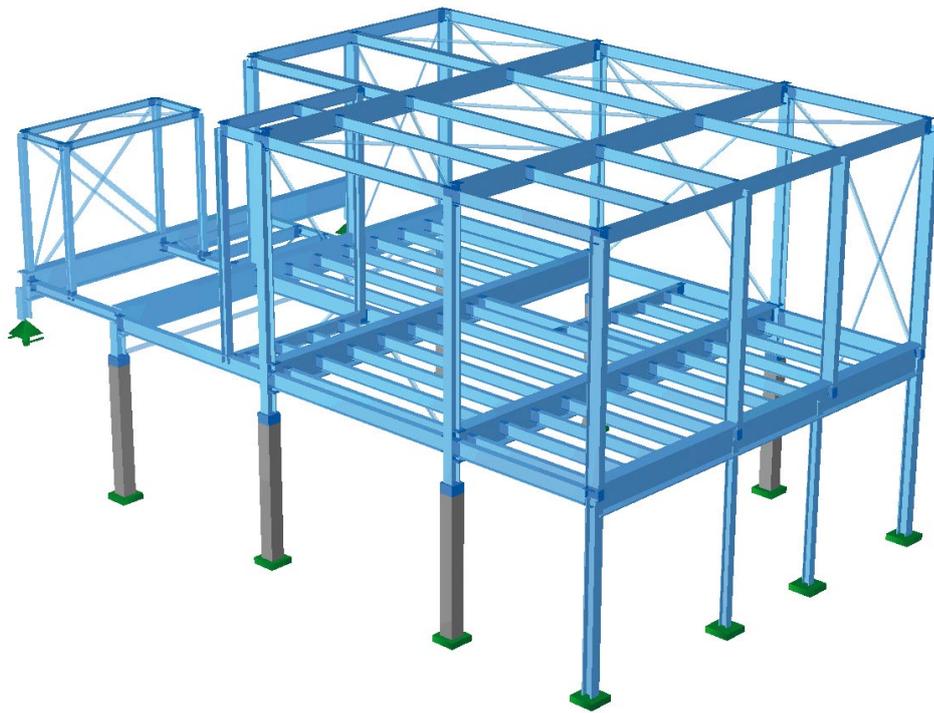


Dr.-Ing. Joachim Kretz, Dr.-Ing. Dorian Lutzkanov

Stabilitätsanalysen mit 3D-Faltwerken

Berechnungsmethoden für Bauteile und Konstruktionen aus Stahlflächen nach Eurocode 3

Im Stahlbau stellt die Finite Elemente Methode (FEM) ein effizientes Werkzeug zur Modellierung und Analyse von Bauteilen und Gesamtsystemen dar. Dies gilt insbesondere für die Analyse von Stabilitätsproblemen. In vielen Fällen sind die vereinfachten Berechnungsverfahren auf der Grundlage der Stabsysteme nicht ausreichend, um eine realitätsnahe Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens zu ermöglichen. Mit Stabtragwerken ist das räumliche Tragverhalten insbesondere bei torsionsweichen, druckbeanspruchten Bauteilen nicht wirklichkeitsnah nachzuweisen. Hier stellt die Berechnung als 3D-Faltwerk das geeignete Verfahren zur Analyse der Strukturen mit Stahlflächen dar.



In einem Gesamtragwerk können die unterschiedlichsten Tragelemente wie z. B. Träger, Stützen, Verbände, Wände, Rahmen u. a. enthalten sein. Bei einer Diskretisierung als räumliches Tragwerk wirken die einzelnen Bauteile in ihrer jeweiligen Ausprägung (Stab oder Schale) zusammen. Sie bilden die räumliche Tragstruktur, wobei sich die einzelnen Bauteile über ihre Anschlüsse / Verbindungen gegenseitig beeinflussen. Das Trag- und Verformungsverhalten kann äußerst komplex sein.

In den Stahlbaunormen DIN EN 1993-1-1 und DIN EN 1993-1-3 sind für übliche Systeme und Querschnittsgeometrien Nachweis- und Bemessungsverfahren als Näherungs- bzw. vereinfachte Verfahren angegeben. Die Anwendung dieser Verfahren wie z. B. das Ersatzstabverfahren ist nur innerhalb der definierten Anwendungsgrenzen möglich. So können z. B. abweichende Querschnittsgeometrien nicht über dieses Verfahren nachgewiesen werden. In diesem Fall sind genauere Nachweise zu führen. Als Berechnungsgrundlage für solche Fälle ist eine Analyse als allgemeines 3D-Faltwerkmodell geeignet.

