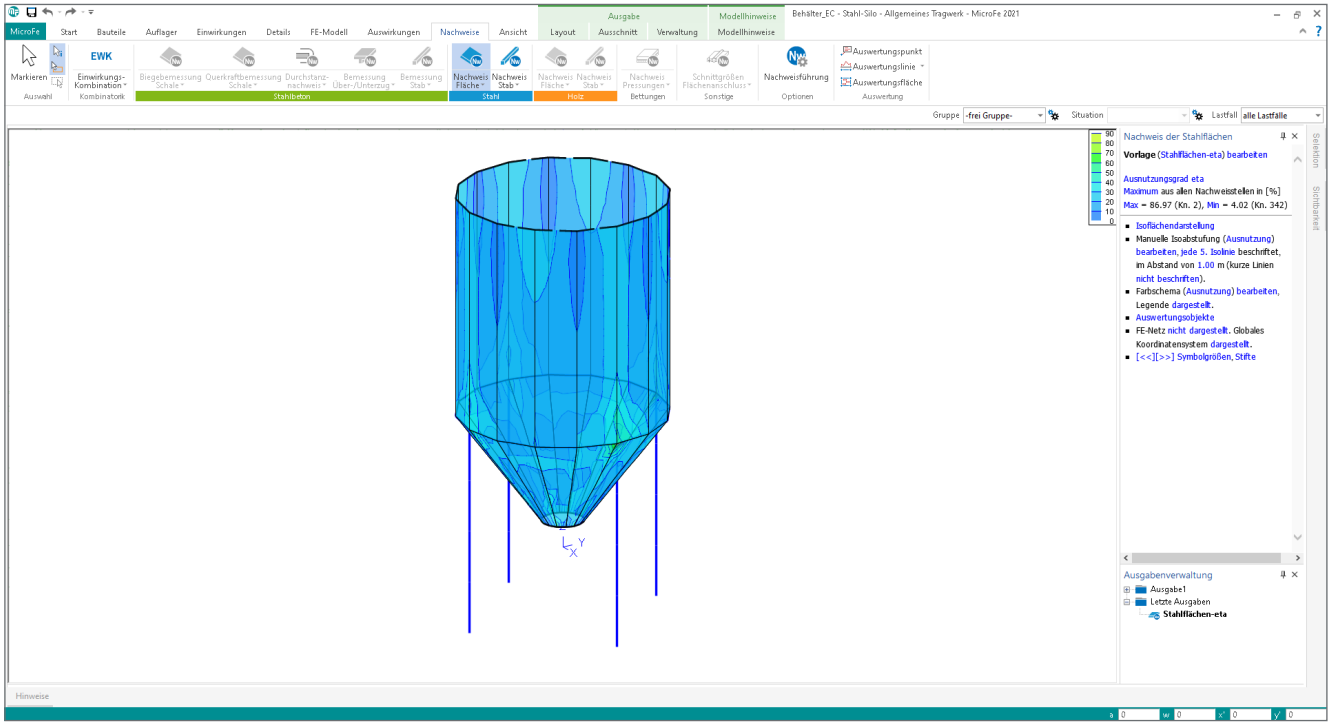
Dipl.-Ing. Sven Hohenstern

Stahlflächen in MicroFe

Leistungsbeschreibung der MicroFe-Module M331.de Plattentragwerke aus Stahl und M341.de Schalentragwerke aus Stahl

Mit den Modulen M331.de und M341.de lassen sich Stahlflächentragwerke modellieren. Der Spannungsnachweis von nicht stabilitätsgefährdeten Stahlflächen erfolgt auf Basis von Vergleichsspannungen nach DIN EN 1993-1-1 [1].



Modellierung

Mit dem Modul M341.de steht die Stahlfläche im Allgemeinen Tragwerk (M120.de) zur Verfügung und kann hier beliebig mit anderen Bauteilen kombiniert werden. Zudem ist mit diesem Modul auch die Stahlfläche im Rotationskörper (M480) einsetzbar. Weiterhin ist dieses Modul Grundvoraussetzung für das Modul M431 (Stahl-Profilstäbe in Faltwerke aus Stahl umwandeln). Mit M331.de kann die Stahlplatte im Plattenmodell (M100.de) verwendet werden.

