurde ab 1977 auf Bauteilversuche verzichtet, soweit gleiche oder ähnliche konstruktive Ausführungen der Auflagerung und des Anschlusses Trichter/Zylinder wie in vorher zugelassenen Silobauarten angewendet werden sollen /20/, der Nachweis kann dann rechnerisch geführt werden. Wenn Bauteilversuche notwendig sind, so ist nunmehr ein Zeitstandversuch über mindestens 1000 h Dauer unter 1,2 facher rechnerischer Gebrauchslast mit anschließender Laststeigerung bis zum Versagen durchzuführen /19/.

So wurden u.a. bei einer Silobauart die Auflagerung des Behälters auf einem umlaufenden Stahlring (U-Profil) über einen Verstärkungsbereich der Zylinderwand (Knagge, siehe auch Bild 41) ergänzend zur Berechnung im Bauteilversuch nachgewiesen (Bild 11 /33/) ebenso bei einer anderen die Auflagerung über außen am Zylinder angeschraubte stählerne Flansche (Bild 12 /34/).

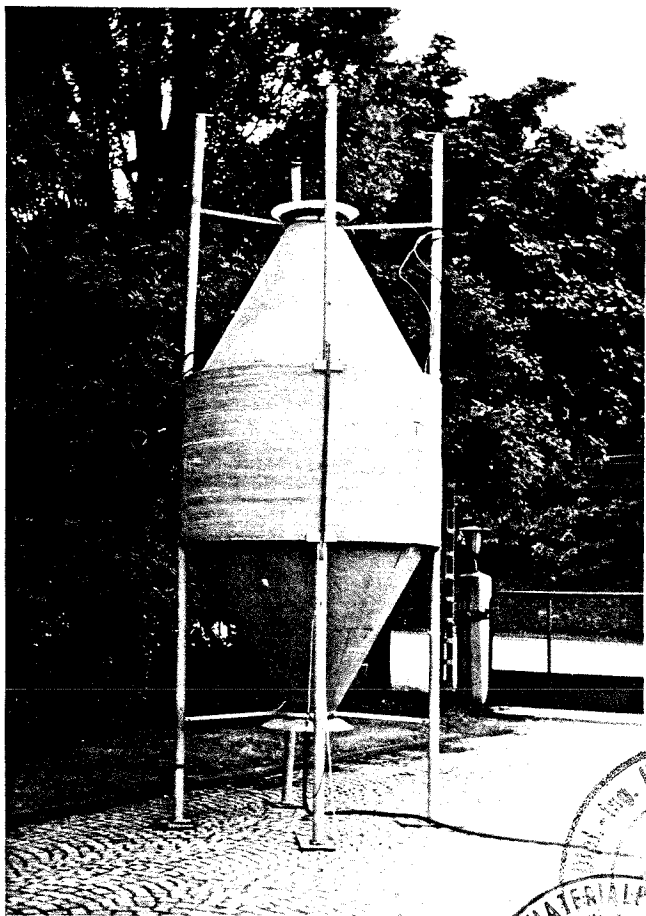
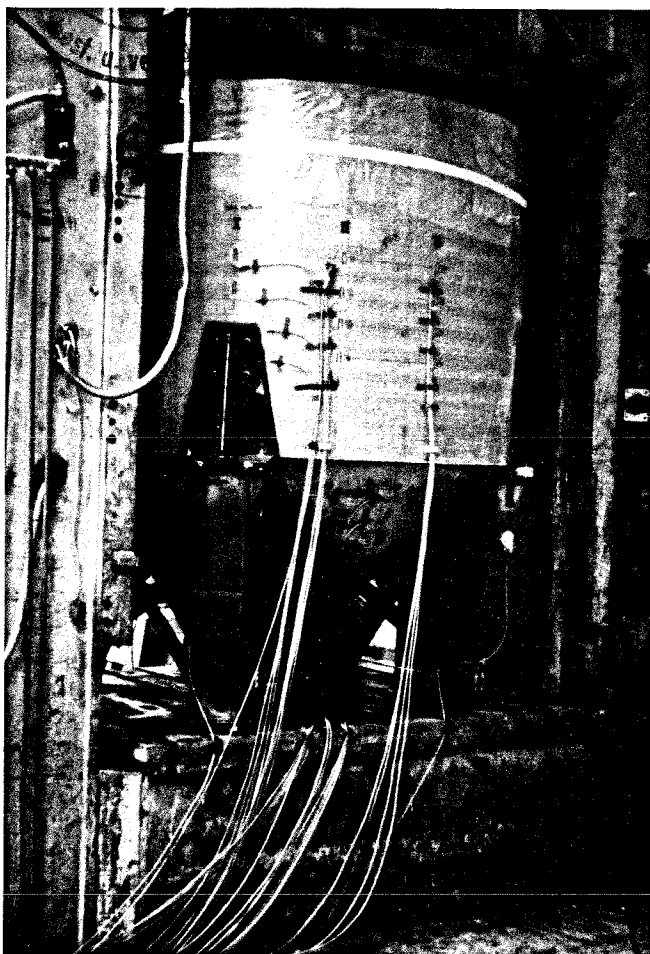


Bild 9 Aufbau für Innendruckversuch (1975) an zwei Trichtern mit kurzem Zylinder, Auflager über Stahlbänder verbunden /31, 40/

Bild 10 Bauteilversuch (1977) an Trichter, Verbindung Trichter/Zylinder und Auflagerung /32, 41/





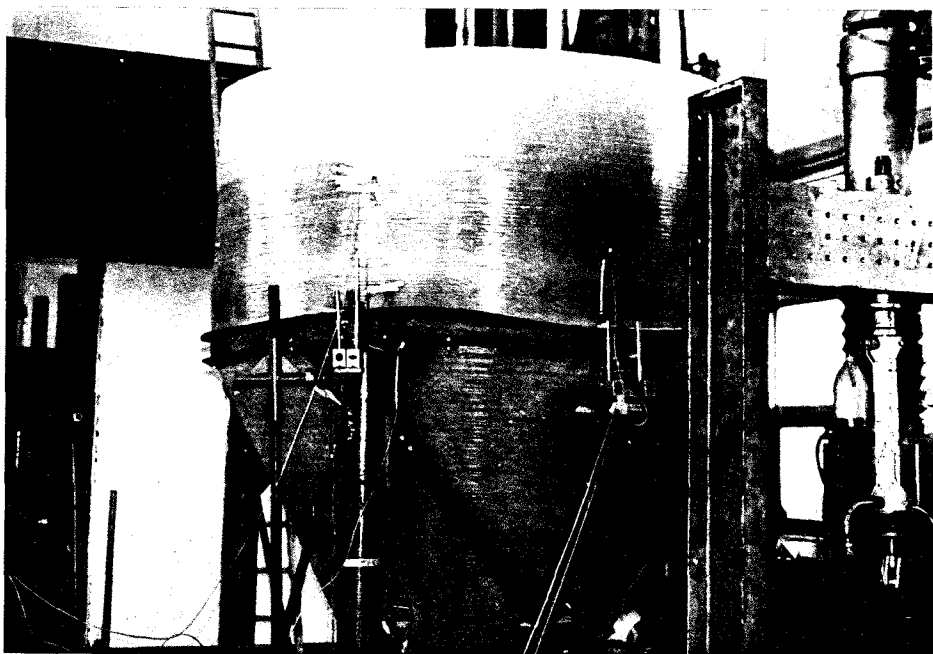
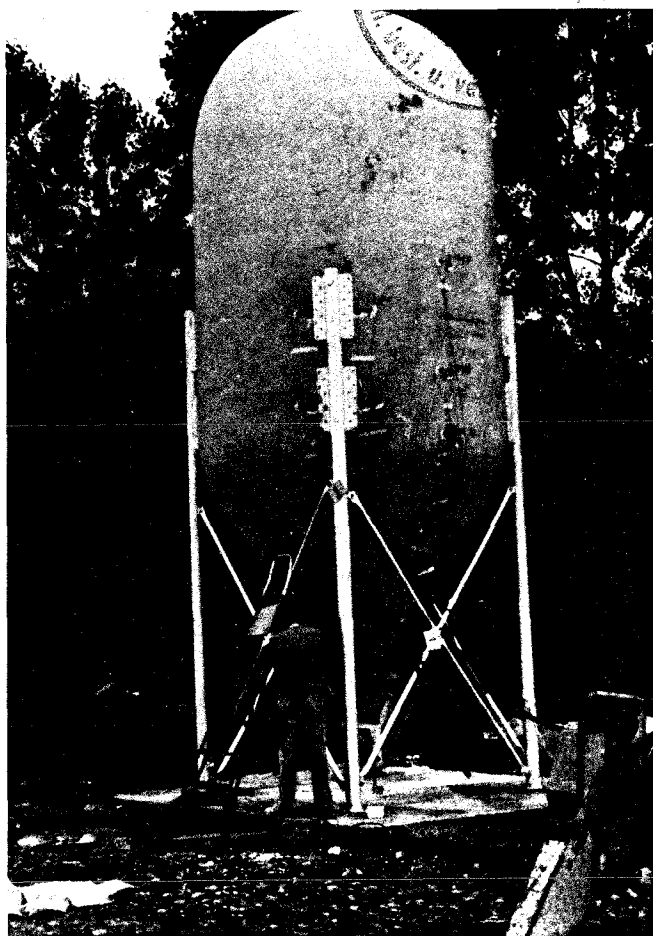


Bild 11 Versuch (1978) zum Tragverhalten der Auflagerung eines Silos auf einem umlaufenden Stahlring (U-Profil) über einen Verstärkungsbereich der Zylinderwand /33, 42/



Bild 12 Versuchsaufbau (1979) für einen Dauerversuch mit 1,2facher rechnerischer Gebrauchslast an einem GF-UP-Silo mit außen angeschraubter Flanschauflagerung /34, 43/



#### 2.1.4 Lastannahmen

Die Entstehung von Unter- bzw. Überdruck wurde bei allen bisher zugelassenen Schüttgutsilos konstruktiv z.B. durch Be- und Entlüftungsvorrichtungen ausgeschlossen, bei Gärfuttersilos wurden diese Drücke in unterschiedlicher Höhe, durch Druckausgleichsvorrichtungen begrenzt, berücksichtigt. Die Dächer sind im Allgemeinen indirekt über den Ansatz der Schneelast als nach Räumen der Schneelast bedingt von Einzelpersonen zu Reinigungs- und Montagearbeiten begehbar nachgewiesen worden.

Neben den Lasten aus Eigengewicht (einschließlich der Anbauten, falls vorgesehen), Schnee (DIN 1055 T 5) und Wind (DIN 1055 T 4) wurden die GF-UP-Silos von Anfang an für Schüttgut- und Gärfutterlasten nach DIN 1055 Bl. 6 /35/ bemessen, die Lasten aus organisch-kohäsiven Schüttgütern wurden ebenfalls in Anlehnung an /35/ bestimmt /20/.

Die Auslauftrichter wurden abweichend von /35/ immer für das volle Schüttgutgewicht ausgelegt. Die vorgenannten Silolasten waren als langfristig wirkend anzunehmen.

Zusätzlich war der Lastfall Brückenbildung in ungünstiger Anordnung nachzuweisen, dabei konnte die Brückenbildung als kurzzeitig wirkend angenommen werden.

Auch nach bauaufsichtlicher Einführung der ergänzenden Bestimmungen zu DIN 1055 T 6 /36/ Ende 1977/Anfang 1978 blieb der zuständige SVA des IfBt bei vorstehenden Vorschriften bezüglich der Lastannahmen.

Bei zentrischer Entleerung wurde für alle Schüttgüter abweichend von /36, Abschnitt 3.1/ der Erhöhungsfaktor  $c = 1,0$  gesetzt. Nach den Einführungserlassen /z.B. 37/ waren daher für Silos, die aus glasfaserverstärkten Kunststoffen bestehen, keine Zusatzmaßnahmen erforderlich. Aus der Lasterhöhung für Mais nach /36, Abschnitt 2/ ergaben sich ebenfalls keine Konsequenzen für die bis dahin zugelassenen Silos, da in den Zulassungsbescheiden stets das zulässige Berechnungsgewicht und der Winkel der inneren Reibung des Schüttgutes angegeben waren.

Da die Auslauftrichter für das volle Schüttgutgewicht als Dauerlast bemessen werden, gilt die Auswirkung von kurzzeitig wirkenden Brückeneinstürzen im Abminderungsfaktor  $A_{1B}$  (siehe 2.1.6) für Dauerlast als miterfaßt.

Beim Beulnachweis des Zylinders darf nicht mit der entlastenden Wirkung des Innendrucks  $p_h$  gerechnet werden, da freie Brücken im oberen Teil der Zylinder nicht sicher für alle Schüttgüter ausgeschlossen werden können und bereichsweise niedrigere Horizontallasten  $p_h$  als die gleichförmigen Lasten  $p_{he}$  entstehen können.

## 2.1.5 Bemessungsverfahren

### 2.1.5.1 Stabilitätsnachweis des Zylinders

Der Nachweis des Zylinders erfolgt nach Weingarten-Morgan-Seide /44/ bzw. DIN 11622 Bl. 4 Kurve I /45/ nach der Formel für die abgeminderte Beulspannung

$$\sigma_e = k_1 \cdot E \cdot \frac{t}{r} \quad \{1\}$$

Die Kurve I in /45/ (Bild 13) für den Beulkoeffizienten  $k$  zur Berücksichtigung von Bauteilungenauigkeiten (Vorbeulen, ungenaue Lasteinleitung, Inhomogenitäten etc.) entspricht der Gleichung nach /44/

$$k_1 = 0,605 \left[ 1 - 0,902 \left( 1 - e^{-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right) \right] \leq 0,3 \quad \{2\}$$

Für Zylinder aus GF-UP gilt  $k \leq 0,3$  /20/.

Oft wurde auch eine vereinfachte Form /46/ angewendet, die im technisch interessanten Bereich geringfügig abweicht:

$$k_1^* = \frac{0,605 + 0,000369 \frac{r}{t}}{1 + 0,00622 \frac{r}{t}} \quad \{3\}$$

Der Wert 0,605 entspricht dem Beiwert der klassischen Lösung für die kritische Beulspannung einer längsgedrückten idealen, isotropen und homogenen Zylinderschale für  $\nu = 0,3$

$$\sigma_{Ki} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} E \cdot \frac{t}{r} \quad \{4\}$$

$$\sigma_{Ki} = 0,605 \cdot E \cdot \frac{t}{r} \quad \{5\}$$

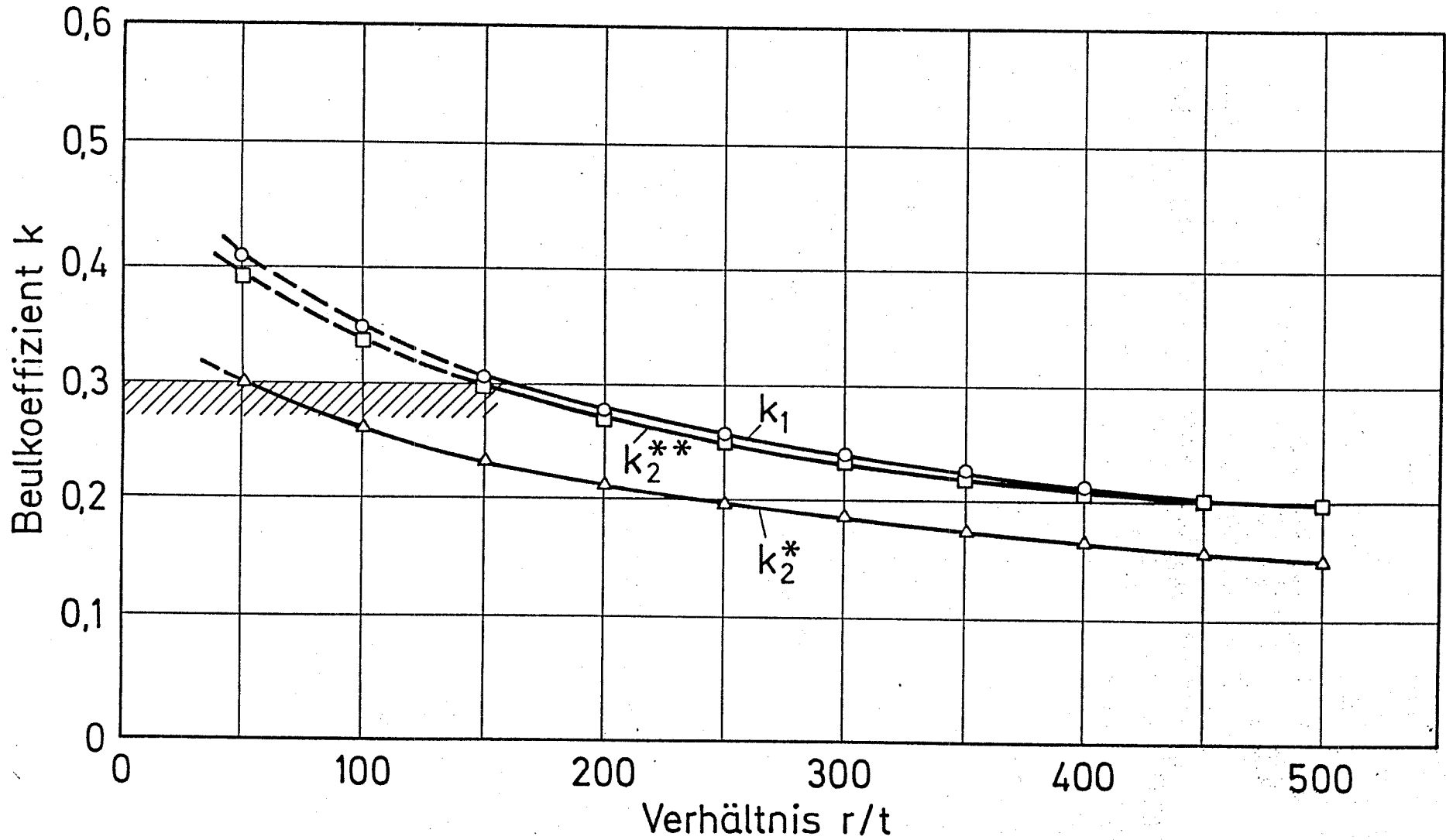


Bild 13 Beulkoeffizient  $k_1$ ,  $k_2^*$  und  $k_2^{**}$  nach Weingarten-Morgan-Seide und DAST-Richtlinie 013 im für GF-UP-Silos interessanten Bereich

Nach DAST-Richtlinie 013 , Formel 2.3 /47/ ist die abgeminderte Beulspannung des Kreiszylinders mittlerer Länge unter rotations-symmetrischer konstanter Axiallast

$$\sigma_e = \alpha \cdot \sigma_{ki} = 0,605 \cdot \frac{0,52}{\sqrt{1 + \frac{r}{100 \cdot t}}} E \cdot \frac{t}{r} \quad \{6\}$$

Der Beulwert entsprechend Gleichung {1} ist

$$k_2 = 0,605 \frac{0,52}{\sqrt{1 + \frac{r}{100 \cdot t}}} \quad \{7\}$$

In vorstehenden Gleichungen ist E = Elastizitätsmodul,  
t = Wanddicke, r = Radius und  $\nu$  = Querkontraktionszahl.

Der nach Gleichung {3} ermittelte Beulbeiwert liegt im Anwendungsbereich von GF-UP mit Verhältnissen  $r/t < 500$  etwas zu günstig gegenüber dem Wert nach exakter Berechnung mit Formel {2}. Für  $r/t = 200$  z.B. wird  $k_1 = 0,285$  gegenüber  $k_1^* = 0,303$ . Der Unterschied beträgt immerhin 6 %.

Um den Beulwert  $k_2$  nach /47/ mit  $k$  nach /44/ vergleichen zu können, sind noch die unterschiedlichen Sicherheitsbeiwerte (siehe 2.1.6),  $S_I = 1,75$  nach /20/ und  $\gamma \cong S_I = 1,5$  nach /47/ zu berücksichtigen.

$$k_2^* = \frac{1,75}{1,5} k_2 = \frac{0,367}{\sqrt{1 + \frac{r}{100 \cdot t}}} \quad \{8\}$$

In Bild 13 sind für den Anwendungsbereich  $r/t \leq 500$  die Kurven der Gleichungen {2} und {8} aufgetragen.

Die Kurve nach DAST-Richtlinie liegt deutlich unter derjenigen nach Weingarten - Morgan - Seide, z.B. für  $r/t = 200$  ist  $k_2^* = 0,212$  um etwa 25 % niedriger als  $k_1 = 0,285$ .

Da jedoch die aussteifende Wirkung einer gleichzeitig wirkenden Horizontallast bei der Bemessung nach Gleichung {1} nicht in Ansatz gebracht werden darf, ist die bisher übliche Praxis des Beulnachweises der Zylinder von GF-UP-Silos ausreichend sicher.

Mit Brückenbildung ist bei üblichen Neigungen der Trichterwand unterhalb der Höhe  $h_B \approx r$  über der Verbindung Trichter/Zylinder zu rechnen. Hier sind die Beullasten auf Grund der kurzen freien Länge und der Einspannungsverhältnisse höher als beim mittellangen Zylinder, außerdem sind in diesem Bereich die Wanddicken konstruktiv und wegen der Lasteinleitung erheblich höher als außerhalb dieses Bereiches. Da man den Lastfall Brückenbildung, insbesondere wenn er noch höher auftritt, sicherlich bei Schüttgutsilos als Sonderlastfall im Sinne von /47/ betrachten kann, wäre unter Berücksichtigung der Sicherheitsbeiwerte mit  $k$  zu vergleichen.

$$k_2^{**} = \frac{1,75}{1,15} k_2 = \frac{0,479}{\sqrt{1 + \frac{r}{100 \cdot t}}} \quad \{9\}$$

Die Kurve dieser Gleichung ist ebenfalls in Bild 13 aufgetragen, sie unterscheidet sich nur noch gering von Gleichung {2}, z.B. bei  $r/t = 200$  ist  $k_2^{**} = 0,276$  nur 3 % geringer als  $k_1$ .

Der Elastizitätsmodul  $E$  wurde in Formel {1} zurückgehend auf die Untersuchungen von Wang /25/ für die orthotrop verstärkten Zylinderschalen (siehe Abschnitt 5) der Silos ersetzt, indem man als effektiven Elastizitätsmodul das geometrische Mittel aus dem Längs- und Umfangsmodul  $\sqrt{E_L \cdot E_U}$  oder auch aus den beiden Zug- und Biegemoduln  $\sqrt[4]{E_{LZ} \cdot E_{UZ} \cdot E_{LB} \cdot E_{UB}}$  einführte /26, 27/:

$$\sigma_e = k \sqrt{E_U \cdot E_L} \cdot \frac{t}{r} \quad \{10\}$$

bzw.

$$\sigma_e = k \sqrt[4]{E_{UZ} \cdot E_{LZ} \cdot E_{UB} \cdot E_{LB}} \cdot \frac{t}{r} \quad \{11\}$$

Da der Elastizitätsmodul für Druckbeanspruchung im Rahmen der Zulassungsprüfungen einerseits nur mit relativ hohem Aufwand zu ermitteln ist, andererseits, insbesondere bei kleinen Verformungen das Verformungsverhalten von Kunststoffen unter Druck- und Zugbeanspruchung als gleich angesetzt werden kann, wurde auf die Ermittlung des Druckmoduls im Versuch schon nach wenigen Zulassungsverfahren verzichtet.

Daß die im Zugversuch ermittelten Kennwerte für die Dimensionierung von Kunststoffbauteilen gegen instabiles Versagen verwendet werden können, wurde vielfach festgestellt /48,49, 50, 22 u. a./.

Die Ermittlung des Zugmoduls in Umfangsrichtung an aus Bauteilen entnommenen Probekörpern ist bei Silozylindern wegen der gekrümmten Form ebenfalls schwierig und aufwendig. In /51, 52/ konnte gezeigt werden, daß bei durch Außendruck (bzw. innerem Unterdruck) belasteten orthotropen Zylinderschalen eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Theorie erzielt werden kann bei Verwendung eines Vergleichsmoduls in der Form

$$E_v = \frac{\sqrt[4]{E_{uB}^3 \cdot E_{lZ}}}{1 - 0,1 \frac{E_{lZ}}{E_{uZ}}} \quad \{12\}$$

Für die bisher in Zulassungsverfahren behandelten GF-UP-Silos ist der Unterschied zwischen Zug- und Biegemodul gering. Bei den verwendeten Verstärkungsaufbauten ist je nach Anzahl der Laminatschichten (siehe Abschnitt 5) der Biegemodul meist geringer als der Elastizitätsmodul für Normalkraftbeanspruchung.

So wurde 1982 als weitere Vereinfachung das Geometrische Mittel für die Biegemoduln in Gleichung {1} eingeführt /20/:

$$\sigma_e = k \sqrt{E_{uB} \cdot E_{lB}} \cdot \frac{t}{r} \quad \{13\}$$

Eine entsprechende vereinfachte Anwendung der Biegemoduln erfolgte auch in /53/ zur Bestimmung eines Vergleichsmoduls für GF-UP bei Anwendung der Gleichungen in /47/ für die abgeminderten Beulspannungen. Dort ist z.B. die Beulkraft  $n_{kl}$  des durch Böden ausgesteiften zylindrischen Flüssigkeitsbehälters bei Axialdruck.

$$n_{kl} = \alpha \cdot 0,605 \sqrt{E_{uB} \cdot E_{lB}} \frac{t^2}{r} \quad \{14\}$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{0,7}{\sqrt{1 + \frac{r}{100 \cdot t}}}$$

und die Beullast unter Manteldruck

$$p_k = 0,85 \cdot E_V \cdot \frac{r}{H_Z} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} \quad \{15\}$$

mit

$$E_V = \frac{\sqrt{E_{uB}^3 \cdot E_{lB}}}{1 - 0,1 \frac{E_{lB}}{E_{uB}}} \quad \{16\}$$

$H_Z = l =$  Länge der Zylinderschale.

Die Gleichungen {14} und {15} entsprechen nach Umrechnung auf die Spannung und unter Berücksichtigung des Verhältnisses der unterschiedlichen Sicherheitsbeiwerte 2,0/1,5 in /53/ und /47/ den Formeln 2.3 und 2.10 in /47/ für die abgeminderte Beulspannung des Kreiszylinders mittlerer Länge unter Axiallast (siehe Gleichung {6}) bzw. konstanter rotationssymmetrischer Außen-druckbelastung:



$$\sigma_e = \alpha \cdot \sigma_{ki} = 0,64 \cdot C \cdot E \cdot \frac{r}{I} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} \quad \{17\}$$

wenn der Beiwert C zur Berücksichtigung der Randbedingungen nach Bild 2.4 in /47/ mit  $C = 1,0$  angesetzt wird, Der Abminderungsbeiwert  $\alpha$  zur Berücksichtigung von Einflüssen, die die idealen Beullasten reduzieren, ist  $\alpha = 0,7$ .

Streng genommen erfassen die Gleichungen {12} und {16} für den Vergleichsmodul  $E_v$  nicht nur den Elastizitätsmodul in der Formel für die ideale Beulspannung der isotropen Schale nach linearer Theorie /47/

$$\sigma_{ki} = C \cdot \frac{0,855}{4\sqrt{(1-\nu^2)^3}} \cdot E \cdot \frac{r}{I} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} \quad \{18\}$$

die für  $C = 1,0$  und  $\nu = 0,3$  in die bekannte Ebnersche Formel übergeht /54/:

$$\sigma_{ki} = 0,92 \cdot E \cdot \frac{r}{I} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} \quad \{19\}$$

sondern integrieren auch den Einfluß der Querkontraktion, wobei  $\nu_l \cdot E_u = \nu_u \cdot E_l$  und  $\nu_u^2 \approx 0,1$  angesetzt wurde /51/. Deshalb wird bei Annahme eines gleichen Abminderungsbeiwertes  $\alpha = 0,7$  gegenüber der idealen Beulspannung die abgeminderte Beulspannung nach Gleichung {15} um knapp 10 % höher als nach Gleichung {17}. Nach /51, 52/ ist die ideale Beullast (Außendruck)

$$p_{ki} = 0,834 \cdot E_v \cdot \frac{r}{H_z} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} \quad \{20\}$$

Die abgeminderte Beulspannung wird mit  $\alpha = 0,7$  unter Berücksichtigung der verschiedenen Sicherheitsbeiwerte

$$p_k = \alpha \cdot \frac{2,0}{1,5} p_{ki} = 0,778 \cdot E_v \cdot \frac{r}{H_z} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} \quad \{21\}$$

Die Anwendung der Gleichungen {13} bis {15} stellen vereinfachte Lösungen dar, die für den Beulnachweis von bisher für GF-UP-Silos üblichen Laminaten mit symmetrischem Aufbau und ausreichenden Wirrfaserschichten genügend genau sind, wenn sich die Zug- und Biegemoduln nicht zu sehr unterscheiden und der Elastizitätsmodul des Reaktionsharzes in festgelegten Grenzen bleibt /55/.

Nach /55, 56/ ist die kritische Beulspannung beim Schachbrettbeulen proportional dem Schubmodul des Laminates:

$$\sigma_{kis} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{2G_{lu} \cdot \sqrt{E_l \cdot E_u}}{1 - \nu_{lu} \cdot \nu_{ul}}} \cdot \frac{t}{r} \quad \{22\}$$

$G_{lu}$  = Schubmodul bezogen auf Längs- und Umfangsrichtung

$\nu_{ul}$  = Querdehnung in Umfangsrichtung infolge Beanspruchung in Längsrichtung

Insbesondere nur in Längs- und Umfangsrichtung verstärkte, sog.  $0^\circ/90^\circ$  - Zylinder sind für Schachbrettbeulung praedestiniert /56/ (Bild 14).

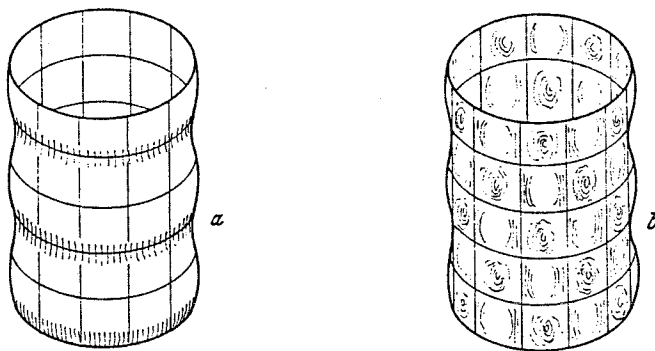


Bild 14 Theoretisch mögliche Beulformen für homogen geschichtete Zylinder

Bei dieser Faserstruktur, die ohne Zwischenschichten aus Wirr-  
fasern praktisch nicht angewendet wird, ist der Schubmodul  
proportional dem Elastizitätsmodul des Harzes. Besonders beim  
Einsatz von GF-UP bei hohen Temperaturen sollte auf diesen  
Einfluß geachtet werden.

Für Ringbeulen, wofür der Vergleichsmodul  $E_V$  in Gleichung {10}  
nach /25/ abgeleitet wurde, ist in /57/ und /62/ eine exakte  
Lösung für orthotrope Lamine angegeben

$$\sigma_{kiR} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu_{luB} \cdot \nu_{ulB})}} \sqrt{E_{uZ} \cdot E_{lB}} \cdot \frac{t}{r} \quad \{23\}$$

$\nu_{luB}$  ;  $\nu_{ulB}$  = Querkontraktionszahlen für Biegung

Die Gleichung entspricht für  $\nu_{luB} = \nu_{ulB} = 0,3$  der klassischen  
Lösung {5} mit

$$E_V = \sqrt{E_{uZ} \cdot E_{lB}} \quad \{24\}$$

Mit diesem Vergleichsmodul wird nach entsprechender Umformung

$$\sigma_e = k \sqrt{E_{uB} \cdot E_{lB}} \cdot \sqrt{\frac{E_{uZ}}{E_{uB}}} \cdot \frac{r}{t} \quad \{25\}$$

Bis auf den Faktor  $\sqrt{\frac{E_{uZ}}{E_{uB}}}$  stimmt diese Gleichung mit {13}  
überein.

Für die Grenzen

$$0,8 < \frac{E_{uZ}}{E_{uB}} < 1,20$$

bleiben die Abweichungen zwischen {25} und {13} unter 10 %.

Die Beziehungen {12} und {16} unterscheiden sich ohne Berück-  
sichtigung der Querkontraktion um den Faktor

$$\frac{4}{\sqrt{\frac{E_{lZ}}{E_{lB}}}}$$

Wegen der vierten Wurzel sind bei größeren Grenzen die Unterschiede noch unter 10 %:

$$0,65 < \frac{E_{1Z}}{E_{1B}} < 1,45$$

#### 2.1.5.2 Stabilitätsnachweis des Daches

Beim Dach wurde der Beulnachweis bisher, soweit sie die Form eines Kugelabschnittes (Halbkugel-, Klöpper- oder Korbbogenform) aufwies, nach Wolmir /58/ an einer Ersatzkugel durchgeführt

$$\sigma_k = 0,155 \cdot E \cdot \frac{t}{r} \quad \{26\}$$

Bisher wurden nur Silos zugelassen, bei denen das Dach aus quasiisotropen Laminaten (Wirrfaser- und Mischlamine aus abwechselnden Wirrfaser- und Gewebeschichten mit Verstärkungsverhältnis 1:1, siehe Abschnitt 5) bestand. Hierbei sind die Elastizitätsmoduln richtungsunabhängig (bei den Mischlaminaten gilt die Aussage exakt nur in Verstärkungsrichtungen des Gewebes) und die Zug-Moduln gleich denjenigen für querkraftfreie Biegung (bei den Mischlaminaten erst bei großen Schichtzahlen),

Als Elastizitätsmodul wurde in Gleichung {26} sowohl der Zug- oder Biegemodul als auch das geometrische Mittel aus beiden  $E_V = \sqrt{E_Z \cdot E_B}$  eingeführt. Mittlerweile hat sich die Verwendung des Biegemoduls durchgesetzt:

$$\sigma_k = 0,155 \cdot E_B \cdot \frac{t}{r} \quad \{27\}$$

In /53/ wird der Beulnachweis GF-UP-Dächer gleicher Form nach der aus Gleichung {4.3} in /47/ mit  $\alpha = 0,15$  für Kugelkappen mit eingespanntem Rand und dem Verhältnis der Sicherheitsbeiwerte 2,0/1,5 abgeleiteten Formel geführt:

$$p_k = \alpha \cdot p_{ki} = 0,242 \cdot E_B \left(\frac{t}{r}\right)^2 \quad \{28\}$$

#### 2.1.5.3 Schnittkraftermittlung

Die Ermittlung der Schnittkräfte erfolgt quasielastisch in gleicher Weise wie bei anderen Baustoffen, dabei darf ein Fließen bei GF-UP nicht berücksichtigt werden. Bei der Dimensionierung gegen Bruch, mögliches Stabilitätsversagen und konstruktiv unzulässige Verformungen sind werkstoffabhängige Abminderungsfaktoren und werkstoffunabhängige Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen. An dieser Vorgehensweise haben sich seit der ersten Richtlinie /18/ keine grundsätzlichen Änderungen ergeben.

In theoretischen Untersuchungen konnte gezeigt werden u.a. /61/, daß die quasielastische Vorgehensweise zur Ermittlung von Spannungen und Verformungen in Kunststoffkonstruktionen sich sehr gut eignet. Man geht dabei von der elastischen Lösung aus, die für Kurzzeitbelastungen sowieso berechnet werden muß. In dieser Lösung ersetzt man die Elastizitätsmoduln durch den Kriechmodul bzw. dividiert die elastischen Steifigkeiten durch die Kriechfunktion ( $A_{1I}$  siehe 2.1.5.4). Die zeitabhängigen Werte für Kriechmodul bzw. Kriechfunktion werden in Versuchen ermittelt.

#### 2.1.5.4 Abminderungs- und Sicherheitsbeiwerte

Die Abminderungsfaktoren erfassen folgende Einflüsse auf die in Kurzzeitversuchen bei Normalklima ermittelten Werkstoffeigenschaften:

Langzeitige Belastung ( $A_1$ ), Alterungseinflüsse in Abhängigkeit vom Umgebungsmedium (z.B. Flüssigkeiten und Freibewitterung) und der Dauer der Einwirkung ( $A_2$ ), erhöhte Temperatur -insbesondere Dauertemperatur- ( $A_3$ ) und die Fertigungsgenauigkeit ( $A_4$ ).

Es ist zwischen Abminderungsfaktoren  $A_{iB}$  für die Dimensionierung gegen Bruchversagen sowie  $A_{iI}$  für den Stabilitätsnachweis und die Verformungsberechnung zu unterscheiden, da sie unterschiedlich groß sein können. Ebenso ist es nicht möglich, allgemein gültige Abhängigkeiten der Faktoren voneinander zu finden /59/.

In den Tabellen 1 und 2 sind typische Beispiele für die einzelnen Abminderungsfaktoren angegeben, wie sie in Zulassungsverfahren eingesetzt wurden (nach /60/). Das Beispiel gilt für einen Flüssigkeitsbehälter aus einem Mattenlaminat. Die Angaben für die Temperatur  $\vartheta \leq 20^\circ \text{C}$  und zweitweise Temperaturerhöhung (Sonne) entsprechen jedoch etwa den Werten die bei GF-UP-Silos verwendet wurden. Die Werte wurden durch Extrapolation von Langzeitversuchen auf eine Beanspruchungszeit von  $10^5 \text{h}$  und teilweise durch Schätzung festgelegt. Die damals (1974) in /60/ verwendete Formel zur rechnerischen Abschätzung der Zeitstandfestigkeit war sehr vorsichtig gewählt.

$$\sigma_{B(t=x)} = E_{c(t=x)} \cdot \frac{2}{3} \epsilon_{B(t=0)} \quad \{29\}$$

$$A_{B1} = \sigma_{B(t=0)} / \sigma_{B(t=x)} \quad \{30\}$$

Darin bedeuten:

$$\sigma_{B(t=0)} = \text{Kurzzeitbruchspannung}$$

$$\sigma_{B(t=x)} = \text{Bruchspannung zur Zeit } t = x$$

$$E_{c(t=x)} = \text{Kriechmodul zur Zeit } t = x$$

$$\epsilon_{B(t=0)} = \text{Kurzzeitbruchdehnung}$$

Daher sind die angegebenen Faktoren  $A_{B1}$  erheblich höher als sich in späteren Untersuchungen zeigte, u.a. /59/. Ebenso wurden die Faktoren  $A_3$  für GF-UP-Schüttgutsilos, die unter normalen atmosphärischen Bedingungen betrieben werden, i.A. zu hoch angesetzt.

**Tabelle 1: Kombinationen der Abminderungsfaktoren gegen Bruch (Beispiel)**

Betriebstemperatur	$A_{B_1}$	$A_{B_2}$	$A_{B_3}$	$A_{B_4}$	$A_{B_{ges}}$	Bedingungen und Erläuterungen
$\vartheta_1 \leq 20^\circ\text{C}$	2,1	1,3	1,0	1,2	3,28	a) Abminderung der Zug- und Biegefestigkeit b) Forderung: Medium nicht an tragendes Laminat, trotzdem $A_{B_2} = 1,3$ wegen mäßiger Härtung und Dickentoleranz der Schutzschicht c) $\vartheta_{\text{Medium}} = \vartheta_{\text{Wand}} = 20^\circ\text{C} \rightarrow A_{B_3} = 1,0$ d) wie a) e) wie b)
$\vartheta_1 \leq 20^\circ\text{C}$ und zeitweise Temperaturerhöhung (Sonne)	2,1	1,3	1,3	1,2	4,26	f) ist Behälter nur zeitweise gefüllt, müssen während der Leerzeit erhöhte Temperaturen angesetzt werden $\vartheta_{\text{Medium}} \neq \vartheta_{\text{Wand}} \leq 80^\circ\text{C} \rightarrow A_{B_3} = 1,3$
$\vartheta_1 \leq 40^\circ\text{C}$	2,4	1,3	1,0	1,2	3,74	g) Abminderung der Zugfestigkeit mit $\sigma_{B_c} = 2/3 E_c(10^5\text{h}, 40^\circ) \sigma_{B_0}$ aus Zugversuch h) wie b) i) $\vartheta_{\text{Medium}} = \vartheta_{\text{Wand}} = 40^\circ\text{C} \rightarrow A_{B_3} = 1,0$ k) wie g)
$\vartheta_1 \leq 40^\circ\text{C}$ und zeitweise Temperaturerhöhung (Sonne)	2,4	1,3	1,25	1,2	4,68	l) wie b) $A_{B_3}$ hier kleiner, weil Abstand zwischen Betriebs- und Maximaltemperatur geringer m) wie f)

**Tabelle 2: Kombination der Abminderungsfaktoren gegen Instabilität (Beispiel)**

Betriebstemperatur	$A_{J_1}$	$A_{J_2}$	$A_{J_3}$	$A_{J_4}$	$A_{J_{ges}}$	Bedingungen und Erläuterungen
$\vartheta_1 \leq 20^\circ\text{C}$	1,7	1,3	1,0	1,2	2,65	a) Beanspruchung durch Eigengewicht, Wind, Schnee Zusatzlast (in Axialrichtung) b) Forderung: Medium nicht an tragendes Laminat, trotzdem $A_{J_2} = 1,3$ wegen mäßiger Härtung und Dickentoleranz der Schutzschicht c) $\vartheta_{\text{Medium}} = \vartheta_{\text{Wand}} = 20^\circ\text{C} \rightarrow A_{J_3} = 1,0$ d) wie a) e) wie b)
$\vartheta_1 \leq 20^\circ\text{C}$ und zeitweise Temperaturerhöhung (Sonne)	1,7	1,3	1,35	1,2	3,58	f) ist Behälter nur zeitweise gefüllt, müssen während der Leerzeiten erhöhte Temperaturen angesetzt $\vartheta_{\text{Medium}} = \vartheta_{\text{Wand}} \leq 40^\circ\text{C} \rightarrow A_{J_3} = 1,35$ Last aus Eigengewicht bleibt für Stabilitätsabminderung
$\vartheta_1 \leq 40^\circ\text{C}$	2,1	1,3	1,0	1,2	3,28	g) Beanspruchung durch Wind, Eigengewicht, Zusatzlast (in Axialrichtung) kein Schnee h) wie b) i) $\vartheta_{\text{Medium}} = \vartheta_{\text{Wand}} \leq 40^\circ\text{C} \rightarrow A_{J_3} = 1,0$ k) wie g)
$\vartheta_1 \leq 40^\circ\text{C}$ und zeitweise Temperaturerhöhung (Sonne)	2,1	1,3	1,25	1,2	4,09	l) wie b) $A_{J_3}$ hier kleiner, weil Abstand zwischen Betriebs- und Maximaltemperatur geringer m) wie f)

Tabelle 1 und 2 Typische Abminderungsfaktoren, die in Zulassungsverfahren eingesetzt wurden, nach /60/

Mit dem Faktor  $A_4$  sollten ursprünglich nicht nur Einflüsse der Fertigungsgenauigkeit auf die Werkstoffeigenschaften sondern auch auf die Bauteilgeometrie erfaßt werden /20/. Später wurden mit  $A_4$  nur noch die Fertigungseinflüsse auf die Materialkennwerte berücksichtigt. Wenn statistisch abgesicherte Schätzwerte für die 5%-Fraktile  $x_{5\%}$  mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von  $W = 75\%$ , daß der Schätzwert nicht kleiner ist als der 5% - Fraktilewert der Grundgesamtheit (Produktion), für die Baustoffeigenschaften vorliegen, kann  $A_4 = 1,0$  gesetzt werden.

Der Faktor  $A_1$  ist allgemein in voller Höhe für die jeweilige Beanspruchungszeit einzuführen. Das galt auch lange Zeit für die Stabilitätsbemessung. Aufgrund der Untersuchungen in /62/ braucht beim Beulnachweis längsgedrückter Zylinderschalen der Faktor  $A_{1I}$  nicht mehr in voller Höhe in Rechnung gestellt werden, sondern mit  $\sqrt{A_{1I}}$ . In Bild 15 ist die Kriechabminderung der Beullasten nach der vorherigen und jetzigen Praxis vergleichend dargestellt (nach /62/).

Dargestellt sind die Kurven für drei idealistische Grenzfälle in der Anordnung der Verstärkung von GF-UP-Zylinderschalen.

-viskoelastisch isotrop:  $\phi_l = \phi_u = \phi_t = A_{1I}$

Diesem Typ entsprechen wirrfaserverstärkte Schalen und solche mit Verstärkungen unter  $45^\circ$  und  $90^\circ$  zur Achse ( $45^\circ/90^\circ$  Schalen) in etwa.

-Umfangsversteift:  $\phi_l = \phi_t = A_{1I}$ ,  $\phi_u = 1$

Eine Wirrfaserverstärkung mit starker Umfangswicklung ( $90^\circ$ ) kommt diesem Grenzfall nahe.

- $0^\circ/90^\circ$ -Verstärkung:  $\phi_l = \phi_u = 1$ ,  $\phi_t = A_{1I}$

Die nur in Achs- und Umfangsrichtung verstärkte Schale ( $0^\circ/90^\circ$ -Schale) kriecht im wesentlichen nur bei Torsions- und Schubbeanspruchung.



Die Werte  $\varnothing_i$  sind die jeweiligen Kriechfunktionen ( $A_{1I}$ ) für Normalkraft oder Biegebeanspruchung in Längs- und Umfangsrichtung bzw. für Schub- oder Torsionsbeanspruchung. Die ermittelten Werte  $\eta_k$  gehen bei den umfangsversteiften und  $0^\circ/90^\circ$ -Schalen von der Formel der Schachbrettbeullast {22} aus, da diese Beullast für sie wegen ihrer geringen Drill- und Schubsteifigkeit maßgeblich ist. Bei quasiisotropen Schalen sind die Ring-

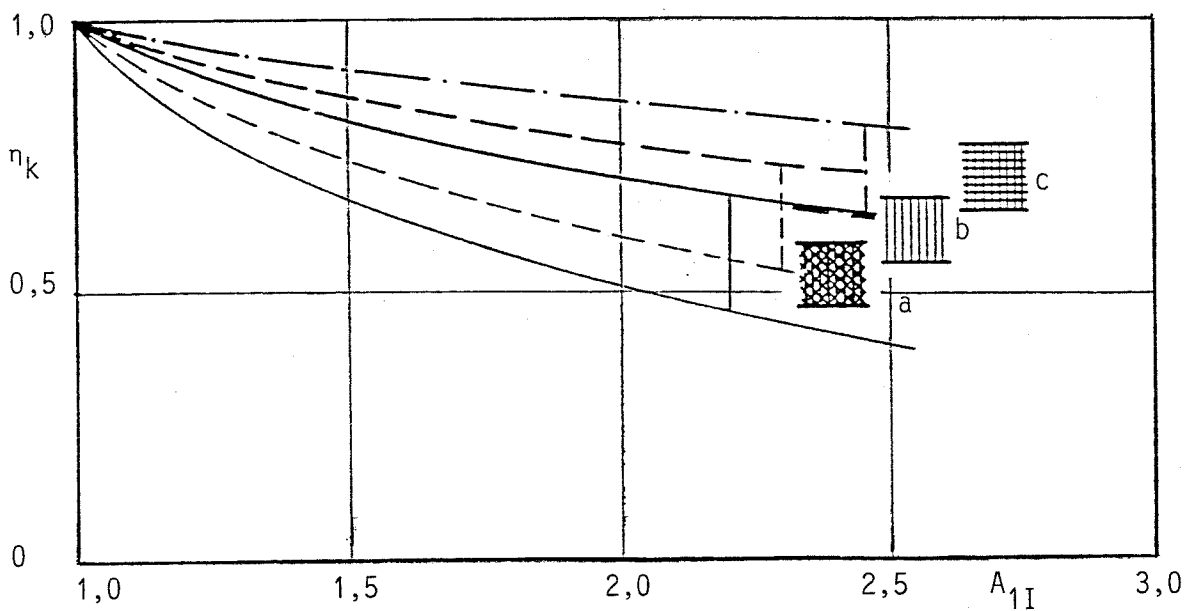


Bild 15 Vergleich der Kriechabminderung  $\eta_k$  nach früherer Praxis (dünne Linien) und den Ergebnissen von /62/ (dicke Linien) in Abhängigkeit vom Endkriechmaß (Abminderungsbeiwert  $A_{1I}$ ) für unterschiedlich verstärkte Zylinder (idealistische Grenzfälle)  
a: isotrope, b: umfangsverstärkte, c:  $0^\circ/90^\circ$ -Zylinder

{23}, und die Schachbrettbeullast gleich.