In einem räumlichen Gesamtsystem können einzelne Stab-Bauteile (Sonderbauteile) enthalten sein, für die eine Analyse nach der klassischen Stabtheorie nicht ausreichend ist. In solchen Fällen besteht die Möglichkeit, diese Bauteile als 3D-Faltwerk abzubilden, während die übrigen Elemente als Stabelemente in dem System verbleiben.

Bei der Finite-Elemente-Modellierung wird anschließend mit eindimensionalen Stäben und zweidimensionalen Flächenelementen diskretisiert. Dieses Vorgehen bietet die Möglichkeit, eine Analyse der Sonderbauteile am Gesamtsystem durchzuführen, ohne diese aus dem Gesamtsystem herauslösen zu müssen. Von entscheidender Bedeutung ist jedoch, dass die Konformität der Stab- und Flächenelemente gewährleistet ist.

Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, einzelne Bauteile oder Gesamtsysteme vollständig mit Flächenelementen zu modellieren. Dies setzt eine ausreichende Rechenkapazität voraus.

Mit dem Modul „M431 Stahl-Profilstäbe in Faltwerke aus Stahl umwandeln“ bietet MicroFe eine effiziente Möglichkeit, auf einfache Art und Weise die automatische Generierung von Stahlflächen aus konstanten oder gevouteten Stahlprofilstäben zu erzeugen.

In diesem Artikel werden an einigen Systemen (Gesamt- oder Teilsysteme) Modellierungsmöglichkeiten vorgestellt und einzelne Ergebnisse aus der Stabilitätsanalyse erläutert.

Die beiden ersten Beispiele sind zwei Teilsysteme, eine dünnwandige Z-Pfette und ein Rahmensystem. Diese sind Bestandteil der nachfolgenden Hallenkonstruktion.

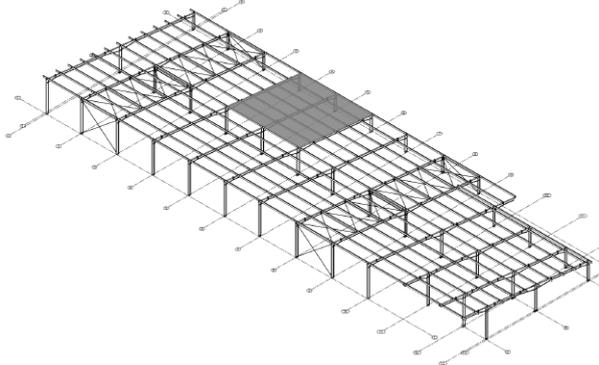


Bild 1. Seitlich offene Stahlhallenkonstruktion

Das darauf folgende Beispiel ist eine ausgeführte Bühnenkonstruktion, die als Gesamtsystem bestehend aus Stab- und Flächenelementen modelliert wird. Anschließend wird ein weiteres Praxisbeispiel, die Befestigung einer Wartungs- und Bedienbühne an einem Rotationskörper, vorgestellt.

1 Stabilität einer dünnwandigen Z-Pfette

Das komplexe Stabilitätsverhalten aus dem möglichen Beul- und Biegedrillknickverhalten von dünnwandigen Z-Pfetten wird für eine aus dem Gesamtsystem herausgelöste Durchlaufpfette über drei Felder dargestellt. Die Pfette wird über Verbindungsmittel mit dem Trapezblech der Dacheindeckung verbunden, so dass eine elastische seitliche Stützung des Obergurtes erfolgt. Die Z-Pfette ist an jedem Auflager an die Auflagerplatte angeschlossen. Unter Nutzung des Moduls M431 ist das System effizient mit Flächenelementen zu modellieren und anschließend dessen komplexes Trag- und Verformungsverhalten zu analysieren.



Bild 2. Z-Pfette mit Anbindung an das aufliegende Trapezblech und Befestigung an der Stahl-Auflagerplatte

Ausgehend von der Profilgenerierung als dünnwandiger polygonaler Querschnitt mittels ProfilMaker (P100.de), erfolgt als nächster Schritt die Zuweisung des Z-Profilquerschnitts zur Stabdefinition des statischen Systems (Bild 3). Über die Funktion „Stahlprofil-Stab ersetzen“ wird programmseitig das Ersetzen des Stahlprofilstabes durch Stahlflächen ausgeführt. Das daraus generierte 3D-Faltwerk einschließlich der Elementierung mit Schalenelementen ist Bild 4 zu entnehmen.