Eigenschaften

In den Eigenschaften der Stahlfläche lassen sich neben der Flächendicke und der Stahlsorte noch weitere Parameter definieren (siehe Bild 1).

Es stehen alle in den Projekt-Stammdaten definierten Stahlsorten zur Auswahl. Dort sind zudem zu jeder Stahlsorte die Grenzdicken mit zugehöriger Streckgrenze eingetragen, um die Streckgrenzenabminderung gemäß EC 3 [1] berücksichtigen zu können. Diese Stammdaten lassen sich manuell verändern oder ergänzen. Die Streckgrenzenabminderung lässt sich in den Positionseigenschaften auch optional unterdrücken.

Mechanik

Die Stahlfläche kann exzentrisch zur Mittelebene angeordnet werden. Zudem kann sie als Starrkörper definiert oder die Membran-, Biege, Schub- und Drillsteifigkeit der Fläche beliebig abgemindert werden (Bild 1).

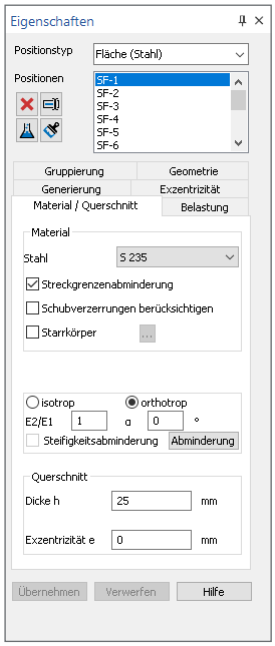


Bild 1. Positionseigenschaften „Material/Querschnitt“ der Stahlfläche

Die alternative Möglichkeit, Schubverzerrungen nach der Kirchhoff-Mindlin-Theorie für dicke Platten zu berücksichtigen, sollte nur im Ausnahmefall Anwendung finden.

Auch die üblichen Vernetzungsparameter stehen bei der Stahlfläche zur Verfügung. Neben der manuellen und optimierten Definition von Vernetzungsursprung und -winkel kann zwischen einer kartesischen, isometrischen und polaren Vernetzung gewählt werden (Bild 2).

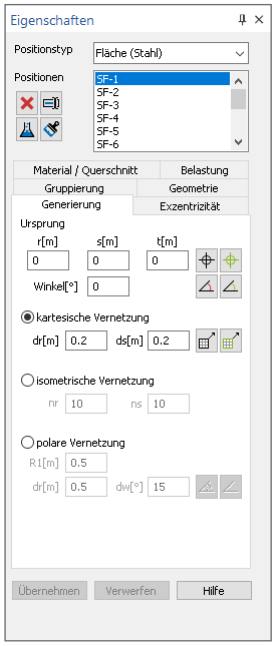


Bild 2. Positionseigenschaften „Generierung“ der Stahlfläche

Belastungen

Analog zu den übrigen Flächenpositionen in MicroFe lässt sich auch bei der Stahlfläche neben dem automatisch ermittelten Eigengewicht auch eine sonstige ständige Last und/oder eine Nutzlast für die gesamte Flächenposition definieren. Die Nutzlast kann hierbei in verschiedene Lastfelder mit automatischen oder manuellen Lastfällen unterteilt werden (Bild 3).

Bild 3. Positionseigenschaften „Belastung“ der Stahlfläche

Für die Stahlplatte im Plattenmodell stehen alle Parameter analog zur Verfügung, soweit sie im Plattenmodell anwendbar sind.

Rotationskörper

Das Modul M480 (als Zusatzmodul zu M120.de) dient der Erstellung von rotationssymmetrischen 3D-Tragwerken. Mit der Stahlfläche lassen sich bspw. rotationssymmetrische Behälter (Titelbild) oder gewendelte Stahltreppen (Bilder 4 und 5) modellieren. Weitergehende Informationen zu M480 finden Sie in der mb-news 7/2019 [4].