Die Kriechabminderung  $\eta_k = \frac{1}{\sqrt{A_{1I}}}$  beschreibt den Einfluß

des Anwachsens von Vorbeulen durch das Kriechen des Werkstoffs auf die Beullast, der Beulvorgang selbst ist kurzzeitig. Bei kurzzeitigen Belastungsvorgängen reagiert der Werkstoff jedoch auch nach langen Kriechzeiten mit seiner "Kurzzeitsteifigkeit", d.h. die dadurch entstehenden Verformungen folgen dem Kurzzeitmodul, solange keine Veränderungen durch Alterung, Temperatur oder Überschreitung von verformungsbedingten Schädigungsgrenzen eingetreten sind. Durch Knickversuche an exzentrisch belasteten wirrfaserverstärkten GF-UP-Stäben sowie an Stäben mit Vorverformungen wurde dieses Verhalten in /50/ bestätigt.

Bei experimentellen Untersuchungen /63/ an axial gedrückten GF-UP-Zylinderschalen war ein Einfluß des Kriechens auf die Beullasten nicht eindeutig feststellbar, die Ergebnisse lagen im üblichen Streubereich.

Die vorher beschriebene Reduzierung der Kriechabminderung von  $A_{1I}$  auf  $\sqrt{A_{1I}}$  ist nicht auf das Stabilitätsverhalten von Stäben übertragbar, da beim Anwachsen von Vorverformungen keine Lastumlagerung möglich ist.

Beim Beulnachweis der Dächer ist  $A_{1I}$  nach /20/ in voller Höhe anzusetzen. In /53/ wurde für diesen Nachweis wie auch für Zylinder unter Manteldruck  $\sqrt{A_{1I}}$  eingeführt.

Die globalen Sicherheitsbeiwerte  $S_B$  bei Dimensionierung gegen Bruchversagen und  $S_I$  für Stabilitätsberechnungen werden nach /19/ in jedem Einzelfall festgelegt, wobei im allgemeinen  $S_I > S_B$  und  $S_B \geq 1,75$  anzusetzen ist.

Für die Bemessung von GF-UP-Silos werden folgende Faktoren angewendet:

- wenn das Bruchversagen maßgeblich ist,  
 $S_B = 1,75$
- bei der Stabilitätsberechnung der Zylinder  
 $S_I = 1,75$

- bei der Stabilitätsbemessung des Daches

$$S_I = 2,0$$

Die zulässigen Spannungen werden damit unter Berücksichtigung der Abminderungsfaktoren:

$$\text{zul } \sigma = \frac{\beta}{A_B \cdot S_B} \quad \{31\}$$

Dabei ist  $\beta$  die maßgebende Festigkeit aus dem Kurzzeitversuch bei Normalklima und  $A_B$  das Produkt der zu berücksichtigenden

$$\text{Abminderungsbeiwerte: } A_B = A_{1B} \cdot A_{2B} \cdot A_{3B} \cdot A_{4B}$$

In der Stabilitätsberechnung werden Verformungsmoduln  $E_C = E/A_I$  eingesetzt mit dem Elastizitätsmoduln  $E$  aus dem Kurzzeitversuch bei Normalklima und dem Produkt der Abminderungsfaktoren

$$E_C = E/A_{1I} \cdot A_{2I} \cdot A_{3I} \cdot A_{4I} \quad \{32\}$$

Bei der Beulbemessung axial gedrückter Zylinderschalen kann

$$E_C = E/\sqrt{A_{1I}} \cdot A_{2I} \cdot A_{3I} \cdot A_{4I} \quad \{33\}$$

verwendet werden.

Die Berechnung von Verformungen der Bauteile (nicht Werkstoffdehnungsgrenzen) oder Zwängungen kann mit dem Mittelwert des Verformungsmoduls erfolgen. Zwängungen sind auch als Kurzzeitlastfall mit dem Mittelwert des Elastizitätsmoduls  $E$  zu ermitteln.

Bei der Bemessung gegen Grenzdehnungen ist nach /53/ der Verformungsmodul in Form von

$$E_C = 1,1 E/A_{1I} \cdot A_{2I} \cdot A_{3I} \quad \{34\}$$

mit  $E$  als 5 %-Fraktile zu verwenden.

Der Nachweis von Rißgrenzen ist bei reinen Schüttgutsilos nicht notwendig, muß jedoch dann geführt werden, wenn die Silos zeitweise mit Flüssigkeiten gefüllt sein können (z.B. bei Salzauflösebehältern).

Insbesondere bei den Faktoren  $A_1$  ist nach der Beanspruchungsart (z.B. Zug, Biegung) und der Beanspruchungsrichtung zu unterscheiden. So ist z.B. die Beulspannung nach {13}

$$\sigma_e = k \frac{\sqrt{E_{uB} \cdot E_{lB}}}{\sqrt[4]{A_{1Iu} \cdot A_{1II} \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4}} \frac{t}{r} \quad \{35\}$$

Lasten und Beanspruchungen unterschiedlich langer Dauer, kurzzeitige (z.B. Wind, Temperatur oder kurzzeitig wirkender Druck), zyklische (z.B. Schnee) und langzeitige (z.B. Eigengewicht, Lasten aus Füllgut) können (siehe auch /53/) überlagert werden, indem die aus den einzelnen Lasten resultierenden Schnittgrößen mit den Abminderungsbeiwerten  $A_1$  entsprechend ihrer Einwirkdauer und den Beiwerten  $A_2$  und  $A_3$  multipliziert werden.

Die Bemessungsgleichungen werden dann beim Festigkeitsnachweis,

$$\frac{S_B \cdot \sum (A_{Bi} \cdot n_i)}{n_B} + \frac{S_B \cdot \sum (A_{Bi} \cdot m_i)}{m_B} \leq 1 \quad \{36\}$$

beim Stabilitätsnachweis

$$\frac{S_I \cdot \sum (A_{Ii} \cdot n_i)}{n_e} \leq 1 \quad \{37\}$$

oder

$$\frac{S_I \cdot \sum (A_{Ii} \cdot p_i)}{p_k} \leq 1 \quad \{38\}$$

und beim Grenzdehnungsnachweis (in allgemeiner Form)

$$S_e \left[ \frac{\sum (A_{Ii} \cdot \sigma_{Zi})}{E_Z} + \frac{\sum (A_{Ii} \cdot \sigma_{Bi})}{E_B} \right] \leq \epsilon_F \quad \{39\}$$

In diesen Gleichungen bedeuten:

- $n_i, m_i, p_i$  = Normalkräfte, Momente und Drücke aus den einzelnen Lasten.
- $n_B, m_B$  = Kurzzeitbruchkräfte und -momente bei Normalklima
- $S_B, S_I, S_e$  = Maßgebliche globale Sicherheitsbeiwerte, in /53/ sind  $S_B = S_I = 2,0$  und  $S_e = 1,0$ .
- $n_e, p_k$  = kritische Beulkräfte bzw.- drücke z.B. nach Gleichungen {13} oder {15}
- $A_{Bi}, A_{Ii}$  = Produkt der für die einzelnen Lasten maßgeblichen Abminderungsfaktoren. Es sind zum Beispiel folgende  $A_1$  für einzelne Schnittgrößen anzusetzen:
- aus ständiger Last:  $A_1$  für  $2 \cdot 10^5$  h Dauer
  - Schnee :  $A_1$  für  $2 \cdot 10^3$  h
  - kurzzeitiger Last.:  $A_1 = 1,0$
- $E_Z, E_B$  = Kurzzeitelastizitätsmoduln bei Normalklima für die maßgebliche Beanspruchung (Normalkraft oder Biegung).
- $\epsilon_F$  = Werkstoffbedingte Grenzdehnung  
In /53/ ist für von Flüssigkeit benetzte GF-UP-Behälter, deren Wandaufbau mit einer Wirrfaserschicht, deren Faseranteil mindestens  $450 \text{ g/m}^2$  beträgt, beginnt und endet, die Randfaserdehnung auf  $\epsilon_F \leq 0,5 \%$  begrenzt.

Auf die Berechnung von Bauteilverformungen und Schub- bzw. Scherbeanspruchungen können die Gleichungen sinngemäß angewendet werden.

Die Gültigkeit der beschriebenen Überlagerung ist bei Kunststoffen (verstärkt oder unverstärkt) für Verformungs- und Stabilitätsberechnungen nachgewiesen, solange man im viskoelastischen Bereich des Verformungsverhaltens bleibt, keine Veränderungen des Werkstoffes durch Alterung, Temperatur (sollen durch  $A_2$  und  $A_3$  erfaßt werden) oder durch Überschreitung verformungsbedingter Schädigungsgrenzen eintritt und bei zyklischen Lasten die Einwirkdauer so klein bleibt, daß bis zum nächsten Lastzyklus zur viskoelastischen Rückstellung ihres Verformungsanteils genügend Zeit bleibt, für GF-UP u.a. /50, 53, 64/.

Zum Einfluß von kurzzeitigen und zyklischen Lasten, die mit Dauerlasten überlagert werden, auf die Zeitstandfestigkeit, liegen wegen des komplexen Verhaltens des Werkstoffs nach Überschreitung verformungsbedingter Schädigungsgrenzen insbesondere für GF-UP noch keine gesicherten theoretischen und experimentellen Ergebnisse vor. Hier kann diese Art der Überlagerung vorläufig nur eine Abschätzung sein, die durch gleichzeitige Einhaltung von Verformungsgrenzen abgesichert werden sollte.

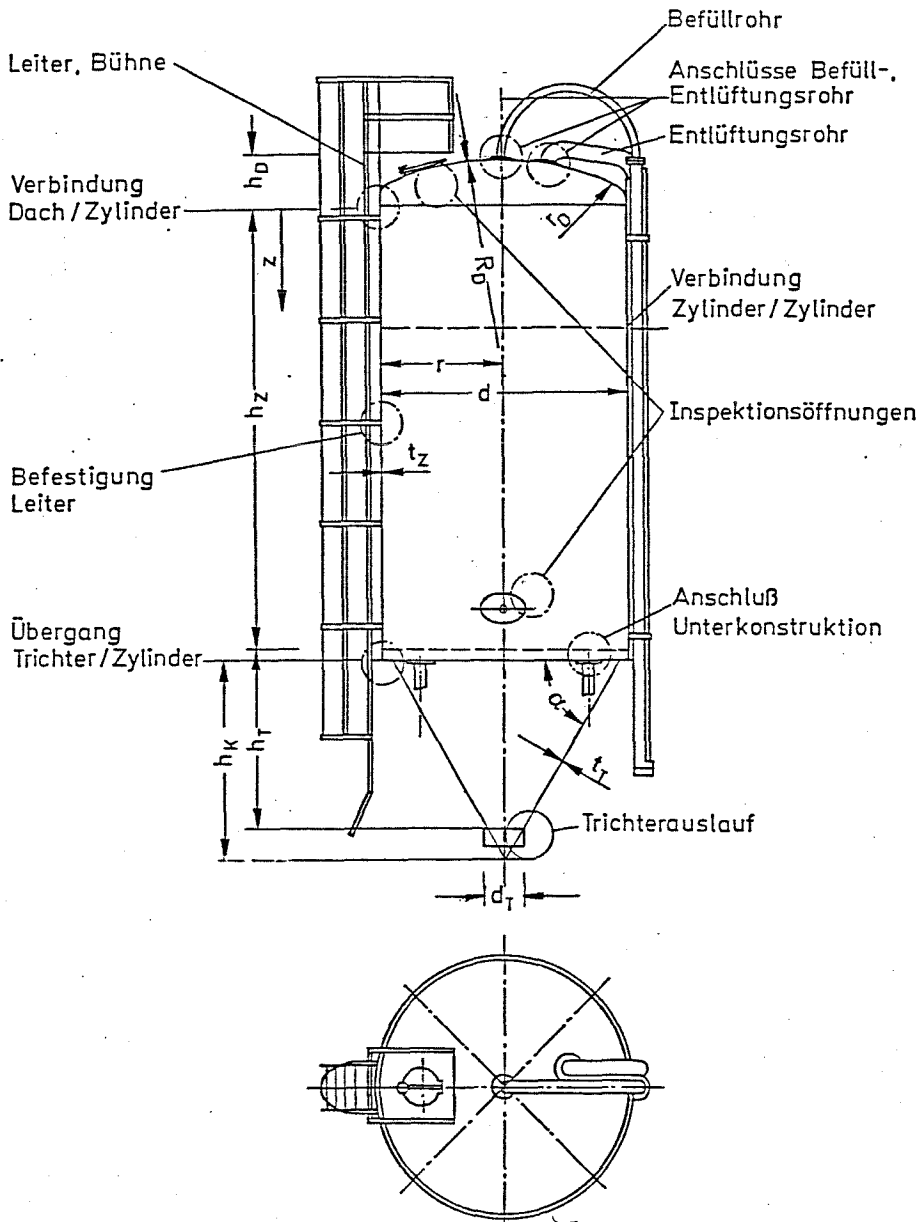
Eine dehnungsbezogene Überlagerung der Lasten unter Berücksichtigung des kurz- und langzeitigen Verformungsverhaltens von GF-UP auch oberhalb von Schädigungsgrenzen bis zur Bruchdehnung könnte zumindestens für die praktische Bemessung von üblichen Baukonstruktionen eine Lösungsmöglichkeit darstellen. Die Bruchdehnungen sind z.B. bei Wirrfaserlaminaten nicht /59/ oder wenn, dann nur gering /22/ von der Belastungsdauer abhängig (ohne Einflüsse von Temperatur und Alterung).

## 2.2 Typische Konstruktionsbeispiele

### 2.2.1 Geometrische Grundformen

Hauptsächlich wegen des günstigen statischen Systems aber auch aus funktionalen Gründen werden die Silobehälter als Zylinder mit kreisförmigem Querschnitt hergestellt (Bilder 16 und 17). Während Schüttgutsilos meist am Übergang Zylinder/Trichter auf einer Stahlunterkonstruktion aufgelagert sind (Bilder 18 und 19), wird bei Gärfuttersilos der Zylinder direkt im Betonfundament verankert (Bild 20). In einzelnen Fällen werden Schüttgutsilos insbesondere mit kleineren Volumina über außen am Zylinder angeflanschte Stahlstützen (Bilder 12 und 21) oder in korbähnlichen Stahlkonstruktionen (Bilder 22 und 23) aufgeständert. Bei Gärfuttersilos wurden neben der Zusammensetzung des Zylinders aus miteinander an vertikalen Fugen verschraubten Einzelsegmenten (Bilder 6 und 20) auch Konstruktionen ausgeführt, bei denen der Zylinder aus einzelnen horizontalen Schüssen zusammengefügt ist (Bild 24).

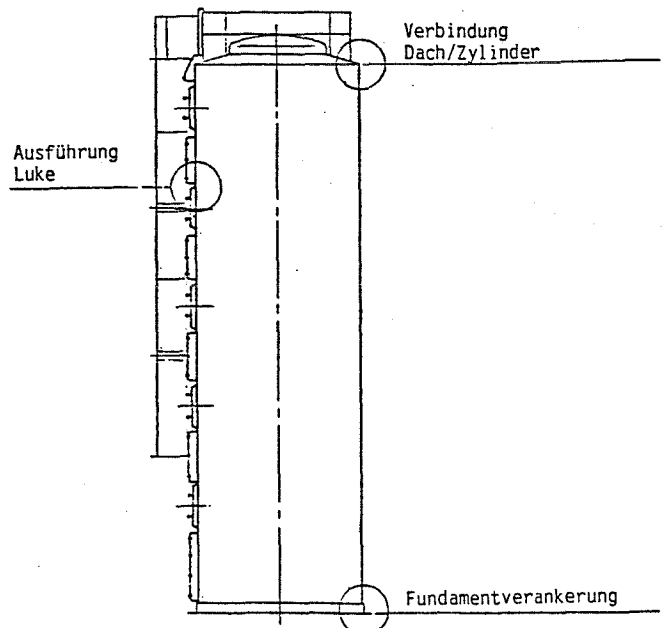
Bild 16



Typische Form eines Schüttgutsilos aus GF-UP mit wichtigen Konstruktionsdetails nach /65/

Bild 17

Typische Form eines Gärfuttersilos aus GF-UP mit wichtigen Konstruktionsdetails nach /10/



## Abkürzungen und Symbole

Typ: Schüttgutsilos  
Wichte (kN/m<sup>3</sup>) / Durchmesser (dm) / Volumen (m<sup>3</sup>)  
Gärfuttersilos  
Wichte (kN/m<sup>3</sup>), Klasse n. DIN 1055 T 6 / Durchmesser (dm) / Volumen (m<sup>3</sup>)

### Laminataufbau:

Verstärkung	Abkürzung	Symbol	flächenbezogene Glasmasse (g/m <sup>2</sup> ) Verstärkungsverhältnis, Beispiel
Wirrfasern	M	XXXXXX	450
Roving (Umfangsrichtung)	F	//////	120
Gewebe	W	+++++=	580 (1 : 1)
Gelege (Achsrichtung)	U	=====	500 (1 : 18)

### Beispiel für Laminatbezeichnung:

GF - UP - 1 - MW - 10 - 55 - B (H)

GF - textilglasverstärkter Baustoff

UP - Harzart

1 - Gruppe nach Tabelle 3

MW - Aufbauart, Mischlaminat Wirrfaser/Gewebe

10 - Anzahl der Schichten

55 - Glas-Masseanteil  $\phi$  in %

B - thermisch nachbehandelt (getempert)

(H)- Herstellverfahren (H  $\hat{=}$  Handlaminieren,  
FS  $\hat{=}$  Faserspritzen,  
I  $\hat{=}$  Injektions- und Vakuumverfahren,  
NP  $\hat{=}$  Naßpressen,  
S  $\hat{=}$  Schleuderverfahren,  
F  $\hat{=}$  Wickelverfahren)

Auf die Abkürzung GF-UP wird in den folgenden Bildern verzichtet, da alle Lamine mit ungesättigten Polyesterharzen hergestellt sind.

Alle Angaben zu Wanddicken und Laminataufbau beziehen sich auf den tragenden Querschnitt ohne Schutzschichten.





Bild 18

Gruppe von Schüttgutsilos zur Lagerung von Streusalz nach /11/

Bild 19

Gruppe von Schüttgutsilos zur Lagerung von Düngemitteln mit unterfahrbarer Unterkonstruktion nach /66/



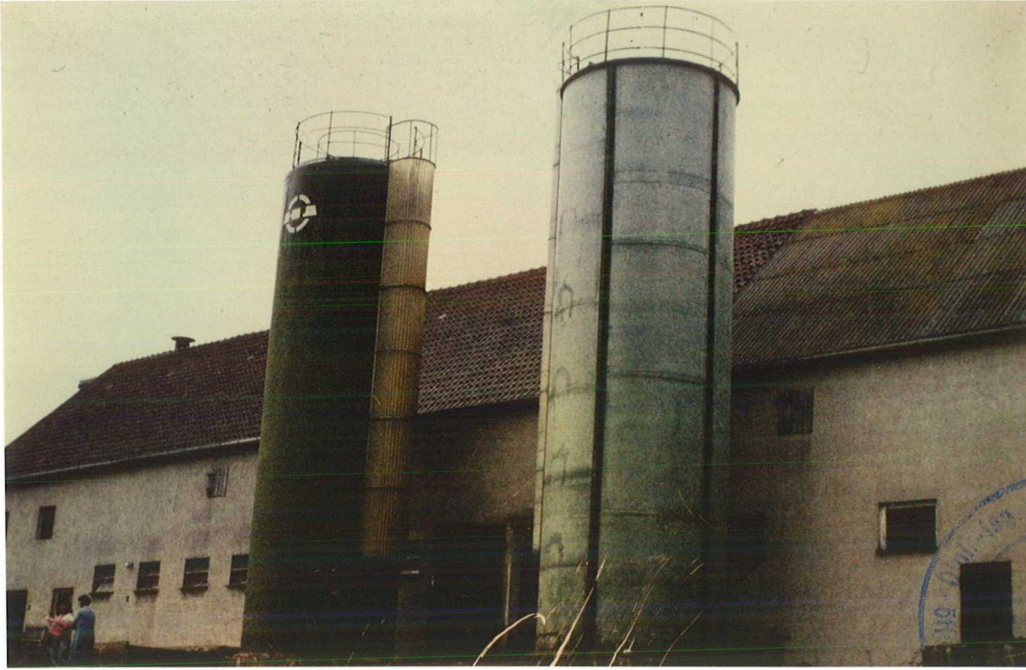


Bild 20 Gärfuttermilos; links mit im Wickelverfahren hergestelltem Zylinder nach /10/, rechts mit einem aus Einzelsegmenten zusammengesetzten, an vertikalen Fugen verschraubten Zylinder nach /67/

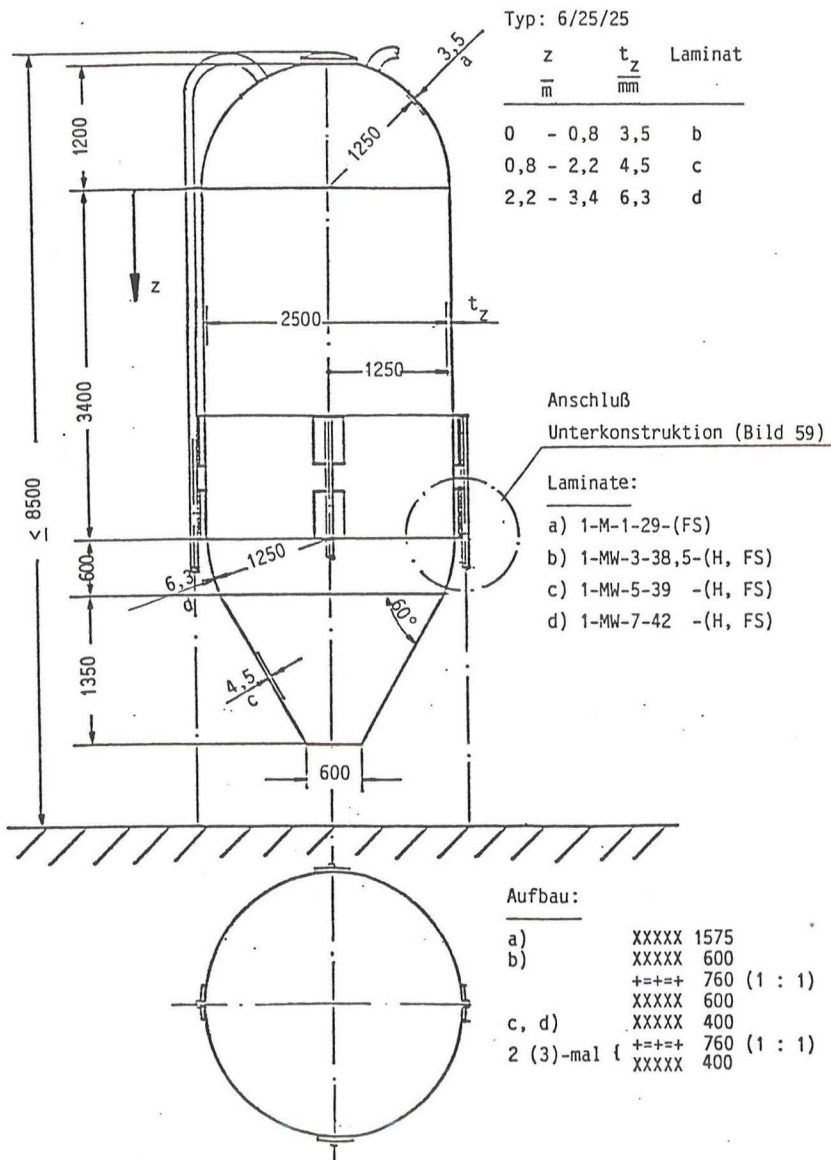


Bild 21 Siloaufständerung mit am Zylinder angeflanschten Stahlstützen nach /45/, gesamter Silobehälter ohne Verbindungsfugen in einem Teil hergestellt

Typ: 6/19/12,5

Bild 22 Siloaufständerung in korbähnlicher Stahlkonstruktion. Silobehälter aus zwei Teilen mit vertikaler Verbindungsfuge hergestellt, nach /68/

Laminat:

- a, b) 1-M -1-35-(FS)
- c) 1-MW-3-45-(H, FS)

Aufbau:

- a) XXXXX 1600
- b) XXXXX 2400
- c) XXXXX 1200
- ++++ 800 (1 : 1)
- XXXXX 1200

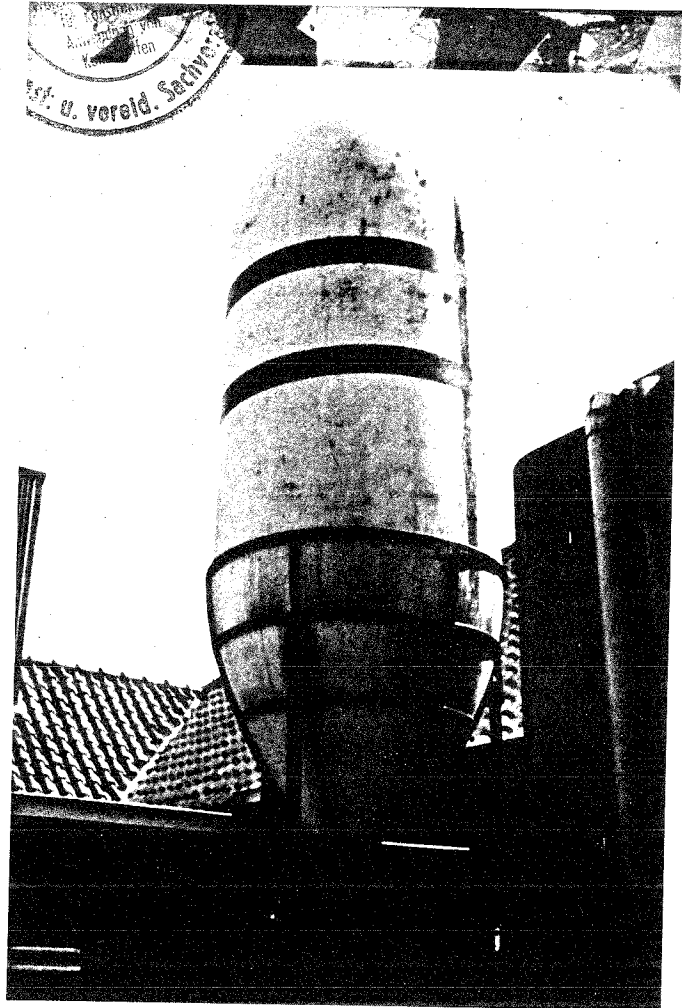
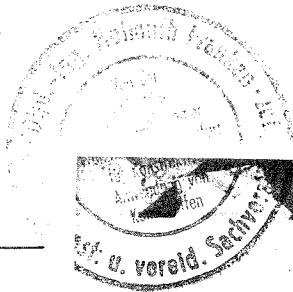
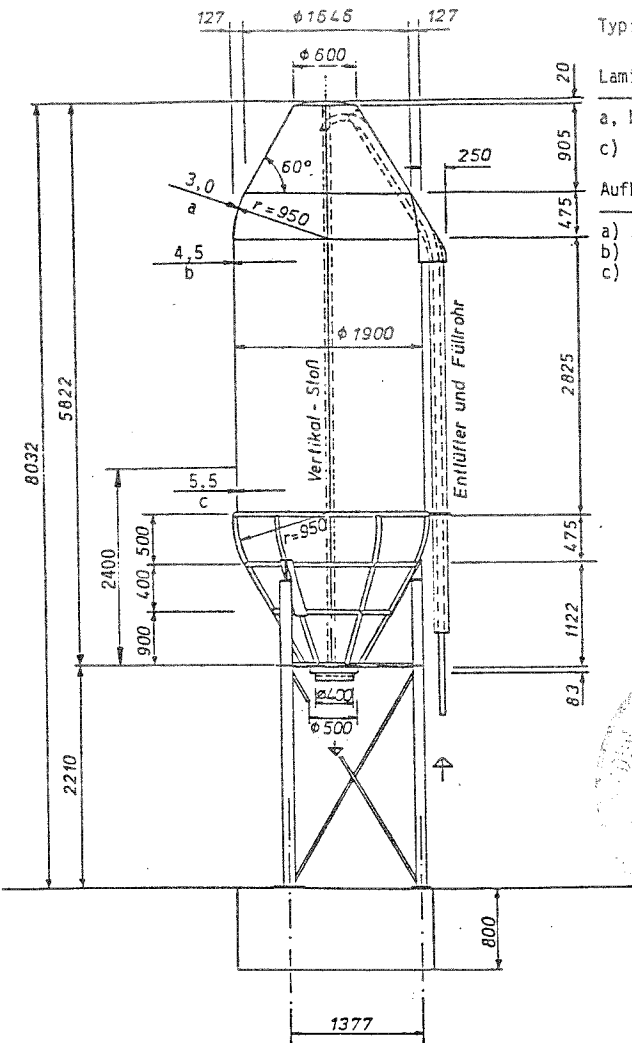


Bild 23 Siloaufständerung in korbähnlicher Stahlkonstruktion nach /68/

Bild 24

Aus einzelnen horizontalen  
Schüssen zusammengefügt  
Gärfuttersilo nach /69/

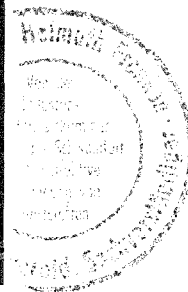
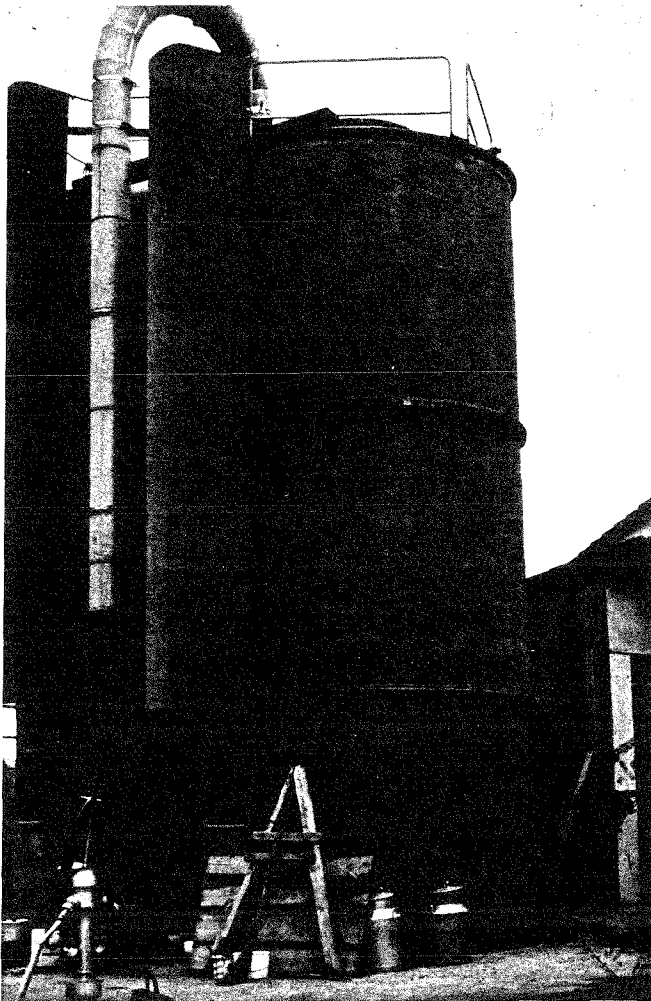
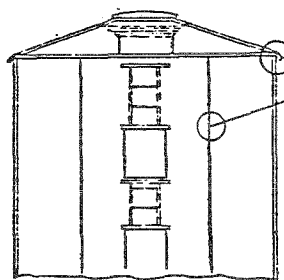


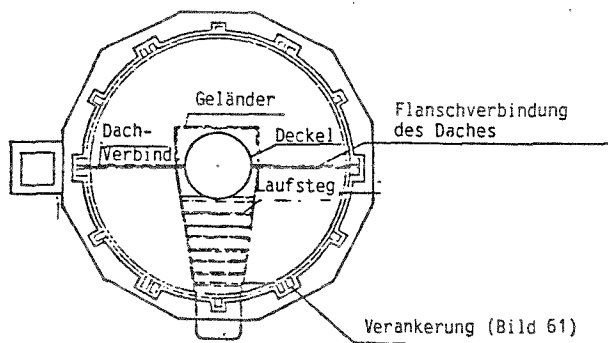
Bild 25

Aus zwei Teilen zusammengeschaubtes Dach eines Gärfuttersilos nach /67/



Verbindung Dach/Zylinder  
(Bild 37a)

Verbindung Zylinder-  
Segment/-segment  
(Bild 39a)



Die Dächer werden im Allgemeinen in Form von Kugelabschnitten (meist Klöpper- oder Korbbogenform, seltener Halbkugelform) ausgeführt. Kegelförmige Dächer wurden bei Schüttgutsilos mit wenigen Ausnahmen (z.B. Bilder 22 und 23) nicht hergestellt, da das statische System höhere Wanddicken erfordert. Bei Gärfuttersilos wurde mehrfach für das Dach die Kegelform gewählt (z.B. Bilder 17 und 25, /9/, /10/, /39/, /67/).

Die Trichter aller bisher allgemein bauaufsichtlich zugelassenen Schüttgutsilos sind als symmetrischer Kegelstumpf ausgeführt, in Einzelfällen sind auch assymmetrische Formen gefertigt worden. Der Trichterwinkel beträgt meistens  $\alpha = 60^\circ$  (siehe Bild 16), vereinzelt werden je nach Fließfähigkeit des Schüttguts geringere Winkel gewählt, z.B.  $\alpha = 54^\circ$  bei Kunstdünger /66/ oder  $\alpha = 45^\circ$  bei Feuchtgetreide /70/.

Auf die Stahlunterkonstruktionen und Fundierungen soll hier nicht weiter eingegangen werden, da sich diese Bauteile nicht von entsprechenden bei Silos aus anderen Baustoffen unterscheiden.

Während die geometrische Grundform der GF-UP-Behälter bei bisher ausgeführten Konstruktionen nur sehr wenig variiert, unterscheiden sich die wichtigsten Konstruktionsdetails in vielfältigster Weise.

### 2.2.2 Konstruktionsdetails

Die Befestigung von Leitern, Geländern und Bühnen, die Anschlüsse von Befüll- und Entlüftungsrohren, die Ausführung von Inspektionsöffnungen und Trichterauslauf sowie die Verbindung Dach/Zylinder sind für die Standsicherheit des Gesamtsilos im Gegensatz zur Verbindung von einzelnen Zylinderschüssen bzw. Segmenten miteinander, vom Zylinder mit dem Trichter und dem Anschluß an die Unterkonstruktion bzw. an die Fundierung (bei Gärfuttersilos) von untergeordneter Bedeutung.

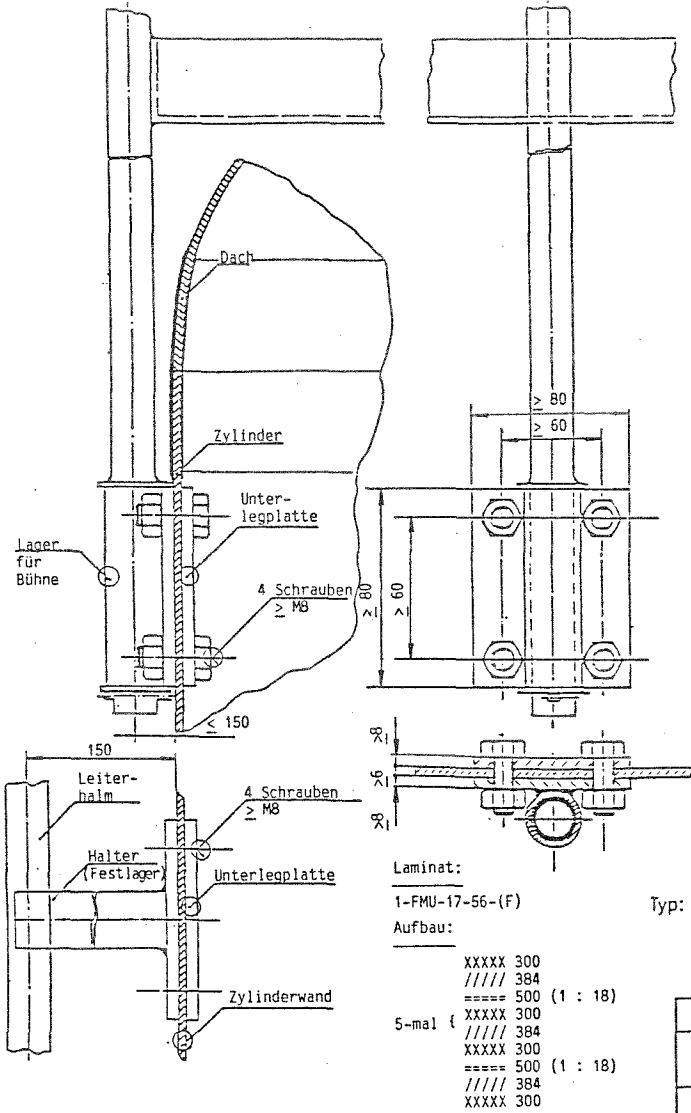
Leitern, Geländer und Bühnen werden an GF-UP-Wand oder -Dach entweder mit durchgehenden Schrauben und Unterlegplatten oder -scheiben befestigt (z.B. Bild 26) oder über angeklebte und überlamierte Stahlbleche mit ihnen verbunden (z.B. Bilder 27 und 28). Um das Durchbohren der Silowand und das Anpassen der Stahlbleche an die Form der Silos zu vermeiden, wurden auch Mischformen der vorgenannten Lösungen ausgeführt (z.B. Bild 29).

Befüll- und Entlüftungsrohre werden ebenfalls entweder über Flansche angeschraubt (z.B. Bild 30) oder anlamiert (z.B. 31). Für die stählernen Befülleitungen werden lösbare Schraubverbindungen bevorzugt, da je nach Schüttgut (z.B. Kunstdünger) insbesondere der Krümmungsbereich der Leitungen (Bild 16) wegen unvermeidlicher Verschleißerscheinungen in unterschiedlichen Zeiträumen ausgetauscht werden muß. Für die Entlüftungsleitungen werden vorwiegend Kunststoffrohre (i.A. Polyvinylchlorid) verwendet. Wenn die zentrische Befüllung des Silos nicht durch mittige Anordnung des Befüllrohres im Dach (Bilder 16 und 30) ohnehin gegeben ist, wird die Leitung im Silo nach dieser Anforderung gestaltet, z.B. durch Anordnung einer Prallplatte. Bei seitlicher Einführung der Rohre erhält das Dach häufig einen kastenförmigen Aufbau (Bild 32). Die Laminatdicke dieser Aufbauten, die durchgehend mit dem restlichen Dach laminiert werden, beträgt i.A. das 1,5-fache der Normaldachdicke.

Inspektionsöffnungen werden meist annähernd elliptisch oval ausgeführt. Ein "Kragen" wird in die Öffnung des Zylinders oder Dachs eingeklebt, deren Rand i.A. durch Überlamine verstärkt ist. Mit einem Bügel und Handrad wird der "Deckel" über eine Spindel von innen nach außen an den "Kragen" gepreßt. Bei Gärfuttersilos sind die Luken meist größer als für übliche Inspektionsöffnungen, da oft auch das Gärfutter (sog. Obenentnahme) durch die Luken entnommen wird. Die konstruktive Lösung nach Bild 33, benutzt den Ausschnitt aus dem Zylinder, der durch Überlamine verstärkt wird.