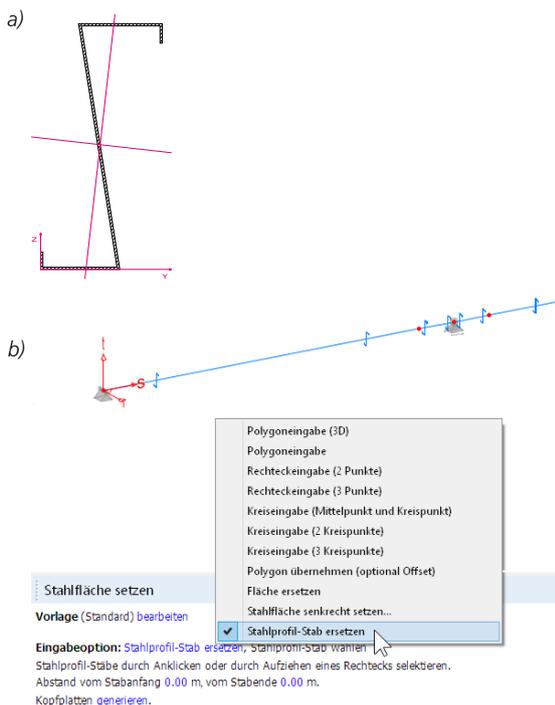


Bild 3. a) Z-Profil
b) Funktion: Stahlprofil-Stab ersetzen

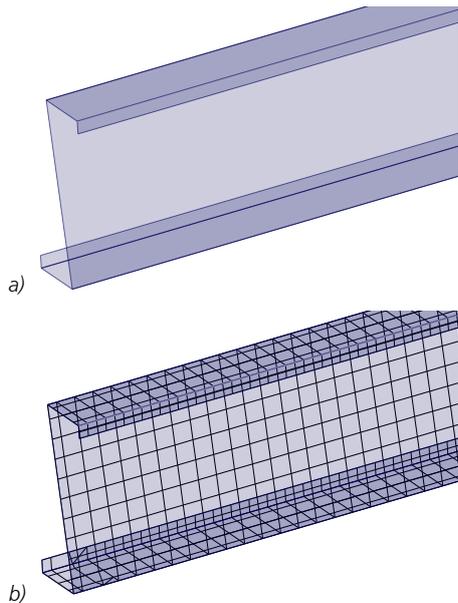


Bild 4. a) 3D-Faltwerk (Ausschnitt)
b) Elementierung / Vernetzung

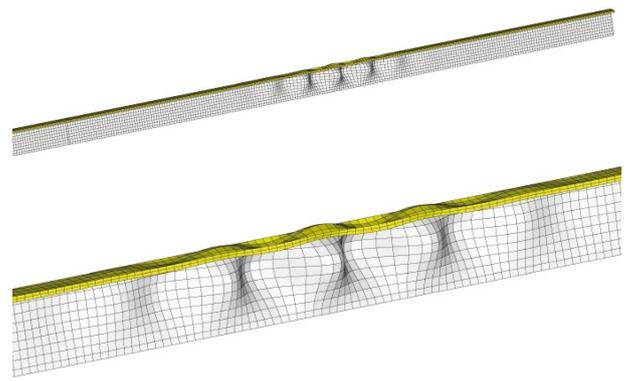


Bild 5. a) Erste Knickfigur der Z-Pfette
b) Knick- bzw. Beulfigur der Z-Pfette (Ausschnitt)

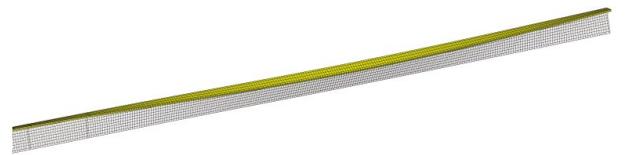


Bild 6. Knickfigur der Z-Pfette bei nur geringer seitlicher Stützung am Obergurt

Der nächste Bearbeitungsschritt ist die Definition der 3D-Lagerbedingungen an diesem Faltwerksystem. Die seitliche Abstützung des Obergurtes der Z-Pfette wird über eine federnde Linienlagerung mit entsprechender Steifigkeit (z. B. aus Zulassung des Trapezbleches) definiert. Senkrecht zur Stegfläche ist die Verschiebung durch die starre Anschlussplatte verhindert. Ebenso ist die vertikale Verschiebung infolge der Verschraubung des Bleches mit der Lagerplatte blockiert. Um die Längsachse führt die Befestigung des Bleches über eine Schraubverbindung zu einer drehelastischen Einspannung.