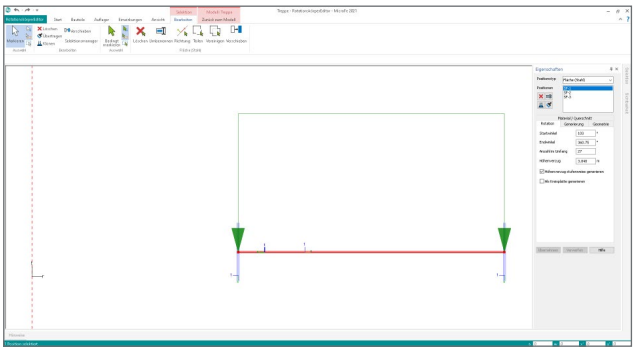


Bild 4. Stahlfläche im RotationskörperEditor

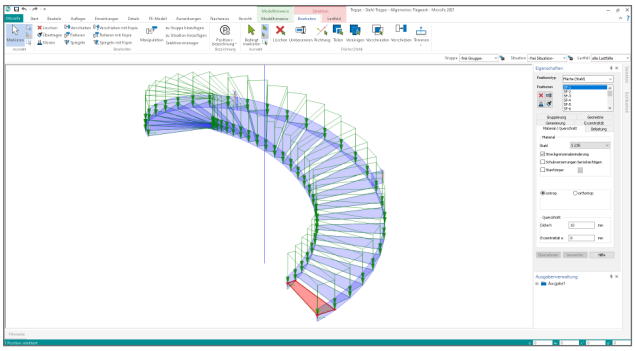


Bild 5. Stahl-Wendeltreppe erzeugt mit Hilfe von M480

Profilstäbe umwandeln

Mit dem Modul M431 lassen sich im Allgemeinen Tragwerk Stahlprofilstäbe in Stahlflächen umwandeln. Um das Modul M431 anwenden zu können, ist deshalb die Stahlfläche (M341.de) Voraussetzung.

Anwendung findet das Modul, wenn bspw. Stahlstäbe oder ganze Rahmen genauer untersucht werden sollen, da sich nach der Umwandlung in Stahlflächen bspw. die Wölbung des Stabes berücksichtigen lässt oder Beulprobleme untersuchen lassen.

Weitergehende Informationen zu M431 finden Sie in der mb-news 2/2013 [5].

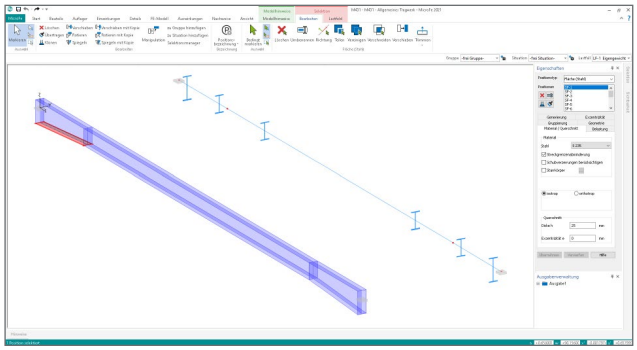


Bild 6. Stahlprofilstab aus Stahlflächen modelliert mit Hilfe von M431

Ergebnisse

Spannungsnachweise

Der Spannungsnachweis der Stahlfläche erfolgt nach der Elastizitätstheorie als Vergleichsspannungsnachweis analog zu EC 3 [1], Gl. (6.1). Stabilitätsnachweise werden nicht geführt.

Die nachfolgend beschriebenen Nachweisergebnisse werden an der Oberseite, in der Mittelebene und an der Unterseite der Fläche ermittelt. Für den Ausnutzungsgrad η und die Vergleichsspannung σ_{vEd} lässt sich zudem das Maximum aus den drei Nachweisstellen dokumentieren.

Die automatische Kombinatorik von MicroFe ermittelt an jedem Knoten unter Berücksichtigung der Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte gemäß DIN EN 1990 [2] diejenige Lastkombination, die zur maximalen Nachweisausnutzung führt.

Aus den Schalenschnittkräften auf Bemessungsniveau berechnen sich die Spannungen und der Ausnutzungsgrad wie nachfolgend beschrieben.

