

Bemessung von wandartigen Trägern aus Stahlbeton mit 4H-Alfa

Wandartige Träger sind Bauteile, deren Stützweite kleiner als die 3-fache Gesamtquerschnittshöhe ist (EC 2, 5.3.1(3)) und in ihrer Ebene belastet werden, die jedoch auf Grund ihrer Lagerung (Einzelstützung) nicht als Wandscheibe betrachtet werden können.

Die bei Balken gültige Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte kann bei wandartigen Bauteilen als Grundlage der Bemessungsansätze (EC 2, 6.1(1)) nicht mehr vorausgesetzt werden (s. Leonhardt, T.2). Daher wird auf nichtlineare Berechnungsverfahren oder Stabwerksmodelle verwiesen.

EC 2, 5.7: Für nichtlineare Verfahren der Schnittgrößenermittlung müssen Baustoffeigenschaften verwendet werden, die zu einer realistischen Steifigkeit führen und die die Unsicherheiten beim Versagen berücksichtigen. Die Bemessung kann dann nach EC 2, 6 erfolgen.

EC 2, 6.5.1 : Bei einer nichtlinearen Dehnungsverteilung (z.B. bei Auflagern, in der der Nähe konzentrierter Lasten oder bei Scheiben) dürfen Stabwerksmodelle verwendet werden. Ein Stabwerksmodell besteht aus Betondruckstreben (diskretisierte Druckspannungsfelder), aus Zugstreben (Bewehrung) und den verbindenden Knoten. Die Zugstreben müssen i.d.R. nach Lage und Richtung mit der zugehörigen Bewehrung übereinstimmen (EC 2, 5.6.4).

Problem: Die Systeme können hochkompliziert sein (polygonale Berandung, beliebig viele Aussparungen, Einzel-, Linien-, Flächenlasten am Rand aber auch in Mitte des Bauteils, verschiedenartige Lagerungen). Außerdem ist der Baustoff Beton bei hoher Belastung weder isotrop noch linear-elastisch. Er wird i.A. als nicht zugfest betrachtet, so dass beim Übergang in den gerissenen Zustand 2 der Betonstahl die Zugspannungen übernimmt. Weiterhin erfordert eine praxisnahe Berechnung nachvollziehbare Ergebnisse bei möglichst geringer Rechenzeit.

Lösung mit 4H-Alfa

1. Wandartige Träger, Scheiben-, Plattenwirkung werden nicht voneinander abgegrenzt, so dass sich eine konsistente Lösung für ein komplexes Bauwerk ergibt. Um diese sehr komplexe Geometrie abzubilden, berechnet das Programm die Schnittgrößen mit der FE-Methode. Es werden flächenhafte Bauteile aus Beton vorausgesetzt, die an beiden Wandseiten durch Bewehrungsstahl verstärkt sind, um etwaige Zugkräfte (auch Querkraft) aufnehmen zu können. Die Bewehrung wird i.A. durch Betonstahlmatten oder gleichmäßig verteilte Stabstähle realisiert.

2. Die FE-Berechnung basiert auf dem Hookeschen Gesetz mit dem E-Modul und der Querdehnzahl des Betons (linear-elastisch, isotrop). Die Schnittgrößen werden also vereinfacht nach Th.I.O. im ungerissenen Zustand ermittelt. Die Richtigkeit der Lösung ist dadurch abgesichert, dass der statische Grenzwertsatz der Plastizität für jede Lösung nach der Elastizitätstheorie angewandt werden kann.

Die Bemessung in 4H-Alfa wird punktweise durchgeführt und ermittelt die Bewehrung je Bewehrungsrichtung, die für die Erhaltung der Grenzbedingungen erforderlich ist. Diese Vorgehensweise liefert ein sicheres, ggf. unwirtschaftliches Ergebnis (s. Schlaich/Schäfer).

