Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 9 (1972)

Artikel: Frei eingespannte zylindrische Turmbauwerke aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)

Autor: Dörnen, Klaus

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-9637

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Frei eingespannte zylindrische Turmbauwerke aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)

Cylindrical Built-in Tower of Fiber Glass Reinforced Synthetic Material

Constructions en forme de tour cylindrique en matière synthétique renforcée fibres de verre

KLAUS DÖRNEN
Dr.-Ing.
Marl, BRD

1. Einleitung

Technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte sind durchweg für die Wahl eines Baustoffes bestimmend. Die gebräuchlichen Baustoffe werden nach physikalischen Festigkeitseigenschaften, Verarbeitbarkeit, Alterungs- und Korrosionsbeständigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Hitze und Feuer, konstruktive Durchbildungsmöglichkeiten sowie nach Transport- und Montagegegebenheiten beurteilt und eingesetzt. Im neuzeitlichen Bauwesen, vornehmlich im Industriebau, können neben den angeführten Eigenschaften noch weitere Forderungen gestellt werden, wie z.B. Isolierfähigkeit gegen Wärme oder Elektrizität, Beständigkeit gegen chemische Angriffe, hohes Tragvermögen bei gleichzeitiger Lichtdurchlässigkeit, geringes spezifisches Gewicht und dgl. mehr. Kunststoffe zeichnen sich durch letztgenannte Eigenschaften bevorzugt aus und können ihre Eigenarten berücksichtigend sinnvoll angewandt, als Isolierstoffe, Verbindungselemente, flächenhafte Verkleidungen und als tragende Konstruktionsglieder vorteilhaft eingesetzt werden. Noch ist ihre Anwendung und ihr Gebrauch verhältnismäßig wenig bekannt, während der Markt schon eine bedeutende Anzahl von Kunststoffen liefert. Das Marktangebot wächst ständig und die Wahl wird schwieriger, da mit den Vorteilen auch eine Reihe von Nachteilen verbunden ist, die zu erkennen und abzuwägen Fachkenntnisse erfordern. Da das einzelne Kunststoffmaterial für Tragkonstruktionen, und hierzu gehört vornehmlich der glasfaserverstärkte Kunststoff (GFK), nicht den universalen Charakter, wie z.B. Stahl, besitzt, müssen zum technisch einwandfreien und werkstoffgerechten Einsatz jedem Verwendungszweck gründliche Untersuchungen mit praxisnahen Versuchen vorangehen.

2. Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)

Bei höher beanspruchten Belastungsfällen bekommt das Reaktionsharz durch eingefügte Glasbewehrung die eigentlichen Tragfestigkeiten. Zur Glasfaserverstärkung stehen Matten, Gewebe und Rovings zur Verfügung. Die mechanischen Güteeigenschaften des GFK, wie Festigkeit und Steifigkeit, werden maßgeblich vom Verhältnis Glasfaser/Reaktionsharz und durch die Orientierung der Fasern zur Beanspruchungsrichtung beeinflußt. Je nach Glasfaseranteil können hierbei Zugfestigkeiten erreicht werden, wie sie für Stahl bekannt sind. Vom reinen Harz ausgehend, ist mit wachsendem Glasgehalt des GFK eine beträchtliche Steigerung der Biege-, Zug-, Schlagfestigkeiten und der Verformungs-Moduln verbunden. Nach den "Vorläufigen Richtlinien zur Kennwertbestimmung....." lassen sich die GFK-Werkstoffeigen-

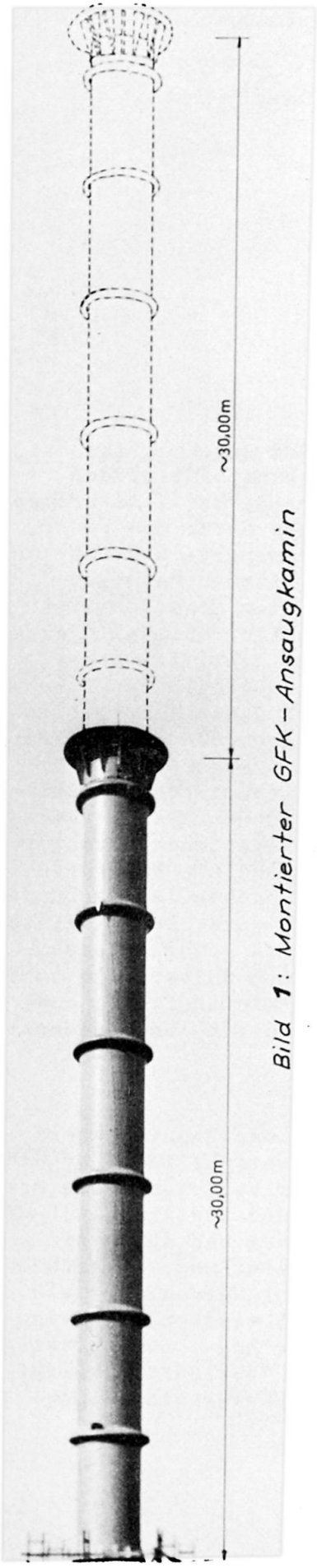


Bild 1: Montierter GFK-Ansaugkamin

schaften hinreichend genau festlegen.

Für bauliche Konstruktionen wird die Form regellos verteilter, auf 3 bis 5 cm Länge geschnittener Glasfasern am häufigsten angewandt. Diese Matten aus Glasfaserstücken werden für die Bemessung nach Quadratmetergewicht bestimmt und aus größeren Bändern oder Matteneinheiten nach Bedarf herausgeschnitten. Die Matte als stabilisierendes Element im Reaktionsharzbett leitet die Beanspruchung von Faser zu Faser über Schub- und Haftfestigkeit des Reaktionsharzes weiter. Infolge der regellosen Faseranordnung weisen diese Matten-Laminate keine richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften auf. Festigkeit und Steifigkeit sind in allen Richtungen der Beanspruchungsebene praktisch gleich; der Verbundwerkstoff ist nahezu isotrop.