Bild 26

Befestigung von Leiter, Geländer und Bühne nach /65/



Laminat:  
1-FMU-17-56-(F)

Aufbau:

XXXXX	300
////	384
====	500 (1 : 18)
XXXXX	300
////	384
XXXXX	300
====	500 (1 : 18)
////	384
XXXXX	300

Typ: 18/33/100

Laminat:

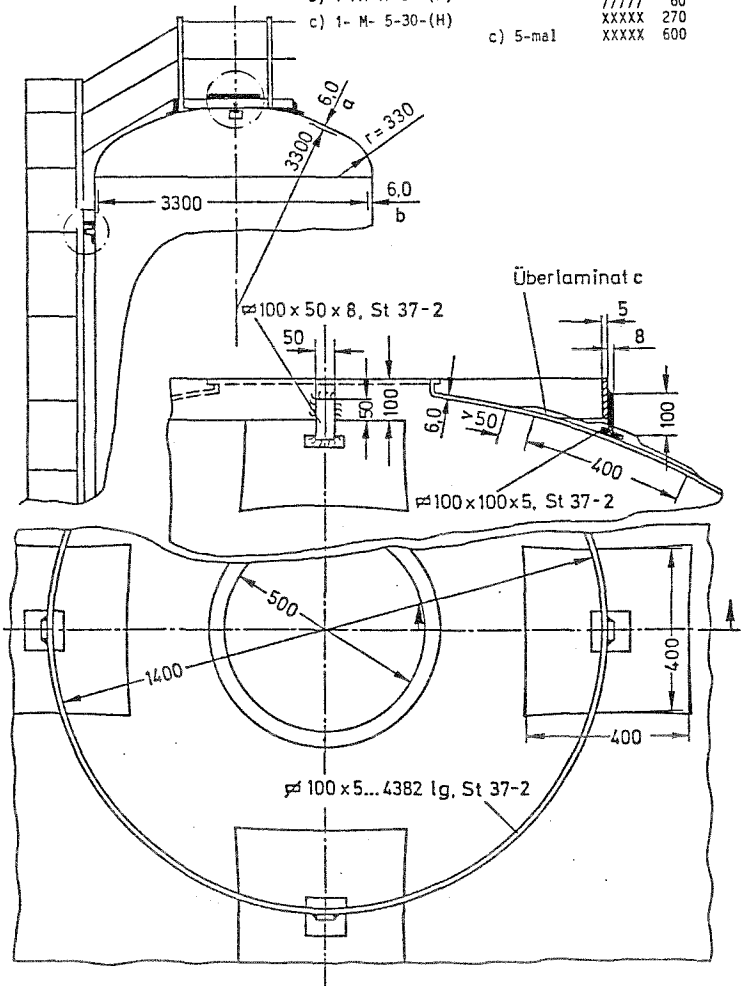
- a) 1- M- 1-42-(FS)
- b) 1-FM-17-34-(F)
- c) 1- M- 5-30-(H)

Aufbau:

- a) XXXXX 3900
- b) 8-mal ( XXXXX 270
- ///// 60
- XXXXX 270
- c) 5-mal XXXXX 600

Bild 27

Befestigung von Geländer und Bühne nach /70/



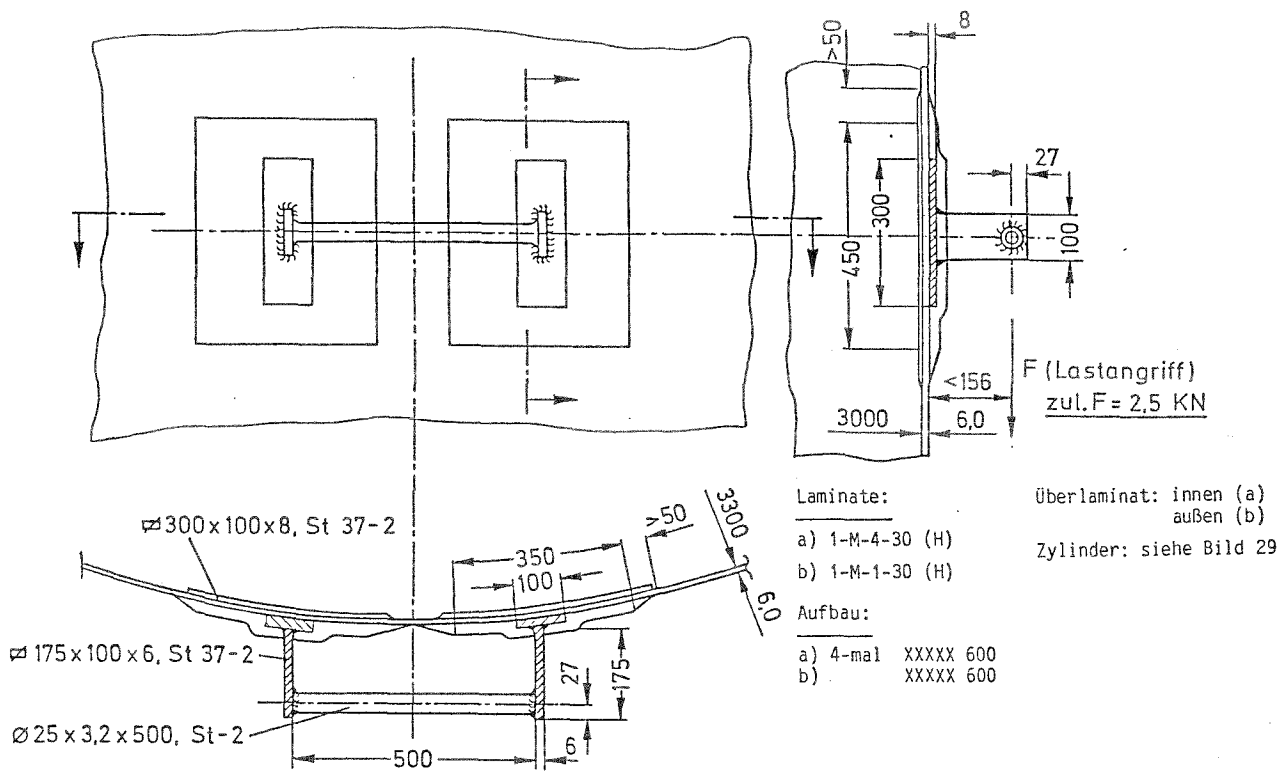


Bild 28 Leiterbefestigung nach /70/

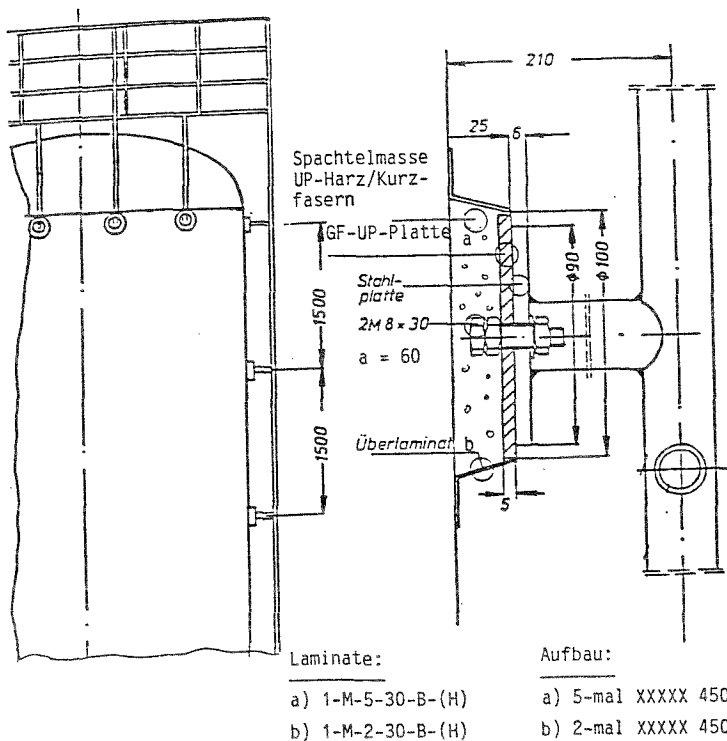


Bild 29 Befestigung von Leiter,  
Geländer und Bühne  
nach /71/



Typ: 17/30/80

Bild 30

Anschlußausführung von Befüll- und Entlüftungsrohr nach /65/

Aufbau:

- a) 6-mal XXXXX 450
- b) 9-mal XXXXX 450

Laminate:

- a) 1-M-6-28 (I)
- b) 1-M-9-28-(I)

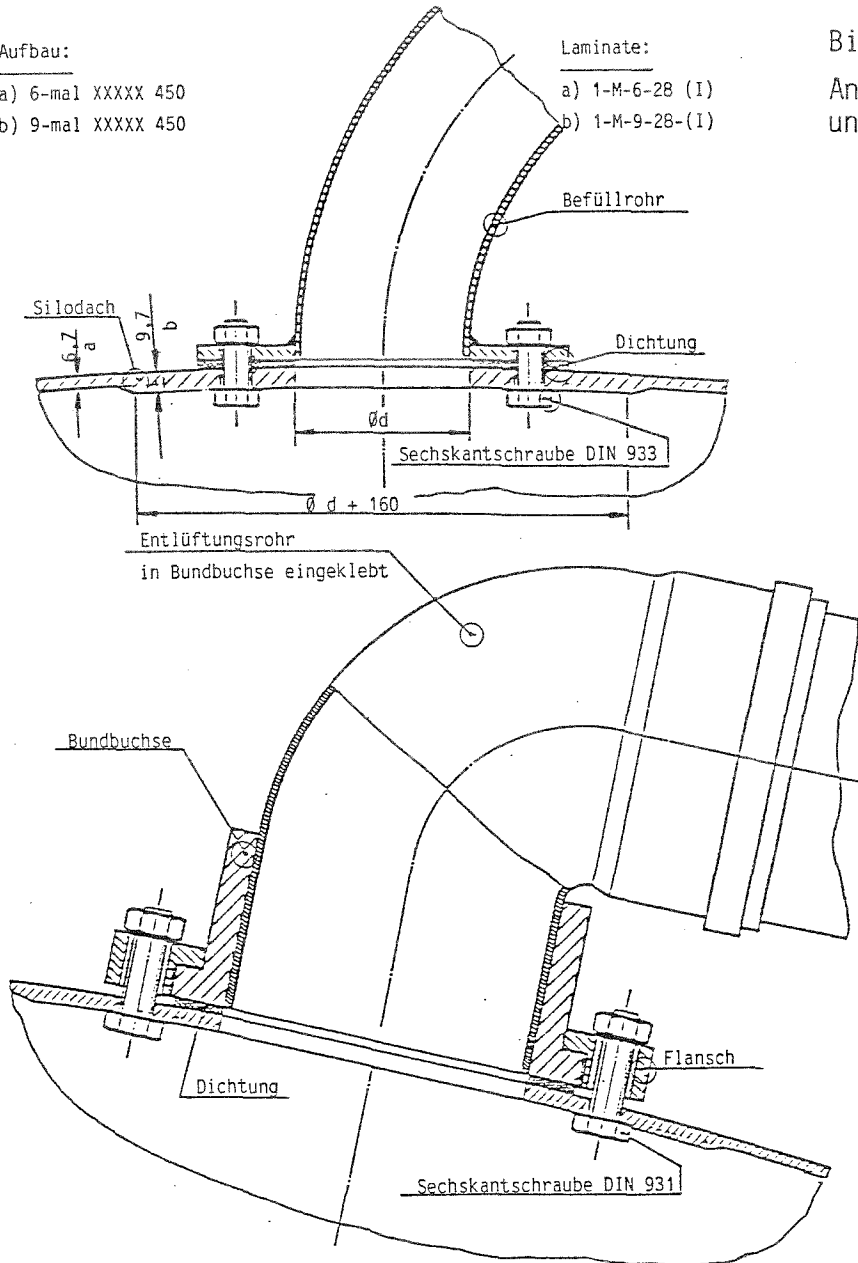
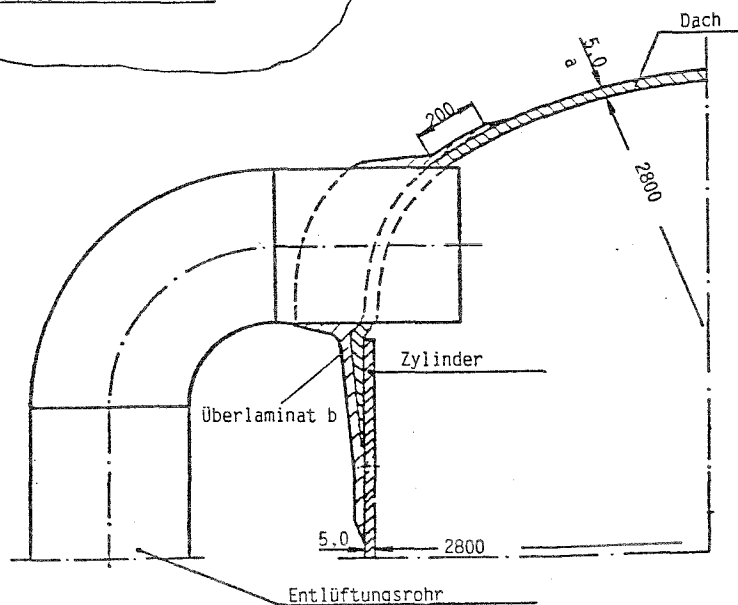


Bild 31

Anschlußausführung des Entlüftungsrohrs nach /66/



Typ: 18/28/60

Laminate:

- a) 1- M- 1-34-(FS)
- b) 1- M- 5-30-(H)
- c) 1-FM-11-30-(F)

Aufbau:

- a) XXXXX 2650
- b) 5-mal XXXXX 450
- c) 5-mal XXXXX 360
- ///// 120
- XXXXX 360

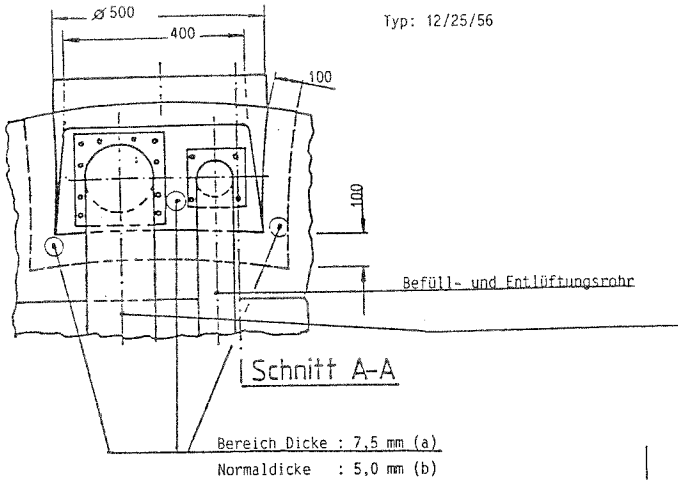
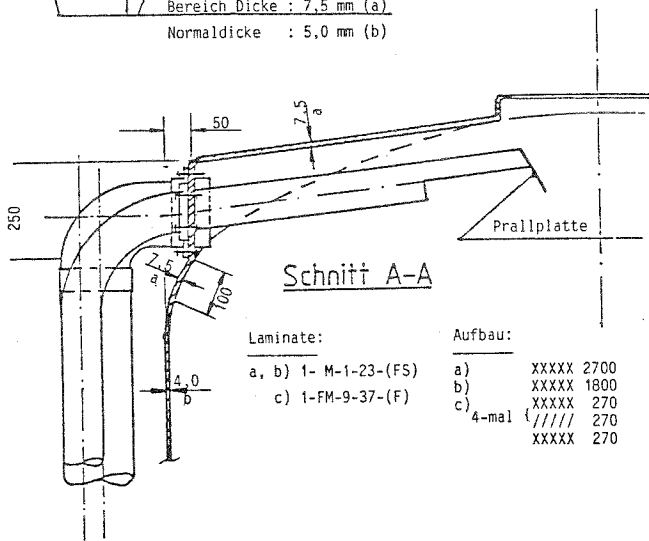


Bild 32

Anschlußausführung von Befüll- und Entlüftungsrohr nach /72/



Bereich Dicke : 7,5 mm (a)  
Normaldicke : 5,0 mm (b)

Laminat:	Aufbau:
a, b) 1- M-1-23-(FS)	a) XXXXX 2700
c) 1-FM-9-37-(F)	b) XXXXX 1800
	c) XXXXX 270
	4-mal { / / / / 270
	XXXXX 270

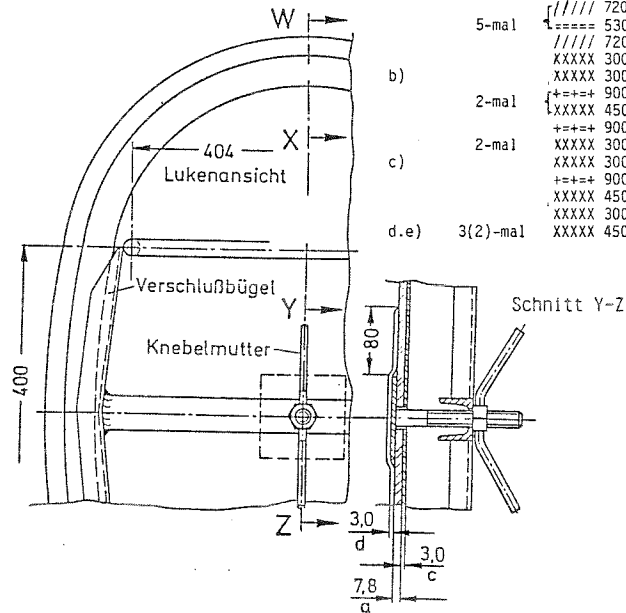
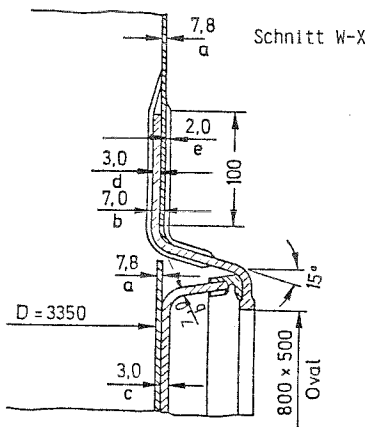
Typ: 10,3/33,5/100 (Gärfutter, Obenentnahme)  
z = 9600 mm

Laminat:

a) 0-FMU-13-50- (F)
b,c) 0- MW- 8(4)-47-(H)
d,e) 0- M- 3(2)-30-(H)

Aufbau:

a)	XXXXX 300
	{ / / / / 720
5-mal	{ ===== 530 (1:18)
	{ / / / / 720
	XXXXX 300
b)	XXXXX 300
2-mal	{ + + + + 900 (1:1)
	{ XXXXX 450
	+ + + + 900 (1:1)
c)	XXXXX 300
	XXXXX 300
	+ + + + 900 (1:1)
	XXXXX 450
d,e)	3(2)-mal XXXXX 300
	XXXXX 450



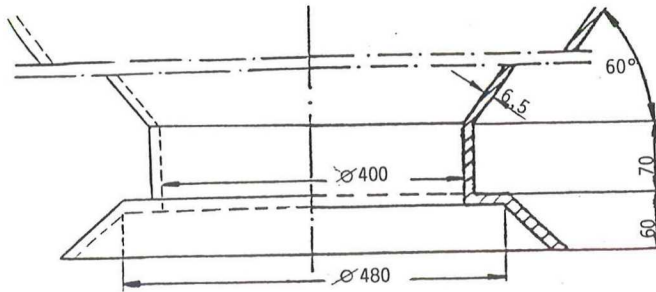
Typ: 10,3/33,5/100  
(Gärfutter, Obenentnahme)  
z = 9600 mm

Bild 33 Luke (Entleerungsöffnung) mit Lukendeckel eines Gärfuttersilos nach /10/

Am Trichterauslauf wird i.A. ein umlaufender Flansch mitangeformt zur Befestigung von Vorrichtungen zum Verschließen oder zur Entnahme und Weitertransport des Schüttguts (Bilder 34 und 35). Bei Silos, die im Freien aufgestellt werden, wird eine Regenschutzhaube anlamiert.

Die Verbindung Dach/Zylinder ist relativ gering beansprucht, maßgeblich für die Laminatdicken des Daches ist im Normalfall die Beulbeanspruchung durch die Schneelast. Die Art der Verbindung zwischen den bis auf wenige Ausnahmen (Bilder 12 und 23) getrennt nach unterschiedlichen Verfahren (siehe Abschnitt 4) hergestellten Bauteilen Dach und Zylinder wird daher nach konstruktiven und produktionstechnischen Gründen gewählt. In Bild 36 sind typische Beispiele von geklebten bzw. laminierten Verbindungen zusammengestellt. Das Dach wird mit einem durchgehend laminierten zylindrischen Bund in den Zylinder eingeschoben (Bild 36a), mit oder ohne Bundversatz außen aufgeschoben (Bild 36b) oder stumpf gestoßen (Bild 36c, d, e) und mindestens außen umlaufend überlaminiert. Auf die statisch günstigere Aufteilung des Überlaminates in Außen- und Innenseite (Bild 36d) wird gegen der geringen Beanspruchung und der ungünstigen Arbeitsbedingungen im Behälter normalerweise verzichtet. Die Keilnut-Verbindung (Bild 36e) begünstigt die paßgerechte Montage der Füge-teile ebenso wie Nut-Feder-Verklebung (36f), in beiden Fällen ist jedoch ein höherer Aufwand bei der Herstellung der Formteile notwendig. Bei der geschäfteten Verbindung wird das zusätzliche Überlaminat eingespart. Je nach Verfahren (siehe Abschnitte 4.5 und 4.6) wird der konisch geschäftete, zylindrische Bund des Dachbauteils, das vorher in oder auf die Zylinderform geschoben wurde, bei der Herstellung des Zylinders durch Aufschleudern (Bild 36g) oder Aufwickeln (Bild 36h) anlamiert. Schraubanschlüsse zwischen Dach und Zylinder wurden nur bei Gärfuttersilos eingesetzt, bei denen auch der Zylinder aus miteinander verschraubten Einzelsegmenten bestand. Die Befestigung von Bühne und Geländer wurde dabei konstruktiv eingeschlossen (Bild 37).

Typ: 6/28/60



Laminat:  
1-M-1-34-(FS)

Aufbau:  
XXXXX 3250

Bild 34

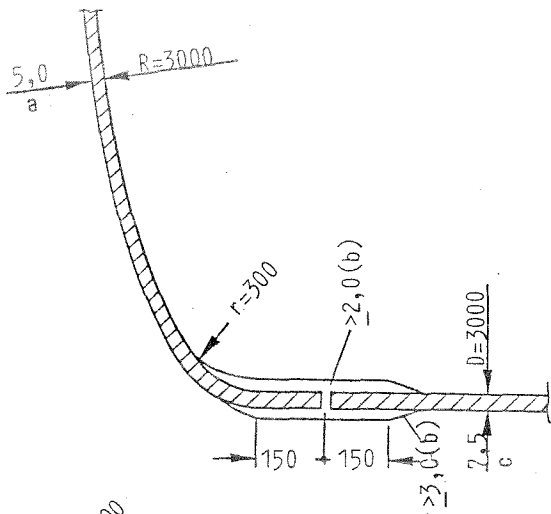
Querschnitt eines Trichter-  
auslaufs nach /66/ mit An-  
schlußflansch und Regen-  
schutz



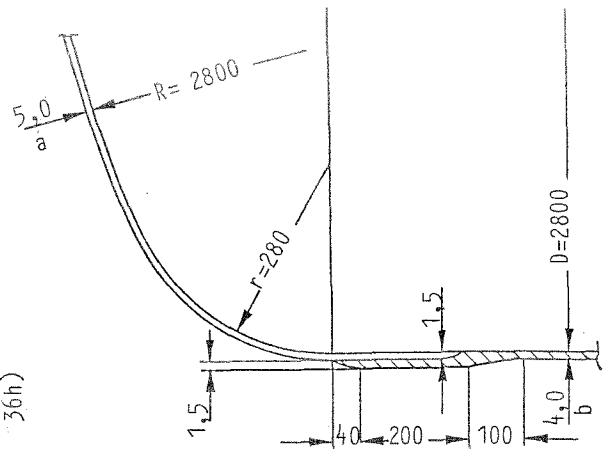
Bild 35

Trichterauslauf mit ange-  
schlossener Entnahmevor-  
richtung nach /66/

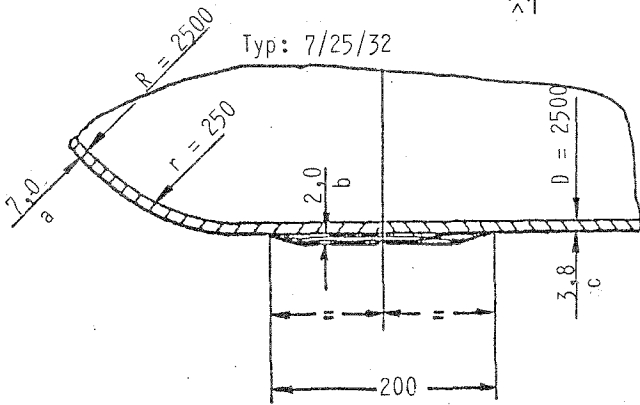
36d)



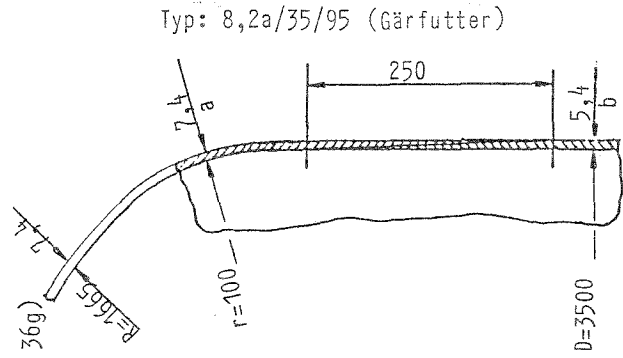
36h)



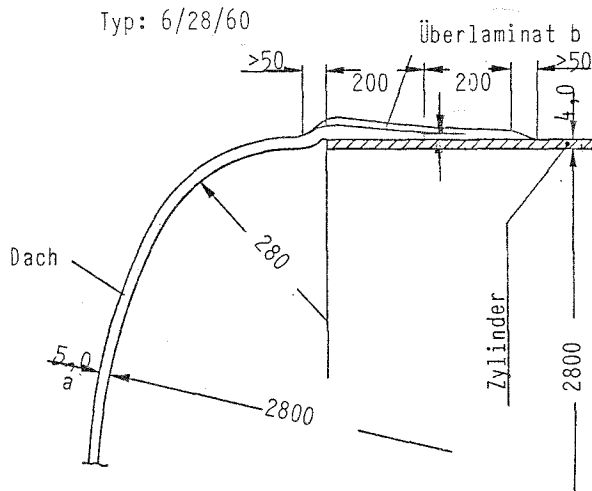
36c)



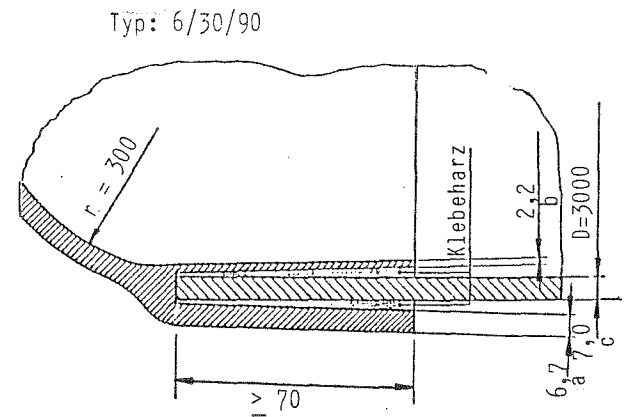
36g)



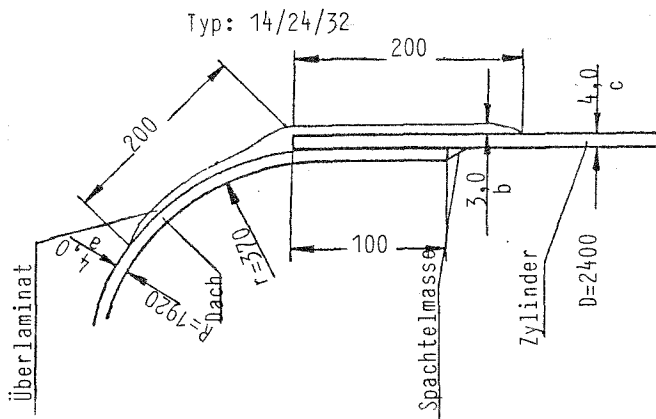
36b)



36f)



36a)



36e)

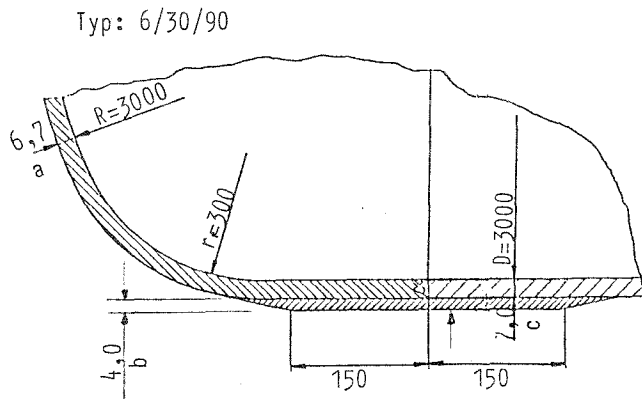


Bild 36 Laminierte bzw. geklebte Verbindungen Dach/Zylinder. Typische Beispiele nach /11/(a), /66/(b), /41/(c), /73/(d), /65/(e, f), /74/(g) und /75/(h)

36a) Typ: 14/24/32

Laminat:

- a) 1- MW- 4-36-B-(NP)
- b) 1- M - 3-30-B-(H)
- c) 1-FMU-11-49-B-(F)

Aufbau:

- a) XXXXX 450  
 +=+=-970 (1 : 1)  
 2-mal XXXXX 450
- b) 3-mal XXXXX 450
- c) 3-mal { XXXXX 150  
 ///// 480  
 ===== 600 (1 : 18)  
 ///// 480  
 XXXXX 150

36b) Typ: 6/28/60

Laminat:

- a) 1- M-1-34-(FS)
- b) 1- M-5-30-(H)
- c) 1-FM-9-30-(F)

Aufbau:

- a) XXXXX 2650
- b) 5-mal XXXXX 450
- c) 4-mal { XXXXX 360  
 ///// 120  
 XXXXX 360

36c) Typ: 7/25/32

Laminat:

- a) 1- M -1-34-B-(NP)
- b) 1- MU-3-53-B-(F)
- c) 1-FMU-7-59-B-(F)

Aufbau:

- a) XXXXX 3600
- b) XXXXX 450  
 ===== 500 (1 : 18)  
 XXXXX 450
- c) 2-mal { XXXXX 225  
 ///// 1000  
 ===== 500 (1 : 18)  
 ///// 1000  
 XXXXX 225

36d) Typ: 6/30/100

Laminat:

- a) 1- M- 1-40-(FS)
- b) 1- M- 3(2)-30-(H)
- c) 1-FM-23-58-(F)

Aufbau:

- a) XXXXX 3150
- b) 3(2)-mal XXXXX 450
- c) 11-mal { XXXXX 200  
 ///// 480  
 XXXXX 200

36e) Typ: 6/30/90

Laminat:

- a) 1- M - 6-28-(J)
- b) 1- MU- 4-35-(H)
- c) 1-FMU-19-56-(F)

Aufbau:

- a) 6-mal XXXXX 450
- b) XXXXX 450  
 ===== 500 (1 : 18)  
 XXXXX 450  
 XXXXX 300
- c) XXXXX 300  
 ///// 384  
 ===== 500 (1 : 18)  
 6-mal { XXXXX 300  
 ///// 384  
 XXXXX 300  
 ===== 500 (1 : 18)  
 ///// 384  
 XXXXX 300

36f) Typ: 6/30/90

Laminat:

- a,c) siehe Bild 36e
- b) 1-M-2-28-(J)

Aufbau:

- a,c) siehe Bild 36e
- b) 2-mal XXXXX 450

36g) Typ: 8,2a/35/95

Laminat:

- a) 0-M-1-31-(FS)
- b) 0-M-1-25-(S)

Aufbau:

- a) XXXXX 3300
- b) XXXXX 2000

36h) Typ: 6/28/60

Laminat:

- a) 1- M-1-28-(FS)
- b) 1-FM-3-30-(F)

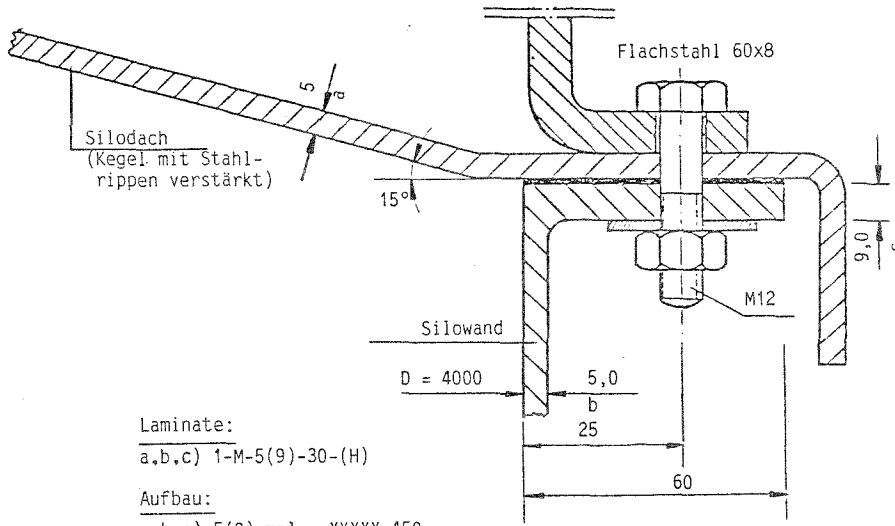
Aufbau:

- a) XXXXX 2200
- b) XXXXX 1200  
 ///// 280  
 XXXXX 300

zu Bild 36

37 a)

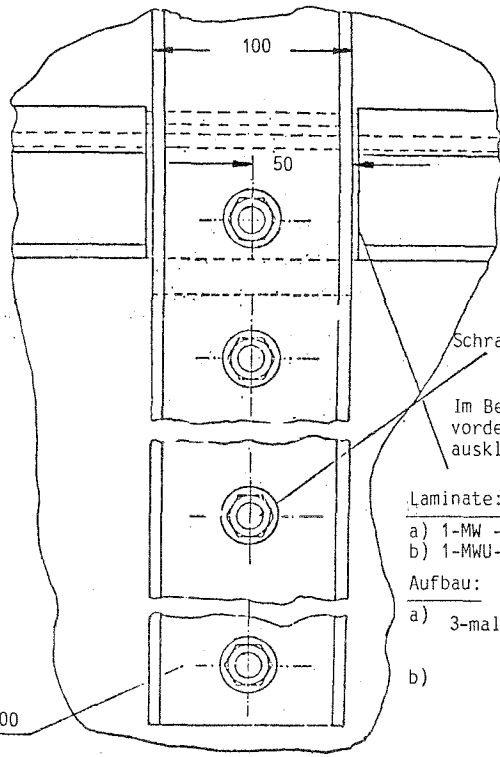
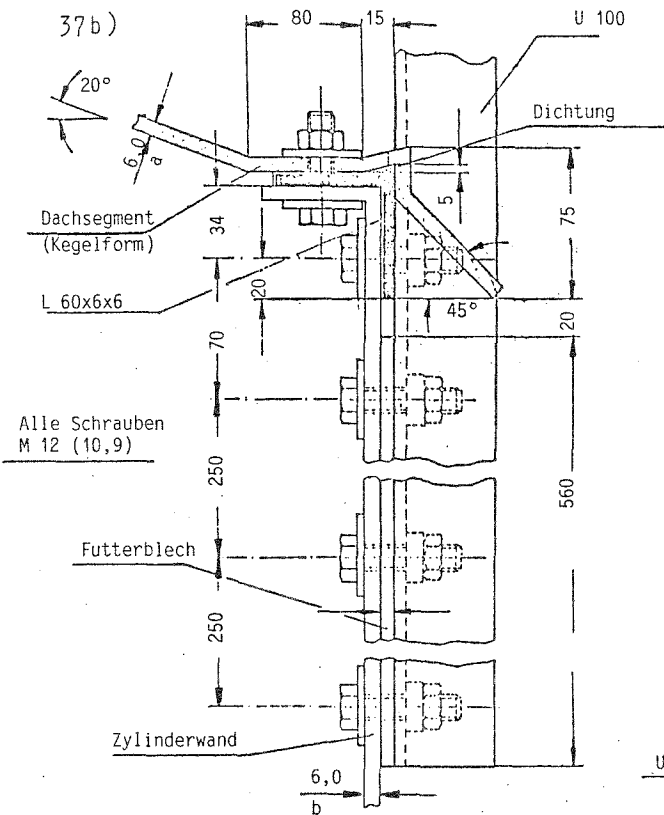
Typ: 8,2a/40/100  
(Gärfuttersilo)



Laminate:  
a,b,c) 1-M-5(9)-30-(H)  
Aufbau:  
a,b,c) 5(9)-mal XXXXX 450

37 b)

Typ: 10,3/50/250 (Gärfuttersilo)



Laminate:  
a) 1-MW -7-35-B-(H)  
b) 1-MWU-7-33-B-(H,J)  
Aufbau:  
a) 3-mal { XXXXX 450  
          +==+ 970 (1 : 1)  
          XXXXX 450  
          XXXXX 450  
          +==+ 970 (1 : 1)  
          XXXXX 450  
          ===== 600 (1 : 18)  
          XXXXX 450  
          +==+ 970 (1 : 1)  
          XXXXX 450

Bild 37 Schraubverbindungen Dach/Zylinder nach /67/(a) und /39/(b)

Verbindungen Zylinder/Zylinder werden im Normalfall nur notwendig, wenn der in einer Produktionsstätte vorhandene Wickelkern (siehe 4.6) nicht lang genug ist, um den Behälter in ganzer Länge durchgehend zu fertigen. Die Schüsse werden stumpf gestoßen und überlaminiert, das innere Überlaminat hat dabei zum Teil keine statische Funktion (Bild 38).

Vertikale Verbindungen von Zylindersegmenten wurden bisher mit wenigen Ausnahmen nur bei Gärfutterbehältern ausgeführt, bei denen um größere Durchmesser zu erreichen, als aus Transportgründen möglich ist, vorgefertigte Einzelteile montiert und miteinander verschraubt wurden (Bild 39). Laminiert wurden bisher solche Segmentstöße nur bei Silos nach Bild 22 und 23, bei denen zwei Silohälften mit symmetrischen Überlaminaten innen und außen verbunden werden (Bild 40).

Der Übergang Zylinder/Trichter wurde bisher in vielfältigster Weise konstruiert. Selten sind Ausführungen, bei denen Zylinder und Trichter durchgehend laminiert werden (Bild 41 und 59). Meist werden Sie getrennt in unterschiedlichen Verfahren hergestellt und miteinander verbunden. Nach dem Fügeverfahren können unterschieden werden: Konstruktionen, bei denen Trichter vergleichbar der geschäfteten Verbindung Dach/Zylinder (Bild 36h) bei der Herstellung des Zylinders angebunden wird (Bilder 42, 43 und 44).

Der Trichter wird mit oder ohne zylindrischen Bund in den Zylinder eingeschoben und im Fügebereich innen überlaminiert (Bilder 45, 46 und 47), wobei der Zwickel zwischen Zylinder und Trichter mit einer faserverstärkten Masse (Bild 47) oder Reaktionsharzbeton (Bild 46) ausgefüllt wird oder auch frei bleibt (Bild 45).

Lösungen entsprechend den Bildern 48 und 49, bei denen die relativ dünnen Überlamine innen bzw. außen nur optische oder dichtende Funktion haben, wurden ebenso wie die Konstruktionen der Bilder 47, 50 und 51 nur über Bauteilversuche nachgewiesen, sie werden mit Ausnahme der Konstruktion nach Bild 47 nicht mehr ausgeführt (siehe auch Bilder 1, 9 und 10).



38a)

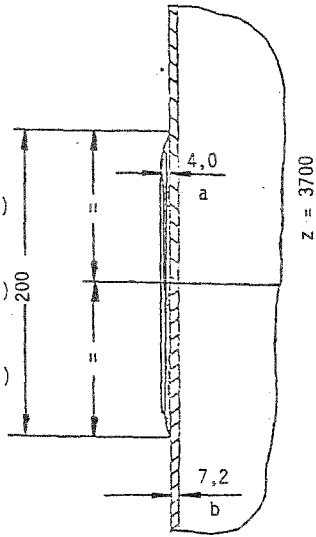
Typ: 17/30/100

Laminat:

- a) 1- MU- 6-53-B-(F)
- b) 1-FMU-13-59-B-(F)

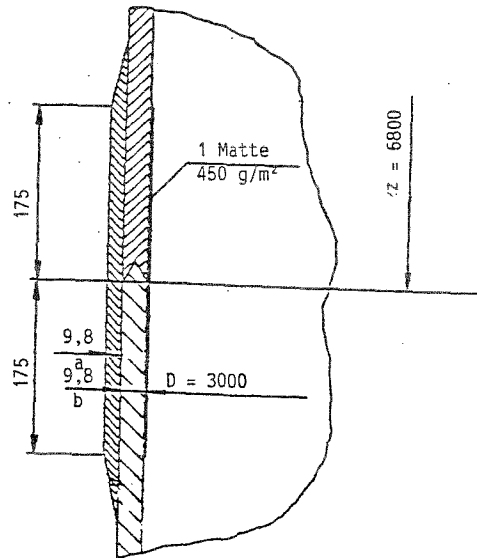
Aufbau:

- a)
  - XXXXX 450
  - ===== 500 (1:18)
  - XXXXX 450
  - XXXXX 225
- b)
  - ////// 1000
  - ===== 500 (1:18)
  - ////// 1000
  - XXXXX 450
  - ////// 1000
  - ===== 500 (1:18)
  - ////// 1000
  - XXXXX 225



38b)

Typ: 17/30/80



Laminat:

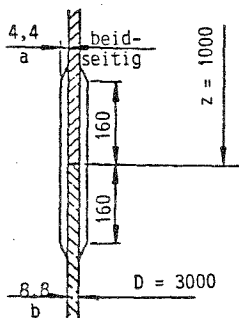
- a) 1- M -13-39-(H)
- b) 1-FMU-27-55-(F)

Aufbau:

- a) 13-mal
  - XXXXX 450
  - XXXXX 300
  - ////// 384
  - ===== 500 (1:18)
- b) 10-mal
  - XXXXX 300
  - ////// 384
  - XXXXX 300
  - ===== 500 (1:18)
  - ////// 384
  - XXXXX 300

38c)

Typ: 17/30/80



Laminat:

- a) 1- M- 5-30-(H)
- b) 1-FM-27-58-(F)

Aufbau:

- a) 4-mal
  - XXXXX 450
  - XXXXX 225
- b) 13-mal
  - XXXXX 200
  - ////// 480
  - XXXXX 200

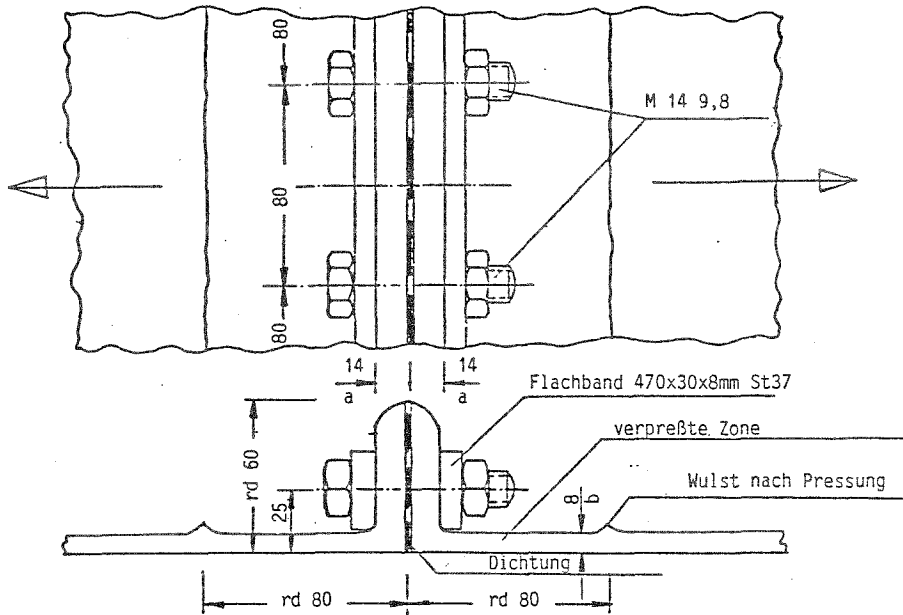
Bild 38

Laminierte Verbindungen  
Zylinder/Zylinder nach /41/(a),  
/65/(b) und /73/(c)

39a)

Typ: 8,2a/40/100 (Gärfuttersilo)

Segmentverbindung



Laminat:

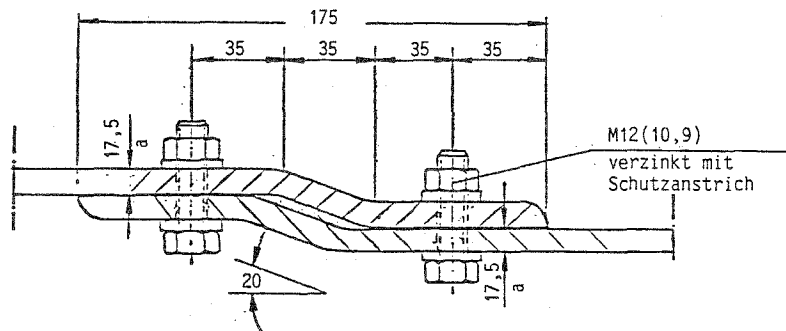
- a) 1-M-17-35-(H)
- b) 1-M- 9-33-(H)

Aufbau:

- a,b) 17(9)-mal XXXX 450

39b)

Typ: 10,3/50/250  
(Gärfuttersilo)



Laminatdicke und -aufbau auf 400 mm Breite und ganzer Zylinderhöhe.  
Schraubenabstand  $a = 100$  mm bei  $z = 8100$  mm.