3. Die Bemessung erfolgt mit den nichtlinearen Materialgesetzen für Beton (EC 2, 3.1.7) und Betonstahl (EC 2, 3.2).

4. Problematisch sind allerdings die Unstetigkeitsstellen im Bereich von Einzellasteinleitung, Einzellager und einspringenden Ecken. Diese Detailbereiche sind gesondert zu untersuchen bzw. die Voraussetzungen zur Verwendung der FE-Methode zu beachten.

5. Daher werden zusätzlich die Hauptdruckspannungen überprüft (besonders wichtig an Druck-Zug-Knoten, EC 2, 6.5.4(4)).

Hilfestellung zur Modellierung

- Punktlager, -lasten sind i.A. in der Realität nicht vorhanden und sollten auch bei Anwendung der FEM vermieden werden. Sie können durch kurze Linienlager, -lasten ersetzt werden, wobei eine starre Lagerung möglichst vermieden werden soll (Modellierung mit Federn).

- Einspringende Ecken sind numerische Unstetigkeitsstellen. Die Schnittgrößen im Eckpunkt wachsen bei Elementverfeinerung an. Jedoch gilt das integrale Gleichgewicht an den Elementknoten, so dass die innerhalb eines moderaten Bereichs um den Eckpunkt integrierte Bewehrung konstant bleibt (Vorausgesetzt, dass die Näherungslösung genau genug ist).

Abgrenzung zu anderen Verfahren

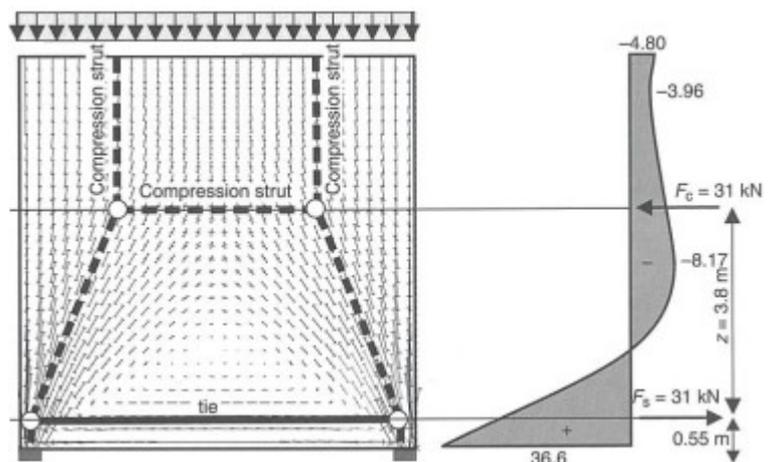
Nichtlineare Verfahren zur Schnittgrößenermittlung: Da das Superpositionsgesetz nicht gilt, sind alle Lastkombinationen iterativ zu berechnen. Die Berechnungen erfordern besonders bei komplexer Laststruktur einen in der Praxis nicht vertretbar hohen Aufwand.

