

DI Dr. techn. Giovanni Pietro Terrasi

Kohlefaservorspannung von dünnwandigen Querschnitten: Erfahrungen aus 10 Jahren Entwicklung

Einführung

Der weltweit erste mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) vorgespannte Freileitungsmast aus Schleuderbeton zur Übertragung von elektrischen Hochspannungen wurde im Jahr 2000 vom Elementwerk SACAC AG produziert [1]. Seit Oktober 2001 steht dieser 27 m hohe Tragmast aus Hochleistungsbeton in einer 110-kV-Leitung der Nordostschweizerischen Kraftwerke bei Würenlingen (Ag) im Einsatz. Der mit 40 CFK-Drähten vorgespannte Mast weist ein konisches Rohrprofil auf, mit einer Wandstärke von lediglich 45 mm, die zu einer Gewichtsersparnis von 40 % im Vergleich zu einem konventionellen Spann- oder Stahlbetonmast für den gleichen Einsatzzweck geführt hat. Die Transport- und Montagekosten konnten dadurch reduziert werden, was bei einer erwarteten Lebensdauer von 50 Jahren ohne Wartungsaufwendungen zu niedrigeren Lebenszykluskosten als bei Stahlrohr- oder Stahlgittermasten, deren Korrosionsschutzanstrich nach ca. 20 Jahren erneuert werden muss, führen sollte. Dieser erste Tragmast wird in einem 5-Jahres-Monitoring-Programm nach einem neuartigen Konzept (GMS) von der EMPA Dübendorf (CH) überwacht.

Der Einsatz von mit CFK-vorgespanntem Hochleistungsbeton hat sich bei weiteren Pilotanwendungen als vorteilhaft erwiesen. Im Frühjahr 2001 erfolgte die Herstellung einer Serie von filigranen (minimale Profilwandstärke 50 mm) Balkonschwellen und Fensterbänken der Längen 3,6–5,3 m für ein Mehrfamilienhaus im Großraum Zürich.

Im Jahr 2003 hat SACAC AG eine neue Produktlinie von dauerhaften und leichten Beleuchtungsmasten der Höhenklassen 4,2–18 m (Carbolith®-Lichtmasten) im Schweizer Markt eingeführt. Eine Serie des ersten derartigen Masttyps (8 Masten der Gesamtlänge 9,2 m) wurde im Jahr 2002 einem sehr detaillierten Zertifizierungsprozedere mit statischen, dynamischen und Dauerhaftigkeitsprüfungen nach EN40 am

Engineering Department („structures group“) der Universität Cambridge in England unterworfen [2]. Dieser Masttyp hat alle Anforderungen für eine experimentelle Zertifizierung nach EN40-3-2 erfüllt.

Wieso CFK-vorgespannter Hochleistungsbeton im Elementbau?

Die Frage sei gestellt, wieso die neuartige Werkstoffkombination „CFK-vorgespannter Hochleistungsbeton“ bei der Herstellung von Tragwerkelementen von Vorteil sein sollte. Bei der nachfolgenden Argumentation wird an Biegeträger gedacht, die im Spannbettverfahren hergestellt werden.

Die CFK-Spannbewehrung, welche aus feinen, unidirektional mit Kohlenstofffasern verstärkten Drähten von $\varnothing = 3-6$ mm besteht, wird typischerweise im Pultrusionsverfahren mit einer Epoxidharzmatrix hergestellt, wobei andere Herstellungsverfahren wie das Rolltrudieren [3] (Thermoplastmatrix) möglich wären. Solche unidirektional verstärkten CFK-Spanndrähte zeichnen sich durch eine sehr hohe Zugfestigkeit im Bereich von 2.500 N/mm² aus. Beispielhafte mechanische Zugeigenschaften werden in Tabelle 1 wiedergegeben. Die Dichte von CFK beträgt mit 1,6 g/cm³ lediglich ein Fünftel der Dichte von Spannstahl. Der wohl größte Vorteil von CFK als Spannbewehrung ist die absolute Korrosionsbeständigkeit in allen praktisch vorkommenden Medien auch bei gleichzeitiger Einwirkung von hohen mechanischen Spannungen. Die völlige Absenz einer Spannungsrisskorrosionsgefahr erlaubt eine Minimierung der Betonüberdeckung weit unterhalb derjenigen, die zum Schutz von Spannstahldrähten notwendig ist. Die $\varnothing 5$ mm CFK-Spanndrähte des ersten Hochspannungsmastes weisen eine Überdeckung von lediglich 18 mm auf, die bei Spannstahl typischerweise das 2,5fache betragen würde. Das Maß der Überdeckung wird durch statische Überlegungen

(Aufnahme der Druckspannungen durch die Biegebelastung und der Spreizzugspannungen im Verankerungsbereich der CFK-Spanndrähte) und durch den Unterschied der Wärmeausdehnungskoeffizienten von CFK (quer zur Faserrichtung) und hochfestem Beton bestimmt.