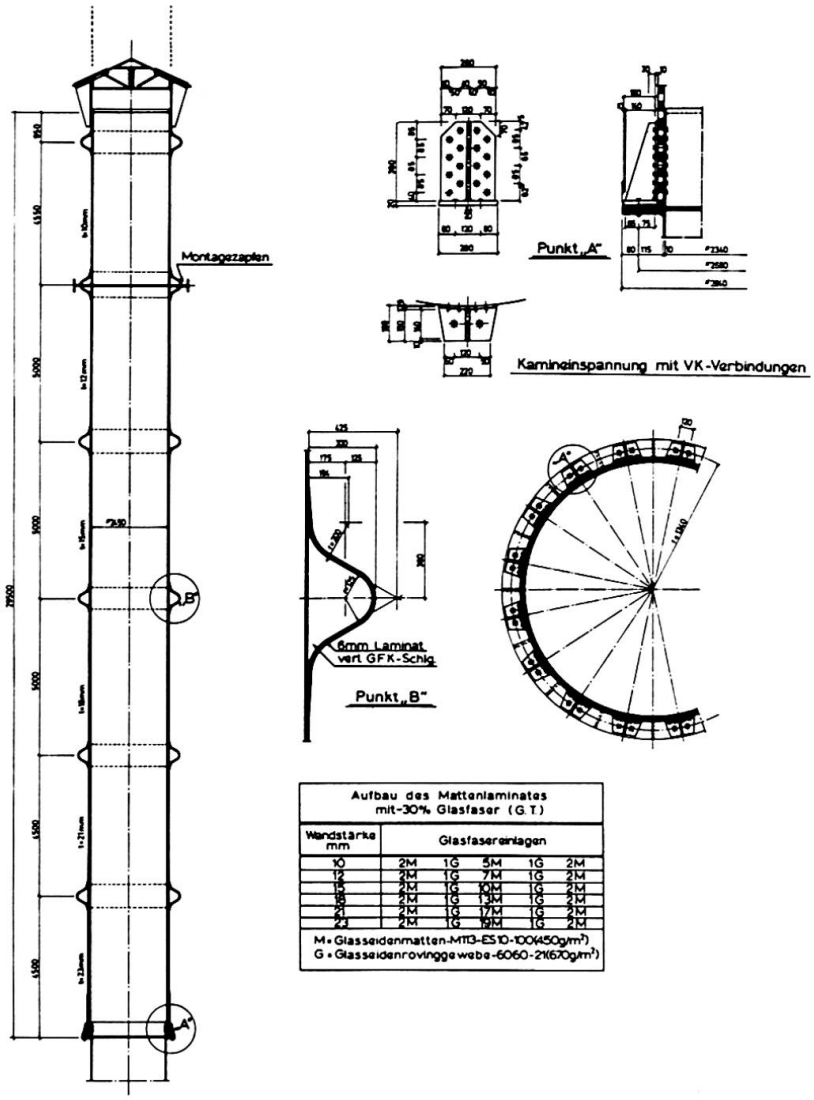
Für optimale Ausnutzung des GFK-Werkstoffes sollte sich die Bewehrungsorientierung der Glasfasern mit der Beanspruchungsrichtung decken. Statt Glasfasermatten werden orthogonale grobmaschige Gewebe oder direkt Rovingsstränge einlaminiert. Der mit Gewebe oder Rovings versehene GFK ist anisotrop und bei senkrecht aufeinander stehenden unterschiedlichen Steifigkeiten, wie z.B. beim Wickellaminat, speziell orthotrop.

Zur Herstellung von GFK-Laminaten bedient man sich unter Verwendung von Matten und Geweben meist des Handauflegeverfahrens und bei richtungsorientierter Glasfaserbewehrung vornehmlich bei zylindrischen Körpern des maschinellen Wickelverfahrens. Während die erstgenannte Herstellungsart sich stark lohnabhängig zeigt, verlangt die zweite durchweg einen höheren Glasfasergehalt, der den Materialpreis des GFK stark beeinflußt. Welche Fertigungsart die größtmögliche Wirtschaftlichkeit bietet, kann letztlich erst nach endgültiger Bemessung bestimmt werden. Für beide Laminate müssen daher Festigkeits- und Stabilitätskennwerte vorliegen.

3. Konstruktive Durchbildung eines GFK-Ansaugkamines

Als Ausführungsbeispiel für turmartige Bauwerke sei hier ein in Abb. 1 wiedergegebener Ansaugkamin mit ⌀ 2,50 m angeführt, der zunächst auf 30 m, im späteren Ausbauzustand auf 60 m Höhe zu errichten ist. Der erste 30 m-Abschnitt wurde ohne Werkstatt- und Montagestöße in ganzer Länge fertiggestellt, was bei derartigen Abmessungen praktisch nur im Handauflegeverfahren und dann zweckmäßig mit Matten-Laminaten zu bewerkstelligen war. Konstruktive Details und Aufbau der Glasfasereinlagen im Laminat sind aus der Darstellung Abb. 2 im einzelnen zu entnehmen.

Im Erscheinungsbild des GFK-Kamines fallen



Aufbau des Mattenlaminates mit-30% Glasfaser (G.T)					
Wandstärke mm	Glasfasereinlagen				
10	2M	1G	5M	1G	2M
12	2M	1G	7M	1G	2M
15	2M	1G	10M	1G	2M
18	2M	1G	13M	1G	2M
21	2M	1G	17M	1G	2M
23	2M	1G	19M	1G	2M

M = Glasseidenmatten-MT13-ES10-100(450g/m²)
G = Glasseidenrovinggewebe-6060-21(670g/m²)

Konstruktion des GFK-Ansaugkamines, Abb. 2

die außen angeordneten Ringsteifen auf, die neben der Biege-, vorrangig zur Torsionssteifigkeit, als Hohlkörper ausgebildet sind. Sie haben mehrfachen Zweck zu erfüllen, so z.B. bei Biegebeanspruchung des Kaminschaftes den Kreisquerschnitt zu stabilisieren, die ganze Zylinderröhre in Beulabschnitte zu unterteilen.

Zu ihrer Herstellung wurden vorgefertigte GFK-Schalen auf den bereits fertiggestellten Zylindermantel gelegt, anschließend über- und anlaminiert. Innerhalb der Ringbreiten werden die unterschiedlichen Manteldicken zwischen den Beulfeldern ausgeglichen.