Laminat:

1-MW-17-40-B-(H,J)

Aufbau:

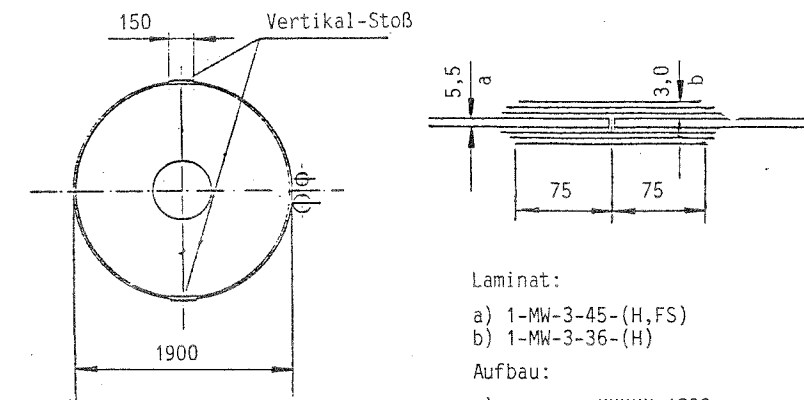
- 8-mal { XXXX 450
- +==+ 970 (1:1)
- XXXX 450

Bild 39 Vertikale Schraubverbindungen von Zylindersegmenten nach /67/(a) und /39/(b)

Typ: 12/19/12,5

Bild 40

Laminierte vertikale Verbindung von Zylindersegmenten nach /68/



Vertikalstoß am Behälter

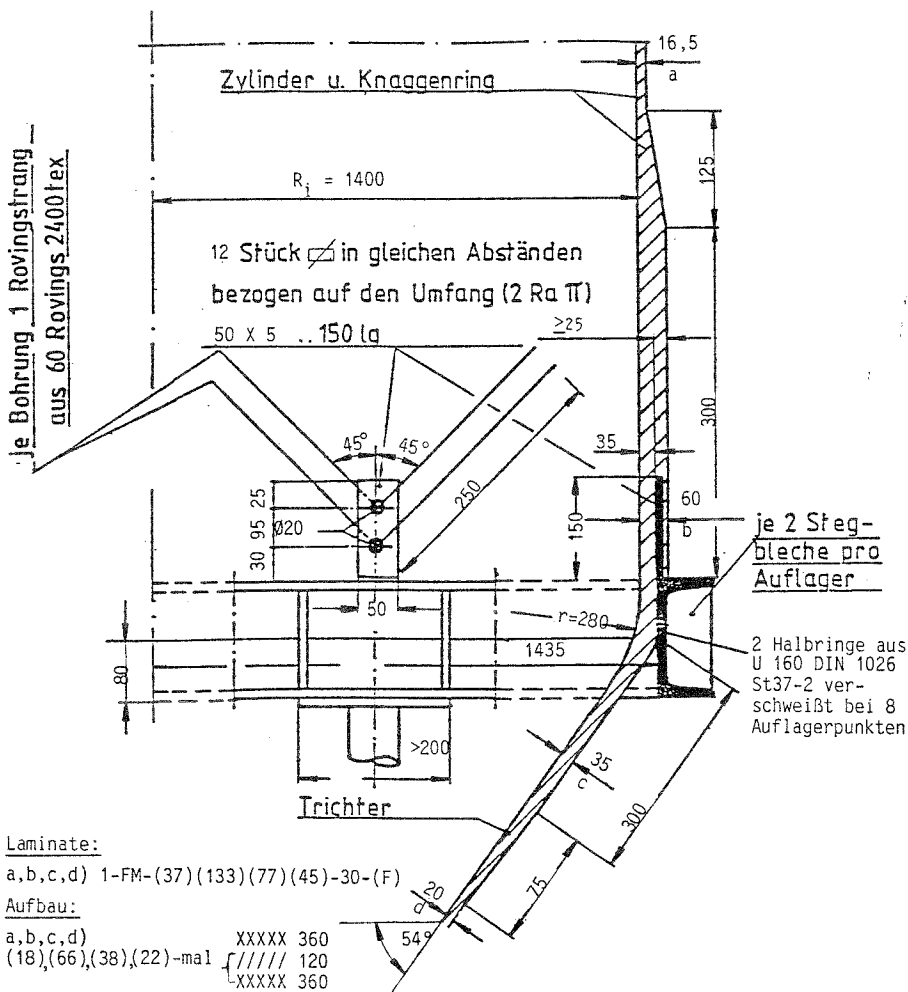
Laminat:

- a) 1-MW-3-45-(H,FS)
- b) 1-MW-3-36-(H)

Aufbau:

- a)
  - XXXXX 1200
  - + = + = + 800 (1 : 1)
  - XXXXX 1200
- b)
  - XXXXX 450
  - + = + = + 800 (1 : 1)
  - XXXXX 450

Typ: 18/28/60



Laminat:

- a, b, c, d) 1-FM-(37)(133)(77)(45)-30-(F)

Aufbau:

- a, b, c, d)
  - XXXXX 360
  - (18)(66)(38)(22)-ma1 {////// 120
  - XXXXX 360

Bild 41 Durchgehend laminiertes Übergang Zylinder/Trichter mit Stahlringauflagerung und einlaminierten Sogankerblechen nach /66/

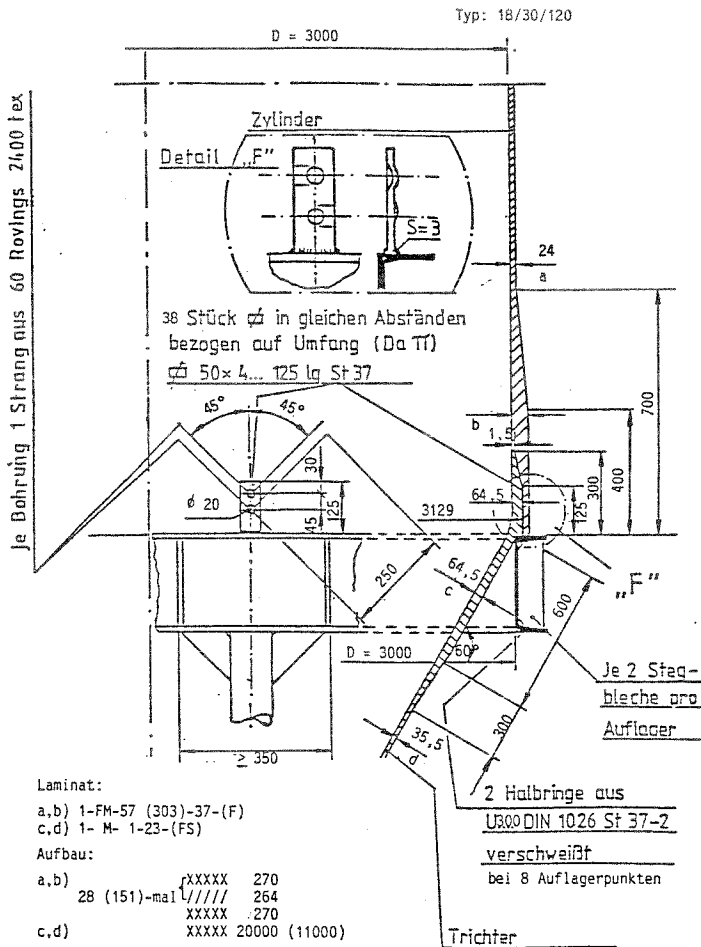
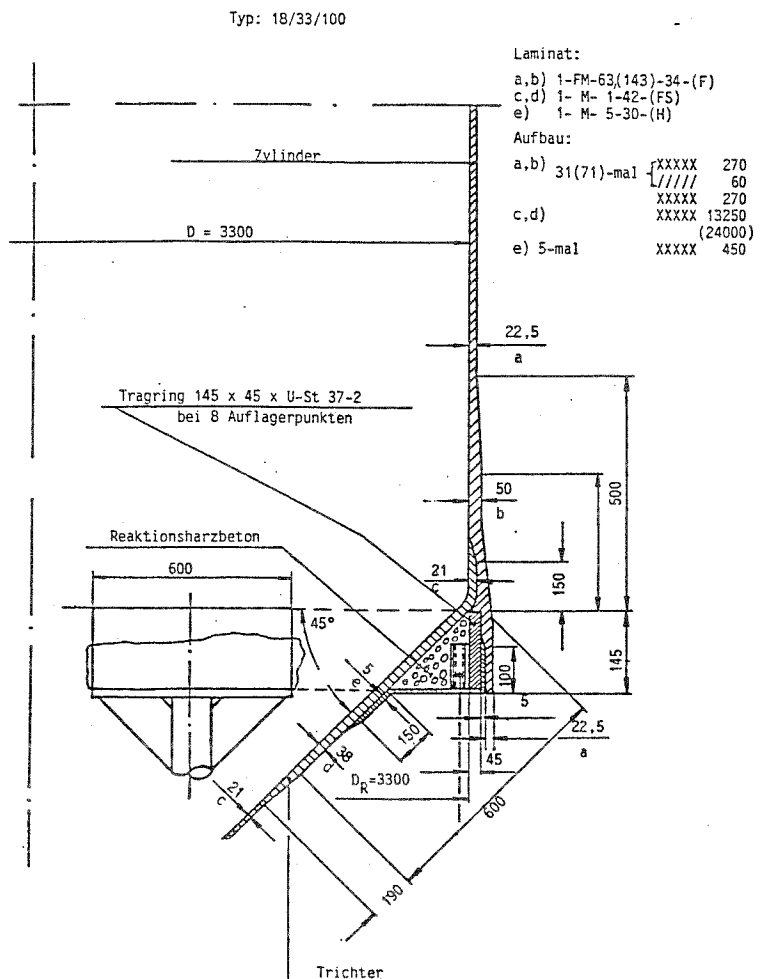


Bild 42

Geschäftete, überwickelte Verbindung Zylinder/Trichter mit Stahlringauflagerung und einlamierten Sogankerblechen nach /72/

Bild 43

Geschäftete, überwickelte Verbindung Zylinder/Trichter mit einlamiertem Stahlring nach /70/



Typ: 10/25/43

Lamine:

- a,b) 1-FMU-23(33)-50-B-(F)  
 c,d,e,f) 1- M-38(11)(9)(8)-32-B-(H)

Aufbau:

- a) 5-mal 

////	480
XXXXX	450
////	480
=====	500 (1:18)
////	480
XXXXX	450
////	480

  
 b) 8-mal 

////	480
XXXXX	450
////	480
XXXXX	450
////	480
=====	500 (1:18)
////	480

  
 c,d,e,f) 38,(11),(9),(8)-mal XXXXX 450

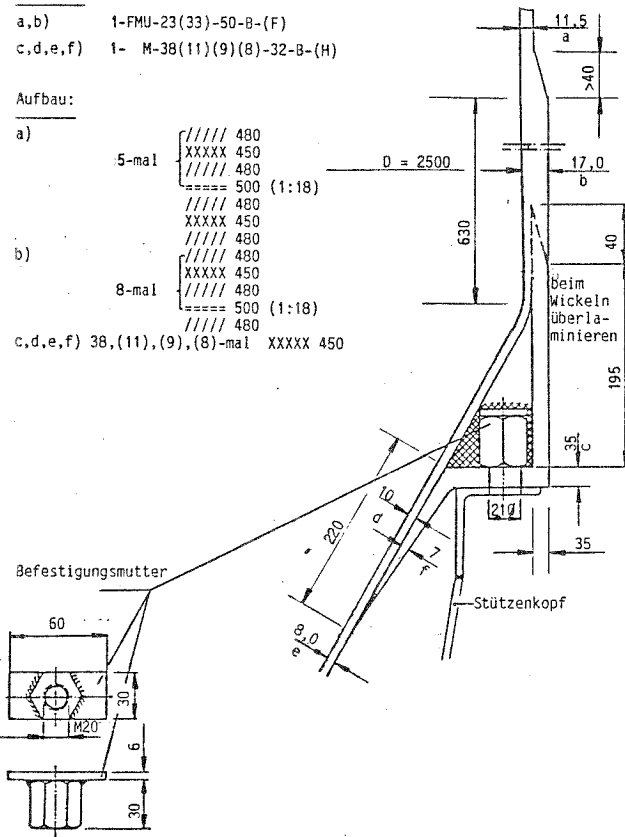
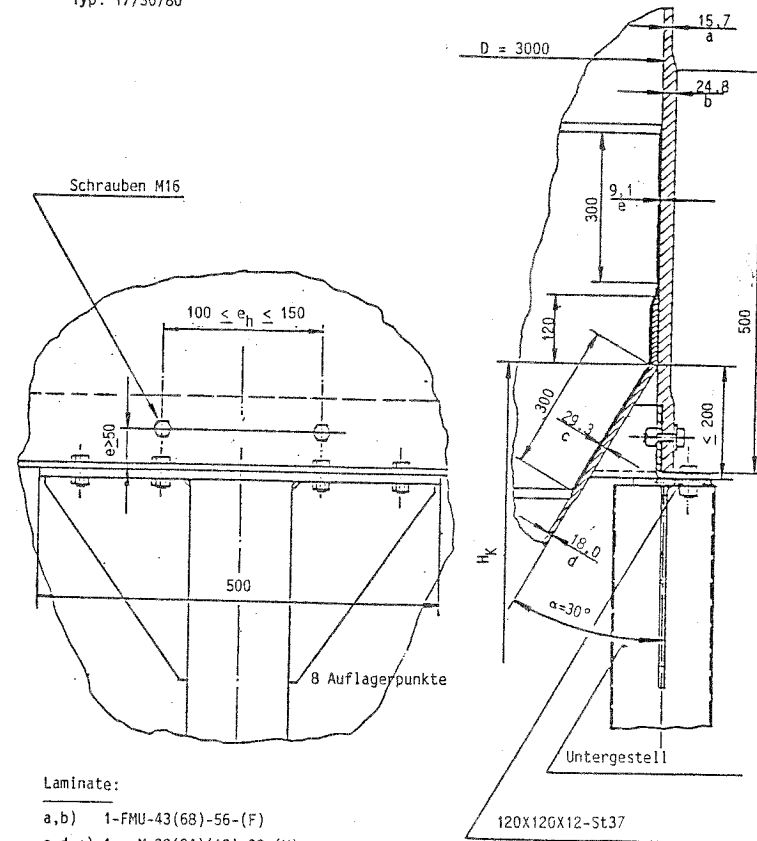


Bild 44 Geschäftete, überwickelte Verbindung Zylinder/Trichter mit einlamierten Ankerelementen nach /6/

Typ: 17/30/80



Lamine:

- a,b) 1-FMU-43(68)-56-(F)  
 c,d,e) 1- M-39(24)(12)-38-(H)

Aufbau:

- a,b) 2-mal 

XXXXX	300
////	384
=====	500 (1:18)

  
 30(55)-mal 

XXXXX	300
////	384
=====	500 (1:18)

  
 2-mal 

XXXXX	300
////	384
=====	500 (1:18)
XXXXX	300

  
 c,d,e) 39(24)(12)-mal XXXXX 450

Bild 45 Verbindung Zylinder/Trichter mit Überlaminat innen, Stahltragring und Schraubenschluß nach /65/

Typ: 6/30/100

Bild 46

Verbindung Zylinder/Trichter mit Überlaminat innen, Stahltragring und Schraubenschluß nach /73/

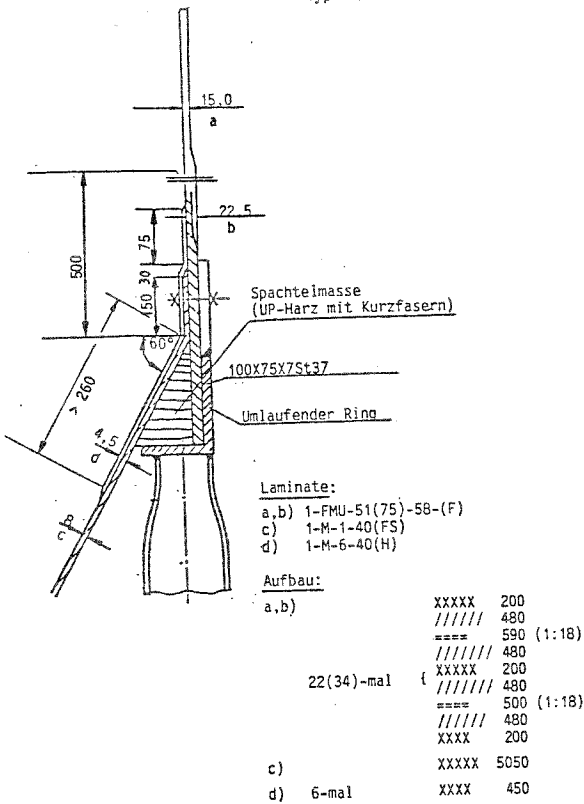


Bild 47

Verbindung Zylinder/Trichter mit Überlaminat innen, Auflager aus Stahlringsegment und Schraubenschluß nach /71/

Typ: 14/34/100

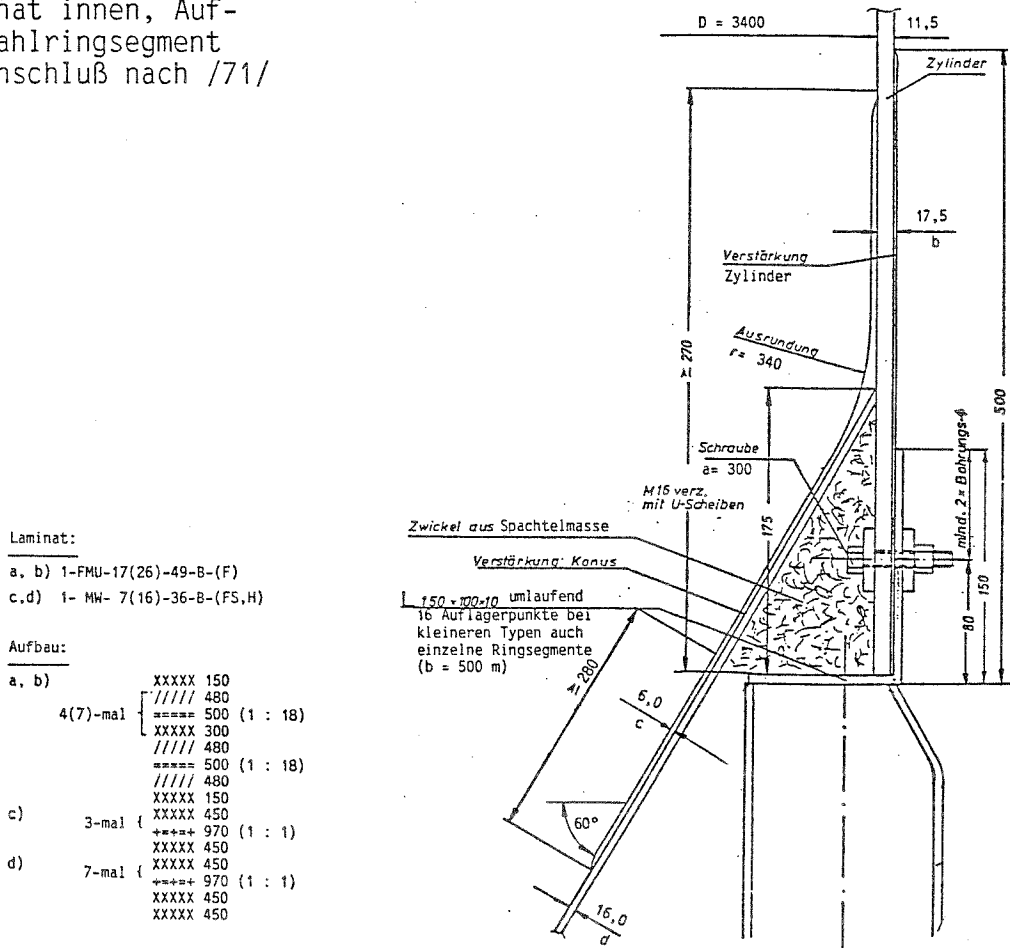
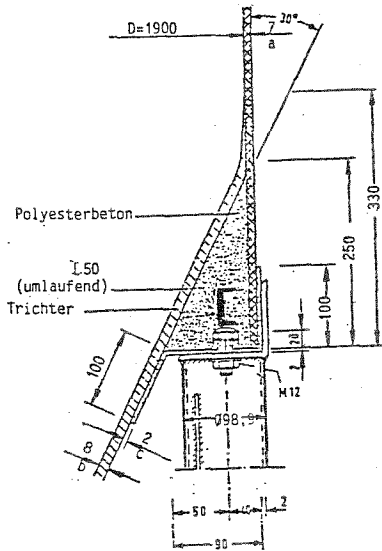
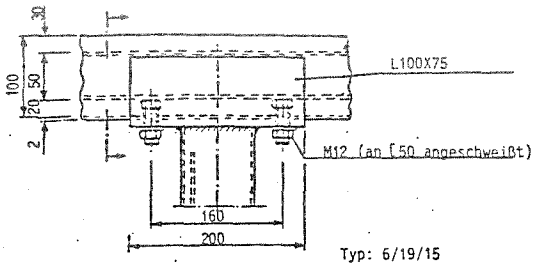


Bild 48

Verbindung Zylinder/Trichter mit in Reaktionsharzbeton eingegossenem Stahling nach /40/



Laminat:

- a) 1-FM-15-30-(F)
- b) 1-MW- 3-34-(FS,H)
- c) 1-M - 2-30-(H)

Aufbau:

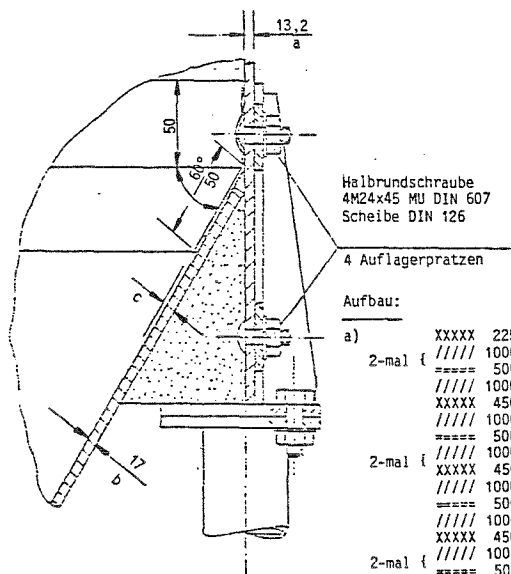
- a) 7-mal {
 

XXXXX	360
////	120
XXXXX	360
XXXXX	500
++++	600 (1 : 1)
XXXXX	3000
XXXXX	450
- b)
- c) 2-mal XXXXX 450

Bild 49

Verbindung Zylinder/Trichter mit Einzelstützung und Schraubverankerung nach /41/

Typ: 17/30/100



Halbrundschaube  
4M24x45 MU DIN 607  
Scheibe DIN 126

4 Auflagerpratzen

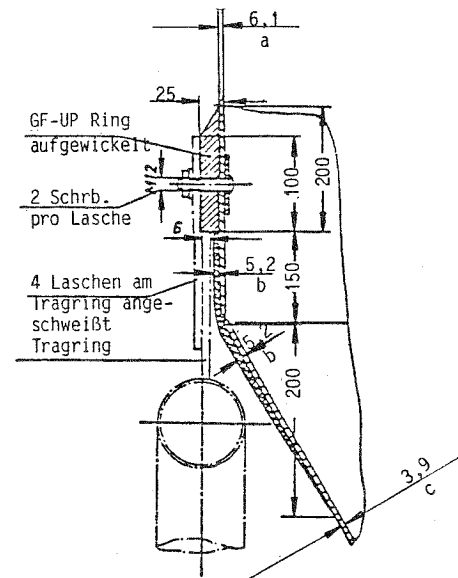
Aufbau:

- a)
 

XXXXX	225
2-mal {	//// 1000
	==== 500 (1 : 18)
	//// 1000
	XXXXX 450
	//// 1000
	==== 500 (1 : 18)
2-mal {	//// 1000
	XXXXX 450
	//// 1000
	==== 500 (1 : 18)
	//// 1000
	XXXXX 450
2-mal {	//// 1000
	==== 500 (1 : 18)
	//// 1000
	XXXXX 225
b)	XXXXX 8700
c) 2-mal	XXXXX 450

Laminat:

- a) 1-FMU-23-63-B(F)
- b) 1-M - 1-34-B(FS)
- c) 1-M - 2-30-B(H)



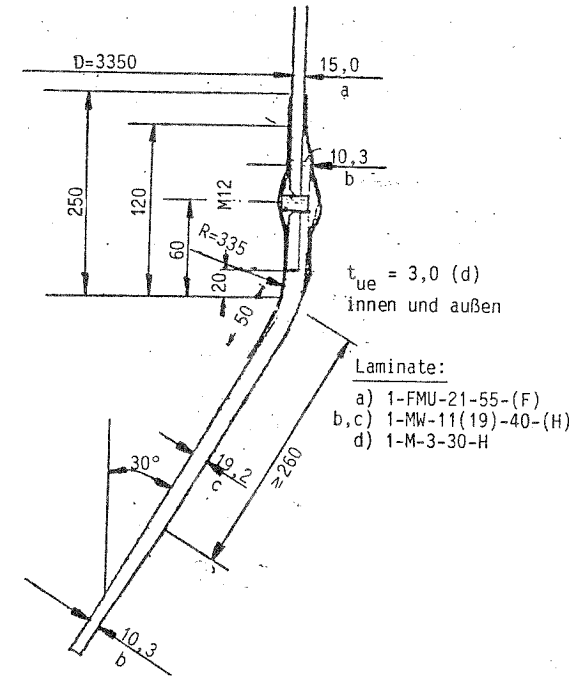
Laminat:

- a) 1-FMU-11-55-(F)
- b) 1-M - 1-30-(FS)

Aufbau:

- a) XXXXX 225
- ///// 1000
- ===== 500 (1:18)
- ///// 1000
- XXXXX 225
- ///// 1000
- XXXXX 225
- ///// 1000
- ===== 500 (1:18)
- ///// 1000
- XXXXX 225
- b,c) XXXXX 2350 (1750)

Bild 50 Verbindung Zylinder/Trichter mit Stahltragring, angewickeltem Knaggenring und Schraubverankerung nach /8/



Aufbau:

- a) XXXX 300
- 9-mal { ///// 880
- === 530 (1:18)
- ///// 880
- XXXX 300
- b,c) XXXX 450
- 5(9)-mal { +=+= 900 (1:1)
- XXXX 450
- d) 3-mal XXXX 450

Bild 51 Verbindung Zylinder/Trichter nach /76/



Lösbare Schraubverbindungen über anlamierte Flansche wurden nur mit einem umlaufenden Tragglied (Auflagerring, Bild 52 oder Standzarge, Bild 53) ausgeführt, wobei der Trichter auch aus Stahl hergestellt wurde (Bild 53).

Der Anschluß an die Unterkonstruktion wird im Normalfall im Übergangsbereich Zylinder/Trichter angeordnet. Der Silobehälter wird oft auf einem umlaufenden Stahlring aufgelagert, der außen am Zylinder mit Knagge angeordnet ist (Bilder 41, 42, 50, 52, 53 und 54), zum Teil am standzargenartig über die Trichteranbindung hinaus verlängerten Zylinder (Bilder 45, 46 und 47) oder am Trichter (Bild 55), aber auch eingegossen bzw. einlamiert sein kann (Bilder 43, 48 und 56). Bei Einzelstützungen werden Ringsegmente (Bilder 44, 47 und 57) oder Pratten (Bilder 49 und 58) unter dem verlängerten Zylindermantel vorgesehen. Außen oberhalb des Trichters am Zylinder angeflanschte Stahlstützen werden selten und nur bei relativ kleinen Silos ausgeführt (Bilder 12 und 59).

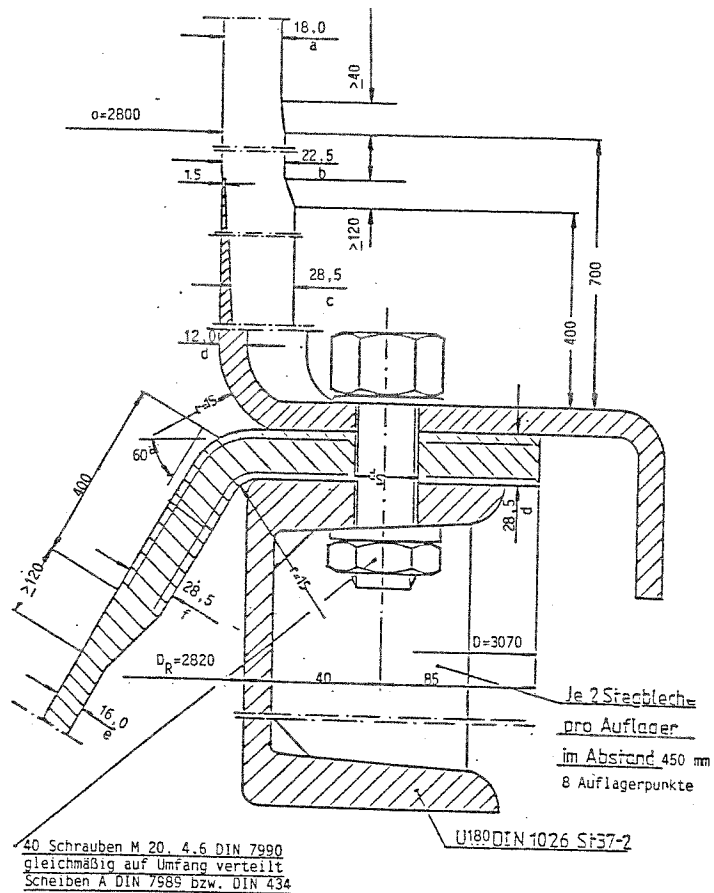
Gegen abhebende Kräfte werden die Behälter zum Teil durch Schraubverbindungen zwischen GF-UP-Zylinder und Stahllaschen oder Stahlring annähernd "stahlbaumäßig" verankert (Bilder 45, 46, 47, 49, 50, 55, 57, 58 und 59), wodurch teilweise zusätzlich Dichtlamine im Behälterinnern notwendig sind. Bei den Lösungen nach den Bildern 52 und 53 ist die Sogverankerung in die Verbindung Trichter/Zylinder integriert.

Das Eingießen oder Einlaminieren von Ankerelementen (Bilder 41, 42, 43, 44 und 48) kann demgegenüber eher als "kunststoffgemäß" bezeichnet werden.

Die sandwichartig aufgebauten Innenwände von Mehrkammersilos mit GF-UP-Deckschichten und Holzkern wurden symmetrisch ausgeführt und durch Überlamine mit der äußeren Zylinderwand und dem mittig angeordneten GF-UP-Rohr verbunden (Bild 60).

Die Fundamentverankerung von Gärfuttersilos wurde entweder an umlaufenden, durchgehend mit dem Behälter laminierten Ringflanschen, die aus schalenstatischen Gründen sowieso vorhanden waren (Bilder 61, 62 und 63) oder über einzelne außen anlamierte Ankerwinkel aus Stahl (Bild 64) vorgenommen, aber auch mit angeschraubten Stahlblechen, Kette und Spannschloß (Bild 65).

Typ: 18/28/60



Laminat:

- a,b,c) 1-FM- 6(6)(8)-30-(F)
- d,e) 1- M-1-28-(FS)
- f) 1-MW-5-30-(FS,H)

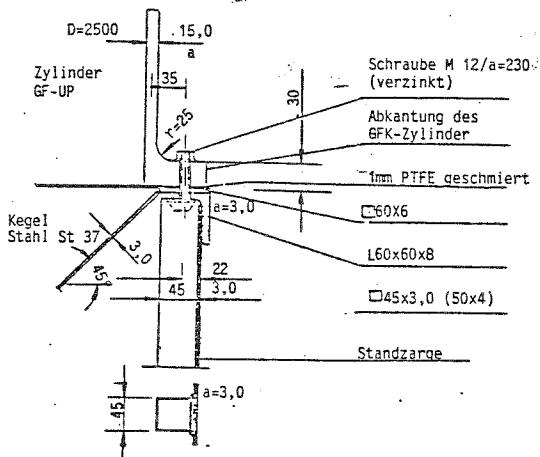
Aufbau:

- a) 2-mal {XXXXX 3400  
//////// 280  
XXXXX 680  
//////// 280
- b) 2-mal {XXXXX 3400  
//////// 280  
XXXXX 2700  
//////// 280
- c) 3-mal {XXXXX 3400  
//////// 280  
XXXXX 1800  
//////// 280
- d,e) XXXXX 4800 (6400)  
XXXXX 400
- f) +++++ 690 (1 : 1)  
XXXXX 9800  
+++++ 690 (1 : 1)  
XXXXX 400

Bild 52

Schraubverbindung zwischen Zylinder und Trichter über anlamierte Ringflansche auf Stahltragring

Typ: 6/25/45



Laminat:

1-FMU-28-50-B-(F)

Aufbau:

- ===== 500 (1:18)
- //////// 480
- ===== 500 (1:18)
- //////// 480
- 3-mal {+++++ 450  
//////// 480  
+++++ 450  
//////// 480
- ===== 500 (1:18)
- //////// 480
- XXXXX 450
- //////// 480
- ===== 500 (1:18)
- //////// 480
- ===== 500 (1:18)
- //////// 480

Bild 53

Schraubverbindung zwischen GF-UP-Zylinder und Stahltrichter auf Stahlstandzarge nach /77/



Bild 54 Auflagerung auf Stahlring  
(Schnitt: Bild 41)

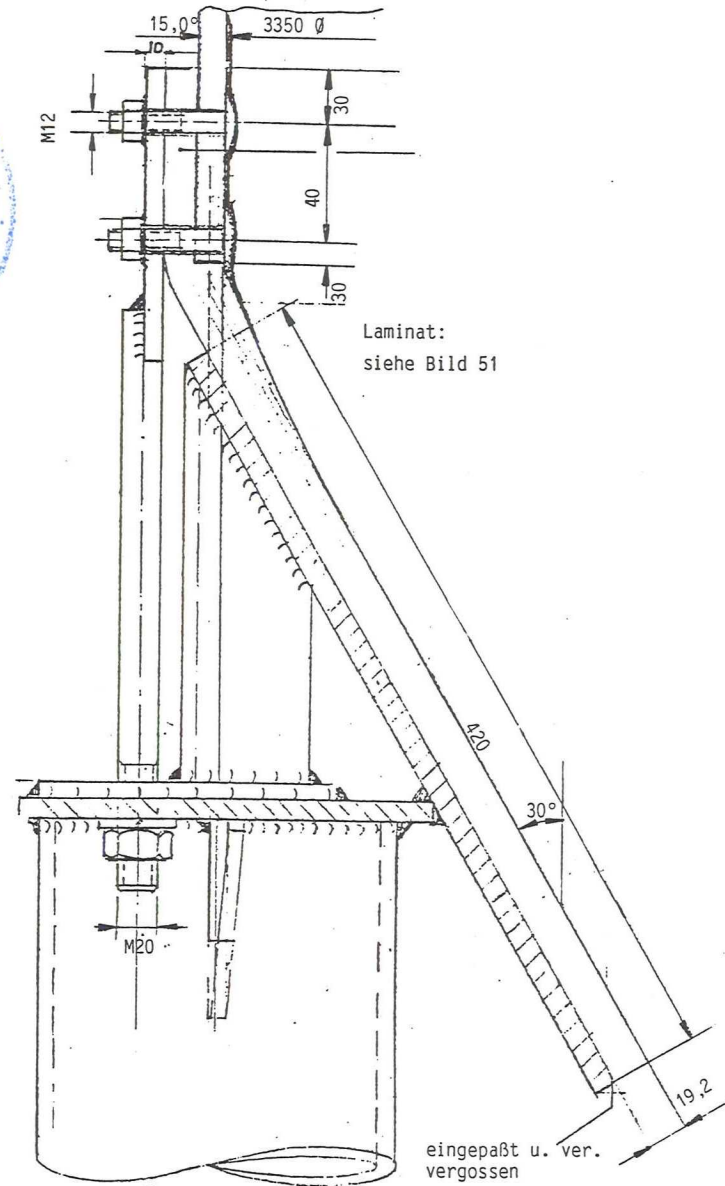


Bild 55 Auflagerung im Trichterbereich auf  
Stahlblechring nach /76/

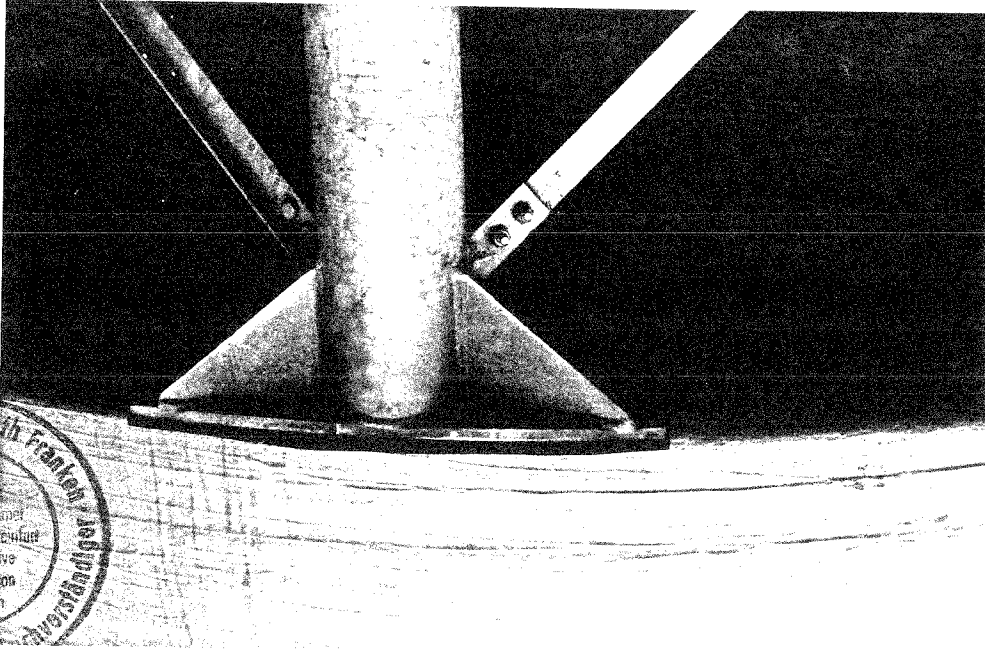


Bild 56 Auflagerung mit einlaminiertem Stahlring  
(Schnitt: Bild 43)

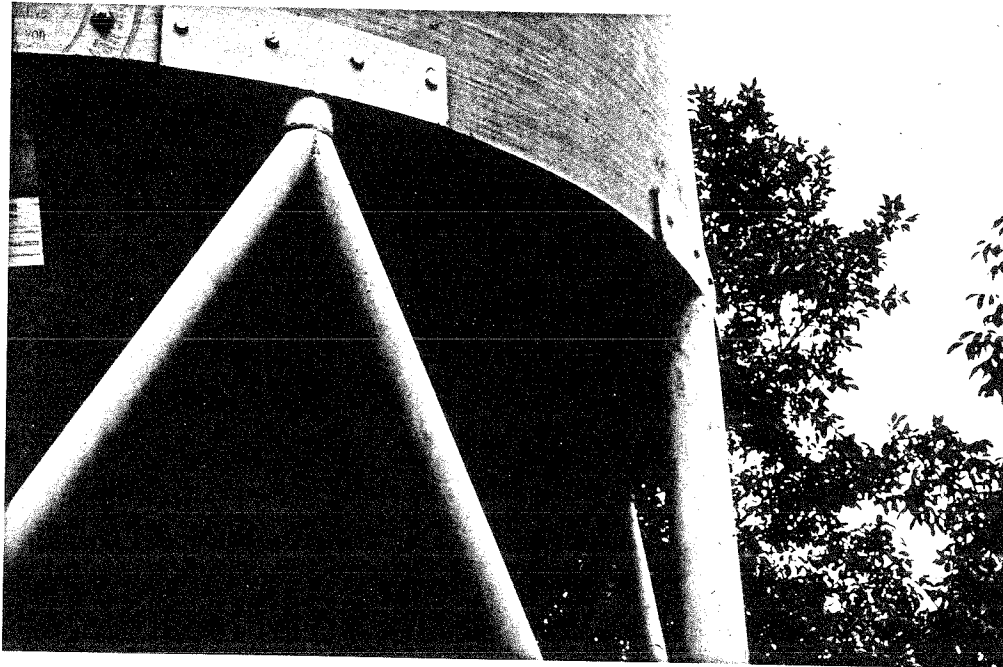


Bild 57 Auflagerung auf Ringsegmenten (Schnitt: Bild 47)

Typ: 6/25/25

Laminata c.d siehe Bild 21

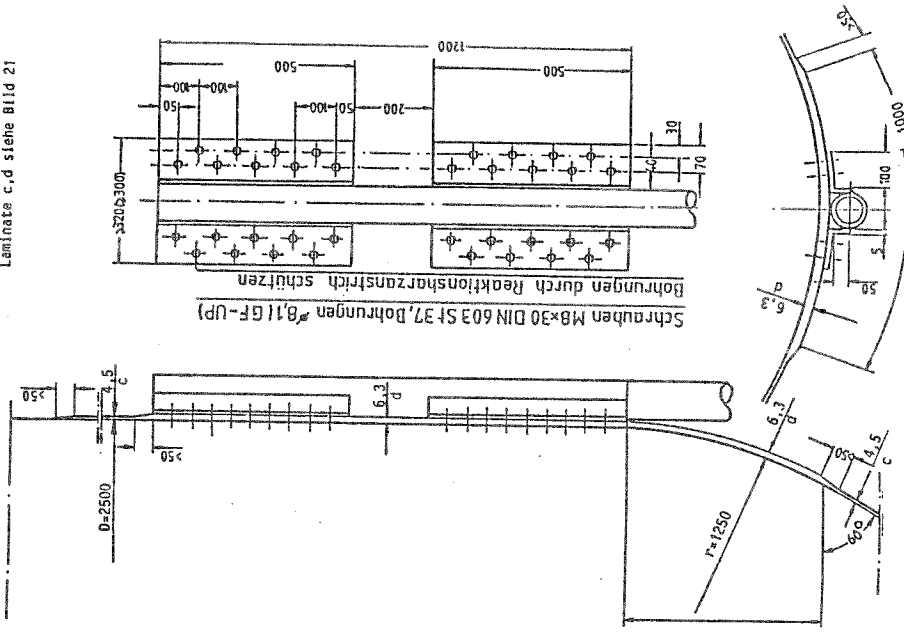


Bild 59 Auflagerung über am Zylinder angeschraubte Stahl-Flansche nach /43/

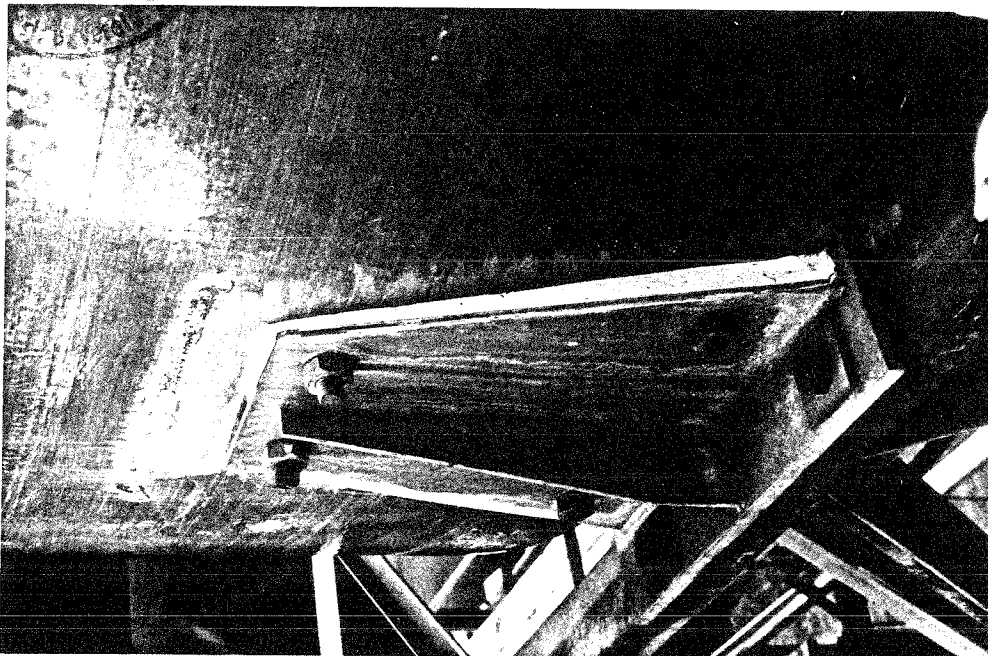
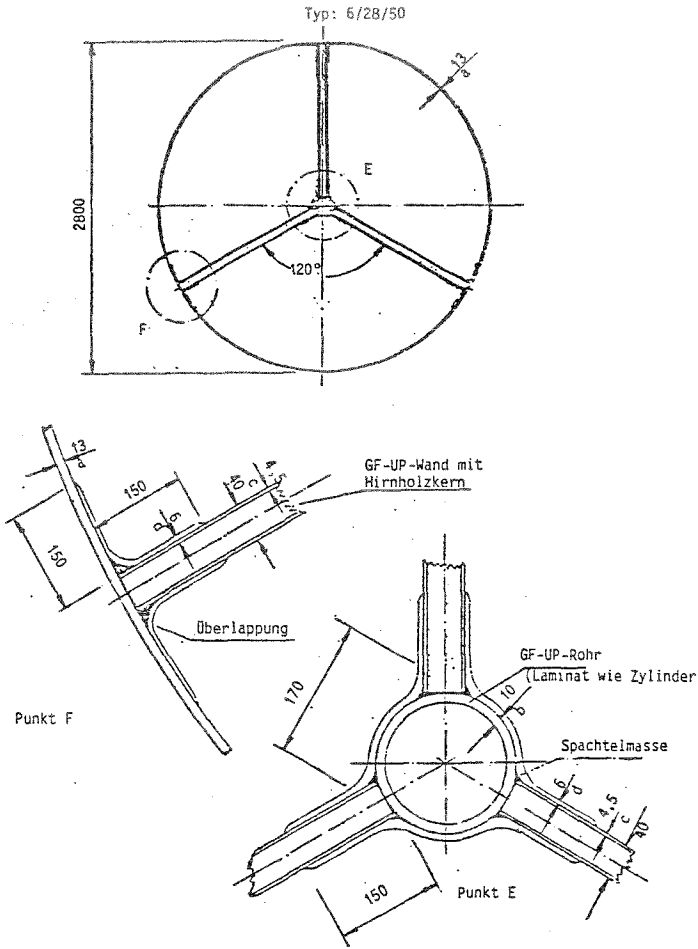


Bild 58 Einzelstützung mit Schraubverankerung (Schnitt: Bild 49)



Laminat:

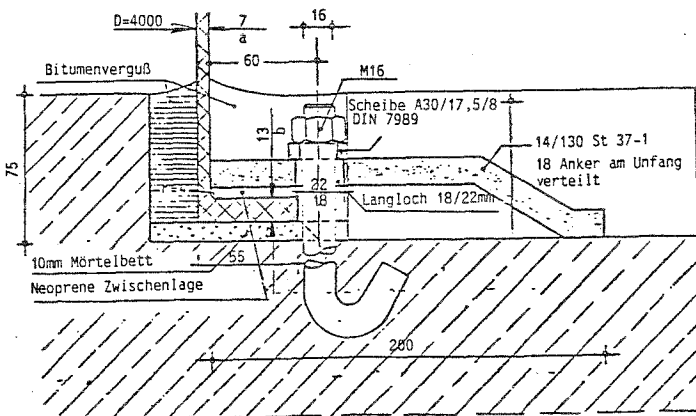
- a, b) 1-FMU-15(11)-58-B-(F)
- c, d) 1-MW-5(7)-36-B-(H)

Aufbau:

- a) 2-mal {
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - ===== 500 (1 : 18)
  - XXXXX 150
- 2-mal {
  - //// 480
  - ===== 500 (1 : 18)
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 300
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - ===== 500 (1 : 18)
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 450
  - ++++ 970 (1 : 1)
  - XXXXX 450
- b) {
  - XXXXX 300
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - ===== 500 (1 : 18)
  - XXXXX 300
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - ===== 500 (1 : 18)
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 450
  - ++++ 970 (1 : 1)
  - XXXXX 450
- c,d) 2(3)-mal {
  - XXXXX 300
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - ===== 500 (1 : 18)
  - XXXXX 300
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 300
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 300
  - XXXXX 300
  - //// 480
  - XXXXX 450
  - ++++ 970 (1 : 1)
  - XXXXX 450

Bild 60 Ausführung und Anbindung der Innenwände eines Mehrkammersilos nach /78/

Typ: 8,2a/40/100  
(Gärfuttersilo)



Laminat:

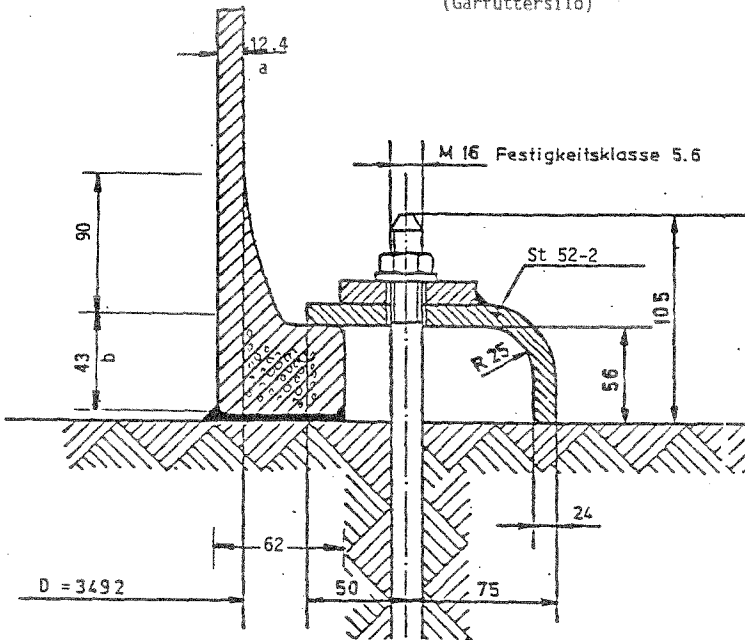
- a,b) 1-M-7(13)-29-(H)

Aufbau:

- a,b) 7(13)-mal XXXXX 450

Bild 61 Fundamentverankerung eines Gärfuttersilos mit durchgehend laminiertem Ringflansch nach /67/

Typ: 8,2a/35/95  
(Gärfuttersilo)



Laminat:

a,b) 0-M-1-30-(S)

Aufbau:

a) XXXXXXX 5500

b) Wie a, im Kern 25 % Masseanteil  
Quarzsand, Körnung: 3 bis 5 mm

Bild 62 Fundamentverankerung eines Gärfuttersilos mit durchgehend laminiertem Ringflansch nach /74/

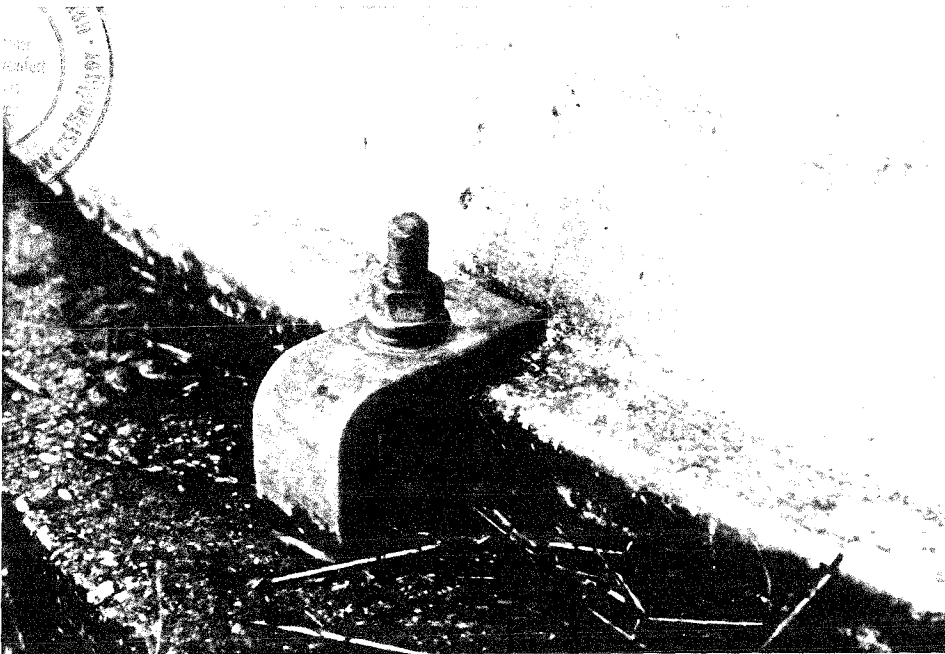
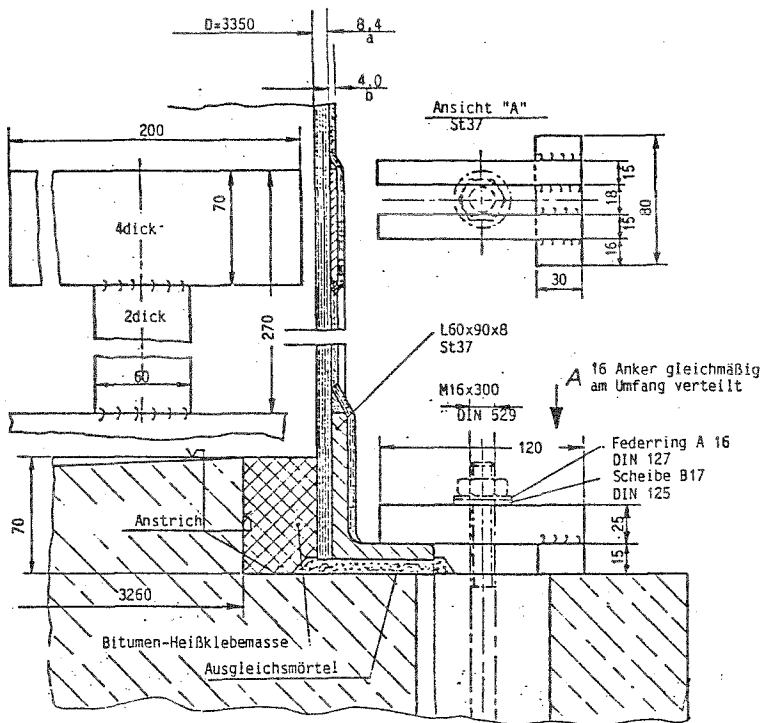


Bild 63 Fundamentverankerung (Schnitt: Bild 62)

Typ: 10,3/33,5/100  
(Gärfuttersilo, Untenentnahme)



Laminat:

- a) 0-FMU-14-50-(F)
- b) 0-MN-5-40-(H)

Aufbau:

a)	XXXXX	300	
3-mal	{ // // // // //	720	
	{ ====	530 (1:18)	
	{ // // // // //	720	
	{ // // // // //	720	
2-mal	{ ====	530 (1:18)	
	{ // // // // //	720	
	{ XXXX	300	
b) 2-mal	{ XXXXX	300	
	{ +++++	580 (1,1:1)	
	{ XXXXX	300	

Bild 64

Fundamentverankerung eines Gärfuttersilos mit anlamierten Stahlwinkeln nach /10/

Typ: 10,3/50/250 (Gärfuttersilo)

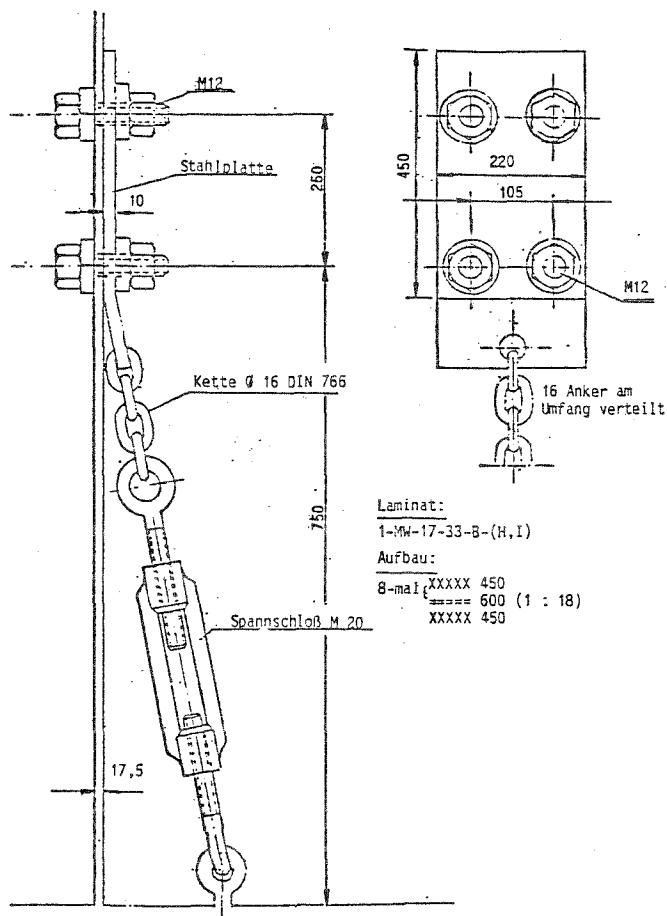


Bild 65

Fundamentverankerung eines Gärfuttersilos nach /39/

Laminat:

1-MW-17-33-B-(H,1)

Aufbau:

8-mal	XXXXX	450	
	{ ====	600 (1 : 18)	
	{ XXXXX	450	



GF-UP-Lamine sind schichtförmig aus den verschiedenen Lagen der Verstärkungswerkstoffe aufgebaute Baustoffe, die mit dem flüssigen Reaktionsharz, dem Zusatzstoff und Reaktionsmittel zugefügt wurden, getränkt werden.