Spannungsnachweis der Stahlfläche

n_{rEd}, n_{sEd}, n_{rsEd}	Schalenmembrankräfte
m_{rEd}, m_{sEd}, m_{rsEd}	Schalenbiegemomente
v_{rEd}, v_{sEd}	Schalenquerkräfte
h	Flächendicke
f_{yd}	Streckgrenze

Index:

o	Oberseite
m	Mittelebene
u	Unterseite

Normalspannung σ_{rEd}

$$\sigma_{\mathrm{rEd,o}} = \frac{n_{\mathrm{rEd}}}{h} - \frac{6 \cdot m_{\mathrm{rEd}}}{h^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\mathrm{rEd,m}} = \frac{n_{\mathrm{rEd}}}{h} \quad (2)$$

$$\sigma_{\mathrm{rEd,u}} = \frac{n_{\mathrm{rEd}}}{h} + \frac{6 \cdot m_{\mathrm{rEd}}}{h^2} \quad (3)$$

Normalspannung σ_{sEd}

$$\sigma_{\mathrm{sEd,o}} = \frac{n_{\mathrm{sEd}}}{h} - \frac{6 \cdot m_{\mathrm{sEd}}}{h^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{\mathrm{sEd,m}} = \frac{n_{\mathrm{sEd}}}{h} \quad (5)$$

$$\sigma_{\mathrm{sEd,u}} = \frac{n_{\mathrm{sEd}}}{h} + \frac{6 \cdot m_{\mathrm{sEd}}}{h^2} \quad (6)$$

Schubspannung τ_{rsEd}

$$\tau_{\mathrm{rsEd,o}} = \frac{n_{\mathrm{rsEd}}}{h} - \frac{6 \cdot m_{\mathrm{rsEd}}}{h^2} \quad (7)$$

$$\tau_{\mathrm{rsEd,m}} = \frac{n_{\mathrm{rsEd}}}{h} \quad (8)$$

$$\tau_{\mathrm{rsEd,u}} = \frac{n_{\mathrm{rsEd}}}{h} + \frac{6 \cdot m_{\mathrm{rsEd}}}{h^2} \quad (9)$$

Schubspannung τ_{rtEd}

$$\tau_{\mathrm{rtEd,m}} = 1.5 \cdot \frac{v_{\mathrm{rEd}}}{h} \quad (10)$$

Schubspannung τ_{stEd}

$$\tau_{\mathrm{stEd,m}} = 1.5 \cdot \frac{v_{\mathrm{sEd}}}{h} \quad (11)$$

Vergleichsspannung σ_{vEd}
(nach der Gestaltänderungsenergiehypothese)

$$\sigma_{\mathrm{vEd,o}} = \sqrt{{\sigma_{\mathrm{rEd,o}}}^2 + {\sigma_{\mathrm{sEd,o}}}^2 - \sigma_{\mathrm{rEd,o}} \cdot \sigma_{\mathrm{sEd,o}} + 3 \cdot {\tau_{\mathrm{rsEd,o}}}^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{\mathrm{vEd,m}} = \sqrt{{\sigma_{\mathrm{rEd,m}}}^2 + {\sigma_{\mathrm{sEd,m}}}^2 - \sigma_{\mathrm{rEd,m}} \cdot \sigma_{\mathrm{sEd,m}} + 3 \cdot ({\tau_{\mathrm{rsEd,m}}}^2 + {\tau_{\mathrm{rtEd,m}}}^2 + {\tau_{\mathrm{stEd,m}}}^2)} \quad (13)$$

$$\sigma_{\mathrm{vEd,u}} = \sqrt{{\sigma_{\mathrm{rEd,u}}}^2 + {\sigma_{\mathrm{sEd,u}}}^2 - \sigma_{\mathrm{rEd,u}} \cdot \sigma_{\mathrm{sEd,u}} + 3 \cdot {\tau_{\mathrm{rsEd,u}}}^2} \quad (14)$$

Ausnutzungsgrad η

$$\eta = \frac{\sigma_{\mathrm{vEd}}}{f_{\mathrm{yd}}} \quad (15)$$

Die Nachweisergebnisse stehen in der grafisch-interaktiven Nachweisausgabe der Stahlflächen und in den positionsorientierten Nachweisausgaben Stahlfläche-Nw-Iso (mit Isolinien-Grafiken), Stahlfläche-Nw-Werte (mit Werte-Grafiken) und Stahlfläche-Nw-Tab (tabellarisch je Knoten) zur Verfügung (Bild 7).

