

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 131 (2005)
Heft: 26: Aufgeblasen

Artikel: Tragen mit Luft
Autor: Pedretti, Andrea / Pedretti, Mauro
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-108594>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 05.05.2025

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

Tragen mit Luft



Das Prinzip Tensairity: Eine unter leichtem Innendruck stehende Membran eliminiert Stabilitätsprobleme wie das Knicken des Druckgurtes. Die dadurch erreichte volle Ausnützung der Materialfestigkeiten ermöglicht die Konstruktion sehr leichter und effizienter Tragwerke.

Ein Tensairity-Träger besteht aus drei Grundelementen: einer unter leichtem Innendruck stehenden zylindrischen Röhre aus einer elastischen Membran, einem auf der ganzen Länge mit der Röhre verbundenen Druckgurt sowie zwei spiralförmig um die Röhre geführten, an den Enden mit dem Druckgurt verbundenen Zugkabeln (Bild 1).

Die elastische Röhre erfüllt zwei Funktionen. Einerseits stabilisiert sie das Druckelement gegen Ausknicken, andererseits bewirkt sie den bogenförmigen Verlauf der Spannkabel. Durch die Verbindung mit dem aufgeblasenen Element sind Zugseile und Druckgurt somit keinerlei Stabilitätsproblemen ausgesetzt und können bis zur Festigkeitsgrenze des Materials belastet werden. Dadurch ist die Konstruktion sehr effizienter und leichter Tragstrukturen möglich.

Pneumatische Elemente sind nie über längere Zeit total luftdicht, und die Verluste steigen mit zunehmendem Innendruck. Die Qualität der Membran und der Nähte ist daher, nicht nur für die Sicherheit, zentral. Um die Verluste und auch die Schwankungen des Aussendruckes (etwa 50 mbar) zu kompensieren, müssen pneumatische Elemente dauernd und kontrolliert aufgepumpt werden. Die Leistungsfähigkeit des Kompressors muss so hoch sein, dass auch grössere Leckagen (z.B. infolge Vandalismus) aufgefangen werden können. Die geringen, für Tensairity-Strukturen notwendigen Innendrucke von 50 bis 300 mbar erleichtern diese Aufgabe beträchtlich.

Bei der Parkhausüberdachung in Montreux wird der Luftdruck in jedem Träger dauernd gemessen. Fällt er unter einen Minimalwert, wird der Druck in allen anderen Trägern auf das Maximum erhöht. Ausserdem sind die Träger so dimensioniert, dass sie ihr Eigengewicht plus eine geringe Auflast auch ohne Innendruck tragen könnten.

1

Der Ingenieur Mauro Pedretti sitzt auf einem der ersten Tensairity-Prototypen. Dessen Druckgurt besteht aus einer Holzplatte mit einem Querschnitt von lediglich $\frac{5}{40}$ mm (oben), die Zugbänder sind aus Kunststoff (Bilder: Autoren)

2

Tensairity-Träger unter einer linearen Last

3

Interaktion zwischen der Membran und den Zugkabeln

Grundprinzipien der Statik

Für unsere Erklärungen bedienen wir uns eines Tensairity-Trägers der Länge L und mit einer linearen Belastung q_l (Bild 2).

Bei einem einfachen Träger beträgt das maximale Moment M :

$$M = \frac{q_l L^2}{8} \quad (1)$$

bei einer Schlankheit γ von:

$$\gamma = \frac{L}{2R_0} \quad (2)$$

Die maximale Zugkraft T in den beiden verdrehten Seilen beträgt demnach:

$$T = \frac{M}{2R_0} = \frac{q_l L \gamma}{8} \quad (3)$$

Andererseits üben die beiden Zugseile einen Druck auf die Membran des unter Druck stehenden Schlauches aus. Die Spannung in der Schlauchmembran übt ihrerseits eine Normalkraft f auf die beiden Seile aus. Die gesamte auf die beiden Seile wirkende Kraft entspricht dem Produkt dieser Normalkraft f mal Biegeradius ρ der Kabel. Die entsprechende, entgegengesetzte Kraft in den beiden Seilen beträgt demnach:

$$T = 2f\rho \quad (4)$$

Die Seilbiegung ρ wird mit folgender Formel berechnet:

$$\rho = R_0 \left(1 + \frac{\gamma^2}{\pi^2}\right) \approx R_0 \frac{\gamma^2}{\pi^2} \quad (5)$$

wobei diese Annäherung bei $\gamma \gg 1$ gilt.