Nicht zu unterschätzen sind das extrem günstige Ermüdungsverhalten und das Fehlen von zeitabhängigen mechanischen Spannungsverlusten (Kriechen und Relaxation). Neben den hohen Zugfestigkeiten verleihen gerade die letzteren Eigenschaften diesem Werkstoff hervorragende Qualitäten zur Vorspannung von Betonelementen.

Es darf nicht verschwiegen werden, dass die bescheidenen mechanischen Eigenschaften der unidirektional kohlenstoffaserverstärkten Profile quer zur Faserrichtung sorgfältig zu berücksichtigen sind (z. B. in Hinsicht auf die Verankerung der Spanndrähte). Außerdem weisen die Profile einen Wärmeausdehnungskoeffizienten quer zur Faserrichtung auf, der 2- bis 3-mal höher ist als derjenige von hochfestem Beton (Orthotropie).

Die hohe Qualität und der heute noch hohe Preis der CFK-Profile erfordern eine gleichsam hohe Qualität der Betonmatrix: Hochleistungsbeton (HLB) der Festigkeitsklasse B100 und höher ist der angemessene Materialpartner

für die Kohlenstofffaser. Hochleistungsbeton kann heute im Fertigteilwerk mit geeigneten Mischanlagen bei guter Beherrschung des Produktionsprozesses und angemessener Mitarbeiterqualifikation in konstanter Qualität hergestellt werden. Typischerweise wird ein sehr präzise dosierter Feinkornbeton (Mörtel) mit hoher Festigkeit der Zuschlagstoffe verwendet. Der Zementgehalt liegt in einer Größenordnung von 450 kg/m³. Silica fume und Hochleistungsverflüssiger sind feste Rezepturbestandteile dieses Betons, der bei optimaler Verarbeitbarkeit einen W/Z-Wert von 0,33 bis 0,35 aufweist.

Hochleistungsbetone der Klasse B100 und höher sind verhältnismäßig preiswert und zeichnen sich nebst der hohen Druckfestigkeit durch eine hohe Dauerhaftigkeit, eine hohe Biegezugfestigkeit, eine hohe Bruchstauchung und einem mittleren bis hohen E-Modul aus: All diese Eigenschaften haben einen günstigen Einfluss auf das geplante Produkt.

Aus den oben erwähnten Vorteilen der einzelnen Werkstoffkomponenten CFK und HLB kann eine Gewichtsminimierung des geplanten Biegeelementes durch Wandstärkenreduktion erreicht werden, wobei die exzellenten Gebrauchseigenschaften (keine Korrosionsanfälligkeit, hohe Biegesteifigkeit und hohe Ermüdungsfestigkeit) gewährleistet werden.

Die hohe Dauerhaftigkeit von mit CFK-Drähten vorgespanntem HLB wird durch die Ergebnisse von Langzeitversuchen im Freien an drei Biegeträgern, die seit 7,5 Jahren an der EMPA Zürich laufen, untermauert [4]. Das Biegekriechverhalten der drei teilweise sehr hoch belasteten und mit CFK-Drähten vorgespannten Mastabschnitte wird in 4-Punkt-Biegeversuchen untersucht. Die periodischen Messungen zeigen eine sehr begrenzte zeitliche Zunahme der Durchbiegungen (Abbildung 1), Stauchungen und Dehnungen, welche ihre Ursache in der geringfügigen Kriechverformung der hochfesten Betonmatrix hat.

Tabelle 1: Eigenschaften von CFK-Drähten ø 4 mm zur Herstellung von Carbolith®-Lichtmasten. Ergebnisse von 10 Zugversuchen

Nenn Durchmesser des Drahtes	4 mm
effektiver Drahtdurchmesser	4.2 mm (beschichtet: 5.4 mm)
Durchmesser-Streuung (stabw)	0.05 mm (beschichtet: 0.4 mm)
Anzahl Filamente im Draht	19 rovings à 12 K
Faservolumengehalt	61.5%
Longitudinale Zugfestigkeit	2'540 N/mm ²
Zugfestigkeits-Streuung (stabw)	40 N/mm ²
Minimal gemessene Zugfestigkeit	2'475 N/mm ²
Mittlerer Längs-E-Modul	168'500 N/mm ²
E-Modul-Streuung (stabw)	3'500 N/mm ²
Mittlere Bruchdehnung	1.64%
Streuung der Bruchdehnung (stabw)	0.04%
Minimal gemessene Bruchdehnung	1.60%

Abb. 1: Biegekriechversuche im Freien an der EMPA Zürich (Abt. Ing. Strukturen)