Die am unteren Ende vorgenommene Kameinspannung ist mit vorgespannten Klebeverbindungen (VK-Verbindungen) vorgenommen worden. Hierbei ist der GFK-Kaminmantel durch die Spannkraft einer Vielzahl von HV-Schrauben zwischen stählernen Ringteilen unter Zwischenschaltung von Klebstoff (Vestopal 400 ®)kraftschlüssig eingeklemmt. Als Vorteile dieser bewährten Verbindungsart kann angeführt werden:

a) die stählernen Haftflächen sind korrosionsgeschützt;
b) Herstellungs- und Montageungenauigkeiten lassen sich durch Klebstoff, der u.U. gemagert werden kann, ausgleichen;
c) durch die Schraubenvorspannung erhält die Klebverbindung hohe statische und vor allem dynamische Schubfestigkeit;
d) durch flächenhafte Krafteinleitung treten nur geringe Spannungsspitzen im Werkstoff GFK auf.

Der Klebanschluß ist derart konstruiert und bemessen, daß er bei späterer Aufstockung ohne Änderung als Montagestoß verwendbar ist.

4. Statische Berechnung und Schwingungsverhalten

Das zu untersuchende statische System ist eine freistehende, unten eingespannte Röhre von zunächst 30 m, in späterer Ausbaustufe 60 m Höhe. Beide Systemhöhen waren getrennt voneinander derart zu berechnen und zu bemessen, daß zur Aufstockung der erste 30 m-Abschnitt auf eine später gefertigte Röhre gesetzt und mit ihr biegesteif verbunden werden kann. Als Werkstoff wurde ein GFK-Matten-Laminat (30 % Glasfaseranteil GT) mit Vestopal 150® bestimmt.

Von der Werkstoffwahl und Konstruktion her ist dieses turmartige Bauwerk in die Reihe der Leichtbau-Schornsteine einzustufen. Für die Belastungsannahmen war neben der DIN 1056 für freistehende Massiv-Schornsteine auch die im Entwurf vorliegende DIN E 4133 (Jan.70) für Stahlschornsteine mit heranzuziehen. An Belastungen waren zu berücksichtigen:

a) Eigengewicht, 10 mm Eisansatz, Wind, 100 mm WS Unterdruck;
b) Temperaturdifferenz im GFK-Zylinderschaft und innerhalb der Zylinderwandung;
c) Zusatzspannungen durch Kaminbiegung infolge Wind und Temperatur;
d) Kaminschiefstellung durch Einwirkungen des untertägigen Bergbaues.

Die nach endgültiger Bemessung sich ergebenden GFK-Mantelspannungen für 30 m und 60 m Höhe sind mit den endgültig gemessenen Wanddicken in den jeweiligen Einspannquerschnitten auf Tabelle 3 zusammengestellt.

Zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens mußte der Eigenfrequenz des Kamines besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Für die Eigenfrequenz eines dünnwandigen Rohr-Balkens unter Berücksichtigung von Zusatzgewichten, wie Kaminhaube und Ringsteifen, gilt:

$$f_e = \frac{0.561}{l_2} \cdot R \cdot \sqrt{\frac{E_g}{2 \cdot \gamma}} \cdot \sqrt{\frac{G_E/4}{G_E/4 + G_H}}$$

	30m hoch t=23mm [kp/cm²]	60m hoch t 39mm [kp/cm²]
Eigengewicht, Eisansatz	- 4,31	- 6,1
Unterdruck	- 0,54	- 0,54
Windbelastung	±108,0	±187,1
Temperaturdifferenz in der Röhre	± 21,8	± 21,8
Temperaturdifferenz in der Wandung	± 49,5	± 49,5
Spannungen II. Ordnung	± 3,7	± 15,9
max. σ	- 187,85	- 280,94

GFK-Mantelspannungen an den Einspannstellen, Abb. 3

Für 30 m und 60 m Höhe wurden die Schwingzahlen für Kurzzeit-E-Modul mit rund 100.000 kp/cm² und für Langzeit-E-Modul reichlich geschätzt mit 70.000 kp/cm² zunächst angenommen. Die rechnerisch ermittelten Frequenzen ergeben sich zu:

	Kurzzeit $E_K \sim 100.000$ kp/cm²	Langzeit $E_L \sim 70.000$ kp/cm²
f_e (30 m) Hz	1,211	1,013
f_e (60 m) Hz	0,328	0,275

Mehrfache exakte Schwingungsmessungen am aufgestellten 30 m-Kamin decken sich mit der errechneten Frequenz von 1,21 Hz. Diese Schwingungsmessungen werden in größeren Zeitabständen wiederholt werden. - Von der gerechneten und gemessenen Eigenfrequenz gegenüber einem kritischen Bereich von 3 bis 5 Hz her ist ein Aufschaukeln dieses Kamines durch Karmann-Wirbel nicht zu befürchten, - Zur Festlegung der zulässigen Spannungen im GFK-Kamin-Mantel mußten vorerst die kritischen Beulspannungen ermittelt werden.

5. Beulversuche axial gedrückter GFK-Kreiszylinderschalen

Die Bemessung dünnwandiger Kreiszylinderschalen setzt die Kenntnis der Beulsteifigkeit voraus. Seit langem liegen für derartige Schalen mit isotropen Werkstoffen zahlreiche Versuchs- und Untersuchungsergebnisse sowie Berechnungsmethoden vor, wobei die letzteren konstante E-Moduln, Querkontraktion und nur Spannungen unterhalb der Proportionalitätsgrenze voraussetzten. Da zwischen Theorie und Versuchsergebnissen ständig große Abweichungen auftraten, wurde die klassische Beulspannungsgleichung

schon frühzeitig durch verschiedenartige Korrekturfaktoren, wie z.B. durch immer vorhandene Störungen infolge Vorbeulens, berichtigt:

$$\sigma_{krit.\,B} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)} \cdot \sqrt{1+R/100 \cdot t}} \cdot E \cdot t/R$$