Als nächstes wird die Belastung als Flächenlast, die auf den Obergurt infolge von Eigengewicht der Dacheindeckung, Wind und Schnee auf das System wirkt, aufgebracht. Die Berücksichtigung von Normalkräften aus Windlast und Stabilisierung ist als Linienlast auf die Profilgeometrie in Systemlängsrichtung aufzubringen.

Nach der Vernetzung des Modells wird eine Stabilitätsanalyse mit der maßgebenden Bemessungskombination durchgeführt. Bei der eingesetzten Steifigkeit der seitlichen Lagerung kann der Obergurt unter der sich einstellenden Druckkraft seitlich nicht ausweichen. Als Folge davon beult das dünnwandige Stegblech aus. Dieses Ausbeulen ist aus der Knickfigur in Bild 5 deutlich zu erkennen. In diesem Fall ergibt sich ein Verzweigungslastfaktor α_{cr} von deutlich über 1.0. Das System ist damit ausreichend stabil.

Bei einer geringeren seitlichen Stützung des Pfettenobergurtes liefert die Stabilitätsanalyse erwartungsgemäß einen kritischen Verzweigungsfaktor α_{cr} unterhalb von 1.0. Das System ist instabil, ein Versagensfall des Biegedrillknickens.

2 Stabilitätsnachweis eines Rahmensystems

Das räumliche Biegedrillknickverhalten wird im folgenden Beispiel an einem Rahmensystem vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein Teilsystem aus der in Bild 1 dargestellten seitlich offenen Hallenkonstruktion. Die Abbildung des Rahmensystems als 3D-Faltwerk erfolgt sowohl für den Riegel als auch für die Stützen, so dass die Auswirkungen der Interaktion von Stützen und Riegel in Bezug auf die Stabilität erfasst werden können. Das Trag- und Verformungsverhalten des Rahmensystems kann auf diese Weise wirklichkeitsnah berücksichtigt werden.

Das abzubildende Teilsystem ist in Bild 7 dargestellt.

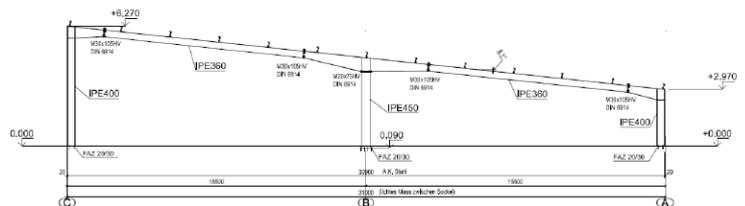


Bild 7. Rahmensystem

Zuerst erfolgt die übliche Eingabe des Rahmens als 3D-Stabsystem, der in den Bildern 8a und 8b dargestellt ist. Die Querschnitte der einzelnen Stabelemente bestehen aus I-Profilen. In den Eckbereichen und im Bereich der Innenstütze sind die Querschnitte gevoutet.