In den Ausgabeeigenschaften der positionsorientierten Ausgaben kann zwischen kurzer und langer Ausgabe unterschieden werden.

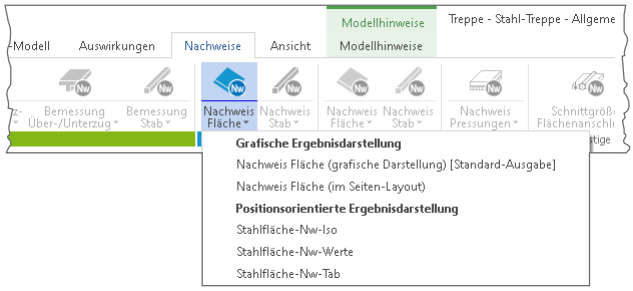


Bild 7. Nachweis-Ausgaben

Stabilität

Die Stabilität von Stahlflächen-Tragwerken lässt sich mit dem Modul M511 untersuchen. Dieses Modul bestimmt die Knickfiguren und die zugehörigen Knicksicherheiten eines Systems. Damit können auch Beulprobleme von Flächentragwerken analysiert werden.

Die Ergebnisse stehen in der grafisch-interaktiven Ausgabe „Knickformen" zur Verfügung (Bild 8 und 9).

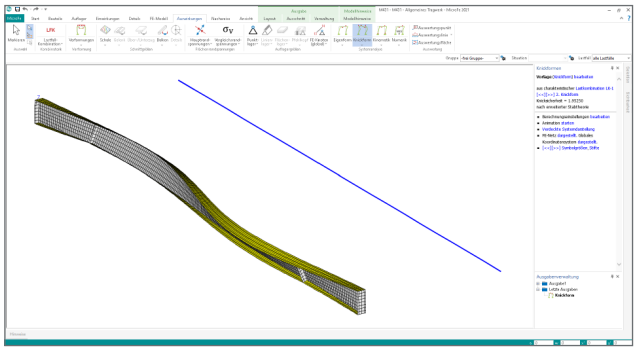


Bild 8. Knickfigur eines aus Stahlflächen modellierten Trägers mit Hilfe von M511

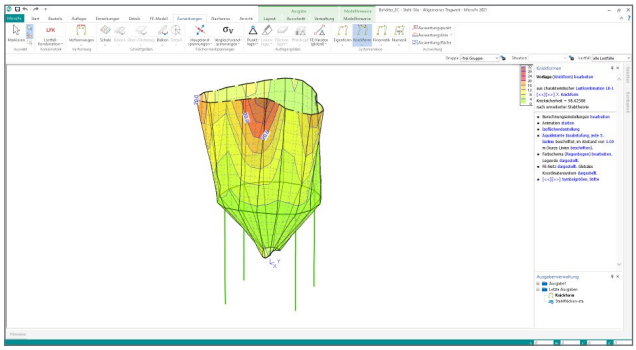


Bild 9. Knickfigur eines aus Stahlflächen modellierten Silos mit Hilfe von M511

Hauptrandspannungen und Vergleichsrandspannungen

Zur weiteren Ergebnisdiskussion können auch die Hauptrandspannungen und die Vergleichsrandspannungen hilfreich sein.