### 3.1 Reaktionsharze

Ungesättigte Polyesterharze gehören zur Gruppe der Reaktionsharze, für die typisch ist, daß sie nach Formgebung in einem chemischen Vorgang aushärten. Das Grundharz besteht aus Glykolen und Dicarbonsäuren, die miteinander durch Polykondensation zu fadenförmigen Kettenmolekülen verbunden werden und normalerweise in monomerem Styrol gelöst sind. Durch Variation des Grundharzes, des Styrolmasseanteils und Zusätze lassen sich die Eigenschaften in einem weiten Bereich beeinflussen. Von den Harzen der Tabelle 3 nach /79/ sind für Schütt- und Gärfuttersilos die sogenannten Standardharze der Gruppe 1 ausreichend, für nur durch Eigengewicht, Schnee und Wind belastete Dächer und bei Temperaturen bis zu 40°C (z.B. im Erdreich und in Gebäuden) auch die Gruppe 0.

In /18 und 19/ wird gefordert: "Zu tragenden Zwecken dürfen nur solche Harze verwendet werden, deren Schubmodul bei Temperaturen von 20°C bis 50°C weniger als 40 % abfällt. Die maximale Gebrauchstemperatur muß in jedem Fall innerhalb des ersten annähernd linearen Bereichs der Schubmodul-Temperaturkurve liegen. Bei Bauteilen, die z.B. im Freien aufgestellt sind und bei denen die Möglichkeit einer örtlichen Erwärmung über 30°C unter Belastung besteht, ist bei Temperaturen von 20°C bis 60°C nur ein Abfall des Moduls in Höhe von 30 % zulässig."

Das Temperaturverhalten von GF-UP läßt sich sehr gut aus den Schubmodul- und Dämpfungskurven der Matrix einschätzen (Bild 66). Neben dem Dämpfungsmaxima, der "Glasübergangstemperatur", ist der Verlauf über der Temperatur wichtig.

Gruppe <sup>1)</sup>	Reaktionsharzart	Glykole (Dirole)	Säuren	Maximaler Styrol-Masseanteil
0	UP	Standardglykole <sup>2)</sup>	Orthophthalsäure Ethylendicarbonsäuren	45 %
1	UP	Standardglykole <sup>2)</sup>	Orthophthalsäure Ethylendicarbonsäuren	45 %
2	UP	Standardglykole <sup>2)</sup>	ausschließlich Isophthalsäure und/oder Terephthalsäure und Ethylendicarbonsäuren	50 %
3	UP	Neopentylglykol (mindestens 80 % molarer Anteil, maximal 20 % molarer Anteil <sup>3)</sup> eines Diols mit mindestens einer sekundären OH-Gruppe)	ausschließlich Orthophthalsäure und/oder Isophthalsäure und/oder Terephthalsäure und/oder HET-Säure und Ethylendicarbonsäuren	50 %
4	UP	Bis(hydroxymethyl)-tricyclodecan	Ethylendicarbonsäuren und Orthophthalsäure	50 %
5	PHA	Bisphenol A-bis (1,2 dihydroxypropyl)-ether	Acryl- und/oder Methacrylsäure <sup>4)</sup>	50 %
6	UP	Perhydrobisphenol A Diethoxybisphenol A Dipropoxybisphenol A (mindestens 90 % molarer Anteil)	Ethylendicarbonsäuren	55 %

<sup>1)</sup> Harze der Gruppen 1 bis 4 und 6 müssen vom Typ 1130 oder 1140 nach DIN 16 946 Teil 2 sein. Harze der Gruppe 0 müssen mindestens vom Typ 1110 nach DIN 16 946 Teil 2 sein. Harze der Gruppe 5 müssen vom Typ 1310 nach DIN 16 946 Teil 2 sein.

<sup>2)</sup> Dazu gehören: Ethylen-, 1,2-Propylen-, Diethylen- und Dipropylenglykol.

<sup>3)</sup> Bezogen auf Styrol-(Monomer-)freies UP-Harz.

<sup>4)</sup> Sogenannte Vinylesterharze.

Tabelle 3 Einteilung der Harze nach /79/

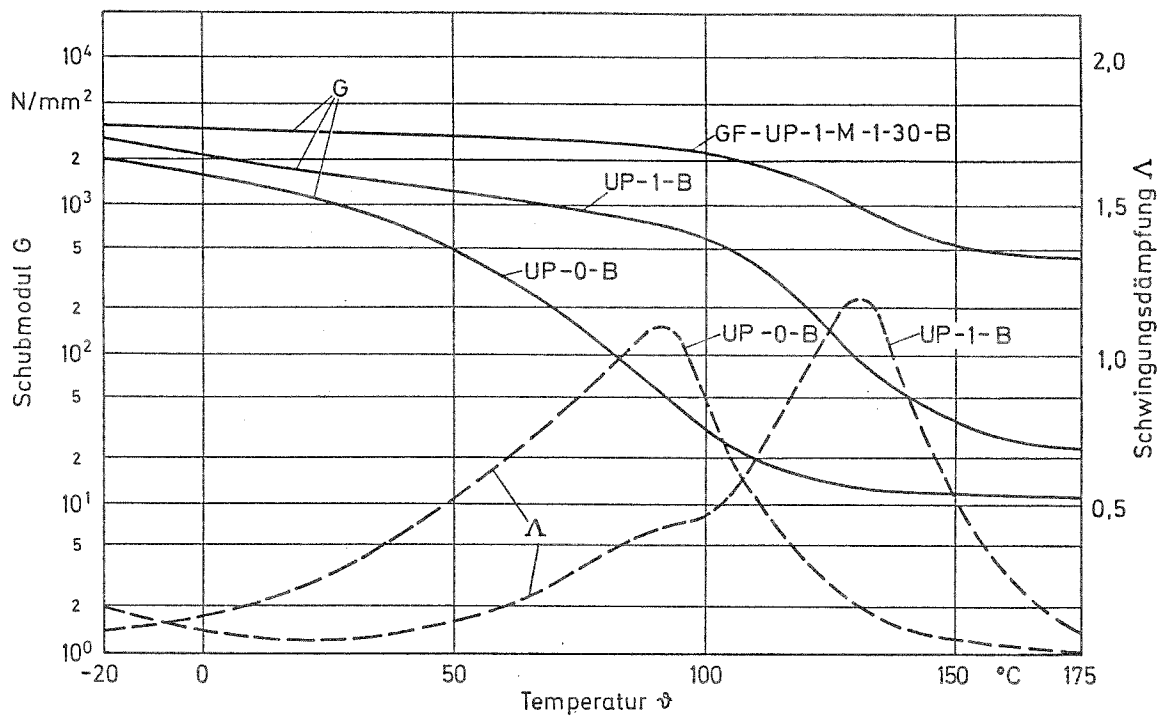


Bild 66 Schubmodul- und Dämpfung gehärteter, unverstärkter UP-Harze und eines Wirrfaserlaminates, ermittelt nach /86/

Die Glasübergangstemperatur, bei der Duroplaste kautschukelastisch werden, muß bei Formstoffen des Typs 1130 oder 1140 nach /80/ (Gruppe 1 und höher nach Tabelle 3) über 120°C liegen, bei Formstoffen des Typs 1110 oder 1120 (Gruppe 0) über 70°C.

Alle bisher zugelassenen Schüttgutsilos wurden mit Harzen der Gruppe 1 nach Tabelle 1 hergestellt. Gärfuttersilos wurden auch mit Harzen der Gruppe 0 gefertigt, ebenso Schüttgutsilos (siehe Abschnitt 6), die ohne Zulassungsverfahren errichtet wurden.

### 3.2 Verstärkungswerkstoffe

Das Harz wird mit Textilglas /81/, bisher für Silos E-Glas (Aluminium-Borsilikat-Glas mit einem Masseanteil Alkali  $\leq 1$  %), verstärkt. Für erhöhte Säurebeständigkeit ist, E-CR-Glas (Aluminium-Kalksilikatglas) zu empfehlen. Auch C-Glas (Alkali-Kalkglas mit erhöhtem Borzusatz) ist chemisch beständiger. Je nach Verarbeitungsverfahren werden Wickelrovings, Rovings, die geschnitten werden, UD-Gelege /82/, Rovinggewebe /83/ und Matten /84/ verwendet, die mit den für die jeweiligen Verarbeitungsverfahren notwendigen Schichten und Haftvermittlern versehen sind. Ausgangskomponente sind kontinuierlich aus der Glas-Schmelze gezogene Filamente, die nachdem die Schlichte aufgetragen ist, zum Spinnfaden oder ohne Drehung zum "Direktroving" gebündelt werden. Der "assemblierte Roving" besteht aus einer Anzahl von Spinnfäden.

Die Gewebe werden in unterschiedlicher Bindungsart und Verstärkungsverhältnissen von unidirektional (UD) bis zu (1:1) aus Rovings hergestellt. UD-Gelege sind parallel angeordnete Rovings.

Bei Matten werden geschnittene Spinnfäden (25 mm oder/bis 50 mm lang), "Schnittmatten", oder endlose Spinnfäden, "Endlosmatten", regellos ohne Verzugsrichtung durch einen "Binder" miteinander verkebt. Nach /79/ sind die Filamentdurchmesser für Wickelrovings und UD-Gelege auf  $29 \mu\text{m}$ , Rovinggewebe und Endlosmatten ( $22 \mu\text{m}$ ) sowie Rovings, die geschnitten werden, und Schnittmatten auf  $19 \mu\text{m}$  beschränkt. Bei bisher zugelassenen GF-UP-Bauteilen sowie bei den untersuchten Laminaten (Abschnitt 6) wurden diese Grenzen eingehalten.

### 3.3 Zusatzstoffe

Durch Zusatzstoffe werden die Eigenschaften von UP-Harzen bei der Verarbeitung und nach der Aushärtung beeinflusst. Hierzu gehören insbesondere Flammschutzadditive (z.B. Chlorparaffin und Antimontrioxid) organische Thixotropiemittel (1) oder solche auf Siliciumdioxidbasis (2), unlösliche Farbpigmente (1) und lösliche Farbstoffe (0,5) sowie Füllstoffe wie Aluminiumhydroxid, Kaolin, Quarzmehl etc.. Aussagen zur Dauerhaftigkeit und den Werkstoffeigenschaften gelten nur uneingeschränkt, wenn der Gesamtmasseanteil der Zusatzstoffe, wie in /79/ gefordert, bezogen auf die Reaktionsharzmasse auf 5 % und die Anteile der einzelnen Stoffe auf die in Klammern angegebenen Werte beschränkt bleiben. Bei den untersuchten Laminaten wurden diese Werte nicht überschritten.

### 3.4 Reaktionsmittel

Zur Härtung des flüssigen Harzes muß die Reaktion der vernetzungsfähigen Doppelbindungen des Grundharzes mit Molekülen des Styrols ausgelöst werden. Hierzu werden Härter (meist organische Peroxide) zugegeben. Die Wirkung des Härters wird entweder durch Wärmezufuhr ("Warmhärtung") oder Zugabe von Beschleunigern ("Kalthärtung") gestartet. Bei der Siloproduktion wird die Kalthärtung mit den Systemen Aminbeschleuniger/Benzoylperoxid oder Cobaltbeschleuniger/Ketonperoxid bevorzugt. Da die Härtung bei Amins systemen schon bei Temperaturen über 5°C möglich ist und schneller verläuft, andererseits Cobaltsysteme erst ab 15°C gute Ergebnisse bringen; jedoch zu einer höheren Durchhärtung führen, werden auch häufig Mischsysteme Cobalt/Amin eingesetzt. Soweit noch zu erfahren war, lag die Herstelltemperatur bei den untersuchten Laminaten über 15°C.

Durch sog. Inhibitoren kann die Geschwindigkeit des Härtungsverlaufs beeinflusst werden.

Bauteile von Silos werden in handwerklichen mehr oder weniger mechanisierten Verfahren hergestellt. Es kann ohne Druck laminiert werden, da bei der Härtung keine flüchtigen Reaktionsprodukte frei werden. Bei der Herstellung wird durch Maßnahmen wie z.B. Formteilgestaltung, gezielte Wahl von Härtungssystemen auch schichtweise variable, dem Einfluß der chemischen Schwindung und der exothermen Reaktion entgegen gewirkt. Beim Härtungsverlauf über den Gelzustand bis zum ausgehärteten Reaktionsformstoff /85/, auch Matrix genannt, schwinden UP-Harze um ca. 7 Vol-%, wodurch Ablösungen der Matrix vom Glas oder sogar Risse entstehen können. Die exotherme Reaktion wird je nach Glasanteil ab etwa 15 mm Laminatdicke kritisch.

#### 4.1 Handlaminieren

Beim Handlaminieren wird das mit den Zusatzstoffen und Härtungsmitteln angesetzte Harz in die mit Trennmittel versehene Form abwechselnd mit zugeschnittenen Matten- und Gewebelagen eingegeben. Mit einfachen Werkzeugen wie Rollen, Pinseln etc. wird verdichtet und eingeschlossene Luft entfernt.

#### 4.2 Faserspritzen

Das Faserspritzen, Bild 67, entspricht dem Handlaminieren. Anstatt mit vorgefertigten Matten werden Wirrfaserschichten mit geschnittenen Rovings (25 mm bis 50 mm lang) aufgebaut, die entweder mit dem Harz zusammen in die Form eingespritzt oder trocken auf das vorher eingerakelte Harz geflockt werden. Durch das Beflocken lassen sich die Styrolverdunstung und die Anzahl der Luftblasen im Laminat verringern.

Dächer und Trichter von Silos werden meist im Handlaminier- und Faserspritzverfahren hergestellt. Die der Form abgewandte Oberfläche so hergestellter Lamine ist immer rau und uneben.

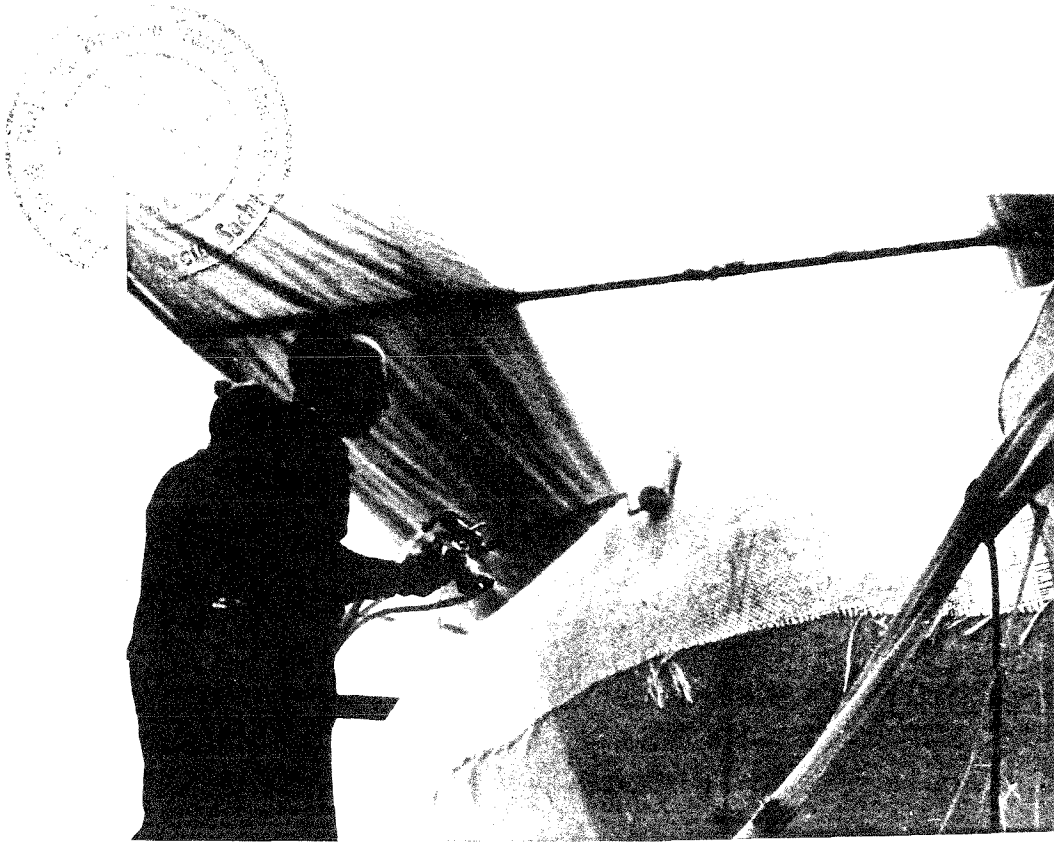


Bild 67 Herstellung eines Silobehälters /43/ in Handauflege- und Faserspritzverfahren

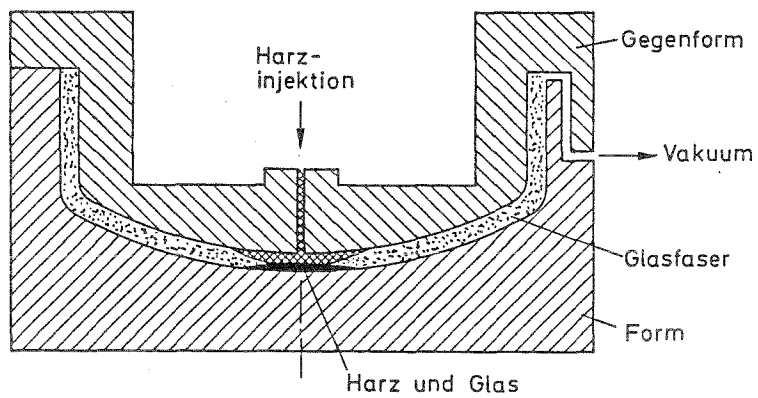


Bild 68 Injektions- und Vakuumverfahren (schematisch)

#### 4.3 Injektions- und Vakuumverfahren

Sollen beidseitig glatte Oberflächen erzielt werden so eignet sich das Injektions- und Vakuumverfahren, Bild 68, es wird jedoch erst bei größeren Stückzahlen wirtschaftlich. Zugeschnittene Matten, meist Endlos-, werden, auch mit Gewebezwisehenlagen, in die Form eingelegt. Dann wird das Harz in die geschlossene Form injiziert. Durch das Vakuum wird die Entlüftung und die vollständige Tränkung der Verstärkung unterstützt. Bei diesem Verfahren spielt die Viskosität des Harzes eine besondere Rolle. Sie kann durch Zugabe von monomerem Styrol niedriger eingestellt werden.

#### 4.4 Naßpressen

Auch bei diesem Verfahren werden beide Seiten des Laminates glatt. Die Verstärkung wird wie vorher beschrieben eingelegt und die notwendige Menge Harz eingegossen. Durch den Druck der Gegenform, für den relativ große Pressen erforderlich sind, wird das Harz verteilt.

#### 4.5 Schleuderverfahren

Beim Schleuderverfahren, das relativ selten zur Herstellung von Silozylindern, häufiger für Rohre angewendet wird, wird das Verstärkungsmaterial in eine drehbare Kokille eingebracht und das Harz möglichst gleichmäßig verteilt während des Drehvorgangs zugegeben. Es können auch geschnittene Rovings mit Harz eingespritzt werden. Durch die Zentrifugalkraft wird das Laminat verdichtet, daher hängen die erzielbaren Glasmasseanteile von den erreichbaren Drehzahlen ab.

#### 4.6 Wickelverfahren

Die Silozylinder werden vorwiegend im Drehbanksystem gewickelt. Hierbei werden zu Bändern zusammengefaßte Rovings durch ein Tränkebad gezogen und nach dem Abstreifen des überflüssigen Harzes mit einer bestimmten Vorspannung auf den sich drehenden Wickelkern aufgewickelt (Bild 69 a). Der Vorschub des Supports wird dabei abhängig von der Breite des Rovingbandes meist im Verhältnis



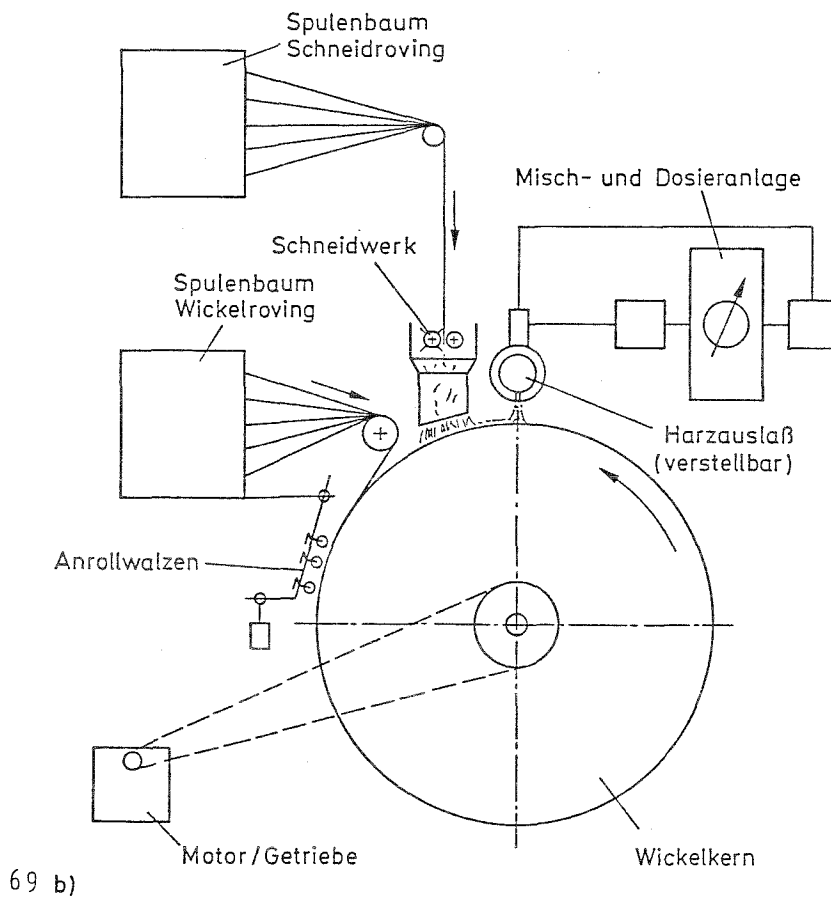
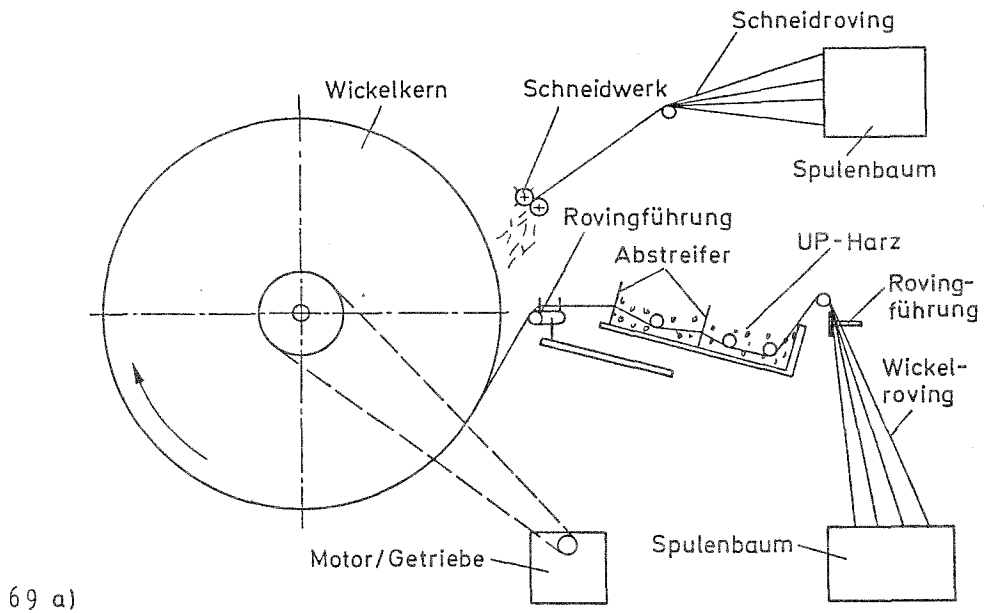


Bild 69 Wickelverfahren (schematisch), mit hohem Rovinganteil (a) oder hohem Wirrfaseranteil (b)

zur Drehzahl des Kerns so geregelt, daß das Band annähernd parallel in Umfangsrichtung abgelegt wird ("Parallelwickeln"). Wirrfaserzwischen-schichten werden eingeflockt oder mit Harz eingespritzt. Zur besonderen Axialverstärkung werden UD-Gewebe entweder per Handverfahren aufgebracht oder in Bandform entsprechend den Rovingbändern aufgewickelt.

Eine Abart des Verfahrens (Bild 69 b) eignet sich besonders für Wickellamine mit hohem Wirrfaseranteil, hierbei wird das Harz über ein geschlossenes System direkt auf den Kern aufgegossen. Die Wirrfaserschicht wird trocken aufgehäckselt, von dem ebenfalls trockenen Rovingband erfaßt und aufgewickelt. Nachgeschaltete Anrollwalzen verdichten und glätten das Laminat. Dieses Verfahren ist besonders wirtschaftlich, wenn möglichst große Laminatdicken mit geringerem Produktionsaufwand erzielt werden sollen, außerdem sind die Styrolemissionen beträchtlich geringer als bei der anderen Variante. Auch lassen sich Trichter und Zylinder in dieser Weise leichter durchgehend wickeln (Bild 70). Alle bisher zugelassenen Silos, die im Wickelverfahren hergestellt wurden, sind parallel gewickelt. Es wurden sowohl Zylinder mit, als auch ohne zusätzliche Axialverstärkung durch UD-Gewebe hergestellt (siehe Abschnitt 2.2).

## 5 Eigenschaften von GF-UP-Laminaten

Der Baustoff GF-UP erhält seine Eigenschaften aus der Verbundwirkung der Glasfasern mit der Matrix, die zu den Duroplasten (Duromere) gehört. Durch den Härtingsprozess werden die linearen Kettenmoleküle des Grundharzes durch die eingebauten Styrolmoleküle mit einander zu einem dichten Netzwerk verbunden, dadurch werden sie nicht mehr schmelzbar und löslich. Bei Elastomeren (kautschukelastische Kunststoffe) liegt ein entsprechendes weitmaschiges Netzwerk vor. Thermoplaste (Plastomere) dagegen bestehen nur aus linearen oder verzweigten Molekülketten, sie sind schmelzbar und löslich. Im Gegensatz zu Stahl und verschiedenen Thermoplasten lassen sich Duroplaste, ob verstärkt oder unverstärkt, nicht strecken (Bild 71).

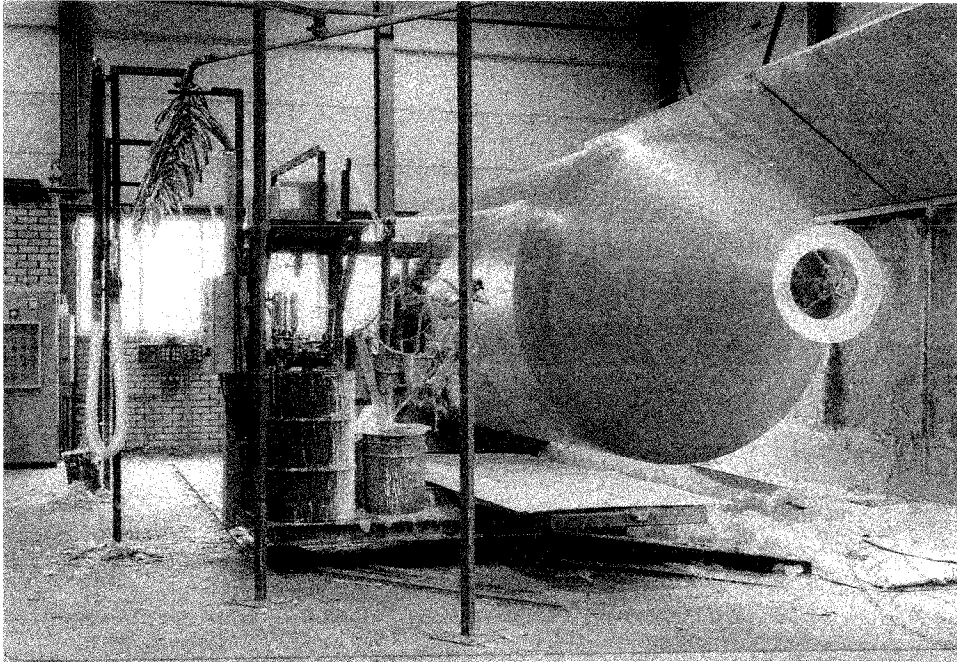


Bild 70 Wickelverfahren: Herstellung eines Silobehälters /66/ mit durchgehend gewickeltem Trichter

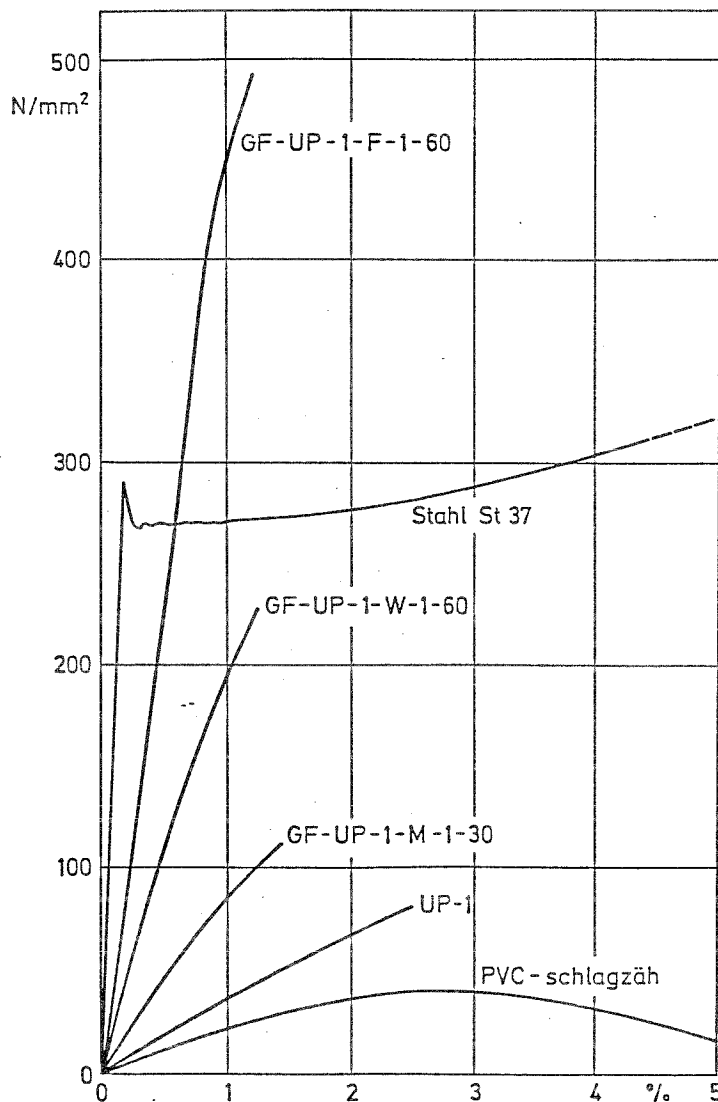


Bild 71

Spannungsdehnungsverhalten unterschiedlich verstärkter GF-UP-Lamine im Vergleich zu Stahl und Thermoplasten

## 5.1 Kennwertbestimmung durch Versuche

Als für die Beurteilung eines Silolaminates wichtigste Kennwerte sind zu bestimmen /19/:

Der Glas-Masseanteil bzw. die flächenbezogene Masse nach /87/, Kurzzeitverhalten im Zugversuch (siehe /88, 89/) und im Biegeversuch (siehe /90/, E-Modul querkraftfrei auch /89/) sowie das Verhalten bei statischer Langzeitbeanspruchung im Zugversuch, insbesondere die Zeitstandfestigkeit, (siehe /88/) und im Biegeversuch, insbesondere das Kriechverhalten (siehe /90, 91/).

Abweichend von den genannten Normen muß die Prüfkörperbreite  $b \geq 50$  mm und der Auflagerabstand beim Dreipunkt-Biegeversuch mindestens die 20-fache Laminatdicke betragen. Bei den Versuchen zur Ermittlung der Eigenschaften (Abschnitt 6) wurden vorstehende Bedingungen eingehalten. Die Verformungsgeschwindigkeit wurde bei den Kurzzeitversuchen mit 1 %/min gewählt.

Die mechanischen Eigenschaften der Lamine sind von Art, Menge und Anordnung der Verstärkungsmaterialien abhängig. Unidirektionale Schichten erreichen die höchsten Bruchwerte und Steifigkeiten bei Beanspruchung in Verstärkungsrichtung, senkrecht dazu ist die Festigkeit nur sehr gering (Bild 71). Besonders bei hoher Packungsdichte können sie schon bei Dehnungen unter 0,1% u.a. /59,95,96/ reißen. Gewebeschichten erreichen ihre höchsten Werte ebenfalls nur in den Hauptverstärkungsrichtungen während Wirrfaserlamine sich richtungsunabhängig (quasiisotrop) verhalten. Die Kennwerte werden in den Hauptverstärkungsrichtungen bestimmt.

### 5.1.1 Kurzzeitversuche

Bei den Kurzzeitversuchen werden Festigkeit, E-Modul, Bruchdehnung sowie Spannungs- und Dehnungswerte erster Schädigungen ermittelt. Bei Wirrfaserlaminaten erreichen irreversible Schädigungen im Verbund Glasfaser/Matrix (Mikrorisse) ab Zugdehnungen von ca. 0,5 % ein zu berücksichtigendes Ausmaß. Bei üblichen, gemischt aufgebauten Laminaten entstehen Risse bei Zugdehnungen senkrecht zu den UD-Schichten von ca. 0,2 % (Bild 72).

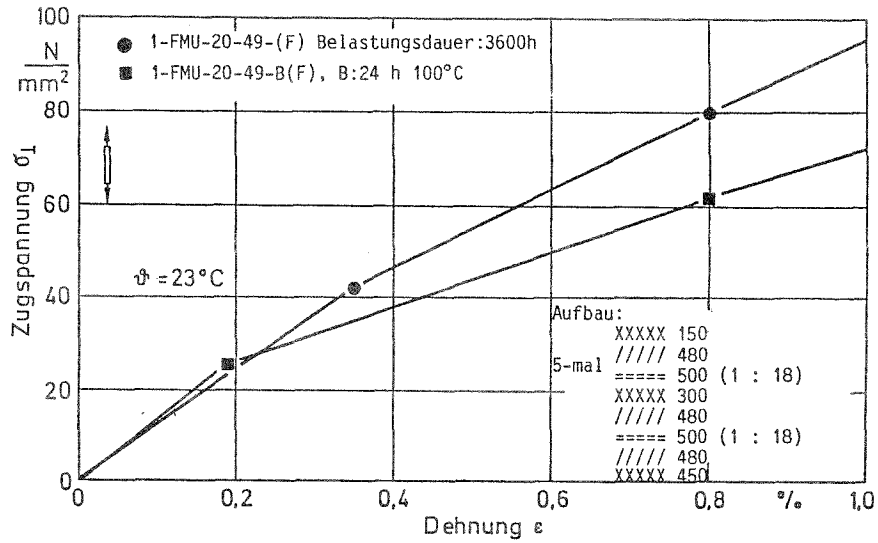


Bild 72 Verhalten von gemischt aufgebauten Wickellaminaten /59/ im Bereich kleiner Dehnungen bei Zugbeanspruchung senkrecht zu den Rovingwickelschichten

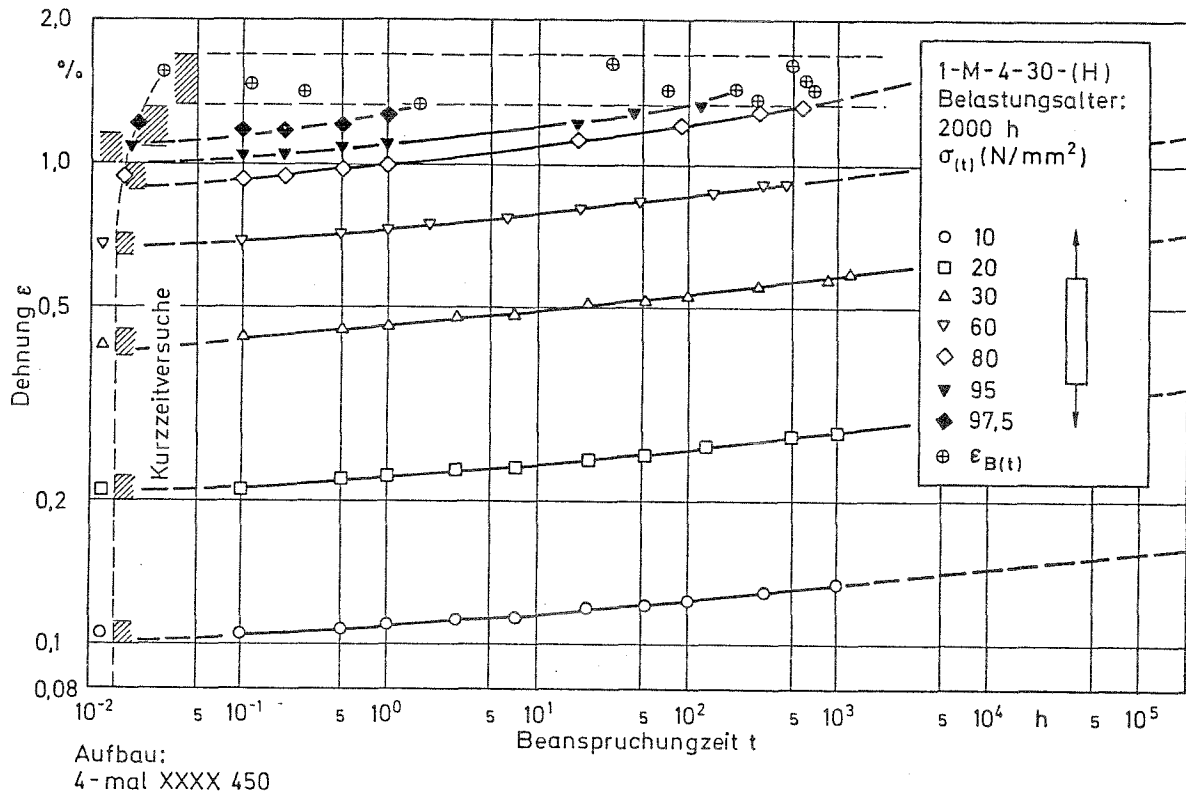


Bild 73 Zeitdehnlinien für Zugbeanspruchung eines Wirrfaserlaminates /59/

## 5.1.2 Langzeitversuche

In den normalerweise über 1000 h durchzuführenden Langzeitversuchen werden die "Zeitdehnlagen" (Bild 73) bei der 0,15 fachen mittleren Bruchlast /18, 19/ und die "Zeitbruchlinien" (Bild 74) bestimmt. Die Zeitdehnlagen können, falls es während der Dauerbelastung nicht zu Rißbildungen kommt, ab etwa 1 h genügend genau als Gerade im doppeltlogarithmischen System angesehen werden. Ebenso kann die Zeitstandbruchkurve als Gerade eingegrenzt werden. Durch Extrapolation auf  $2 \cdot 10^5$  h werden aus dem Verhältnis der Kurzzeit- zu den Langzeitwerten die Faktoren  $A_{1B}$  und  $A_{1I}$  bzw. die Kriechzahl  $\varphi_t$  bestimmt ( $A_{1I} \cong 1 + \varphi_t$ ).

Da GF-UP Silos meist kalthärtend ohne thermische Nachbehandlung hergestellt werden, beeinflußt das Belastungsalter (der erreichte Aushärtegrad) entscheidend das Verformungsverhalten jedoch nicht die Kurzzeit- und Zeitstandfestigkeit (Bilder 75 und 76). Während der Elastizitätsmodul nach relativ kurzer Zeit (ca. 3 Monate) nur noch wenig von dem des getemperten Laminats abweicht, ist der Kriecheinfluß noch merklich größer (Bild 76). Bei höherem Belastungsalter nähern sich die  $A_{1I}$ - bzw.  $\varphi_t$  - Werte denjenigen von getemperten Laminaten bei Verwendung eines Cobaltsystems (siehe Abschnitt 3.3) an.

Da das doppeltlogarithmisch lineare Zeitstandverhalten des Werkstoffs als gesichert gilt, reichen zur Überprüfung geplanter oder rechnerisch ermittelter Kennwerte sowie zur Fertigungskontrolle abgekürzte Zeitstandversuche aus.

### 5.1.2.1 Bruchverhalten

Bei Kenntnis der Kurzzeitfestigkeit reichen i.A. 3 Probekörper, die unter einer durch den angenommenen Faktor  $A_{1B}$  bestimmten Last nach 100 h Lastdauer nicht zu Bruch gehen, aus, um weitgehend sicher zu sein, daß  $A_{1B}$  real gleich oder kleiner ist als angenommen (Bild 74).