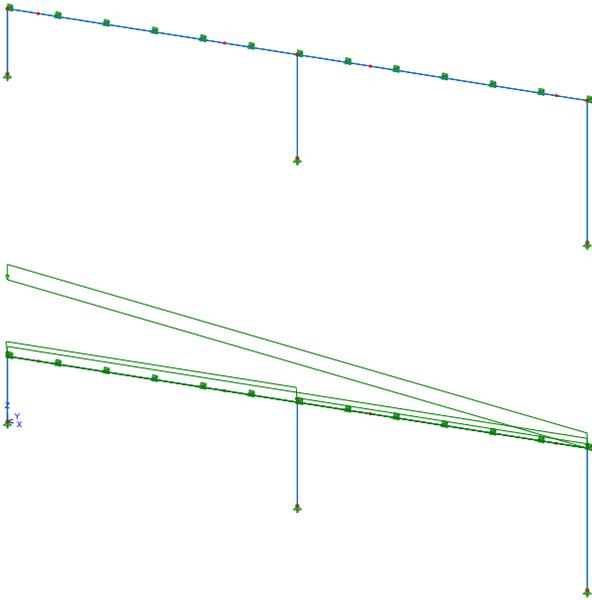


Bild 8. a) 3D-Stabsystem
b) 3D-Stabsystem mit Belastung

Über die Funktion „Stahlprofil-Stab ersetzen“ werden entweder mit oder ohne Kopfplatten programmseitig die Stahlprofilstäbe durch Stahlflächen ersetzt. Das daraus entstandene 3D-Faltwerkmodell und das Finite-Elemente-Modell sind in den Bildern 9 und 10 dargestellt.

Im Bereich der Kreuzungspunkte Anschlüsse Riegel-Stütze sowie im Bereich der Kopfplatten ist die Anbindung der Stahlflächen manuell zu überarbeiten.

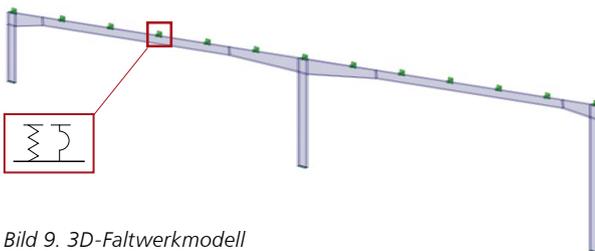


Bild 9. 3D-Faltwerkmodell

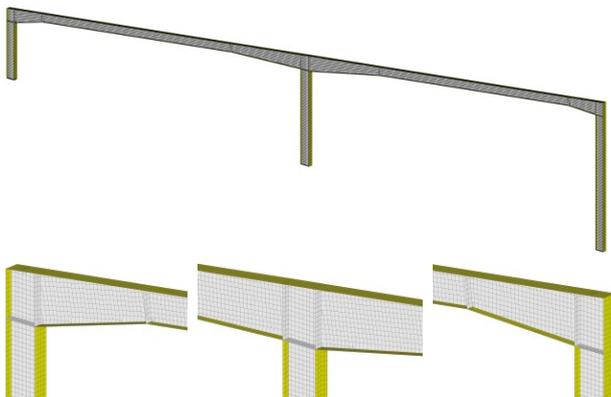


Bild 10. a) Finite-Elemente-Modell (Gesamtmodell)
b) FE-Netz des linken Rahmenecks
c) FE-Netz im Bereich der Innenstütze
d) FE-Netz des rechten Rahmenecks

Zur besseren Übersichtlichkeit wird das FE-Netz in den Rahmenecken sowie im Voutenbereich über der Innenstütze in den Bildern 10b bis 10d als vergrößerter Ausschnitt dargestellt.

Das aus dem Gesamtsystem herausgelöste Teilsystem des Rahmens wird über die Lagerungsbedingungen der Pfetten elastisch an dem verbleibenden Restsystem der Halle gelagert. Die daraus entstehende seitliche Abstützung des Obergurtes des Riegels wird vereinfacht durch elastische Punktlager realisiert. Die Lagerbedingungen am Stützenfuß werden als Flächenlager an der Fußplatte angesetzt, die der ausgeführten Stützenfußausbildung mit dicker Fußplatte gemäß Bild 11 entsprechen.



Bild 11. Auflagerdetail Fußpunkt Mittelstütze

Die Belastungen des Rahmens infolge von Wind-, Schnee- und Eigengewichtslasten werden als Flächenlasten auf den Obergurt des Riegels aufgebracht. Anschließend wird eine Stabilitätsberechnung mit der maßgebenden Bemessungskombination durchgeführt.

Der kleinste Verzweigungslastfaktor α_{cr} ist deutlich größer als 1.0. Damit liegt ein ausreichend stabiles System vor.



