

Zur Verankerung von Faserbündeln und Stahldrahtseilen in Stahlhülsen mit Kunstharzvergüß

H. Gropper und K. Gabriel, Stuttgart

Übersicht. Auch auf dem Gebiet der großen Zugglieder in der Bautechnik werden zunehmend künstliche Werkstoffe eingesetzt, die zu eingehenden Untersuchungen drängen und eine kritische Stellungnahme verlangen. Auf Ergebnissen einer mehrjährigen Auseinandersetzung mit Fasern statt hochfesten Drähten als Zuelemente und Gießharzen statt metallischen Vergüssen baut dieser Bericht auf. Konstruktionsmöglichkeiten werden dargestellt und ihre Anwendbarkeit diskutiert.

On the anchorage of fibre bundles and steelwire ropes in sockets by casted resin

Contents. Plastic materials are more and more used, even for huge tension elements. Therefore exact investigations and critical analyses of this type of material are needed. The present report is based on the experiences gained during several years of work on the replacement of high tensile steel wires by synthetic fibres and on the replacement of metal casting for the anchor matrix of sockets by a resin-type matrix. Possible detailing of the structural elements is shown and its applicability is discussed.

1 Einleitung

In der Bautechnik werden zunehmend synthetische Werkstoffe eingesetzt. Anstriche und Beschichtungssysteme, Injektionsharze zum Auspressen von Rissen, Geotextilien, Fassadenelemente, Dämmstoffe etc. bestehen aus Kunststoffen. Für tragende Bauteile werden faserverstärkte Kunstharze verwendet. Selbst den hochfesten Stahldrähten erwächst Konkurrenz in den gleichermaßen hochfesten, künstlich hergestellten Fasern (Bild 1).

Hochfeste Filamente werden auf folgenden Spezialgebieten angewendet:

- **In der Vorspanntechnik:** Glasfaserverbundstäbe wurden bereits als „HLV“-Elemente (Hochleistungs-Verbundelemente) im Großversuch eingesetzt [1]. In England und Frankreich sind Vorspannsysteme auf der Basis von Aramidseilen im Gespräch für Vorspannung ohne Verbund [2]. Enka/Akzo entwickelt einen aramidfaserbewehrten Beton mit Verbund [3].
- **Bei Flächentragwerken:** Membrantragwerke werden aus PVC-beschichteten Polyestergeräten bzw. teflonbeschichteten Glasfasergeweben errichtet; die textile Membran übernimmt eine raumabschließende und eine lastabtragende Funktion. Für das wandelbare Dach des Olympiastadions in Montreal mit einer Membran aus PVC-beschichtetem Aramidgewebe wurde ein „Randelement“ [4] aus Aramidgarnen entworfen, das aber nicht zum

Einsatz kam, weil eine funktionsfähige Verankerung kurzfristig nicht entwickelt werden konnte.

- **Bei Abspannungen:** Synthesefaserseile als Abspannungen für Sendemasten haben den Vorzug, nicht auf ein elektromagnetisches Feld anzusprechen [1]. Für sehr weitgespannte Brücken (Straße von Messina, Ärmelkanal) werden Traggliedausbildungen auf der Basis von Aramidgarnen diskutiert (Parafilseile [5]).

In Tabelle 1 sind mechanische Kennwerte von hochfesten synthetischen Fasern zusammengestellt, die für technische Zwecke eingesetzt werden. Der „Kristallinitätsgrad“ eines Filamentes bestimmt dessen mechanisches Verhalten. Je besser sich eine kristalline Struktur ausbildet, desto höher sind die erreichbaren Zugfestigkeiten und E -Moduli. Dieser Effekt ist besonders bei den temperaturstabilen anorganischen Fasern zu erkennen. In die Tabelle sind als Beispiele dafür ein „weicherer“ Kohlefasertyp und eine Glasfaser aufgenommen.

Als Maß für die Beanspruchbarkeit einer Faser quer zur Faserachse wurde die Knotenfestigkeit [41] gewählt. Sie nimmt mit steigender Zugfestigkeit, d.h. wachsendem Kristallinitätsgrad, ab.

Polyester ist wegen seines niedrigen Glaspunktes (große Temperaturempfindlichkeit) und des hohen Dehnvermögens (niedrige Elastizitätsgrenze) für lineare Tragglieder nicht ge-

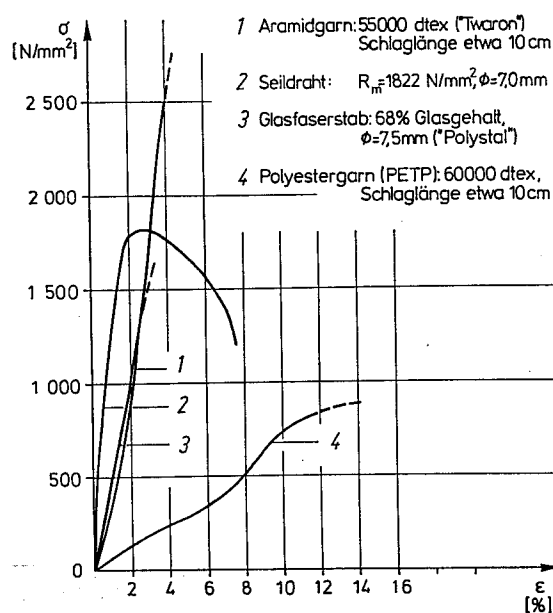


Bild 1. Spannungsdehnungslinien verschiedener Werkstoffe, die für Zuelemente eingesetzt werden können

Dipl.-Ing. H. Gropper und Dipl.-Ing. K. Gabriel sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Universität Stuttgart (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. J. Schlaich).

Tabelle 1. Eigenschaften verschiedener hochfester Fasern für technische Einsatzgebiete

Werkstoff		Stahlfaser	Kohlenstofffaser	Polyamid	Glasfaser	Polyester	Polypropylen
		kaltgezogen unlegiert Ø 0,5 mm	HST 1,8	aromatisches Polyamid	Typ E	PETP	„Spectra 900“
1	2	3	4	5	6	7	8
Dichte	g/cm ³	7,85	1,8	1,44	2,5	1,38	0,97
Faserfestigkeit	N/mm ²	2500	4000	2700	2000	1100	3000
Reißlänge							
Festigkeit/Dichte	km	32	222	190	78	70	310
Anfangssteifigkeit	N/mm ²	200 000	240 000	65 000/130 000	75 000	9000	150 000
Querkonstruktion μ	—	0,28	0,3	0,3	0,22	0,4	0,4
Knotenfestigkeit	%	50	—	40	20	60	75
Bruchdehnung	%	80	18	40/20	27,5	170	20
Wärmeausdehnungs- koeffizient α_T	$\frac{1}{k} \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$-0,1 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	—	—
Temperatur mit Eigen- schaftsveränderung	°C	400	(1000)	400	350	70	60
Preis	DM/kg	5	200	80	12	8	—

eignet. Als Konkurrenz zum Stahldraht kommen deshalb zur Zeit nur Aramidfasern in Betracht. Ihr hochgeordneter Molekülaufbau bietet eine Zugfestigkeit im Bereich der mineralischen Fasern bei einer ausreichenden Knotenfestigkeit und Temperaturunempfindlichkeit.

Die Geometrie der einzelnen Filamente in einer „geschlagenen“ Zuggliedkonstruktion und die bekannten Verankerungskonstruktionen bewirken Zusatzbeanspruchungen, die eine volle Ausnützung der Filamentzugfestigkeit unmöglich machen. Um diese Einflüsse zu verringern, wird im konstruktiven Ingenieurbau immer wieder versucht, synthetische Harze für die Verankerung von Zuggliedern aus metallischen Drähten oder synthetischen Fasern einzusetzen. Verschiedene Konstruktionen werden angewendet:

- Mit Stahlspänen gefülltes Epoxidharz [6],
- Heißhärtendes Epoxidharz zum Füllen des Stahlkugelerüstes beim „HiAm“-Verguß [7],
- Epoxidharz als Schutz gegen den Zutritt von Luft und Feuchtigkeit bei der „DINA“-Verankerung [8],
- Quarzsandgefülltes Polyesterharz für den Verguß von Förder- und Hebesseilen [9] und
- Polyesterharz zur Verankerung von Glasfaserverbundstäben [10].

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 64 „Weitgespannte Flächentragwerke“ der Universität Stuttgart sind am Institut für Massivbau Untersuchungen und Entwicklungen zum Metallverguß von Stahldrahtseilen durchgeführt worden [11 bis 13]. Darauf aufbauende Arbeitsergebnisse über den Kunstharzverguß von Stahldraht- und Faserseilen [14 bis 16] entstanden in den letzten zwei Jahren. Die Versuche wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Modellstatik (Leitung Prof. Dr.-Ing. R. K. Müller) durchgeführt. Auch Prüfeinrichtungen der FMPA Baden-Württemberg wurden benutzt. Die verwendeten Werkstoffe wurden von der Industrie größtenteils kostenlos zur Verfügung gestellt.

2 Angewandte Verankerungssysteme

Verankerungen hochfester Zugglieder wurden insbesondere für den Spannbetonbau entwickelt. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [17]. Sie wurden von U. Nürnberger [18] sehr eingehend auf ihre Betriebsfestigkeit hin untersucht.

Heute noch werden große Litzenbündel mit verbesserten Keilverankerungen ausgestattet. Für Stahldrahtseile und Faserbündel sind diese Konstruktionen nicht sinnvoll.

2.1 Vergußverankerungen für Stahldrahtseile

Während Rundlitzenseile und offene Spiralseile bis zu einem Durchmesser von ca. 40 mm mit Preßfittingen als Endverankerungen versehen werden, wird das größere meist vollverschlossene Spiralseil mittels metallischer Legierungen in Stahlhülsen vergossen [19, 20]. Diese Legierungen sind als Lagermetalle entwickelt worden [21], die ähnlichen Anforderungen unterliegen. Nach [22] sind heutzutage nur noch wenige Legierungen für den Verguß zugelassen:

- Zinklegierungen Zn 99,9 (Feinzink)
GS-Zn Al 6 Cu 1 (Zamak 610)
- Bleizinnlegierungen Pb Sn 10 Sb 10 (Tego VG 3)
Sn Sb 12 Cu 6 Pb (Lg SN 80)

Mit der heute gebräuchlichsten Vergußlegierung, dem „Zamak 610“ [23], das einen E -Modul von $E = 90\,000\text{ N/mm}^2$ und eine Druckfestigkeit von $R_{p,2} = 230\text{ N/mm}^2$ besitzt, lassen sich hochfeste Stahldrähte mit Zugfestigkeiten bis zu $R_m = 1800\text{ N/mm}^2$ und 7 mm Durchmesser bei entsprechender Oberflächenbehandlung [13] in konisch ausgebildeten Stahlhülsen verankern.