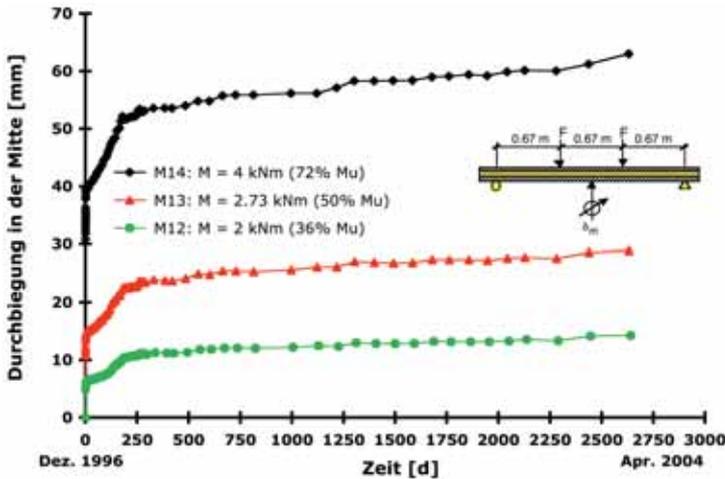


Tabelle 2: Eigenschaften der im 4-Punkt-Biegekriechversuch geprüften Mastabschnitte ($\sigma_{CFK,0}$ = CFK-Anfangsvorspannung, $\sigma_{c,0}$ = anfängliche zentrische Betonvorspannung, σ_{c,t_0} = zentrische Betonvorspannung im Belastungszeitpunkt t_0)

Prüfling	CFK-Spanndrähte	$\sigma_{CFK,0}$ [N/mm ²]	t_0 [d]	$\sigma_{c,0}$ [N/mm ²]	σ_{c,t_0} [N/mm ²]	2F [kN]	F.a/M _u [%]	σ_{c,ult,t_0} [N/mm ²]
M12	8 x Ø 3 mm	1'600	28	15.2	12.3	6	36	21
M13	8 x Ø 3 mm	1'600	28	15.2	12.3	8.2	50	56
M14	8 x Ø 3 mm	1'600	23	15.2	12.4	12	72	86

Abb. 2: Biegekriechversuch von Mastabschnitt M14: Zustand einer hohen und stabilen Durchbiegung (Bild EMPA Dübendorf, Abt. 101)



Tabelle 2 gibt die Eigenschaften der geprüften zylindrischen Mastabschnitte (Außendurchmesser 100 mm und mittlere Wandstärke 25 mm) wieder. Die drei Balken haben eine Gesamtlänge von 2,3 m und eine Versuchsspannweite von 2 m. Die Lasteinleitung erfolgt in den Drittelpunkten durch aufgehängte Betongewichte (die einwirkende Gesamtlasten betragen 2F = 6 kN, 8,2 kN, 12 kN bei einem Hebelarm a = 0,67 m). Die im Pultrusionsverfahren hergestellten CFK-Spanndrähte à Ø 3 mm weisen einen anfänglichen Vorspanngrad von 50 % bezüglich ihrer charakteristischen Zugfestigkeit von 3.200 N/mm² auf. Eine über die Spanndrähte gewickelte CFK-Bandspirale (Thermoplastmatrix) von Ganghöhe 40 mm dient als Schubbewehrung. Die Abschätzung der Betondruckspannung an der Oberkante der Mastabschnitte (σ_c , μ_e , t_0 in Tabelle 2) zeigt das hohe Belastungsniveau in den Kriechversuchen. Es sei dabei vermerkt, dass die Druckfestigkeitsklasse der geschleuderten hochfesten Betonmatrix B120/110 beträgt. Der Mastabschnitt M12 befindet sich anfänglich im ungerissenen Zustand, während die Erstbelastung feine Biegerisse in den Prüfkörpern M13 und M14 erzeugt. Demzufolge weisen diese eine überproportional höhere Verformung auf.

Die drei Versuchskörper zeigen eine sofortige elastische Deformation beim Aufbringen der Last und eine wichtige Kriechverformung im Zeitraum der ersten 200 Tage (Abbildung 1). Danach – das heißt innerhalb der letzten 7 Jahre – sind die Durchbiegung, das Rissbild und der CFK-Drahtschlupf der Mastabschnitte bei konstanter Belastung nahezu stabil. Selbst der hoch belastete Versuchskörper M14 zeigt nur geringfügige Kriecherscheinungen. Abbildung 2 zeigt die bemerkenswerte und stabile Verformung von Mastabschnitt M14, der einem Biegemoment von 72 % der experimentellen Kurzzeitbiegetragfähigkeit M_u unterworfen ist.