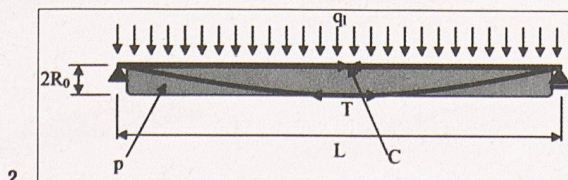
Je schlanker die Schläuche, desto paralleler zur Schlauchachse kommen die beiden Seile zu liegen. Unter der Wirkung des Seildrucks wird sich die Membran nun verformen und zwei Kreisbögen bilden, wodurch zwei Zylinder mit dem Radius R entstehen (Bild 3).

Der Radius R dieser Kreisbögen beträgt:

$$R = R_0 \frac{1}{1 + \frac{2\phi}{\pi}} \quad (6)$$

Die Komponente n eines Seils auf einen Zylinder mit dem Radius R beträgt beim Innendruck p :

$$n = pR \quad (7)$$



2

Die Normalkraft f beträgt entsprechend der Wirkung beider Zylinder:

$$f = 2n \sin \phi \quad (8)$$

Bei konstantem Druck p lassen sich die Gleichungen 6, 7 und 8 so kombinieren:

$$f = 2pR_0 \frac{\sin \phi}{1 + \frac{2\phi}{\pi}} \quad (9)$$

Die Verformung δ beträgt:

$$\delta = R_0 - R \cos \phi \quad (10)$$

In erster Annäherung ergibt sich die Normalkraft f aus:

$$f = p\pi\delta \quad (11)$$

und in zweiter Annäherung aus:

$$f = pR_0\pi \frac{\delta}{R_0} \left(1 - \frac{\delta}{R_0}\right) \quad (12)$$

Bei kleineren Verformungen ($\delta/R_0 < 0,2$) beträgt die Normalkraft f ungefähr:

$$f \approx \frac{1}{2} pR_0 \quad (13)$$

Die Kombination der Gleichung 13 mit den Gleichungen 4 und 5 ergibt für die Spannung T in den Seilen:

$$T = pR_0^2 \frac{\gamma^2}{\pi^2} \quad (14)$$

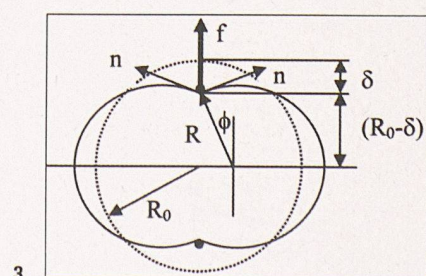
Unter der Annahme, die lineare Last q_l sei auf die plane Schlauchfläche so verteilt, dass eine Oberflächenlast q entsteht:

$$q = \frac{q_l}{2R_0} \quad (15)$$

und durch Kombinieren der Gleichungen 3 und 14 kann man für den Druck p schreiben:

$$p = \frac{\pi^2}{2} q \quad (16)$$

Dieses äußerst überraschende Ergebnis beweist, dass der Innendruck p eines Tensairity-Trägers von den Trägerabmessungen (L und R_0) unabhängig ist. Bei einer



3

externen Belastung $q = 1 \text{ kN/m}^2$ beträgt der im Schlauch notwendige Druck bloss $p = 5 \text{ kN/m}^2$, d. h. 50 mbar!

Druckbeanspruchung ohne Knickung

Die beiden Seile führen zu einer Druckbeanspruchung $C=T$ im oberen Element (Bild 2). Dieses auf Druck beanspruchte Element steht auf seiner gesamten Länge mit der Membran des aufgeblasenen Schlauches in Verbindung und verhält sich wie ein Träger unter Druck auf einer elastischen Grundlage. Die Knickbelastung eines solchen Trägers ergibt sich aus folgender Gleichung [3]:

$$P = 2\sqrt{kEI} \quad (17)$$

wobei k die Federkonstante (in N/m^2) der elastischen Grundlage, E das Elastizitätsmodul und I die Trägheit des Trägers darstellt. Von der Gleichung 11 ausgehend erhalten wir:

$$C = 2\sqrt{p\pi EI} \quad (18)$$

und wir können daraus die kritische Knickbelastung unseres auf Druck beanspruchten Elementes ableiten als:

$$k = \frac{\partial f}{\partial \delta} \Big|_{\delta=0} = p\pi \quad (19)$$

Die Knickbelastung nimmt entsprechend der Quadratwurzel des Druckes p zu, ist aber von der Trägerlänge L unabhängig.