Das Seilende (Bild 2) oder ein Drahtbündel (Bild 3) wird zu einem Besen aufgefächert. Weil das Vergußmetall einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzt als der Stahlguß der Hülse, und die Hülse eine niedrige Temperatur aufweist, schrumpft der Gußkörper beim Abkühlen auf Raumtemperatur mehr als die Hülse. Zwischen beiden entsteht ein Spalt unterschiedlicher Dicke. Je größer der Durchmesser des Gußkörpers, desto größer der Spalt [24].

Dieses Herstellungsmerkmal wird planmäßig genutzt, um den radialen Druck auf die Drähte im Eingangsbereich in den Vergußkörper möglichst zu erhöhen. Damit wird der Verbund zwischen den Drähten und dem Verguß durch einen Reibungsanteil verbessert.

Unter der Traglast des Zuggliedes wird sich zwischen Konus und Hülse ungefähr die Spannungsverteilung des Bildes 4 einstellen. Die Dimensionierung des Vergußraumes sollte so erfolgen, daß unter Gebrauchslast die radiale Pressung im Verguß hoch, aber nicht oberhalb der Fließspannung

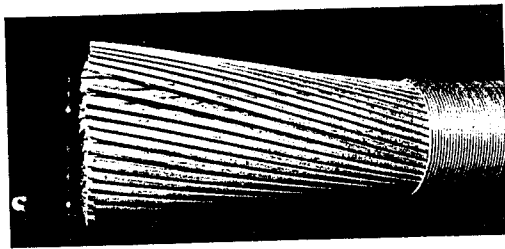


Bild 2. Zum Besen aufgefächertes Ende eines verzinkten vollverschlossenen Spiralseiles, das in eine Stahlhülse eingezogen und vergossen wird

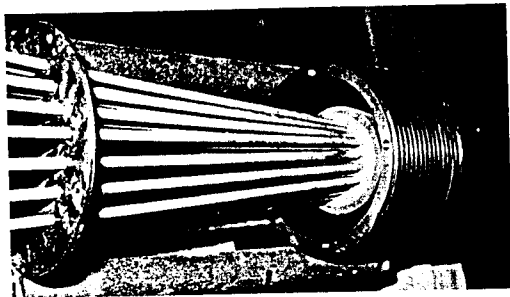


Bild 3. Vergußende eines verdrehten Bündels, dessen dicke Drähte aus der Spiralförmigkeit tangential in den Besen auffächern

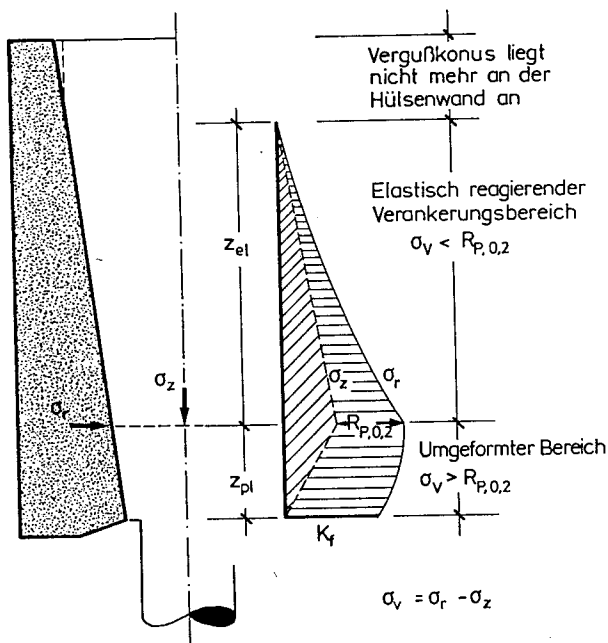


Bild 4. Pressungsverteilung zwischen einem gegossenen Metallkonus und einer Stahlhülse [12]

liegt, und daß unter der Traglast des Seiles nicht mehr als ein Drittel der Konuslänge umgeformt ist. Damit werden schädigende Reibbewegungen am Vergußausgang auf ein Minimum reduziert, und die Sicherheit gegen Herausziehen des Zuggliedes ist ausreichend. Zugglieder, die nur aus einigen wenigen dicken Drähten bestehen, müssen gesondert untersucht werden, weil eine Einbindelänge von $5 \times$ Seildurchmesser für den Einzeldraht zu kurz werden kann. Die noch heute nach [22] zu dimensionierenden Vergußräume sind nach unseren Erkenntnissen für Zamak 610 ungünstig (Bild 5a). Mit einer Konuslänge von $3d$, der Konusneigung $1:10$ und dem kleinsten Konusdurchmesser von mehr als

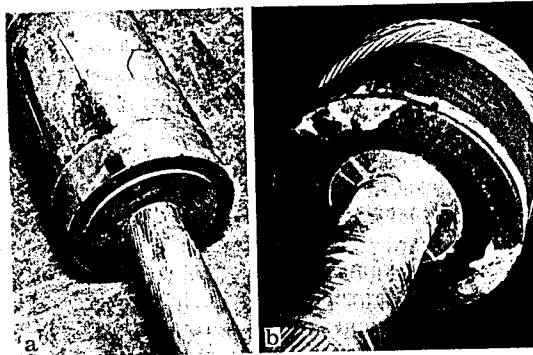


Bild 5a und b. Veränderungen in der Geometrie des Seilkopfes; a) früher gebräuchlicher zylindrischer Seilkopf; b) neuartiges Versuchsseil. Der Konus im Kopf wird kürzer, breiter und steiler

$1,5d$ werden die obigen Bedingungen besser erfüllt [12] (Bild 5b). Die Größe d ist der Durchmesser des aus den Drahtquerschnitten gebildeten zylindrischen Vollstabes.

2.2 Verankerungen für Synthesefaserseile

Zugelemente aus Synthese- oder Naturfasern gibt es in der Fördertechnik (Gurte oder Lastschlingen) und der Seefahrt (Tae). Sie sind in [25 bis 27] beschrieben. Für diese Anwendungsbereiche ist Handlichkeit und die Eignung als laufendes Seil mehr gefragt als eine Traglastserhöhung durch eine gute Verankerung. Mit einem Sicherheitsfaktor von 8 wird die zulässige Belastung niedrig angesetzt, weil die Seile stark abgenutzt werden. Eine hohe Ausnutzbarkeit der Verankerung ist selten erforderlich.

Nur mit gespleißten Seilen kann nahezu die „wirkliche Bruchlast“ des Seiles erreicht werden. Ein Spleiß ist aufwendig herzustellen (hochqualifizierte Arbeitskräfte), und seine optimale Anwendung ist auf geflochtene Seile beschränkt (Bild 6a). Am Spleißbeginn entsteht eine Sollbruchstelle. Mit Spleißlänge und Schlaufe benötigt ein Spleiß viel Platz. Für Seil und Spleiß ergibt sich ein hoher Verseilverlust infolge der großen Empfindlichkeit der Filamente auf Querpressung. Als Anhaltswert gilt für ein Synthesefaserseil: Seilfestigkeit = $\frac{2}{3} \times$ Garnfestigkeit. Zusätzlich tritt Reibung an den Berührungsstellen der Filamente auf. Bei dynamischer Belastung entsteht hier Wärme. Sie führt zum Versagen des Seiles, da die Wärme durch das schlecht leitende Kunststoffmaterial nicht abgeführt werden kann.



Bild 6a und b. Faserseile; a) ein Seil mit 4 Litzen aus Aramidgarnen („Kevlar 29“) und 600 kN Tragkraft; b) ein gelegtes Faserbündel mit 200 kN Tragkraft

„Stehende“ synthetische Zugglieder, wie sie in der Bautechnik benutzt werden, sind vorwiegend „gelegte“ Konstruktionen mit parallelem Aufbau (Bild 6b). Sie haben einen geringeren Verseilverlust. Zusätzlich wird die Reibung an den Berührungsstellen der Filamente vermindert. Insbesondere bei Aramidfaserseilen wird mit gering verselten Konstruktionen die Ausnutzung der Filamentfestigkeit verbessert. Ein Umlenken der Seile ist nur eingeschränkt möglich.

Gelegte Faserseile können mit einer „Gleitdornverankerung“ [28, 29], deren Prinzip von der Keilverankerung im Spannbetonbau her bekannt ist, verankert werden. Das Seilende wird auch hier zu einem Besen aufgefächert (Bild 7), über den eine Hülse mit konischer Innenbohrung geschoben wird. Mitten in den Seilbesen wird ein Dorn eingeführt. Mit steigender Seilkraft werden die Garne in den Konus hineingezogen. Sie nehmen dabei den Dorn mit.

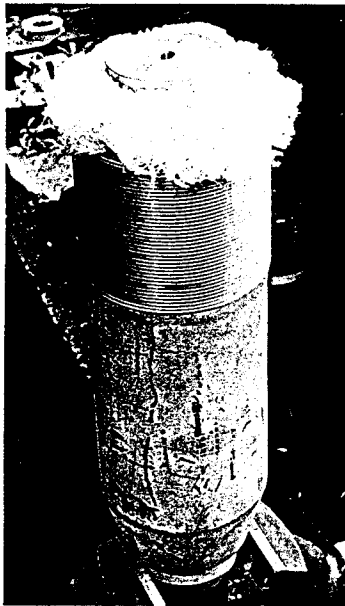


Bild 7. Dorn-Verankerung eines Polyesterfaserseiles mit Aluminiumhülse

Der verbleibende Ringspalt zwischen Dorn und Hülse wird immer kleiner und das Seil dadurch festgeklemt (Bild 8). Die Garne besitzen so die Möglichkeit, sich während der Belastung in Richtung der Zugkraft auszurichten sowie unterschiedliche Längen beim Durchrutschen auszugleichen. In Versuchen konnte mit einem Seil aus parallelen PETP-Einzelgarnen nahezu die Bruchspannung des Garnes erreicht werden [29].