Pilotprojekt CFK-vorgespannter Freileitungsmast

Im Jahr 1994 beginnt die SACAC Schleuderbetonwerk AG ein innovatives Entwicklungsprojekt mit der EMPA Dübendorf (Zürich), dessen Ziel es ist, die Grundlagen einer neuen Art der passiven (schlafenden) und aktiven (vorgespannten) Bewehrung von Hochleistungsbeton zu erforschen. Die hohe Zugfestigkeit und die ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit auch bei gleichzeitiger Einwirkung von hohen mechanischen Spannungen der dabei eingesetzten Bewehrungselemente aus CFK spielen eine zentrale Rolle bei der Optimierung der geprüften Schleuderbetonproben.

Die eingesetzten Hochleistungsbetone weisen neben einer hohen Dauerhaftigkeit eine Druckfestigkeit von über 100 N/mm² (1.000 kg/cm²) auf. Dies entspricht dem drei- bis vierfachen Wert eines konventionellen Baustellenbetons.

Nachdem die Grundlagen für diese neue Bauweise ermittelt waren [4], entschieden sich die Nordostschweizerischen Kraftwerke (NOK) 1998, einen derartig innovativen Mast erstmals in eine Leitung ihres 110-kV-Verteilnetzes einzubauen. Für dieses Pilotprojekt wurde ein 27 m hoher Mast in einem Spannbett-Schleuderverfahren hergestellt [1].

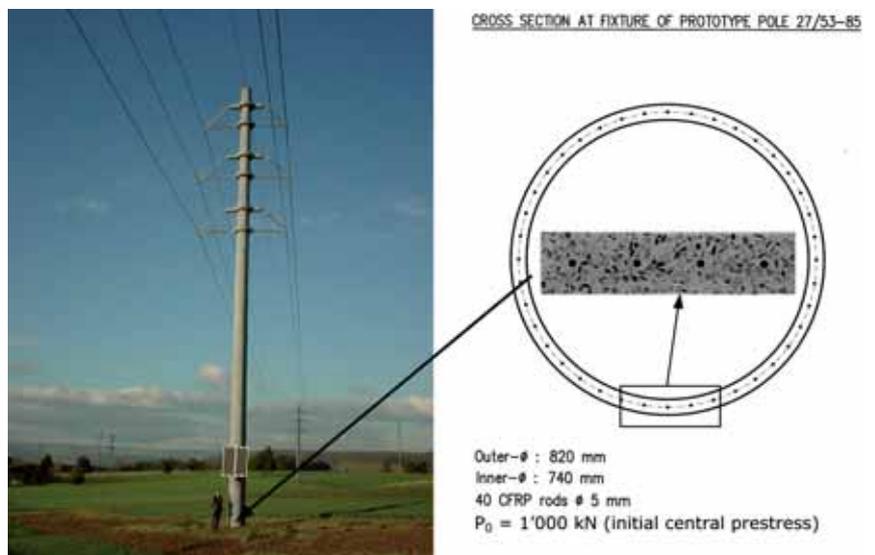
Der konische Mast weist einen Außendurchmesser von 850 mm am Fuß und 530 mm am Zopf auf (Konizität 1,175 %), mit einer mittleren Wandstärke von lediglich 45 mm (die minimal erforderliche Nennwandstärke beträgt 40 mm). Die Betonüberdeckung der CFK-Drähte liegt bei 18 mm. Die Einhaltung der Überdeckung und der Wandstärke werden mittels Georadar-Messung (EMPA Abt. 113) über die gesamte Mastlänge überprüft. Der Mast wiegt lediglich 5.500 kg. Dies bedeutet eine Gewichtsreduktion von 40 % im Vergleich zu einem traditionellen, mit Stahl bewehrten Betonmast für den gleichen Einsatzzweck. Eine zentrische Gesamtvorspannung von 1.000 kN wird mittels 40 feinen CFK-Spanndrähten (ø 5 mm) erzeugt (nach Vorspannungsverlusten: $\sigma_{CFK} = 1.200 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{C^*} = 6,6 \text{ N/mm}^2$ an der Einspannung $-\sigma_{C^*} =$

13,3 N/mm² im Zopfbereich). Dies entspricht einem mittleren CFK-Bewehrungsgehalt von 1 %. Eine um die Spanndrähte gewickelte Spirale bestehend aus CFK-Bändern dient als Schubbewehrung.

Der CFK-vorgespannte Mast aus Hochleistungsbeton wird vor dem Feldeinsatz in statischen Versuchen an der EMPA geprüft und übertrifft alle Erwartungen hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit bei gleichzeitiger Erfüllung der gestellten Tragfähigkeitsanforderungen. Demzufolge haben die NOK im Sommer 2001 den geprüften Mast im Kanton Aargau (Gemeinde Würenlingen) in ihre 110-kV-Leitung Beznau-Baden eingebaut (Abbildung 3).

