

H. Gropper und W. Sobek

Zusammenfassung:

Über Randausbildungen von Membrantragwerken werden theoretische Überlegungen angestellt. Anschließend wird über die Neuentwicklung eines textilen Randelementes berichtet, von dem ein Prototyp in Zusammenarbeit mit einer Weberei verwirklicht werden konnte. Dieser Prototyp wurde unter Einsatz verschiedener Verankerungen getestet. Die Verankerung von Synthesefaserzuggliedern stellt sich dabei als problematisch heraus und wird deshalb näher untersucht.

Summary:

Theoretical investigations on the detailing of membrane - edges are described. A short outline is given on the development of a new textile membrane - edge - element which was realized in cooperation with a weaving mill. A prototyp of the element was tested with several different end anchorages. Anchoring synthetic fibres in tension proved to be critical. Therefore this problem was studied in detail.

1. Der Einfluß der Randausbildung auf das Tragverhalten von Membranen im randnahen Bereich

Das Tragverhalten von Membranen wird im randnahen Bereich (und dabei insbesondere in den Zwickelbereichen) stark von der gewählten Randausbildung beeinflusst /1//3//4/. Im Bereich der ausschließlich zugbeanspruchten Membranränder zeigen dabei die bisher üblichen Randausbildungen wie

- Stahlseil in einer Membrantasche
- Stahlseil in einer Membrantasche und ein zusätzlich aufgenähter Gurt
- Verstärkung des Randes durch einen aufgenähten Gurt
- Stahlseil, das durch einen Schnürstoß mit der Membrane verbunden wird
- Stahlseil, das über eine Klemmplattenverbindung mit der Membrane verbunden wird

deutliche Nachteile nicht nur hinsichtlich ihrer konstruktiven Durchbildung, sondern auch hinsichtlich des durch sie beeinflussten Tragverhaltens des Membrantragwerks /1//4/.

Die Beeinflussung des Tragverhaltens der Membrane durch die Randausbildung ist im wesentlichen durch die Parameter

- Aufnehmbarkeit von tangential zur Randkurve wirkenden Membrankräften durch die Randverstärkung
- Steifigkeitsrelation von Randverstärkung und Membrane gekennzeichnet.

Die Art und Größe dieser Beeinflussung stellt sich sehr komplex dar, so daß an dieser Stelle nur kurz einige der auftretenden Effekte skizziert werden sollen und ansonsten auf die theoretische Untersuchung /3/ verwiesen wird.

Bereits die Erzeugung eines planmäßigen Vorspannzustandes im randnahen Bereich ist ausgeprägt abhängig von der zur Anwendung kommenden Randausbildung: Beim Übergang der Membrane vom entspannten in den vorgespannten Zustand muß die Randverstärkung die in der Membrane entstehenden Kräfte aufnehmen können und dabei durch ihr Verformungsverhalten die planmäßige (Vorspann-) Deformation der Membrane ermöglichen. Wird bei der Tragwerksplanung die Dehnsteifigkeit des Randelements nicht berücksichtigt, so führen z.B. relativ dehnweiche Randverstärkungen (unter der Annahme einer Membrane mit isotropen Werkstoffeigenschaften) zu überhöhten Zwickel-längskräften n_x bei gleichzeitig niedrigen Zwickelquerzugkräften n_y . Bei einer relativ dehnsteifen Randverstärkung (wie z.B. einem Stahlseil) dreht sich dieser Membrankraftzustand im Zwickelbereich um: Es entstehen überhöhte Zwickelquerzugkräfte n_y bei gleichzeitig gegenüber dem Soll -

Vorspannzustand zu niedrigen Zwickellängskräften n_x .

Die erforderliche Abstimmung der Dehnsteifigkeiten von Membrane und Randverstärkung scheidet an der bisherigen konstruktiven Lösung des Details "Randelement", denn hier werden, bis auf Ausnahmen bei sehr kleinen Zeltbauten, bisher ausschließlich Stahlseile, z.T. in Verbindung mit Gurten, als Randverstärkung verwendet. Bis auf den Fall der bautechnisch kaum zu realisierenden Kompensation dieser Stahlseile /4/ ist dadurch eine Abstimmung der Dehnsteifigkeiten Randverstärkung/Membrane nicht möglich. Neben einer Reihe weiterer Überlegungen führte diese Erkenntnis zur Neuentwicklung eines Membran - Randelements. Diese Neuentwicklung wird in Kap. 2 beschrieben. Eine der Besonderheiten des neuentwickelten Randelements ist seine Herstellung aus Synthesefasern. Hierdurch werden die gewünschten Steifigkeitsabstimmungen ermöglicht.

Die bisherige Schilderung der Zusammenhänge am Zwickelbereich der Membrane ging von einem Membranwerkstoff mit isotropen Werkstoffeigenschaften aus. Diese Annahme kann bei der Verwendung von beschichteten Geweben als Membranwerkstoff nicht aufrechterhalten werden. Durch die Wahl der Bahnlage und damit der Steifigkeitsverteilung in der Membrane tritt ein weiterer das Tragverhalten der Membrane beeinflussender Parameter auf. Bei der Verwendung von Parallelzuschnitten zum Beispiel ändert sich die zur Erzeugung der planmäßigen Vorspannung erforderliche Dehnung entlang der Randkurve. Die Herstellung von Randverstärkungen mit einer sich kontinuierlich ändernden Dehnsteifigkeit ist aber wegen der damit verbundenen Kosten ausgeschlossen. Es stellt sich somit die Frage nach der Art der Beeinflussung der Kräfte in der (Gewebe-) Membrane beim Vorspannen durch die Dehnsteifigkeit des Randelements. Die Dehnsteifigkeit des Randelements ist dabei als konstant über dessen Länge anzunehmen.

Für den Fall eines ebenen, unendlich langen Membranstreifens aus einem PVC - beschichteten Polyestergerewebe (dessen Kettrichtung in der x - Richtung des verwendeten Koordinatensystems liegt) zeigt Abb. 1a beispielhaft diejenigen Zwickelquerzugkräfte n_y in Abhängigkeit von der Dehnsteifigkeit des Randelements, die beim Übergang vom spannungslosen in den vorgespannten Zustand entstehen. Es ist deutlich zu erkennen, wie mit abnehmender Dehnsteifigkeit des Randelements die Zwickelquerzugkräfte immer kleiner werden. Dies ist wiederum gleichzeitig mit einer Zunahme der Zwickellängskräfte n_x (nicht dargestellt) in der Membrane verbunden. Der Soll-Vorspannzustand kann (mit Ausnahme des "Idealalles" des kompensierten Stahlseils) in keinem Fall ohne merkliche Abweichungen erreicht werden. Die Beeinflussung der Membrankräfte durch die Dehnsteifigkeit der Randausbildung ist in Abb.1b für den Fall eines simulierten Montagefehlers, einer

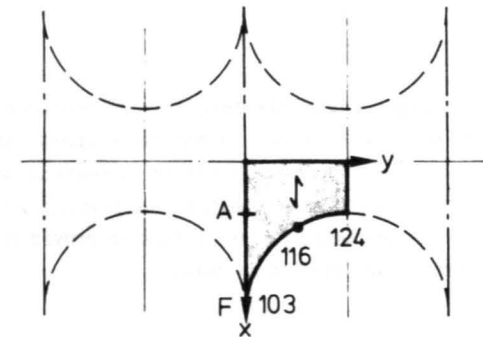
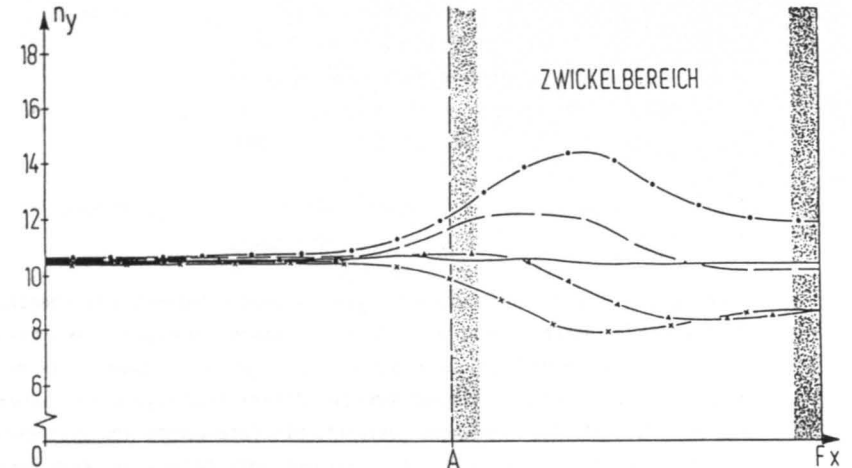
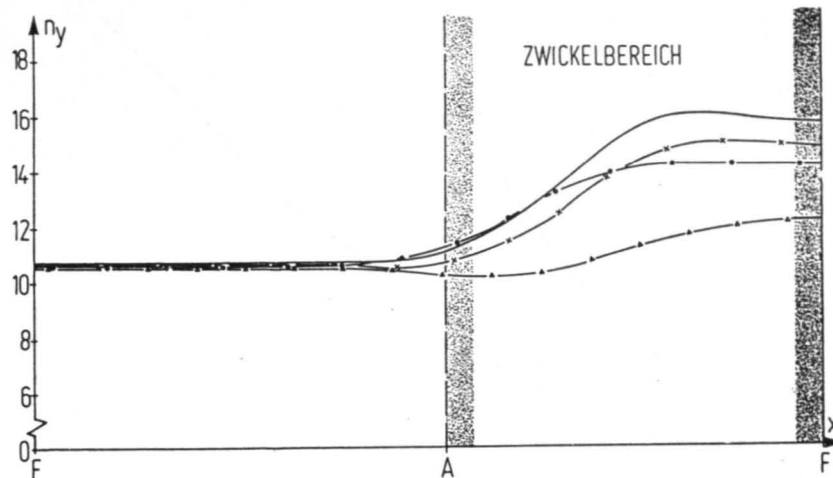


Abb. 1a: Membrankräfte n_y entlang des Schnittes $y = 0$ in Abhängigkeit von der Randausbildung. Vorspannzustand. Ebener, unendlich langer Membranstreifen /3/. Legende siehe Abb. 1b.



- | | | |
|----------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eich 103 | —•— | Textiles Randelement aus
Synthesefasern
{ EA (Eich 103) > EA (Eich 116) > EA (Eich 124) |
| Eich 116 | — — — | |
| Eich 124 | —▲— | |
| KS | — — — | Kompensiertes Stahlseil. Ein in einer Membrantasche liegendes Stahlseil wird in kurzen Abständen fest an die Membrantasche geklemmt. Die ungedehnte Länge des Stahlseiles zwischen diesen Klemmprofilen wird dabei so vorgegeben, daß sich der gewünschte Vorspannzustand der Membrane einstellt. |
| NKS | —x— | Nicht kompensiertes Stahlseil. Das Stahlseil hat im spannungslosen Montagezustand die Länge der Randkurve der vorgespannten Membran. |

Abb. 1b: Membrankräfte n_y entlang des Schnittes $y = 0$ nach einer Verschiebung des Punktes F um $\Delta x = 0,2$ m. Ebener, unendlich langer Membranstreifen/3/.

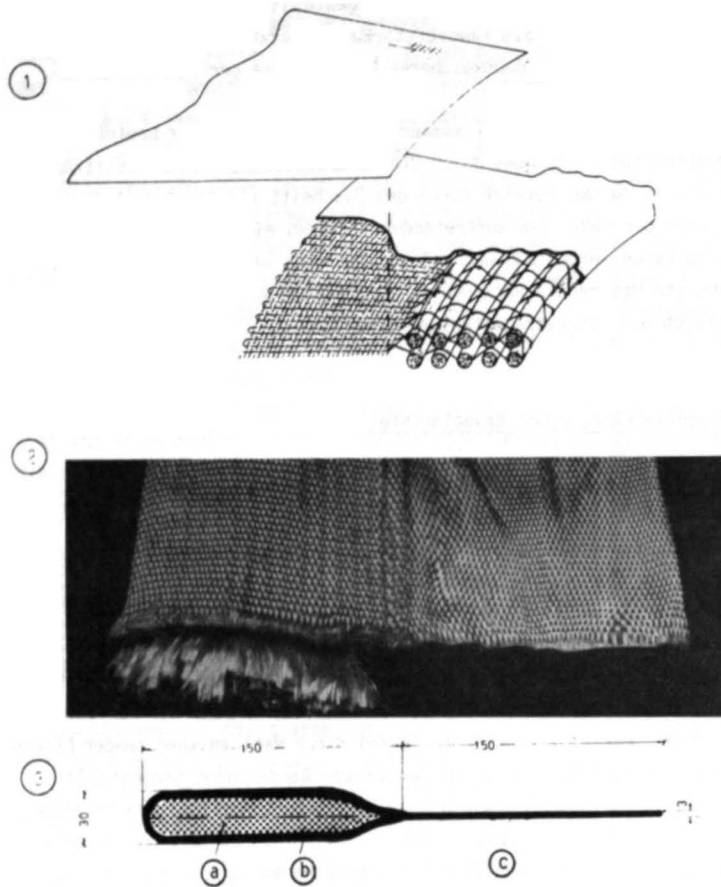
Ankerpunktsverschiebung um $\Delta x = 0,2$ m, dargestellt. Der "Idealfall" eines kompensierten Stahlseils als Randverstärkung bewirkt hier das ungünstigste Verhalten, wohingegen die dehnweicherer Randelemente geringere Membrankrafterhöhungen hervorrufen.

Die hier nur kurz skizzierten Zusammenhänge hinsichtlich der Beeinflussung des Membranspannungszustandes durch die Randausbildung machen deutlich, daß insbesondere im Zwickelbereich durch den Zuschnitt und damit auch durch die Wahl der Lage der Nähte den auftretenden Effekten einerseits konstruktiv Rechnung getragen werden muß und daß andererseits hinsichtlich der Dimensionierung von Membrantragwerken eine sorgfältige Bemessung in diesem Detailbereich des Gesamttragwerkes erforderlich ist.

2. Zur Neuentwicklung eines Randelementes

Grundlage für die Neuentwicklung eines Randelementes waren die Forderungen nach Aufnehmbarkeit von Membrankräften in radialer und tangentialer Richtung zur Randkurve durch das Randelement sowie dessen auf eine aktuelle Konstruktion hin abstimmbare Dehnsteifigkeit. Gleichzeitig sollte die erarbeitete Lösung prinzipiell für alle zur Zeit verwendeten Membranwerkstoffe eine Anwendbarkeit gewährleisten. Insbesondere die letzte Forderung führte dazu, ein aus miteinander verwebten Synthefasern bestehendes Randelement mit asymmetrischem Querschnitt zu entwickeln (Abb. 2). Für verschiedene Membranqualitäten kann so leicht durch Wahl entsprechender Fasern bei gleichbleibendem Webprinzip ein geeignetes Randelement hergestellt werden. Durch den asymmetrischen Querschnitt ist es möglich, den in seiner Materialdicke der Membrane selbst vergleichbaren dünnen Teil des Randelementes durch herkömmliche Konfektionierungsmethoden mit der Membrane zu verbinden. Damit entfallen alle Schwierigkeiten wie sie z.B. aus der Konfektionierung von Textilgurten an Membranen bekannt sind. Der dünne Teil des Querschnittes leitet sowohl Radial- wie auch Tangentialkräfte aus der Membrane in den dicken Querschnittsteil des Randelementes über, der die eigentliche lastabtragende Funktion besitzt.

In Zusammenarbeit mit einer Weberei wurde ein Prototyp des Randelementes hergestellt. Er besteht aus hochfesten Polyesterfasern (Polyethylenglykolyterephthalat PETP) mit einer Gesamtbruchlast von etwa 1000 kN. Abb. 3 zeigt in einaxialen statischen Zugversuchen gemessene Kraft - Verformungslinien des Randelementes. Bei diesen Versuchen kamen zwei verschiedene Arten der Verankerung zur Anwendung. Gegenüber der Kunstharz - Vergußverankerung weist die mit einer Gleitdornverankerung verankerte Probe bei der



- (a) Füllkette: PETP - Multifilamentgarn, 130 Fäden a 66 000 dtex, Z 60; $P_{max} = 4,4 \text{ kN/Faden bei } \epsilon = 14 \text{ \%}$.
- (b) Schlauchgewebe: Kettfaden: PETP - Multifilamentgarn, 1602 Fäden a 5720 dtex, Z 60; $P_{max} = 0,43 \text{ kN/Faden bei } \epsilon = 14 \text{ \%}$.
- (c) Anschlußgewebe: Kettfaden: PETP - Multifilamentgarn, 350 Fäden a 5720 dtex, Z 60; $P_{max} = 0,43 \text{ kN/Faden bei } \epsilon = 14 \text{ \%}$.

Abb 2: Ausbildung des neuen Randelements:

- (1) Entwurfszeichnung /7/
- (2) Prototyp /8/
- (3) schematischer Aufbau und Fadenbesckung des Prototypes /2/.

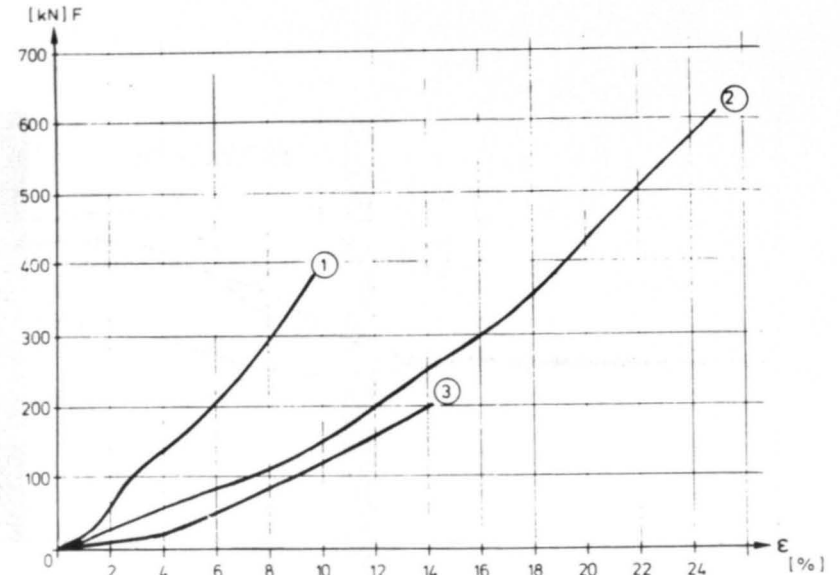


Abb. 3: In Versuchen ermittelte Kraft - Verformungslinien des Randelementes /5/:

- (1) Vergußverankerung
- (2) Gleitdornverankerung
- (3) Vergußverankerung ohne Füllkette

Erstbelastung höhere Deformationen auf. Auf dieses durch den Verankerungstyp bedingte Verhalten wird in Kapitel 3 näher eingegangen. Aus herstellungstechnischen Gründen wurden bei der Produktion des Randelement - Prototypes nicht alle Kettfäden in das Randelement eingewebt. Weil die Fäden der Füllkette bereits bei Belastungsbeginn durch ihre gestreckte Lage im Randelement Kräfte übernehmen, die Kettrichtung des Schlauchgewebes infolge der durch die Einwebung bedingten Kettfadenwelligkeit jedoch bedeutend größere Dehnungen bis zum Erreichen der Bruchlast erfährt, kann in der vorliegenden Version des Randelementes noch nicht die aufgrund des vorhandenen Faserquerschnittes theoretisch mögliche Bruchlast erreicht werden. Dieser Nachteil soll zukünftig dadurch umgangen werden, daß alle Kettfäden webtechnisch eingebunden werden. Bei Anwendung eines Straight - Warp Verfahrens liegen hierbei die Kettfäden nahezu gestreckt im Randelement, so daß die Strukturdehnung des Randelements sehr klein wird. Die Einbindung

der Schußfäden erfolgt beim Straight - Warp Webprinzip durch eine Hilfskette.

3. Zur Verankerung des Randelementes

Für die Verankerung von Synthefasern bzw. von aus ihnen hergestellten Seilen, Gurten, Randelementen o.ä. steht nur eine beschränkte Palette technischer Möglichkeiten zu Verfügung. Im wesentlichen können vier Methoden unterschieden werden:

- a) Schlaufenbildung mit Spleißen
- b) Schlaufenbildung mit Vernähen
- c) Klemmen
- d) Vergießen

Verankerungen durch Spleißen oder Vernähen sind für das Randelement zu unhandlich. In den hier vorgestellten Untersuchungen wurden daher als Klemmverankerungen eine Gleitdornverankerung und als Vergußverankerung eine Reihe von Kunstharzvergüssen untersucht /2/ /5/ /6/.

3.1 Gleitdornverankerung

Das Prinzip einer Klemmverankerung ist von Spanngliedverankerungen her bekannt und wird für Synthefaserseile in Form einer Gleitdornverankerung z.B. im Antennenbau eingesetzt. Für die hier durchgeführten Versuche wurde eine Sonderanfertigung verwendet (Abb. 4). Bei der Montage wird das Randelement durch die Hülse gezogen und anschließend aufgefächert. Sodann wird ein Dorn von hinten zentrisch in das Faserbündel eingepreßt. Unter Zugbelastung ziehen die Fasern den Dorn in die Hülse (Bild 5). Sie werden durch den kleiner werdenden Ringspalt zwischen Hülse und Dorn eingeklemmt. Der Dorneinzug ist bei der Wahl der Abmessungen der Verankerung zu berücksichtigen, da die Dornlage, die zulässigen Querpressungen der Synthefasern und die Zugkraft im Randelement aufeinander abgestimmt werden müssen. In Kurzzeitversuchen mit dem Randelement wurden aufgrund des unterschiedlichen Kraft - Dehnungsverhaltens von Füllkette und Schlauch 620 kN /2/ erreicht. Mit Seilen aus Parallelfaserbündeln gleichen Querschnittes betrug die Bruchkraft 1000 kN /5/.

Die Gleitdornverankerung ermöglicht die Verankerung von Synthefasern bis zur Bruchkraft des Seiles, da sich die ungleichmäßig eingebauten Fasern beim Gleiten des Dornes orientieren können. Die Dimensionen der

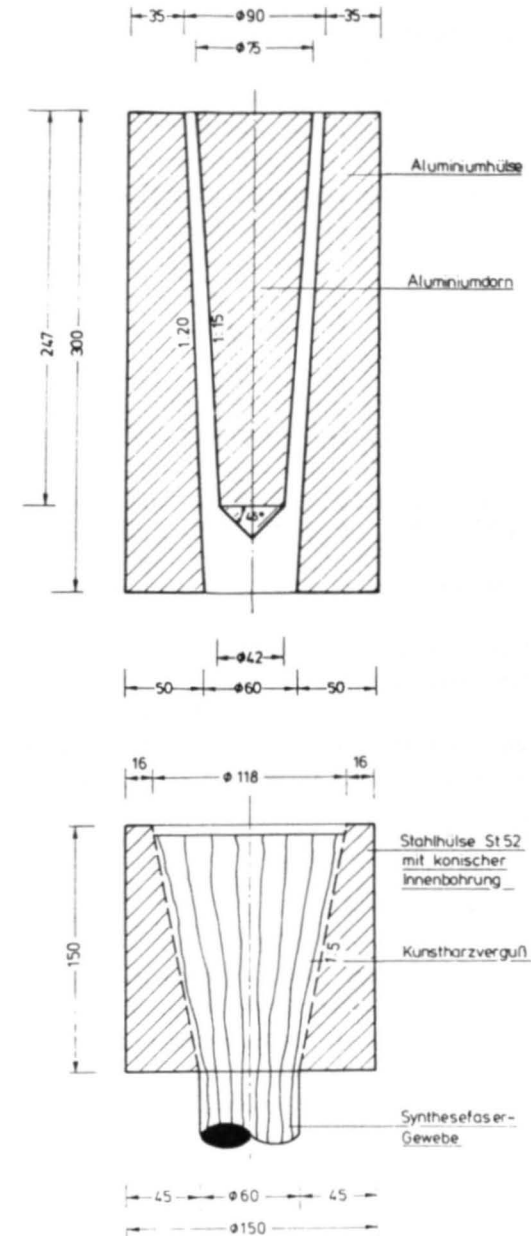


Abb. 4: Die Abmessungen der Gleitdorn - und Vergußverankerung /2/ /8/.

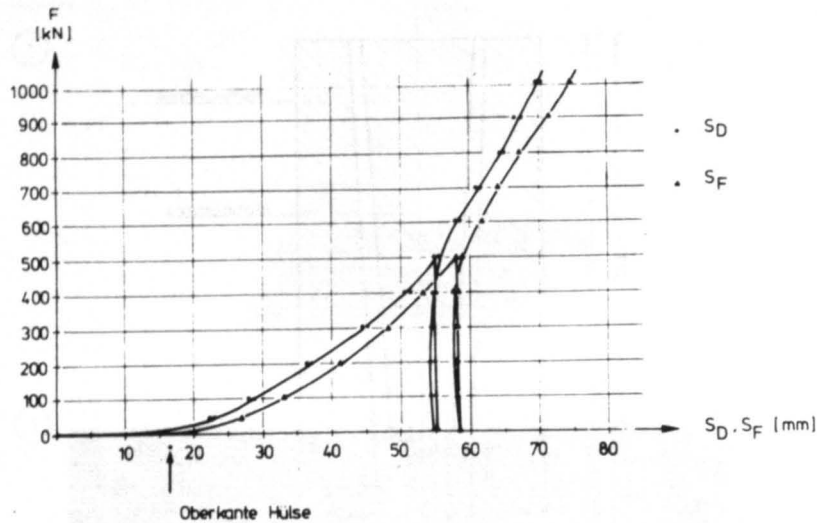


Abb. 5: Im Versuch gemessener Dorn - (s_F) und Fasereinzug (s_D) einer Gleitdornverankerung /5/.

Verankerung sind jedoch groß und der Gleitweg muß bei praktischen Einsätzen durch Vorrecken bis zur Höhe der maximal auftretenden Belastung vorweggenommen werden.

3.2 Vergußverankerung

Aufgrund dieser Randbedingungen (Abmessungen der Hülse, Notwendigkeit eines Vorreckens) schien eine Vergußverankerung für einen Einsatz bei Membrantragwerken besser geeignet, zumal die Technologie von Stahlseilvergüssen mit Kunstharzen übernommen werden könnte. Erste Versuche mit dem Randelement (Bild 3,4) waren nicht zufriedenstellend /2/. Dies ist auf die hohen Anforderungen an den Kunstharzverguß zurückzuführen. Das verwendete Harz muß:

- eine gute Haftung zu Synthesefasern besitzen;
- gut fließfähig und benetzend sein;
- sich in großen Mengen vergießen lassen;
- das Polyestermaterial nicht durch Wärmeentwicklung beim Abbinden

schädigen;

- in seiner Steifigkeit auf die verwendeten Fasern abgestimmt werden.

Zusätzlich spielt die Frage der Abdichtung und der Faserreinigung im Verbundbereich eine große Rolle.

Um den Aufwand gering zu halten, wurden die Versuche im kleinen Maßstab weitergeführt /6/. Im Rahmen einer Optimierung dieser kleinmaßstäblichen Vergußverankerungen wurde es durch Entwicklung eines schwach reaktiven Kunstharzsystemes möglich, im Zugversuch 90 % der Garnbruchlast zu erreichen (Bild 6). Dieses Vergußsystem erlaubt auch die Herstellung voluminöser Vergüsse. Erste Versuche mit den kleinmaßstäblichen Vergußverankerungen unter dynamischer Belastung ($P_U = 0,1 P_{max}$, $P_O = 0,5 P_{max}$) mußten aus Kostengründen nach 2000 Lastwechseln abgebrochen werden: die Restbruchlast von Garn und Verankerung betrug ebenfalls 90 % der Garnfestigkeit. Durch die Weiterentwicklung der Vergußverankerungen und der Gewebekonstruktion hoffen die Autoren, bald ein Randelement für den Einsatz an einem Membranbauwerk bereitstellen zu können. Die erreichbare Vereinfachung der Detaillierung zeigen die Skizzen in Abb. 7 im Vergleich einer Zwickelausbildung konventioneller Art mit einer Zwickelausbildung für das neuentwickelte Randelement.

4. Literaturverzeichnis

- /1/ Schlaich, J., Kleinhanß, K., Gabriel, K.: Membrandach aus der Sicht des planenden Ingenieurs. Symposium "Beschichtete Chemiefasergewebe". Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Aachen 1979.
- /2/ Sobek, W.: Drei Zugversuche an Probekörpern eines Membranrandelementes aus hochfesten Polyesterfasern. Interner Bericht am Institut für Massivbau - SFB 64, Stuttgart 1983.
- /3/ Sobek, W.: Biegegewichte, nur durch Zugkräfte beanspruchbare Membranrandverstärkungen. Interner Bericht am Institut für Massivbau - SFB 64, Stuttgart 1983.
- /4/ Sobek, W.: Untersuchungen zum Problem der Randausbildung mechanisch vorgespannter Membrankonstruktionen. Diplomarbeit am Institut für Massivbau - SFB 64, Stuttgart 1980.
- /5/ Gropper, H.: Versuchsberichte Gleitdornverankerung. Interner Bericht am Institut für Massivbau - SFB 64, Stuttgart 1983/84.

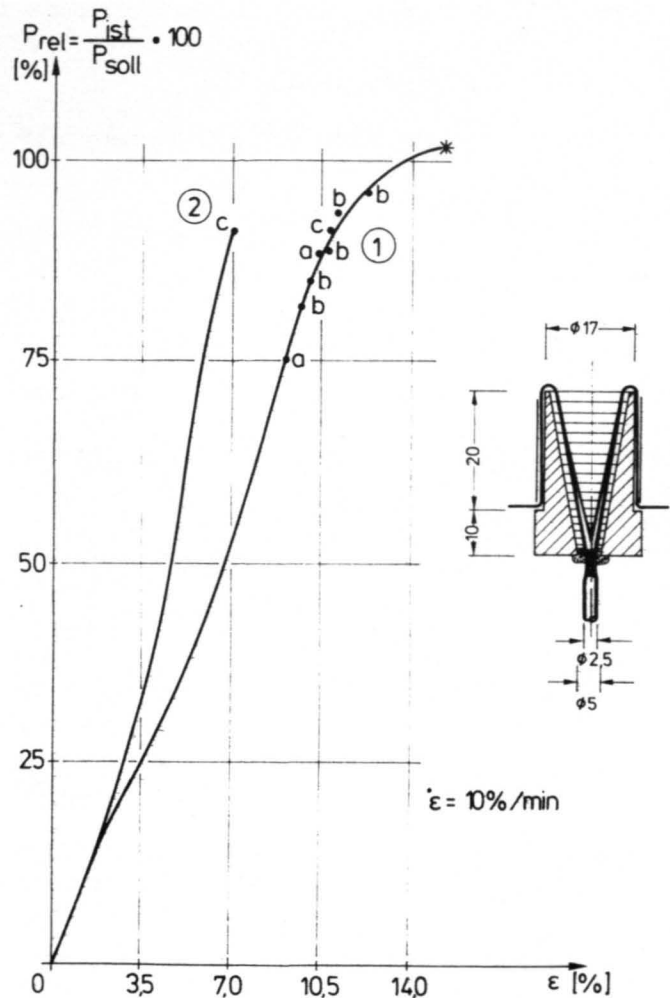


Abb. 6: Ergebnisse aus Versuchen mit Verankerungen für Kunstharzsysteme /6/ bei verschiedener Faservorbehandlung im Verbundbereich (a warmes Wasser, b Aceton, c warmes Wasser und Aceton):

- ① statische Zugversuche
- ② Restbruchlast nach 2000 Lastspielen ($P = 0,4 P_{max}$, $P_m = 0,3 P_{max}$)

* Sollbruchlast des Garnes
 Zugglied PETP - Multifilamentgarn, 66 000 dtex, Z 60. $P_{max} = 4,4$ kN bei $\epsilon = 14\%$.
 Verankerung: Aluminiumhülse mit kalthärtendem Epoxidharzverguß.

- /6/ Gropper, H.: Untersuchungen von kalthärtenden Reaktionsharzen als Verankerung für Seile. Interner Bericht am Institut für Mas-sivbau - SFB 64, Stuttgart 1984.
- /7/ Jahresbericht SFB 64 1981, Bericht der Gruppe; Selbstverlag SFB 64, Stuttgart 1982.
- /8/ Jahresbericht SFB 64 1982/83, Bericht der Gruppe E; Selbstverlag SFB 64, Stuttgart 1984.

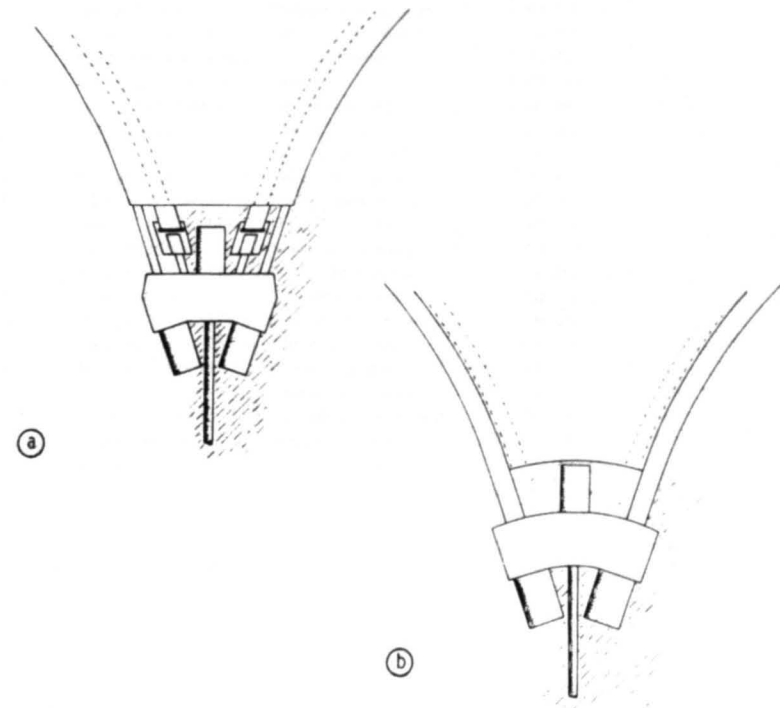


Abb. 7: Detaillierung des Membranzwickels:

- Ⓐ Randausbildung mit Stahlseil und Textilgurt;
- Ⓑ Randausbildung mit neuentwickeltem Randelement.