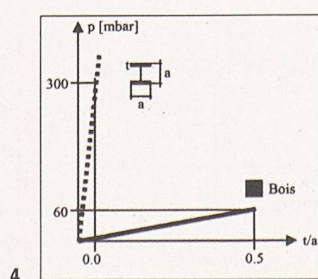
Bei einem dünnen Profil, wie im Idealfall nach Abbildung 5 mit Höhe und Breite a , Flügeldicke t und Druckfestigkeit σ können wir von der Gleichung 19 ausgehend schreiben:

$$2\sqrt{p\pi EI} \geq A\sigma = 2at\sigma \quad (20)$$

was zu einem Mindest-Innendruck p von:

$$p \geq \frac{2\sigma^2 t}{\pi E a} \quad (21)$$

führt. Ein auf Druck beanspruchtes Holzelement mit quadratischem Querschnitt ($t/a = 0,5$) wird durch einen Innendruck von nur $p = 60 \text{ mbar}$ gegen jede Knickung gesichert. Hingegen erfordert ein dünnwandiges Metallprofil einen Druck von ca. 300 mbar.



Formvarianten

Bei der Untersuchung¹ verschiedener Trägerformen mit der Methode finiter Elemente zeigte sich, dass ein zigarrenförmiger Träger (Bild 5, b) bereits eine höhere Steifigkeit aufweist als ein zylindrischer. Die Formen c und d in Bild 5 – mit auf einen Punkt konvergierenden Enden – sind diesbezüglich noch günstiger: In beiden Fällen wandelt sich die vorher gekrümmte Geometrie der Zugelemente zu einer Geraden, und die Seile lassen sich durch einen Stab ersetzen. Vom Typ d sind denn auch die Dachträger des Parkhauses in Montreux.

Andrea Pedretti, Mauro Pedretti, Bauingenieure, Biasca, haben Tensairity entwickelt. Von ihnen stammt auch Tensegrity, das Konzept, das u. a. der Wolke von Yverdon an der Expo.02 zugrunde lag.
info@airlight.ch
Erstabdruck erschienen in *Tracés* 04/2005
Übersetzung: Richard Squire

Literatur

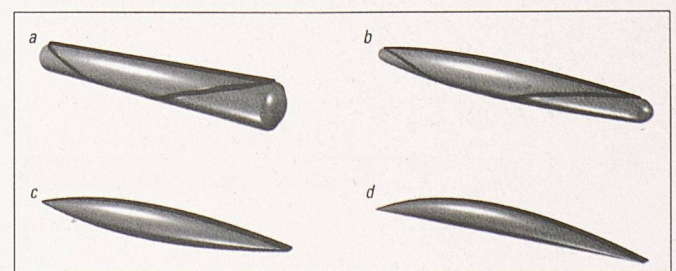
- 1 A. Pedretti, P. Steingruber, M. Pedretti and R. H. Luchsinger: «The new structural concept Tensairity: FE-modeling and applications», in A. Zingoni (Hg.): *Proceedings of the Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Lisse (NL), A. A. Balkema / Swets Zeitlinger, 2004

4

Membranluftdruck für unterschiedliche Druckgurte. Oben ein Stahlträger, rechts ein Holzquerschnitt

5

Verschiedene mögliche Formen von Tensairity-Trägern. Die Modelle c und d sind unter anderem darum interessant, weil die Zugbänder nicht mehr räumlich gekrümmt sind



Pizza statt Mensa

Haben Ingenieure und Architekten durch ihre Arbeit eine Verpflichtung zum politischen Mandat? Wir erinnern uns: 2002 lobte der Kanton Aargau zuerst einen zweistufigen Architekturwettbewerb für die neue Mensa der Alten Kantonsschule in Aarau aus, dem ein ebenfalls zweistufiger Fachplanerwettbewerb auf Grundlage des Siegerprojektes folgte. Dieses Verfahren wurde daraufhin breit diskutiert, was grundsätzlich lobenswert und wertvoll war. Und es hätte sich an der anschliessenden Planung und Realisation zeigen müssen, ob dieser Weg auch in der Praxis wirklich seinen postulierten Ansprüchen gerecht werden kann. Leider werden wir dies nun nie erfahren. Denn in unserer inhaltlichen Debatte haben wir die Rechnung ohne den Wirt gemacht, das Vorhaben wurde nach etlichen Verschiebungen nun definitiv gestrichen.

Was ist passiert? Eigentlich eine mittlerweile alltägliche Geschichte. Der politische Entscheidungsträger, sprich der Regierungsrat des Kantons Aargau, hat einen «Strategiewechsel» vollzogen. Dieser führte zum Schluss, dass die beiden Schulen AKSA und KBS keinen Neubau einer Mensa benötigten, da die zentrale Lage und der erwartete Neubau des Bahnhofs genügend Verpflegungsangebote böten. Zudem seien die prognostizierten Betriebskosten der Mensa nicht tragbar.