Während der ersten 5 Betriebsjahre erfolgt eine Fernüberwachung des Mastes gemäß einem neuartigen Konzept der EMPA: Ein Novum im Bauwesen ist die elektronische Widerstandsmessung der CFK-Vorspanndrähte zur Überwachung der Vorspannung [1]. Diese Messmethode beruht auf der gleichzeitigen Verwendung der CFK-Bewehrung als Sensor dank der Dehnungsabhängigkeit

Abb. 3: CFK-vorgespannter Tragmast aus hochfestem Schleuderbeton in Würenlingen (CH)



des elektrischen Widerstandes. Eine so genannte Masterkurve (Eichparabel) wird im Labor beim mechanischen Zugversuch mit elektrischer Widerstandsmessung ermittelt. Durch Kenntnis dieser Charakteristik der CFK-Drähte kann eine Überwachung der CFK-Spannkraft durch die Messung des elektrischen Widerstandes erfolgen (CFK verhält sich linear elastisch, d.h. mechanische Spannungen und Dehnungen sind linear proportional). In Abbildung 4 werden die beim Pilotmast gemessenen und temperaturkompensierten Dehnungsänderungen einzelner CFK-Drahtabschnitte im Bereich der Mastenspannung über einen Zeitraum von 2 Jahren wiedergegeben. Es finden keine Vorspannungsverluste statt. Die Störspitzen der Signale finden ihre Ursache in der schwierigen Temperaturkompensation mittels eines nicht im HLB eingebetteten CFK-Referenzdrahtes, der Luftströmungen ausgesetzt ist. Man beachte dabei, dass der Temperaturgang der CFK-Drähte sehr hoch ist (1°C Temperaturänderung verursacht $200\ \mu\text{m/m}$ Dehnungsänderung), was die Kompensation bei starken Temperaturschwankungen erschwert.

Parallel dazu läuft die periodische Messung von Betondehnungen an der Einspannungs-

höhe (durch konventionelle Dehnmessstreifen) sowie von Temperaturen und Feuchtigkeiten an ausgewählten Stellen an der Innen- und Außenoberfläche des Mastes.

Die Daten werden über ein sog. Generic Monitoring System (GMS, man siehe www.empa.ch/gms) per Mobiltelefon auf einen Rechner geleitet und sind via Internet weltweit abrufbar. Die Messgeräte, der lokale Datenerfassungs-PC und das Datenübertragungsmodul werden von einer Solaranlage gespeist (Abbildung 3). Die effiziente Messwerterfassung via GMS ist gekoppelt mit einer flexiblen Übertragung der Daten und ermöglicht eine vollständige Fernkontrolle. Das Senden von Warnsignalen bei Grenzwertüberschreitung per SMS und E-Mail wird in nächster Zukunft implementiert werden.

CFK-vorgespannte HLB-Fensterbänke und Balkonschwellen (Carbolith®)

Im Frühjahr 2001 wird eine Serie von 14 filigranen Fensterbänken und Balkonschwellen auf Bestellung eines Architekturbüros für ein Mehrfamilienhaus in der Nähe von Zürich hergestellt. Die ästhetische Anforderung, sehr dünne und lange Einfassungselemente herzustellen, die eine angemessene Festigkeit und Biegesteifigkeit sowie eine hohe Dauerhaftigkeit aufweisen, führt zur Wahl von mit CFK-Drähten vorgespannten HLB-Platten (Carbolith®-Platten). Die Balkonschwellen haben einen Trapezquerschnitt mit einer Wandstärke zwischen 50 mm und 55 mm bei einer Breite von 350 mm und Längen zwischen 3,6 m und 5,1 m. Der Trapezquerschnitt der Fensterbänke variiert zwischen 50 mm und 60 mm bei einer Breite von wiederum 350 mm, die Längen der Elemente betragen zwischen 4,3 m und 5,3 m (Abbildung 5). Alle Elemente werden mit 7 CFK-Spanndrähten von $\varnothing 5\ \text{mm}$ auf einer Gesamtlast von 112 kN zentrisch vorgespannt. Dies entspricht einer Einzeldrahtspannung von $820\ \text{N/mm}^2$ beim Absenken,

Abb. 4: Dehnungsänderungen von 4 der 40 CFK-Drähte über einem Messbereich von 800 mm, mit Mittelpunkt 0,8 m unterhalb der Einspannung des 27 m Mastes.