Bild 12. a) Erste Biegedrillknickfigur
b) Biegedrillknickfigur der Mittelstütze mit Ausschnitt des Riegels

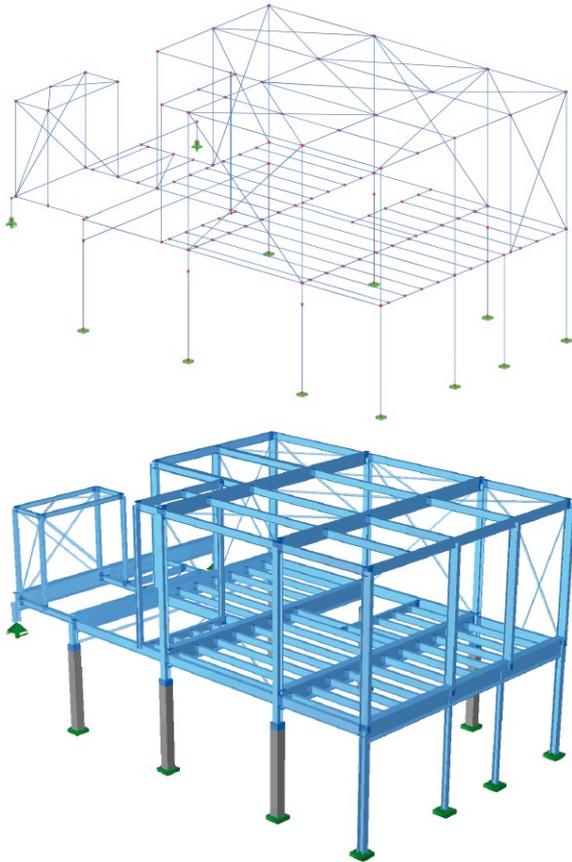


Bild 13. a) Räumliches Stabtragwerk
b) Visualisierung des Gesamttragwerks als Stabtragwerk

Aus der zugehörigen Knickfigur ist deutlich ein antimetrisches seitliches Ausweichen des Untergurtes des Riegels bei gleichzeitiger Verdrehung der Mittelstütze zu erkennen. Die Interaktion Riegel-Stütze ist bei Abbildung des Gesamttragwerks automatisch gegeben. Die Drehsteifigkeit der Mittelstütze hat auf das Ergebnis des kritischen Lastverzweigungsfaktors einen signifikanten Einfluss.

3 Stabilität eines räumlichen Tragwerks mit Stab- und Flächenelementen

In einem räumlichen Stahl-Stabtragwerk (Bilder 13a und 13b) ist der Nachweis einer ausreichenden Stabilität zu erbringen. Der Randträger der Bühnenkonstruktion wird durch die Einleitung hoher Lasten aus den angrenzenden Deckenträgern beansprucht. Die abstützende Wirkung der angeschlossenen Deckenträger kann für die Stabilisierung genutzt werden, andererseits wird der Randträger durch die exzentrisch angeschlossenen Träger stark auf Torsion beansprucht.

Die Torsionsbeanspruchung des Randträgers wird durch die exzentrisch angeordneten Randstützen noch zusätzlich verstärkt. Eine zuverlässige Stabilitätsanalyse auf der Basis der Stabtheorie ist für diese Situation nicht möglich.

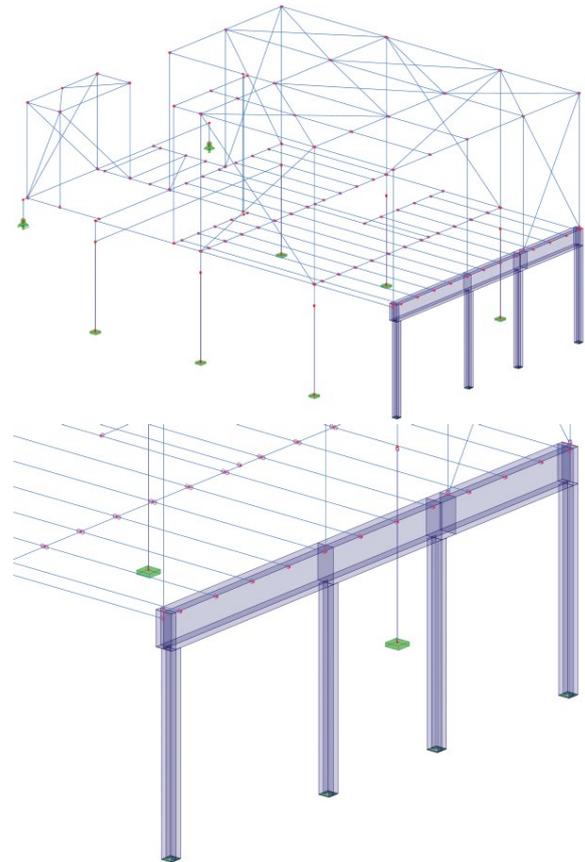


Bild 14. a) Gesamtsystem mit Stab- und Flächenelementen
b) Ausschnitt: Verbindung Stab- und Flächenelemente; Randträger mit exzentrischem Stützenanschluss