Diese und ähnliche Formeln können bei der gewissermaßen heterogenen Struktur des Werkstoffes GFK nicht in Ansatz gebracht werden, da je nach Laminataufbau erhebliche Eigenschaftsunterschiede in Längs- und Umlaufrichtung vorliegen und diese ohnehin von Beanspruchungsrichtung, -höhe und Temperatur Abhängigkeit zeigen. Um die Anisotropie durch unterschiedlich große E-Moduln im Laminataufbau zu erfassen, wurde die einfache Beulspannungsgleichung z.B. erweitert:

$$\sigma_{krit.\,B} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \cdot E_x \cdot \sqrt{\frac{E_y}{E_x}} \cdot t/R$$

Da die hiernach errechneten Beulspannungen sich wenig mit den experimentell ermittelten deckten, wurde versucht, durch einen Beulkoeffizienten c = f (R/t) eine Angleichung beider Ergebnisse zu erzielen:

$$\sigma_{krit.\,B} = c\,E_x \cdot \sqrt{\frac{E_y}{E_x}} \cdot t/R = c\sqrt{E_x \cdot E_y} \cdot t/R$$

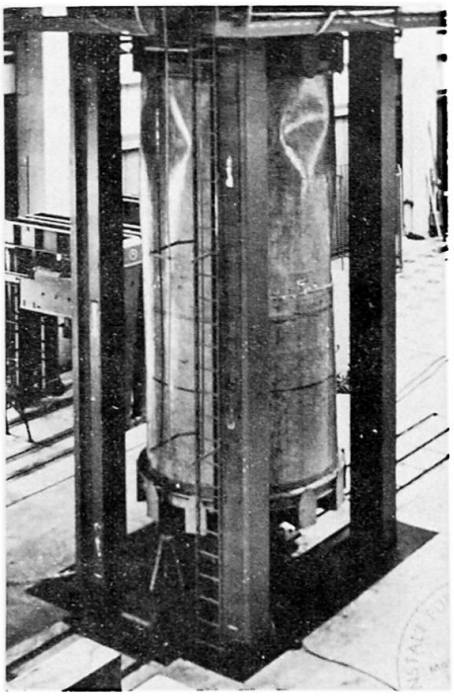
Auch dieser Versuch zeigte sich als nicht zuverlässig genug, so daß letztlich zur Ermittlung einer allgemein gültigen GFK-Beulspannungslinie für verschiedenartige Laminate Versuchsreihen vorgenommen werden mußten, wobei die Versuchskörper in möglichst großen Abmessungen hergestellt werden sollten. Diese Versuche erwiesen sich als dringend notwendig, da abgesehen von Einzelversuchen eine zusammenhängende Beulspannungslinie in einem größeren R/t-Bereich für diesen Werkstoff bisher nicht vorliegt.

Zur Herstellung größerer GFK-Zylinderröhren bedient man sich des Handauflege-, meist jedoch des Wickelverfahrens. Durch den Herstellungsvorgang bedingt ist der Laminataufbau durch Anordnung der Glasfaserbewehrung sehr unterschiedlich. Beim Handauflegeverfahren kommen, wie bereits erwähnt, durchweg Matten und Gewebe zur Anwendung, wobei mit höherem Mattenanteil gegenüber Geweben der GFK-Werkstoff zunehmend isotrope Festigkeitseigenschaften in der Schalenebene annimmt. Das Wickelverfahren sieht dagegen mehr Rovings zum eigentlichen Aufwickeln mit zwischengelegten Geweben vor, so daß die Glasfasern starke Richtungsorientierung aufweisen. Zur Erhöhung der Beulsteifigkeit axial gedrückter Zylinderschalen muß der Glasanteil in Längs- gegenüber Umlaufrichtung überwiegen. - Um beide genannten Herstellungsverfahren wirtschaftlich bemessen zu können, wurden zur Versuchsdurchführung die Laminate mit Vestopal 150® festgelegt:

a) Mattenlaminat mit rund 30 %igem Glasfaseranteil GT für Handauflegeverfahren (12 Prüfkörper);
b) Wickellaminat mit Glasfaserorientierung längs zu umlaufend (l : u) wie 2 : 1 mit rund 50 %igem Glasfaseranteil GT (hierzu Vergleichsuntersuchungen mit Orientierungsänderung 1 : 1 und 1 : 2 mit 14 Prüfkörpern).

Diese insgesamt 26 Prüfkörper mit vorwiegend Ø 1400 mm und Prüfkörperhöhe von 2800 mm wurden mit großer Sorgfalt und Genauigkeit hergestellt. Die unterschiedlichsten Wanddicken t mußten gleichmäßig, vor allem beim Wickellaminat, derart aufgebaut werden, daß unter Einhalten des vorgegebenen Glasgewichtsanteiles und festgelegter Faserorientierung sich auch die Festigkeitseigenschaften in Längs- und Umlaufrichtung nicht änderten. Diese Abstimmungsschwierigkeiten scheiden beim Mattenlaminat praktisch aus. Um die angestrebten Werkstoffestigkeiten zu erzielen, wurde auf entsprechende Aushärtung des Polyesterharzes streng geachtet und, soweit notwendig, mit Tempern nachgeholfen.

