Universität Stuttgart
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Statische Analyse von Seilnetztragwerken am Beispiel des Gebäudes des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Armin Eckerle

Motivation und Zielsetzung

Seilnetze ermöglichen es, mit geringem Materialaufwand große Flächen zu überspannen. Der Preis dafür ist ein nichtlineares Tragverhalten. Seile nehmen nur Zugkräfte auf und tragen Querlasten über Krümmung und Durchhang ab. Erst diese aktivieren die geometrische Steifigkeit, die das Netz tragfähig macht.

Ziel der Arbeit ist es, verschiedene Statikprogramme auf ihre Tauglichkeit für die Berechnung von Seilnetzen zu untersuchen. Betrachtet werden die Formfindung, die Netzmodellierung und die nichtlinearen Algorithmen zur Lösung des Gleichgewichtsproblems.

Daraufhin wird ein Programm ausgewählt und an einem Beispieltragwerk unter verschiedenen Lastfällen getestet, um den maßgebenden Lastfall zu finden.

Formfindung mit der Kraftdichtemethode

Gibt man eine Netzform rein geometrisch vor, steht sie selten im Kräftegleichgewicht. Geometrie und Seilkräfte sind nichtlinear miteinander gekoppelt. Das eine bedingt das andere.

Die Kraftdichtemethode ersetzt in der Gleichgewichtsbedingung das Verhältnis aus Seilkraft und Seillänge durch eine vorgegebene Kraftdichte q. Aus dem nichtlinearen wird somit ein lineares Gleichungssystem, das eine Gleichgewichtsform ohne Iteration liefert. Allerdings hängt diese von der vorgegebenen Kraftdichte ab.

Softwarevergleich

Verglichen werden Technet Easy, Dlubal RFEM und Oasys GSA an einem Referenznetz.

Alle drei benutzen zur Formfindung direkt oder indirekt die Kraftdichtemethode, unterscheiden sich aber im nichtlinearen Solver. RFEM und Easy rechnen implizit mit dem Newton-Raphson-Verfahren. Es ist matrixbasiert und baut das Residuum über mehrere Iterationen ab. Weil es quadratisch konvergiert, genügen dafür wenige Durchläufe. Es bricht jedoch ab, wenn die Steifigkeitsmatrix an kritischen Punkten singulär wird.

GSA rechnet explizit mit der Dynamischen Relaxation. Das Gleichgewichtsproblem wird in eine fiktive Schwingung überführt, die durch viskose oder kinetische Dämpfung zur Ruhe kommt. Sie arbeitet matrixfrei und hat deshalb kein Problem mit kritischen Punkten, ist aber an einen kritischen Zeitschritt gebunden. GSA hält ihn über Massenskalierung ein.

In der Netzmodellierung unterscheiden sich die Programme ebenfalls. Während man in RFEM und GSA die Netze selbst aufbauen muss, generiert Easy das Netz automatisch anhand der geometrischen Randbedingungen.

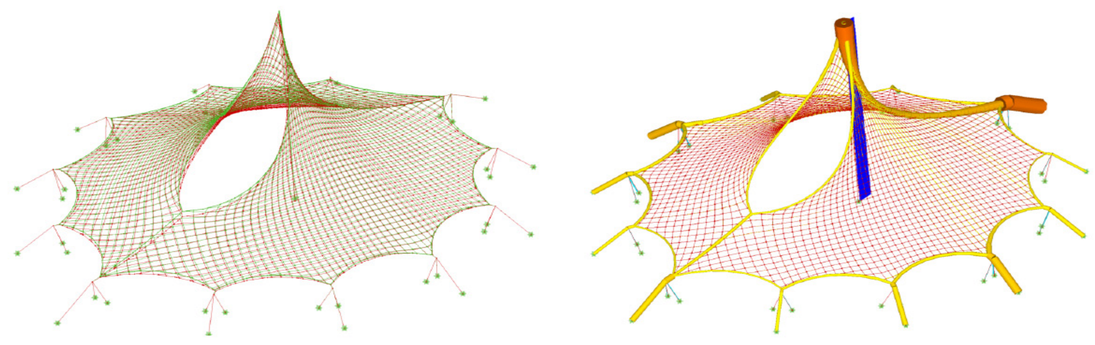
Das ILEK-Zelt

Angewendet wurde Easy auf das Institutsgebäude des ILEK. Im Zentrum steht ein um 7,2° geneigter Mast von 16,7 m Höhe. Er steht in einem Sandtopf, lässt kleine Verdrehungen zu und wirkt deshalb als Pendelstab. Die Spannweite beträgt rund 15 m, die Maschenweite 50 × 50 cm.

Das Dach ist kein durchgehendes Netz, sondern besteht aus zwei getrennten Hälften, die über den Mast und die beiden Hauptabspannungen gekoppelt sind. An diesen laufen alle vier Tragseile zusammen.

Ergebnis

Untersucht werden verschiedene Lastfälle. Da Lastfälle aufgrund der Theorie großer Verformungen nicht superponiert werden dürfen, wurden die Lastfälle immer in Kombination mit den ständigen Lasten untersucht, jedoch nicht untereinander. Es hat sich herausgestellt, dass Vorspannverlust maßgebend für das ILEK-Zelt ist. Durch eine Stützensenkung sinkt die maximale Zugkraft in der Hauptabspannung um 56 %.



Verformung und Normalkräfte unter dem kritischen Lastfall Stützensenkung.

Fazit

Bei vorgespannten Tragwerken ist der ungünstigste Zustand nicht zwangsläufig der mit der größten Last, sondern der mit dem größten Vorspannverlust.

Bei der Wahl des Programms muss man sich immer bewusst machen, wie das Programm rechnet. Das hilft beim Verständnis der Ergebnisse und bei der Klärung, wenn ein Ergebnis nicht wie erwartet ausfällt.

Literatur

Schek, H.-J. (1974): The force density method for form finding and computation of general networks. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 3, S. 115–134.

Ströbel, D.; Singer, P.; Oswald, R. (2007): Seilnetze – Eigenschaften, Besonderheiten bei der Montage, Lastabtragung. Stahlbau 76, Heft 5, S. 289–296.

Betreuung:

Axel Trautwein, M.Sc.

Dr.-Ing. Rebecca Thierer (BOLLINGER+GROHMANN)

Baustatik und Baudynamik