Zur Lösung der Aufgabenstellung wird die Möglichkeit genutzt, Stabelemente und Flächenelemente gleichzeitig in einem Modell analysieren zu können. Dazu werden der Stahlprofilstab des Bühnenrandträgers sowie die lastweiterleitenden Stahlprofilstab-Stützen unterhalb des Randträgers in Stahlflächen umgewandelt. Als weitere Maßnahmen zur Stabilisierung und zur Kraftdurchleitung werden Stegsteifen im Randträger modelliert.

Das Gesamttragwerk, das in Bild 14 dargestellt ist, ist nun aus Stab- und Flächenelementen modelliert. Die Stabilitätsberechnung am Gesamtsystem liefert die aus Bild 15 erkennbare Knickfigur, die sich unter einem kritischen Lastverzweigungsfaktor größer 1.0 einstellt. Das Gesamtsystem unter Berücksichtigung der besonderen Lagerungsbedingungen des Bühnenrandträgers besitzt demnach eine ausreichende Sicherheit gegen Stabilitätsversagen d. h. Biegedrillknicken.

4 Rotationskörper

An einen bestehenden Rotationskörper wurden Bedienbühnen über Kragarme aus Stahlprofilstäben an die Filterwandung angeschlossen. Das Beispiel beschreibt die wirklichkeitsnahe Anbindung eines eindimensionalen Stabelementes an das dreidimensionale Schalentragwerk.

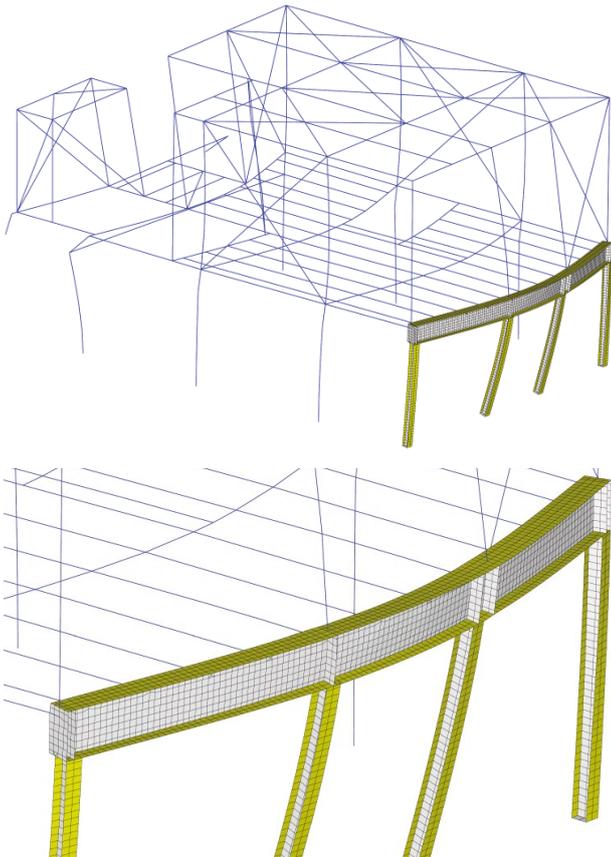


Bild 15. a) Erste Knickfigur des Gesamttragwerks
b) Ausschnitt – Knickfigur im Bereich der Stahlflächen

Der Rotationskörper wurde über das Modul M480 „Rotations-symmetrische Schalentragwerke“ erzeugt. Die als Stäbe definierten Kragträger wurden durch Stahlflächen (M431) ersetzt. Damit wurde die Kopplung an die im Bereich der verstärkten Rotationsflächen angeschlossenen Kragträger realistisch modelliert. Über den Anschluss mit Stahlflächen wurden die Singularitäten der Schnittgrößen im Vergleich zur Modellierung mit Stäben deutlich abgebaut.

5 Zusammenfassung

Vorgestellt wurden an einigen räumlichen Stahlkonstruktionen unterschiedliche Aspekte bei der Stabilitätsanalyse.

Das Ersetzen der eindimensionalen Stahlprofilstäbe durch Stahlflächen ermöglicht eine realistische Modellierung der Bauteile, der Randbedingungen und der Lasteinleitungsbereiche. Das Trag- und Verformungsverhalten sowie das Beul- und Biegedrillknickverhalten lässt sich somit wirklickeitsnah abbilden.

Dr.-Ing. Joachim Kretz,
Dr.-Ing. Dorian Lutzkanov
mb AEC Software GmbH
mb-news@mbaec.de

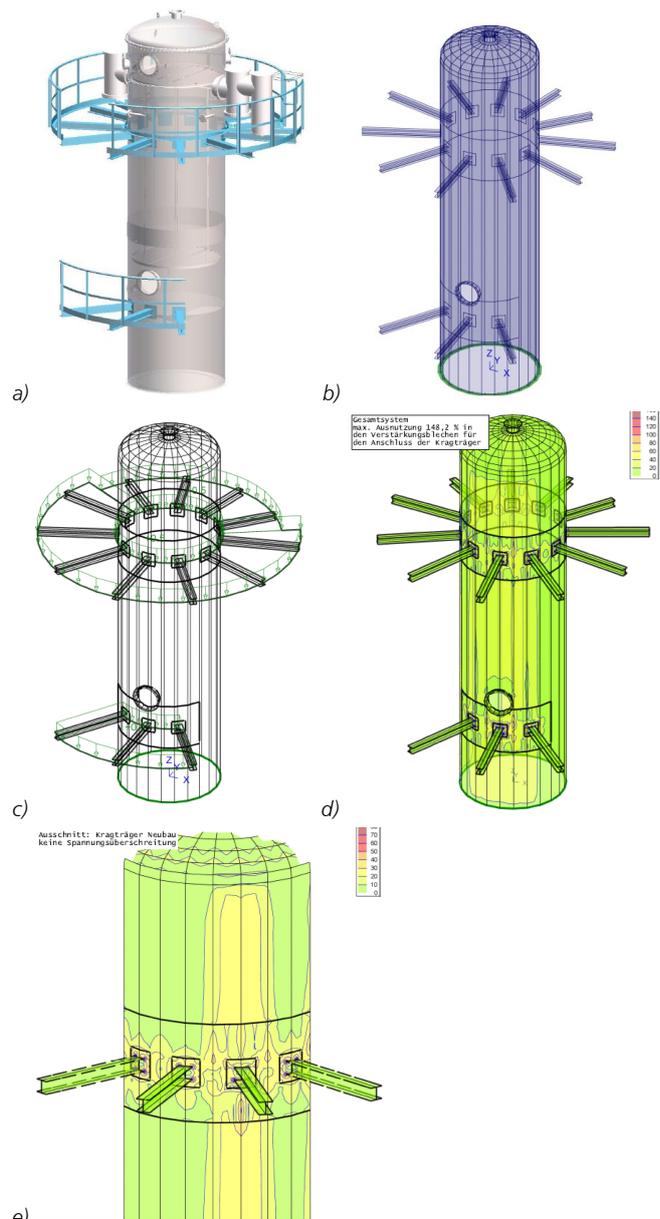


Bild 16. a) Konstruktionsmodell
b) System
c) Flächenlast auf Bedienbühne
d) Spannungen
e) Spannungen (Ausschnitt)

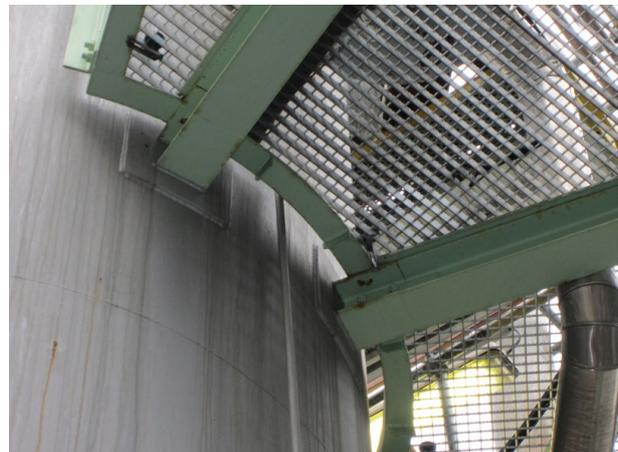


Bild 17. Ausgeführte Konstruktion