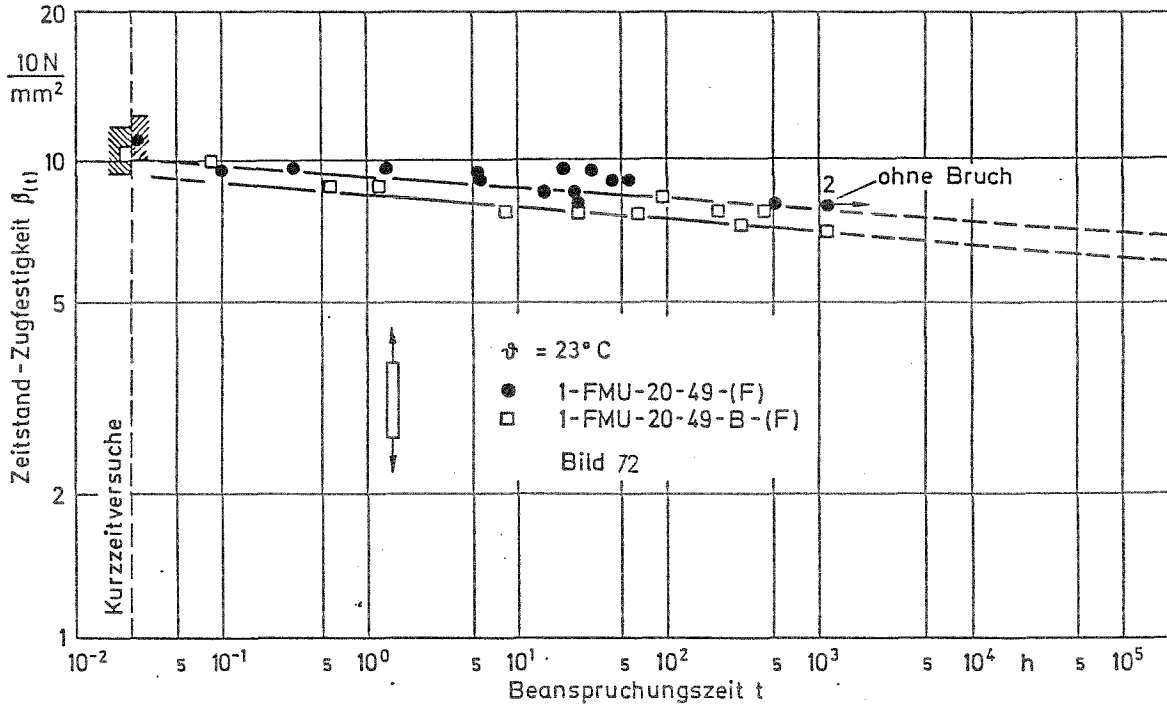


Bild 74 Zeitbruchlinien eines typischen Wickellaminates bei Beanspruchung senkrecht zur Wickelrichtung /59/

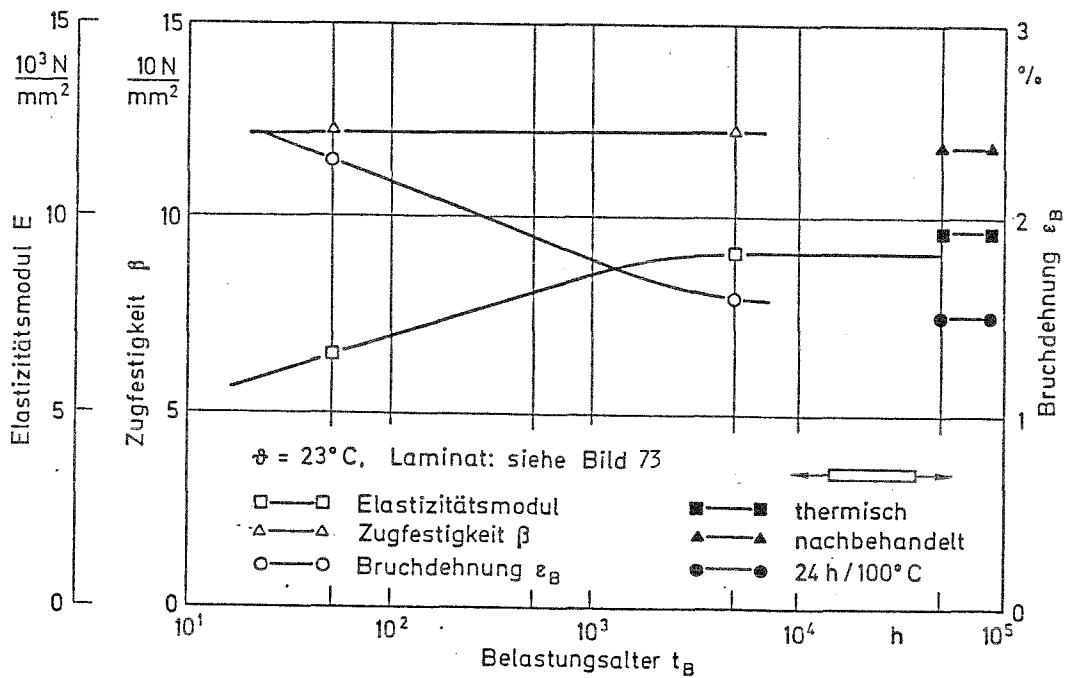


Bild 75 Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit und Bruchdehnung eines kaltgehärteten Wirrfaserlaminates als Funktion des Belastungsalters /59/

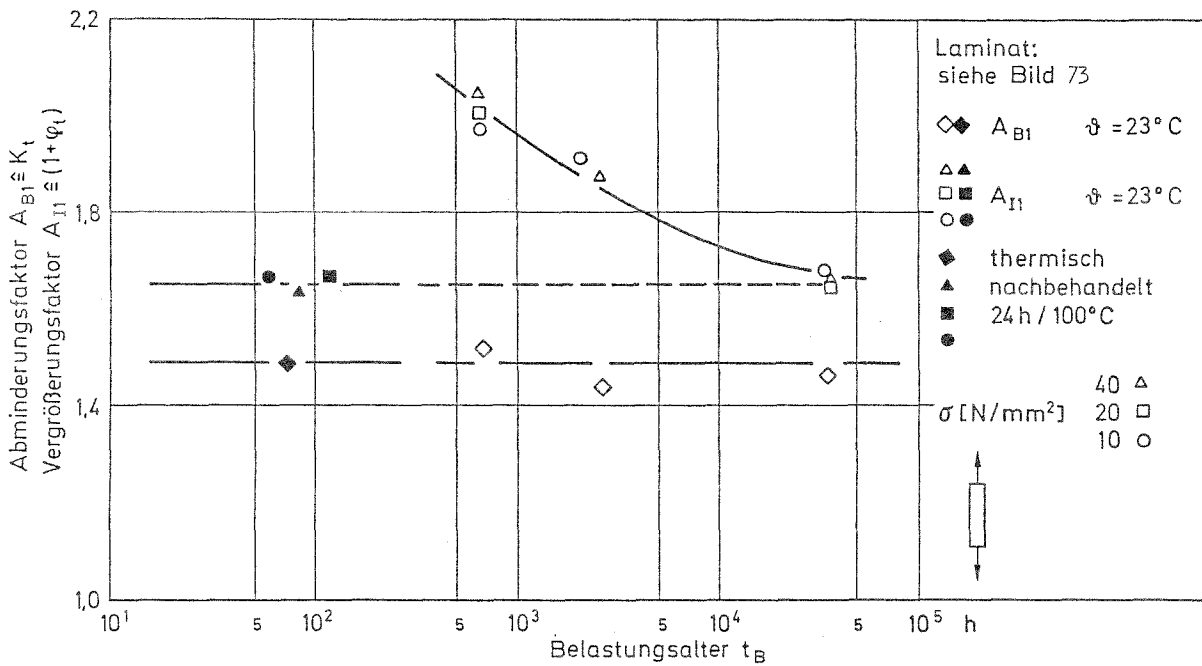


Bild 76 Abhängigkeit der Abminderungsfaktoren  $A_{1B}$  und  $A_{1I} \cong 1 + \varphi_t$  eines kaltgehärteten Wirrfaserlaminates von Belastungsdauer /59/

Die Versuchsspannung ergibt sich aus der 5 % - Fraktile der Kurzzeitfestigkeit zu

$$\sigma_{100 \text{ h}} = \beta_{5 \%} / A_{1B}^{0,55}$$

Die Werte für  $A_{1B}$  in Abschnitt 6 wurden in der vorstehenden Weise ermittelt. Wenn Einzelwerte nach weniger als 100 h zu Bruch gingen, wurde das arithmetische Mittel der logarithmierten Bruchzeiten errechnet und der Wert für  $A_{1B}$  entsprechend dieser Bruchzeit korrigiert. Wenn alle Proben mehr als 100 h ohne Bruch blieben wurden die Versuche abgebrochen. Für die Kurzzeitfestigkeit wurde vereinfacht (normalerweise ist sie wegen der Verformungsgeschwindigkeit im Versuch von der Bruchdehnung abhängig) eine Zeit von  $t_0 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ h}$  angenommen.



Diese Zeit entspricht bei einer Dehnungsgeschwindigkeit von 1%/min einer Bruchdehnung  $\epsilon_B = 0,9 \%$

### 5.1.2.2 Verformungsverhalten

Die Verformungskennwerte  $E_{CO}$ ,  $E_C$  und  $\varphi_t$  wurden in Biegekriechversuchen (Dreipunkt-) mit Lastdauern zwischen 1000 h und 1300 h bestimmt. Jedem Kennwert liegen mindestens fünf Versuche zugrunde.

Der Querkrafteinfluss wurde vereinfacht mit dem Faktor 1,1 bzw. 0,9 bezüglich  $E_{CO}$  und  $A_{1I}$  berücksichtigt. Wie Vergleichsauswertungen ergaben, liegen die querkraftfrei ermittelten Kennwerte im Allgemeinen mehr als 10 % höher bzw. niedriger, als solche aus Dreipunkt-Biegeversuchen (siehe auch Bild 104).

Im sog. 24 h - Biegeversuch (Bild 77) unter der Biegespannung entsprechend dem 0,15 fachen Bruchmoment kann der Verformungsmodul

$$E_C^* = E_{1h} (f_{1h}/f_{24h})^{3,6} \quad \{40\}$$

bestimmt werden, er entspricht:

$$E_C^* \cong \frac{E}{1+\varphi_t} \cong \frac{E}{A_{1I}} \quad \{41\}$$

Aus dem gleichen Versuch kann auch ein Vergleichswert für den Kurzzeitmodul

$$E_{CO}^* = E_{1h} (f_{1h}/f_{24h})^{-1,4} \cong E \quad \{42\}$$

oder die Kriechzahl  $\varphi_t$  errechnet werden:

$$\varphi_t^* = (f_{1h}/f_{24h})^{-5,0} - 1 = A_{1I}^* - 1 \cong \varphi_t \quad \{43\}$$

$E_{1h}$  = E-Modul, berechnet aus der Durchbiegung nach 1 h Belastungsdauer

$f_{1h}$  = Durchbiegung nach 1 h Belastungsdauer

$f_{24h}$  = Durchbiegung nach 24 h Belastungsdauer

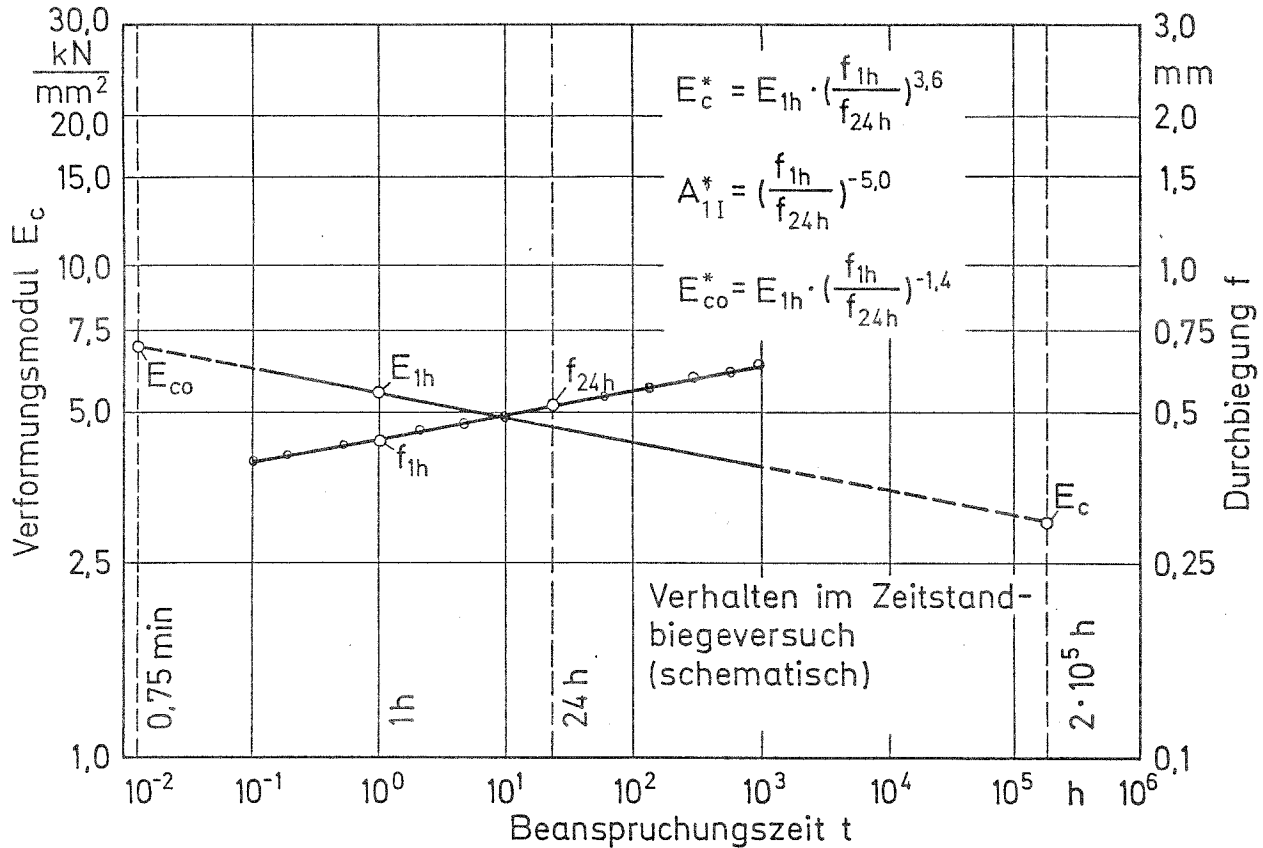


Bild 77 Verformungsmodul eines kaltgehärteten Wirrfaserlaminates, Alter 15 Jahre, aus dem Dreipunkt-Biegeversuch in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit

Die nach vorstehenden Gleichungen errechneten Werte stimmen gut mit den aus Zeitdehnlagen durch Intra- bzw. Extrapolation ermittelten Werten überein (siehe Bilder 104 bis 109). Die Unterschiede betragen normalerweise weniger als 5 % bezogen auf  $E_{co}$  und  $A_{1I}$ . Voraussetzung ist, daß es während des Zeitstandversuches nicht zu merklichen Rißbildungen im Laminat kommt (siehe 5.1.1).

Werden erhebliche höhere Abweichungen als + 5 % zwischen  $A_{1I}^*$  nach {43} und  $A_{1I}$  aus Extrapolation festgestellt, kann daraus im Allgemeinen bei Ausschluß von Versuchsfehlern auf Rißbildung geschlossen werden. Kriechkurven, die nicht durch eine ausreichende Anzahl von Meßpunkten im Bereich ab 0,1 h (siehe Bild 77) belegt sind, werden in dieser Hinsicht oft falsch interpretiert.

Theoretisch wurden die Gleichungen {40 bis 43} für die Zeiten  $t_0 = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{h}$  und  $t_c = 10^5 \text{h}$  abgeleitet. Sie sind jedoch auch genügend genau für Zeiten  $t_c = 2 \cdot 10^5 \text{h}$  und mehr. Der Unterschied liegt unter 3 % für  $25 \text{ a} = 2 \cdot 10^5 \text{h}$  und unter 5 % für  $50 \text{ a}$ .

## 5.2 Berechnung von Kennwerten

Zwischen Dicke  $t_L$ , flächenbezogene Glasmasse  $m_G$  ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), Glasvolumenanteil  $V_G$ , -Masseanteil  $\phi$ , Dichte  $\rho_L$  des Laminates und der Dichte der Glasfaser  $\rho_G = 2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$  ergeben sich folgende relativ einfachen Beziehungen, wenn vereinfacht die Dichte der Matrix (i.A. ausreichend genau) mit  $\rho_H = 1,25 \text{ g}/\text{cm}^3$  eingesetzt wird:

$$t_L = \frac{m_G}{2500 \cdot V_G} \quad (\text{mm}) \quad \{44\}$$

$$V_G = \frac{\phi}{2 - \phi} \quad \{45\} \quad \phi = \frac{2V_G}{1 + V_G} \quad \{46\}$$

$$\rho_L = 2,5 \cdot V_G + 1,25 (1 - V_G) \quad (\text{g}/\text{cm}^3) \quad \{47\}$$

Ausgehend von der Kontinuumstheorie /92/ können die Elastizitätsmoduln der einzelnen Schichten im Gebrauchszustand, in dem die Matrix voll mitträgt und der Verbund noch nicht durch Risse etc. gestört ist, nach folgenden Formeln mit teilweise empirisch ermittelten Beiwerten vereinfacht ermittelt werden /93,94/.

Unidirektionale Schichten (Roving F, Gelege U). Bei paralleler Beanspruchung

$$E_{||} = (1 - V_G) E_H + V_G \cdot E_G \quad \{48\}$$

und senkrechter

$$E_{\perp} = \frac{E_H}{1 - \nu_H^2} \cdot \frac{1 - \sqrt{V_G} + V_G}{1 - \sqrt{V_G}} \quad \{49\}$$

Für Gewebeschichten (W) werden die vorstehenden Gleichungen, indem man den aus dem Verstärkungsverhältnis  $1:\alpha$  bezogen auf die Richtung der UD-Schichten abgeleiteten Traganteil  $K_W = 1 + \alpha$  einführt, übernommen

$$E_{W||} = \frac{1}{K_W} E_{||} + \left(1 - \frac{1}{K_W}\right) E_{\perp} \quad \{50\}$$

$$E_{W\perp} = \frac{1}{K_W} E_{\perp} + \left(1 - \frac{1}{K_W}\right) E_{||} \quad \{51\}$$

Bei Wirrfaserschichten (M) gilt

$$E_M = 0,4 V_G \cdot E_G + (1 - 0,4 V_G) E_H \quad \{52\}$$

Für übliche Lamine ist es ausreichend genau für Glasfaser und Matrix anzunehmen:

$$E_G = 73000 \text{ N/mm}^2; E_H = 3500 \text{ N/mm}^2; \nu_H = 0,36$$

Unter der Annahme linearer Dehnungsverteilung können die Steifigkeiten der Einzelschichten und ihrem Abstand zur neutralen Faser des Laminates die Steifigkeiten bzw. Elastizitätsmoduln des Verbundes für Normalkraft- und Biegebeanspruchung errechnet werden.

Die Bruchkräfte und Bruchmomente sind nur noch von den Festigkeiten der Glasfaser abhängig, wenn für den Bruchzustand davon ausgegangen wird, daß die Matrix nicht mehr mitträgt (Netztheorie). Für übliche Lamine sind folgende Beziehungen für die Festigkeiten der einzelnen Schichten genügend genau:

$$\text{UD-Schichten:} \quad \beta_{F||} = 1200 \cdot V_G \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \{53\}$$

$$\beta_{F\perp} = 0$$

$$\text{Gewebeschichten:} \quad \beta_{W||} = \frac{1}{K_W} \cdot 1200 V_G \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \{54\}$$

$$\beta_{W\perp} = 1200 \left(1 - \frac{1}{K_W}\right) V_G \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \{55\}$$

$$\text{Wirrfaserschichten:} \quad \beta_M = 0,4 \cdot V_G \cdot 1200 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \{56\}$$

Da die Bruchdehnung der Wirrfaserschichten größer ist, als die der anderen Schichten, wird ein ideal-elastisch-plastisches Verhalten der Wirrfaserschichten im Verbund vorausgesetzt. Unter der Annahme, daß auch im Bruchzustand die Querschnitte eben und die Dehnungsverteilung linear bleibt, können über die Kräfte in den einzelnen Schichten die Bruchkräfte und Bruchmomente des Mehrschichtlaminates bestimmt werden.

In den Formeln {48} bis {56} sind jeweils die Volumenanteile  $V_{Gi}$  der einzelnen Schichten einzusetzen, die in einem relativ festen Verhältnis zum Anteil in den unidirektional verstärkten Schichten (U, F) (Tabelle 4) je nach Herstellverfahren liegen.

Hieraus ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$V_{Gi} = F_i \cdot V_G \sum \left( \frac{n \cdot m_G}{F} \right)_i / \sum (n \cdot m_G)_i \quad \{57\}$$

$$t_i = \frac{t_L \cdot m_{Gi}}{F_i \left( \frac{n \cdot m_g}{F} \right)_i} \quad \{58\}$$

Schicht	Handlaminieren	Wickelfverfahren	Naßpressen
Wirrfaser	0,30 ÷ 0,45	0,35 ÷ 0,50	0,45 ÷ 0,60
Gewebe (~1:1)	0,70 ÷ 0,80	0,75 ÷ 0,85	0,95 ÷ 1,00

$$F_i = V_{Gi} / V_{GU,F}$$

Tabelle 4 Verhältnis  $F_i$  bezogen auf unidirektional verstärkte Schichten

Erfahrungsgemäß sind bei üblichen Misch- und Wickellaminaten die 5 % - Quantilen (Fraktilen) aus im Versuch ermittelten Werten höher als das 0,8 fache der nach vorstehenden Beziehungen errechneten Kennwerte.

Bei Wirrfaserlaminaten (insbesondere Mattenlaminaten) werden auch größere Abweichungen festgestellt.

### 5.3. Bezeichnungen nach Entwurf DIN 18820

In /79/ werden insbesondere die Abminderungsfaktoren  $A_I$  und  $A_B$  anders bezeichnet.

Es wird unterschieden nach festigkeitsmindernden und verformungserhöhenden Einflüssen

$$R(t, \vartheta, U) = \frac{R_0}{K_t \cdot K_\vartheta \cdot K_U} \quad \{59\}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} \quad \{60\}$$

$$\varepsilon_I = \frac{\sigma_I}{E_0} (1 + \varphi_t) C_\vartheta \cdot C_U \quad \{61\}$$

$$\varepsilon_K = \frac{\sigma_I}{E_0} \varphi_t \quad \{62\}$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{\sigma_{II}}{E_0} \cdot C \cdot C_U \quad \{63\}$$

$R$  : Widerstand des Laminates,  $R_0$  : Widerstand im Kurzzeitversuch bei Raumtemperatur,  $\varepsilon$  : Gesamtverformung,  $\sigma_I$  bzw.  $\sigma_{II}$  : Spannung infolge von ständig bzw. kurzzeitig wirkenden Lasten,

$E_0$  = Kurzzeit - E - Modul,  $\varphi_t$  : Kriechzahl,  $\varepsilon_K$  : Kriechanteil der Verformung,  $K_t \cong A_{1B}$ ,  $K_\vartheta \cong A_{3B}$ ,  $K_U \cong A_{2B}$ ,  $(1 + \varphi_t) \cong A_{1I}$ ,  $C_\vartheta \cong A_{3I}$ ,  $C_U \cong A_{2I}$ .

Schon in den ersten Zulassungsbescheiden wurde auf einen Vorgang hingewiesen, der entscheidend für die Dauerhaftigkeit der GF-UP-Bauteile ist. So hieß es z.B. in /40/: "Bei einer Bloßlegung von Glasfasern durch Witterungseinflüsse ist ein witterungsbeständiger Überzug aus Reaktionsharzen vorzunehmen." Mit wechselndem Wortlaut bei gleicher inhaltlicher Bedeutung wurde bis heute in allen Zulassungsbescheiden für GF-UP-Silos diese Forderung im Rahmen der Zustandskontrolle gestellt, die in der Regel erstmals nach 4 Jahren und dann alle 2 Jahre meist durch einen Sachverständigen durchzuführen war. Wie sich bei den Untersuchungen herausstellte, ist dieser Forderung neben Mindestanforderungen für den Laminataufbau und die Schutzschichten eine entscheidende Bedeutung für das Dauerverhalten von GF-UP beizumessen.

Insgesamt wurden mehr als 100 GF-UP-Silos verschiedener Hersteller, die bis zu 19 Jahren im Einsatz waren, auf ihren äußeren Zustand untersucht. Aus einigen, bis zu 16 Jahre alten, konnten Laminatproben entnommen werden und die für die Bemessung der Silos wichtigsten Kennwerte neu ermittelt werden.

## 6.1 Witterungsbedingte Veränderungen

Die witterungsbedingte Veränderung der Lamine verläuft etwa wie folgt beschrieben, wobei die Dauer bis zum Eintreten der verschiedenen Verwitterungsstufen hauptsächlich von der Wahl der Reaktionsharztypen, dem Laminataufbau, der Ausführung von Schutzschichten, der Einfärbung der Harze, der Verarbeitung und der Intensität der Witterungseinflüsse abhängt. Es können 4 Verwitterungsstufen unterschieden werden.

### 6.1.1 Stufe I

Die ursprünglich glänzende Oberfläche wird nach und nach matter, Einfärbungen können sich ändern, und es zeigen sich feine, oft nur unterm Mikroskop zu erkennende Riefen und Abtragungen.

### 6.1.2 Stufe II

Gleichzeitig mit dem Vorgang nach Stufe I werden bei fehlender oder zu dünner Schutzschicht und nicht eingefärbten Laminaten die unter der Oberfläche liegenden Glasfasern sichtbar.

Dieses sogenannte "Zeichnen" ist typisch für das Eindringen von Wasser in GF-UP-Lamine /97,98,99/ (Bilder 91 u. 92). Durch Diffusion und beschleunigt beim Vorhandensein von Poren, Luft-einschlüssen und Rissen dringt Wasser in das Laminat ein, wobei durch Kapillarwirkung entlang der Glasfasern die Eindringtiefe vergrößert wird. Das Wasser lagert sich an die Grenzfläche der Fasern und greift sie an, das führt zu einer Lockerung des Verbundes Harz/Faser sowie zu einer, wenn auch geringen Auslaugung und Hydrolyse der im Glas enthaltenen Alkali-oxide /100/.

### 6.1.3 Stufe III

Von Stellen schwacher Haftung ausgehend bewirken die Wassermoleküle ein fortschreitendes Ablösen der Matrix vom Glas. Die um die Fasern sich bildenden Hohlräume bewirken eine vermehrte Wasseraufnahme. Aufgrund osmotischer Effekte bilden sich Blasen in dünnen Harzschichten über den Fasern, die bei fehlender Schutzschicht relativ schnell aufreißen, die Glasfasern werden freigelegt. Das erste Aufplatzen geht dabei vorwiegend von Stellen aus, an denen die Glasfasern eng beieinander liegen, da hier die Benetzung der Glasfasern und damit die Haftung geringer als in harzreicheren Bereichen ist.

### 6.1.4 Stufe IV

Im weiteren Verlauf beschleunigt sich dieser Zerstörungsprozess in der Außenschicht bis über der ganzen Oberfläche Glasfasern freiliegen.



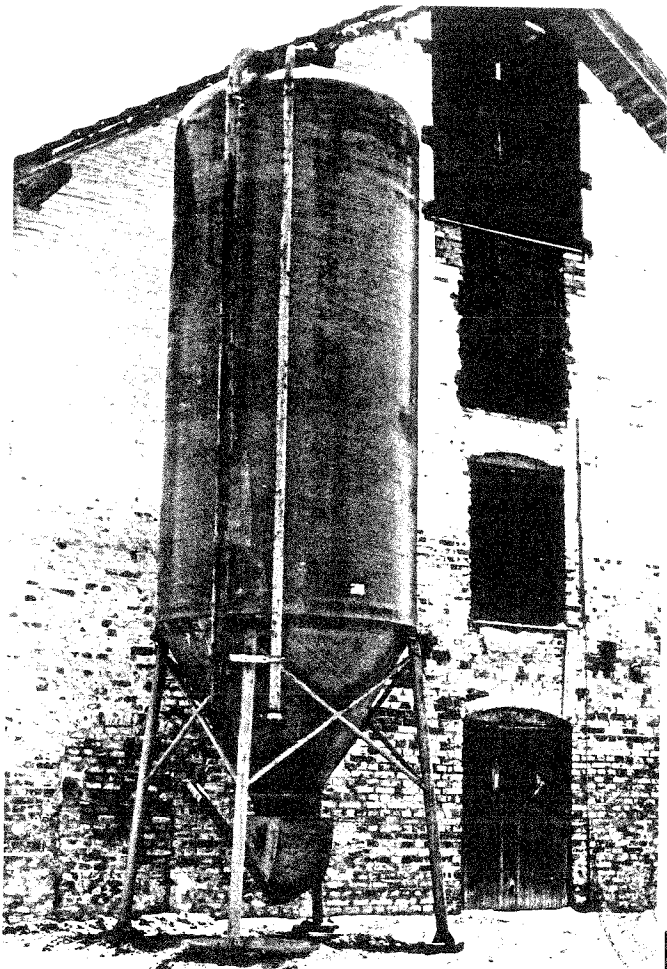


Bild 78

Schüttgutsilo zur Lagerung von Kraft-  
futter, 13 a alt

Bild 79

Gärfuttersilos, 18 a alt



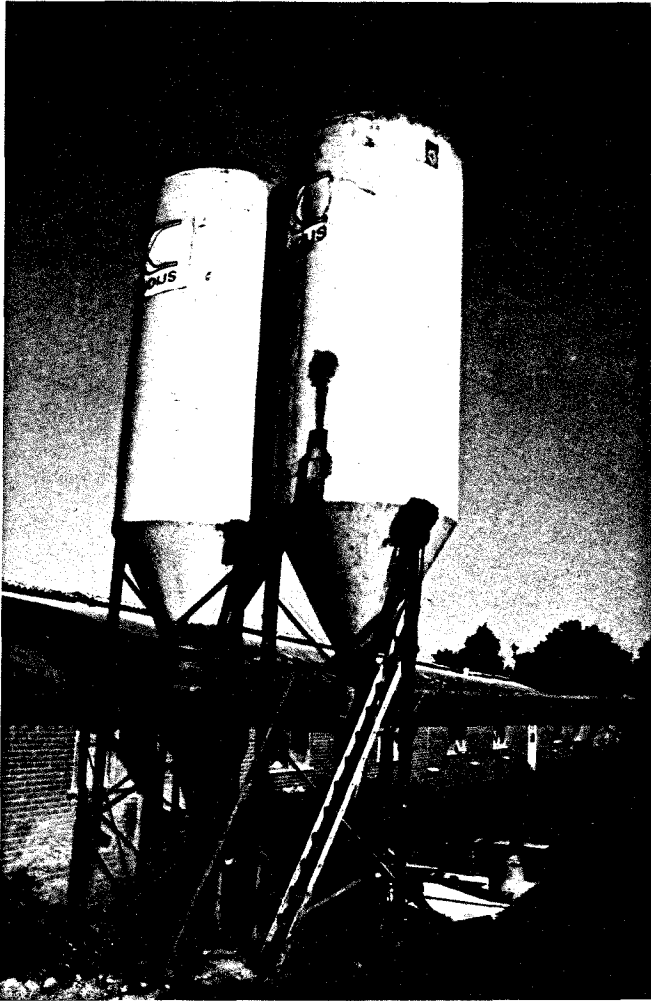


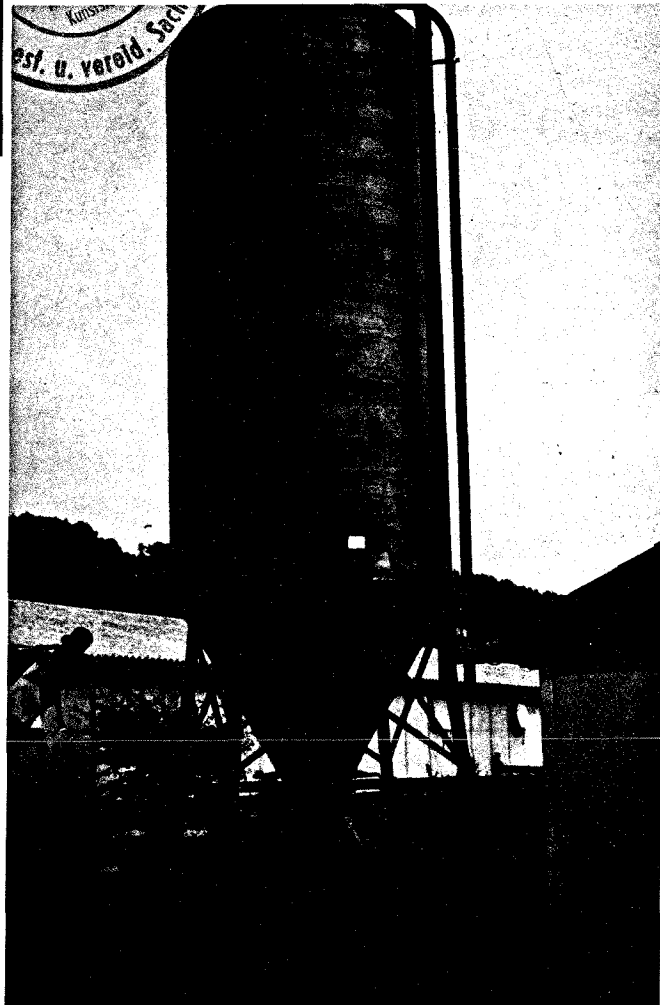
Bild 80

Schüttgutsilos zur Lagerung von Kraft-  
futter, 15 a alt



Bild 81

Schüttgutsilo zur Lagerung von Kraft-  
futter, 13 a alt



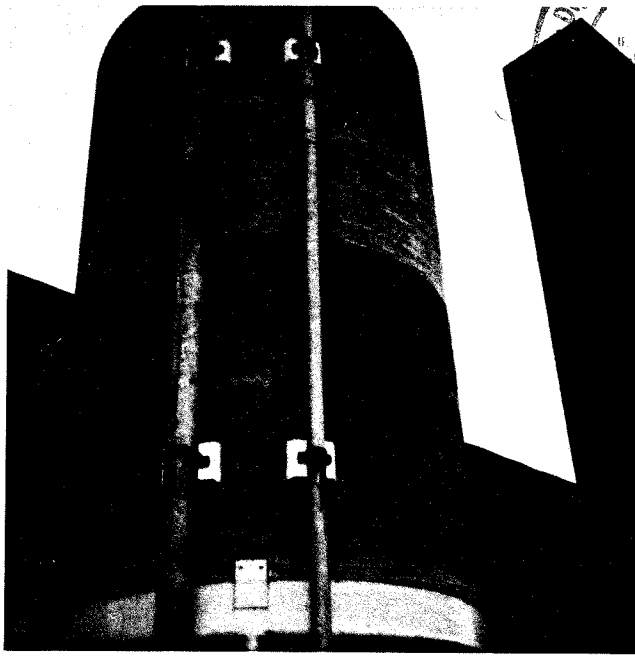


Bild 82  
Schüttgutsilos zur Lagerung von Kunststoffgranulat, links 16 a, Mitte 6 a, rechts 14 a alt

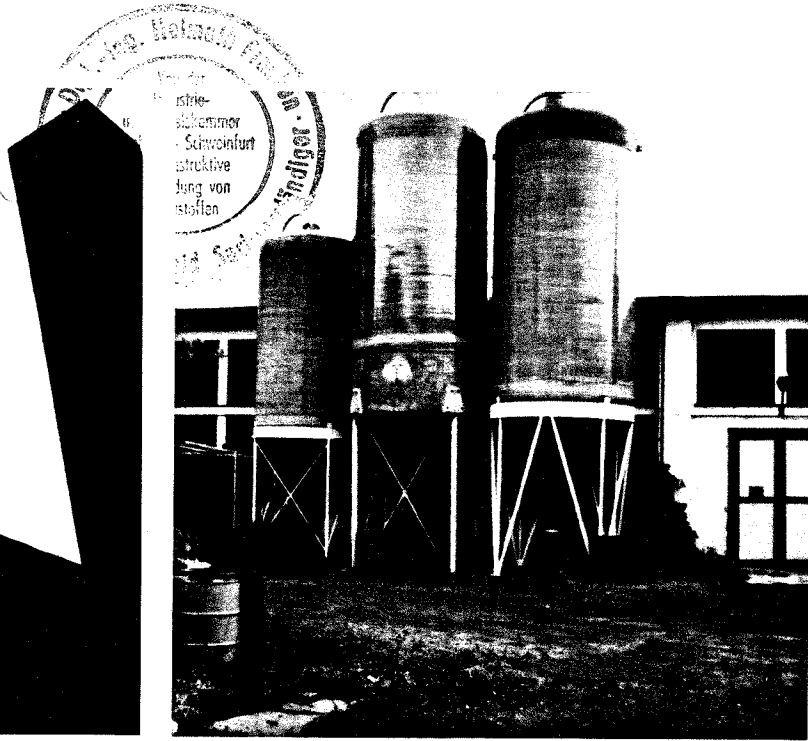


Bild 83  
Schüttgutsilo zur Lagerung von Kunststoffgranulat, 14 a alt

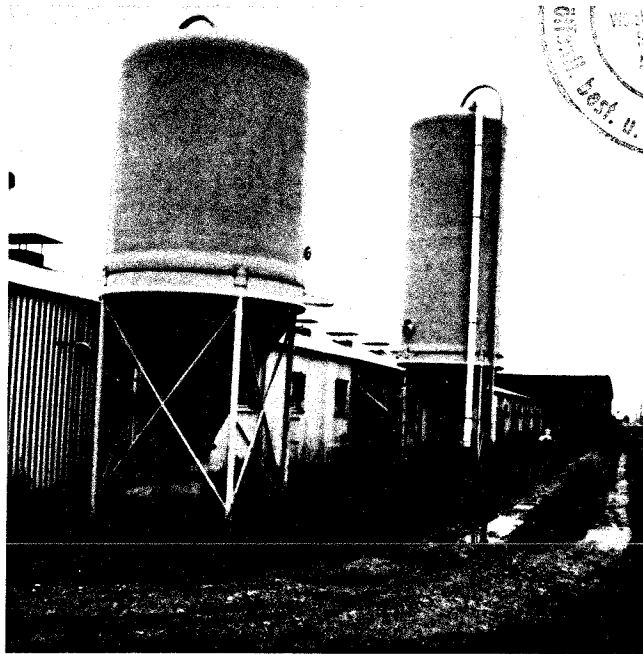


Bild 84  
Schüttgutsilos zur Lagerung von Kraftfutter, 14 a alt

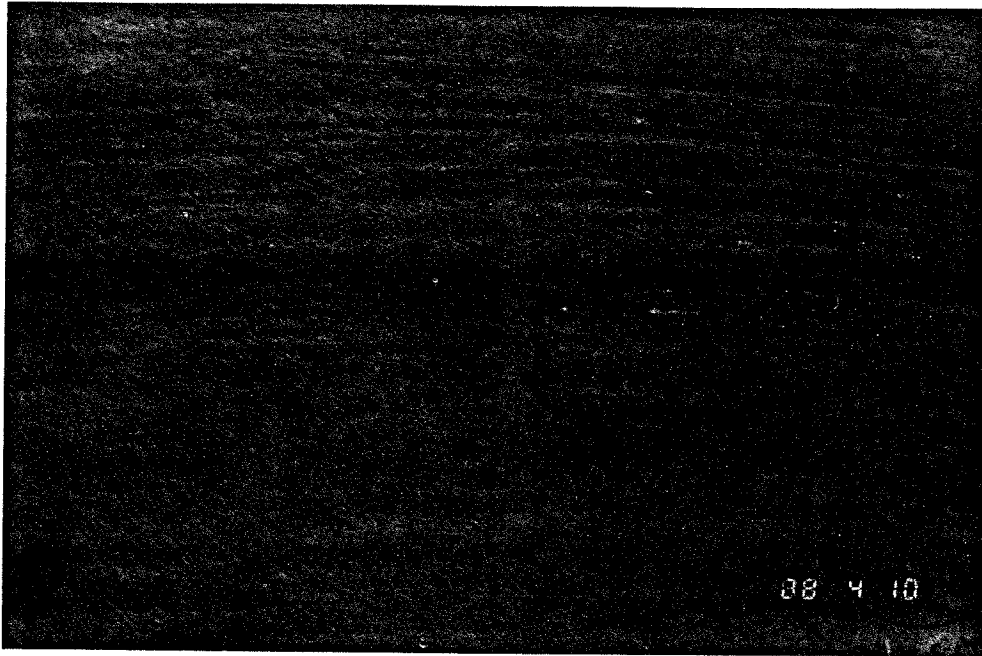


Bild 85 Äußere Oberfläche (Ausschnitt) des Silos von Bild 79  
(rechts) im Zylinderbereich

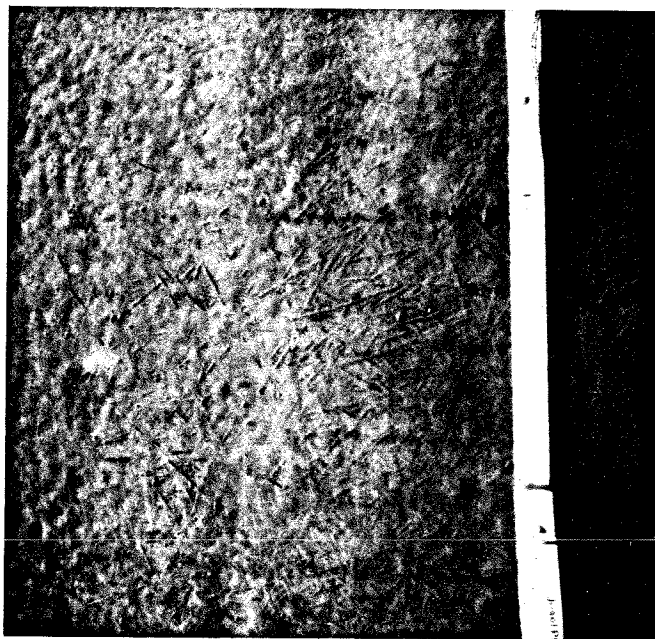


Bild 86 Äußere Oberfläche des Gärfuttersilos  
von Bild 20 (links)

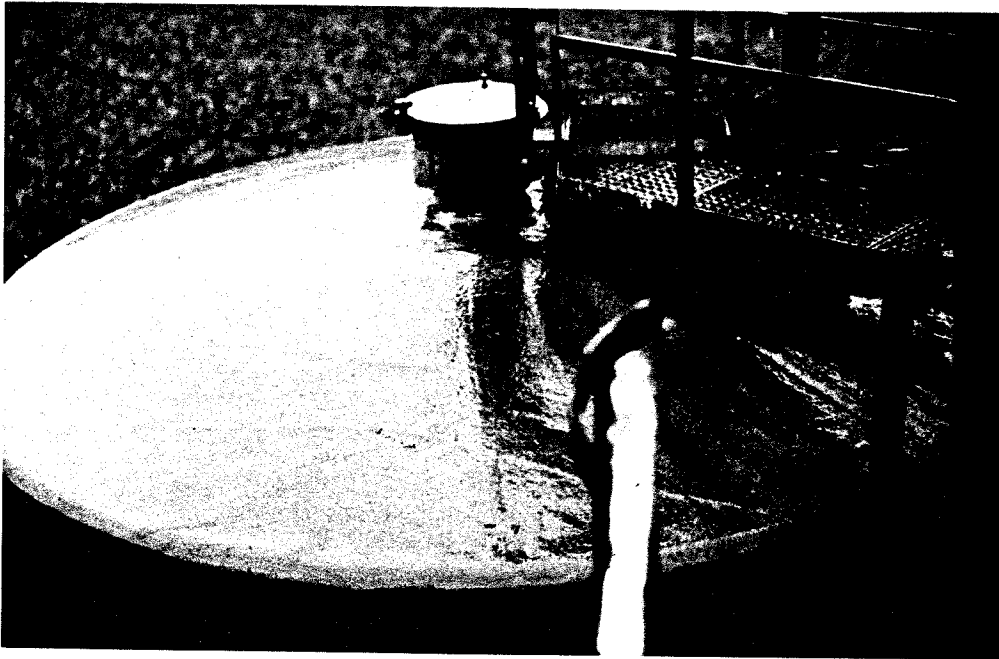


Bild 87 Dach eines Gärfuttersilos

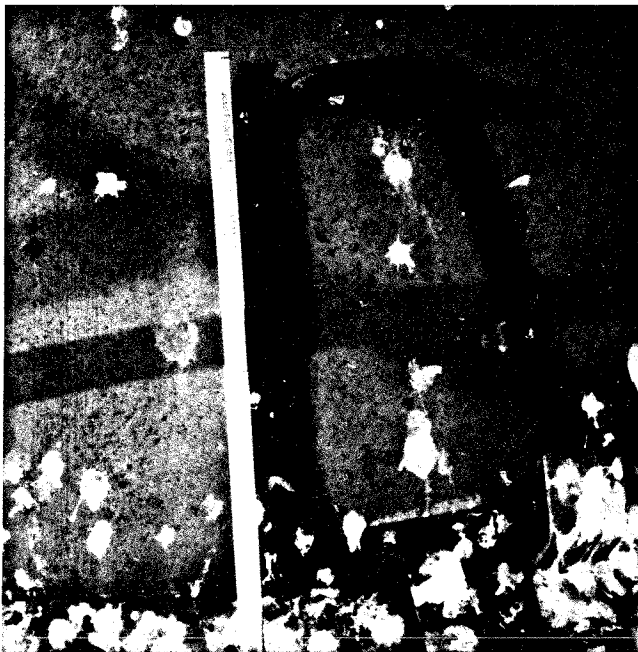


Bild 88  
Dach-Deckel mit Griff aus Stahl eines  
Gärfuttersilos

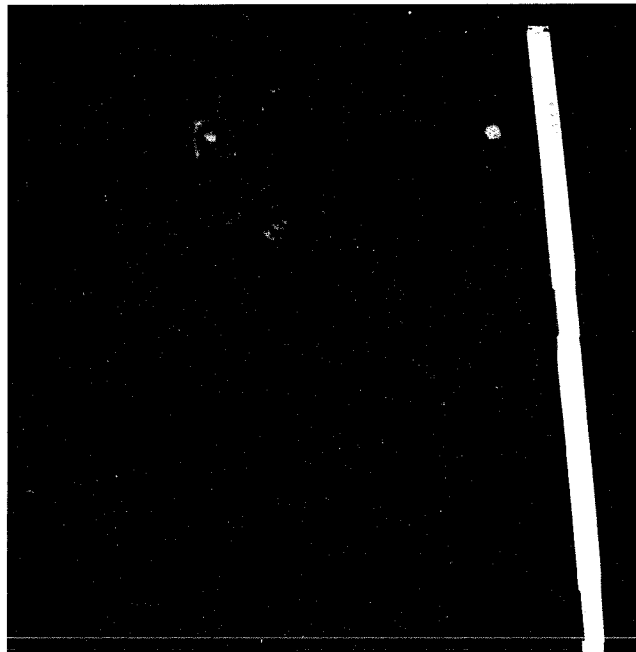


Bild 89  
Dach-Deckel mit Griff aus GF-UP eines  
Gärfuttersilos



Bild 90  
Luke eines Gärfuttersilos

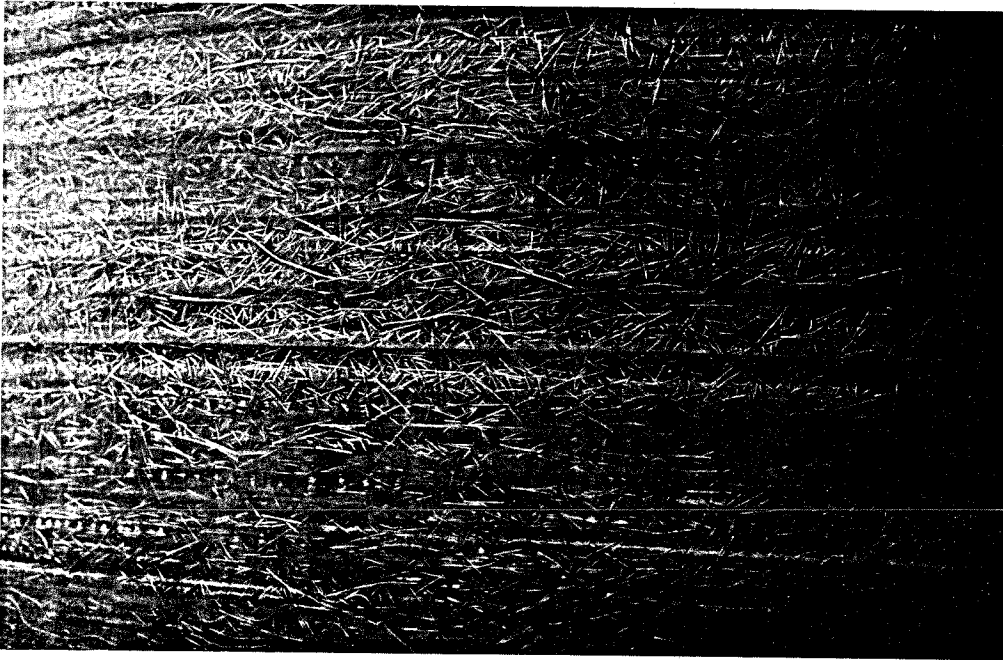


Bild 91 Sichtbarwerden der Glasfasern, sog. "Zeichnen", unter der Oberfläche, Wirrfaserschicht außen

## 6.2 Äußerer Zustand, Typische Beispiele

In den Bildern 18 (14 a alt), 19 (14 a), 20 (rechts 15 a, links 12 a), 23 (12 a), 78 (13 a), 79 (18 a), 80 (15 a), 81 (13 a), 82 (16 a, 6 a, 14 a), 83 (14 a) und 84 (14 a) sind Silos dargestellt, deren äußerer Zustand die typischen Auswirkungen entsprechend den Verwitterungsstufen nach Abschnitt 6.1. zeigte.