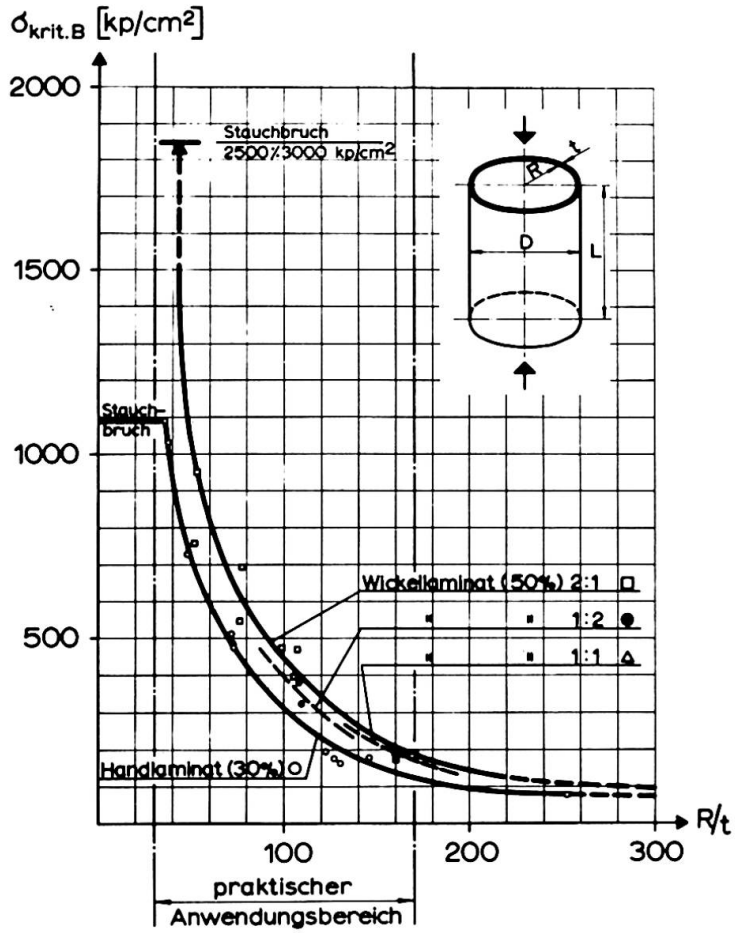
Die Belastungsversuche wurden im Institut für Stahl, Holz und Steine der TU Karlsruhe durchgeführt. Zur gleichmäßigen Lasteinleitung waren zuvor die Zylinderendquerschnitte planparallel abgedreht und diese zur Vermeidung von Randstörungen mit Holzschotten ausgesteift. Die zentrische Druckeinleitung wurde über Meßdehnungsstreifen kontrolliert, die in halber Zylinderhöhe jeweilig innerhalb und außerhalb der Ringviertelspunkte angebracht waren. Mit dieser Meßanordnung konnten während der stufenförmigen Belastung gleichzeitig die Verformungsänderungen und somit die E-Moduln und Querkontraktion bis in den Beulbereich exakt bestimmt werden. Auf der Abb. 4 ist z.B. die Versuchsanordnung an einem 5 m hohen GFK-Zylinder mit ⌀ 2,50 m und Manteldicke t = 5 mm (R/t = 253) zu sehen.



Ausgebeulter GFK-Prüfkörper ⌀ 2,45 m, H=5,0m, t=5mm unter zentrischer Drucklast, Abb. 4

6. Versuchsergebnisse

Die umfangreichen Ergebnisse dieser Stabilitätsversuche sind in ausführlichen Prüfberichten der TU Karlsruhe festgehalten, von denen hier nur auf die wesentlichsten kurz eingegangen wird. Die zur Beurteilung erforderlichen Angaben der Festigkeits-, Belastungs- und Verformungsuntersuchungen an den GFK-Kreiszylinderschalen sind in Tabellenform auf der Abb.5 für Mattenlaminat und auf Abb. 6 für Wickellaminat zusammengestellt. Im Rahmen von Stabilitätsuntersuchungen liegt hier eine überraschend geringe Streuung der Versuchsergebnisse vor, so daß mit großer Zuverlässigkeit die zugehörigen kritischen Beulspannungslinien auf der Abb.7 zur sicheren Dimensionierung aufgetragen werden konnten.



Kritische Beulspannungslinien für Matten- und Wickellaminat aus GFK, Abb. 7

Bei den dünnwandigen Prüfzylindern bis etwa R/t > 70 zeigten sich bis zur Durchschlagslast ausgeprägte Beulmuster. Mit größeren Wanddicken, d.h. kleiner werdenden R/t-Werten traten während des Beuleinfallens infolge örtlicher Überschreitung der Laminatfestigkeit Scher-

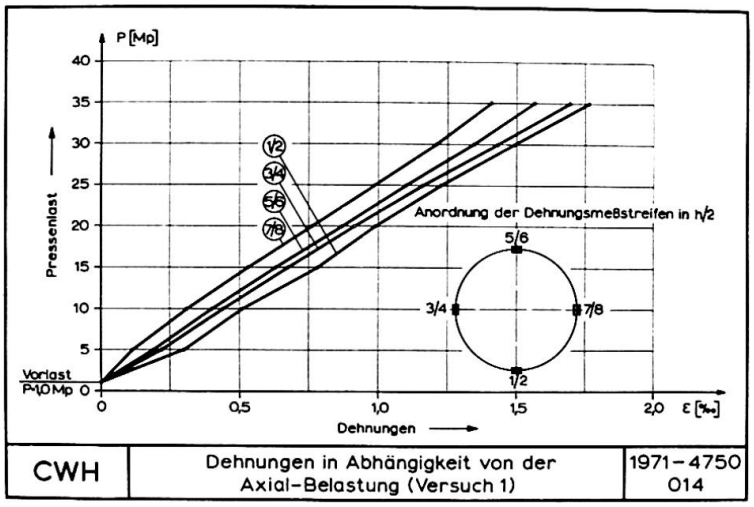
Prüfkörper Nr.	Radius/Höhe [mm]	t^m [mm]	R/t^m	Glasgehalt DIN E53395 % n.G.	σ_z DIN 53455 [kp/cm²]	Quer-kontraktion DIN E53395	Biege-E-Modul DIN 53457 [kp/cm²]	Druck-E-Modul [kp/cm²]	P_B [Mp]	krit. σ_B^m [kp/cm²]
1	700/2818	4,8	146	28,6	1330	0,365	82200	104.100	37,5	178
2	700/2800	5,5	127	26,0	1105	0,348	77400	94.000	42,5	176
3	700/2805	5,4	130	29,4	1435	0,381	76600	87500	40,0	168
4	700/2800	9,8	71,5	30,6	1550	0,344	97400	108600	225,0	522
5	700/2810	9,6	73,0	30,1	1220	0,332	97.700	105200	200,0	474
6	700/2810	9,7	72,3	31,9	1480	0,344	97000	101.100	206,0	484
7	700/2800	14,7	47,7	30,7	1502	0,351	97800	94.000	470,0	727
8	700/2804	18,7	37,5	30,6	1213	0,361	102200	101.100	850,0	1030
9	700/2808	19,6	35,7	31,0	1090	0,360	111.100	182.000	940,0	1090
I	1225/4997	4,85	253					104.000	29,0	78
II	1231/5015	10,1	122					88.000	155,0	197