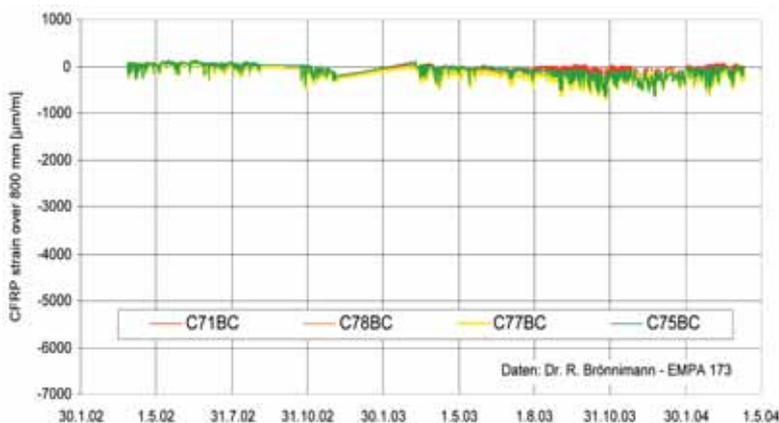




Abb. 5: Carbolith®-Fensterbank der Länge 4,7 m



Abb. 6: Fassade mit filigranen Carbolith®-Fensterbänken

die genügt, um alle Elemente für den maßgebenden Gebrauchslastfall (Lastfall einfache Lagerung an den beiden Enden unter Eigengewicht bei der Montage der Platten) voll vorzuspannen. Durch den Einsatz eines hell eingefärbten HLB der Güte B90/80 kann auf eine Schubbewehrung bei den schlanken Biegeträgern verzichtet werden. Die filigranen Fensterbänke und Balkonschwellen verschwinden im schlichten Erscheinungsbild der modernen Fassade und haben sich mittlerweile 3 Jahre im Einsatz bewährt (Abbildung 6).

Lichtmasten

Im Jahr 2002 wurde eine Serie von mit CFK-vorgespannten Lichtmasten aus hochfestem Schleuderbeton B100/90 hergestellt [2]. Die 8 Carbolith®-Masten des Typs 9.2/12-21.2/CFK haben eine Nennhöhe von 8 m bei einer Gesamtlänge von 9,2 m und sind mit 6 \varnothing 4 mm CFK-Drähten (Eigenschaften in Tabelle 1) auf eine Gesamtlast von 100 kN (beim Absenken) zentrisch vorgespannt. Eine Konizität von 10 mm/m lässt den Außendurchmesser der Rohrprofile zwischen 120 mm (Zopf) und 212 mm (Fuß)

variieren. Im Schleuderverfahren kann die Nennwandstärke von 30 mm sicher erreicht werden (die mittlere gemessene Wandstärke liegt bei 40 mm). Die Notwendigkeit einer Schubbewehrung sowie 3 verschiedene Varianten davon (CFK-Spirale oder Faserarmierungsgitter) werden untersucht.

Fünf derartige Masten werden in Zusammenarbeit mit der Universität Cambridge in England einem detaillierten Zertifizierungsprozedere mit statischen, dynamischen und Dauerhaftigkeitsprüfungen nach EN40 [5] unterworfen. Insbesondere finden fünf horizontale Kragarmversuche mit exzentrischer Führung der einwirkenden Spitzenlast statt (Abbildung 7). Die geringe Exzentrizität (140 mm) des einwirkenden Spitzenzugs erzeugt ein kleines Torsionsmoment, das proportional mit der Biegehaupteinwirkung zunimmt. Die Verformungsaufzeichnung von Abbildung 8 zeigt, wie der untersuchte Masttyp alle Anforderungen für eine experimentelle Zertifizierung nach EN40-3-2 erfüllt hat [2]. Dies unabhängig davon, ob eine Schubbewehrung oder eine zusätzlich passive Bewehrung eingesetzt wird, und unabhängig von der Lage der 300 mm x 75 mm Öffnung für die elektrischen Sicherungen in Bezug auf die geprüfte Biegeebene.

Insbesondere begrenzt die volle Vorspannung die Durchbiegung und den Torsionswinkel an der Mastspitze unter der maximalen Gebrauchseinwirkung. Die gemessenen bleibenden Durchbiegungen nach Entlastung ab Gebrauchszustand betragen lediglich einen Fünftel der durch EN40-3-2 definierten Werte. Die effektive Bruchsicherheit der 5 Proben liegt bei 2,8–3,5, was deutlich über die Normanforderung von 1,7 liegt.

Zusätzlich weisen alle Masten eine hohe Spitzendurchbiegung beim Bruch (Zugbruch der CFK-Drähte oder Stauchung des HLB) von weit über 0,5 m auf: Der relativ gute Verbund der beschichteten CFK-Spanndrähte zur HLB-Matrix ermöglicht die Öffnung einer mittleren Anzahl feiner Biegerisse, in denen sich die Krümmungen konzentrieren [6]. Die hohe Rotationsfähigkeit der gerissenen Querschnitte ergibt den gewünschten Warnungseffekt, falls die Masten außerordentlichen Extrembelastungen standhalten müssen.

Die durch volle Vorspannung erreichte hohe Steifigkeit der filigranen Masten im Gebrauchszustand (F_{ser}^x oder F_{ser}^y) sowie die geringe Massenverteilung führen zu einer Grundeigenfrequenz von 2,4 Hz, die aus mehreren dynamischen Ausschwingungsversuchen an zwei ungerissenen Masten ermittelt wird [7]. Demzufolge sind die geprüften Masten (bzw. deren Leuchten) viel schwerer als z. B. analoge Aluminiummasten durch Vandalismus zu beschädigen.

Die hohe Dauerhaftigkeit von Carbolith® wird im einem Frost-Tau-Temperatur-Wechselversuch an einer mit den eingesetzten \varnothing 4 mm Spanndrähten vorgespannten HLB-Prüfplatte mit der Länge 2,3 m und dem Querschnitt 175 x 40 mm nachgewiesen. Die 50 durchgeführten Frost-Tau-Temperaturwechsel zwischen -25°C und $+50^{\circ}\text{C}$ erzeugen keine Risse im Verankerungsbereich der CFK-Drähte (durch Überlagerung von Spreizzugspannungen und von thermischen Inkompatibilitätsspannungen) und es entsteht ein vernachlässigbarer Verlust an Vorspannung.

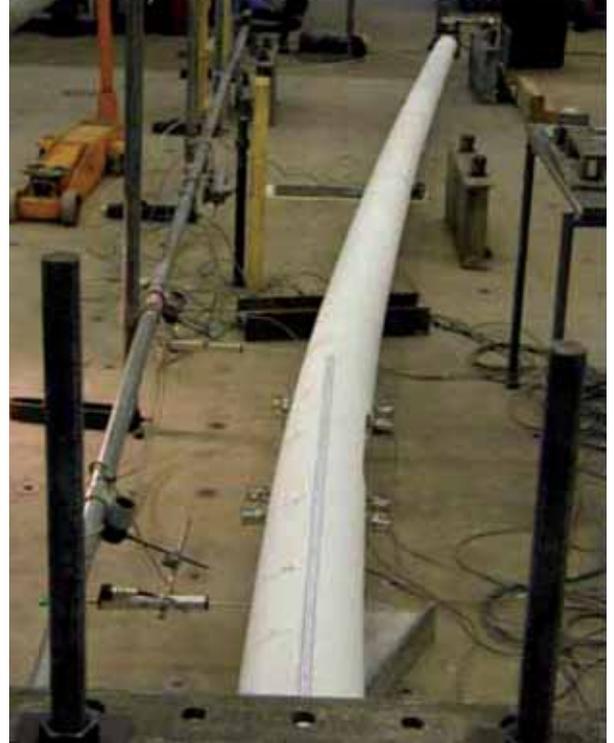


Abb. 7: Durchbiegung von Mast 3 kurz vor dem Biegeversagen ($\delta_{\text{Spitze}} \approx 900\text{ mm}$): viele feine Biegerisse im Bereich der Einspannung [2]

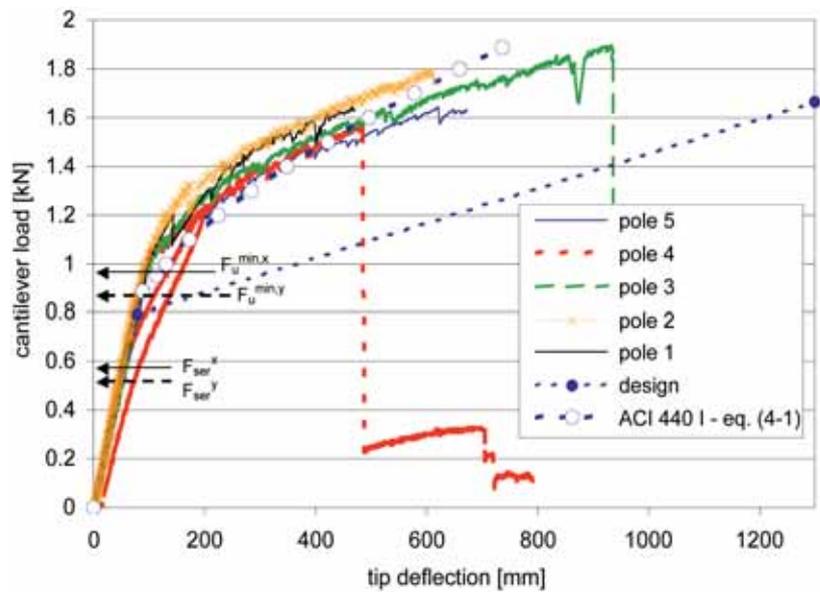
Der Leitgedanke für den Einsatz von CFK-vorgespanntem HLB ist die Erzielung einer optimalen Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Lichtmastes, wobei die ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit besonders im Bereich der Einspannung und der Öffnung für die elektrischen Leuchtensicherungen im Vordergrund steht. Man bedenke, dass verschiedenartige, sehr aggressive Medien an der Einspannung eines Lichtmastes einwirken können (insbesondere Tausalze gegen Frost, Hundeurin, Gartenchemikalien). Die entwickelten Lichtmasten sind demzufolge wartungsfrei. Günstiger Nebeneffekt ist eine Gewichtsreduktion durch Minimierung der Überdeckungen. Die geprüften Lichtmasten wiegen 350 kg und sind 30 % leichter als analoge Stahlbetonlichtmasten. Diese Gewichtsreduktion kann insbesondere beim Transport und bei der Montage von höheren Lichtmasten von Vorteil sein.

Im Jahr 2003 hat SACAC AG die neue Produktlinie von dauerhaften und leichten Beleuchtungsmasten der Höhenklassen 4,2–18 m in den Schweizer Markt eingeführt.

Schlussfolgerungen

Die innovative Werkstoffkombination CFK und Hochleistungsbeton (Carbolith®) eröffnet völlig neuartige und viel versprechende Möglichkeiten für die Gestaltung von Bauteilen und Tragstrukturen. Sie ermöglicht die Herstellung von dünnwandigen, leichten, filigranen, ermüdungsfesten und sehr dauerhaften Betonkonstruktionen mit sehr geringem

Abb. 8: Last- vs. Spitzendurchbiegung-Verläufe der 5 im Biege/Torsionsversuch geprüften Lichtmasten. F_{ser} ist die maximale Gebrauchslast nach EN40-3-1/2 und EC2 (Windeinwirkung) bezüglich der geprüften Biegeebene x oder y [5]. F_u^{min} steht für die minimal erforderliche Bruchlast nach EN40-3-1/2 [2].



Rohstoffverbrauch für den Einsatz im gesamten Infrastrukturbau und Bauwesen. Zwei oder mehr dieser Vorteile sollten gleichzeitig in der geplanten Anwendung zum Zuge kommen, um den noch hohen Materialpreis der CFK-Spannbewehrung in Bezug auf Spannstahl zu rechtfertigen. Ökonomische Vorteile ergeben sich bei der Wartung der Tragwerke sowie beim Transport und bei der Montage der Strukturen.

Mit Kohlenstofffasern vorgespannte Hochleistungsbeton-Produkte sind überdies gegen vergleichbare Konstruktionsbauteilen in verschiedenen Bereichen ökologisch von Vorteil:

- CFK-armerter Hochleistungsbeton besteht zu ca. 99 % aus natürlichen Baustoffen.
- Das geringe Gewicht führt zu einer Reduktion der Transportaufwendungen und zur Schonung der Sand-Kies-Ressourcen.
- Die filigranen Konstruktionsbauteile können nach der Nutzungsdauer relativ einfach wiederverwertet werden (Zerkleinern der HLB-Querschnitte in konventionellen Brechanlagen, was bei hoch mit Stahl bewehrten Betonbauteilen schwierig oder unmöglich ist).
- Das rückgewonnene Konstruktionsmaterial ist für geeignete Betonprodukte mittlerer Qualität vollumfänglich wieder einsetzbar. Die zerkleinerten Spanndrähte dienen dabei als Kurzfaserverstärkung.

Danksagung

Für die sehr fruchtbare Entwicklungszusammenarbeit der letzten 10 Jahre mit der von Prof. Urs Meier geleiteten EMPA Dübendorf (Zürich) sei bestens gedankt.

DI Dr. techn. Giovanni Pietro Terrasi
 Leiter F&E/Engineering SACAC
 Schleuderbetonwerk AG,
 CH-5600 Lenzburg
 www.sacac.ch, terrasi@sacac.ch

Literatur

- [1] Terrasi G. P., Bättig G., Brönnimann R., 2001: Pylons made of High-Strength Spun Concrete and prestressed with CFRP for high power transmission lines, FRPRCS 5 "Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures", ISBN 07277-3009-6, University of Cambridge, England 16 – 18 Jul 2001, edited by C. Burgoyne, pp. 1103–1112
- [2] Terrasi G. P., Lees J. M., 2002: SACAC CFRP prestressed concrete lighting columns: Experimental bending/torsion behaviour (type testing after EN40-3-2). Structures Group, Engineering Dept., University of Cambridge, England, in press
- [3] Winistörfer A., 1999: Development of Non-Laminated Advanced Composite Straps for Civil Engineering Applications. PhD Thesis, University of Warwick, GB
- [4] Terrasi, G. P., 1997: Mit Kohlenstofffasern vorgespannte Schleuderbetonrohre. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Diss. ETH Nr. 12'454, EMPA Bericht 240
- [5] CEN/TC 50 "Lighting columns and spigots": European Standards EN 40-3-1: 2000, EN40-3-2: 2000, prEN 40-3-3: 1999 (final draft): Design and verification, European Committee for Standardization CEN, Brussels
- [6] Lees J. M., 1997: Flexure of Concrete Beams Pre-tensioned with Aramid FRPs. Department of Engineering, University of Cambridge, Dissertation, Cambridge, March 1997.
- [7] Bachmann H. et al., 1995: Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines. Birkhäuser Verlag Basel. ISBN 3-7643-5148-9