Bei den Silos auf den Bildern 19, 20 (linkes Silo), 23, 79 (rechtes Silo) und 80 wurden außer Verschmutzungen, die sich relativ leicht entfernen ließen, nur Verwitterungen entsprechend Stufe I erkennbar. Die Darstellungen verschiedener Details aus diesen Silos bzw. anderen gleicher Produktionsstätte und vergleichbaren Alters (Bilder 85, 86, 87, 88, 89, 90, 112 und 113) verdeutlichen diese Feststellung, die sich sowohl auf Zylinder und Trichter als auch auf die Dächer bezieht.

Bei Silos entsprechend den Bildern 18 und 78 war im Zylinderbereich das "Zeichnen" entsprechend Stufe II feststellbar (Bild 91). Inwieweit entsprechende Einflüsse auch bei den vorstehenden Beispielen für Stufe I vorhanden waren, konnte wegen der Einfärbung der Schutzschichten nicht festgestellt werden.

Für alle Silos der Stufen I und II gelten folgende Gemeinsamkeiten hinsichtlich Laminataufbau und Schutzschicht: Die Lamine sind an der Außenseite mit einer abschließenden Wirrfaserschicht mit mindestens  $150 \text{ g/m}^2$  Flächengewicht versehen und ihre Schutzschichten sind mindestens 0,1 mm und höchstens 0,6 mm dick (siehe auch Abschnitt 6).

Es wurden keine Unterschiede darin gefunden, ob die Schutzschicht als gel-coat (auf der Form anliegenden Seite) oder als Schlußstrich (top-coat, auf der abgewandten Seite) hergestellt wurde (siehe Abschnitt 4).

Bei der Oberfläche des Silos nach Bild 92 war keine äußere Wirrfaserschicht vorhanden, der Zustand entsprach Stufe II.

Die Bilder 20 (rechtes Silo), 81, 82 und 83 zeigen Beispiele von Silos mit Verwitterungsstufen III bis IV. In den Detailbildern (93 bis 99 und 114) werden die Auswirkungen fehlender oder unzureichender Schutzschichten bzw. nicht vorhandener äußerer Wirrfaserschichten sichtbar.

Bild 20 zeigt 2 Gärfuttersilos, die ursprünglich etwa gleich dunkelgrün eingefärbt waren. Sie waren den gleichen Witterungsbedingungen ausgesetzt und zwar das rechte seit 15 und das linke seit 12 Jahren.

Beide waren auf der bei der Herstellung der Form gegenüberliegenden Laminatseite bewittert, jedoch war das rechte ohne, dagegen das linke mit einer besonderen Schutzschicht versehen. Während bei dem rechten die Wirrfasern freiliegen, verstärkt an der bewitterten Seite (Bild 93), wurden beim linken keine Fasern gefunden. Die Farbe war lediglich verblaßt und zwar stärker im Bereich intensiver Sonneneinstrahlung (Bild 86). Im Bereich des gepreßten Flansches (Bild 93) war die Oberfläche teilweise harzreicher, wodurch hier deutlich weniger Fasern freiliegen.

Wenn der Laminataufbau mit einer Wirrfaserschicht beginnt, wirken sich freiliegende Glasfasern nur geringfügig auf mechanische Kennwerte (siehe w.u.) aus, da diese Schichten aus geschnittenen Rovings mit einer Schnittlänge unter 50 mm relativ harzreich sind und daher der Errosionsprozeß vergleichsweise langsam verläuft und nicht sehr tief eindringt.

Wird dagegen eine Schicht aus fortlaufenden Fasern, z.B. aus Rovingewebe oder Wickelrovings, freigelegt (Bilder 96 und 97), so ist mit einer beschleunigten Zerstörung größerer Anteile des Laminatquerschnitts zu rechnen, zumal in solchen Schichten die Fasern meist sehr eng beieinander liegen, um hohe Glasgehalte im Laminat zu erzielen.



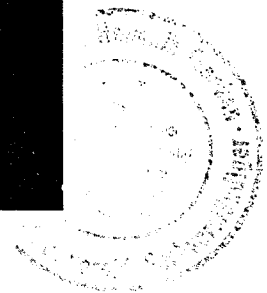
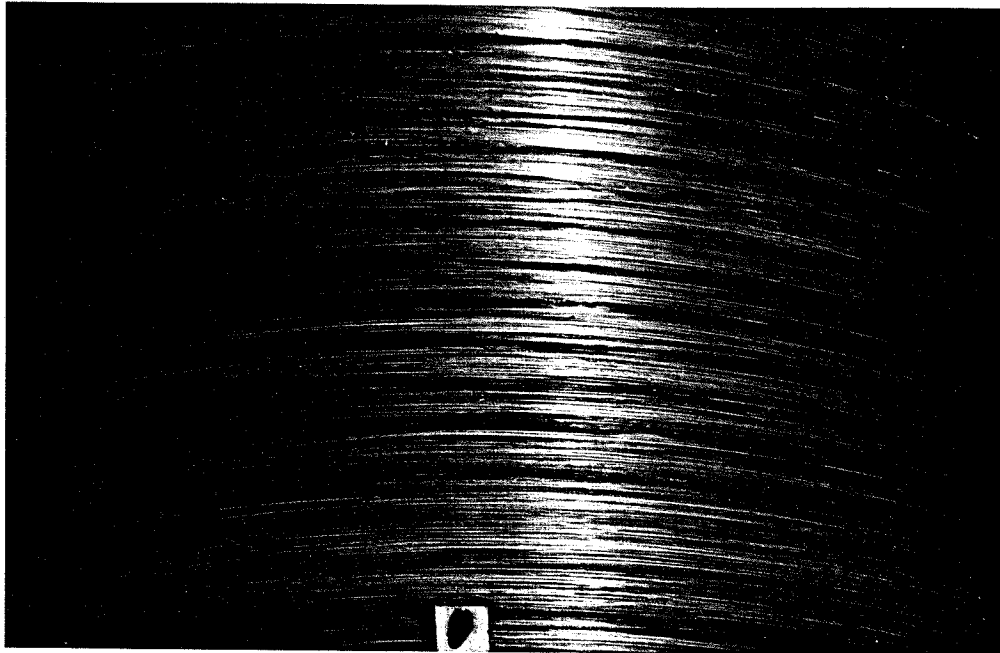


Bild 92 Sichtbarwerden der Glasfasern unter der Oberfläche, Wickelrovingschicht außen

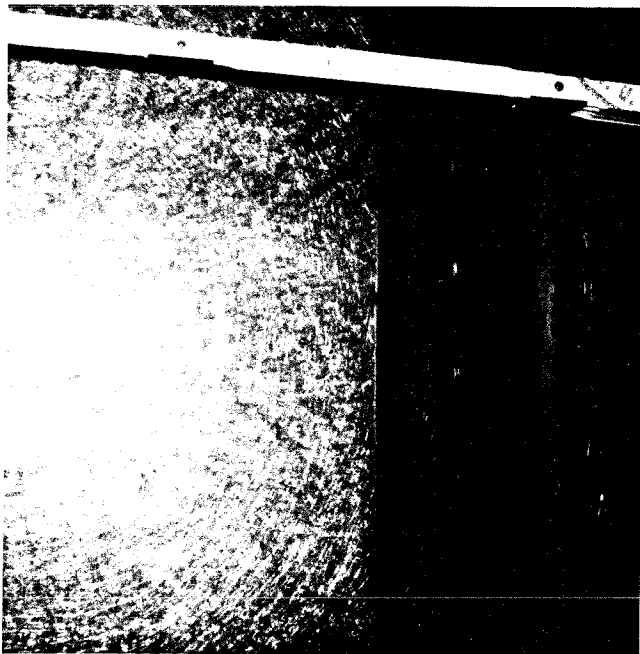


Bild 93  
Ausschnitt aus rechtem Silo von Bild 20  
mit freiliegenden Wirrfasern



Bild 94  
Trichter/Auflagerbereich des Silos von  
Bild 81 freiliegenden Wirrfasern

Dipl.-Ing. Helmut Franken  
1952

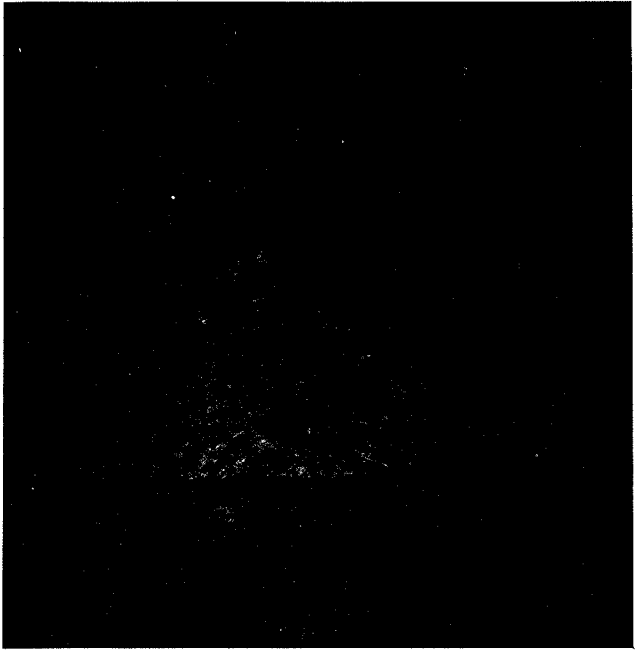


Bild 95  
Trichterbereich eines Schüttgutsilos  
mit freiliegenden Wirrfasern

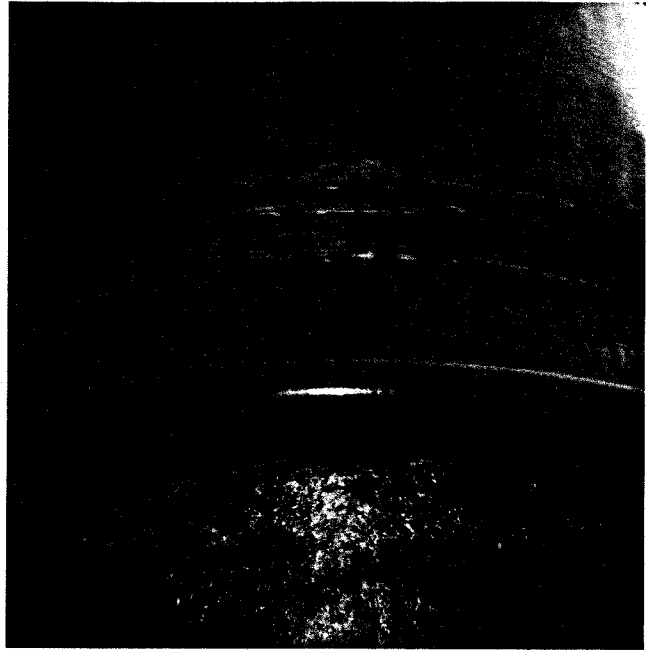


Bild 96  
Auflagerbereich eines Schüttgutsilos  
mit freiliegenden Wickelrovings

Dipl.-Ing. Helmut Franken  
1952



Bild 97 Zylinderbereich eines Schüttgutsilos mit freiliegendem Gewebe

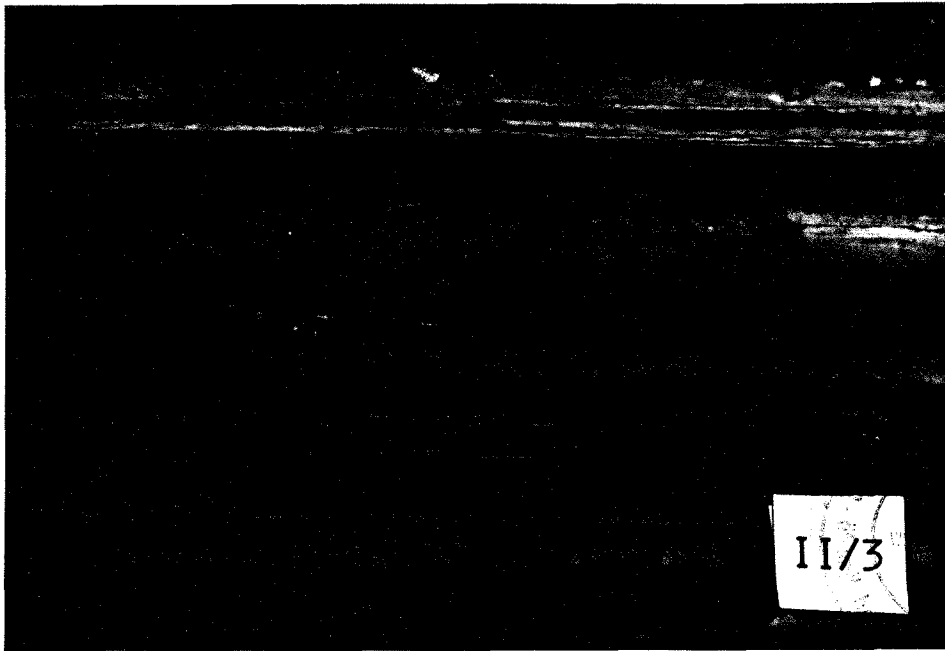


Bild 98 Risse und Delamination in der äußeren Rovingschicht

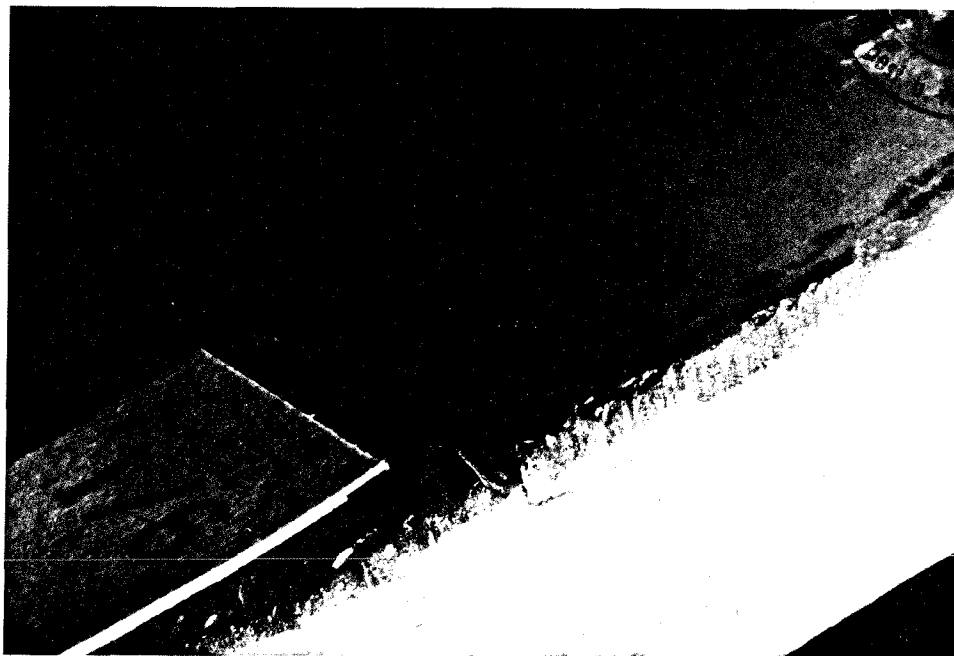


Bild 99 Risse und Delamination in der äußeren Rovingschicht, Detail (Querschnitt) von Bild 98

Die Zerstörung der Oberfläche ist großflächiger, Wasser dringt entlang der Fasern tiefer und schneller ein und zu den beschriebenen Angriffen auf das Glas und die Haftung Faser/Matrix, kommen mechanische Beanspruchungen bei Frost/Tau Wechseln im Herbst und Winter durch die Volumenzunahme des eingedrungenen Wassers hinzu. Die Vergrößerung beträgt vom flüssigen zum gefrorenen Zustand 8,3 %, wodurch Risse senkrecht zu den Fasern und Delaminationen einzelner Schichten entstehen /101/.

Die Risse in den Bildern 98 und 99 wurden an einem Silo gefunden, dessen Feinschicht insbesondere im Ribbereich über 1 mm dick war und das ohne äußere Wirrfaserschicht, die als "Ribstopper" hätte wirken können, hergestellt wurde.

Unter der Feinschicht lag eine Wickelrovingschicht mit hoher flächenbezogener Glasmasse. Wenn keine besonderen Maßnahmen hinsichtlich der Zusammensetzung des Harzes der Reinharzschicht (z.B. Elastifizierung) getroffen werden, muß davon ausgegangen werden, daß sie unter relativ kleinen Dehnungen reißt. Im berichteten Fall wurden die Risse allein durch temperaturbedingte Dehnungen ausgelöst, sie liefen durch die Rovingschicht entlang der Wickelrichtung durch, wurden erst von der folgenden Wirrfaserschicht gestoppt und führten zu einer fortschreitenden Delamination, d.h. die Rovingschicht hebt sich ab. Das Silo war zum Zeitpunkt der Aufnahmen 9 Jahre alt.

Daß ein optimaler Aufbau des Laminates alleine noch nicht ausreicht, einen ausreichenden Witterungsschutz zu gewährleisten, wenn insbesondere die Schutzschichten fehlerhaft hergestellt werden, zeigen die Beispiele der Bilder 79 (linkes Silo), 100 und 101. Während das Silo auf der rechten Seite von Bild 79 wie im Allgemeinen die Silos aus dieser Produktion einen recht guten Zustand zeigen (Stufe I), liegen in Teilbereichen (Bild 100) die Wirrfasern frei (Stufe III). Offensichtlich wurden auch schon Teilflächen mit einem nachträglichen Anstrich versehen. Wahrscheinlich war das Harz der Schutzschicht, die als Schlußstrich aufgebracht wurde, nicht ausreichend ausgehärtet (z.B. durch Luftinhibierung wegen fehlenden Paraffinzusatz im Harz).

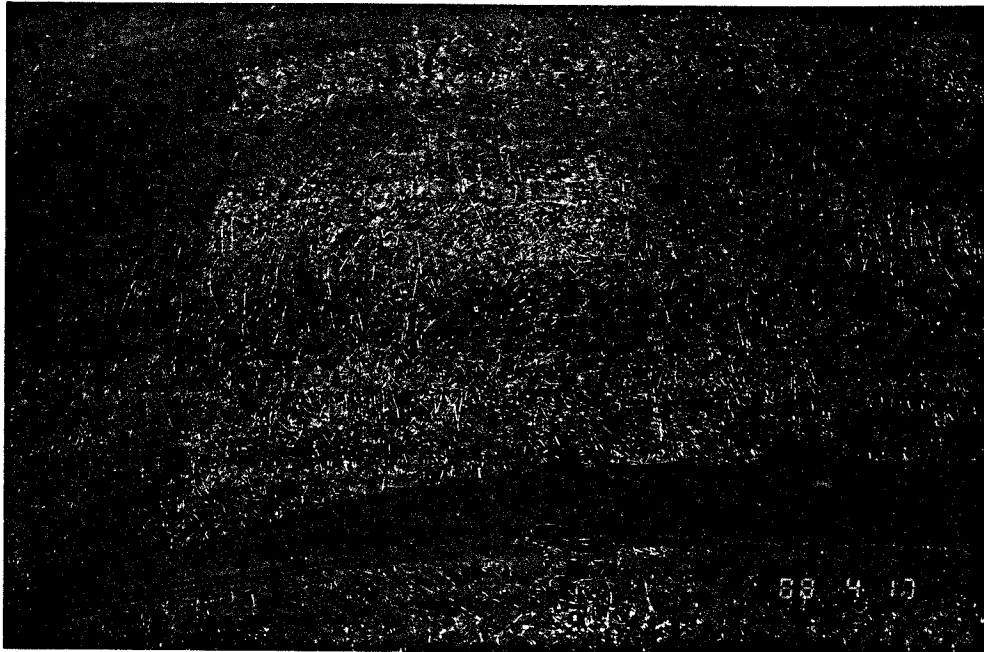


Bild 100 Ausschnitt der Oberfläche im Zylinderbereich des Silos auf Bild 79 (links)

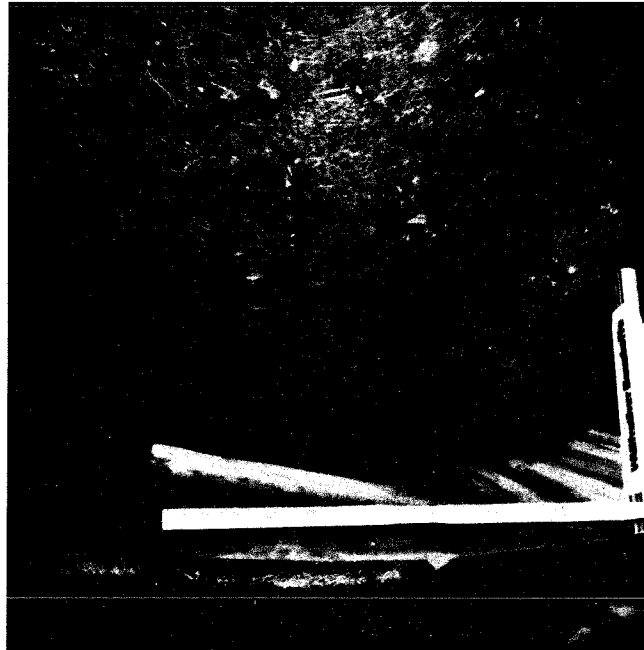
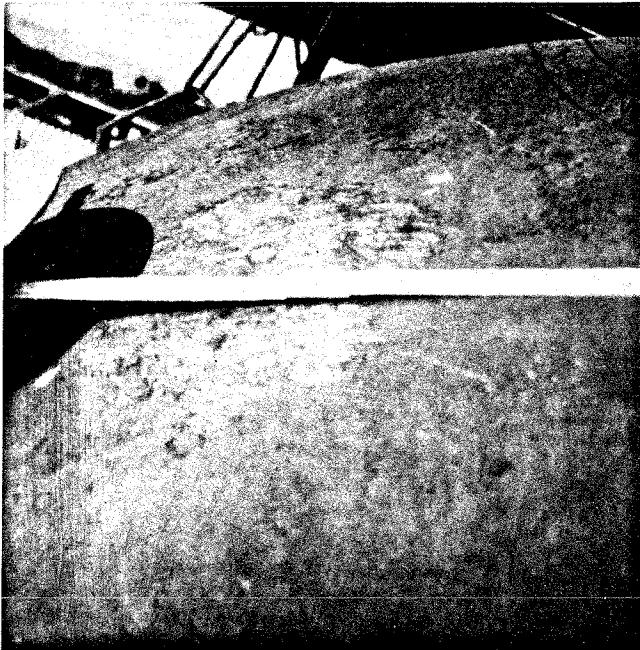
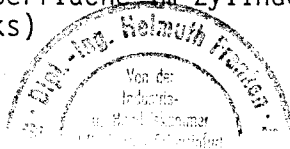


Bild 101  
Herstellbedingte Schadstelle in der Schutzschicht des Daches eines Gär-futtersilos

Bild 102  
Durch Hammerschläge hervorgerufene Schadstellen im Trichterbereich eines Schüttgutsilos

Auch die in den Bildern 82 und 83 nur in Teilbereichen des Zylinders freiliegenden Glasfasern könnten auf solche Gründe zurückzuführen sein. Die auffallend braune Färbung der Lamine läßt auf ein Amin-Härtungssystem schließen, wodurch Luftinhibierungen begünstigt werden. Die Schadstelle im Dach eines Gärfuttersilos (Bild 101) ist wahrscheinlich durch Herstellfehler entstanden, ansonsten waren die Dächer aus dieser Produktion ohne Beanstandungen (Bilder 87 bis 89).

Unterschiede hinsichtlich unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen konnten nicht festgestellt werden. Die Aufstellungsorte der untersuchten Silos lagen über die Niederlande und das Bundesgebiet Deutschland verteilt, von Nordseenähe bis Süddeutschland, in Industriegebieten ebenso wie in ländlicher Umgebung.

### 6.3 Laminatoberfläche im Innern

Durch mechanische Einwirkung üblicher körniger und staubförmiger Schüttgüter sind bei ordnungsgemäßem Betrieb der Silos keine Beschädigungen von Schutzschichten erfaßt worden, die ein der Bewitterungsstufe IV vergleichbares Ausmaß erreicht hätten (Bilder 115, 116 und 117). So wurden bei Schüttgutsilos, die zur Lagerung eines Gemischs aus Salz und gebrochenem Quarzsand eingesetzt wurden, nach mehr als zehnjährigem Betrieb insbesondere im Übergangsbereich Trichter/Zylinder nur Riefen und Schürfspuren gefunden, die jedoch nicht bis zum tragenden Laminatquerschnitt durchgingen. Schäden wurden jedoch bei kohäsivem Schüttgut festgestellt, wenn wegen fehlender Austraghilfen festsitzendes Schüttgut durch z.B. Hammerschläge von außen wieder zum Fließen gebracht wurde, eine leider oft vorkommende aber nicht gerade fachgerechte Methode (Bild 102).

In den untersuchten Gärfuttersilos mit dem Laminataufbau nach Bild 64 und ausreichender Schutzschicht waren ebenfalls keine Fehler zu erkennen (Bild 103).

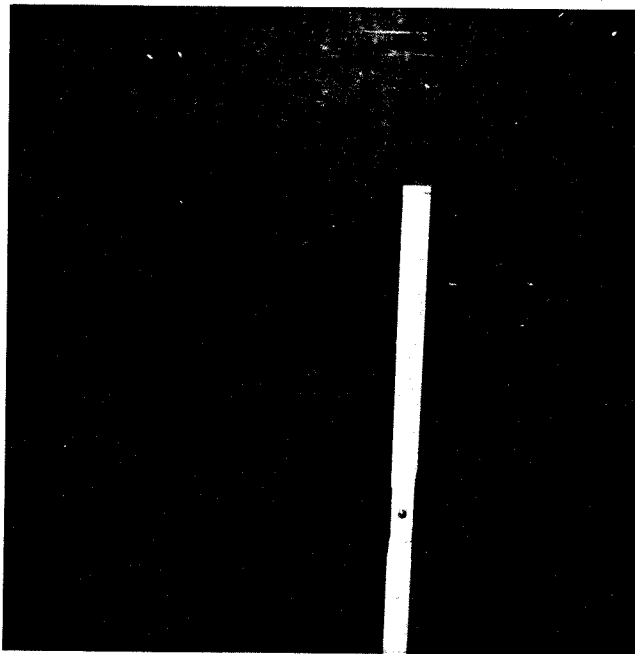


Bild 103  
Oberfläche im Innern eines Gärfuttersilos,  
Alter 18 a

#### 6.4 Lastbedingte Schäden

An keinem der untersuchten Silos wurden optisch Schäden wie Beulen, Risse oder ähnliches aus der Einwirkung von Silo-, Wind- oder Schneelasten gefunden.

#### 6.5 Werkstoffprüfungen

In den Bildern 104 bis 111 sind wichtige Kennwerte für die Bemessung von GF-UP-Bauteilen zusammengestellt. Sie erfassen das Verhalten bei kurzzeitiger Belastung sowie den Einfluß der Belastungsdauer von Laminaten aus Schüttgutsilos, die zwischen 12 und 16 Jahren im Einsatz waren.

Erläuterungen zu den Bildern 104 bis 111

- $E_R, \beta_R$  : theoretisch ermittelter Wert für Normalkraftbeanspruchung
- $E, \beta$  : aus Kurzzeitzugversuch
- $E_{CO}^*$  : aus Zeitstandbiegeversuch (Dreipunkt-) errechnet, Querkrafteinfluss vereinfacht berücksichtigt
- $$E_{CO}^* = 1,1 \cdot E_{1h} (f_{1h}/f_{24h})^{-1,4}$$
- $E_{CO}$  : aus Zeitdehnlilie durch Intrapolation ermittelt, Querkrafteinfluss vereinfacht mit Faktor 1,1 berücksichtigt
- $Q$  : Werte ohne Berücksichtigung des Querkrafteinflusses
- $\varphi_t^*$  : aus Zeitstandbiegeversuch (Dreipunkt-) errechnet, Querkrafteinfluss vereinfacht berücksichtigt
- $$\varphi_t^* = 0,9 (f_{1h}/f_{24h})^{-0,5} - 1$$
- $\varphi_t, \varphi_{10^5}$  : aus Zeitdehnlilien durch Intra- bzw. Extrapolation ermittelt, Querkrafteinfluss vereinfacht berücksichtigt
- $$\varphi_t = 0,9 E_{CO}/E_C/2 \cdot 10^5 - 1 ; \varphi_{10^5} = 0,9 E_{CO}/E_C/10^5 - 1$$
- $T, Z, D$  : Entnahmestellen (T = Trichter, Z = Zylinder, D = Dach)
- $N$  : An neuem Laminat ermittelt
- $\perp$  : senkrecht zur Hauptverstärkungsrichtung (Wickelrichtung)
- $\parallel$  : parallel zur Hauptverstärkungsrichtung (Wickelrichtung)
- $F_{si}, F_{sa}$  : Feinschicht auf der Formseite (gel-coat); Feinschicht außen (Schlußstrich, top-coat)

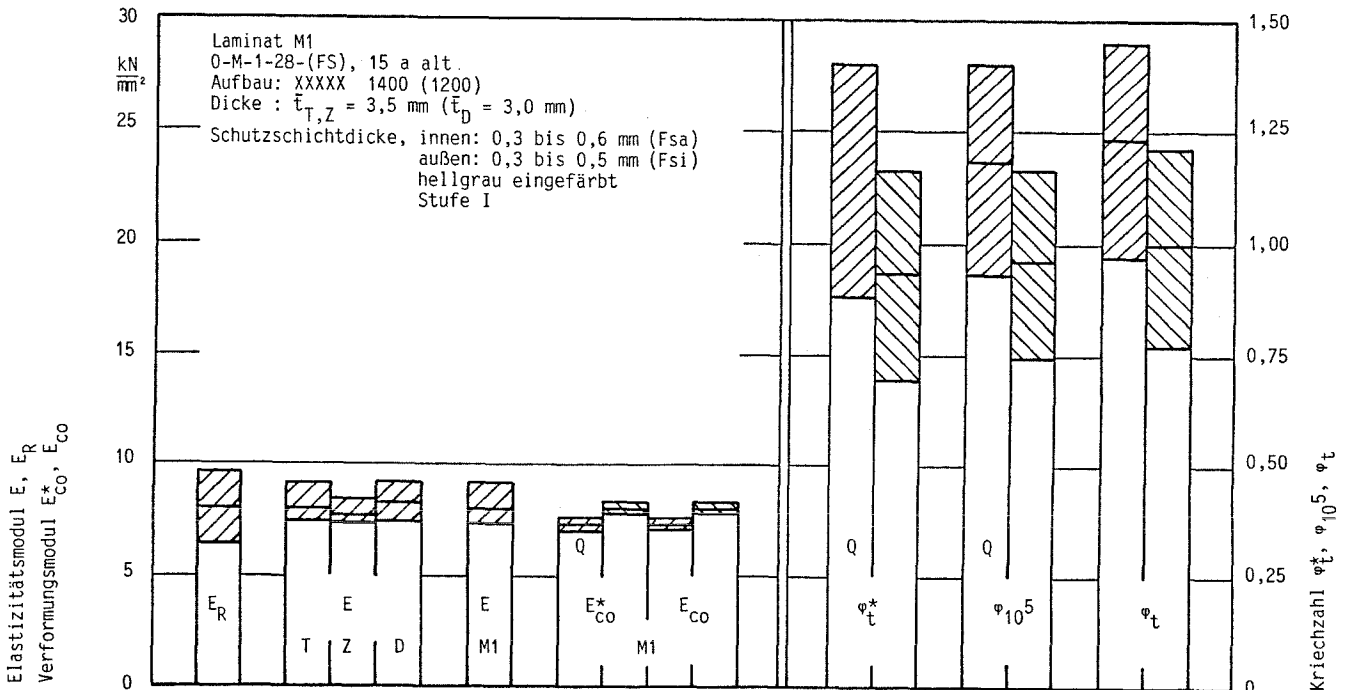


Bild 104 Verformungsverhalten eines Wirrfaserlaminates (M1) nach langjährigem Einsatz



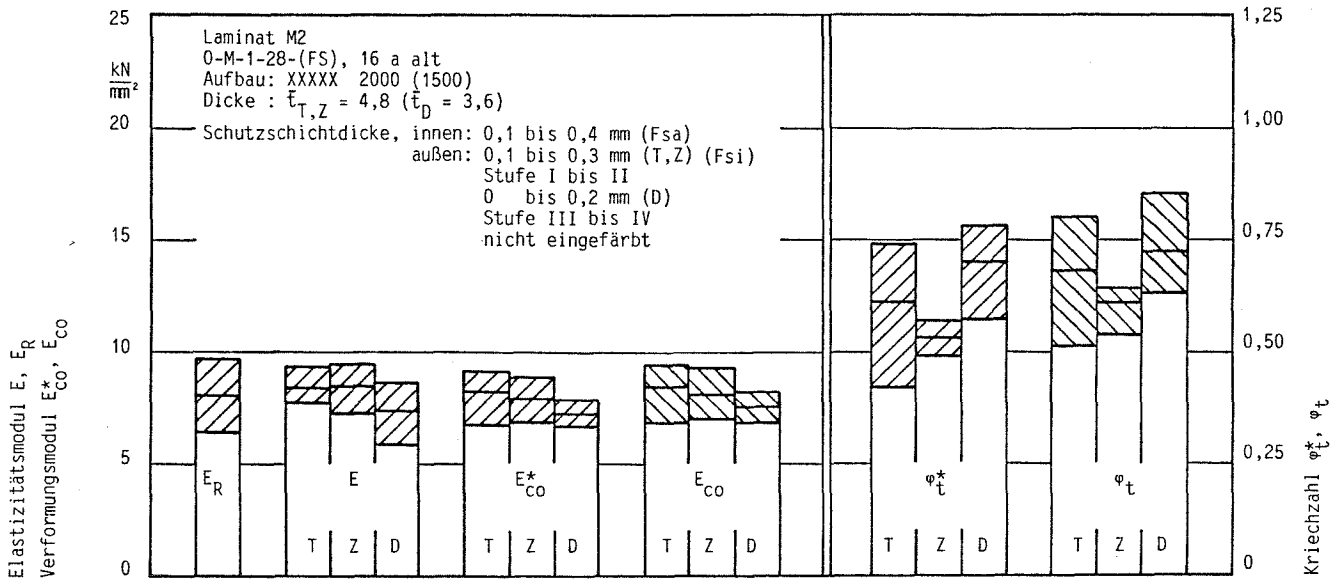


Bild 105 Verformungsverhalten eines Wirrfaserlaminates (M2) nach langjährigem Einsatz

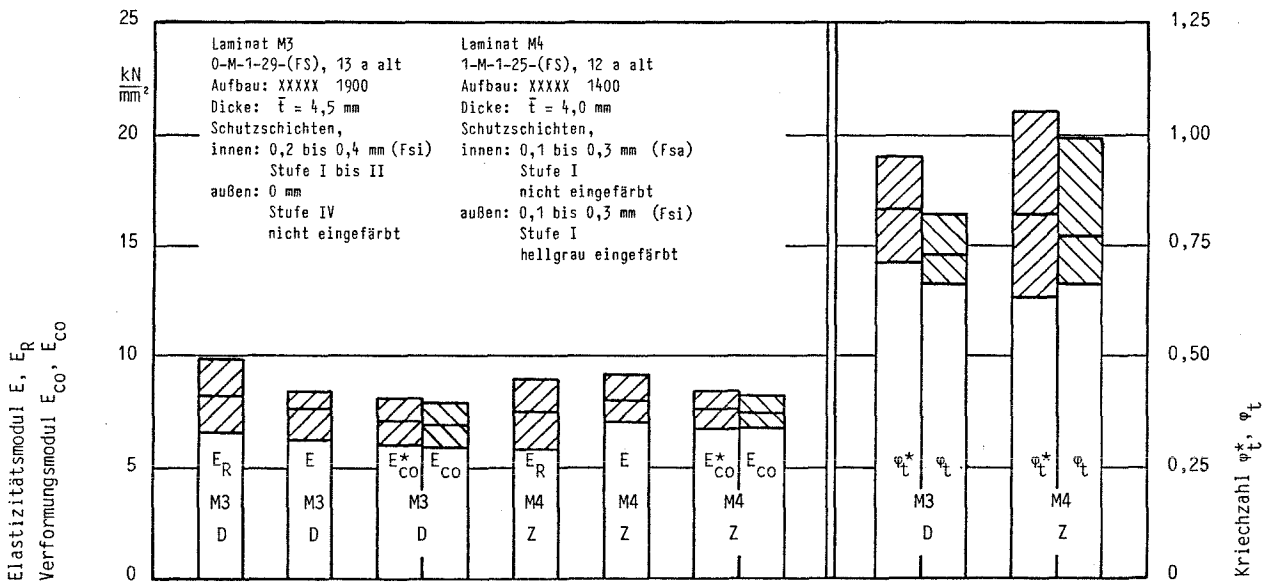


Bild 106 Verformungsverhalten von Wirrfaserlaminaten (M3 und M4) nach langjährigem Einsatz

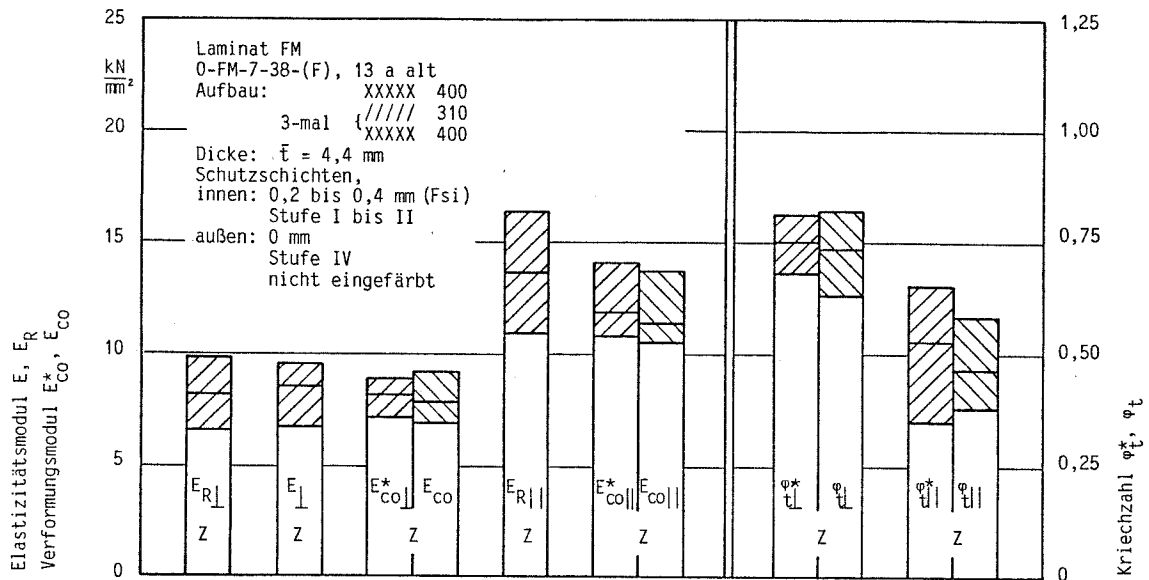


Bild 107 Verformungsverhalten eines Wickellaminates (FM) nach langjährigem Einsatz

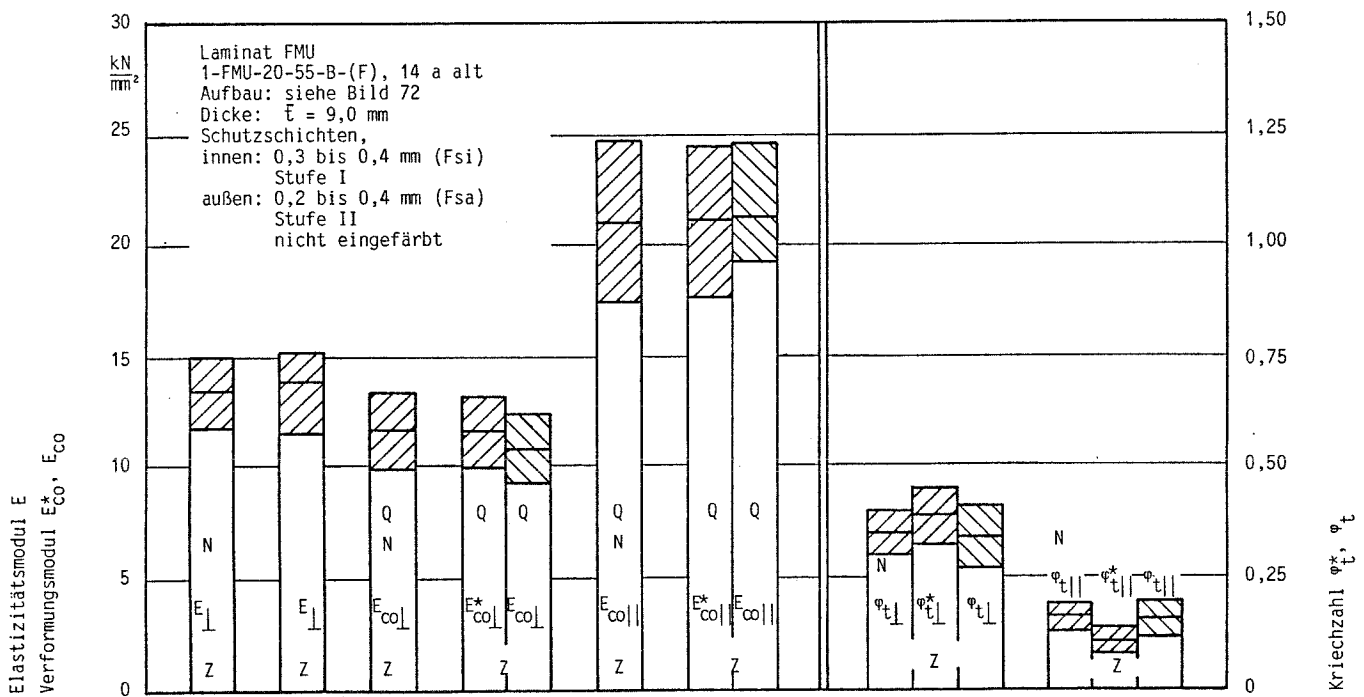


Bild 108 Verformungsverhalten eines Wickellaminates (FMU) nach langjährigem Einsatz

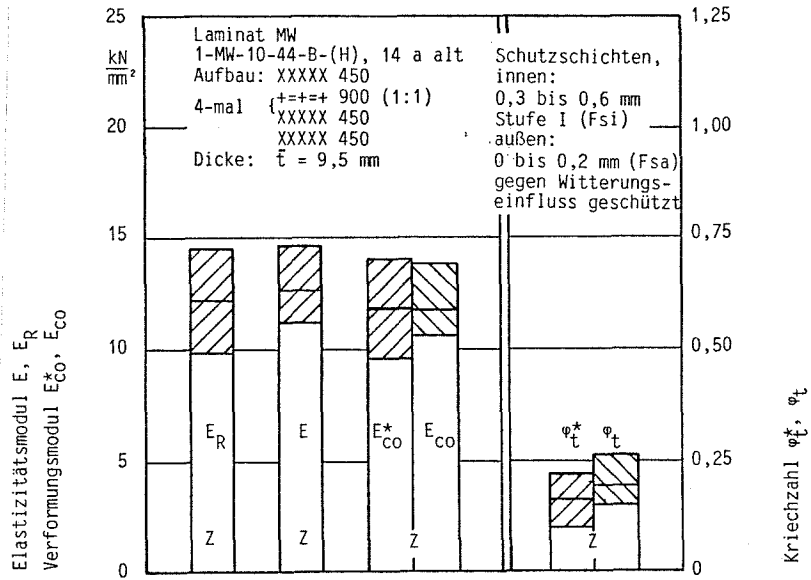


Bild 109 Verformungsverhalten eines Mischlaminates (MW) nach langjährigem Einsatz

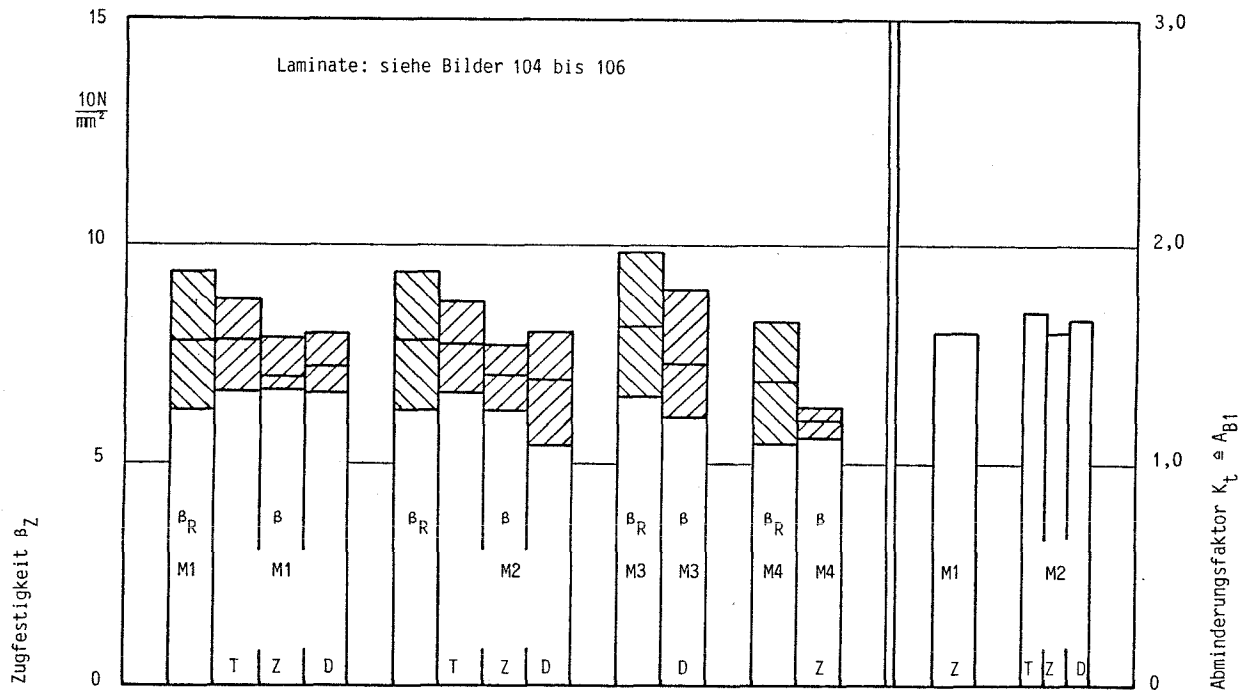


Bild 110 Bruchverhalten (Zug) von Wirrfaserlaminaten nach langjährigem Einsatz

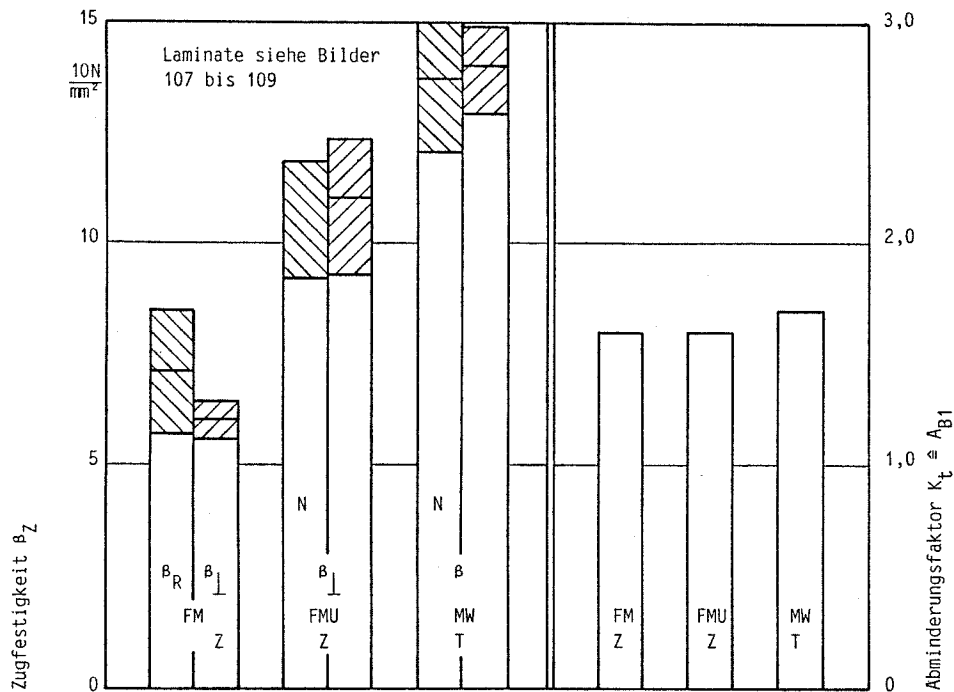


Bild 111 Bruchverhalten (Zug) von Wickel- und Mischlaminaten nach langjährigem Einsatz

Sowohl hinsichtlich ihres Aufbaus (Wirrfaser-, Misch- sowie Wickellamine mit und ohne Axialverstärkung) als auch der Herstellverfahren (Faserspritz-, Handauflege- und Wickelverfahren) sind die Lamine typisch für Silos. Die UP-Harze (Gruppe 0), die Dicke der Schutzschichten (soweit überhaupt vorhanden) und die innen bzw. außen liegenden Wirrfaserschichten entsprachen teilweise noch nicht heutigen Forderungen.