Abb. 5 Beulergebnis von GFK-Kreiszylinderschalen mit Mattenlaminat 1971-4750 013

Prüfkörper Nr.	t^m [mm]	R/t^m	Verstärkung L/U	Glasgehalt DIN E53395 % n.G.	σ_z DIN 53455 [kp/cm²] axial	Biege-E-Modul DIN 53457 [kp/cm²] axial	Biege-E-Modul DIN 53457 [kp/cm²] radial	Druck-E-Modul [kp/cm²]	P_B [Mp]	krit. σ_B^m [kp/cm²]
1	4,23	169	1,7:1	50,1	3276	106.900	109.300	176.000	34,0	182
2	4,59	170						206.000	33,5	190
3	4,29	160						189.000	33,0	174
4	6,68	107	2,1:1	54,7	3112	111.000	120.000	211.000	130,5	468
5	7,05	105						200.000	112,0	399
6	6,66	99						214.000	132,0	473
7	9,18	76	2,2:1	58,7	4032	153.300	119.500	228.000	222,0	546
8	9,30	77						228.000	285,0	693
9	13,52	52	2,3:1	54,6	3494	148.400	95.600	213.000	455,0	759
10	13,42	53						217.000	566,0	951
11	4,44	160	1:1,2	50,0	2540	102.600	160.600	175.000	38,0	193
12	4,62	166						155.000	37,0	181
13	8,08	102						154.000	155,5	438
14	8,13	104						149.000	161,0	448
15	7,40	108	1:2,6	45,8	2444	106.400	104.900	160.000	125,0	382
16	6,73	109						169.000	96,0	324

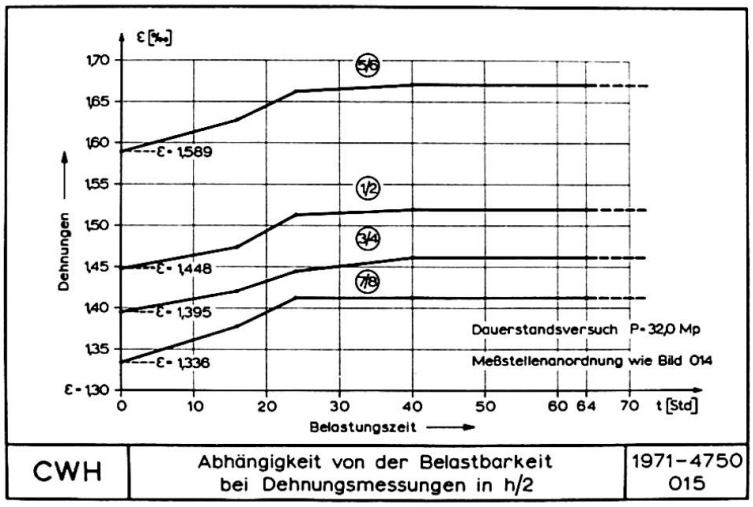
Abb. 6 Beulergebnis von GFK-Kreiszylinderschalen mit Wickellaminat Radius / Höhe = 700 / 2800 [mm] 1972-4750 017

brüche ein. Mit Aufbringen der Belastung verliefen die Stauchungen über die Zylinderhöhe sowie die über die Meßstreifen ermittelten Dehnungen bis zur kritischen Beulbelastung (krit. $\sigma_B \sim 700$ kp/cm^2) absolut gradlinig (Abb.8). Auch bei mehrmaliger Belastung bis zur Ausbeulung zeigte sich ein elastisches Verhalten und bestätigte erneut das außergewöhnlich große Erholungsverhalten des GFK-Werkstoffes.



Typisches Lastdehnungsverhalten eines GFK-Prüfzylinders, Abb. 8

Nachdem bisher die Beulspannungen durch langsame Steigerung, aber insgesamt kurzzeitige Belastung gefunden wurden, sollte auch das Langzeitverhalten unter konstanter Last beurteilt werden. Hierzu war der dünnwandige Prüfzylinder Nr. 3 mit 32 Mp, das bedeutet 80 % der kritischen Beullast, in ausgebeultem Zustand über 64 Stunden hinweg belastet worden. Das aufgetragene Belastungs-/Verformungs-Diagramm (Abb.9) zeigt nach den ersten 16 Belastungsstunden eine zusätzliche Längszusammenstauchung von 7,4 % und bleibt von da ab bis zum Belastungsende nach fast 3 Tagen praktisch unverändert.



Dauerbeanspruchung eines GFK-Zylinders mit 32 Mp, 80 % der kritischen Beullast, Abb. 9

Nach Aufstellung wird die eingespannte Kaminröhre überaus vorwiegend durch Windbelastung dynamisch beansprucht werden. Durch einen Dauerschwellbiegeversuch an einem Prüfzylinder mit $\sigma_u / \sigma_o = + 0{,}1$ konnten nach 424×10^3 Lastwechseln (33 Lastwechsel/Minute) keinerlei Schäden festgestellt werden. GFK-Prüfstreifen aus dem Druck-, Zug- und neutralen Bereich unmittelbar neben der Einspannstelle des Prüfkörpers nach Versuchsabbruch entnommen, zeigten keine Abweichung von den vorher bestimmten Null-Werten. - Nach diesen überzeugenden Versuchsergebnissen hatte die Dimensionierung der Kaminröhre unter Festlegung genügend hoher Sicherheit zu erfolgen.

7. Bestimmung der zulässigen Spannungen

Die Bemessung tragender Bauteile ist so vorzunehmen, daß ein Versagen durch Bruch, Fließen, erheblich bleibende Formänderungen des

Baumaterials oder durch instabiles Verhalten von Konstruktionsteilen mit Sicherheit vermieden wird. Hierzu werden die zulässigen Spannungen unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften, konstruktiven Durchbildung der Bauteile und Beanspruchungsart des ganzen Bauwerkes von den Versagensspannungen abgeleitet. Besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich höherer Temperaturen, Feuerwiderstandsverhalten und allgemeiner Beständigkeit gilt den organischen Konstruktionsmaterialien. Die von Fall zu Fall zu bestimmenden Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren 1/A, bzw. (A) oder S ergaben beim anstehenden Ansaugkamin aus GFK-Handlaminat folgendes Ergebnis:

Der Abminderungsfaktor A_1 dient der Berücksichtigung zeitabhängiger Verminderung von Beul- bzw. Bruchfestigkeiten gegenüber in Kurzzeitversuchen ermittelter Werte. Obwohl die Bruch- bzw. die krit.Beulspannungen eindeutig bekannt sind, wurde der Wert 0,5 (2,0) zugrunde gelegt. Diese hohe Sicherheit wurde auch seitens der genehmigenden Behörde als gut ausreichend angesehen, so daß die unter den allgemeinen Sicherheitsfaktoren S angeführten und hier zutreffenden Gesichtspunkte als mitberücksichtigt anzusehen sind.