Hauptrandspannungen

Aus den Schalenschnittkräften berechnen sich die Hauptrandspannungen wie folgt:

n_r, n_s, n_{rs}	Schalenmembrankräfte
m_r, m_s, m_{rs}	Schalenbiegemomente
h	Flächendicke

Index:

o	Oberseite
u	Unterseite

Schalenrandspannungen

$$\sigma_{r,o/u} = \frac{n_r}{h} \mp \frac{6 \cdot m_r}{h^2} \tag{16}$$

$$\sigma_{s,o/u} = \frac{n_s}{h} \mp \frac{6 \cdot m_s}{h^2} \tag{17}$$

$$\tau_{rs,o/u} = \frac{n_{rs}}{h} \mp \frac{6 \cdot m_{rs}}{h^2} \tag{18}$$

erste Hauptrandspannung σ_1

$$\sigma_{1,o/u} = \frac{1}{2}\left(\sigma_{r,o/u} + \sigma_{s,o/u} + \sqrt{\left(\sigma_{r,o/u} - \sigma_{s,o/u}\right)^2 + 4 \cdot \tau_{rs,o/u}{}^2}\right) \tag{19}$$

zweite Hauptrandspannung σ_2

$$\sigma_{2,o/u} = \frac{1}{2}\left(\sigma_{r,o/u} + \sigma_{s,o/u} - \sqrt{\left(\sigma_{r,o/u} - \sigma_{s,o/u}\right)^2 + 4 \cdot \tau_{rs,o/u}{}^2}\right) \tag{20}$$

Richtungswinkel von σ_1

$$\varphi_{o/u} = \frac{1}{2}\left(\arctan\left(\frac{2 \cdot \tau_{rs,o/u}}{\sigma_{r,o/u} - \sigma_{s,o/u}}\right)\right) \tag{21}$$

Hauptrandschubspannung τ_{max}

$$\tau_{max,o/u} = \frac{1}{2}\left(\sigma_{1,o/u} - \sigma_{2,o/u}\right) \tag{22}$$

Vergleichsrandspannungen

Die Vergleichsrandspannungen können nach unterschiedlichen Festigkeitshypothesen ermittelt werden, vgl. bspw. [3]:

Gestaltänderungsenergiehypothese
(HUBER, v. MISES, HENCKY)

$$\sigma_{v,o/u} = \sqrt{\sigma_{r,o/u}{}^2 + \sigma_{s,o/u}{}^2 - \sigma_{r,o/u} \cdot \sigma_{s,o/u} + 3 \cdot \tau_{rs,o/u}{}^2} \tag{23}$$

Normalspannungshypothese
(LAMÉ, RANKINE)

$$\sigma_{v,o/u} = MAX\left(\left|\sigma_{1,o/u}\right|, \left|\sigma_{2,o/u}\right|\right) \tag{24}$$

Schubspannungshypothese
(TRESCA)

$$\sigma_{v,o/u} = \sqrt{\left(\sigma_{r,o/u} - \sigma_{s,o/u}\right)^2 + 4 \cdot \tau_{rs,o/u}{}^2} \tag{25}$$