Natürlich sind wir enttäuscht, unser mit viel Energie und Überzeugung getragenes Projekt nicht realisieren zu können, ganz zu schweigen von unentgeltlichen Diensten sowohl unseres Büros als auch aller der an den Verfahren beteiligten Planungsteams. Und natürlich ist es auch für das öffentliche Ansehen von Wettbewerben schädigend, wenn nun nach diesem exorbitanten finanziellen Verfahrensaufwand rein gar nichts resultiert.

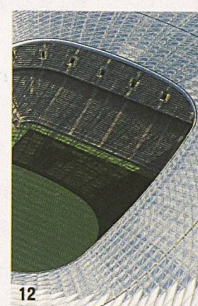
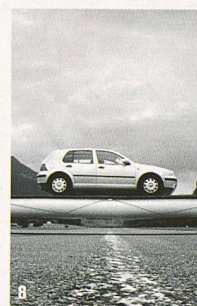
Aber wirklich entscheidend ist meiner Meinung nach die politische Stossrichtung hinter diesem Strategiewechsel. Es ist offenbar ökonomisch nicht mehr vertretbar, für annähernd 1600 Schülerinnen und Schüler einen eigenen Aufenthalts- und Verpflegungsraum ohne Konsumpflicht bereitzustellen. Das seit 1973 geführte Provisorium wird nämlich ebenfalls ersatzlos gestrichen. Es beschleicht einen das ungute Gefühl, hier dem neoliberalen Geist in Form von Pizza- und Hamburger-Shops den Vorschub zu leisten und einer wichtigen, gemeinschaftlichen Einrichtung wie eine Schulmensa schlicht die Daseinsberechtigung abzuschneiden.

Es wäre von Seiten der Berufsverbände zu überprüfen, inwieweit wir uns nur als planende Dienstleister verstehen oder darüber hinaus für öffentliche Einrichtungen mehr übrig haben als die ordentliche Durchführung von Wettbewerben. Die Schulpolitik verdient unsere Aufmerksamkeit nicht nur in Form von schönen Gebäuden, sie muss vermehrt als öffentliche Institution überhaupt verteidigt werden. Schliesslich geht es hier auch um die Rolle des öffentlichen Raumes, der zugunsten einer kontrollierten, privaten Alternative aufgegeben werden soll. Spätestens hier wird deutlich, was die Antwort auf die oben gestellte Frage sein müsste.

Frank Zierau, dipl. Ing. Architekt SIA BSA, info@zierau.ch

Anmerkung

Siehe zum Thema auch tec21 5-6/04, S. 6 f., und 14/04, S. 18 f.



4 Luftig und leuchtend

| Rodolphe Luscher, André Luscher | Die Überdeckung des neuen Parkhauses in Montreux leuchtet nachts in allen Farben. Eine transluzente Kunststoffmembran dient einerseits als Dachhaut und erfüllt andererseits im neuartigen Tragwerkskonzept eine statische Funktion.

8 Tragen mit Luft

| Andrea Pedretti, Mauro Pedretti | Das Tragwerkskonzept Tensairity: Eine unter leichtem Überdruck stehende Membran eliminiert Stabilitätsprobleme wie das Knicken des Druckgurtes. Die dadurch erreichte volle Ausnutzung der Materialfestigkeiten ermöglicht die Konstruktion sehr leichter und effizienter Tragwerke.

12 Autoreifen, Schwimmring, Schlauchboot

| Christian Holl | Das neue Stadion in München von Herzog & de Meuron ist durch seine beleuchtete Fassade aus Luftkissen zum städtebaulichen Zeichen avanciert und steht für einen neuen Typ eines Fussballstadions.

18 Wettbewerbe

| Neue Ausschreibungen und Preise | Gemeindehaus Lommis | Wohnen im Rosenthal, Wald ZH | Eidgenössischer Wettbewerb für Kunst | Himmelscheibe von Nebra | Klosterschule St-Maurice |

25 Magazin

| Sanfte Renovation des Zürcher Lettenareals | Ausstellung: Gaetano Pesce – Unterschied ist Leben |

26 Aus dem SIA

| Normenschaften: Spagat zwischen Schweiz und Europa | Innovative Mobilitätslösung für Firmenmitglieder | Vernehmlassung: SIA 422 Bauzonkapazität |

28 Produkte

| Engeler Freiraumplanung: Falsches Grün | Warema AG: Sonnenschutz | Kaldewei: Duschen XXL | Schoellkopf: Tondichtungsbahn |

38 Veranstaltungen