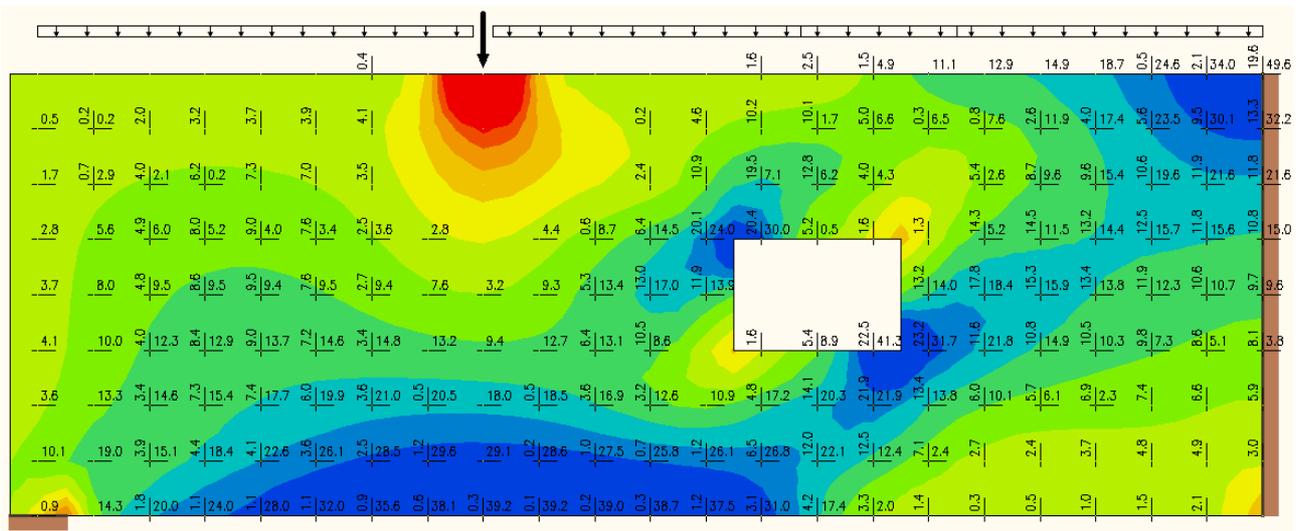
Stabwerksmodelle: Die Anwendung von Stabwerksmodellen erfordert, die Lage der Bewehrung vorab festzulegen. Auch hier gilt das Superpositionsgesetz nicht, d.h. für jede Lastkombination ist ggf. ein anderes Modell zu erstellen. Komplexe Systeme sind häufig schwer in sinnvolle Stabwerksmodelle abzubilden, die allen Anforderungen an Geometrie und Belastung genügen. I.A. sind interaktive Eingriffe des Anwenders in die Modellbildung erforderlich.

Beispiel nach Rombach

Rombach vergleicht FE-Bemessungsergebnisse einer Scheibenberechnung (Rombach, Kap. 3.4) mit Ergebnissen einer Stabwerksmodellierung. Es wird eine Wandscheibe mit den Abmessungen $L_x/L_y/d = 7.2/7.2/0.24 \text{ m}^3$ und einer Belastung am Wandkopf von $q = 20 \text{ kN/m}$ betrachtet. In Wandmitte erhält er eine Zugkraft von $F_s = 31.1 \text{ kN}$, daraus ergibt sich eine Bewehrung von $A_s = 0.5 \cdot F_t / f_{yd} = 0.36 \text{ cm}^2$ je Wandseite, die 0.55 m oberhalb der Wandunterseite (angenommene Lage der Zugstrebe) anzuordnen ist.

Die in Rombach veröffentlichte Schnittgrößenverteilung wurde mit $4H$ -Alfa für eine Belastung von $1.15 \cdot 20 = 23 \text{ kN/m}$ verifiziert. Sowohl die Verteilung als auch die integralen Größen im Vertikalschnitt in Wandmitte konnten bestätigt werden.





Deutlich zu erkennen ist der Fluss der Zugspannung quer durch die Wand von der oberen rechten zur unteren linken Ecke. Infolge dieser diagonal verlaufenden Spannungen ergibt sich eine nicht unerhebliche Vertikalbewehrung von $a_s = 2 \cdot 9.5 = 19 \text{ cm}^2/\text{m}$ bzw. $2 \cdot 13 = 26 \text{ cm}^2/\text{m}$.

In *4H-Alfa* wird eine Netzbewehrung berechnet, die natürlich auch als solche in der Konstruktion zu verarbeiten ist. Für diesen Anwendungsfall ergibt sich eine etwas höhere Bewehrung als mit dem Stabwerksmodell von Häußler-Combe, und ist demnach auch zur Bemessung von wandartigen Trägern geeignet (s. Anmerkung von Schlaich/Schäfer).

Literatur

- DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Januar 2011
- DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang zu EC 2, April 2013
- Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau, Teil 2: Sonderfälle der Bemessung im Stahlbetonbau, 3. Auflage, Springer-Verlag, 1986.
- Schlaich, J., Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau, Betonkalender 2001, Teil 2, Verlag Ernst & Sohn, 2001
- Rombach, G.A.: Finite element design of concrete structures, Thomas Telford Publishing, 2004.
- Häußler-Combe, U.: Computational Methods für Reinforced Concrete Structures, Verlag Ernst & Sohn, 2015