Große Erfahrung ist bei der Herstellung und der Ausführung der Verankerung erforderlich: der Dorn muß sich so bewegen, daß erst mit Seilbruchlast die maximale Filamentquerpressung erreicht wird. Er muß sich trotzdem noch vollständig in der Hülse befinden, damit die hohe Dehnung der PETP-Filamente langsam entlang des Ringspaltes abgebaut wird: die Querpressung p nimmt von der Dornspitze bis zum dicken Dornende zu (Bild 9). Hier ist die Fläche des Ringspaltes am geringsten und so zu bemessen, daß die Garne weder abgequetscht werden noch unter ihrer Zugkraft durchrutschen können. Somit werden weiche Werkstoffe für die Verankerung eingesetzt, meist Aluminium oder Kunststoff. Während der Belastungszunahme schlupft der Dorn ruckartig in die Hülse hinein. Aufgrund des großen Dornwe-

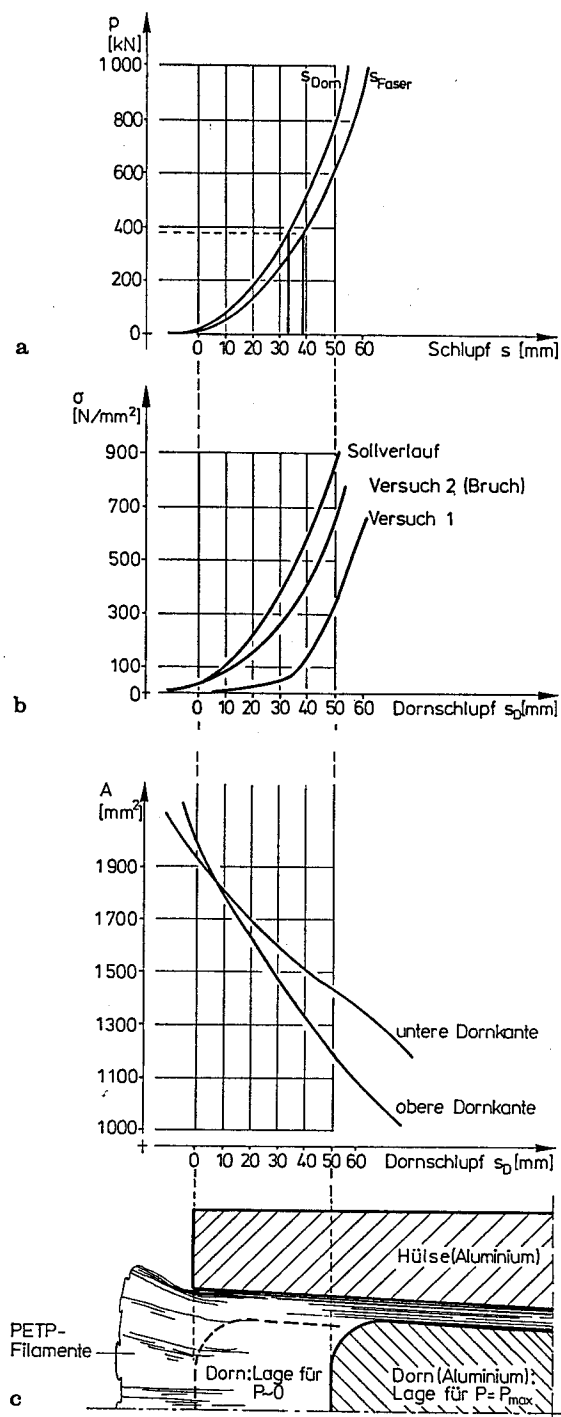


Bild 8a-c. Verhalten der Gleitdornverankerung. Die Versuche V1 und V2 wurden mit einem „Parallelgarnbündel“ aus PETP-Garnen (vgl. Bild 7) durchgeführt. a) im Versuch wie V2 gemessener Dorn- (s_D) und Faserschlupf (s_F); b) Zugspannung σ in den Fasern auf der freien Bündellänge; c) Änderung der Ringspaltquerschnitte A an den beiden Enden des Dornes

ges (Bild 8) und zur Vermeidung einer großen Hülse aufweitung (Bild 9) – kleinste Verformungen Δd gehen überproportional in die Fläche des Ringspaltes ein und lassen den Dorn weiterrutschen –, fällt eine solche Konstruktion groß aus. Der Dornschlupf könnte nur durch Vorpressen des Dornes oder Vorrecken des Seiles über die höchste zu erwartende Last hinaus vorweggenommen werden. Bei dynamischen Belastungen muß der Dorn in dieser Lage fixiert werden.

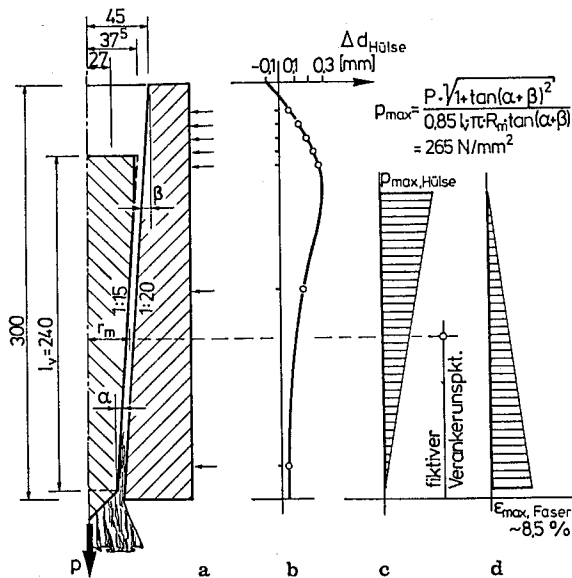


Bild 9 a–d. Verwendete Gleitdornverankerung; a Abmessung und Meßpunkte; b Aufweitung der Hülse im Versuch V2 bei 800 kN; c überschlägig angenommene Pressung auf die Hülse; d Dehnung des Faserbündels entlang des Dornes

Mit einer Vergußverankerung können diese Nachteile vermieden werden. Abweichend von den obigen Versuchen wurden hierfür Aramidfaserseile eingesetzt. Diese sind wegen ihrer Empfindlichkeit gegenüber Querpressung, Kerbwirkung, Reibung und UV-Einstrahlung für eine Gleitdornverankerung weniger geeignet. Weil Aramide temperaturstabil sind, ist die Auswahl eines Vergußharzes einfacher als bei PETP-Filamenten, deren Glaspunkt von 70 °C während der Härtungsreaktion des Harzes erreicht werden kann. Außerdem sind die Steifigkeitsunterschiede zwischen dem Vergußkonus und den Polyesterfilamenten kritischer als zwischen Konus und Aramidfasern, was zum vorzeitigen Versagen des Polyesterseiles im Konus führte [14].

Eine Vergußverankerung für Synthesefaserseile wurde bisher nur in wenigen knapp dokumentierten Experimenten, z. B. [30] und [31], erprobt.

3 Harze als Vergußwerkstoffe

3.1 Chemische und physikalischer Eigenschaften von Duromeren

Aus herstellungstechnischen Gründen kommen nur kalthärtende Gießharze in Frage. Sie gehören zur Gruppe der duromeren Kunststoffe, deren Eigenschaften in [32, 33] erläutert sind. In ihrer chemischen Struktur bestehen sie aus Molekülketten, die räumlich miteinander vernetzt sind („Molekülknäuel“). Bei Raumtemperatur sind sie noch „energieelastisch“. Im Glasübergangsbereich, der schon bei 30 °C beginnen kann, weichen die Vernetzungspunkte zwischen den einzelnen Molekülketten auf. Bei Erreichen der Zersetzungstemperatur (etwa 200 °C) verkohlen die Duromere. Außer durch Gießen beim Herstellen können sie nur spanabhebend geformt werden. Ein Umformprozeß, wie er von den Metallen her bekannt ist, ist bei der angestrebten hohen Vernetzungsdichte und Bindungsstärke zwischen den Monomeren in der Regel nicht möglich. Dichte Vernetzung und starke Bindung garantieren andererseits geringe Zeiteinflüsse auf die mechanischen Eigenschaften des Harzes (z. B. Kriechen).

Ungesättigte Polyestergießharze („UP“; nicht zu verwechseln mit dem „linearen Polyester“ für die thermoplastische Faser) beziehen ihren Namen von der Grundkomponente „ungesättigter Polyester“. Er ist je nach gewünschter Viskosität in einer bestimmten Menge Styrol (normal etwa 40 Gew.%) gelöst, dem späteren Reaktionspartner bei der Vernetzung (Polymerisation). Der Vernetzungsprozeß wird durch eine Art „Katalysator“ (Initiator) angeregt, der in das spätere Endprodukt mit eingebaut wird.

Die Eigenschaften zweier gebräuchlicher Härter/Beschleuniger-Systeme sind in Bild 10 dargestellt. Bei entsprechender Dosierung der Komponenten kann über die Menge des Beschleunigers – in der Regel 4 Gew.% der reinen Harzmenge – der Reaktionsstart auf die Umgebungstemperatur eingestellt werden. Diese Änderung des Mischungsverhältnisses hat keine Auswirkung auf die Eigenschaften des Endproduktes. Die stark exotherme Reaktion bei der Polymerisation erfordert dünne Bauteile, weil sonst die inneren Spannungen zu hoch und das Schwindmaß (≤ 15 Vol%) zu groß werden. Mit Füllstoffen kann hierauf Einfluß genommen werden. Vergußmassen auf UP-Basis werden mit quarzischen Füllern, wie Gesteinsmehl oder feinstem Sand, ($\varnothing \leq 1$ mm) im Gewichtsverhältnis 1 bis 2 Teile Füller zu 1 Teil Harz modifiziert (dies entspricht je nach Dichte 40 bis 60 Vol% Füllstoffanteil). Dieses Verhältnis gewährleistet die Benetzung jedes Füllkornes (falls alle rund sind und denselben Durchmesser besitzen) und eine hohe Druckfestigkeit bei niedriger Viskosität und guter Verarbeitbarkeit.

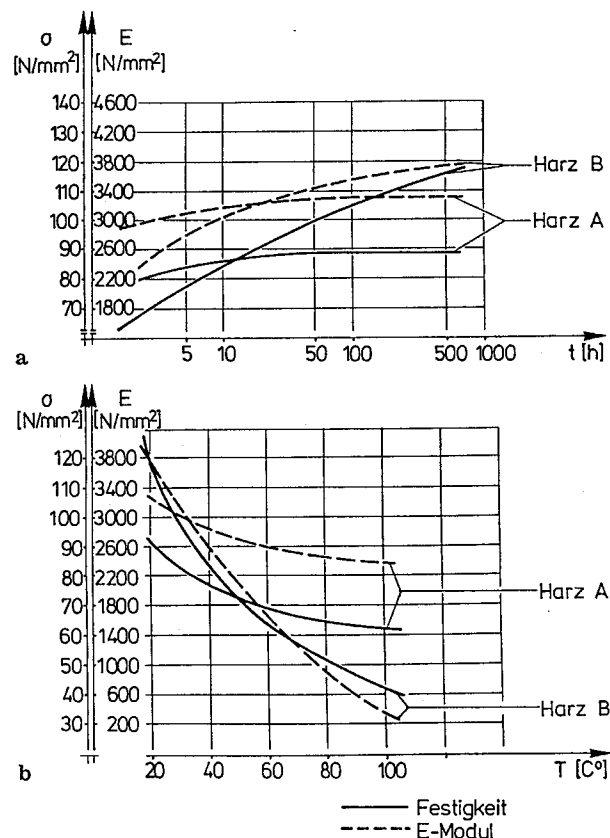


Bild 10 a und b. Eigenschaften zweier Vergußmassen auf der Basis von ungesättigten Polyestern gemessen an zylindrischen Druckproben; a zeitliche Festigkeitsentwicklung; b Temperatureinfluß (Härtungszeit 500 h). Harz A: wärmestabiles Grundharz, Härtung mit Aminen und Benzoylbeschleuniger, Harz B: Standardharz, Härtung mit Methyläthylketonperoxid und Kobaltbeschleuniger [38]

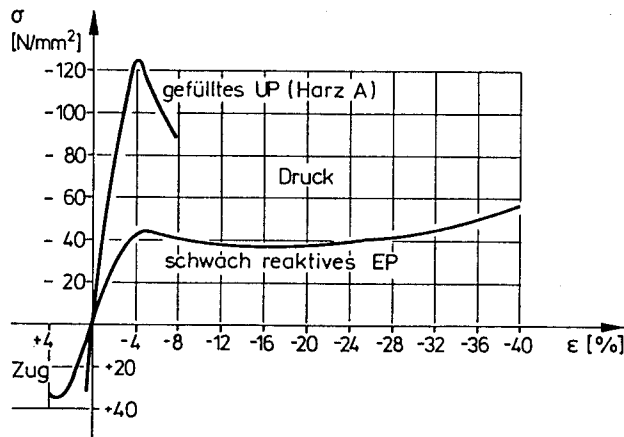


Bild 11. Arbeitslinie zweier Gießharze von Schuler- bzw. zylindrischen Druckproben

Mit der Art des Füllers und der Wahl der Harzgrundkomponente kann somit die Versagensart der Vergußmasse beeinflusst werden: während die Druckproben in den Versuchen zu Bild 11 bei Harz „A“ (gefüllt mit feinem Sand) spröde absicherten, entstanden bei „B“ (Gesteinsmehl) Fließlinien.

Die teuren Epoxid-Harze („EP“) zeigen im Gegensatz zu den UP-Harzen ein duktileres Verhalten. Für die Vernetzung auf dem Wege der Polyaddition muß das Mischungsverhältnis von Harz und Härter allerdings exakt eingehalten werden: zu jedem Harzmonomeren gehört ein Härtermonomeres. Das Mischungsverhältnis läßt sich daher stöchiometrisch berechnen. Versuche sind trotzdem erforderlich, denn die in der Praxis vorliegenden Verhältnisse weichen oftmals von der Theorie stark ab.

Große Variationsbreite besteht bei der Auswahl der Härter. Neben normalen aliphatischen Aminen – sie ergeben ein reaktives, schnell härtendes System – wurden für die Versuche Polyaminoamide („Versamide“) eingesetzt. Sie gewährleisten eine nur geringe Reaktivität beim Vergießen großer Mengen, versprechen eine hohe Haftung zu Metallen und reagieren bei geringen Abweichungen vom vorgegebenen Mischungsverhältnis gutmütig. Weitere Vorteile sind die Unempfindlichkeit gegen Feuchte und die relativ geringen physiologischen Gefahren. Auch das Schwindmaß bleibt wegen der geringen Reaktivität unter den normalen Werten für EP-Harze (normal 5 Vol%). Feuchtigkeit und basische Medien (wie Beton) können EP-Harze im Gegensatz zu UP-Harzen nicht angreifen.

Polyurethan-Gießharze stellen an die Verarbeitung höchste Anforderungen und kommen für Seilvergüsse nicht in Betracht. Das Mischungsverhältnis muß genau eingehalten werden, die Reaktionsfreudigkeit mit Wasser ist hoch (CO₂-Entwicklung), und besondere Arbeitsschutzvorschriften müssen eingehalten werden.

3.2 Anwendung für Vergüsse

3.2.1 Verarbeitung

Der Einsatz von Gießharzen für großvolumige Bauteile muß zunächst kritisch beurteilt werden. Gewöhnlich sieht man ihre Anwendung für zweidimensionale Bauteile vor (z.B. Faserverbundwerkstoffe), denn die chemische Reaktion der Vernetzung in 3 Richtungen ist schlecht steuerbar und heftiger als eine Vernetzung in nur 2 Vorzugsrichtungen. Die entstehenden Wärmemengen werden nur langsam an den

Rand des Bauteiles abgeführt und erzeugen innere Spannungen. Die Komponenten Harz und Härter müssen deshalb mit Vorsicht formuliert werden und sollten auf die jeweiligen Randbedingungen (Vergußvolumen, Umgebungstemperatur) abzustimmen sein (Abschn. 3.1). Bei einer Zugabe von Füllstoffen darf die Viskosität und die Benetzungsfähigkeit der Gußmasse nicht leiden, damit sie sich innerhalb der Topfzeit im Drahtbesen und in der Hülse verteilen kann. Im Zeitraum zwischen Verarbeitung und Gelierbeginn sinken die Füllstoffe ab und sammeln sich an den tiefsten Punkten des Vergußkörpers (Konusspitze bei „stehendem“ Verguß).

3.2.2 Mechanische Verhaltensweisen

Gießharze sind glasartig (amorph). Die Sprödigkeit kann, wie schon erwähnt, über die Reaktionsgeschwindigkeit sowie Art und Menge des Füllstoffes beeinflusst werden. Mit langsameren Vernetzungsvorgängen und feinstem Füller erhält man auch plastifizierbare Endprodukte, die unseren Vorstellungen nach Abschn. 2.1 näher kommen (Bild 11). Dabei ist jedoch ein Kompromiß zu schließen, wenn das System trotzdem kriecharm – und damit hochgefüllt – und wärme-stabil sein soll. Der E-Modul fällt, ermittelt mit $\mu = 0,35$ und G nach [32], z.B. von 8000 N/mm² bei Raumtemperatur auf ca. 1800 N/mm² für Temperaturen knapp oberhalb des Glaspunktes ab. Nur bei wärme-stabilen Typen ist die Verminderung der mechanischen Eigenschaften bis 90°C als gering zu bezeichnen. Dafür müssen geringere Steifigkeiten und Festigkeiten bei Raumtemperatur in Kauf genommen werden (Bild 10).

Die Erscheinung der Kompressibilität und die unterschiedlichen Zug- und Druckfestigkeiten von Kunststoffen sind bei der Lastabtragung mit zu berücksichtigen. Bardenhaier [34] bezieht beides in ein Kriterium mit ein, welches aus einer Erweiterung der Gestaltänderungsenergiehypothese nach v. Mises hervorgegangen ist:

$$\sigma_{v,II} = \frac{m-1}{2m} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \sqrt{\left(\frac{m-1}{2m}\right)^2 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{2m} \times \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]}$$

Mit $m = R_{mD}/R_{mZ} = -1,5$ bis -2 wird das Festigkeitsverhältnis für die hier gewählten reinen Harze ausgedrückt, und die Kompressibilität wird über den hydrostatischen Spannungsanteil berücksichtigt. Bei der Berechnung der Konuspressung ergaben sich nur geringe Unterschiede zwischen der erweiterten Gleichung und dem Kriterium nach Tresca. Im Rahmen der vorhandenen Genauigkeiten der Werkstoffkennwerte wurde das Kriterium nur zur Berechnung der Synthesefaserseilvergüsse benutzt (Abschn. 4.2). In den anderen Fällen konnte ein Anstieg der Festigkeiten und Steifigkeiten des Harzes unter hohem Druck [35] vernachlässigt und die Kompressibilität mittels einer geringen Erhöhung des Schwindmaßes berücksichtigt werden.

3.2.2 Verguß von Drahtseilen

Drahtbesen und Verguß werden als Verbundwerkstoff angesehen. Es wird angenommen, daß zwischen beiden Komponenten keine Relativverschiebung stattfindet. Bei Kunstharzen als Vergußmaterial entspricht ein solches Grenzschicht-

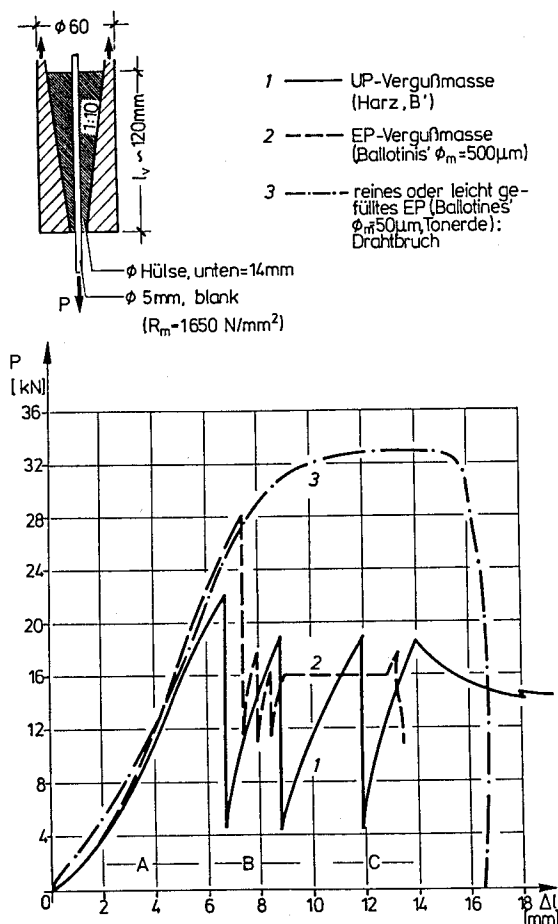


Bild 12. Ausziehversuche an Drähten $\varnothing = 5$ mm. Bereich A: Haftung über zwischenmolekulare Bindungskräfte (Klebung) und Querpressung; Bereich B: überwiegend Haftreibung; Bereich C: überwiegend Gleitreibung

verhalten einer Klebung. Bei reinen EP-Harzen kann man im Kurzzeitversuch Haftspannungen von 30 N/mm^2 erreichen, die als Mittelwert über die Einbindelänge bestimmt sind. Dieser Wert kann für geringe Füllgrade und bestimmte Füller noch ansteigen (Kurve 3 in Bild 12). Füllgrade von mehr als 50 Vol% setzen jedoch die übertragbaren Haftspannungen erheblich herab. So ergaben sich für gefüllte Epoxidharze im Mittel nur noch 15 N/mm^2 (Kurve 2 in Bild 12) und für gefüllte UP 5 N/mm^2 . Im letzteren Fall ergäbe sich für Drähte $\varnothing 5 \text{ mm}$ ($R_m = 1650 \text{ N/mm}^2$) eine theoretische Verankerungslänge von $L_v = 80 \cdot \varnothing_{\text{Draht}}$. Eine Querpressung des Drahtes zur Unterstützung des Verbundes ist also erforderlich.

Eine wirksame Klebung ist nur bei entsprechender Vorbehandlung der Drahtoberflächen zu erzielen:

- Reinigen von Fetten,
- Befreien von Oxidschichten.

Auch Zinkauflagen wirken haftmindernd.

Die wirkungsvollste Vorbehandlung der Drahtoberfläche ist Sandstrahlen: außer der Reinigung und der Vergrößerung der Oberfläche wirkt dieser Vorgang chemisch „aktivierend“: es steht mehr Bindungsenergie von der Stahloberfläche zu den benachbarten Molekülen des Kunststoffes zur Verfügung. Im Gegensatz dazu ist ein Verbund in der Grenzschicht Hülse/Verguß unerwünscht. Mit einem Trennmittel (Lack) kann der Konusschlupf sichergestellt werden, und es besteht die Möglichkeit, den Konus zur Sichtkontrolle nach dem Härten „auszuschalen“ (zurückzuschlagen).

Für die Untersuchungen [15] im Abschn. 4 wurden 2 Harzsysteme ausgewählt. Einem Markenprodukt auf der Basis eines hochreaktiven, gefüllten UP-Harzes (Harz A in den Bildern 10 und 11) wurde ein reines EP-Harz (Bild 11) mit folgenden Vorteilen gegenübergestellt:

- gering reaktiv und deshalb in großen Mengen vergießbar ohne innere Wärmespannungen,
- hervorragende Haftung an Stahl und
- plastisch verformbar.

3.2.4 Verguß von Faserseilen

Bei der Verankerung von Aramidfaserseilen müssen weitere Punkte beachtet werden: Die Herstellung eines Besens und seine Reinigung von Präparationsmitteln (meist Wachse, die die Reibung zwischen den Garnen mindern sollen und deshalb die Haftung mindern), ist wegen der Feinheit der Filamente aufwendiger. Auch hier wurde eine Querpressung infolge Konusschlupf zugelassen, da Aramide von ihrer chemischen Struktur her schlechte Hafteigenschaften besitzen (Ausnahme: in jüngster Zeit wurden haftfreundlich ausgerüstete Fasern entwickelt). Die Seile (Firma ICI: „Parafilseil“) selber besitzen den geringstmöglichen Querschnitt bei einem Füllfaktor von 70%. Die Kapillarwirkung in der Besenwurzel ist hoch. Deshalb sind Viskosität und Topfzeit des Kunstharzes so einzustellen, daß sich das Seil nicht mit Harz vollsaugen kann.

Als Vergußharz wurde ein Epoxid verwendet, welches üblicherweise für Verbundwerkstoffe in der Segelflugzeugherstellung („Glycidether“) benutzt wird und das eine hohe Haftung zu Synthesefasern besitzen soll. Die Vergußmenge ist wegen dem Aminhärter beschränkt (Bild 13). Die damit

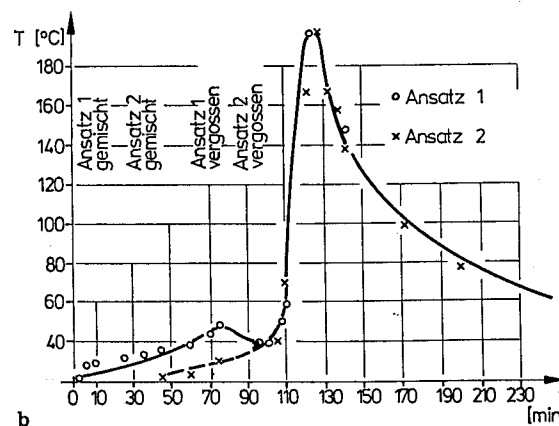
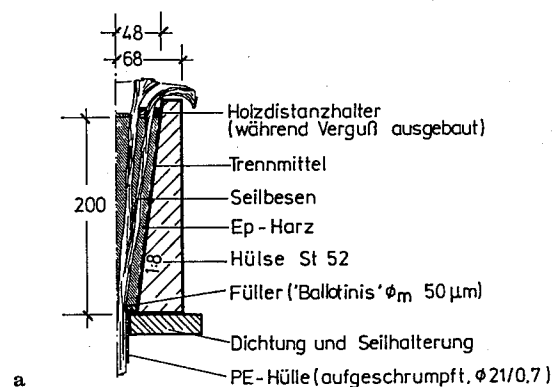


Bild 13a und b. Versuchsverankerung für ein Faserseil; a Schnitt durch den Vergußkörper des 600 kN „Parafilseiles“; b Reaktionsverlauf des Epoxides vom Volumen abhängig

verbundene reaktive Vernetzung ergibt ein etwas spröderes Harz als die versamidgehärtete Version für die Stahlseile. Teilweise wurden die Vergüsse mit feinstem Füller modifiziert.

Die Abminderung der Seiltragkraft wird mit steigendem Querschnitt des Seiles größer. Bei kleinen Vergußkörpern ($V = 200 \text{ cm}^3$) wurden bis zu 88% der Sollkraft erreicht (entsprechend 78 kN nach Abschn. 4, während bei einem 600 kN Seil ($V = 750 \text{ cm}^3$) nur noch 75% entsprechend 450 kN erreicht wurden. Es wurde eine Garnfestigkeit von 2000 N/mm² vorausgesetzt (Bild 14).

Ausgangspunkt des Versagens ist in jedem Fall die Faserwurzel. Die Garne saugen sich infolge des Kapillareffekts

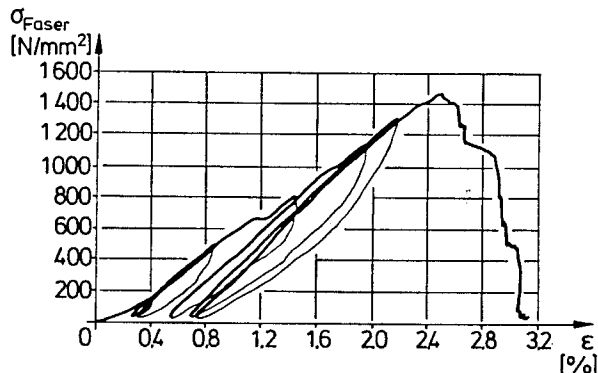


Bild 14. Spannungs-Dehnungs-Diagramm zum Zugversuch am 600 kN „Parafilseil“ (vgl. Bild 6a). Im 5. Lastaufgang wurde ein E-Modul von 78 000 N/mm² erreicht

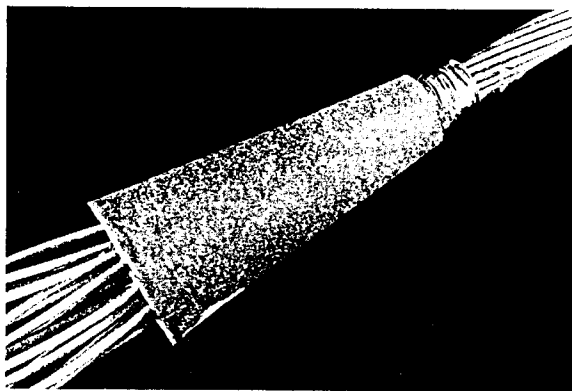


Bild 15. Vergußkonus des gefüllten Polyesterharzes (Harz A nach Bild 10) an einem Spiralseil 1 x 19

mit Harz voll und verhalten sich spröde. Zusätzlich können sie an dieser empfindlichen Übergangsstelle freies Seil/steifer Verguß Biegung erhalten, wenn ihre Lage in der Konusspitze nicht der Richtung der Zugkraft im Garn entspricht. Eine Umlagerung auf intakte Fasern findet wegen der geringen Dehnfähigkeit der Aramidfilamente ($\leq 4\%$) kaum statt.

4 Beanspruchung von Konus und Hülse

4.1 Versuchsbeschreibung

Das unterschiedliche Verhalten der ausgewählten Vergußharze in der Hülse und die Auswirkung der Verankerungen auf das Zugglied sollte in Versuchen geprüft werden. Von Bedeutung war speziell der Einfluß des Füllstoffes.

Die Auslegung der Größe von Seil und Verankerung für die Versuche war durch die Prüfeinrichtung (Zwick Prüfmaschine am Institut für Modellstatik) vorgegeben. Es wurde ein Spiralseil 1 x 19, verzinkt, mit einer Zugfestigkeit der Einzeldrähte von $R_m = 1650 \text{ N/mm}^2$ eingesetzt (Bild 15). Ein dreileitziges Aramidfaserseil desselben Querschnittes wurde zusammengebaut (Tabelle 2). Mit dem in Abschn. 3.2 geschilderten Epoxidharzverguß ergab sich etwa dieselbe Bruchkraft wie für das Stahlseil. Der Wirkungsgrad dieser Vergußverankerung lag, wie oben erwähnt, bei 88% (bei einer angenommenen Festigkeit von 2000 N/mm² für das Faserseil) im Gegensatz zu 100% beim Stahlseil. Infolge der guten Qualität der Versuchsseile entsprach hier die tatsächliche Bruchkraft der rechnerischen.

Die zurückgehängten Verankerungshülsen wurden aus St 52 gedreht und für mehrmalige Verwendung bis zur Seilbruchlast ausgelegt. Ein „Aufkrempeln“ der Hülsenöffnung infolge zu großen Konusschlupfes war nicht zu berücksichtigen. Mit Ausnahme des letzten Versuches wurde Versagen des Seiles auf freier Länge vorausgesetzt; ein Verguß aus gefülltem UP wurde so ausgelegt, daß kurz vor Erreichen der Seilbruchlast mit einem Konusversagen zu rechnen war (Bild 16). Eine der eingesetzten Hülsen wurde auf der Außenseite mit Dehnmeßstreifen bestückt: Mit 3mal 6 Rosetten auf drei Mantellinien (insgesamt 54 Meßstellen) konnten die Hülsenverformungen mit einer Vielstellenmeßanlage erfaßt werden. Mit Hilfe eines Meßprogrammes wurde das Seil verformungsgesteuert belastet und je Laststufe zusätzlich noch Kraft, Traversenweg und Konusschlupf abgefragt. Bild 17 gibt die Meßergebnisse unter der Last von 60 kN ($\sigma_{\text{Draht}} = 0,75 \cdot R_m$) an, die knapp unterhalb der Proportionalitätsgrenze der Seildrähte lag. Dies war mit Ausnahme der Messungen im letzten Versuch die höchste Laststufe im Prüfprogramm.

Tabelle 2. Kenndaten der in den Versuchen eingesetzten Seile

Seilart		Stahlseil	Synthesefaserseil
Aufbau		Verzinktes Spiral 1 x 19	3leitziges Aramidfaserseil
Schlaglänge	mm	äußere Drahtlage 120	200
Einzelelement R_m	N/mm ²	Drähte $\varnothing 1,8 \text{ mm}$ $R_m = 1570$	„Kevlar 29“ Garn; R_m Filament = 2700
Durchmesser Seil	mm	9	9,2
Bruttoquerschnitt	mm ²	63, 62	66
Nettoquerschnitt	mm ²	48, 35	46
Füllfaktor	%	76	70
Verseilverlust	%	~ 13	~ 25
Mit Vergußverankerung erreichbare Bruchlast	kN	77	78,5
Rechn. Bruchlast	kN	(Drahtqualität) 76	(Versagen d. Faser an d. Verankerung) ~ 90
E-Modul	N/mm ²	~ 150 000	~ 55 000

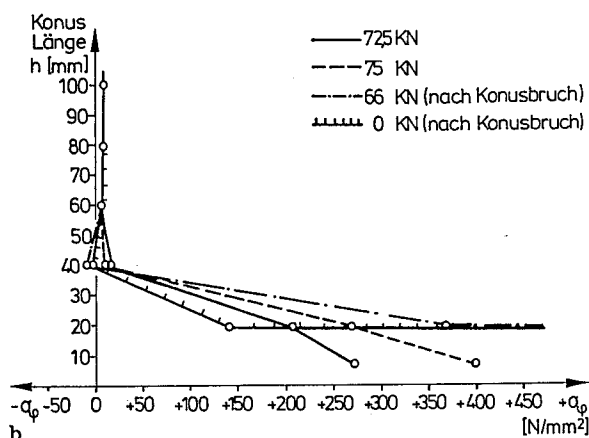
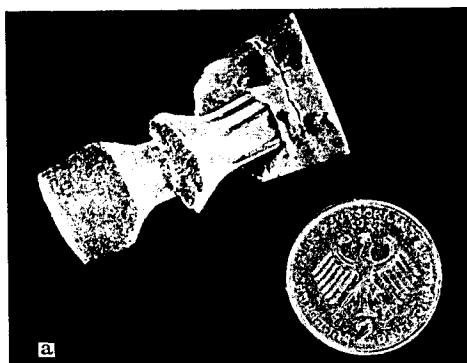


Bild 16a und b. a Bruchkörper des bei 78 kN zerbrochenen Konus aus gefülltem UP; b Verlauf der Ringspannungen auf der Hülse Außenseite bei diesem Versuch

Die Länge der Vergußkoni war wesentlich kleiner als die der Hülse. Somit wurden die Hülsen an den oberen Konusenden biegebeansprucht. Dieser Anteil an den Verformungen konnte nach Entlastung des Seiles festgestellt werden, da der Konus sich bei Entlastung nicht zurückbewegt: Die Längsspannungen verschwinden, Ring- und Biegespannungen aus dem Konusdruck ändern sich nur unwesentlich.

4.2 Versuchsergebnisse

Die gemessenen Verformungen der Hülse Außenseite wurden in Ringspannungen σ_ϕ und in Spannungen in Richtung der Seilachse σ_z umgerechnet. Aufgrund der genauen Herstellung der Verankerung waren die Unterschiede der Meßwerte aller drei Mantellinien gering, und die Meßwerte der jeweils gleichen Ebene konnten gemittelt werden.

In den Versuchen deckten sich die Richtungen der Hauptspannungen mit denen von σ_z und σ_ϕ . Bezüglich der Fertigung (Hülsen werden gegossen und nicht gedreht) und des Einbaues (Richtung der Zugkraft) ist dies ein Idealzustand, der in der Praxis nicht auftritt.

Der Verlauf von σ_z gibt die Kraftabtragung vom Seil über den Verguß in die Hülse wieder. Für das gefüllte UP-Harz ist die Kraftabtragung schon beinahe bei Meßpunkt 20 mm beendet. Bei den EP-Harzen ist die Krafteinleitungsstrecke größer und erreicht ihren maximalen Wert bei 40 mm; bei dem dehnungsweicheeren Synthesefaserseil ist die Krafteinleitungsstrecke, wie erwartet, fast doppelt so groß wie beim Drahtseil (70 mm, Bild 17).

Von dem Spannungsverlauf σ_ϕ in Umfangsrichtungen kann direkt auf den Verlauf der Konuspressungen geschlossen werden. Er zeigt deutlicher als die σ_z -Spannungen das unterschiedliche Verhalten der drei untersuchten Veranke-

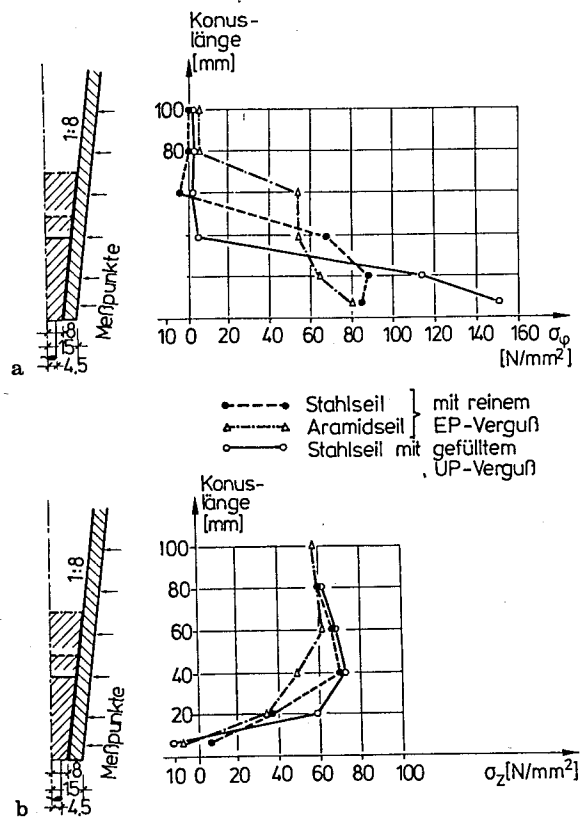


Bild 17a und b. Spannungsverläufe auf der Hülse Außenseite für eine Seilkraft von 60 kN; a in Umfangsrichtung; b in Richtung der Seilachse

rungen. Das gefüllte UP reagiert steif, und die rechnerisch ermittelte Konuspressung steigt in Richtung des freien Seiles fast linear bis $p_{\max} = 150 \text{ N/mm}^2$ an; im letzten Versuch wurde bei einer Seilkraft von 77 kN kurz vor dem Versagen des Konus gerade die Fließspannung 400 N/mm^2 der Hülse an dieser Stelle erreicht (Bild 16). Die Spannungsverläufe der EP-Harze sind viel ausgeglichener und betragen maximal nur etwas mehr als die Hälfte des Spitzenwertes des gefüllten Harzes.

Während die EP-Harze die Konuspressung ausgleichend verteilen können, wird bei der gefüllten Vergußmasse die Lastabtragung und die Steifigkeit vom Füller bestimmt [36]. Er sinkt während der Topfzeit ab und sammelt sich an der Konusspitze zu einem maximalen Füllgrad (etwa 60 Vol. %). Unter dem Druck der Konuspressung wird dort das Harz zwischen die Füllkörner in die Hohlräume gedrängt (Kompressibilität). Ausgehend von einem E-Modul der Vergußmasse von $10\,000$ bis $20\,000 \text{ N/mm}^2$ (gemessen im Zugversuch) steigt er hier auf

$$E = \varphi \times E_F + (1 - \varphi) \times E_H = 50\,000 \text{ N/mm}^2$$

mit φ = Füllgrad als Volumenanteil

$E_F = 80\,000 \text{ N/mm}^2$ (Quarzitische Füller)

$E_H = 4000 \text{ N/mm}^2$ (Harz)

Unter diesen Umständen ist die molekulare Bindung zwischen Harz und Draht im hohen Lastbereich nicht ausschlaggebend, die Lastübertragung übernimmt der Füller (Bild 18). Er muß einen Formschluß zum Draht aufbauen. Kann sich der Füllstoff aufgrund seiner Härte, Form und seines Volumenanteiles gegen den Draht abstützen, ist eine Verankerung auch dicker Drähte bis in ihren Fließbereich hinein sichergestellt. Dieses Prinzip (Kugelvegußmasse „HiAm“ [7]) konnte in Versuchen nachvollzogen werden [37]. Andere Füllstoffe,

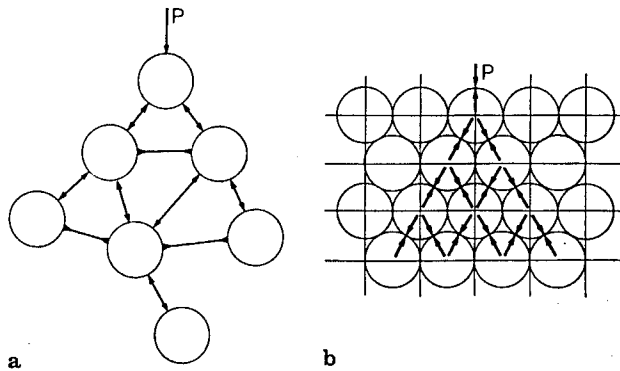


Bild 18a und b. Prinzip der Lastabtragung in einem gefüllten Kunstharzverguß (Extrema): a) das Kunstharz trägt maßgeblich; b) der Füller trägt maßgeblich

wie z. B. Glaskugeln („Ballotinis“) in hoher Packungsdichte, wirken wie Gleitlager und lassen den Draht nach Überwindung der chemischen Bindung und des Reibungsanteils durchrutschen (Vergleich der Kurven 2 und 3 in Bild 12).

Eine Verankerung dicker Drähte bis zum Bruch ist auch möglich, wenn die Haftfähigkeit verbessert werden kann. Dies wird erreicht, indem der Füllstoff fein ist und gut verteilt bleibt, so daß die maximale Haftfähigkeit des Harzes ausgenutzt werden kann, und die Lastabtragung der Seilkraft sich nicht auf die Konusspitze konzentriert (Bild 17).

Das Versagen des Konus bei 78 kN beweist das spröde Verhalten des hochgefüllten UP-Harzes. Schlagartig brach der Vergußkörper etwa $l_v/2 = 20$ mm trichterförmig aus (Bild 16). Die Konusspitze konnte dann mit abnehmender Last unter großer Aufweitung der Hülse weiter herausgezogen werden.

Mit der Annahme, daß bei gefüllten Vergußmassen keine plastische Verformung auftritt, konnten die Konuspressungen für den Lastfall 60 kN nachgerechnet werden. Bild 19

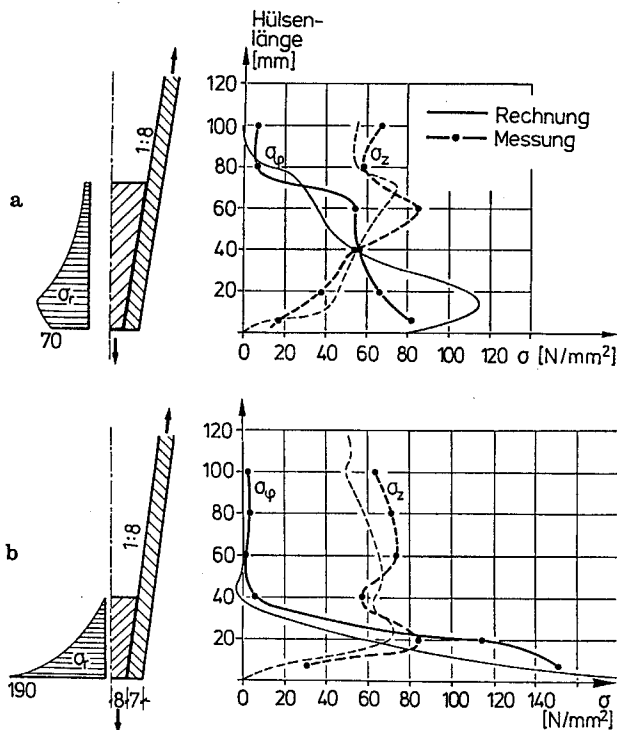


Bild 19a und b. Vergleich der gemessenen mit den gerechneten Spannungen der Hülse für die Konuspressung im Belastungsfall 60 kN: a) reines EP mit Aramidseil; b) gefülltes UP mit Stahlseil

zeigt die gemessenen Spannungen und den mit obiger Konuspressung mittels eines FEM-Programmes bestimmten Spannungsverlauf an der Hülseaußenseite.

Die Genauigkeit des nachgerechneten Verlaufes der Konuspressungen für die reinen EP-Harze war auch unter der Annahme bereichsweise auftretender plastischer Verformungen schlechter als diejenige der gefüllten Harze. Die Modellvorstellung der Umformtechnik für metallische Werkstoffe nach Abschn. 2.1 läßt sich auch mit den vorgenommenen spezifischen Änderungen (Abschn. 3.2.2) nicht zufriedenstellend auf Gießharze übertragen.

Die Messung des Konusschlupfes ließ keine eindeutigen Unterschiede im Verhalten der drei Vergußwerkstoffe (Bild 17) erkennen (etwa 1,4 mm für 60 kN). Die Grenzfläche wird bestimmt durch die Beschaffenheit der Oberfläche der Hülseinnenseite und der reinen Harzoberfläche. Nur bei geringen Vernetzungsgraden – wie sie z. B. für PETP-Seilvergüsse getestet wurden [16] – können höhere Schlupfwerte auftreten, und die Konusspitze kann sich umformen.

5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

5.1 Synthetische Garne und Dornverankerung

Die Chemiefasern für synthetische Zugglieder lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die eine Gruppe zeichnet sich aus durch relativ hohe Knotenfestigkeit und eine tiefe Glasübergangstemperatur (z. B. Polyestergerne), die andere Gruppe ist temperaturstabil und weist eine hohe Querdruckempfindlichkeit der Filamente auf (z. B. Kohlenstoff- und Glasfasern). Für den Einsatz bei bautechnischen Zuggliedern bietet sich die Aramidfaser an.

Einsatzreif von der Industrie entwickelt wurde dafür eine Keilverankerung, bei welcher ein zentrisch angeordneter Gleitdorn die Fasern in einer konischen Hülse festhält. Dieses System kann trocken zusammengebaut werden und besteht aus nur wenigen Komponenten, es hat jedoch verhältnismäßig große Abmessungen, einen großen Schlupfweg und reagiert mit nachteiligem Verhalten auf einen zu großen oder zu kleinen Faserquerschnitt.

5.2 Vergießen von Faserseilen mit Kunstharzen

Mittels einer Vergußverankerung können die aufgezählten Nachteile vermieden werden. Allerdings ist die Herstellung einer guten Vergußverankerung für Faserseile, für die nur gering gefüllte Epoxidharze verwendet werden können, nach dem heutigen Entwicklungsstand noch als sehr aufwendig einzustufen – aufwendiger als der metallische Verguß für Stahlseile.

Die Vergußhülse ist verhältnismäßig klein, der Schlupf gering und der Lastübergang von der Faser in die Hülse ziemlich gleichmäßig. Zwar ist das Grenzflächenproblem zwischen Filament und Matrix aus dem Bereich der Faser-verbundwerkstoffe her bekannt und läßt sich lösen, aber die Vorbehandlung und Ordnung des Faserseilendes erfordert ebenso wie der Aushärtvorgang des Harzes Zeit. Nur ein langsam härtendes System entwickelt geringe Wärmemengen und läßt den Makromolekülen Zeit zur parallelen Ausrichtung, damit eine möglichst kristalline Struktur erreicht wird [39].

Die Anwendung von Zuggliedern aus synthetischen Fasern bringt Vorteile, wenn

- das geringe Gewicht von Nutzen ist,
- die Korrosionsbelastung für den Stahl hoch ist,
- auf einen hohen Elastizitätsmodul verzichtet werden kann,

- die elektromagnetische Neutralität Störungen vermeiden hilft und Kosten spart,
- eine geringe Biegesteifigkeit den Transport, die Montage und eventl. Auswechslungen wesentlich erleichtert.

Diese Zugglieder sind erst konkurrenzfähig, wenn

- die Tragfähigkeit der Filamente in den Verankerungen nicht durch Biege- oder Querdruckeinflüsse reduziert wird,
- Langzeiteinflüsse auf das Verhalten des Konus aus synthetischem Harz bekannt sind, die von der Höhe der Dauerlast, den Lastveränderungen und der Erwärmung des Konus abhängen,
- der Seilaufbau und der Schutz der Faserseile bzw. -gelege so planmäßig vorgegeben werden kann, daß erhöhte Sicherheitsfaktoren entfallen können.

5.3 Vergießen von Stahlseilen mit Kunstharzen

Sehr viel positiver ist der Einsatz von Harzen für die Vergußverankerung von Stahlseilen zu beurteilen. Für diesen Anwendungsfall werden auch in anderen Instituten Untersuchungen durchgeführt [30, 40], die zum Wissen um das Tragverhalten des Konus aus synthetischen Harzen beitragen. Beim Verguß von Verankerungshülsen für Stahlseile erleichtert das Harz gegenüber der Metalllegierung den Herstellungsvorgang aufgrund seines geringeren spezifischen Gewichtes (1,8 gegenüber 6,6 g/cm³) und der nicht erforderlichen Erwärmung von Hülsen und Vergußlegierung. Ein wärmebeständiges, gefülltes ungesättigtes Polyesterharz kann so modifiziert werden, daß es den üblichen Anforderungen an marktübliche metallische Vergüsse für dünnröh-

tige Stahldrahtseile entspricht (Tabelle 3). Die bisher durchgeführten Untersuchungen ergaben:

- Die mechanischen Eigenschaften ändern sich im Temperaturbereich von 0°C bis 90°C nur unwesentlich.
- Das hohe Schwindmaß des Vergußwerkstoffes garantiert dessen Ablösen von der Hülseninnenwand. Der Konus kann schlupfen und die Drähte werden quergepreßt. Zur Haftung addiert sich ein Reibwiderstand.
- Die Vergußkomponenten können so dargereicht werden, daß eine Abstimmung auf Vergußmenge und Umgebungstemperatur möglich ist.
- Die Materialkosten sind gering.

Als Erschwernis für die Anwendung des Kunststoffvergusses bei Stahlseilen ergab sich, daß

- die aus der Klebtechnik bekannte Bindung zur Drahtoberfläche die Werte des metallischen Vergusses nur erreichen kann, wenn die einzelnen Drähte aufwendig gereinigt werden;
- für eine optimale Anwendung die Modifikation des Harzes, die Menge und Art des Füllers und die Geometrie der Hülse auf den Werkstoff, den Drahtdurchmesser und die Konstruktionsart des Zuggliedes abgestimmt werden muß, was sich am Beispiel der „HiAm-Verankerung“ leicht demonstrieren läßt [7];
- die heute marktüblichen synthetischen Vergußwerkstoffe nicht der Güte des von uns erreichten und verwendeten Harzes entsprechen.

In Tabelle 4 sind die unterschiedlichen Konusgeometrien angegeben, wie sie nach den vorliegenden Versuchsergebnissen und einzelnen Rechenergebnissen [12] dem einzelnen Vergußwerkstoff angepaßt sein sollten.

Tabelle 3. Bemessungskennwerte der Vergußmaterialien ZAMAK und gefülltes UP

Material		Gefülltes, wärmestabiles UP	GB Zn Al 6 Cu 1
Markenname		WIRELOCK	ZAMAK
Dichte	g/cm ³	1,75	6,6
Härte	N/mm ²	(155 Kugeldruckh.)	(786 Brinell)
E-Modul	N/mm ²	12 000	90 700
Druckfestigkeit	N/mm ²	90	230
Wärmeausdehnungskoeffizient α_T	$\frac{1}{k} \cdot 10^{-6}$	70	30
Querkontraktion μ		0,3	0,25
Schwindmaß	Vol. %	3,0	3,0

Tabelle 4. Vergußkennwerte und Vorschläge für Konusabmessungen

Vergußwerkstoff (Gruppenbezeichnung)	Bestandteile	E-Modul	Druckfestigkeit $R_{p,0,2}$	Konuswinkel 1:n	Konusradius $r_{\min}$	Konuslänge L	Bemerkungen
1	2	3	4	5	6	7	8
		N/mm ²	N/mm ²		r	r	r = Radius des fiktiven Zuggliedes mit der Völligkeit 1,0
ZAMAK Z 610	Zn Al 6 Cu 1	90 700	230	1:5	1,8	6	duktil, dicke Drähte
Feinzink	Zn 99,99	95 000	22	1:4	1,3	10	duktil, –
WM 80	Sn 80	55 700	62	1:3	1,5	10	duktil, dünne Drähte
Tego VG 3	Pb Sn 10 Sb 10	30 000	32	1:3	1,5	10	duktil, dünne Drähte
EP-Harz	reines EP	4000	60	1:3	1,8	12	duktil, –
WIRELOCK	wärmebeständ. gefülltes UP	10 000	85	1:5	2,0	12	spröde, dünne Drähte
Wewa	gefülltes EP	10 000	100	1:4	2,0	10	mittlere Drähte
Hi-Am	EP m. Stahlkugeln	120 000	120	1:6	1,3	6	–, dicke Drähte

Literatur

1. Weiser, M.: Erste mit Glasfaser-Spanngliedern vorgespannte Betonbrücke. Beton- u. Stahlbetonbau 2 (1983) 36–40
2. Burgaone, C. J.; Chambers, J. J.: Prestressing with parafil tendons. Concrete 19/10 (1985) 12–15
3. Gerritse, A.; Schürhoff, H.: Prestressing with aramid tendons. 10th Intern. Congr. of the FIP, Bd. 3. New Delhi, Febr. 1986
4. Gropper, H.; Sobek, W.: Zur konstruktiven Durchbildung ausschließlich zugbeanspruchter Membranränder, 1. Berichtsh. zum 3. Intern. Symp. 1985 des Sonderforschungsbereiches „Weitgespannte Flächentragwerke“ S. 187–193. Universität Stuttgart 1985
5. Hammer, M.: Across the channel by 2000. New Sci. 106 (1985) 16–19
6. Medicus, F.: Verankerungen von Drahtseilen und Dehnungsmessungen an Seilköpfen. Goldschmidt informiert, Nr. 16, 1971
7. Ändra, W.; Zellner, W.: Zugglieder aus Parallelrahtbündeln und ihre Verankerung bei hoher Dauerschwellbelastung. Bautechnik 8; 9 (1969) 263–268; 309–315
8. Birkenmaier, M.; Narayanan, R.: Fatigue resistance of large high tensile steel stay tendons. JABSE-Colloquium, Lausanne 1982
9. Dodd, J. M.: Resin socketing for wire ropes/internal report. Glasgow 1975
10. Kepp, B.: Zum Tragverhalten von Verankerungen für hochfeste Stäbe aus Glasfaserverbundwerkstoff als Bewehrung im Stahlbetonbau. Diss. TU Braunschweig 1984
11. Bergermann, R.: Seilkonstruktionen – Untersuchungen an Seilköpfen. Düsseldorf: Werner-Verlag 1974
12. Schumann, R.: Anwendung werkstoffmechanischer Zusammenhänge auf Vergußverankerungen von Seilen. Draht 35 (1985) 621–624
13. Schumann, R.: Vergußverankerungen von Stahlseilen. Düsseldorf: Werner-Verlag (voraussichtl. 1987).
14. Gropper, H.: Untersuchungen von kalthärtenden Reaktionsharzen als Verankerung für Seile. Intern. Bericht, Inst. f. Massivbau, Dez. 1983
15. Gropper, H.: Seilvergüsse aus Kunstharzen, Messung von Hülsevenformungen. Intern. Bericht Inst. f. Massivbau, Jan. 1986
16. Gropper, H.: Versuche zur Verankerung von Synthesefaserseilen. Intern. Bericht Inst. f. Massivbau, März 1986
17. Leonhardt, F.: Spannbeton für die Praxis, Berlin: Ernst & Sohn 1962
18. Nürnberger, U.; Patzak, M.: Metallische Verankerungen für dynamisch beanspruchte Zugglieder. Sonderforschungsbereich 64, Univers. Stuttgart 1978
19. Gabriel, K.: Ebene Seiltragwerke. Merkblatt 496, Düsseldorf: Beratungsstelle für Stahlverwendung 1980
20. Gabriel, K.: Seile aus Stahldrähten. Stahl im Hochbau, 14. Aufl., Bd. 1, Teil 3, S. 211–233. Düsseldorf: Stahleisen 1984
21. Gleitlagertechnik. Goldschmidt informiert, Nrn. 60 und 61, Berichtreihe d. Fa. Goldschmidt, 1984 Essen
22. DIN 3092: Drahtseilvergüsse in Seilhülsen, Teil 1: Metallische Vergüsse. Berlin: Beuth 1986
23. DIN 1743: Feinzink-Gußlegierungen. Berlin: Beuth 1978
24. Patzak, M.; Nürnberger, U.: Grundlagenuntersuchungen zur statischen und dynamischen Belastbarkeit von metallischen Drahtseilvergüssen. Sonderforschungsbereich 64, Univers. Stuttgart 1978
25. VDI-Richtlinie 2500: Faserseile aus Pflanzen und/oder synthetischen Fasern. Düsseldorf: VDI-Verlag 1975
26. DIN 61300 Teil 1: Hebebänder aus synthetischen Fasern. Berlin: Beuth 1983
27. DIN 83305: Faserseile. Berlin: Beuth 1983
28. Offenlegungsschrift 2231481.4 vom 28. 6. 1972: Seilverbindung
29. Versuchsberichte zur Gleitdornverankerung und zum Randelement. FMPA-Stuttgart/Inst. f. Massivbau, März 1984
30. Müller, H.: Untersuchungen an Hanfseilen. Diss. Univers. Stuttgart 1940
31. Zhang, S.; Leech, C. M.: The use of inhomogeneous finite elements for prediction of stress in rope terminations. Personal Manuscript, University of Manchester 1985
32. DIN 7724 Teil 1: Gruppierung polymerer Werkstoffe aufgrund der Temperaturabhängigkeit ihres mechanischen Verhaltens. Berlin: Beuth 1983
33. DIN 16945: Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen. Berlin: Beuth 1976
34. Bardendhaier, R.: Mechanisches Versagen von Polymerwerkstoffen. München: Hanser 1982
35. Wronski, A. S.; Parry, T. V.: Fracture of a plasticized epoxide under superposed hydrostatic pressure. J. Material Sci. 17 (1982) 2047–2055
36. Rehm, G.; Franke, L.; Zeus, K.: Kunstharzmörtel und Kunstharzbetone unter Kurzzeit- und Dauerstandsbelastung. DAfStb, H. 309, Berlin: Ernst & Sohn 1980
37. Gropper, H.: Modifizierte Harze, eine kurze Zusammenstellung von Literaturrecherchen und Versuchsergebnissen. Inst. f. Massivbau, Univers. Stuttgart 1985
38. Alt, B.: Der Aushärtograd ungesättigter Polyesterharze und seine Bedeutung für die Praxis. Kunststoffe 54 (1964) 738–745
39. Findley, W. N.; Reed, R. M.: Effect of cross-linking on hydrostatic creep of epoxy. Polym. Eng. Sci 17 (1977) 837–841
40. Chaplin, C. R.; Charman, P. C.: Load transfer mechanics in resin socketed termination. Wire Industry (1984)
41. DIN 53842: Knoten-Zugversuch. Berlin: Beuth 1976