Der Abminderungsfaktor A_2 beinhaltet die Alterungs- und Korrosionseinflüsse. Hinsichtlich der Alterung speziell mit den UP-Harzen VESTOPAL® liegen über gut 1 1/2 Jahrzehnte zuverlässige und gute Erfahrungen vor, so daß bei der in diesem Fall ohnehin geringen ständigen Belastung bei fachgerechter Fertigung eine Werkstoffalterung auf Jahrzehnte kaum zu befürchten ist. Bei erstmaliger Ausführung dieser Art wurde ein Minderungsfaktor von 0,9 (1,11) in die Bemessung eingeführt.

Der Abminderungsfaktor A_3 gilt dem Einfluß erhöhter Temperaturen, der beim GFK erkennbar ist. Bis zu Temperaturen um + 80°C ist je nach Glasfasergehalt eine Festigkeitsminderung von 10 - 15 % allgemein festzustellen. Da der Luftansaugkamin, wenn überhaupt, sich in den Breitengraden seines Aufstellungsortes auf 60° erhitzen kann, wurde eine Abminderung 0,7 (1,43) als ausreichend angesehen.

Der Abminderungsfaktor A_4 berücksichtigt nachteilige Fertigungseinflüsse, die sich vor allem bei kleineren Konstruktionsabmessungen stärker auswirken können. Der Schaftdurchmesser und die Mindestwandstärken konnten bei der hier vorgesehenen Fertigung exakt eingehalten werden. Letztlich unerforscht sind noch die interlaminaren Kohäsions- und Spannungsverhältnisse, die mit 0,8 (1,25) Abminderung beachtet werden sollten.

Die Sicherheitsfaktoren S_B gegen Bruch, S_P gegen Überschreiten der Schädigungsgrenze, S_I gegen Versagen durch Instabilität können gemäß den für Bauteile aus bekannten Werkstoffen abgeleiteten Werten angesetzt werden. Bei dem Ansaugkamin konnten die Sicherheitsfaktoren, soweit nicht schon unter Faktor A_1 berücksichtigt, vernachlässigt werden, da praktisch nur durch übermäßig hohe, kaum zu erwartende Windbelastung ein Tragwerksversagen eintreten und sich ohnehin der Werkstoffbruch nur mit Vorankündigung vollzieht. Die Gefahrenklasse, die einem derartigen Kamin zukommt, ist selbst bei einem vollständigen Einsturz gering.

Insgesamt stellte sich ein zusammengefaßter Sicherheits- und Abminderungsfaktor ein:

Abminderungsfaktor	1/A	A
A_1	0,5	2,0
A_2	0,9	1,11
A_3	0,7	1,43
A_4	0,8	1,25
A	0,252	3,97

Als zulässige Spannungen ergeben sich,
für Sicherung gegen Beulen

$$\sigma_{zul.} \leqq \sigma_{krit.\,B} \cdot 0{,}252$$

gegen reinen Stauchbruch ohne Berücksichtigung der Stabilität

$$\sigma^{D}_{zul.} \leqq 1050 \cdot 0{,}3 = \sim 300\ kp/cm^2$$

und gegen reinen Reißbruch

$$\sigma^{Z}_{zul.} \leqq 1323 \cdot 0{,}3 = \sim 400\ kp/cm^2$$

Mit diesen der Bemessung zugrunde gelegten zulässigen Spannungen ergeben sich z.B. die in Abb. 3 zusammengestellten Nennspannungen.

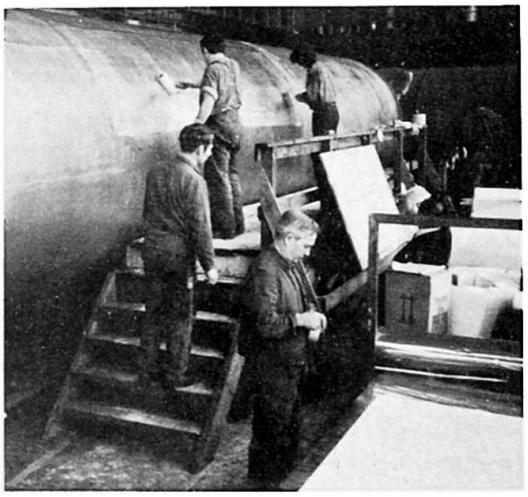
8. Bauaufsichtliche Zulassung

Baustoffe, Bauteile und Bauarten, die nicht allgemein gebräuchlich und bewährt sind, dürfen bekanntlich nur angewendet werden, wenn ihre Brauchbarkeit als Tragkonstruktion nachgewiesen ist. Dieses trifft für den hier zur Anwendung gelangten GFK zu, der zwar als Baustoff nicht erstmalig verwendet wird, für den aber noch keine offiziellen Vorschriften für Bemessung, konstruktive Behandlung und Prüfmöglichkeiten vorliegen. Nur eingehende Festigkeitsuntersuchungen können hinsichtlich der Bauverwendbarkeit Klärung schaffen und darauf aufbauend genügend hohe Sicherheit dem Bauwerk ausreichende Standfestigkeit verleihen.

Bei dem hier beschriebenen GFK-Kamin mit beachtlichen Abmessungen und verhältnismäßig hoher Beanspruchung wurde mit der wiedergegebenen Berechnungsart, der nach zuverlässigen Versuchen vorgenommenen Bemessung und den zugrunde gelegten Sicherheitsfaktoren nach Einschaltung des Prüfingenieurs offiziell das Baugenehmigungsverfahren eingeleitet, das sämtliche hierfür notwendigen Instanzen der BRD durchlaufen sollte. Am 18. Nov. 1971 wurde nach verhältnismäßig kurzer Laufzeit von der obersten Bauaufsichtsbehörde nach Konsultation des Institutes für Bautechnik, Berlin, und des Innenministeriums des Landes Nordrhein-Westfalen die Zustimmung zur Errichtung für den Einzelfall erteilt.