### 6.5.1 Belastungsverlauf

In den Silos waren Futtermittel (Lamine M1 bis M4 und FM) sowie Getreidemehl (FMU, MW) gelagert. Sie wurden regelmäßig in Abständen von etwa 1 Woche bis 4 Wochen bis auf relativ kleine Reste geleert und wieder gefüllt.

Die Beanspruchungen, denen die Laminate während ihres Einsatzes ausgesetzt waren, konnten nicht genau erfaßt werden. Man kann jedoch von folgenden relativen Verhältnissen ausgehen, wenn man die vernachlässigbaren Schnittkräfte aus Eigengewicht außer acht läßt:

#### 6.5.1.1 Dächer

Die Dächer waren zeitweise (Schnee) durch Druckkräfte beansprucht, die jedoch sehr gering waren, da die Dächer bei nur sehr kleinen Verformungen beulen.

#### 6.5.1.2 Zylinder

Die Zylinder sind in Längsrichtung aus gleichem Grund ebenfalls vorwiegend nur von relativ kleinen Druckkräften aus den Wandreibungslasten beansprucht, außer in den Bereichen der Auflager auf der Unterkonstruktion. Hier konnten jedoch keine für Prüfungen geeignete Probekörper entnommen werden. Durch Wind treten im Zylinder in dieser Richtung nur sehr geringe Zugkräfte auf.

In Umfangsrichtung entstehen durch den Horizontaldruck aus dem Schüttgut Zugkräfte, die jedoch im Vergleich zur Zugfestigkeit der Laminate verschwindend gering sind.

#### 6.5.1.3 Trichter

Im Trichter treten vergleichsweise hohe Zugkräfte aus der Schüttgutwirkung auf. Es ist jedoch unwahrscheinlich, daß sie zur Überschreitung von Reißgrenzen (siehe Abschnitt 5.1) geführt haben.

Bei den Laminaten, die sowohl aus dem Trichter, dem Zylinder als auch dem Dach eines Silos entnommen werden konnten (Bilder 104, 105 und 110), wurden keine signifikanten Unterschiede an den verschiedenen Entnahmestellen bezüglich der unterschiedlichen Belastung gefunden.

#### 6.5.2 Zustand der Laminatoberfläche

Die bewitterten Seiten konnten bei den Laminaten M1 (Bild 112) und M4 der Stufe I, bei den Laminaten M2 (Bild 113, Trichter und Zylinder) der Stufe I mit Beginn der Stufe II, beim Laminat FMU der Stufe II (vergleichbar Bild 91), beim Laminat M2 (Dach) der Stufe III bis IV und bei den Laminaten M3 sowie FM (Bild 114) der Stufe IV zugeordnet werden. Das Laminat MW war gegen direkten Witterungseinfluß geschützt, da das Silo auf einer Standzarge aufgeständert war.

Das Laminat M1 stammt aus einem der Silos von Bild 80, M2 aus einem gleichartigen Silo, M4 aus dem Silo von Bild 23 und FMU sowie MW aus einem Silo entsprechend Bild 18. Die Lamine FM und M3 sind aus dem gleichen Silo entnommen worden.

Auf den vom Silogut beanspruchten Seiten entsprachen die Lamine M1 (Bild 115), M4, FMU und MW der Stufe I sowie die Lamine M2 (Bild 116), M3 und FM (Bild 117) der Stufe I bis II.

#### 6.5.3 Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten ist sowohl bei kurzzeitiger Beanspruchung als auch bei Dauerlast allgemein nicht oder nur geringfügig bei den Laminaten der Bewitterungsstufen IV (M2D, M3, FM) schlechter geworden, als von neuen, gleichartigen zu erwarten ist.

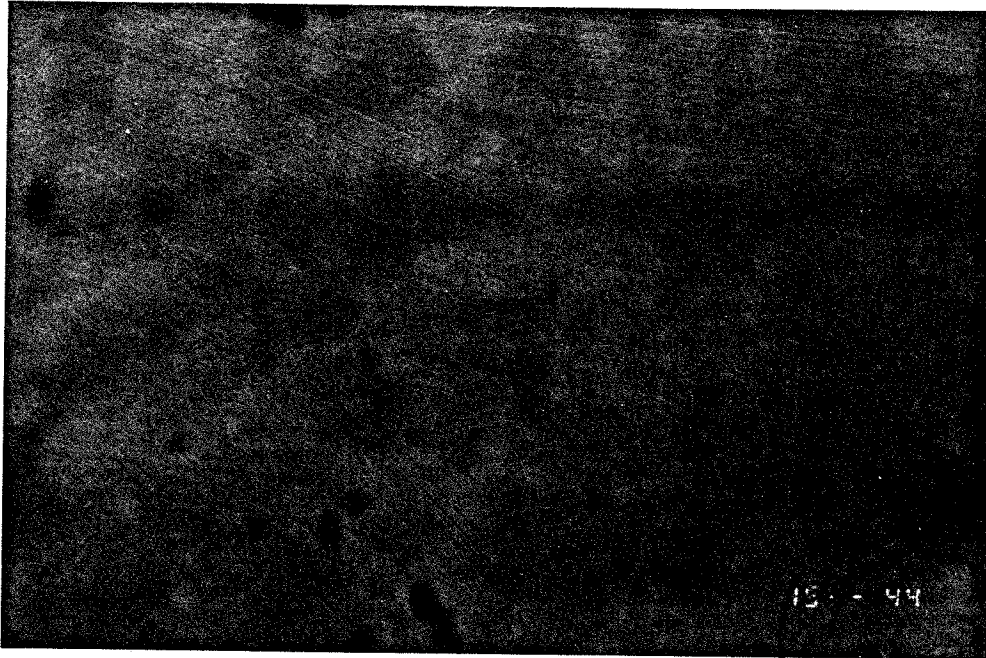


Bild 112 Bewitterte Seite des Laminates M1

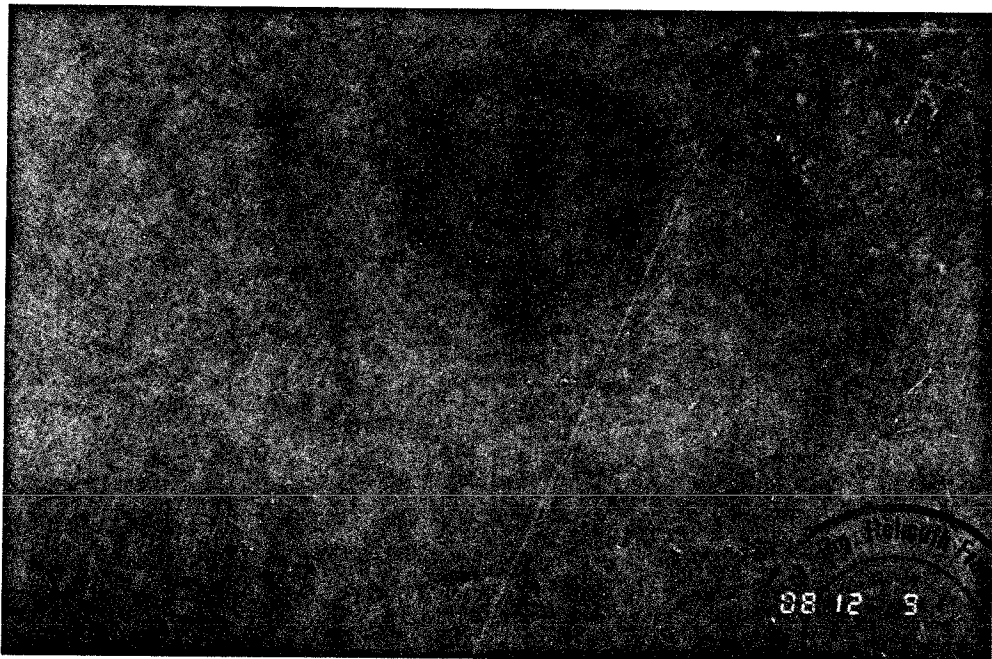


Bild 113 Bewitterte Seite des Laminates M2



Bild 114  
Bewitterte Seite des Laminates FM

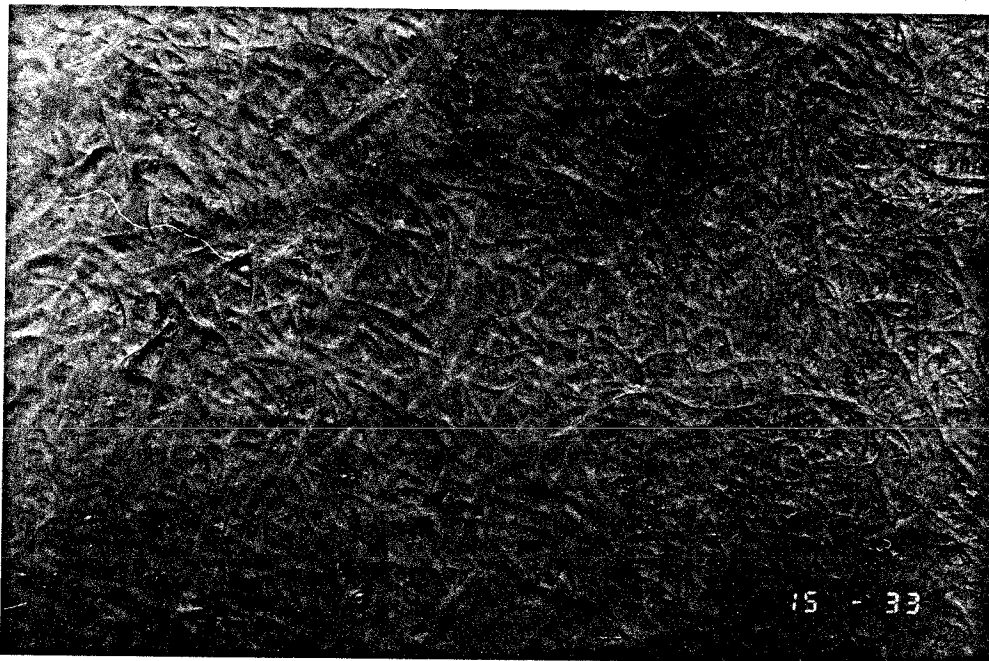


Bild 115  
Vom Schüttgut beanspruchte Seite des Laminates M1



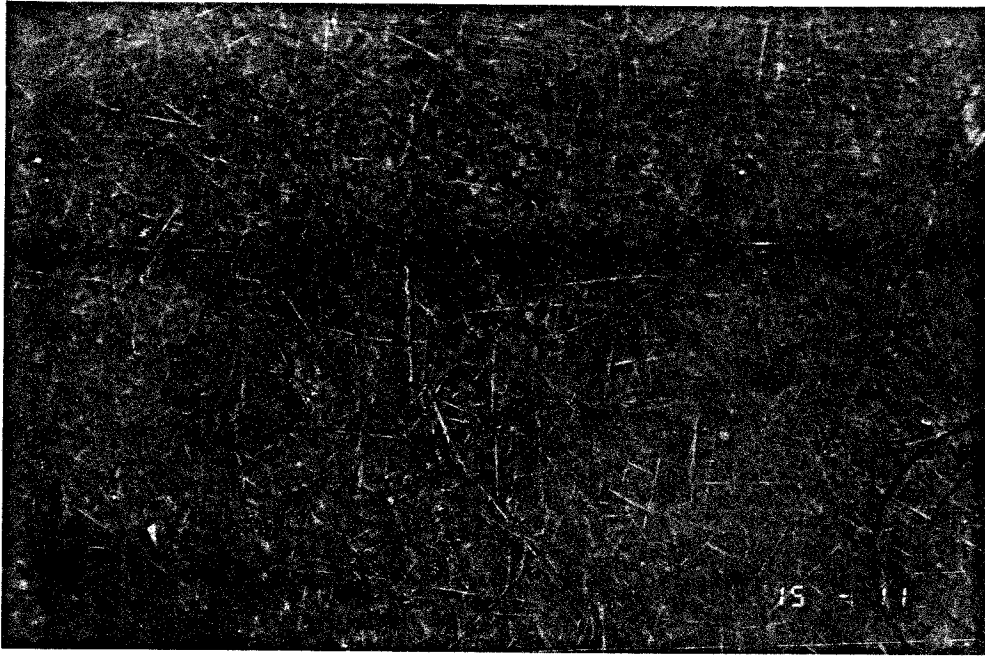


Bild 116 Vom Schüttgut beanspruchte Seite des Laminates M2

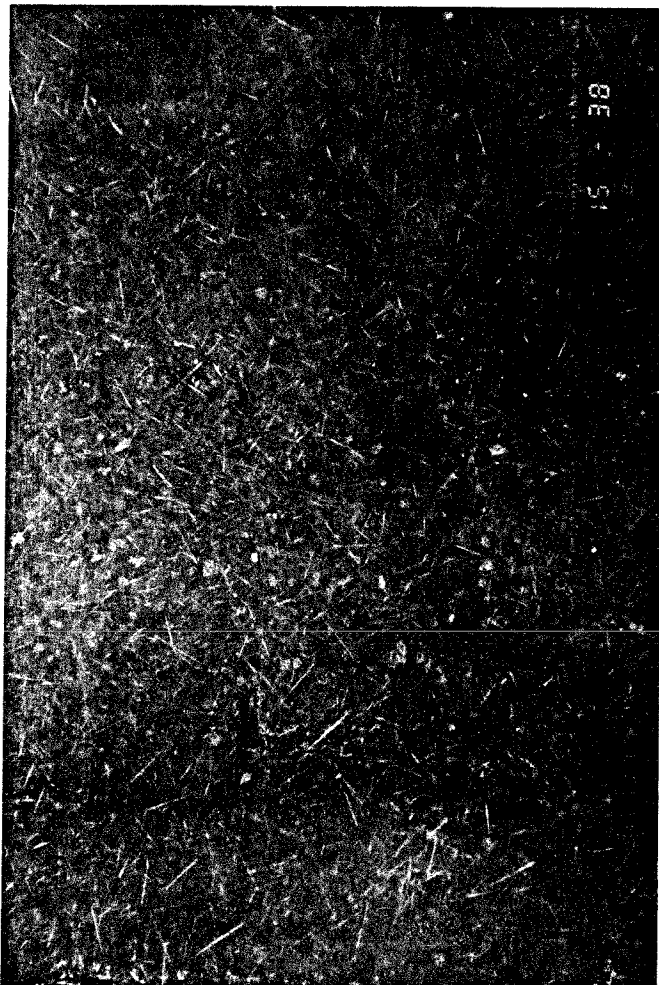


Bild 117  
Vom Schüttgut beanspruchte Seite  
des Laminates FM

Die ermittelten Werte ordnen sich in den Streubereich ein, mit dem für gleichartige Lamine zu rechnen ist. Mit Ausnahme des Laminates M1 sind die Kriechzahlen vergleichsweise niedrig, das könnte auf einen versteifenden ("verspröhdenden") Effekt durch Sonneneinstrahlung (UV-Strahlung) auf die Harzmatrix bei den nicht eingefärbten Laminaten hinweisen. Sowohl die Höhe, als auch die relativ große Streuung bei M1 ist jedoch auch durch die im Vergleich zum tragenden Laminatquerschnitt großen Schutzschichtdicken bedingt, die zudem noch stark variierten.

#### 6.5.4 Bruchverhalten

Auch das Bruchverhalten hat sich mit Ausnahme der Lamine, deren Oberfläche schon beträchtlich abgewittert war (Stufe IV) nicht geändert. Der Abfall der Zugfestigkeit beträgt aber nur etwa 10 %. Die Abminderungsfaktoren  $K_t$ , die auf die Zugfestigkeit der alten Lamine bezogen sind, unterscheiden sich nicht von Werten neuer Lamine.

In Prüfberichten über Laminatprüfungen findet man oft weit höhere Werte. In den meisten Fällen ist das auf eine ungenügende Anzahl von Versuchswerten sowie fehlerhafte Ausführung und Auswertung der Versuche zurückzuführen.

Ein ähnlicher Abfall der Zugfestigkeit wie bei den Laminaten M3 und FM wurde nach 15 bis 17 Jahren Freibewitterung in /99/ an nur 1 mm dicken Wirrfaserlaminaten mit Standardharzen (Gruppe 0 bis 1) ohne Feinschichten festgestellt. Dort wurde auch die Abwitterung gemessen. Bei Laminaten aus Normalharz (ohne besondere Witterungsbeständigkeit) war nach 15 Jahren eine Schicht von ca. 50  $\mu\text{m}$  abgetragen.

An herausgewitterten Glasfasern waren Rinnen in der Matrix vorhanden, sodaß von einer Gesamtschädigung des Laminates bis zu 100  $\mu\text{m}$  ausgegangen werden muß.

Da alleine hierdurch der Festigkeitsabfall von ca. 10 % erklärbar ist, kann angenommen werden, daß sich der Witterungseinfluß bei Wirrfaserlaminaten nur in der obersten Schicht auswirkt. Die Abnahme der Laminatdicke verlief im beobachteten Zeitraum linear, gleiches Verhalten wurde auch in /102/ festgestellt. Setzt man eine weitere lineare Zeitabhängigkeit voraus und berücksichtigt, daß Fein- oder Vliesschichten witterungsbeständiger als Lamine ohne Schutzschichten sind und daher bei ihnen die Abtragung langsamer verläuft, so ist erst in einem Zeitraum von 50 bis 100 Jahren damit zu rechnen, daß Schutzschichten mit mindestens 0,3 mm Dicke völlig abwittern und die oben beschriebene Verwitterungsstufe III erreicht wird. Ein Abfall der mechanischen Kennwerte ist bis dahin nicht zu erwarten.

## 6.6 Lebensdauer

Zu Anfang des Abschnittes 6 wurde der Hinweis in den Zulassungsbescheiden auf die Notwendigkeit eines Anstriches beim Bloßliegen von Glasfasern erwähnt. Es gehört zum Allgemeinwissen, daß bei üblichen Baustoffen (normaler Baustahl, Stahlbeton, Holz, Aluminium, etc) durch Witterungseinflüsse Korrosions-, Erosions- oder Zerfallprozesse ausgelöst werden. Normaler Stahl "rostet" eben und muß dagegen geschützt werden, wobei dieser Korrosionsschutz je nach seiner Qualität in mehr oder weniger langen Zeiträumen erneuert werden muß, wenn das Bauteil nicht "durchrosten" soll (Bilder 80, 88, 93 und 94). Mit dem vorgenannten Hinweis sollten und sollen die Bauherren darauf aufmerksam gemacht werden, daß GF-UP-Bauteile trotz der guten Beständigkeit gegen aggressive Einflüsse ähnlichen witterungsbedingten Korrosionsprozessen ausgesetzt sind, die Schutzmaßnahmen erfordern. Wie das Auftreten von Rost beim Stahl ist das Freiliegen von Glasfasern das Signal zur Erneuerung des Korrosionsschutzes, wenn schwerwiegende Schäden am Bauteil verhindert werden sollen. Der Betreiber der Silos auf Bild 84 (vergleiche die Bilder 82, 83, 96 und 97) hat durch den Anstrich die Lebensdauer seiner Silos entscheidend verlängert.

Wird der o.g. Hinweis in den Zulassungsbescheiden rechtzeitig befolgt, gelten die folgenden Aussagen zur Lebensdauer auch für alle alten Silos, die noch nicht nach heutigem Kenntnisstand bezüglich Laminataufbau, Harzwahl, Schutzschichten, Verarbeitung, Konstruktion und Bemessung ausgeführt sind. Bei danach hergestellten Silos kann auch auf die Kontrolle durch Sachverständige verzichtet werden.

GF-UP-Lamine sollten folgendermaßen aufgebaut sein:

Außen und innen ist im tragenden Querschnitt eine Wirrfaserschicht möglichst aus geschnittenen Roving anzuordnen, deren flächenbezogene Glasmasse mindestens  $450 \text{ g/m}^2$  beträgt. Außerdem sind sie beidseitig mit einer mindestens  $0,3 \text{ mm}$  und höchstens  $0,6 \text{ mm}$  dicken Feinschicht oder einer mindestens  $0,3 \text{ mm}$  dicken Vlies-schicht zu versehen, die nicht zum tragenden Querschnitt hinzugerechnet werden dürfen.

Die Abminderungsfaktoren  $K_U \cong A_{2B}$  und  $C_U \cong A_{2I}$  können bei wie vorstehend aufgebauten Laminaten mit  $K_U = C_U = 1,0$  in die Bemessung von GF-UP-Bauteilen eingeführt werden.

Aufgrund der Ergebnisse ist für GF-UP-Bauteile eine Lebensdauer von mehr als 25 Jahren nachgewiesen. Wie hoch sie wirklich ist, kann noch nicht am realen Bauteil kontrolliert werden, da der Werkstoff GF-UP noch nicht länger eingesetzt wird. Es kann jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, daß die Lamine über einen Zeitraum von mehr als 50 Jahren ihre Ausgangseigenschaften behalten. Wird der Korrosionsschutz (Schutzschichten) rechtzeitig erneuert, was an der bewitterten Seite bei optimaler Ausführung erst nach etwa dieser Dauer notwendig werden dürfte, spricht zum heutigen Zeitpunkt nichts dagegen, daß die Lebensdauer dieser Bauteile beträchtlich über 50 Jahre hinausgehen kann.

Die vorstehenden Aussagen gelten für Bauteile, die durch normale Witterungseinflüsse (auch Industrielatmosphäre) wie der Sonneneinstrahlung (insbesondere UV-Anteil), Temperaturwechsel, Feuchtigkeit (mit reversiblen Diffusionsvorgängen), chemische Einflüsse und Erosionsprozesse beansprucht werden. Ebenso gelten sie für Silos die im innern in erster Linie durch mechanische Reibung trockener Schüttgüter belastet sind. Bezüglich der Mindestlebensdauer von 25 Jahren können sie auch auf Silos zur Lagerung von Gärfutter übertragen werden.

Literaturverzeichnis

- /1/ Menges, G.  
Werkstoffkunde der Kunststoffe  
Carl Hanser Verlag, München, Wien
- /2/ Ellis C.  
DRP 967 265 (1938)
- /3/ Schwenk E.  
80 Jahre Kunstharze  
Hoechst AG, Frankfurt/M (1982)
- /4/ Kunststoff-Handbuch 1973  
(Band VIII), 247
- /5/ Zulassungsbescheid II B 3 - 2.420 Zul. 389 (7. Aug. 1967)  
Der Minister für Wohnungsbau und öffentliche Arbeiten  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Futtermittelsilos aus glasfaserverstärktem Polyesterharz  
Riedel und Sohn, Homberg
- /6/ Schicketanz R.  
Silobehälter aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)  
Plastverarbeiter (24) 1973/3, 160 bis 164
- /7/ Zulassungsbescheid Nr. IV B 8 - 9151/3-28 (31. Mai 1968)  
Bayrisches Staatsministerium des Inneren  
Kraftfutterbehälter aus glasfaserverstärktem Polyesterharz  
Luitpoldhütte AG, Amberg und Bölkow GmbH, München-Ottobrunn
- /8/ Zulassungsbescheid VA 2-64 b 08/37-12/68 (9. April 1968)  
Des Hessische Minister des Inneren  
Schüttgutsilo aus glasfaserverstärktem Polyester  
Burger Eisenwerke AG, Burg/Dillkreis
- /9/ Zulassungsbescheid - 40 42 10 Ku (480) - (16. Jan. 1970)  
Der Niedersächsische Minister der Finanzen  
Gärfuttersilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)  
Steffens & Nölle AG, Berlin-Tempelhof

- /10/ Zulassungsbescheid Nr. IV B 8 - 9151/3-20  
(15. April 1971)  
Bayrisches Staatsministerium des Inneren  
Gärfuttersilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)  
Luitpoldhütte AG, Amberg
- /11/ Zulassungsbescheid Nr. VHB-70-5-1/2099/71  
(26. Nov. 1971)  
Rheinland-Pfalz, Ministerium der Finanzen  
Silo aus glasfaserverstärktem Polyesterharz  
Theodor Vanck KG, Bitburg-Staffelstein
- /12/ Geithe W.  
Zur Geschichte des Zulassungswesen  
Mitteilungen des Institut für Bautechnik 4/1986, 109 bis 111  
Ernst & Sohn, Berlin
- /13/ Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (BauO NW)  
§§ 3, 21 und 22  
GV, NW 1984, 419
- /14/ Gallep H.  
Die Zulassung tragender Bauteile aus Kunststoffen  
VDI-Bericht Nr. 122 (1968), 83 bis 87  
VDI-Verlag, Düsseldorf
- /15/ Wagner O.  
Zulassung tragender Bauteile aus Kunststoffen  
Kunststoffe 57 (1967) Nr. 5, 356
- /16/ Bub H.  
Die Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten  
Kunststoffe 57 (1967) Nr. 5, 353 bis 355
- /17/ Zulassungsbescheid Gesch. Z.: I/31-1.10.2  
(3. Nov. 1971)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Silo aus glasfaserverstärktem Polyesterharz  
Riedel & Sohn, Homberg
- /18/ Vorläufige Richtlinien zur Kennwertbestimmung,  
Zulassungsprüfung und Güteüberwachung von  
zulassungspflichtigen Bauteilen aus GFK  
1. Fassung: Matting, Menges, Woebcken  
Gemeinschaftsentwurf des Instituts für Werkstoffkunde  
(IAfW), TH Hannover,  
des Süddeutschen Kunststoffzentrums (SKZ), Würzburg  
und des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV), TH Aachen,  
Okt. 1967  
2. Fassung: Gemeinschaftsentwurf des AK "Kunststoffe" des LSA,  
Mai 1969

- /19/ Vorläufige Richtlinien für die Kennwertbestimmung, Zulassungsprüfung, Bemessung und Güteüberwachung von zulassungspflichtigen Bauteilen aus glasfaserverstärktem, ungesättigtem Polyesterharz (GF-UP-Richtlinie) - Fassung Dezember 1983 - Institut für Bautechnik, Berlin - unveröffentlicht -
- /20/ Stand der Beratungen und Erkenntnisse im Sachverständigenausschuß, SVA "Kunststoffe" des Instituts für Bautechnik, Berlin  
Interne Sitzungsunterlagen und Protokolle
- /21/ DIN 18200 (Vornorm) Juni 1980  
Überwachung (Güteüberwachung)  
von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten  
- Allgemeine Grundsätze -
- /22/ Dolfen E.  
Bemessungsgrundlagen für tragende Bauelemente aus glasfaserverstärkten Kunststoffen, insbesondere durch Glasseidenmatten bewehrten Polyesterharzen  
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), TH Aachen  
DS 69/07
- /23/ Prüfungszeugnis Nr. 819.173 (6.6.1969)  
IAfW, TU Hannover
- /24/ Bericht Nr. 5741/2 (7.6.1971)  
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine  
TH Karlsruhe
- /25/ Wang C.S.  
21st Annu. Conf. SPI Reinforced Plastics Div., Chicago 1966  
Sect. 14 E
- /26/ Schlehöfer B.  
Kunststoffe 59/1969, 905
- /27/ Schulz U.  
Der Bauingenieur Bd 47 (1972), 157
- /28/ Gutachten Nr. 806.294 (30.7.1966)  
IAfW, TH Hannover
- /29/ Bericht Nr. 5740/2 (3.6.1971)  
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, TH Karlsruhe
- /30/ Prüfungszeugnis Nr. 820.126 (9.11.1967)  
IAfW, TH Hannover



- /31/ Bericht Nr. 220637 2 74 (7.8.1975)  
Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen (MPA NW),  
Dortmund-Aplerbeck
- /32/ Prüfungszeugnis Nr. 827.358 (22.11.1977)  
IAfW, TU Hannover
- /33/ Bericht Nr. 220427 2 77-2 (20.2.1978)  
MPA NW, Dortmund-Aplerbeck
- /34/ Prüfungszeugnis Nr. 22 0243 5 79-02 (24.10.1980)  
MPA NW, Dortmund-Aplerbeck
- /35/ DIN 1055 Teil 6 (Nov. 1964)  
"Lastannahmen für Bauten, Lasten in Silozellen"
- /36/ Ergänzende Bestimmungen zu DIN 1055 T 6 (Mai 1977)
- /37/ Erlaß V 7115/207 vom 14.02.1978  
des Innenministerium von Baden-Württemberg
- /38/ Zulassungsbescheid Nr. VHB-70-5-1-/451/70  
(6. April 1970)  
Rheinland-Pfalz, Ministerium der Finanzen  
Theodor Vanck KG, Bitburg-Staffelstein
- /39/ Zulassungsbescheid Nr. 70-5-1/5 05-688/72  
(28. April 1972)  
Rheinland-Pfalz, Ministerium der Finanzen  
Theodor Vanck KG, Bitburg-Staffelstein
- /40/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-7 (11. Mai 1976)  
IfBt, Berlin  
WORIES Kunststoffen, NL-Aalten
- /41/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-16 (22. Jan. 1979)  
IfBt, Berlin  
Buderus AG, Dieburg
- /42/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2.24 (10. Okt. 1978)  
IfBt, Berlin  
WORIES Kunststoffen, NL-Aalten

- /43/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-55 (21. Dez. 1983)  
IfBt, Berlin  
Marumo, Fabrique de Polyester Stratifié, F-Guebwiller
- /44/ Weingarten V.J., Morgan F.J. u. Seide P.  
Final Report on Development of Design Criteria  
for Elastic Stability of Thin Shell Structures,  
Space Techn. Laboratories Inc. Los Angeles 1960
- /45/ DIN 11622 Bl. 4 (Aug. 1973), Abschnitt 4.2  
Gärfutterbehälter, Bemessung, Ausführung,  
Beschaffenheit, Gärfutterbehälter aus Stahl
- /46/ Schapitz E.  
Festigkeitslehre für den Leichtbau (1963)  
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf
- /47/ DAST-Richtlinie 013 (Juli 1980)  
Beulsicherheitsnachweise für Schalen  
Deutscher Ausschuß für Stahlbau  
Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln
- /48/ Menges G. u. Gaube E.  
Kunststoffe Bd. 58 (1968), 642/48
- /49/ Menges G, Roskothen H. u. Empt P.  
Kunststoffe Bd. 60 (1970), 1009/14
- /50/ Menges G. u. Franken H.W.  
Kunststoffe Bd. 62 (1972) 309/17
- /51/ Nonhoff G.  
Ein Beitrag zur Stabilisätsberechnung und Prüfung  
von Zylinderschalen aus glasfaserverstärktem Kunststoff  
unter gleichmäßigem Außendruck  
DS 82, TH Aachen(1972)
- /52/ Nonhoff G. u. Zott H.  
Kunststoffe Bd. 62 (1972) S. 820/26
- /53/ N.N.  
Musterberechnungen für Kunststoffbehälter  
zur Lagerung wassgefährdender Flüssigkeiten  
März 1986  
Schriften des IfBt, Reihe B Heft 4

- /54/ Ebner, H.  
Der Stahlbau, 21 Jahrg. 1952, Heft 9, 153/59
- /55/ Giencke E.  
Kunststoffe 64 (1974), 727/33
- /56/ Puck A. u. Ruegg Ch.  
Kunststoffe 64 (1974), 718/26
- /57/ Geier B.  
Zur Berechnung der theoretischen Beullasten  
dünnwandiger Kreiszylinderschalen aus  
Faserverbundwerkstoffen  
Bericht IB 131-82/16  
DFVLR, Braunschweig
- /58/ Wolmir A.S.  
Biegsame Platten und Schalen  
VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin (1962)
- /59/ Franken H.W. u. Kurzmeier U.  
Einfluß des Aushärtgrades auf GFK-Bauteile  
Forschungsbericht F 149, SKZ, Würzburg (1978)  
Auftraggeber: IfBt, Berlin
- /60/ Menges G. u. Brintrup H.  
Kunststoffe im Bau (1974) 6, 31/42
- /61/ Giencke E.  
Einfluß der verschiedenen Kriechmodelle auf die Spannungen  
und Verformungen in GFK-Konstruktionen  
14. AVK-Tagung 1977
- /62/ Giencke E.  
Einfluß des Kriechens auf die Stabilität  
längsgedrückter GFK-Zylinderschalen  
Forschungsbericht. IfBt  
15. AVK-Tagung 1978
- /63/ Nonhoff G.  
Einfluß des Kriechens auf die Stabilität längsgedrückter  
GFK-Zylinderschalen  
Forschungsbericht  
Teilweise: Konstruktiver Ingenieurbau  
VBI (1985)  
Ernst & Sohn, Berlin

- /64/ Roskothen H.J.  
Vorschlag zur Dimensionierung von GFK-Bauteilen  
im Hinblick auf eine bauaufsichtliche Zulassung  
Bericht zum 7. Kunststofftechnischen Kolloquium  
IKV, TH Aachen (1974)
- /65/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-51 (12. März 1984)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Schüttgutsilos aus glasfaserverstärktem ungesättig-  
tem Polyesterharz  
Speidel Kunststoffwerk KG, Ofterdingen
- /66/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2 -42 (07. April 1982)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
GF-UP Schüttgutsilos  
Polem b.v., NL-Lemmer
- /67/ Zulassungsbescheid Nr. IV B 8-9151/3-87 (23. Nov. 1971)  
Bayer Staatsministerium des Innern  
Gärfuttersilos aus glasfaserverstärktem Polyesterharz  
Dechentreiter  
Kunststoffe und Maschinenbau, Wertingen
- /68/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-19 (01. Febr. 1978)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Silomatic Schüttgutsilos aus GF-UP  
Nord-Niederlandse Kunststoffindustrie  
A. Hiemstra, NL-Akkrum
- /69/ Zulassungsbescheid Nr. I/4-1.10.2.1-TG (20. Mai 1974)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Gärfuttersilos aus GFK  
Kunststoffwerk AG, CH-Tägerwilen
- /70/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-39 (07. Juni 1982)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
GF-UP Schüttgutsilos  
Tunetanken A/S, DK-Vejen
- /71/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-22 (26. Okt. 1978)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Schüttgutsilos aus GF-UP  
Theodor Vanck KG, Bitburg Staffelstein
- /72/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-38 (17. März 1983)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Schüttgutsilos aus glasfaserverstärktem ungesättig-  
tem Polyesterharz.  
Vrielak b.v., NL-Stolwijk

- /73/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-40 (16. Febr. 1982)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
GF-UP Schüttgutsilos  
Georg Reich Kunststoffverarbeitungs GmbH, Pürgen
- /74/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.1-29 (10. Jan. 1980)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Gärfuttersilo aus GF-UP  
Epple-Buxbaum-Werke AG, A-Wels
- /75/ Zulassungsbescheid Nr. Z-10.2.2-9 (01. Sept. 1983)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Schüttgutsilos aus glasfaserverstärktem ungesättig-  
tem Polyesterharz  
De Hollandsche Ijssel b.v., NL-Stolwijk
- /76/ Zulassungsbescheid Nr. Z 1.10.2.2-8/72 (28. Febr. 1975)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Schüttgutsilos aus glasfaserverstärktem Polyesterharz  
Luitpoldhütte AG, Ansberg
- /77/ Zulassungsbescheid Nr. I/4-1.10-22 (16. Mai 1972)  
Institut für Bautechnik, Berlin  
Schüttgut-Kammersilo aus glasfaserverstärktem Polyesterharz  
Riedel und Sohn, Homberg
- /78/ Zulassungsbescheid Nr. -70-3-1-/505-1121/73 (07. Dez. 1973)  
Rheinland-Pfalz, Ministerium der Finanzen  
Mehrkammersilos aus glasfaserverstärktem Polyesterharz  
Theodor Vanck KG, Bitburg-Staffelstein
- /79/ Entwurf DIN 18820  
Lamine aus textilglasverstärkten, ungesättigten Polyester-  
und Phenacrylharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA)  
Teil 1  
Aufbau, Herstellung und Eigenschaften
- /80/ DIN 16946 T 2  
Reaktionsharzformstoffe  
Typen

- /81/           DIN 61850  
Textilglas und Verarbeitungshilfsmittel; Begriffe
- /82/           DIN 61855 Teil 1 und 2  
Textilglas  
Textilglasrovings für die Kunststoffverstärkung  
Technische Lieferbedingungen  
Einteilung, Anwendung
- /83/           DIN 61854 Teil 1 und 2  
Textilglas  
Textilglasgewebe für die Kunststoffverstärkung  
Filamentgewebe und Rovinggewebe  
Technische Lieferbedingungen  
Typen
- /84/           DIN 61853 Teil 1 und 2  
Textilglas  
Textilglasmatten für die Kunststoffverstärkung  
Technische Lieferbedingungen  
Einteilung, Anwendung
- /85/           DIN 16945  
Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharz-  
massen; Prüfverfahren
- /86/           DIN 53445  
Prüfung von Kunststoffen, Torsionsschwingversuch
- /87/           DIN EN 60  
Glasfaserverstärkte Kunststoffe; Bestimmung des  
Glühverlustes
- /88/           DIN EN 61  
Glasfaserverstärkte Kunststoffe Zugversuch
- /89/           DIN 53457  
Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Elastizi-  
tätsmoduls im Zug-, Druck- und Biegeversuch
- /90/           DIN EN 63  
Glasfaserverstärkte Kunststoffe; Biegeversuch,  
Dreipunktverfahren
- /91/           DIN 54852  
Prüfung von Kunststoffen; Zeitstandbiegeversuch bei  
Dreipunkt- und Vierpunktbelastung

- /92/ Puck A.  
Zur Beanspruchung und Verformung von GFK-Mehrschicht-  
verbundbauelementen  
Kunststoffe 57 (1967) S. 284/93, 573/83, 965/73
- /93/ Giencke E.  
Über die Berechnung regelmäßig aufgebauter Lamine  
am Beispiel der GFK-Typenlamine  
19. AVK-Tagung 1984
- /94/ Einsfeld U.  
Anwendung der Tragfähigkeitstabelle aus E DIN 18820  
19. AVK-Tagung 1984
- /95/ Menges G. und Brintrup H.  
"Rißgrenzen" an unidirektionalen GFK-Wickellaminen  
unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung 10. AVK-  
Tagung 1972
- /96/ Buhmann K.P:  
Zum Bestimmen der Schädigungsgrenze von GFK-Laminen  
10. AVK-Tagung 1972
- /97/ Kleinholz R.  
Kunststoffberater 4/1972, 265 ff
- /98/ Menges G. und Pütz D.  
Der Einfluß korrosiver Flüssigkeiten auf das Verhalten  
glasfaserverstärkter ungesättigter Polyesterharze (GF-UP)  
13. AVK-Tagung 1976
- /99/ Scholz D.  
Einfluß langjähriger Bewitterung auf Festigkeit und  
Transparenz von GF-UP-Laminen  
14. AVK-Tagung 1977
- /100/ Schmidt K.A.F.  
Textilglas für die Kunststoffverstärkung, 2. Aufl. 1972  
Zechner & Güttig Verlag GmbH, Speyer
- /101/ Menges G. u. Lutterbeck K.  
Einfluß von Feuchte- und Temperaturwechseln auf GFK  
19. AVK-Tagung 1984
- /102/ Moseler H.J.  
Witterungsbeständigkeit von UP-Harzmatten  
14. AVK-Tagung 1977

# INGENIEURBÜRO FRANKEN

## KUNSTSTOFFPRÜFSTELLE FRANKEN

Dipl.-Ing. Helmuth W. Franken  
BERATENDER INGENIEUR VBI

Gewerbestr. Süd 24 · 5140 Erkelenz · Tel. 0 24 31 - 7 36 51  
Röckertstr. 19 · 8702 Kleinrinderfeld · Tel. 0 93 66 - 3 12

Estimation of the service life of GR-UP components under the action of long-term loading

### SUMMARY

The development of approval procedures, tests and design methods for components made of textile glass fibre reinforced unsaturated polyester resins (GR-UP) is described in the specific case of GR-UP silos, where the most experienced and most comprehensive data are available from technical approval procedures.

Typical examples of construction, laminate and resin types used as well as the most important manufacturing methods are dealt with.

The material constituents (such as cold-cured resins, reinforcing materials, additives and accelerators) and their influence on the properties of the composite material (laminate) are described.

The properties of GR-UP laminates and the determination of characteristic values of the deformation and failure behaviour based on tests with short-term and long-term (permanent) loading are given careful consideration, but equally the possibility of determining corresponding values with a sufficient accuracy by means of simplified calculation methods.

From the results of visual sampling inspections of components after several years of use (up to 19 years) and of investigations of specimens taken from silos, it can be concluded that GR-UP components assembled and constructed according to the present state of knowledge have a service life of more than 25 years.



# INGENIEURBÜRO FRANKEN

## KUNSTSTOFFPRÜFSTELLE FRANKEN

Dipl.-Ing. Helmuth W. Franken  
BERATENDER INGENIEUR VBI

Gewebestr. Süd 24 · 5140 Erkelenz · Tel. 0 24 31 - 7 36 51  
Röckertstr. 19 · 8702 Kleinrinderfeld · Tel. 0 93 66 - 3 12

Appréciation de la vie de service des composants de construction en polyester non saturé renforcé aux fibres de verre sous l'action de charges de longue durée.

### RESUME

Le développement des procédures d'agrément, des essais et des méthodes de calcul pour des composants de construction en polyester non saturé renforcé aux fibres de verre est décrit à titre d'exemple dans le cas des silos, où on dispose des données les plus profondes des procédures d'agrément technique.

Des exemples caractéristiques de construction, des systèmes de matériau stratifié et des types de résines employés ainsi que les procédés de fabrication les plus importants sont traités.

En plus compte est tenu des constituants de matériau (comme par ex. résines de réaction, matériaux de renforcement, adjuvants et accélérateurs) et de leur influence sur les propriétés du matériau composite (matériau stratifié).

Les propriétés des matériaux stratifiés en polyester non saturé renforcé aux fibres de verre sont décrites ainsi que la détermination des valeurs caractéristiques du comportement de déformation et de rupture sur la base des essais sous charges de courte et de longue durée, mais également la possibilité de déterminer des valeurs correspondantes avec une précision adéquate moyennant des procédures de calcul simplifiées.

Sur la base des résultats des inspections visuelles au hasard faites sur des composants de construction après plusieurs d'années d'utilisation (jusqu'aux 19 années) et des essais sur éprouvettes prélevées des silos, on peut conclure que ces composants de construction, fabriqués selon les présentes connaissances, ont une vie de service de plus de 25 ans.