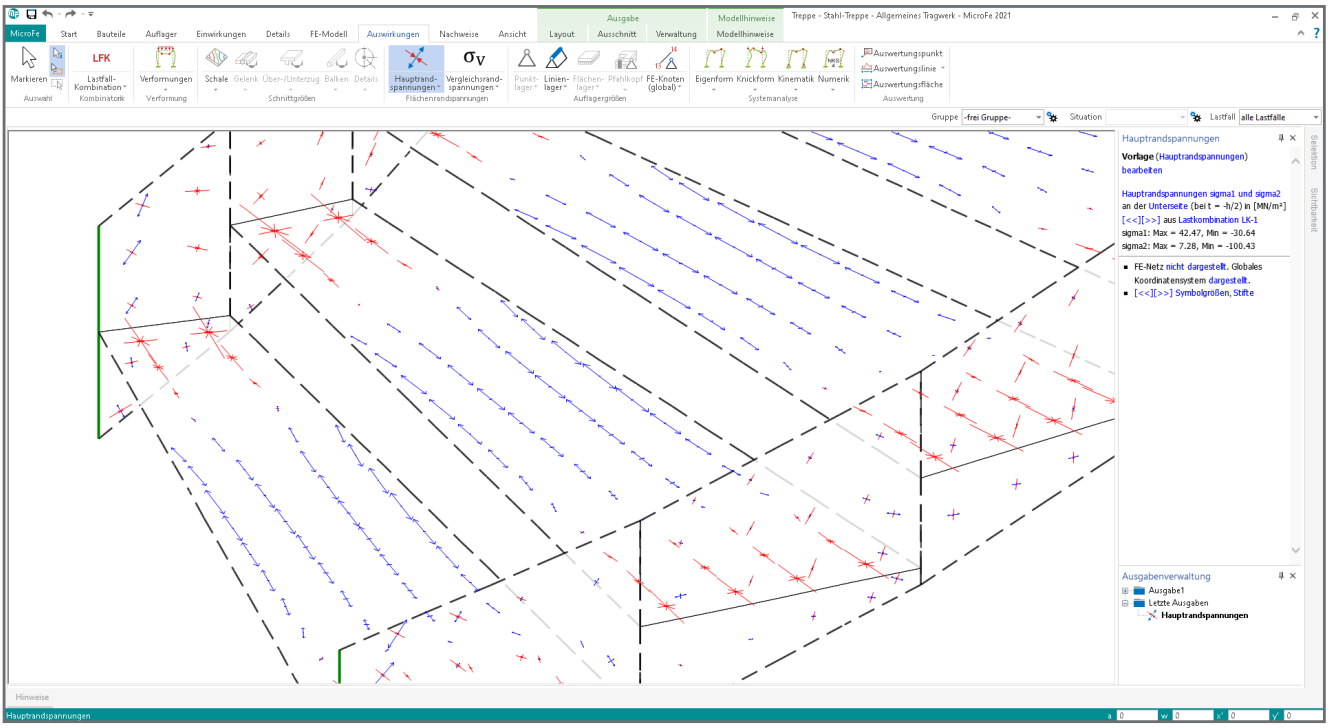


Bild 10. Vektordarstellung der Hauptrandspannungen

Diese Flächenrandspannungen stehen jeweils als grafisch-interaktive Ausgabe und als tabellarische Ausgabe je Knoten bzw. Element für alle Flächenbauteile zur Verfügung und ermitteln normunabhängig ihre Ergebnisse an der Oberseite und der Unterseite von Flächen (Bild 11).

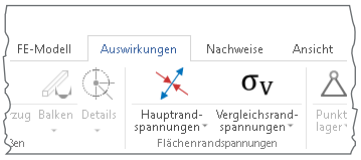


Bild 11. Ausgaben der Flächenrandspannungen

Diese Ausgaben sind auch im Plattenmodell verfügbar, wo jedoch systembedingt keine Membrankräfte auftreten.

Die Hauptrandspannungen sind in der grafisch-interaktiven Ausgabe neben der Wertedarstellung auch als Vektordarstellung anzeigbar (Bild 10).

Die Vergleichsrandspannungen sind in den üblichen Ergebnisdarstellungsvarianten von Flächenergebnissen darstellbar: als Isolinien-, Isoflächen- und/oder als Wertedarstellung.

Dipl.-Ing. Sven Hohenstern
mb AEC Software GmbH
mb-news@mbaec.de

Literatur

[1] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009. Ausgabe Dezember 2010. Beuth Verlag.

[2] Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. Ausgabe Dezember 2010. Beuth Verlag.

[3] Schnell, Gross, Hauger: Technische Mechanik - Band 2: Elastostatik. 5. Auflage, 1995. Springer-Verlag

[4] S. Hohenstern: Rotationssymmetrische Schalentragwerke. mb-news 7/2019

[5] K. Ben Hamida: Weiterrechnen, wo die Stabtheorie am Ende ist. mb-news 2/2013

Preise und Angebote

M331.de Plattentragwerke aus Stahl – EC 3, DIN EN 1993-1-1:2010-12
Weitere Informationen unter
https://www.mbaec.de/modul/M331de

M341.de Schalentragwerke, Faltwerke aus Stahl – EC 3, DIN EN 1993-1-1:2010-12
Weitere Informationen unter
https://www.mbaec.de/modul/M341de

Es gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen. Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Alle Preise zzgl. Versandkosten und MwSt. – Hardlock für Einzelplatzlizenz je Arbeitsplatz erforderlich (95,- EUR). Folgelizenz-/Netzwerkbedingungen auf Anfrage. – Stand: August 2021

Unterstütztes Betriebssystem: Windows 10 (64)

Preisliste: www.mbaec.de