9. Werkstattfertigung und Montage

Die Kaminröhre mit 2,50 m Ø wurde in ganzer Länge von 30 m im Handauflegeverfahren stoßfrei hergestellt. Eine spannbare Stahlform von entsprechendem Durchmesser und 6 m Länge, die nach der Fertigstellung eines Röhrenabschnittes verzogen wurde, diente gewissermaßen als Gleitschalung. Stufenweise war zunächst mit einer Manteldicke von rund 5 mm die Röhre ganz gefertigt worden, um anschließend gemäß eines Laminatplanes die festgelegte Manteldicke mit vorgegebenem Laminataufbau zu bewerkstelligen (Abb. 10).



Werkstattfertigung der 30 m langen GFK-Röhre mit Ø 2,50 m, Abb. 10

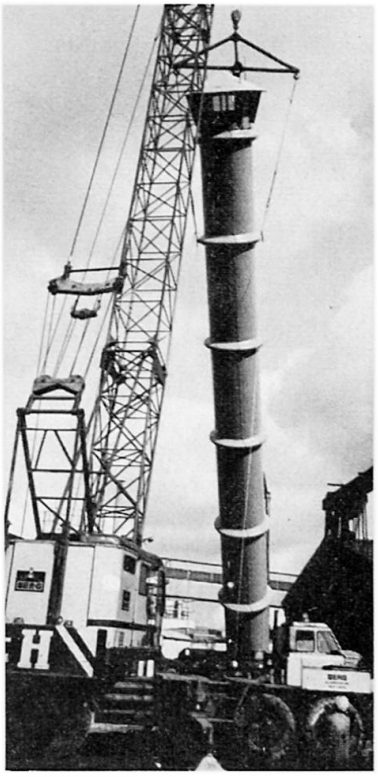
Vor dem Auflegen der beiden letzten Matten wurden aus GFK vorgefertigte Viertelsegmente als verlorene Schalung, aber später mittragender Bestandteil für die hohlquerschnittigen Versteifungsringe aufgelegt. Die letzte Laminatschicht war über die Hohlringe zu ziehen, wodurch sich eine einwandfrei kraftschlüssige Verbindung zur GFK-Röhre ergibt. Die beiden äußeren Mattenlagen garantieren

in Verbindung mit einem zweifachen Außenanstrich aus Vestopal 400® neben hoher Alterungsbeständigkeit einen wirkungsvollen Schutz gegen Witterungseinflüsse und aggressive Atmosphäre. - Um eine ausreichende Aushärtung des Reaktionsharzes zu erreichen, sollten nach der Laminatherstellung genügend hohe Temperaturen vorliegen, was in der hier zur Verfügung stehenden beheizten Werkstatthalle gewährleistet war.

Am unteren Abschluß des Kamines werden die Einspannkräfte über einen Stahlring in die GFK-Röhre eingeleitet, was, wie erwähnt, mit VK-Verbindungen vorgenommen wurde. Auf den inneren Stahlring ist der GFK-Mantel, der durch HV-Schrauben von außen angepaßt wird, zum genauen und lückenlosen Sitz anlaminiert.

Bei der Fertigung von GFK-Röhren derartiger Durchmesser im Wickelverfahren lassen sich mit den bisher bekannten Vorrichtungen nur Einzelschüsse von etwa 6 - 8 m herstellen. Das Verbinden der Einzelschüsse erfolgt in doppellaschigen Stumpfstößen mittels Matten- und Gewebelaminat, das zweckmäßig im Handauflegeverfahren ausgeführt wird. Die Ringversteifungen können auch bei dieser Fertigungsart entweder über Schaumstoffkerne oder dünne GFK-Schalen anlaminiert werden.

Der Transport zur Baustelle und die Montage des fertigen GFK-Kamines gestaltete sich in einem für den Bauingenieur bekannten Vorgang. Das Aufstellen des Kamines mit einem Gesamtgewicht von rund 6 Mp war durch einen Mobilkran in kürzester Zeit erledigt.



Montage des GFK-Ansaugkamines, Abb. 11

10. Schlußbetrachtung

Über eine Reihe von Jahren konnten Festigkeit und Beständigkeit in Kurz- oder Langzeit erforscht und umfangreiche Erfahrungen nach einer Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen gesammelt werden, so daß grundsätzlich das GFK-Werkstoffverhalten weitgehend bekannt ist. Auch konstruktiv und verbindungstechnisch dürfen die auftretenden Probleme als gelöst angesehen werden. Speziell für turmartige Bauwerke liegen nunmehr die Stabilitätsergebnisse an GFK-Kreiszylinderschalen vor, so daß sich hier ein weites Anwendungsgebiet erschließen läßt, wenn die speziellen Werkstoffeigenschaften, wie z.B. leichtes Gewicht, hohe Alterungsbeständigkeit, insbesondere gegen Seewasser, und Isolierfähigkeit gegen elektrische Spannungen ausgenutzt werden. Funk- und Fernmeldemaste, Leucht- und Signaltürme für Luft- und Seefahrt, Kamine aller Art, Masten für Hochspannungsanlagen oder Windkraftwerke und dergl. können wahlweise eingefärbt, auf Jahrzehnte wartungsfrei hergestellt, leicht transportiert sowie schnell und einfach montiert werden.

Der weiteren Entwicklung wird es nunmehr überlassen bleiben, inwieweit bei der Verwirklichung derartiger Bauwerke der neue Baustoff GFK selbsttragend künftig eingesetzt werden wird.

Zusammenfassung

Neben den heute bekannten Baustoffen ist der glasfaserverstärkte Kunststoff (GFK) für tragende Konstruktionen einsatzbereit. Seine Werkstoffeigenschaften, Herstellungsverfahren und konstruktive Anwendbarkeit sind bekannt. Zur Berechnung und Bemessung eines 30 m (60 m) hohen Ansaugkamines waren Stabilitätsuntersuchungen notwendig, deren Ergebnisse allgemein verwendbar vorliegen. Speziell für selbsttragende Turmbauwerke gibt es bei den speziellen Eigenarten des GFK eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten.