



Fassung
April 2017

Zusatzmodule

RF-FORMFINDUNG RF-ZUSCHNITT

Formfindung und Schnittmuster für
Membran- und Seilkonstruktionen

Programmbeschreibung

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.
Ohne ausdrückliche Genehmigung der DLUBAL SOFTWARE GMBH ist
es nicht gestattet, diese Programmbeschreibung oder Teile daraus
auf jedwede Art zu vervielfältigen.



© **Dlupal Software GmbH 2017**
Am Zellweg 2
93464 Tiefenbach
Deutschland

Tel.: +49 9673 9203-0
Fax: +49 9673 9203-51
E-mail: info@dlupal.com
Web: www.dlupal.de



Inhalt

| Inhalt | Seite |
|-----------|---|
| 1. | Einleitung 2 |
| 1.1 | Zusatzmodul RF-FORMFINDUNG 2 |
| 1.2 | Unabdingbarer Formfindungsprozess 2 |
| 1.3 | Wichtige Merkmale des Formfindungsprozesses 3 |
| 1.4 | In RF-FORMFINDUNG verwendete Methoden 3 |
| 1.4.1 | Projektionsmethode 4 |
| 1.4.2 | Zugmethode 4 |
| 1.5 | Formfindung bei kombinierten Konstruktionen 5 |
| 1.6 | Zusatzmodul RF-ZUSCHNITT 5 |
| 2. | RF-FORMFINDUNG 6 |
| 2.1 | Aufruf des Moduls 6 |
| 2.2 | Dialoge des Moduls 7 |
| 2.2.1 | Berechnungsparameter für Formfindung 7 |
| 2.2.2 | Dialog für Membranen 8 |
| 2.2.3 | Dialog für Seile 9 |
| 2.2.4 | Temporäre Formfindungslager 10 |
| 2.3 | Start der Berechnung 11 |
| 2.4 | Anzeige von Ergebnissen 12 |
| 3. | Beispiele 14 |
| 3.1 | Punktgestützte Membran 14 |
| 3.2 | Bogengestützte Membran 20 |
| 3.3 | Pneumatisch gestützte Membran 23 |
| 3.4 | Kegelmembran 25 |
| 4. | Allgemeine Hinweise 30 |
| 4.1 | Kontrolle der Einstellungen 30 |
| 4.2 | Dreieckelemente 31 |
| 4.3 | Seile 32 |
| 5. | RF-ZUSCHNITT 33 |
| 5.1 | Aufruf des Moduls 33 |
| 5.2 | Schnittlinien 34 |
| 5.3 | Schnittmuster 37 |
| 5.4 | Berechnung 43 |
| 5.4.1 | Berechnungsparameter 43 |
| 5.4.2 | Vorläufige und endgültige Berechnung 44 |
| 5.5 | Ergebnisse und Export 46 |
| A. | Index 51 |

1 Einleitung

Membrankonstruktionen stellen eine attraktive Alternative für die Überdachung kleiner und großer Objekte dar: Sie sind leicht, elegant und effektiv zugleich. Der Entwurf dieser Konstruktionen erfordert jedoch ein spezifisches Verfahren, denn in der Regel weisen die verwendeten Materialien praktisch keine Biegesteifigkeit auf. Sie können nur auf Zug beansprucht werden. Deshalb ist die Bestimmung des Anfangsgleichgewichtszustandes die Schlüsselaufgabe beim Entwurf. Die Form der Membrankonstruktionen ist nicht frei wählbar, sondern muss aus den erforderlichen Randbedingungen, Vorspannungen und ggf. auch Überdrücken gefunden werden.

Bei der Planung von Membrankonstruktionen ist es nicht möglich, die Formbestimmung vom Entwurf der Vorspannung zu trennen, wie dies bei biegesteifen Strukturen möglich ist. Die Form muss generiert werden. Das schränkt jedoch die Kreativität beim Entwurfsprozess keineswegs ein, sondern verleiht ihr eine neue Dimension. Durch die Beeinflussung der Randbedingungen oder der Vorspannung lässt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Formen erreichen. Die optimale Vorspannungsverteilung ist stets individuell. Sie ergibt sich aus den Anforderungen der Konstruktion.

Das erste Handbuchkapitel gibt eine Einleitung in das Thema *Formfindung* mit den Hauptmerkmalen der in RF-FORMFINDUNG implementierten Methoden. Es schließt sich ein Kapitel mit der Beschreibung der einzelnen Dialoge und Funktionen an. Das dritte Kapitel erläutert die Arbeit mit dem Modul anhand von Beispielen. Nach einem Kapitel mit wichtigen Anmerkungen folgt die Beschreibung des Moduls RF-ZUSCHNITT.

1.1 Zusatzmodul RF-FORMFINDUNG

Das Zusatzmodul RF-FORMFINDUNG des Hauptprogramms RFEM hilft dem Anwender, vorgespannte Anfangsformen von Membran- und Seilkonstruktionen zu finden. Diese vorgespannten Formen kann man nachfolgend in RFEM einer Analyse unterziehen.

1.2 Unabdingbarer Formfindungsprozess

Praktisch weisen die für Membrankonstruktionen verwendeten Materialien eine reine Zugtragfähigkeit auf. Sämtliche Lasten werden ausschließlich über Zug abgetragen. Um bei Membrankonstruktionen eine ausreichende Beanspruchbarkeit und Formbeständigkeit zu gewährleisten, muss eine geeignete Vorspannung vorgesehen werden.

Infolge der Null-Biegesteifigkeit der Materialien ist es nicht möglich, den Formvorschlag von dem Vorspannungsentwurf zu trennen, denn die Form wird durch die Vorspannung definiert. Jedes räumliche Kräftegleichgewichtssystem (d. h. Gleichgewicht der Vorspannkraft) bestimmt eindeutig die räumliche Form einer Membrankonstruktion. Indem man Randbedingungen festlegt und nachfolgend die Vorspannkraft im Gleichgewichtszustand definiert, gibt man die eigentliche Form der Membrankonstruktion vor. Die Suche nach der Form einer Membrankonstruktion in Abhängigkeit von der definierten Vorspannung wird als **Formfindung** bezeichnet.

Es sind zwei Vorgehensweisen innerhalb des Formfindungsprozesses zu unterscheiden:

1. Vorgabe von Randbedingungen und Vorspannung
Es wird eine entsprechende Gleichgewichtsform gesucht.
2. Vorgabe von Randbedingungen und Form (Verformung) der Membran
Es wird eine Gleichgewichtsvorspannung gesucht.

Beide Varianten sind zulässig und haben ihre Vorteile. Nie darf jedoch das Zusammenspiel zwischen Form und Vorspannung vernachlässigt werden. Mit der zweiten Variante lässt sich die Endform einfacher beeinflussen, während die erste das Entwerfen der endgültigen Vorspannung erleichtert. Da die Vorspannung für die Tragfähigkeit und Lebensdauer der Konstruktionen maßgebend ist, bietet RF-FORMFINDUNG auch diese Methode der Formfindung an.

1.3 Wichtige Merkmale des Formfindungsprozesses

Es gibt einen direkten Zusammenhang zwischen Vorspannung und Form der Membranbauten. Die Eigenschaften der verwendeten Gewebe spielen dabei keine Rolle. Der Formfindungsprozess ist materialunabhängig.

Die Form einer Membrankonstruktion kann neben Randbedingungen und Vorspannung auch durch eine Belastung geprägt werden. Bei pneumatisch vorgespannten Membranen wird somit die Gleichgewichtsform für die vorgegebene Vorspannung und den Innendruck gesucht.

Die Last aus Eigengewicht kann ebenfalls den Formfindungsprozess beeinflussen. Man kann so nach einer Form suchen, die der vorgegebenen Vorspannung, dem Eigengewicht und ggf. dem Innendruck entspricht. In der Regel beeinflusst aber das im Formfindungsprozess angesetzte Eigengewicht die endgültige Form und Vorspannung kaum, da das Eigengewicht des Gewebes gering ist.

1.4 In RF-FORMFINDUNG verwendete Methoden

Die Form einer Membrankonstruktion definiert sich eindeutig durch die Randbedingungen und Gleichgewichtsvorspannung, ggf. durch das Gleichgewicht zwischen Vorspannung und Last (Innendruck, Eigengewicht). Eine Schwierigkeit ist jedoch die Festlegung der Gleichgewichtsvorspannung, d. h. des räumlichen Kräftegleichgewichtssystems.

Beim Entwurf einer Membrankonstruktion ist eine isotrope Vorspannung praktisch die einzige Gleichgewichtsvorspannung, die man im Voraus festlegen kann. So eine Vorspannung erweist sich jedoch nicht immer als geeignet – sowohl hinsichtlich der eigentlichen Form als auch einer nachfolgend angesetzten nichtlinearen Analyse. Darüber hinaus kann es vorkommen, dass eine der isotropen Vorspannung entsprechende Form infolge bestimmter Randbedingungen physikalisch gar nicht möglich ist.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, im Formfindungsprozess eine orthotrope Vorspannung vorzuschreiben. Eine konstante orthotrope Vorspannung im Gleichgewichtszustand ist nur möglich, wenn die Gaußsche Krümmung der jeweiligen Fläche gleich null ist (z. B. bei ebenen oder zylindrischen Flächen). Doppelt gekrümmte Membrantragwerke zeichnen sich durch diese Eigenschaft nicht aus. Man müsste die Membrankonstruktionen mit einer allgemeinen räumlichen orthotropen Vorspannung versehen. Dies ist jedoch realitätsfern und verlangt ein Instrument, das durch die Vorgabe der Vorspannungen in zwei Richtungen (Kett- und Schussrichtung) nicht nur eine Gleichgewichtsform, sondern auch die Gleichgewichtsvorspannung finden kann.

In RF-FORMFINDUNG sind zwei zur Findung von Gleichgewichtsformen und Gleichgewichtsvorspannungen verwendbare Methoden implementiert - die *Projektionsmethode* und die *Zugmethode*. Beide Methoden beruhen auf der bekannten Formfindungsmethode *Updated Reference Strategy (URS)* von K. U. BLETZINGER und E. RAMM aus dem Jahre 1999. Generell gilt, dass die Projektionsmethode für hohe Kegelformen vorteilhaft ist, während sich die Zugmethode für punkt- und bogengestützte oder pneumatisch stabilisierte Membranen eignet.

1.4.1 Projektionsmethode

Wie erwähnt, ist es praktisch ausgeschlossen, eine allgemeine Gleichgewichtsvorspannung im Raum festzulegen. Nicht so in einer Ebene, wo neben einer isotropen Vorspannung auch eine konstante orthotrope Vorspannung (orthogonal ausgerichtete Vorspannung) vorliegen kann. Darüber hinaus ist es möglich, beim Definieren einer Vorspannung in Radialrichtung auch die Vorspannungen in Tangentialrichtung für alle Nachbarkpunkte aufgrund der Gleichgewichtsbedingung zu ermitteln. In einer Ebene kann man also ein Kräftegleichgewichtssystem eindeutig definieren.

Diese Gegebenheiten nutzt die *Projektionsmethode*, die auf der „Projizierung“ der in der globalen XY-Ebene definierten Vorspannung in die tatsächliche Lage der Membrankonstruktion beruht. Falls die Neigung der Membran gegen die globale XY-Ebene gleich null ist, entspricht die Vorspannung in der Membran den vorgegebenen Werten. Wenn die Neigung der Membran gegen die globale XY-Ebene ungleich null ist, steigt die Vorspannung in Richtung der Falllinie an, während die Vorspannung in Richtung der Schichtlinie abnimmt. Nähert sich die Neigung der Membran gegen die globale XY-Ebene einem rechten Winkel, nimmt die Vorspannung in Richtung der Falllinie erheblich zu, während sich die Vorspannung in Richtung der Schichtlinie null nähert.

Mit diesem Verfahren wird das Vorspannungsgleichgewicht in Richtungen der globalen Achsen X und Y bewahrt. Innerhalb des Formfindungsprozesses wird dann nach derjenigen Anordnung der Membrankonstruktion im Raum gesucht, die eine Gleichgewichtsvorspannung auch in Richtung der globalen Achse Z gewährleistet. Die Projektionsmethode, bei der die Gleichgewichtsvorspannung in der Projektion bestimmt wird, führt zur Festlegung der Gleichgewichtsvorspannung im Raum und somit auch zur Findung einer eindeutigen räumlichen Form der Membrankonstruktion.

Die Findung des Gleichgewichtszustands erfolgt unter Anwendung der Methode *Updated Reference Strategy*. Der Formfindungsprozess ist daher ein nichtlineares Problem.

1.4.2 Zugmethode

Die *Zugmethode* unterscheidet sich grundlegend von der *Projektionsmethode*: Die vorgegebene Vorspannung wird nicht geändert (stabilisiert). Bei der Ermittlung der Gleichgewichtsform geht die *Zugmethode* von den beiden vorgegebenen Werten aus, die für die Vorspannung in Kett- und Schussrichtung festgelegt wurden.

Gewöhnlich wird eine physikalisch nicht im Gleichgewicht stehende Vorspannung vorgeschrieben (außer isotroper Vorspannung). Deshalb ist nicht zu erwarten, dass beim Ansatz einer orthotropen Vorspannung z. B. von 2,0 kN in Kett- und 1,0 kN in Schussrichtung eine Form der Membrankonstruktion mit einer Vorspannung erreicht wird, die diesen Anforderungen genau entspricht. Da die Forderung nach einer konstanten orthotropen Vorspannung in der Regel keine entsprechende Lösung findet, würde die Form bei der sich ständig wiederholenden Verwendung dieser Vorspannung im Iterationsprozess nicht gegen die Gleichgewichtslage konvergieren. Deshalb wird die gewählte Vorspannung in der Membrankonstruktion nur in der gewünschten Anzahl der Iterationen angesetzt. Danach wird eine Stabilisierung angewendet.

Die *Zugmethode* nutzt die Tatsache, dass bei der Vorgabe einer nicht im Gleichgewicht stehenden Vorspannung für die Membrankonstruktion die zur Ebene der Membran senkrechten Verformungen häufiger auftreten als die in der Ebene der Membran. Sobald die Anzahl der festgelegten Iterationen für die Verwendung der vorgeschriebenen Vorspannung erreicht ist, wird die Konstruktion stabilisiert. Dabei nähert sich die resultierende Vorspannung in der Regel stark an die vorgegebenen Werte an. Die Zugmethode beruht ebenfalls auf der Formfindungsmethode *Updated Reference Strategy*.

1.5 Formfindung bei kombinierten Konstruktionen

Während in RF-FORMFINDUNG die Form der Membranen anhand der vorgegebenen Werte der Vorspannung bestimmt wird, kann man für Seile neben Vorspannungen auch geometrische Anforderungen definieren wie z. B. die endgültige Stichhöhe oder Länge.

Membranen sind oft Teile eines Bauwerks, das viele biegesteife Elemente (Träger, Platten, Schalen usw.) enthält. Während des Formfindungsprozesses wird nach einer Gleichgewichtsform der Gesamtkonstruktion gesucht. Die Vorspannung in der Membran und in den Seilen wirkt aktiv auf die biegesteifen Elemente des Bauwerks, die dieser Vorspannung entgegenwirken müssen. Falls es nicht erwünscht ist, dass die biegesteifen Elemente im Formfindungsprozess mitwirken, können sie mit speziellen temporären Formfindungslagern versehen werden. Diese Lager fixieren die Elemente für den Formfindungsprozess. Es ist individuell abzuschätzen, welche Variante der vorgesehenen Montage der Konstruktion besser entspricht.

1.6 Zusatzmodul RF-ZUSCHNITT

Das Zusatzmodul RF-ZUSCHNITT bildet den zweiten Baustein in der RFEM-Produktfamilie für Membrankonstruktionen. Dieses Modul errechnet und organisiert Schnittmuster für Membranen, die als Ergebnis des Formfindungsprozesses vorliegen. Alternativ kann RF-ZUSCHNITT auch für eigendefinierte räumliche Membransysteme genutzt werden.

Ist die Aufteilung der Membranflächen für den Zuschnitt zu groß, kann die Fläche über Schnittlinien in Teilstreifen zerlegt werden. Die Randbedingungen der Zuschnittmuster auf der gekrümmten Geometrie lassen sich über die Randlinien sowie über unabhängige ebene oder geodätische Schnittlinien erfassen. Der Ebnungsprozess erfolgt über die Theorie der minimalen Energie.

Vorspannung und Spannungen aus der Verebnung werden über Kompensationen umgesetzt. Darüber hinaus können Zu- und Abschlüge für Schweißnähte und Randanschlüsse für jedes Schnittmuster separat definiert werden.

2 RF-FORMFINDUNG

Das folgende Kapitel beschreibt die Dialoge und Funktionen des Moduls RF-FORMFINDUNG.

2.1 Aufruf des Moduls

Für die Arbeit mit RF-FORMFINDUNG ist zunächst das Modul zu aktivieren: Dies erfolgt, indem man im Register *Optionen* des Dialogs *Neues Modell - Basisangaben* bzw. *Modell - Basisangaben bearbeiten* das Kontrollfeld **RF-FORMFINDUNG** anhakt.

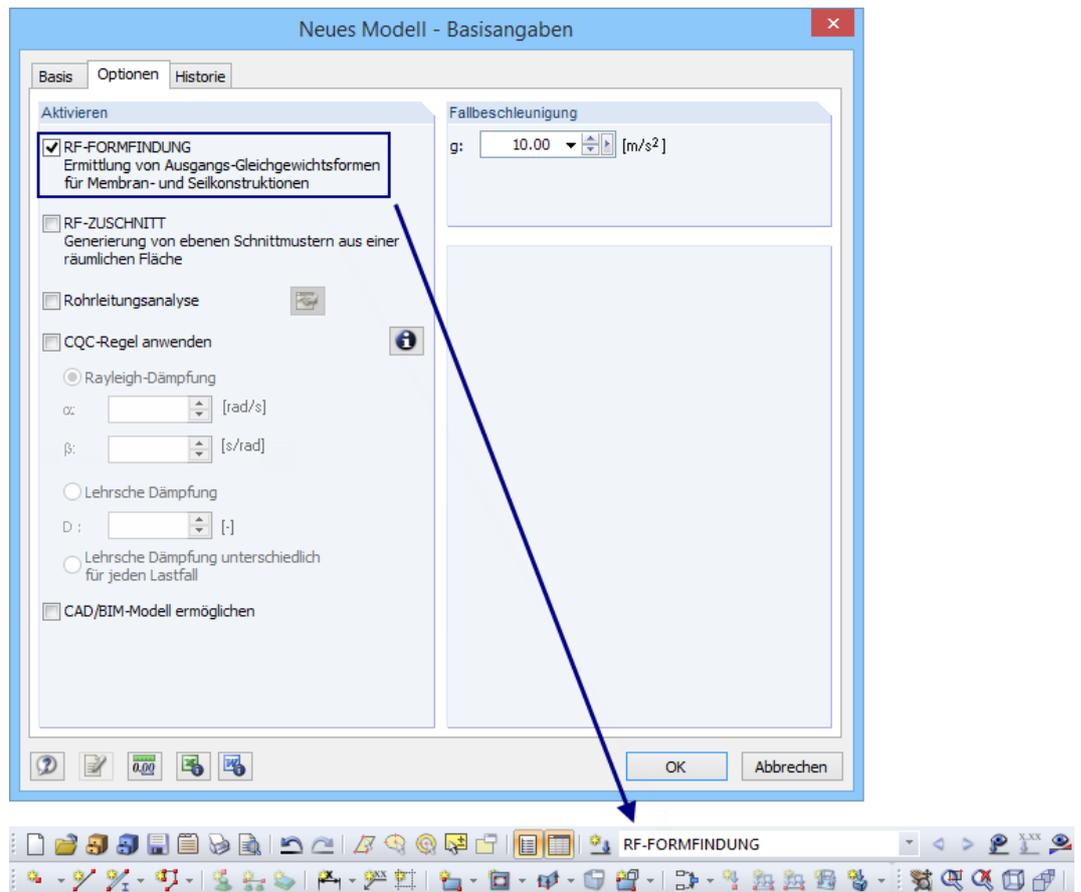


Bild 2.1: Aktivierung des Moduls RF-FORMFINDUNG im *Basisangaben*-Dialog

Beim Anlegen eines Modells mit aktiv gesetztem Modul wird automatisch ein neuer gleichnamiger Lastfall erzeugt. Dieser dient zum Aufrufen und Anzeigen von Ergebnissen der Formfindung.

2.2 Dialoge des Moduls

Das aktiv gesetzte Modul RF-FORMFINDUNG bietet in der Oberfläche des Hauptprogramms RFEM folgende Dialoge und Funktionen.

2.2.1 Berechnungsparameter für Formfindung



Das Register *Formfindung* des Dialogs *Berechnungsparameter* verwaltet grundlegende Optionen zur Steuerung der Formfindung. Der Dialog ist über die links dargestellte Schaltfläche zugänglich.

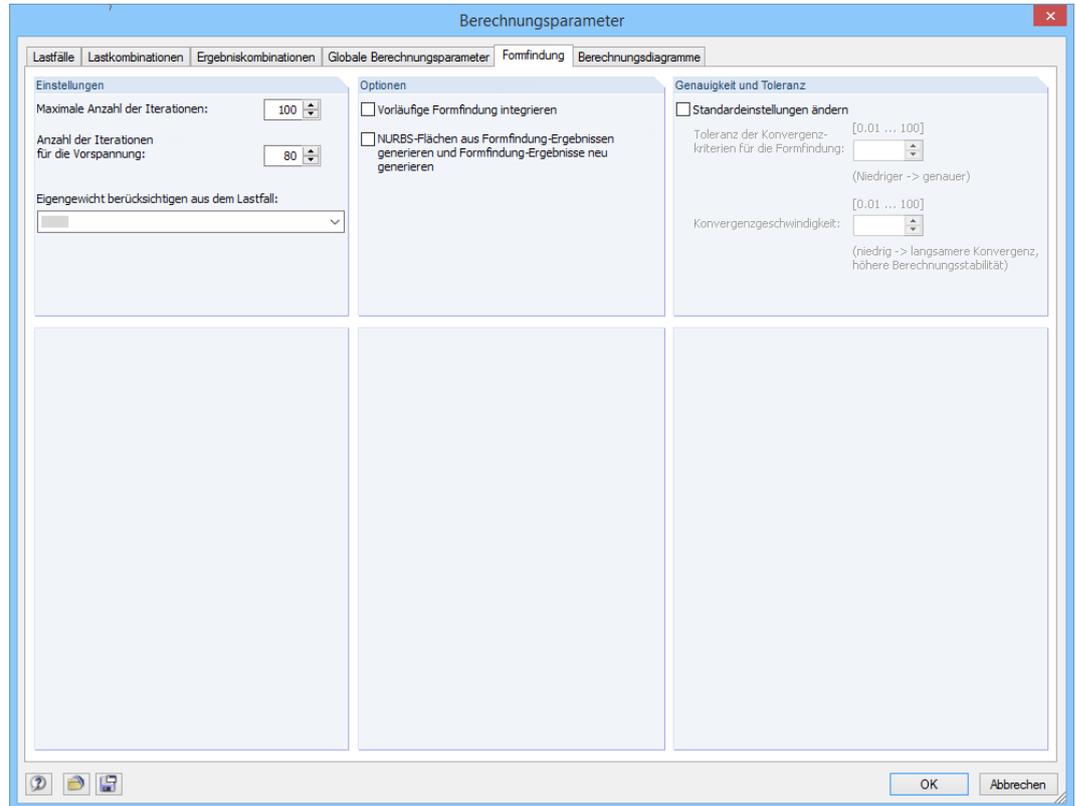


Bild 2.2: Dialog *Berechnungsparameter*, Register *Formfindung*

Der Abschnitt *Einstellungen* steuert die *Maximale Anzahl der Iterationen* für die nichtlineare Berechnung sowie die *Anzahl der Iterationen für die Vorspannung*. Soll das Eigengewicht der Konstruktion im Formfindungsprozess mit angesetzt werden, kann in der Liste *Eigengewicht berücksichtigen aus Lastfall* ein Eigengewichtslastfall ausgewählt werden (nur Lastfall mit Strukturgewicht).



Das Eigengewicht muss nicht mehr berechnet werden, wenn es in diesem Register definiert ist.

Die beiden Kontrollfelder im Abschnitt *Optionen* ermöglichen spezifische Vorgaben. Über eine *Vorläufige Formfindung* kann die Berechnung beschleunigt werden: Vor dem eigentlichen Formfindungsprozess werden die Netzknoten unter alleiniger Berücksichtigung der Membran- und Seilelemente an eine Position nahe der Zielgeometrie verschoben. Mit dieser Näherung erfolgt dann die Formfindung mit Berücksichtigung aller Effekte aus dem Gesamtsystem. Optional lassen sich auch *NURBS-Flächen* und Seile aus den Ergebnissen des Formfindungsprozesses erzeugen. Die Generierung von NURBS-Flächen ist jedoch nur für Flächen möglich, die über drei oder vier Linien definiert sind. Nach dieser Transformation sollte im *Zeigen-Navigator* die Option *Membranen und Seile ausblenden* deaktiviert werden.

Der Abschnitt *Genauigkeit und Toleranz* steuert die Toleranz der Konvergenzkriterien für den Formfindungsprozess.

2.2.2 Dialog für Membranen



Das Berechnungsverfahren und die Vorspannungsparameter für Membranflächen lassen sich im Dialog *Formfindung* für Membranen definieren, der im Dialog *Neue Fläche* oder *Fläche bearbeiten* über die Schaltfläche zugänglich ist (siehe [Bild 2.3](#)). Zuvor ist der Flächentyp *Membran* oder *Membran - Orthotrop* in der Liste auszuwählen.

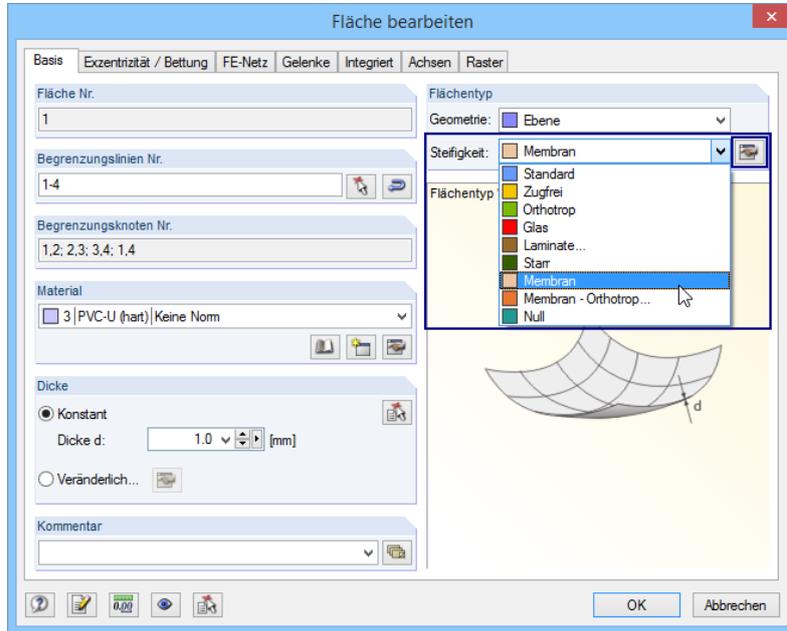


Bild 2.3: Aufruf des Dialogs *Formfindung*

Im Dialog *Formfindung* (siehe [Bild 2.4](#)) kann festgelegt werden, ob die *Projektionsmethode* oder die *Zugmethode* (siehe [Kapitel 1.4](#)) für die Fläche verwendet werden soll. Ferner kann die *Vorspannung* und bei pneumatischen Konstruktionen auch der *Innendruck* vorgeben werden.

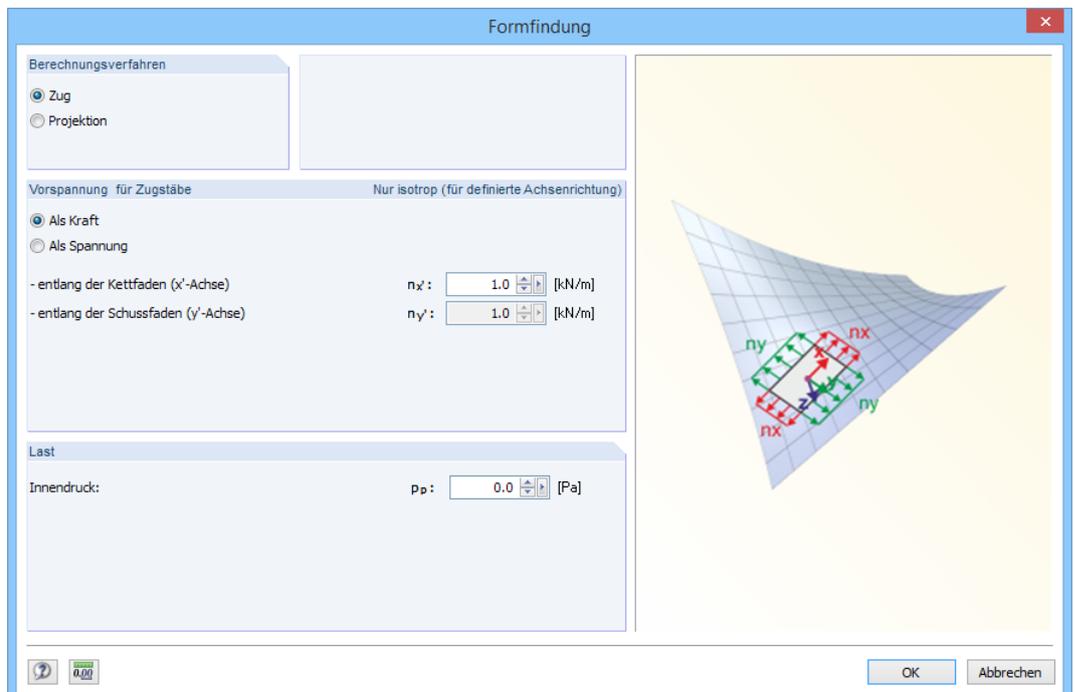


Bild 2.4: Dialog *Formfindung* für Membranen

Die Vorspannung kann *Als Kraft* oder *Als Spannung* definiert werden.

Die Richtungen der Kett- und Schussfäden sind an die Achsen der Fläche gekoppelt (vgl. Flächendialog-Register *Achsen*). Bei der Standardeinstellung kann nur eine isotrope Vorspannung angesetzt werden. Sind die Achsen ausgerichtet, kann auch eine orthotrope oder radiale Vorspannung vorgegeben werden.

Bei einer pneumatischen Membran kann im Abschnitt *Last* der Innendruck festgelegt werden.

2.2.3 Dialog für Seile



Die Eingabeparameter für den Formfindungsprozess bei Seilen sind festzulegen, indem man den Dialog *Neuer Stab* bzw. *Stab bearbeiten* öffnet (siehe Bild 2.5), den Eintrag *Seilstab* aus der Liste im Abschnitt *Stabtyp* auswählt und über die Schaltfläche daneben den Dialog *Parameter des Stabs mit dem Typ 'Seilstab' bearbeiten* aufruft (siehe Bild 2.6).

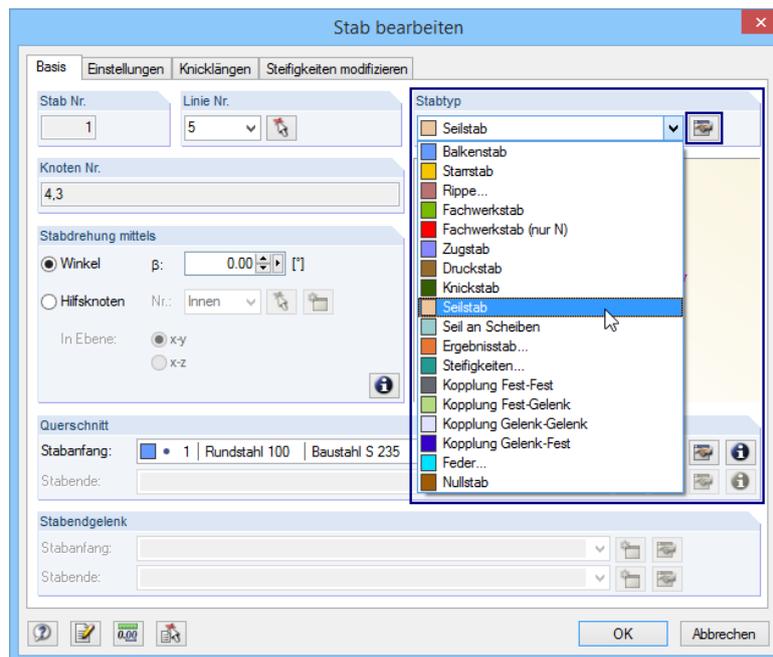


Bild 2.5: Aufruf des Dialogs *Parameter des Stabs mit dem Typ 'Seilstab' bearbeiten*

Im Dialog *Parameter des Stabs mit dem Typ 'Seilstab' bearbeiten* können die geometrischen Bedingungen oder Kräfte für das Seil vorgegeben werden.

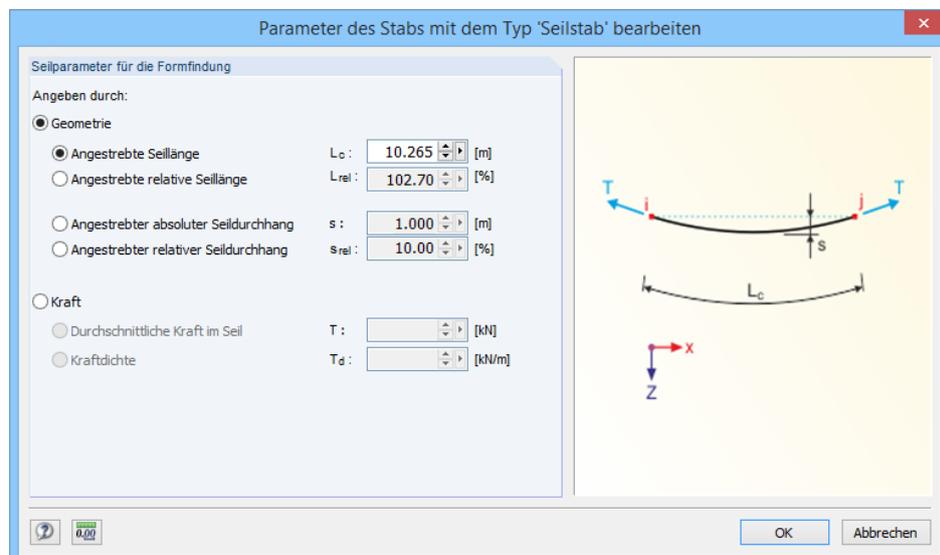


Bild 2.6: Dialog *Parameter des Stabs mit dem Typ 'Seilstab' bearbeiten*

Im ersten Fall lassen sich entweder die *Angestrebte Seillänge (absolut/relativ)* oder der *Angestrebte Seildurchhang (absolut/relativ)* definieren. Im zweiten Fall kann man die *Durchschnittliche Kraft im Seil* oder die *Kraftdichte* angeben. Die erste Variante ist für die Randseile von Membrankonstruktionen vorgesehen, die zweite Variante für Seilnetze relevant.

2.2.4 Temporäre Formfindungslager

Für das Modul RF-FORMFINDUNG steht ein weiterer Typ der Lagernichtlinearität zur Verfügung (siehe Bild 2.7): Hierbei handelt es sich um eine Stützung, die nur während des Formfindungsprozesses wirksam ist.

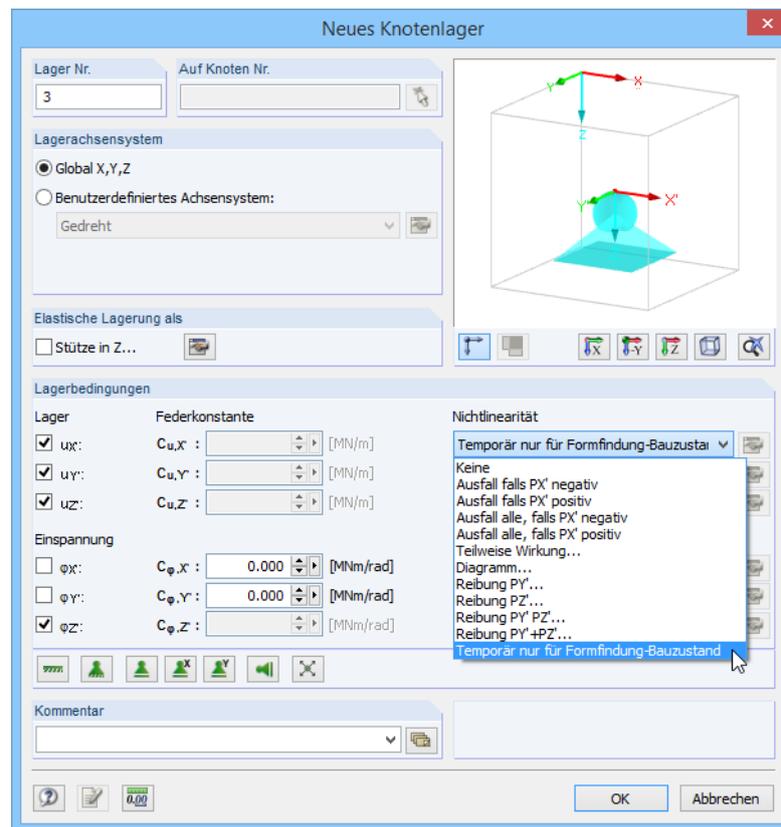


Bild 2.7: Temporäres Lager nur für Formfindungs-Bauzustand

Die Anwendung temporärer Formfindungslager wird am Beispiel einer bogengestützten Membran beschrieben (siehe Kapitel 3.2).

2.3 Start der Berechnung

Beim Aktivieren des Zusatzmoduls RF-FORMFINDUNG (siehe Bild 2.1) wird der Lastfall *Formfindung* angelegt. Die Berechnung dieses Lastfalls kann wie gewohnt über die RFEM-Symbolleiste oder das Pulldownmenü gestartet werden (siehe Bild 2.8 und Bild 2.9).



Bild 2.8: Startmöglichkeiten des Formfindungsprozesses in der Symbolleiste



Bild 2.9: Startmöglichkeiten des Formfindungsprozesses im Menü

Mit dem Start der Berechnung beginnt das Programm mit dem Formfindungsprozess. Er wird am Modell anhand der vorgegebenen Werte durchgeführt. Andere Lastfälle werden auf die generierte vorgespannte Form der Membrankonstruktion angesetzt. Der Formfindungsprozess stellt somit die erste Phase der Berechnung dar, in der die vorgespannte Form generiert wird. Alle anderen Lasten aus Lastfällen und Lastkombinationen werden dann auf diese Form aufgebracht.



Wurde das Modul RF-FORMFINDUNG aktiviert, können keine Lastfälle ohne den vorgeschalteten Formfindungsprozess berechnet werden. Falls die Berechnung eines Lastfalls ohne vorausgegangene Formfindung gestartet wird, wird zunächst automatisch der Lastfall RF-FORMFINDUNG berechnet. Bei der Berechnung des Lastfalls wird dann von der resultierenden vorgespannten Form ausgegangen.

2.4 Anzeige von Ergebnissen

Die Ergebnisse des Formfindungsprozesses werden analog zur Anzeige von Lastfall-Ergebnissen ausgegeben. Die Ergebnisanzeige lässt sich über den *Ergebnisse*-Navigator steuern (siehe Bild 2.10). Die Ergebnisse sind auch in Tabelle 4.0 *Ergebnisse - Zusammenfassung* aufgelistet (siehe Bild 2.11).

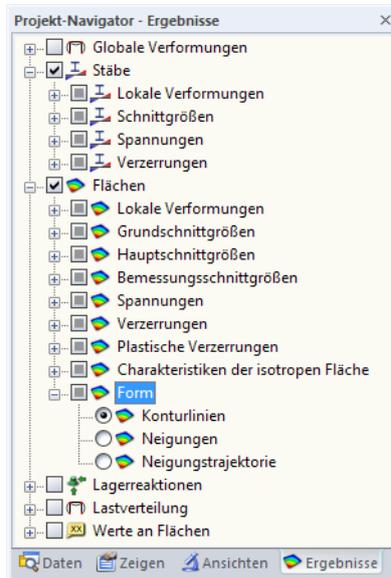


Bild 2.10: *Ergebnisse*-Navigator

4.0 Ergebnisse - Zusammenfassung

| | A | B | C | D |
|-----------------------|---------------------------------|-------|---------|-----------|
| | Bezeichnung | Wert | Einheit | Kommentar |
| RF-FORMFINDUNG | | | | |
| | Summe Belastung in Richtung X | 0.000 | kN | |
| | Summe Lagerkräfte in Richtung X | 0.000 | kN | |
| | Summe Belastung in Richtung Y | 0.000 | kN | |
| | Summe Lagerkräfte in Richtung Y | 0.000 | kN | |
| | Summe Belastung in Richtung Z | 0.000 | kN | |
| | Summe Lagerkräfte in Richtung Z | 0.000 | kN | |

Ergebnisse - Zusammenfassung | Linien - Lagerkräfte | Stäbe - Schnittgrößen | Querschnitte - Schnittgrößen | Flächen - Grundschnittgrößen | Flächen - Hauptschnittgrößen

Bild 2.11: Tabelle 4.0 *Ergebnisse - Zusammenfassung*

Nach der Berechnung der Formfindung erscheint im *Ergebnisse*-Navigator der Eintrag *Form* mit drei Untereinträgen (siehe Bild 2.10): Die *Konturlinien* entsprechen den Schichtlinien. Über den Eintrag *Neigungen* kann die maximale Neigung an der jeweiligen Stelle der Membran angezeigt werden. Die Winkel lassen sich auch als *Neigungstrajektorien* darstellen.

Die Berechnung der Formfindung führt zur Verzerrung der Anfangsform des FE-Netzes. Die neue Form des FE-Netzes, die die ursprüngliche Form ersetzt, lässt sich im *Zeigen*-Navigator über die Einträge **FE-Netz (Formfindung)** → **An Stäben** und **FE-Netz (Formfindung)** → **An Flächen** darstellen (siehe [Bild 2.12](#)). Dieses Netz wird dann für alle weiteren Berechnungen angesetzt.

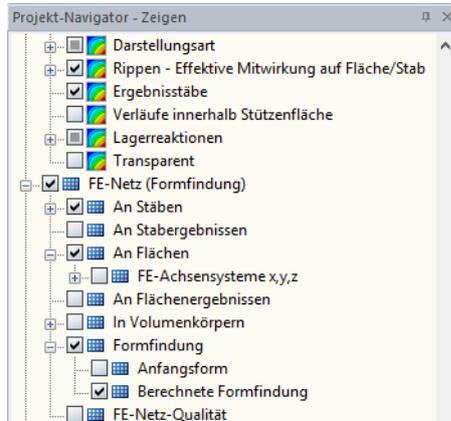


Bild 2.12: Darstellung der neuen Form des Netzes im *Zeigen*-Navigator

Mit dem Formfindungsprozess wird das FE-Netz in eine neue Position verschoben. Die ursprünglich modellierten Flächen und Stäbe bleiben in ihrer Ausgangsposition. Um durch die ursprüngliche Form nicht gestört zu werden, kann man die *Anfangsform* unter dem Eintrag *FE-Netz (Formfindung)* ausblenden und das FE-Netz gefüllt darstellen (siehe [Bild 2.12](#)).

Mit der Transformationsfunktion in den Berechnungsparametern (siehe [Bild 2.2, Seite 7](#)) besteht auch die Möglichkeit, das verformte Netz in eine NURBS-Fläche umzuwandeln.

3 Beispiele

Das folgende Kapitel verfolgt das Ziel, die Arbeit mit dem Modul RF-FORMFINDUNG anhand verschiedener Beispiele aufzuzeigen. Es werden typische Formen von Membrankonstruktionen vorgestellt – punktgestützte Membranen, bogengestützte Membranen, Kegelmembranen und pneumatische Membranen.

Bei der Arbeit mit RF-FORMFINDUNG wird im ersten Schritt immer das Modell angelegt, d. h. die einzelnen Flächen, Seile, Lager usw. definiert. Dieses Modell stellt die Anfangsannäherung an die endgültige Form dar. Das Modell wird in Abhängigkeit von den Eingabeparametern des Formfindungsprozesses in eine neue Position verzerrt.

Wir verwenden die im Kapitel 2 beschriebenen Dialoge, um für die Flächen des Typs *Membran* oder *Membran - Orthotrop* die Vorspannung zu definieren und die Kett- und Schussrichtungen einzustellen. Für die Seilstäbe geben wir die geometrischen Bedingungen oder Kräfte vor.

3.1 Punktgestützte Membran

Das erste Beispiel beschreibt eine punktgestützte Standardmembran. Zuerst wird ein aus Seilen, einer Membran und aus Lagern bestehendes Modell in RFEM erzeugt (siehe Bild 3.1).

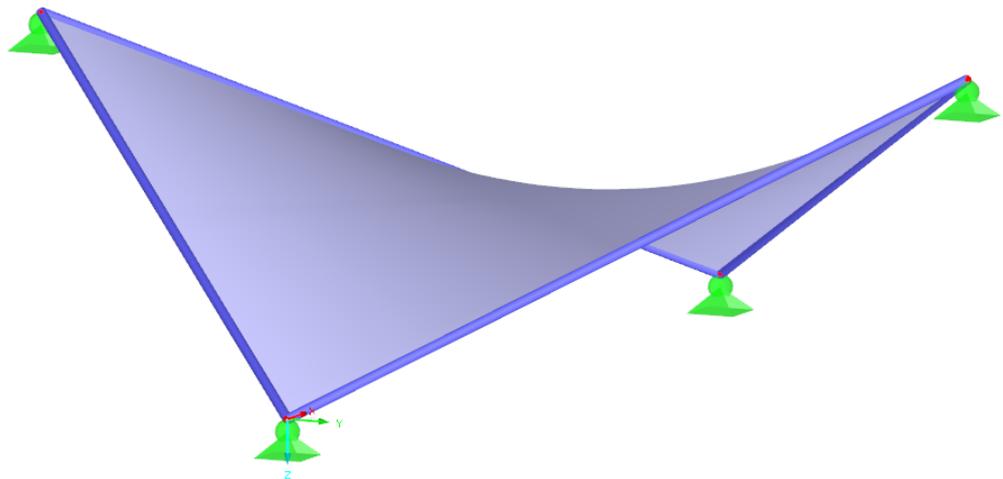


Bild 3.1: Modell der punktgestützten Membran



Im Dialog *Formfindung* besteht die Auswahlmöglichkeit zwischen den beiden Formfindungsmethoden (siehe Bild 3.2). Generell gilt, dass die *Zugmethode* für punkt- und bogengestützte oder pneumatisch stabilisierte Membranen vorteilhaft ist, während sich die *Projektionsmethode* für Kegelmembranen eignet. In unserem Beispiel wählen wir somit die Berechnungsmethode **Zug**.

Für eine Fläche des Typs *Membran* und für die *Seilstäbe* legen wir Vorspannungswerte fest: Bei der Membran wird eine isotrope Vorspannung von 1,0 kN pro Meter Breite verlangt (siehe Bild 3.2). Für eine isotrop vorgespannte Form sind Kett- und Schussrichtung nicht entscheidend.

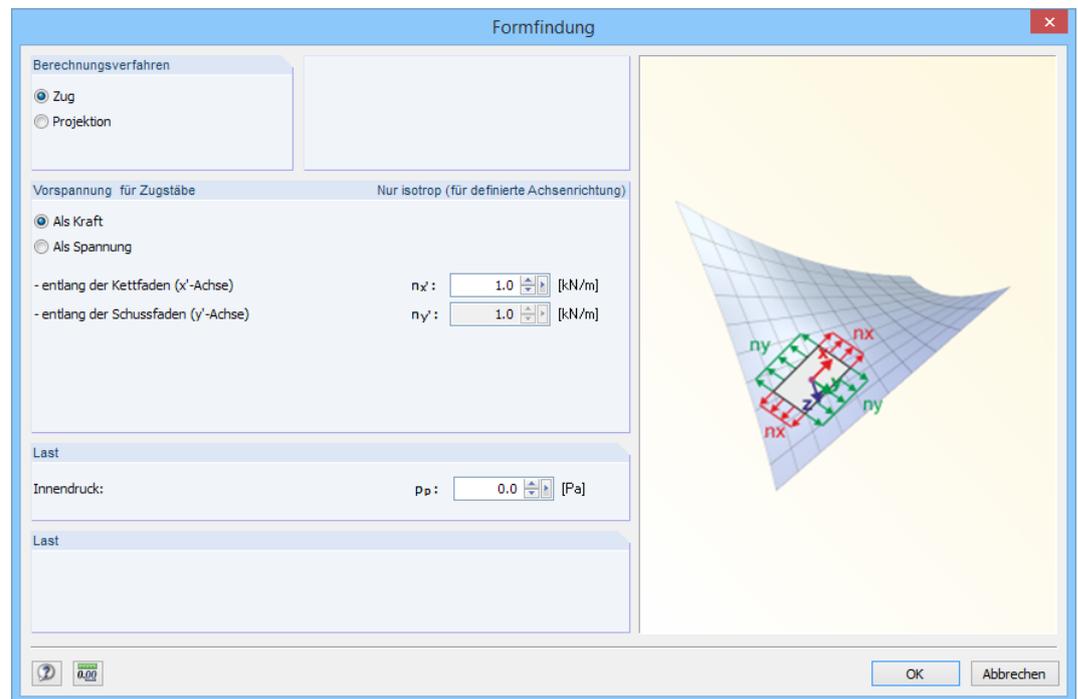


Bild 3.2: Vorspannung für Membran

Bei Seilen wird eine mittlere Vorspannung von 10 kN vorgegeben (siehe Bild 3.3).

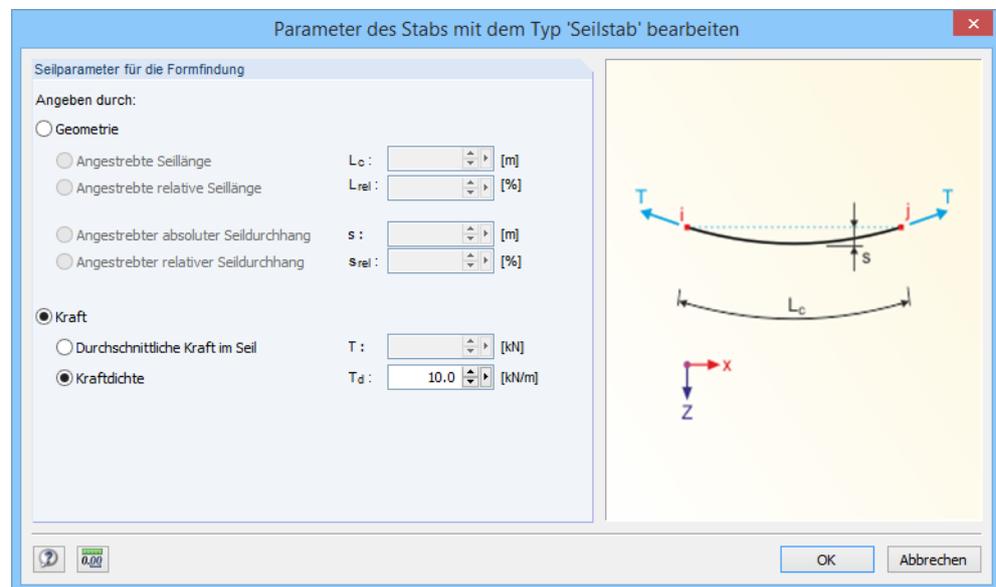


Bild 3.3: Vorspannung für Seile

Sobald das Modell erstellt ist und die Eingabeparameter für die Formfindung festgelegt sind, kann die Berechnung des Lastfalls RF-FORMFINDUNG gestartet werden.

Der Formfindungsprozess führt zur Generierung einer neuen Form der Konstruktion (siehe Bild 3.4).

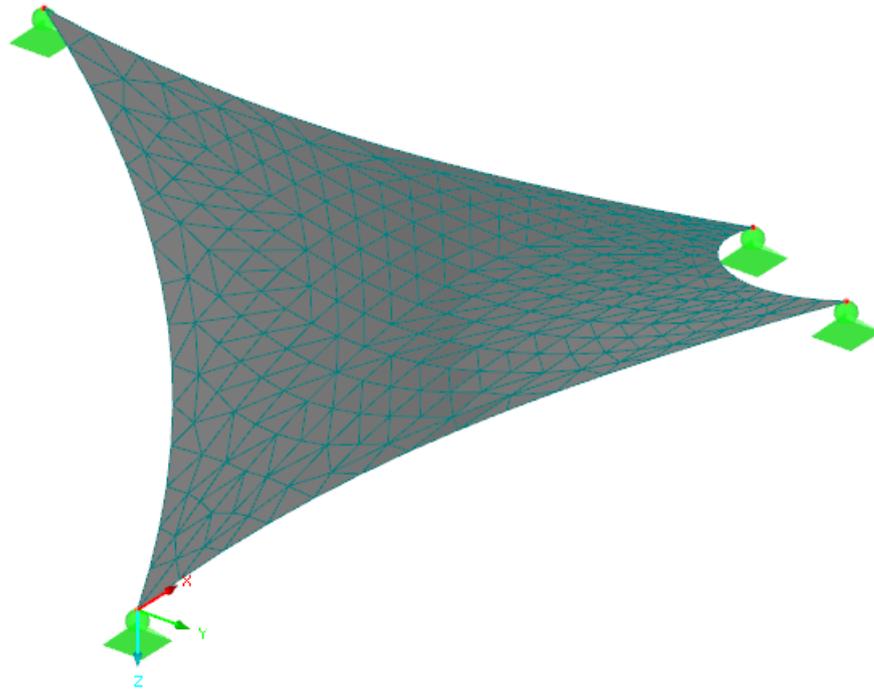


Bild 3.4: Neue Form der Konstruktion

Im Bild 3.5 werden die Schnittgrößen in der Membran und in den Seilen veranschaulicht. Ferner können die Lagerreaktionen angezeigt werden.

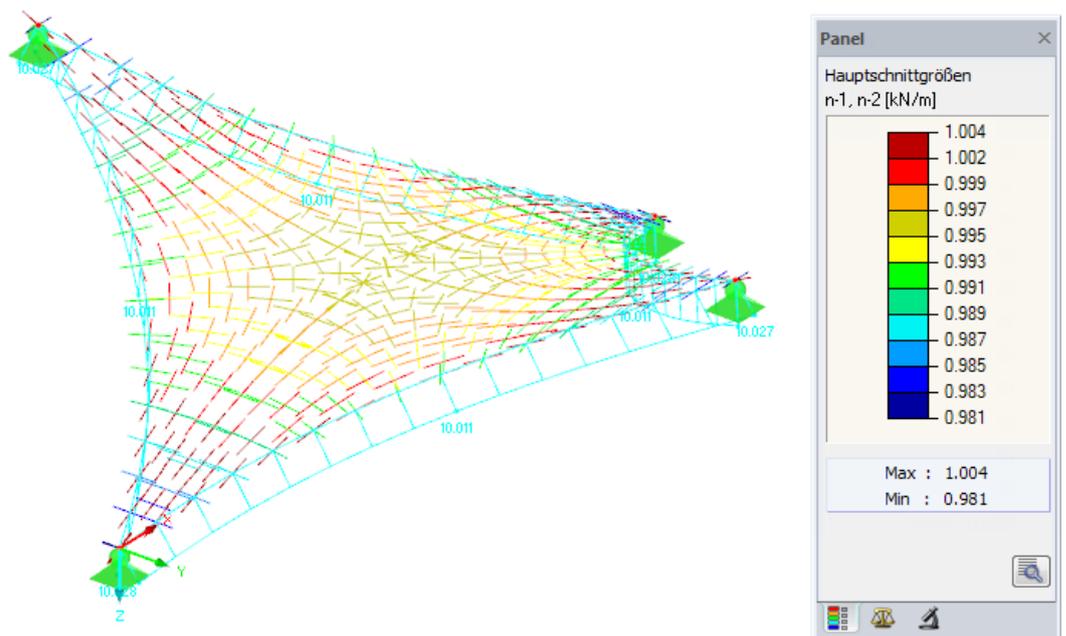


Bild 3.5: Vektorielle Anzeige der Membran-Hauptschnittgrößen und Seil-Normalkräfte

Das Bild 3.5 zeigt, dass die resultierende Vorspannung bereits gut den vorgegebenen Werten entspricht. Da die isotrope Vorspannung eine räumliche Gleichgewichtsvorspannung ist, kann man eine noch bessere Annäherung durch eine Änderung im Dialog *Berechnungsparameter*, Register *Formfindung* (siehe Bild 2.2) erreichen.

Im Bild 3.6 sind die Schnittgrößen in der Membrankonstruktion dargestellt, die sich nach einer Erhöhung der Anzahl der Iterationen für die Vorspannung ergeben.

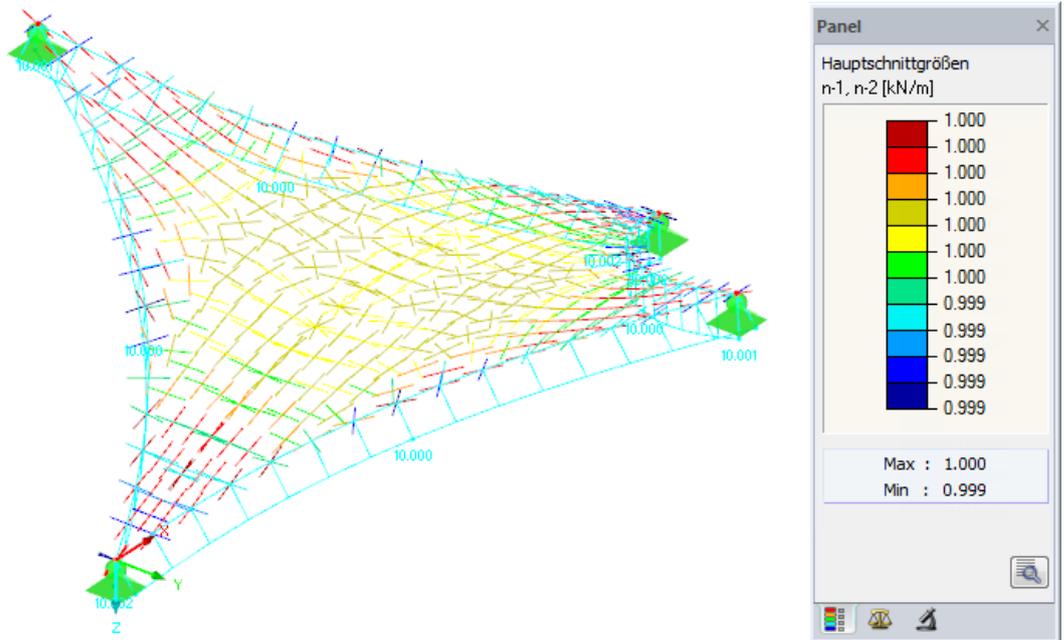


Bild 3.6: Resultierende Vorspannung nach Erhöhung der Iterationsanzahl

Die vorgespannte Membrankonstruktion kann man nachfolgend einer LF/LK-Analyse unterziehen: Man legt Lastfälle an, definiert Lasten und startet die Berechnung. Die Berechnung der Lastfälle erfolgt auf Basis der generierten vorgespannten Form. Die Formfindung kann somit als erste Phase, die Berechnung der anderen Lastfälle als zweite Phase der Berechnung angesehen werden.

Hat die statische Analyse gezeigt, dass die isotrope Vorspannung für die Konstruktion nicht geeignet ist, kann eine orthotrope Vorspannung gewählt werden. Hierzu ist zunächst im Dialog *Fläche bearbeiten*, Register *Achsen* das Achsensystem in geeigneter Weise auszurichten.

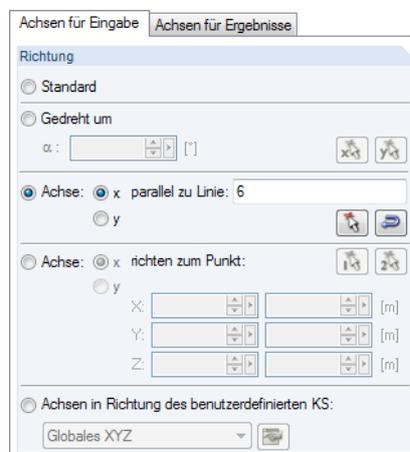


Bild 3.7: Dialog *Fläche bearbeiten*, Register *Achsen*

In den Dialogen für Membranen und Seile können dann die Eingabewerte angepasst werden. In unserem Beispiel wird eine Vorspannung von 2 kN/m in Kettrichtung und 1 kN/m in Schussrichtung angesetzt. Für die orthotrope Vorspannung sind die Kett- und Schussrichtungen anzugeben. Die Randseile werden im Beispiel mit einer Kraft von 15 kN vorgespannt.

Im Dialog *Formfindung* (siehe Bild 3.2) ist nun auch das Eingabefeld für die Schussrichtung zugänglich. Werden gleiche Werte eingegeben (isotrope Vorspannung), wird ein räumliches Kräftegleichgewichtssystem definiert. Durch Erhöhung der Genauigkeit und der Anzahl der Iterationen für die Vorspannung werden präzisere Ergebnisse erreicht. Auf die Genauigkeit wirkt sich in gewissem Maße auch die Größe der Elemente des FE-Netzes aus. Generell gilt, dass sich mit einem verdichteten Netz die der Gleichgewichtsvorspannung entsprechende Form im Raum besser annähert.

Durch die Vorspannung von 2 kN/m in Kettrichtung und 1 kN/m in Schussrichtung (bei Verwendung der Zug-Methode) liegt eine konstante orthotrope Vorspannung vor. Es ist nicht zu erwarten, dass sich hiermit eine Gleichgewichtsvorspannung im Raum einstellt. Deshalb wird die gewählte Vorspannung nur in einer bestimmten Anzahl von Iterationen angesetzt – so lange, bis sich die Membrankonstruktion stabilisiert hat. Dadurch wird in den meisten Fällen eine Form gefunden, die sich gut an die vorgegebenen Werte annähert (siehe Bild 3.8).

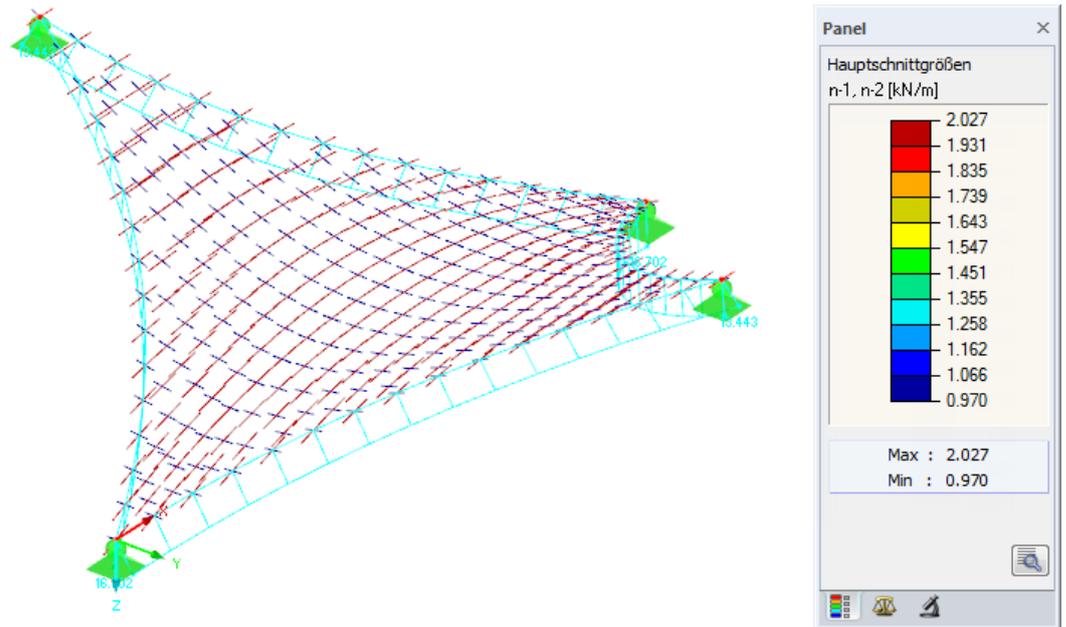


Bild 3.8: Orthotrop vorgespannte Membran



Für die Anzahl der Iterationen für die Vorspannung der Konstruktion ist Folgendes zu empfehlen: Liegt eine isotrope Vorspannung vor, wird durch eine zunehmende Anzahl der Iterationen eine Form erreicht, die sich dem Kräftegleichgewichtssystem im Raum immer besser annähert. Bei einer konstanten orthotropen Vorspannung (d. h. das räumliche Kräftesystem steht nicht im Gleichgewicht) hingegen ist die Wirkung der Vorspannung im richtigen Moment zu beenden. Dies ist dann der Fall, wenn die im Diagramm *Maximale Verschiebung* dargestellte Verformung aufhört deutlich zu wachsen (siehe Bild 3.9).

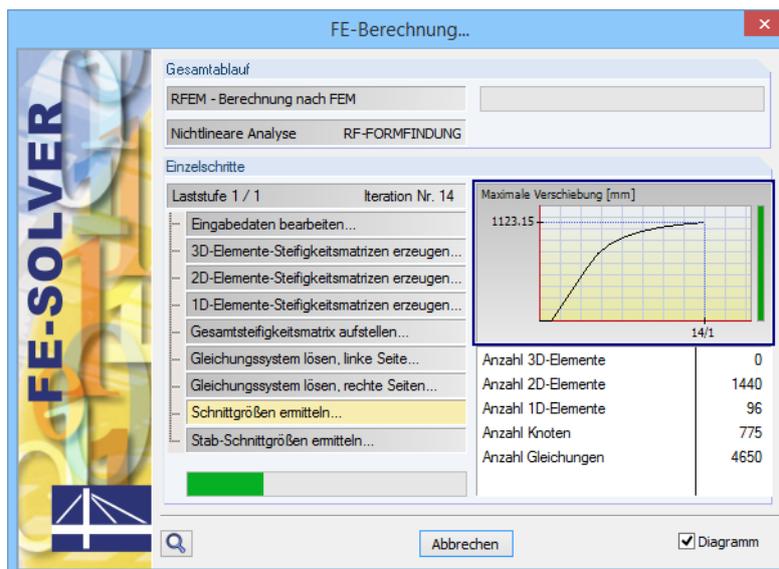


Bild 3.9: Grafische Darstellung der Verformungen während des Formfindungsprozesses

Die zur Ebene der Membran senkrechten Verformungen (in der Regel im steilen Teil der Kurve) treten wesentlich häufiger auf als die in der Ebene der Membran. Sobald die Steigerung der Verformung nachlässt, ist gewöhnlich die Form gefunden, die der geforderten orthotropen Vorspannung annähernd entspricht. Nach dem letzten Ansatz der konstanten orthotropen Vorspannung wird die Konstruktion stabilisiert; auf diese Weise stellt sich eine **Gleichgewichtsvorspannung** ein, die den vorgegebenen Werten sehr nahe kommt.

Die Gleichgewichtsform ist von der Steifigkeit des verwendeten Materials völlig unabhängig. Die Form einer biegeweichen Konstruktion ergibt sich eindeutig aus den festgelegten Randbedingungen und der Gleichgewichtsvorspannung bzw. sie wird durch die Randbedingungen und das Gleichgewichtssystem von Vorspannung und Lasten (Überdruck, Eigengewicht) bestimmt. Das verwendete Material kann die resultierende Form nur beeinflussen, wenn die Formfindung unter der Berücksichtigung des Eigengewichts erfolgt. In der Regel kommt jedoch dieser Last nur eine kleine Bedeutung zu.



Es ist deshalb zu empfehlen, das Eigengewicht nicht am Anfang des Formfindungsprozesses zu aktivieren. Der Benutzer kann so zuerst die vorgespannte Form finden, die seinen Vorstellungen gerecht wird. Erst danach wird ein geeignetes Material gewählt, die Berücksichtigung des Eigengewichts innerhalb des Formfindungsprozesses aktiviert und die Berechnung nochmals gestartet.

Die Endform ist ebenfalls von der Anfangsannäherung der Form unabhängig. Mit anderen Worten ausgedrückt: Es spielt keine Rolle, wie die Ausgangskonstruktion modelliert wird. Wichtig ist, dass beide Konstruktionen gleich angeordnete Lager und gleiche Vorspannungen aufweisen. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich auch gleiche Endformen (siehe [Bild 3.10](#) und [Bild 3.11](#)).

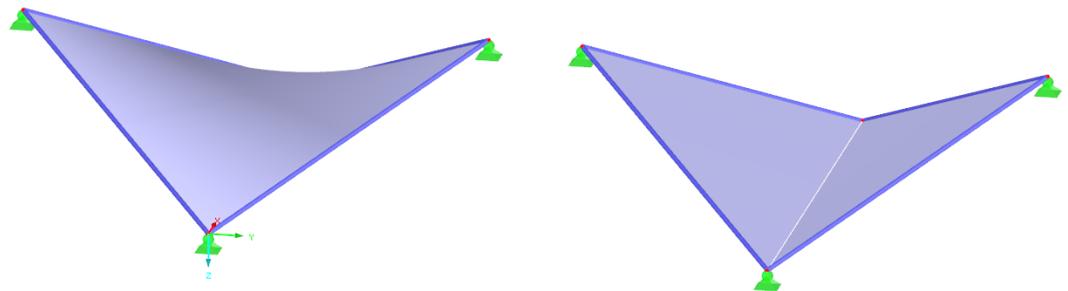


Bild 3.10: Unterschiedliche Modelle – zwei verschiedene Anfangsformen

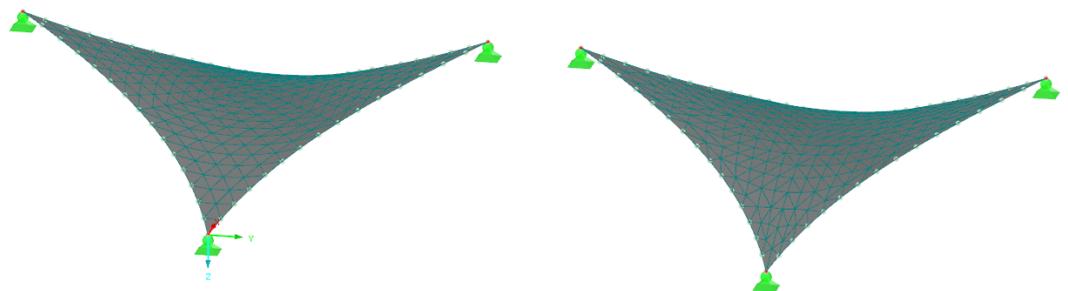


Bild 3.11: Zwei identische Formen nach dem Formfindungsprozess



Für die Endform sind nicht die absoluten Größen, sondern die Vorspannungsverhältnisse entscheidend: Gleich ob für die Membran eine isotrope Vorspannung von 1 kN/m und eine mittlere Vorspannung für Seile von 10 kN oder eine isotrope Membranvorspannung von 50 kN/m bei einer mittleren Seilvorspannung von 500 kN vorgegeben wird, ergibt sich eine identische Form für beide Konstruktionen. Das gilt nicht, wenn als Randbedingungen nachgiebige Träger eingesetzt werden, die bei verschiedenen Vorspannungen in der Membran unterschiedlich verformt werden (siehe Anmerkungen zum Beispiel im [Kapitel 3.2](#))!

3.2 Bogengestützte Membran

Das zweite Beispiel stellt eine bogengestützte Membran vor. Die Konstruktion umfasst drei Membranfelder und vier Stahlbögen. Die Membranen sind seitlich an die Träger angeschlossenen und am unteren Rand verankert, die Stahlbögen in den Baugrund eingespannt (siehe Bild 3.12).

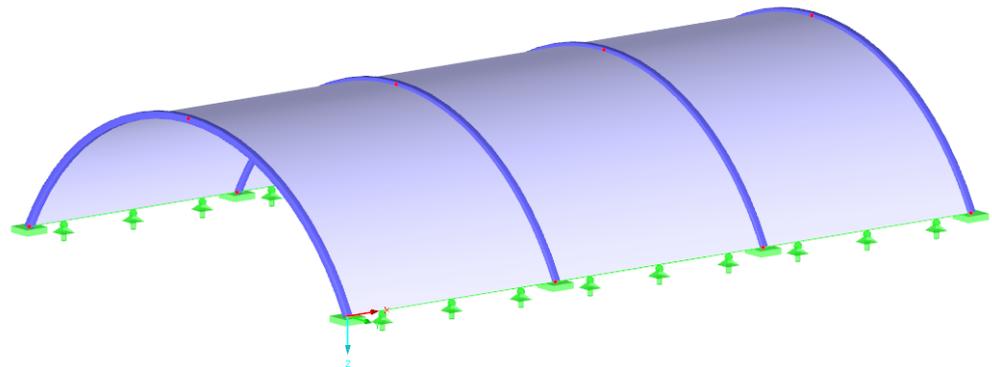


Bild 3.12: Modell der bogengestützten Membran

Im ersten Schritt wird in RFEM ein Modell definiert, das eine Anfangsannäherung an die Endform darstellt. Exemplarisch wird für jedes Feld eine andere Vorspannung vorgesehen. Für das erste Feld wird eine isotrope Vorspannung von 1 kN/m, für das zweite und dritte eine orthotrope Vorspannung vorgegeben. Die Vorspannung im zweiten Feld beträgt 1 kN/m in Kettrichtung und 2 kN/m in Schussrichtung, während für das dritte Feld eine Vorspannung von 2 kN/m in Kettrichtung und eine von 1 kN/m in Schussrichtung definiert werden.

Berechnungsverfahren

- Zug
- Projektion

Im Dialog *Formfindung* kann für jede der drei Flächen eine spezifische Formfindungsmethode festgelegt werden (siehe Bild 3.2). Generell gilt, dass das Berechnungsverfahren **Zug** für bogengestützte Membranen besser geeignet ist. Der Dialog *Berechnungsparameter* (siehe Bild 2.2, Seite 7) steuert die Anzahl an Iterationen für die Vorspannung.

Da ein klarer Zusammenhang zwischen der Vorspannung und Form besteht, ergeben sich unterschiedliche Membranformen infolge der verschiedenen Vorspannungswerte in den Feldern (siehe Bild 3.13 und Bild 3.14).

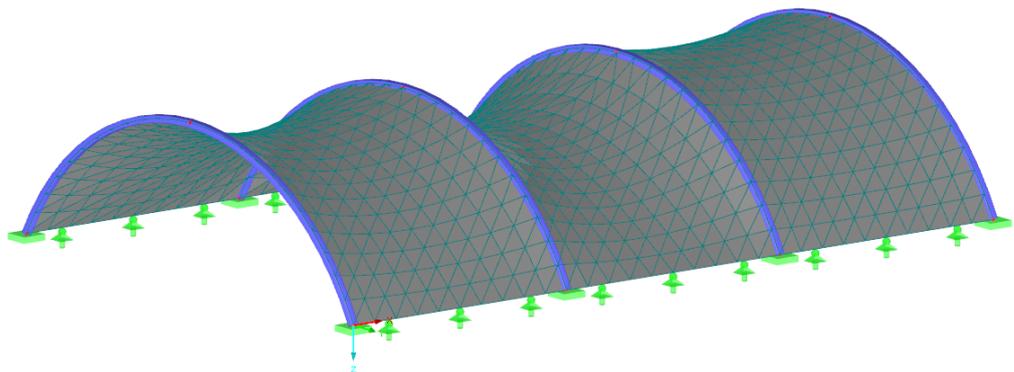


Bild 3.13: Endform der Membrankonstruktion - isometrische Ansicht

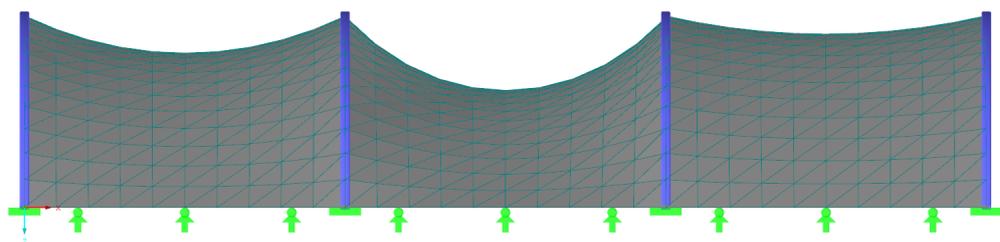


Bild 3.14: Endform der Membrankonstruktion - Ansicht in -Y

Das **Bild 3.15** zeigt die Schnittgrößen an der generierten Form der Membrankonstruktion. Es ist wieder eine gute Annäherung der resultierenden Vorspannung an die geforderte Vorspannung festzustellen.

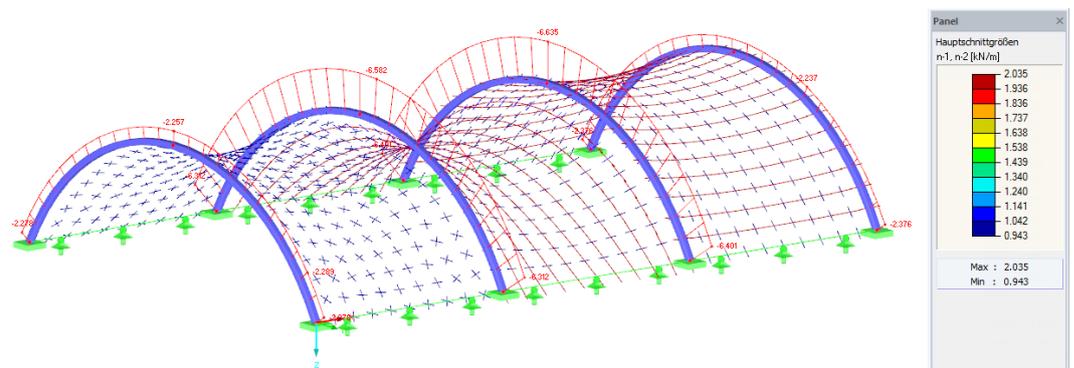


Bild 3.15: Vektorielle Anzeige von Membran-Hauptschnittgrößen und von Träger-Normalkräften

Die Stahlbögen gehen in den Formfindungsprozess ein. Sie bilden nachgiebige Randbedingungen für die Membranflächen. Die Membranen werden mit der definierten Vorspannung versehen, der die Träger zu widerstehen haben. Aus dem Formfindungsprozess ergibt sich so nicht nur die vorgespannte Form der Membranflächen, sondern auch die verzerrte Form und die Schnittgrößen der biegesteife Teile der Konstruktion. Die Stahlbögen werden unter der Belastung aus den Membranen entsprechend ihren Steifigkeiten verformt.



Wünscht man nicht, dass die Stahlbögen in den Formfindungsprozess einfließen, kann man sie durch temporäre Formfindungslager stützen (siehe blaue Lager im **Bild 3.16**).

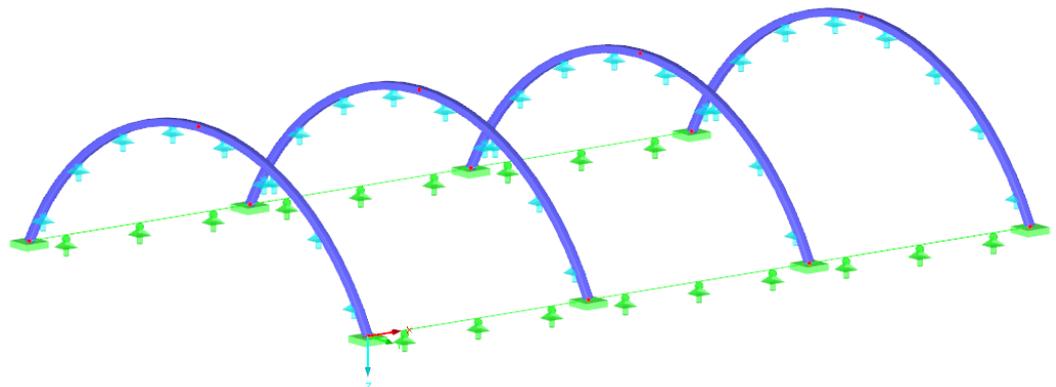


Bild 3.16: Temporäre Formfindungslager

Diese Lager sind mit der nichtlinearen Eigenschaft *Temporär nur für Formfindung-Bauzustand* zu versehen (siehe **Bild 3.17**). Sie sind dann nur während des Formfindungsprozesses aktiv; für andere Lastfälle werden sie nicht berücksichtigt (analog zum Entfernen von Montagestützen). Alle Lasten, denen die Lager für die Formfindung zu widerstehen hatten, werden dann von den Stahlbögen aufgenommen.

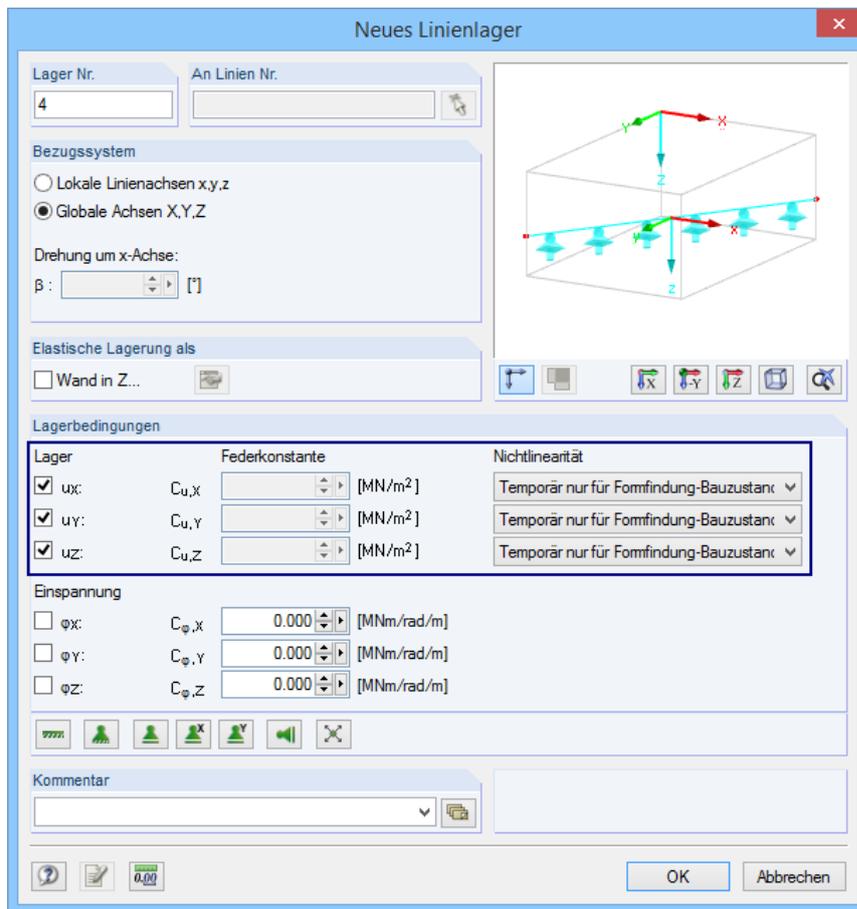


Bild 3.17: Definition der temporären Formfindungslager



Es liegt beim Benutzer, ob die biegesteifen Teile der Konstruktion in den Formfindungsprozess mit einfließen oder ob sie von temporären Lagern gestützt werden sollen. Man kann sich je nach Montagevorgang entscheiden.

Werden während der Montage keine Montagestützen für die eingespannten Bögen verwendet, verformen sie sich beim Anspannen. Dies entspricht dem Formfindungsprozess ohne Einsatz von temporären Lagern. Die Vorspannung, die nach dem Anspannen der Konstruktion vorliegt, entspricht der aus dem Formfindungsprozess resultierenden Vorspannung.

Werden hingegen die Träger während des Anspannens der Membran von Montagelagern gestützt, kann dies durch temporäre Formfindungslager simuliert werden. Nach dem Anspannen der Membran treten in den Montagestützen Lagerreaktionen auf. Nach dem Beseitigen der Montagelager haben die Stahlbögen diesen Kräften zu widerstehen und werden verformt. Die Schnittgrößen in der Membran erfahren folglich eine Änderung. Das entspricht dem Formfindungsprozess, der an der von temporären Lagern gestützten Konstruktion nach dem Starten eines leeren Lastfalls erfolgt. Da die temporären Formfindungslager in diesem Schritt deaktiviert werden, übernehmen die Träger sämtliche Lasten und verformen sich. Die Verformung der Träger wirkt sich auch auf die Vorspannung in den Membranen aus. Diese in RFEM durch die Beseitigung der temporären Lager hervorgerufene Zustandsänderung entspricht dem Prozess der Entfernung von Montagestützen.

3.3 Pneumatisch gestützte Membran

Als drittes Beispiel wird eine pneumatisch stabilisierte Membran vorgestellt. Die Form der Membran wird durch die gegebenen Randbedingungen, eine Vorspannung und Innendruck bestimmt. Zur Veranschaulichung werden zwei separate Membrankonstruktionen mit unterschiedlichen Vorspannzuständen vorgestellt.

Berechnungsverfahren

- Zug
- Projektion

Das Berechnungsverfahren **Zug** ist für diesen Typ von Membrankonstruktionen zu bevorzugen.

Das Modell wird in der globalen XY-Ebene angeordnet (siehe Bild 3.18) und entsprechend den vorgegebenen Vorspannungs- und Innendruckwerten in eine Gleichgewichtslage verformt. Der ersten Konstruktion wird eine isotrope Vorspannung von 1 kN/m, der zweiten eine orthotrope Vorspannung von 2 kN/m in Kettrichtung und 1 kN/m in Schussrichtung verliehen.

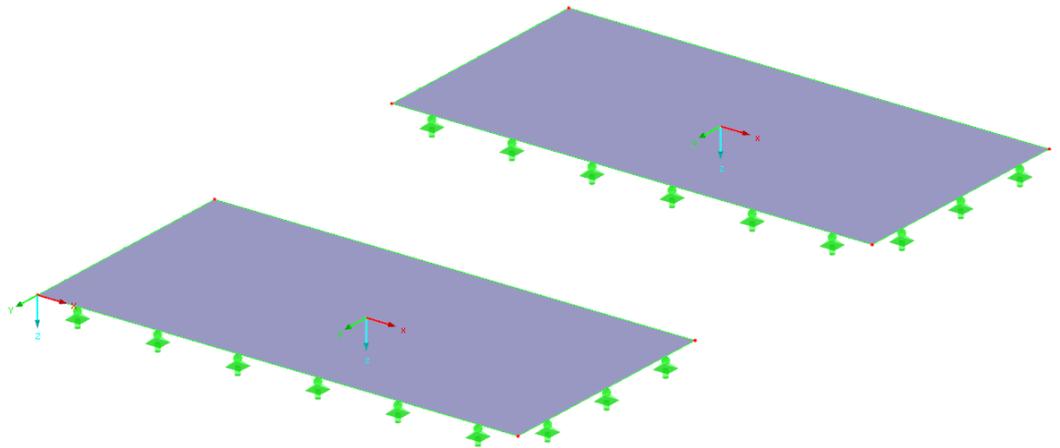


Bild 3.18: Ausgangsgeometrie der pneumatischen Membranen

Der Überdruck ist in beiden Konstruktionen gleich und beträgt -400 Pa (siehe Bild 3.19). Positiver Innendruck wirkt in Richtung der lokalen z-Achse der Fläche, negativer Innendruck entgegen der lokalen z-Flächenachse. In unserem Beispiel soll die pneumatische Konstruktion nach oben verformt werden, also entgegen der lokalen z-Achse der Fläche.

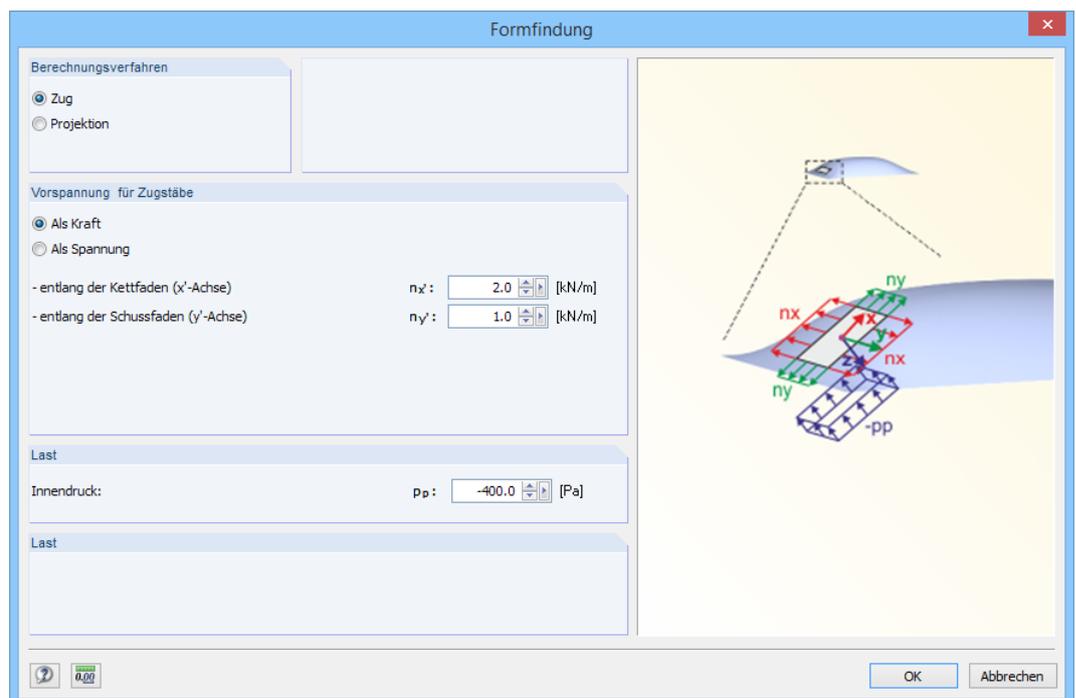


Bild 3.19: Definition von orthotroper Vorspannung und Innendruck

Nach dem Start der Berechnung konvergiert die Konstruktion gegen die Gleichgewichtsform (siehe Bild 3.20). Im Bild 3.21 kann man wieder eine gute Annäherung der resultierenden Vorspannung an die geforderte Vorspannung der Membrankonstruktion beobachten.

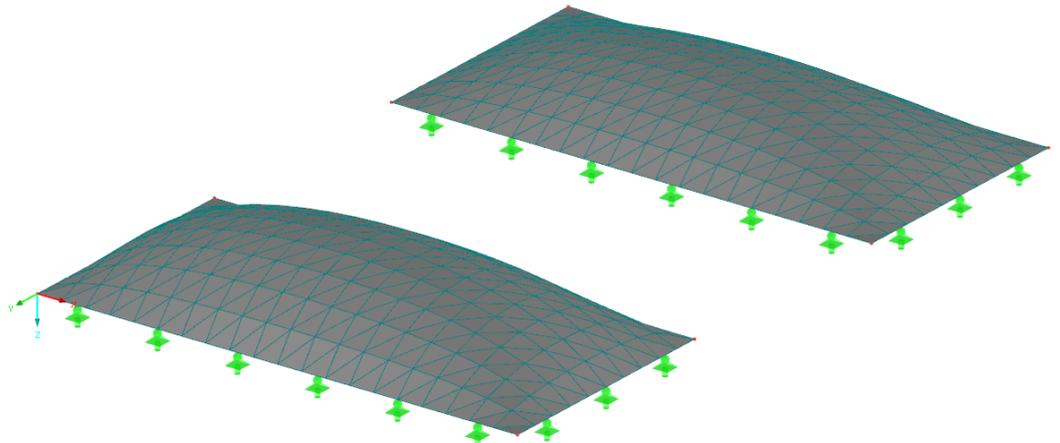


Bild 3.20: Endform der Membrankonstruktionen

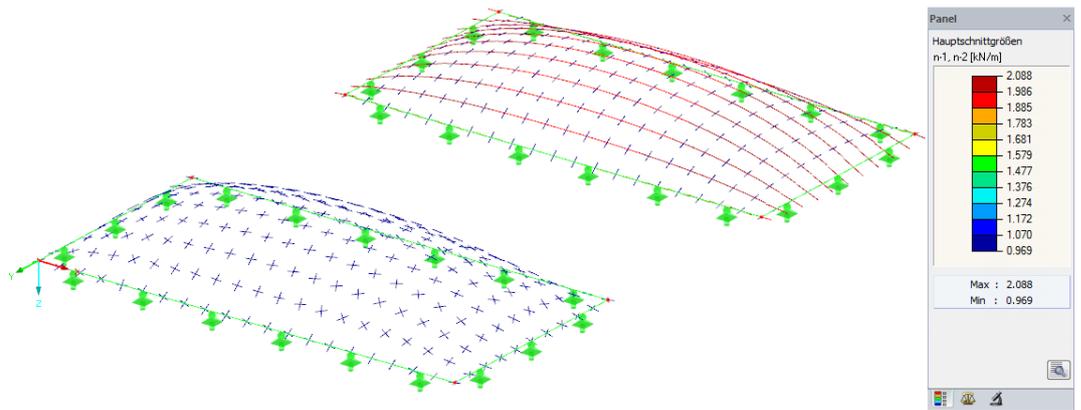


Bild 3.21: Vorspannung der Membrankonstruktionen

3.4 Kegelmembran

Dieses Beispiel stellt die letzte der vier Membranformen vor – eine Kegelmembran.

Berechnungsverfahren

- Zug
 Projektion

Das Modell, d. h. die Anfangsannäherung an die Form der Konstruktion, besteht aus Membranflächen, Seilen, einem Scheitelring und einem Zentralmast (siehe Bild 3.22). Bei kegelförmigen Membranen ist das Berechnungsverfahren **Projektion** für den Formfindungsprozess zu empfehlen.

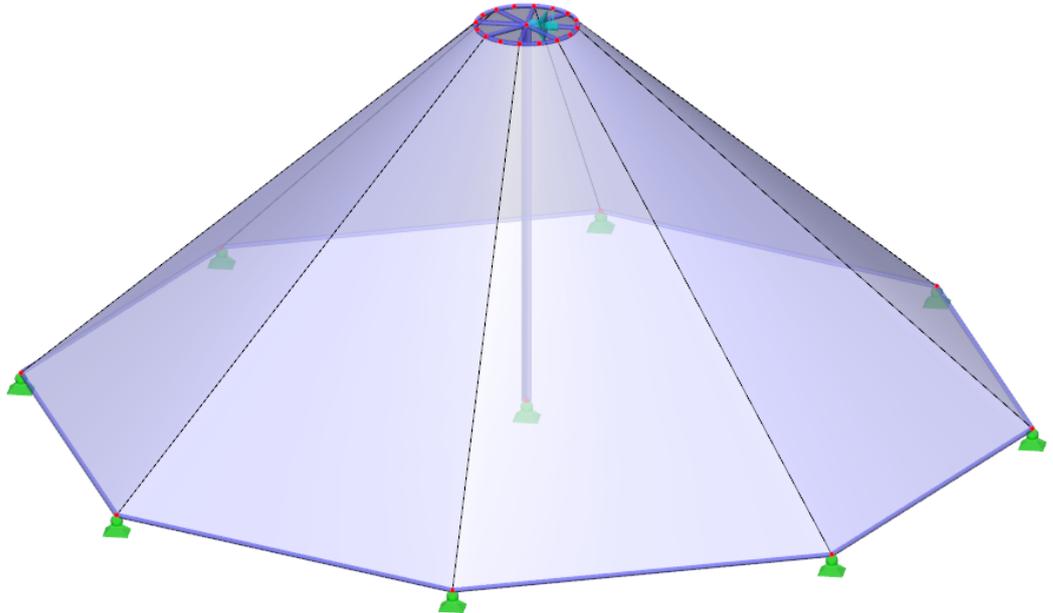


Bild 3.22: Ausgangsgeometrie der kegelförmigen Membrankonstruktion

Wie im Kapitel 1.4.1 auf Seite 4 erläutert, geht die Projektionsmethode von einer in der globalen XY-Ebene vorgegebenen Vorspannung aus, die dann entsprechend der Membranneigung angepasst wird. Vergrößert sich die Neigung der Membran, so wächst die Vorspannung in Richtung der Falllinien, während die Vorspannung in Richtung der Schichtlinien abnimmt. Definiert man eine isotrope Vorspannung in der Projektion, erhält man eine allgemeine Vorspannung der Membrankonstruktion im Raum.

Der Zentralmast, der die Membrankonstruktion stützt, ist am Fuß gelenkig gelagert. Diese Lagerung ermöglicht das Neigen des Mastes sowohl während des Formfindungsprozesses als auch während des Anspannens der Konstruktion. Während der Montage und auch während des Formfindungsprozesses muss der Mast gesichert werden, z. B. durch ein Formfindungslager (provisorische Montagestützung) am Mastkopf (siehe Bild 3.22). Man kann natürlich auch andere temporäre Stützungsarten verwenden, z. B. Behinderung der Verdrehung am Mastfuß. Der biegesteife Teil der Konstruktion muss sowohl beim Formfindungsprozess als auch beim Aufbau stabil sein.

Nachdem Erstellen des Modells sind die geforderten Vorspannungen zu definieren. Den Membranen wird eine isotrope Vorspannung (in Projektion) von 1 kN/m zugewiesen, die Seile mit einer mittleren Kraft von 10 kN vorgespannt.

Nach dem Start der Formfindung erhält man die im Bild 3.23 dargestellte Gleichgewichtsform.

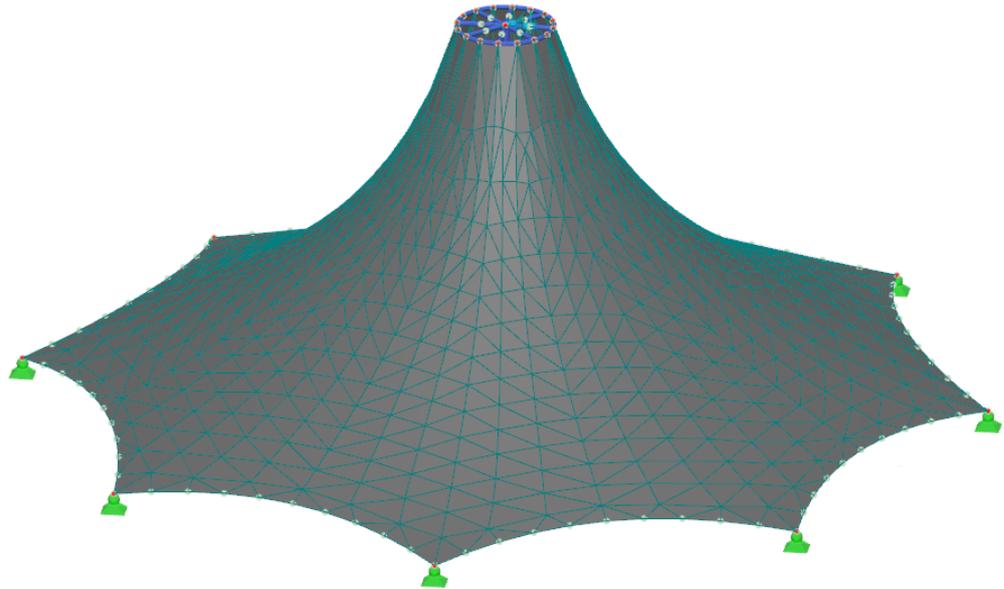


Bild 3.23: Endform der Membrankonstruktion

Die resultierende Vorspannung ist im Bild 3.24 dargestellt.

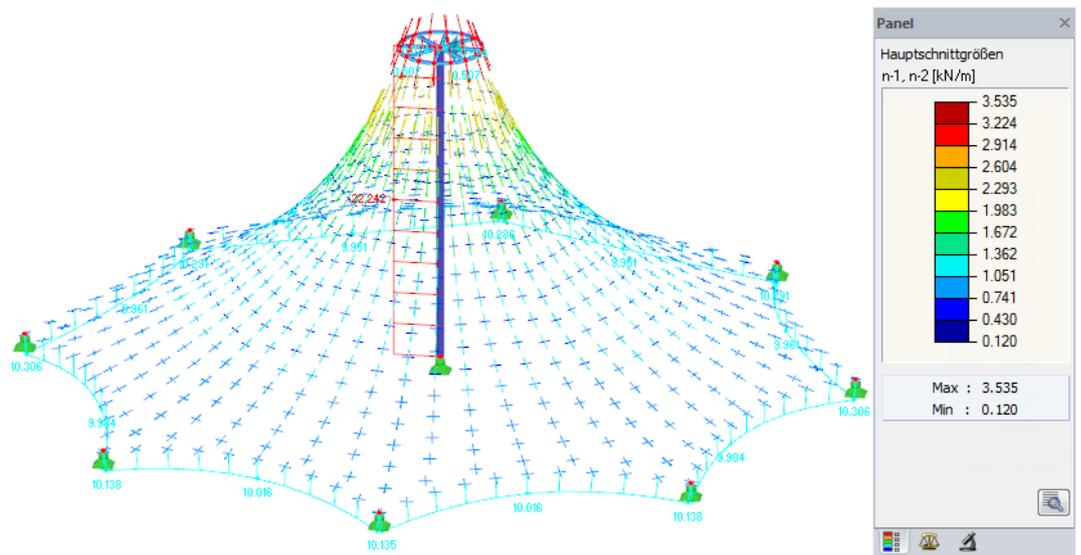


Bild 3.24: Resultierende Vorspannung

Wie erwähnt, führt eine in der Projektion definierte isotrope Vorspannung zu einer allgemeinen orthotropen Vorspannung in der räumlichen Lage der Membran. Die Vorspannung hängt von der Neigung an der jeweiligen Stelle ab. In unteren Teilen der Membran, wo die Neigung gering ist, kommt die Vorspannung der isotropen (in der Projektion vorgegebenen) Vorspannung nahe, während oben am Scheitel des Kegels die Vorspannung wegen der großen Neigung deutlich verändert wird.

Bei Bedarf kann die Vorspannung im Dialog *Formfindung* angepasst werden. Man kann eine radiale Anordnung der Kett- und Schussrichtungen festlegen und die Vorspannungswerte definieren (siehe Bild 3.25).

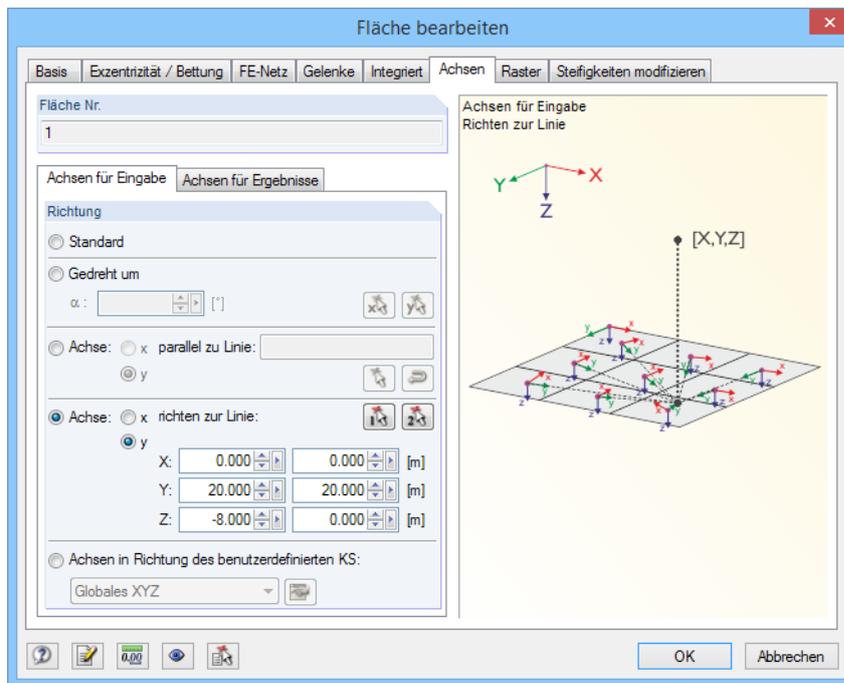


Bild 3.25: Radiale Ausrichtung der Achsen im Dialog *Fläche bearbeiten*, Register *Achsen*

Eine orthotrope, in einer Ebene vorliegende Gleichgewichtsvorspannung kann bei einer radialen Anordnung keine zwei konstanten Werte aufweisen (im Gegensatz zu einer orthogonal ausgerichteten Vorspannung in einer Ebene). Infolge der radialen Anordnung werden die Radialkräfte durch die tangentialen Kräfte beeinflusst. Tangentialkräfte bewirken aufgrund der Krümmung eine Zunahme der Radialkräfte in zentrischer Richtung.

Dies bedeutet: Wählt man eine radial angeordnete, orthotrope Vorspannung, sind die Werte der Vorspannung (in Kett- und Schussrichtung) in der Projektion für einen Punkt im *Abstand vom Mittelpunkt* r zu definieren. In den anderen Abständen wird die radiale Vorspannung so errechnet, dass sie in der Ebene im Gleichgewicht steht. So kann das Kräftegleichgewichtssystem in die räumliche Lage der Membran projiziert werden.

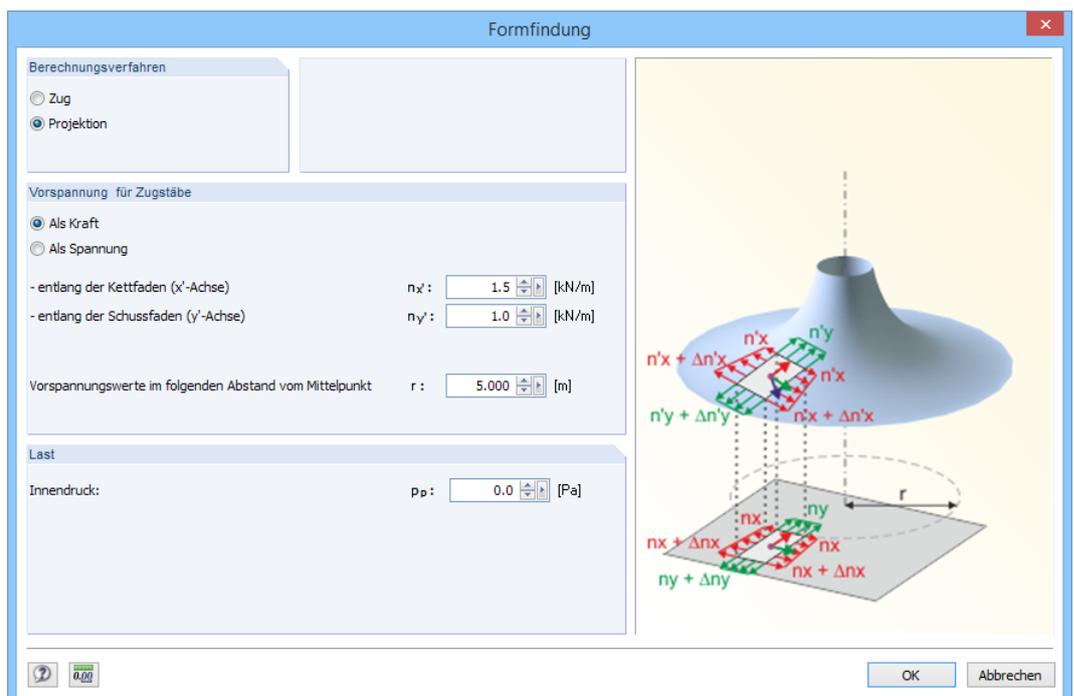


Bild 3.26: Radiale Vorspannung im Dialog *Formfindung*

Das Radialfeld der Vorspannung in der Projektion kann sowohl über die in Kett- und Schussrichtung vorgegebenen Kräfte als auch über den Abstand der definierten Vorspannung vom Mittelpunkt angepasst werden. Die auf den ersten Blick geringen Vorspannungswerte, die im Mittelpunkt vorliegen, wachsen mit zunehmender Neigung der Membran. Dies lässt sich gut am Beispiel der Kegelmembran veranschaulichen. Die Änderung der Vorspannung von isotrop auf orthotrop (siehe Bild 3.26) führt zu der im Bild 3.27 dargestellten Endform der Membrankonstruktion.

Bei unterschiedlichen Vorgaben der Vorspannung werden auch verschiedene Formen generiert.

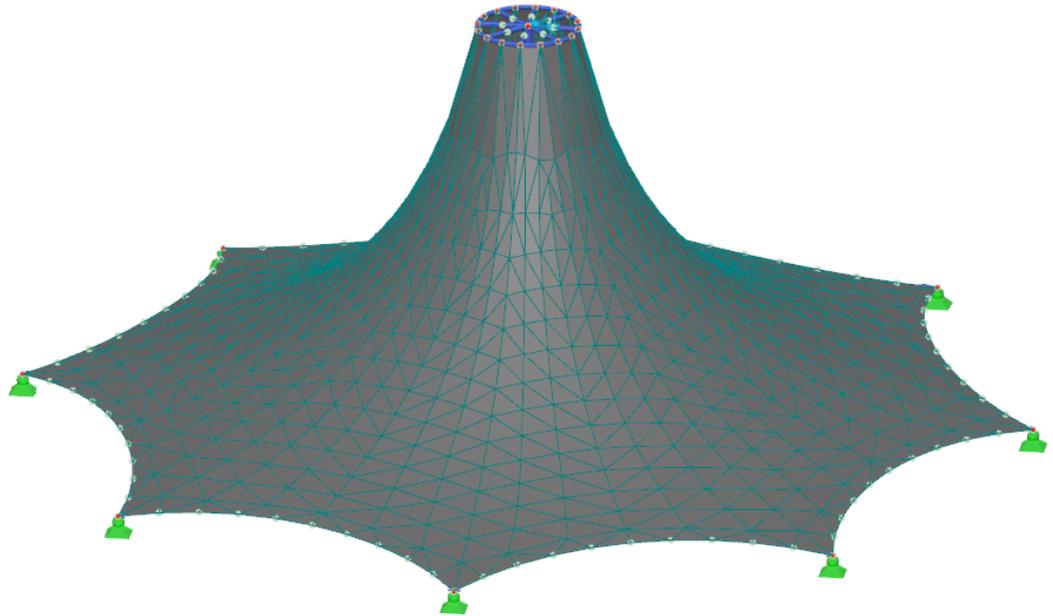


Bild 3.27: Endform der Membrankonstruktion

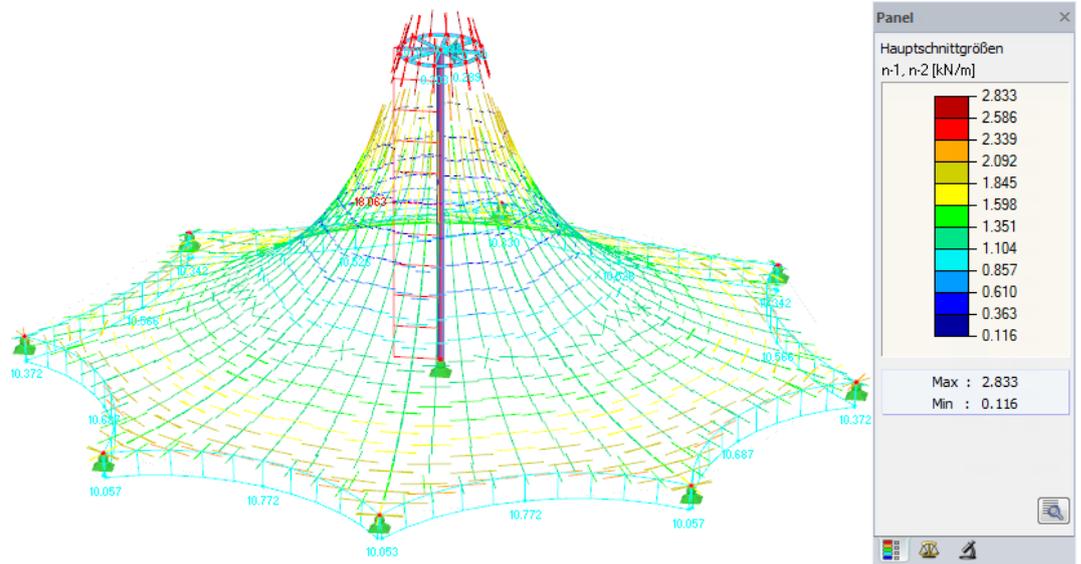


Bild 3.28: Resultierende Vorspannung

Zur weiteren Veranschaulichung der Projektionsmethode kann man die Punkte des Rings der Kegelmembran in eine Ebene verschieben und dann verschiedene Vorspannungen in der Projektion generieren. Anschließend kann man die Position des Rings nach oben verschieben und dabei die Änderungen der Vorspannung in Abhängigkeit von der Neigung betrachten. Bei einheitlicher Vorgabe (z.B. Isotropie in der Projektion) wird die resultierende Vorspannung im Raum deutlich variieren.



Definiert man eine radiale Orthotropie, gilt eine Beschränkung für das Verhältnis zwischen radialer und tangentialer Vorspannung. Die Eingabewerte für die Vorspannung sollen im Verhältnis 1:1 bis 1:2 (radiale zu tangentialer Vorspannung) definiert werden. Diese Beschränkung soll verhindern, dass Druckkräfte bei Berechnung der radial orthotropen Gleichgewichtsvorspannung in der Projektion auftreten. Die Einschränkung gilt nur für die Projektionsmethode.



Die Projektionsmethode eignet sich für hohe kegelförmige Membranen, da sie der Verengung des Membranhalses vorbeugt – ein Effekt bei der Zugmethode. Das [Bild 3.29](#) zeigt ein Ergebnis, das sich bei Anwendung des Berechnungsverfahrens *Zug* einstellt.

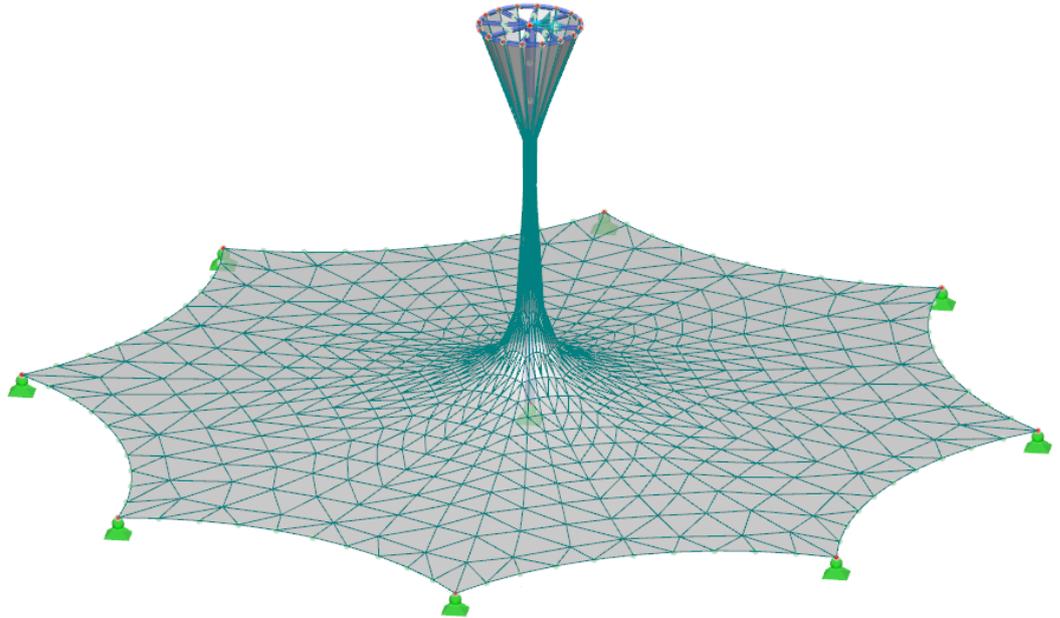


Bild 3.29: Ergebnis bei Anwendung der Zugmethode

Die Endform wird auch durch die Anzahl der Iterationen beeinflusst, die für den Ansatz der Vorspannung vorgegeben ist.

4 Allgemeine Hinweise

4.1 Kontrolle der Einstellungen

Besteht eine Membrankonstruktion aus mehreren Flächen (siehe [Kapitel 3.4](#)), so wird davon ausgegangen, dass für alle Flächen gleiche Werte von Vorspannungen und identische Kett- und Schussrichtungen definiert werden. Ist dies nicht der Fall, gibt RFEM eine entsprechende Warnung aus (siehe [Bild 4.1](#)).

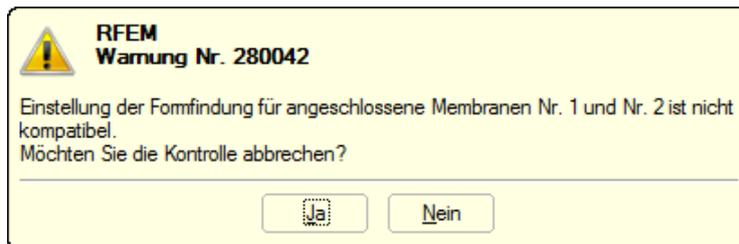


Bild 4.1: Warnmeldung

Liegen jedoch selbstständige Membranen vor oder werden die einzelnen Flächen voneinander durch Lager, Seile oder Träger getrennt, handelt es sich um unabhängige Flächen, bei denen die Kompatibilität der Eingabedaten nicht überprüft wird.

Im [Bild 4.2](#) ist der Grundriss einer bogengestützten Membran dargestellt. Das Mittelfeld wird durch ein Seil geteilt. Stäbe sind mit römischen Ziffern, Flächen mit arabischen Ziffern gekennzeichnet. Die Kompatibilität wird zwischen den Flächen 1 und 2 und den Flächen 5 und 6 überprüft.

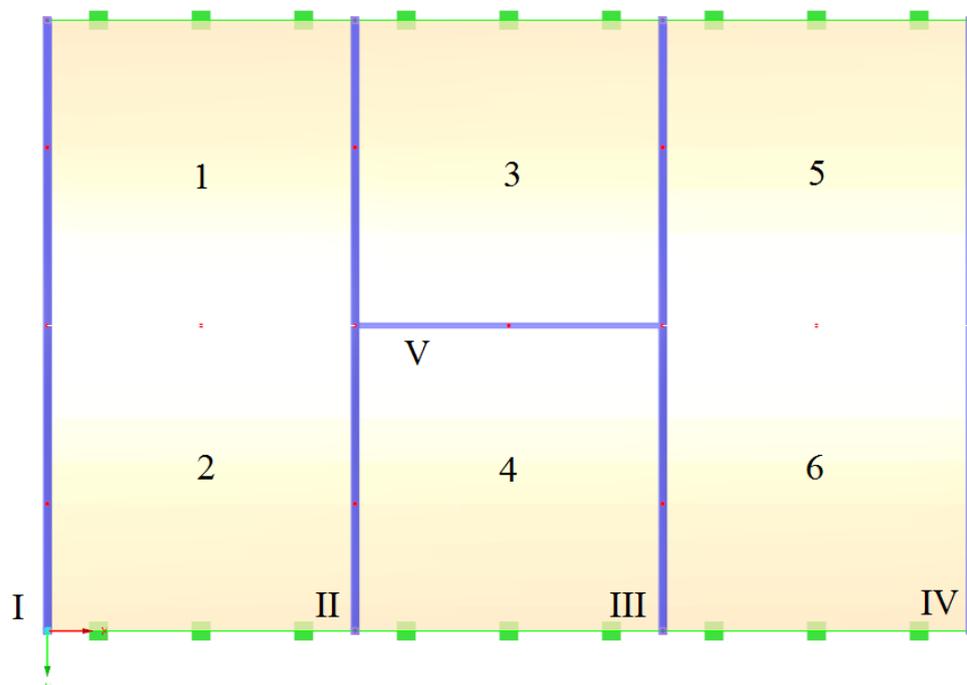


Bild 4.2: Flächen einer bogengestützten Membran

4.2 Dreieckelemente

Für die Modellierung von Membrankonstruktionen empfiehlt es sich, das FE-Netz mit Dreieckelementen generieren zu lassen. Bei Viereckelementen treten Verwölbungseffekte auf. Aus diesem Grund werden Membranflächen automatisch mit Dreieckelementen vernetzt.

Die Einstellungen werden im Dialog *FE-Netz* verwaltet. Dieser Dialog lässt sich über das Menü **Berechnung** → **FE-Netz-Einstellungen** aufrufen.

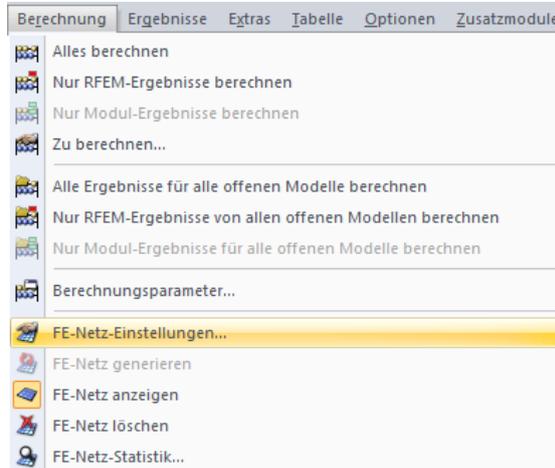


Bild 4.3: Aufruf der *FE-Netz-Einstellungen*

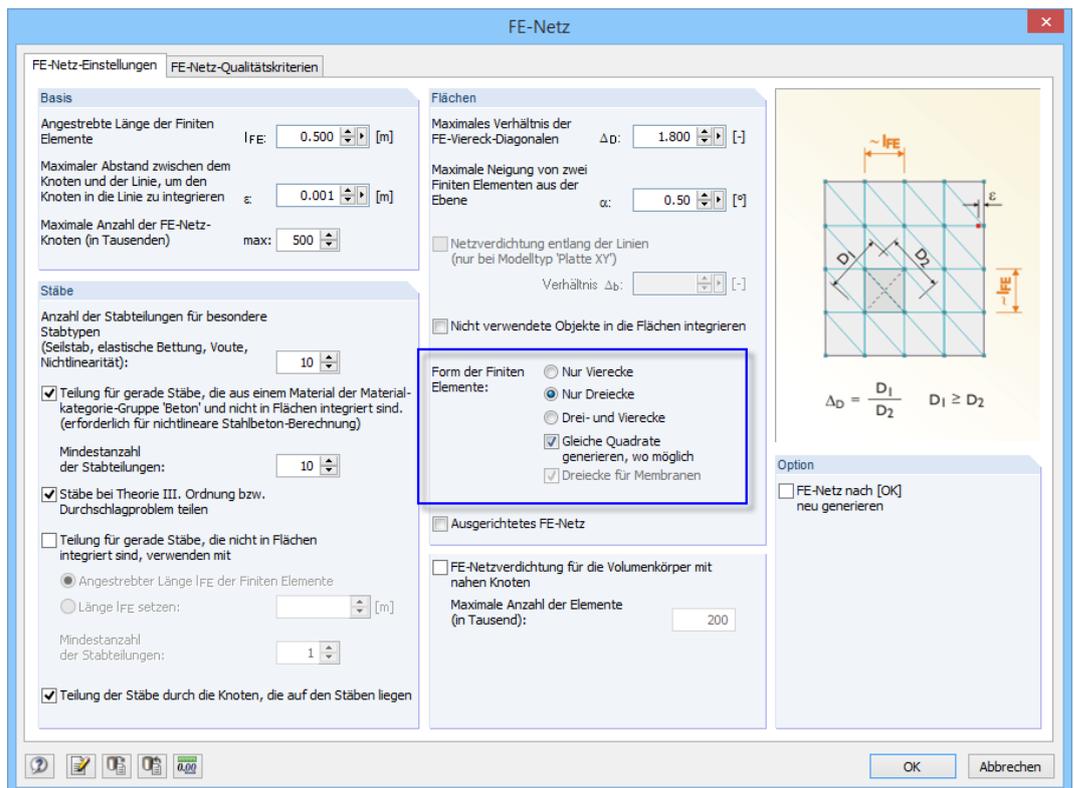


Bild 4.4: Dialog *FE-Netz*, Register *FE-Netz-Einstellungen*

4.3 Seile

Es bestehen zwei Möglichkeiten, Kräfte für Seile zu definieren: Die *Durchschnittliche Kraft im Seil* ist für die Seile vorzusehen, die mit den Membranen der Konstruktion verbunden sind. Die *Kraftdichte* hingegen ist für reine Seilnetze anzusetzen.

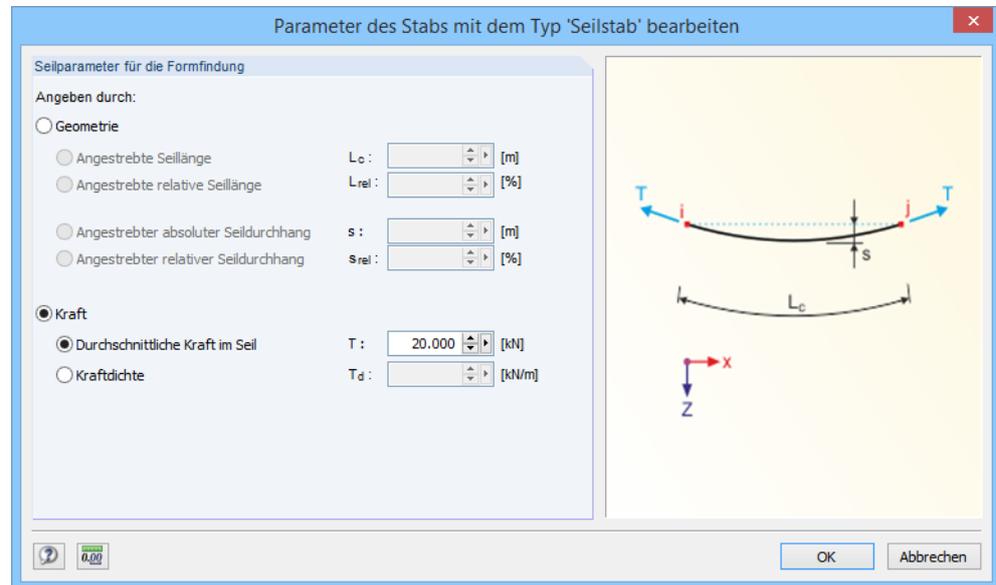


Bild 4.5: Definition der geometrischen Bedingungen oder der Kräfte für Seile

Wird eine *Durchschnittliche Kraft im Seil* vorgegeben und erweist sich der definierte Wert während der Berechnung zu gering, so wird das Seil bei Überschreitung der Länge $l_c = 0,4\pi l$ versteift. Folglich tritt keine Dehnung im Seil mehr auf (l als Abstand zwischen den Punkten i und j , siehe Bild 4.5).

Die vorgegebenen Werte der geforderten Vorspannung oder Geometrie von Seilen werden als resultierende Werte im Raum betrachtet. Die für Seile eingegebenen Werte werden bei Anwendung der Projektionsmethode nicht entsprechend der Neigung (wie bei Membranen) angepasst, da es sich um eindeutige, d. h. physikalisch reale Vorgaben handelt.

5 RF-ZUSCHNITT

Dieses Kapitel beschreibt die Dialoge und Funktionen des Moduls RF-ZUSCHNITT.

5.1 Aufruf des Moduls

Für die Arbeit mit RF-ZUSCHNITT ist zunächst das Modul zu aktivieren: Dies erfolgt, indem man im Register *Optionen* des Dialogs *Neues Modell - Basisangaben* bzw. *Modell - Basisangaben bearbeiten* das Kontrollfeld **RF-ZUSCHNITT** anhakt.

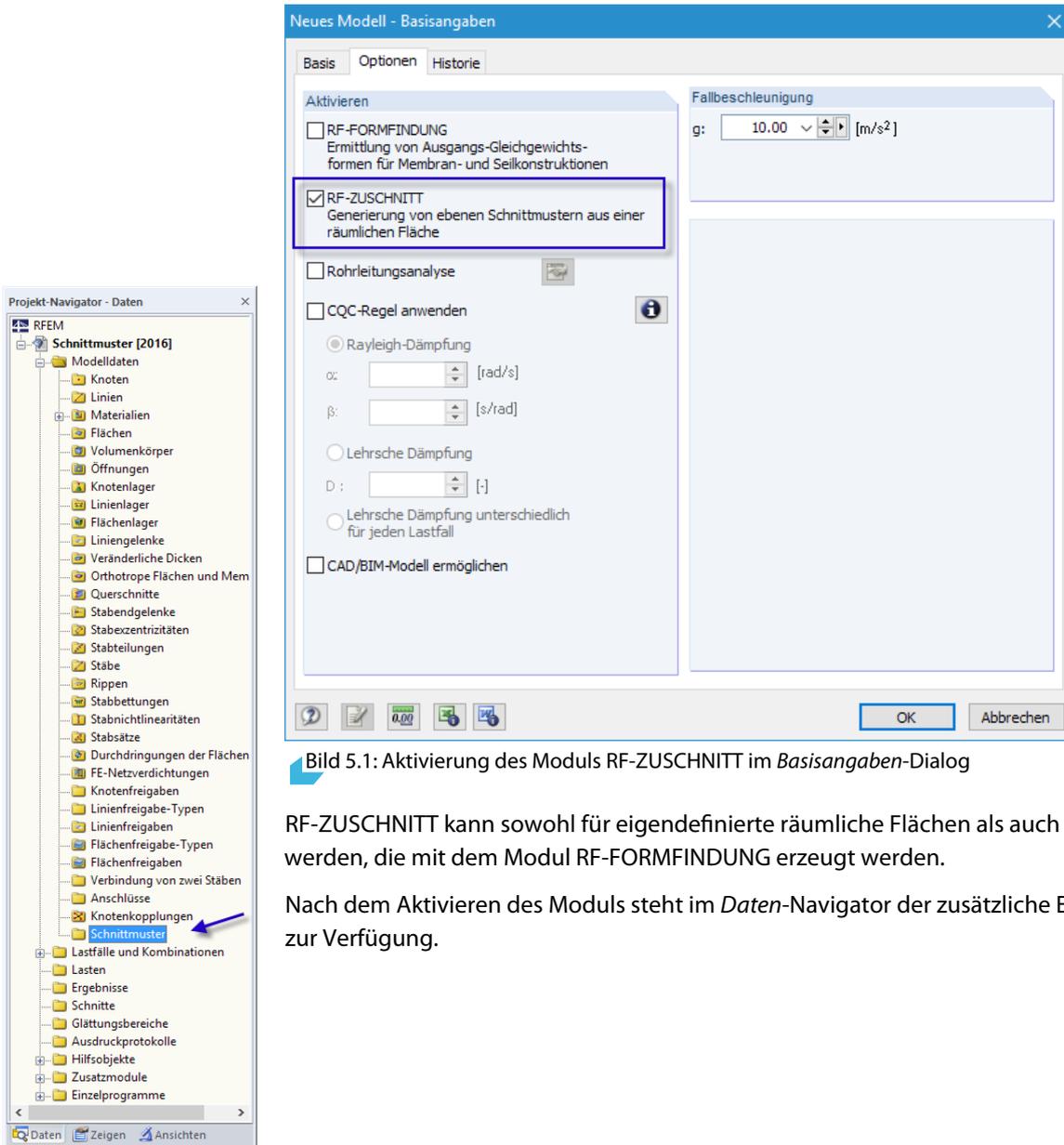


Bild 5.1: Aktivierung des Moduls RF-ZUSCHNITT im *Basisangaben*-Dialog

RF-ZUSCHNITT kann sowohl für eigendefinierte räumliche Flächen als auch für Systeme genutzt werden, die mit dem Modul RF-FORMFINDUNG erzeugt werden.

Nach dem Aktivieren des Moduls steht im *Daten*-Navigator der zusätzliche Eintrag *Schnittmuster* zur Verfügung.

5.2 Schnittlinien

Das Schnittmuster ist über Randlinien zu definieren. Ist die Aufteilung der Membranflächen in der Grundposition für den Zuschchnitt zu groß, kann die Fläche über Schnittlinien in Teilstreifen zerlegt werden. Hierzu stehen für das Modul RF-ZUSCHNITT zwei spezielle Linienfunktionen zur Verfügung. Sie sind über das *Linien*-Kontextmenü oder das Menü

Einfügen → **Modelldaten** → **Linien** → **Schnitt mittels zwei Linien** bzw. **Schnittfläche** zugänglich.

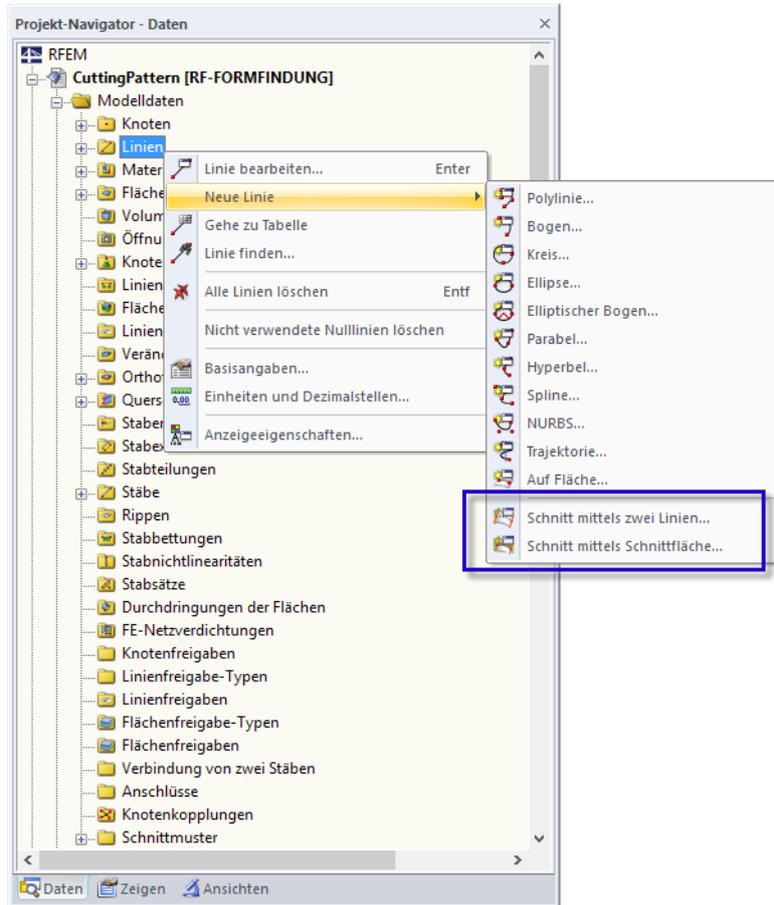
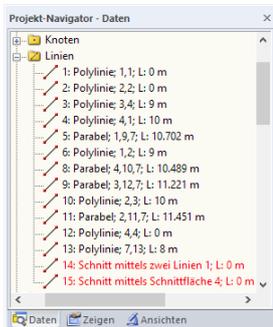


Bild 5.2: Linientypen für RF-ZUSCHNITT im *Linien*-Kontextmenü



Diese beiden Linientypen wirken sich nicht auf die Geometrie des Modells aus. Sie können somit unabhängig vom Modell definiert werden.

Die Schnittlinien werden in der Grafik nur dann dargestellt, wenn das FE-Netz generiert wurde. Bei fehlendem Netz sind die entsprechenden Einträge im Navigator rot gekennzeichnet.

In den Dialogen für beide Linientypen ist zunächst im Register *Basis* die Fläche anzugeben, auf der sich die Linie befindet (siehe Bild 5.3).

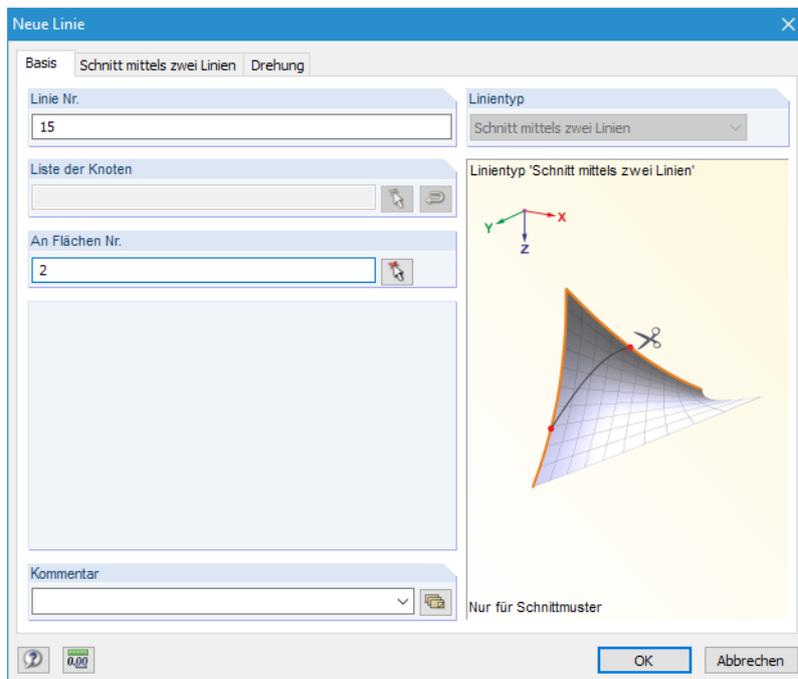


Bild 5.3: Dialog *Neue Linie*, Register *Basis*

Die Fläche lässt sich mit der Schaltfläche  grafisch bestimmen. Da die Linien auch über mehrere Flächen gelegt werden können, sind Mehrfacheinträge möglich.

Schnitt mittels zwei Linien

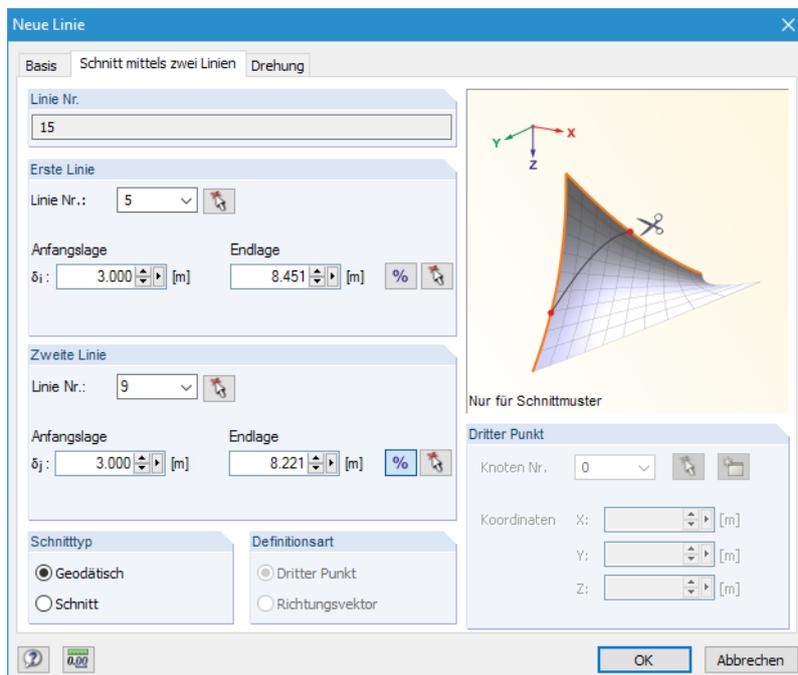


Bild 5.4: Dialog *Neue Linie*, Register *Schnitt mittels zwei Linien*

Im zweiten Dialogregister sind die Linien sowie die Punkte auf den Linien anzugeben, die als Definitionsknoten der Schnittlinie dienen. Die Linien lassen sich mit  grafisch auswählen.

Die Schaltfläche  ermöglicht den Wechsel zwischen der Eingabe von relativen und absoluten Abständen.

Mit  können die Relativabstände auch grafisch im Arbeitsfenster bestimmt werden.

Im Abschnitt *Schnitttyp* ist festzulegen, wie die Schnittlinie erzeugt werden soll:

- *Geodätisch*: Dies ist die kürzeste Linie zwischen den Definitionspunkten auf der Oberfläche.
- *Schnitt*: Durch die Fläche wird eine Ebene gelegt, die über einen dritten Punkt oder einen Richtungsvektor definiert werden kann.

Schnitt mittels Schnittfläche

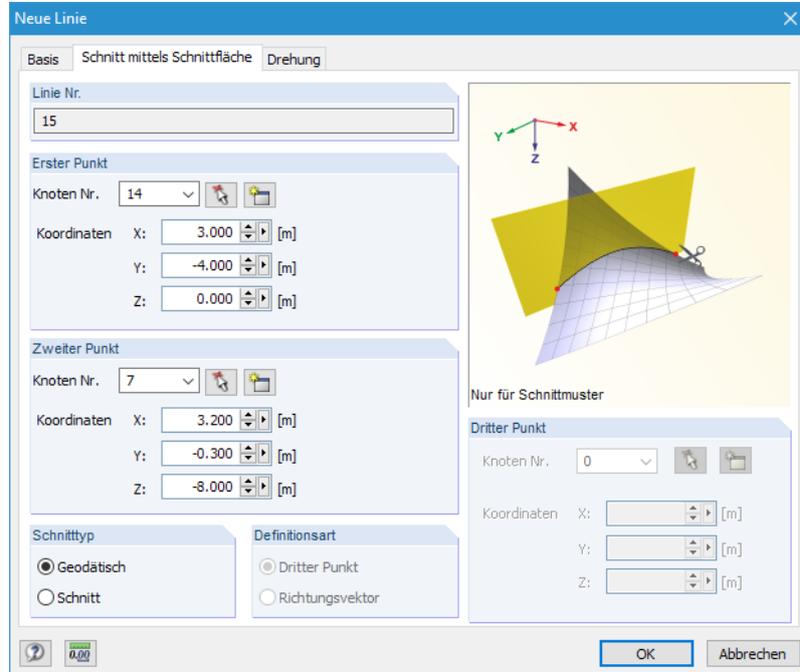


Bild 5.5: Dialog *Neue Linie*, Register *Schnitt mittels Schnittfläche*

Im zweiten Dialogregister sind die Punkte anzugeben, die die Schnittebene definieren. Die Knoten lassen sich mit grafisch auswählen oder mit neu anlegen.

Im Abschnitt *Schnitttyp* ist festzulegen, wie die Schnittlinie erzeugt werden soll:

- *Geodätisch*: Dies ist die kürzeste Linie zwischen den Schnittpunkten auf der Oberfläche.
- *Schnitt*: Die Schnittebene wird über einen dritten Punkt oder einen Richtungsvektor definiert.



Die Schnittlinien werden nur angezeigt, wenn das Netz generiert ist!

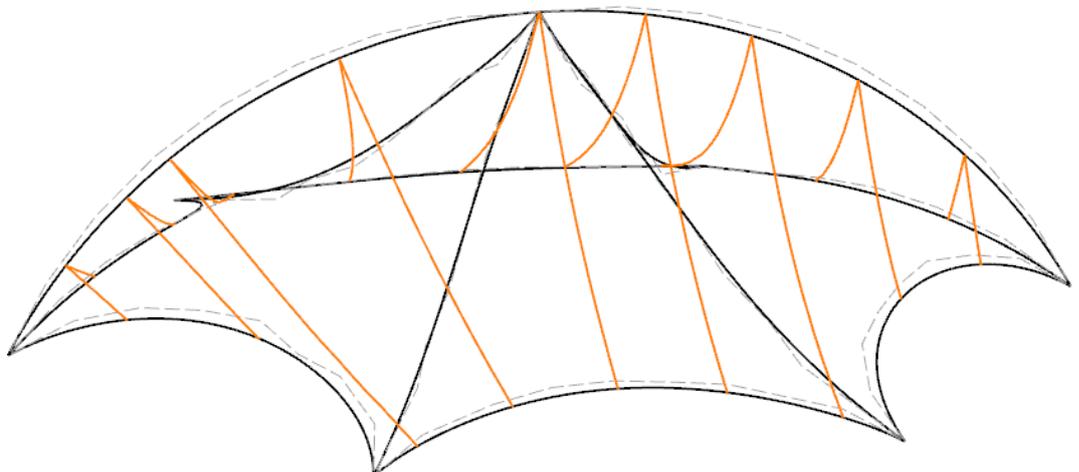


Bild 5.6: Schnittlinien (orange)

5.3 Schnittmuster

Für die Erzeugung von Zuschnitten sind die Membranflächen in sogenannte *Schnittmuster* aufzuteilen. Diese Objekte können über die Randlinien der Membranen sowie über benutzerdefinierte Schnittlinien (siehe [Kapitel 5.2](#)) erstellt werden.

Ein neues Schnittmuster wird angelegt über das Menü

Einfügen → **Modelldaten** → **Schnittmuster** → **Dialog**

oder das *Schnittmuster*-Kontextmenü im *Daten*-Navigator.

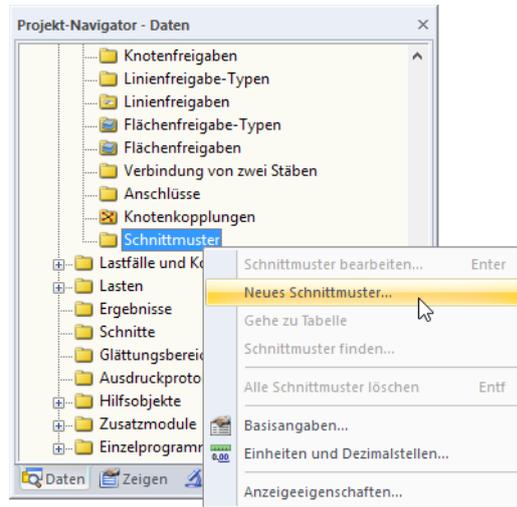


Bild 5.7: Anlegen eines neuen Schnittmusters über Kontextmenü

Es erscheint der Dialog *Neues Schnittmuster*.

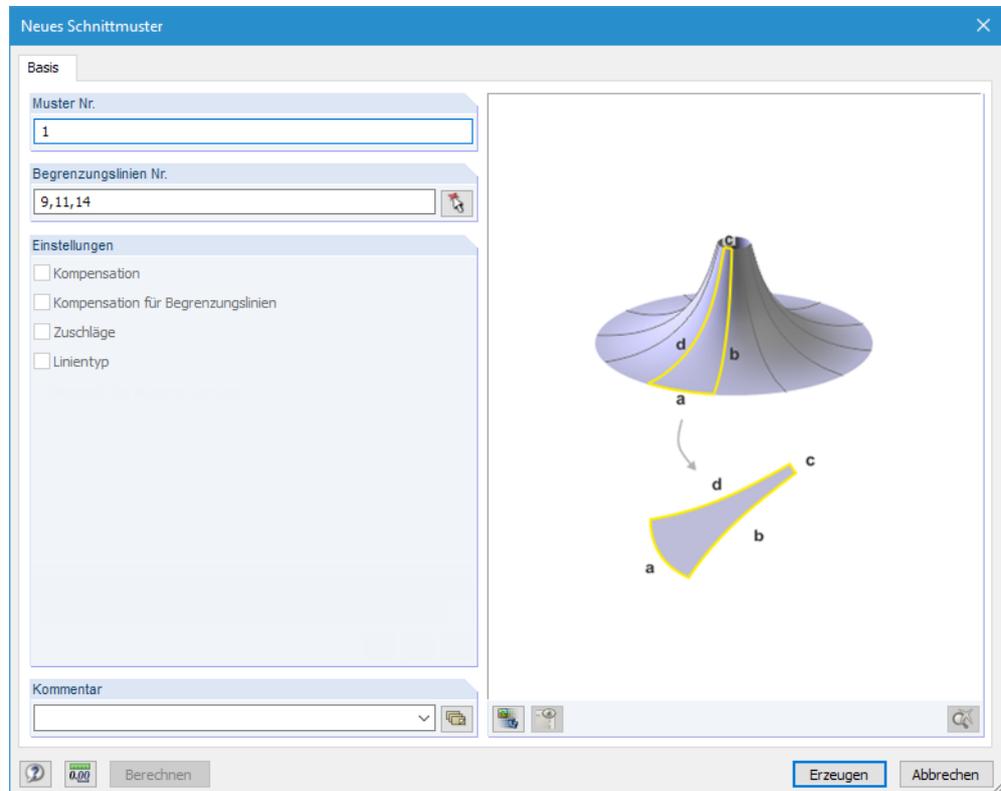


Bild 5.8: Dialog *Neues Schnittmuster*

Als *Begrenzungslinien* des Schnittmusters kommen „echte“ Linien oder Schnittlinien infrage. Die Linien können mit der Schaltfläche grafisch festgelegt werden. RFEM erkennt Schnittpunkte automatisch.

Erzeugen

Sind die Begrenzungslinien festgelegt, kann das Schnittmuster mit einem Klick auf [Erzeugen] generiert werden.

Es erscheint der Dialog *Schnittmuster bearbeiten*.

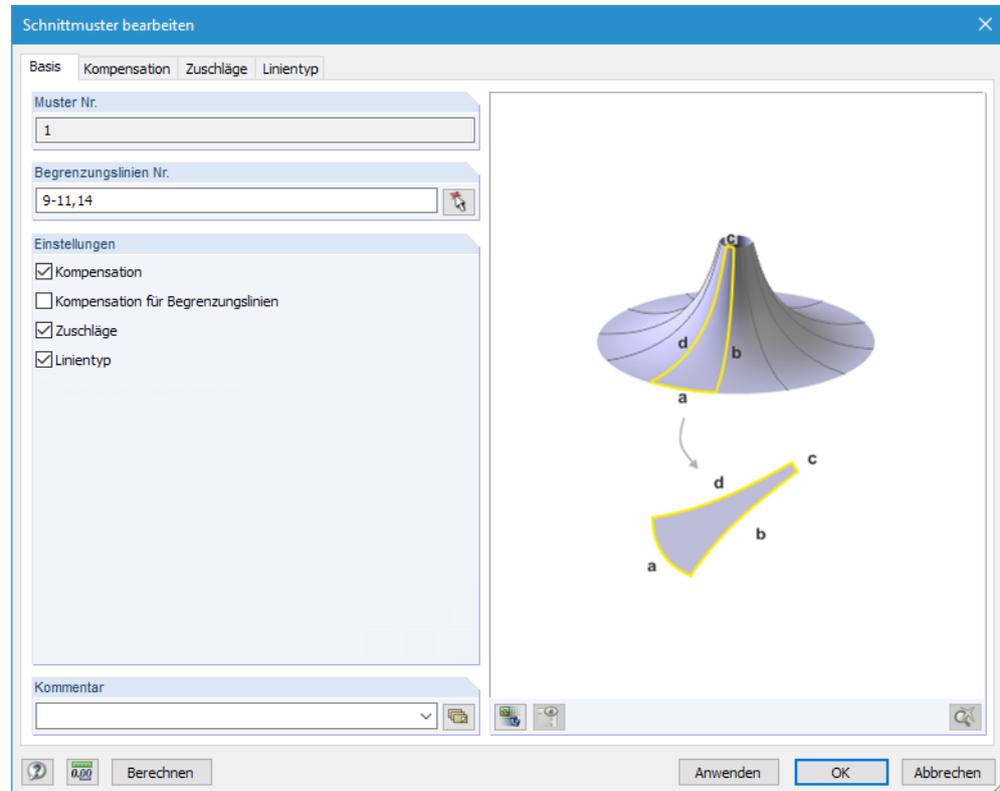


Bild 5.9: Dialog *Schnittmuster bearbeiten*, Register *Basis*

In diesem Dialog sind Vorgaben zur Kompensation und für Randzugaben möglich. Die weiteren Dialogregister werden von den aktiven Parametern des Abschnitts *Einstellungen* bestimmt.

Allgemeine Hinweise

Folgende Grundsätze sind beim Erstellen eines Schnittmusters zu beachten:

- Das Schnittmuster darf nicht ausschließlich über Schnittlinien definiert werden. Es muss mindestens eine systemrelevante Begrenzungslinie vorhanden sein.
- RF-ZUSCHNITT prüft, ob benachbarte Schnittmuster vorliegen. Die Berechnung sorgt dafür, dass gemeinsame Linien die gleiche Länge haben.
- RF-ZUSCHNITT klassifiziert die Linien als Begrenzungslinien oder Schweißlinien. Im Register *Linientyp* kann eine Schweißlinie in eine Begrenzungslinie geändert werden (siehe [Seite 42](#)).



Schnittmuster werden im Arbeitsfenster durch einen dicken Punkt symbolisiert. Wenn ein Eintrag im Navigator rot gekennzeichnet ist, liegt eine fehlerhafte Definition des Schnittmusters vor.

Anwenden

Die vorläufige Form des Zuschnitts kann mit der Schaltfläche [Anwenden] erzeugt werden (siehe [Kapitel 5.4.2, Seite 44](#)).



In der Dialoggrafik lässt sich das Schnittmuster mit der Schaltfläche [Grafik oder Rendering] darstellen (siehe [Bild 5.12, Seite 40](#)).

Kompensation

Dieses Register steht zur Verfügung, wenn im *Basis*-Register die *Kompensation* aktiviert ist.

Einstellungen

- Kompensation
- Kompensation für Begrenzungslinien
- Zuschläge
- Linientyp
- Material den Mustern zuordnen

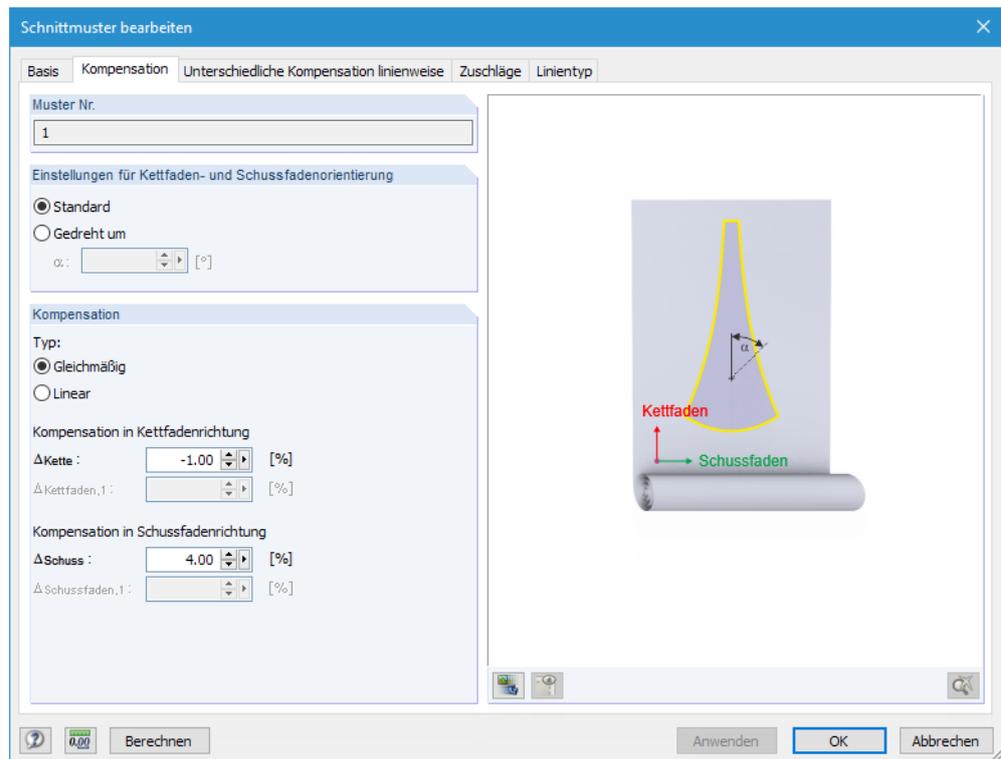


Bild 5.10: Dialog *Schnittmuster bearbeiten*, Register *Kompensation*

In der Regel werden die Abmessungen eines Schnittmusters durch einen kleinen Prozentanteil reduziert, sodass die Membran nach dem Aufbringen der Vorspannung die zuge dachte Endform erreicht. Auf diese Weise lassen sich Kriecheffekte der Membran kompensieren.

Einstellungen für Kettfaden- und Schussfadenorientierung

Die Kompensation lässt sich getrennt für Kett- und Schussfadenrichtung vorgeben. Als *Standard* werden die Kettfäden in Richtung der Flächenachse x , die Schussfäden in Richtung der Achse y angenommen. Falls die Struktur des Gewebes für den Zuschnitt anders ausgerichtet ist, kann die Orientierung um einen Winkel α gedreht werden.



In der Dialoggrafik werden die Flächenachsen dargestellt, wenn über die Schaltfläche [Grafik oder Rendering] auf die Modellansicht umgestellt wird (vgl. Bild 5.12).

Kompensation

Ein positiver Wert der Kompensation reduziert die Zuschnitte, ein negativer Wert verlängert sie entsprechend für die Richtung der Kett- oder Schussfäden.



Die Kompensation bezieht sich auf die nicht belastete Länge der Membranbahn („Urzustand“). Mit den Parametern der Kompensation wird dann nach dem Vorspannen die Endform erreicht, die z. B. mit RF-FORMFINDUNG ermittelt wurde. Die Kompensation kann nicht direkt über die definierte Vorspannung ermittelt werden.

Die Kompensation kann *Gleichmäßig* oder *Linear* vorgegeben werden. Letztgenannte Option ermöglicht es, linear veränderliche Dehnungsanteile für die Kett- und Schussfadenrichtungen vorzugeben. Dies kann z. B. bei konischen Modellen erforderlich sein. Die Dehnungen Δ_0 und Δ_1 beziehen sich auf die Ränder des Schnittmusters gemäß Symbolskizze.



Bei Eingaben zur Kompensation ist es erforderlich, das Schnittmuster erneut zu **Berechnen** (siehe Kapitel 5.4.2, Seite 44, Abschnitt „Endgültige Berechnung“).

Unterschiedliche Kompensation linienweise

Dieses Register steht zur Verfügung, wenn im *Basis*-Register die *Kompensation für Begrenzungslinien* aktiviert ist.

Einstellungen

- Kompensation
- Kompensation für Begrenzungslinien
- Zuschläge
- Linientyp
- Material den Mustern zuordnen

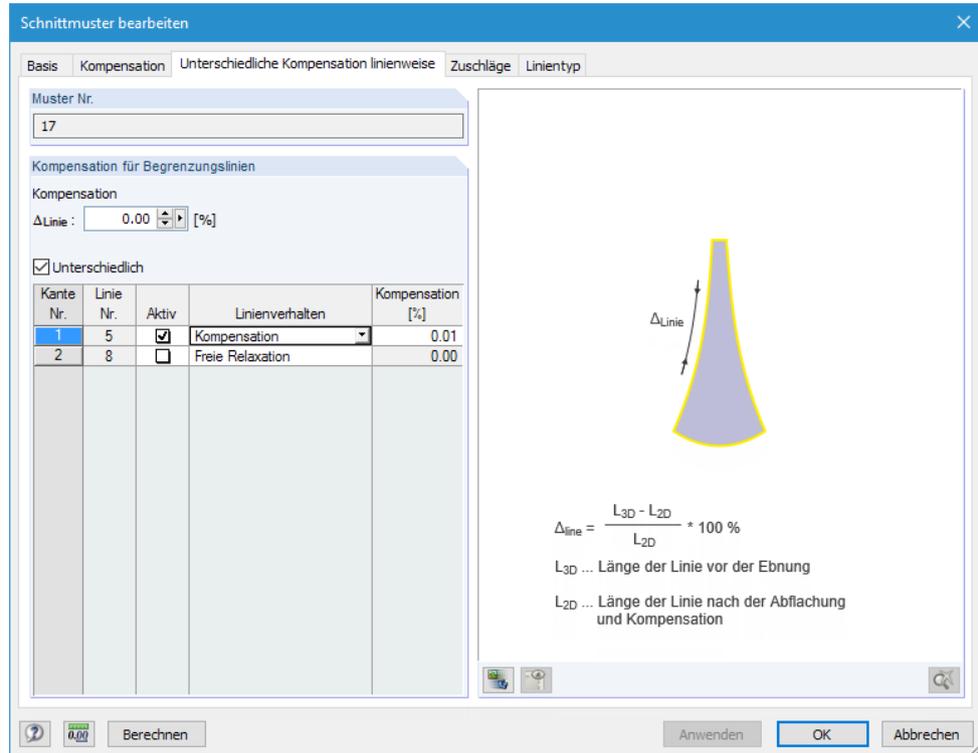


Bild 5.11: Dialog *Schnittmuster bearbeiten*, Register *Unterschiedliche Kompensation linienweise*

Eine unterschiedliche Kompensation wird benötigt, um eine Liniengleichheit z. B. bei einem festen Auflager zu erreichen. Man stelle sich eine Randbefestigung an einem Stahlrohr vor. Da die Länge des Stahlrohrs nicht kompensiert wird, bleibt die Länge der Membran gleich.

Im Eingabefeld Δ_{Linie} kann ein globaler Wert der Kompensation angegeben werden. Nach dem Anhaken des Kontrollfeldes *Unterschiedlich* besteht in der Tabelle die Möglichkeit, Linien *Aktiv* zu setzen oder zu deaktivieren. Die *Kompensation* kann dann auch individuell zugewiesen werden.

Das *Linienverhalten* kann über eine Kompensation oder eine freie Relaxation (Verschiebbarkeit) beschrieben werden. Die Auswahl ist in der Liste des Eingabefeldes möglich.

Im Renderingmodus wird die Linie der aktuellen Zeile in der Selektionsfarbe gekennzeichnet.

Linienverhalten

- Freie Relaxation
- Kompensation
- Freie Relaxation

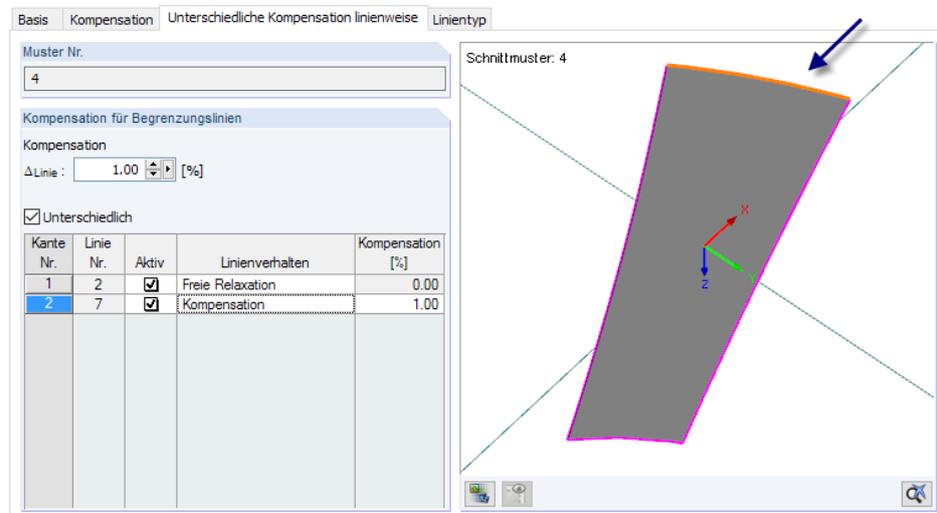


Bild 5.12: Renderingmodus mit Selektion der aktiven Tabellenzeile

Zuschläge

Dieses Register steht zur Verfügung, wenn im *Basis*-Register die *Zuschläge* aktiviert sind.

Einstellungen

- Kompensation
- Kompensation für Begrenzungslinien
- Zuschläge
- Linientyp
- Material den Mustern zuordnen

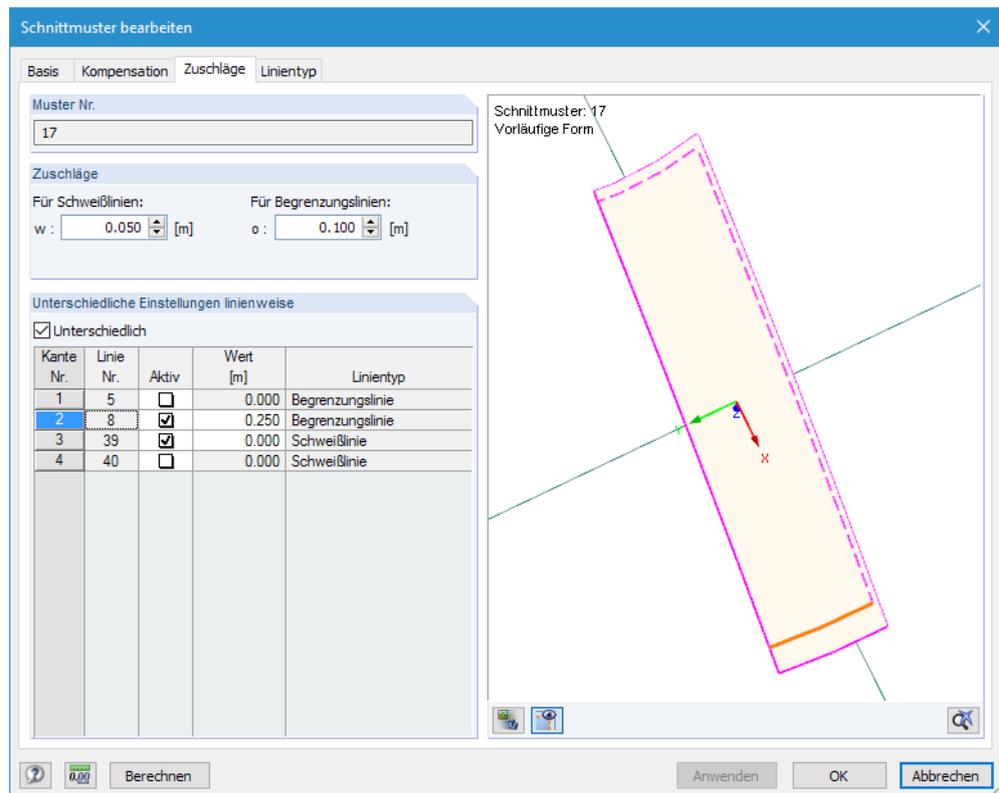


Bild 5.13: Dialog *Schnittmuster bearbeiten*, Register *Zuschläge*

Zugaben sind erforderlich, um die Membran an Randlinien zu befestigen oder für Überlappungen zum Verschweißen der Bahnen.

Die Zuschläge können global *Für Schweißlinien* und *Für Begrenzungslinien* vorgegeben werden. Die Linientypen werden im Register *Linientyp* verwaltet und können dort bei Bedarf angepasst werden (siehe Seite 42).

Nach dem Anhaken des Kontrollfeldes *Unterschiedlich* besteht in der Tabelle die Möglichkeit, Linien *Aktiv* zu setzen oder zu deaktivieren. Der *Wert* des Zuschlags kann dann individuell zugewiesen werden.



In der Dialoggrafik lassen sich die Parameter überprüfen, wenn mit der Schaltfläche [Grafik oder Rendering] in den Renderingmodus gewechselt wird (siehe Bild 5.13). Die Linie der aktuellen Zeile ist in der Selektionsfarbe gekennzeichnet.



Mit der Schaltfläche [Musterüberlappung] können die Zuschläge ein- und ausgeblendet werden. Auf diese Weise lässt sich das Schnittmuster jeweils mit bzw. ohne Zugaben überprüfen.



Die Grafik kann mit den von RFEM bekannten Mausfunktionen gesteuert werden, um die Ansicht zu zoomen, verschieben und drehen.



Die gerenderte Darstellung ist nur möglich, wenn das Schnittmuster berechnet wurde. Eingaben zu Zuschlägen erfordern keine erneute Berechnung des Schnittmusters.

Im Arbeitsfenster von RFEM werden die Zuschläge als gestrichelte Linien dargestellt (vgl. Bild 5.6, Seite 36).

Linientyp

Dieses Register steht zur Verfügung, wenn im *Basis*-Register der *Linientyp* aktiviert ist.

Einstellungen

- Kompensation
- Kompensation für Begrenzungslinien
- Zuschläge
- Linientyp
- Material den Mustern zuordnen

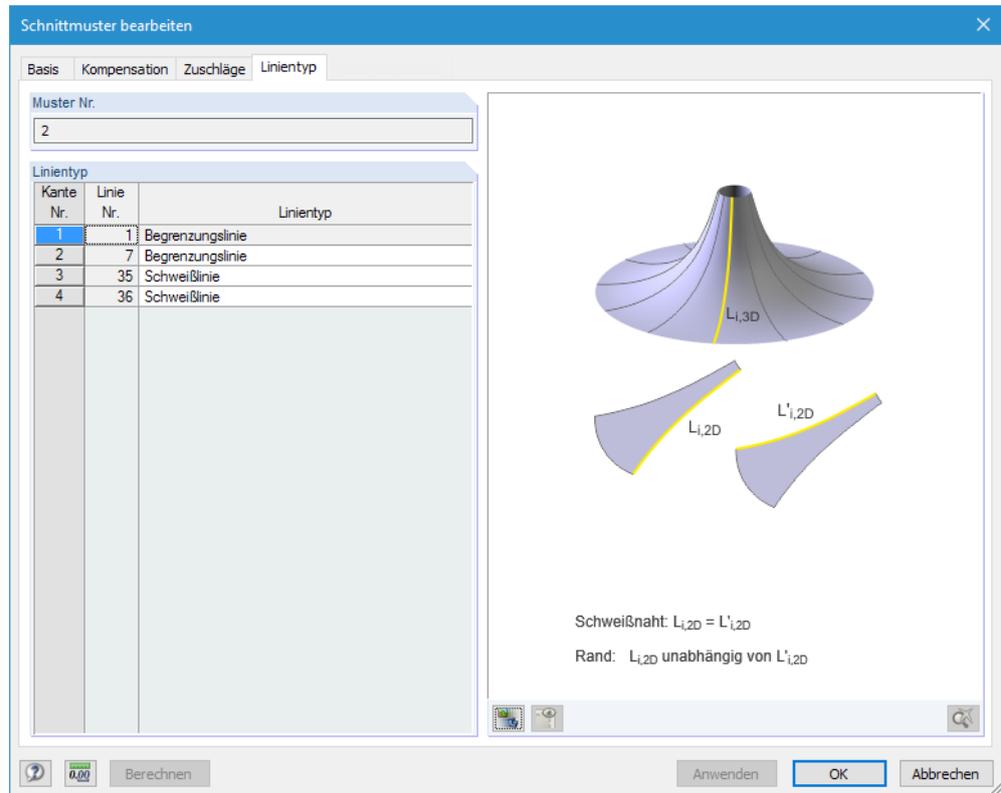


Bild 5.14: Dialog *Schnittmuster bearbeiten*, Register *Linientyp*

RF-ZUSCHNITT legt für jede Definitionslinie des Schnittmusters einen Linientyp fest. Die Linie wird entweder als *Begrenzungslinie* oder als *Schweißlinie* klassifiziert. Schweißlinien werden in der Regel bei benachbarten Zuschnitten erzeugt.

Schweißlinien wirken sich auf den Gesamtzuschnitt aus: Das Programm versucht eine Liniengleichheit bei beiden Zuschnittsrändern zu erreichen, da sich die gemeinsame Linie synchron verformt. Hierzu werden die Durchschnittswerte der Linie von beiden Schnittmustern verwendet.

In diesem Register besteht die Möglichkeit, eine Schweißlinie auf den Linientyp *Begrenzungslinie* zu ändern.



Umgekehrt kann eine Begrenzungslinie nicht in den Linientyp *Schweißlinie* umgewandelt werden. Schweißlinien werden automatisch bei benachbarten Schnittmustern erkannt, die eine gemeinsame Linie besitzen.

5.4 Berechnung

5.4.1 Berechnungsparameter

Für RF-ZUSCHNITT ist im Dialog *Berechnungsparameter* das Zusatzregister *Schnittmuster* verfügbar, das die modulspezifischen Berechnungseinstellungen verwaltet. Dieser Dialog wird aufgerufen über das RFEM-Menü

Berechnung → **Berechnungsparameter**



oder die zugeordnete Schaltfläche in der Symbolleiste.

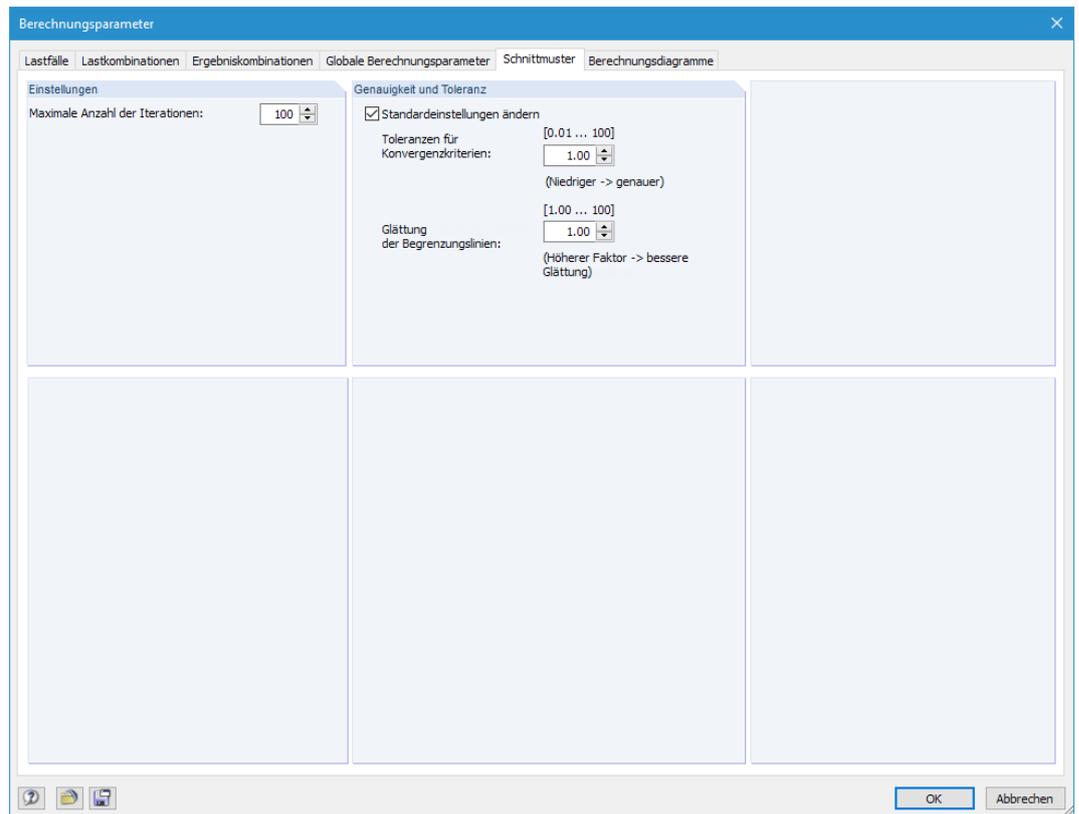


Bild 5.15: Dialog *Schnittmuster bearbeiten*, Register *Schnittmuster*

Einstellungen

Da die Berechnung der Schnittmuster unabhängig von Lastfällen oder Lastkombinationen erfolgt, sind die Vorgaben der globalen Berechnungsparameter nicht anwendbar. In diesem Abschnitt kann die *Maximale Anzahl der Iterationen* für RF-ZUSCHNITT festgelegt werden, die im Verebnungsprozess durchlaufen werden.

Genauigkeit und Toleranz

Es ist nur selten erforderlich, die voreingestellten Toleranz- und Glättungsparameter anzupassen. Nach dem Anhaken des Kontrollfeldes *Standard Einstellungen ändern* sind die Eingabefelder unterhalb zugänglich

Das Konvergenzverhalten des Ebnungsprozesses kann über die *Toleranzen für Konvergenzkriterien* beeinflusst werden. Als Standard ist der Faktor 1,0 voreingestellt. Der minimale Faktor ist 0,01, der Maximalwert beträgt 100,0. Je größer der Wert, desto unempfindlicher ist die Abbruchschanke.

Die *Glättung der Begrenzungslinien* wirkt sich auf die iterative Ermittlung der Randlinienform aus. Auch hier ist der Faktor 1,0 voreingestellt. Je größer dieser Faktor, umso genauer werden die Randlinien geglättet. Die Berechnungsdauer erhöht sich entsprechend.

5.4.2 Vorläufige und endgültige Berechnung

Allgemeines

Bei der Berechnung wird in einem iterativen nichtlinearen Verfahren versucht, die gekrümmten Flächenbauteile in ebene Zuschnitte zu transferieren. Diesen Vorgang kann man sich als „Bügelprozess“ vorstellen mit dem Ziel, die gekrümmten Flächen zu glätten.

Die Berechnung benutzt die Netzgeometrie der ebenen, geknickten, einfach oder doppelt gekrümmten Flächenbauteile der Schnittmuster und ebnet diese mittels der Theorie der minimalen Energie. Vereinfacht beschrieben wird versucht, die Netzgeometrie der gekrümmten Flächen in einer Presse mit reibungsfreien Presseflächen in eine Ebene zu drücken. Ist der Zustand erreicht, bei dem die Spannungen aus der Verebnung im Gleichgewicht stehen, so ist ein Minimum an Energie und ein Optimum der Genauigkeit des Zuschnitts erreicht. Bildhaft ausgedrückt: Beim Glätten einer halben Orange ergibt sich im Außenbereich Zug und im Innenbereich Druck. Diese Kräfte liegen dann im Gleichgewicht.

Vorläufige Berechnung

Erzeugen
Anwenden

Die Berechnung ist zweiteilig organisiert. Für die Vorsicht des Schnittmusters wird eine vorläufige Glättungsberechnung verwendet, sobald die Funktion [Erzeugen] (beim Neuanlegen des Schnittmusters) bzw. [Anwenden] (beim Ändern von Parametern) benutzt wird.

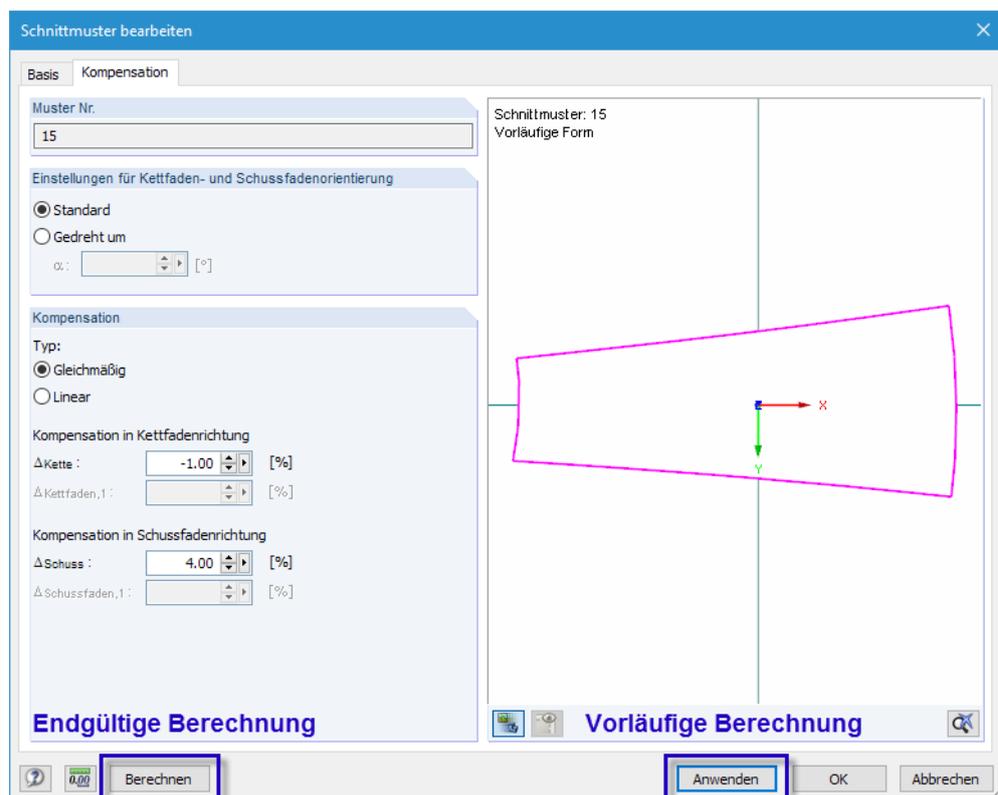


Bild 5.16: Schaltflächen [Berechnen] und [Anwenden] im Dialog *Schnittmuster bearbeiten*

Die „vorläufige Berechnung“ (*Mapping Process*) bestimmt das Schnittmuster in einem Schnellverfahren provisorisch, damit in der Dialoggrafik eine Vorschau des geglätteten Schnittmusters dargestellt werden kann.



Mit [Anwenden] wird jeweils nur das aktuelle Schnittmuster untersucht.

Endgültige Berechnung

Berechnen

Die „endgültige Berechnung“ ermittelt die Zuschnitte unter Ansatz eines isotropen Materialverhaltens (orthotropes Materialverhalten in Vorbereitung). Mit einem Klick auf die Schaltfläche [Berechnen] (siehe Bild 5.16) wird die vollständige Glättungsberechnung auf die gekrümmten Flächenbauteile angewandt.

Der Ebnungsprozess erfolgt über die Theorie der minimalen Energie. Vorspannung und Spannungen aus der Verebnung werden über eine Kompensation je Hauptrichtung umgesetzt. Zu- und Abschläge für Schweißnähte und Randanschlüsse werden für jedes Schnittmuster separat berücksichtigt.

Der „Bügelprozess“ übernimmt von der gekrümmten Geometrie eine durchschnittliche Koordinatensystemausrichtung und wendet diese Systeme mit der gleichen Drehung auf das geglättete Bauteil an.

Sind Nachbarschnittmuster definiert, so werden deren Parameter zur Erhaltung gleicher Längen entsprechend berücksichtigt.



Beim [Berechnen] werden global alle Schnittmuster untersucht.

Der Ablauf der iterativen Berechnung kann in einem Dialog verfolgt werden.

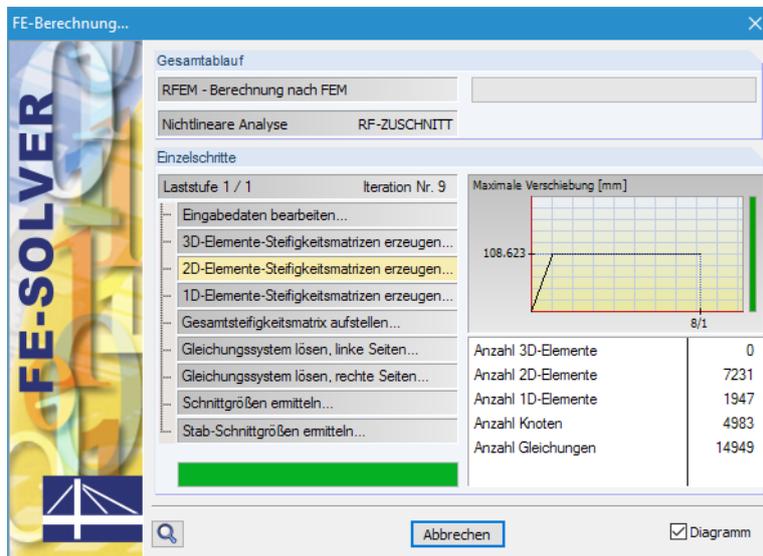


Bild 5.17: Berechnungsablauf für RF-ZUSCHNITT

Als Ergebnis der „endgültigen Berechnung“ werden die Koordinaten des Schnittmusters im Dialogregister *Punkt-Koordinaten* sowie in der Tabelle 4.46 *Schnittmuster - Punktkoordinaten* ausgewiesen (siehe Kapitel 5.5).

Die Schnittmuster nach der endgültigen oder vorläufigen Berechnung sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Im Dialog *Anzeigeeigenschaften* können die entsprechenden Farbeinstellungen eingesehen und angepasst werden. Dieser Dialog ist zugänglich über das RFEM-Menü

Optionen → Anzeigeeigenschaften → Bearbeiten.

- Farben
 - Modelldaten
 - Knoten
 - Linien
 - Flächen
 - Volumenkörper
 - Öffnungen
 - Knotenlager
 - Linienlager
 - Flächenlager
 - Linien gelenke
 - Stabend gelenke
 - Stäbe
 - Stabbettungen
 - Stabsätze
 - FE-Netzverdichtungen
 - Anschlüsse
 - Knotenfreigaben
 - Linienfreigaben
 - Flächenfreigaben
 - Knotenkopplungen
 - Schnittmuster
 - Schnittmuster
 - Schnittmuster (Vorläufige Form)

5.5 Ergebnisse und Export

Berechnen

Nach dem [Berechnen] des Schnittmusters erscheint im Dialog *Schnittmuster bearbeiten* das neue Register *Punkt-Koordinaten*.

Dialog *Schnittmuster bearbeiten*

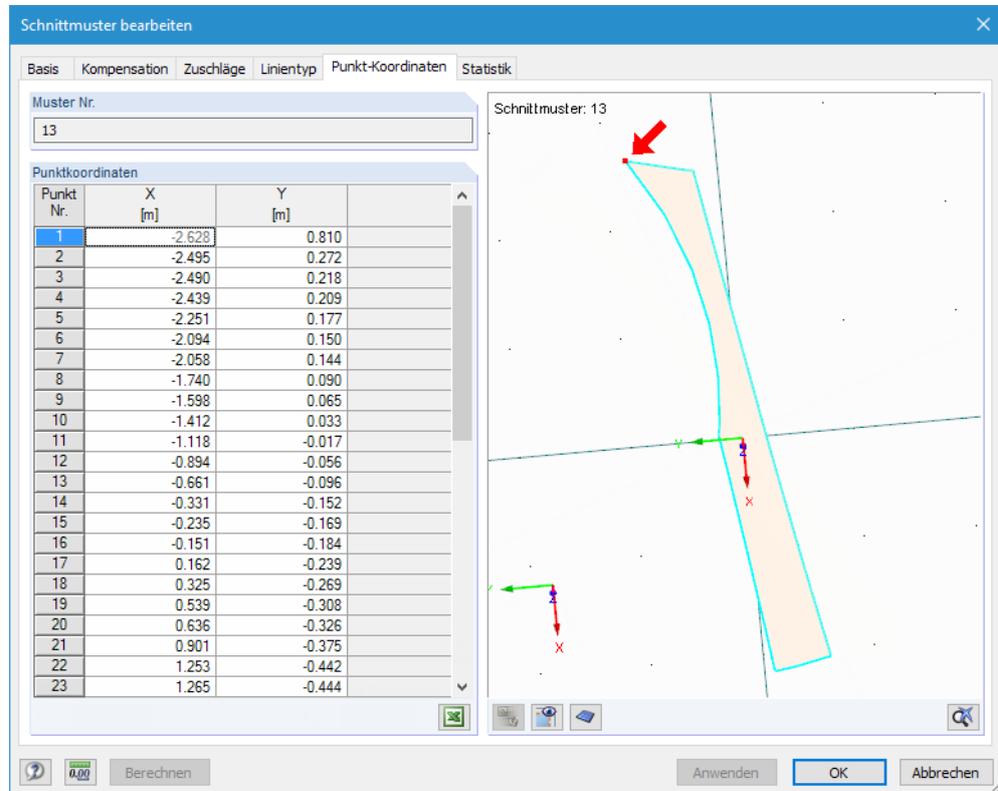


Bild 5.18: Dialog *Schnittmuster bearbeiten*, Register *Punkt-Koordinaten*

In diesem Register wird die Form des Schnittmusters in einer Koordinatentabelle ausgegeben. Die Tabelle enthält für jeden FE-Netzknoten die neuen geebneten Koordinaten des Zuschnitts. Die *Punktkoordinaten* beziehen sich auf den Schwerpunkt des Schnittmusters.

Im Grafikbereich wird das Schnittmuster mit seinem Koordinatensystem im Schwerpunkt dargestellt. Der in der Tabelle selektierte Punkt ist mit einem Pfeil gekennzeichnet. Mit der Schaltfläche können die Überlappungsbereiche ein- und ausgeblendet werden. Die Schaltfläche stellt das FE-Netz des Schnittmusters dar bzw. blendet es aus.

Die Flächen der Zuschnitte werden im Dialogregister *Statistik* angegeben.

| Statistik für Schnittmuster | | | |
|----------------------------------|-------------------|-------|----------------|
| Schnittmusterfläche | | | |
| 2D-Fläche | A _{2D} | 1.784 | m ² |
| 2D-Fläche mit Zuschlägen | A _{2D,a} | 2.507 | m ² |
| 3D-Fläche | A _{3D} | 1.834 | m ² |
| Zusätzliche Eigenschaften | | | |
| Höhe | H | 1.411 | m |
| Höhe mit Zuschlägen | H _a | 1.670 | m |
| Breite | L | 4.792 | m |
| Breite mit Zuschlägen | L _a | 4.998 | m |

Bild 5.19: Dialog *Schnittmuster bearbeiten*, Register *Schnittmuster* (Ausschnitt)

Die *2D-Fläche* repräsentiert den Flächeninhalt des „gebügelten“ Schnittmusters. Zur Kontrolle wird auch die *3D-Fläche* angegeben, d. h. die Oberfläche der gekrümmten Fläche. Wenn sich die Werte nur geringfügig unterscheiden, spricht dies für die Qualität des Verebnungsprozesses.

Die Abmessungen des Schnittmusters werden als *Zusätzliche Eigenschaften* ausgegeben. So ist auf einen Blick erkennbar, ob die Fertigung der Bahnen aus dem Rollenmaterial möglich ist.

Tabelle 4.46 Schnittmuster - Punktkoordinaten

Die Zuschnitte werden auch in der RFEM-Ergebnistabelle 4.46 Schnittmuster - Punktkoordinaten dokumentiert.

| Muster Nr. | Punkt Nr. | Punktkoordinaten ohne Überlappungen | | Punktkoordinaten mit Überlappungen | |
|------------|-----------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|
| | | x [m] | y [m] | x [m] | y [m] |
| 1 | 1 | -0.333 | -0.632 | -0.539 | -1.036 |
| | 2 | 0.072 | -0.329 | 0.196 | -0.485 |
| | 3 | 0.441 | -0.017 | 0.621 | -0.126 |
| | 4 | 0.402 | 0.021 | 0.437 | 0.057 |
| | 5 | 0.185 | 0.237 | 0.220 | 0.273 |
| | 6 | 0.094 | 0.328 | 0.130 | 0.363 |
| | 7 | -0.051 | 0.473 | -0.015 | 0.508 |
| | 8 | -0.179 | 0.601 | -0.291 | 0.783 |
| | 9 | -0.163 | 0.348 | -0.264 | 0.349 |
| | 10 | -0.208 | -0.138 | -0.306 | -0.121 |
| | 11 | -0.333 | -0.632 | -0.539 | -1.036 |
| 2 | 1 | -0.393 | -0.238 | -0.507 | -0.137 |
| | 2 | -0.257 | -0.358 | -0.257 | -0.358 |
| | 3 | -0.104 | -0.495 | -0.104 | -0.495 |
| | 4 | -0.009 | -0.580 | -0.009 | -0.580 |
| | 5 | 0.219 | -0.784 | 0.219 | -0.784 |
| | 6 | 0.260 | -0.821 | 0.409 | -0.955 |
| | 7 | 0.276 | -0.806 | 0.416 | -0.949 |
| | 8 | 0.621 | -0.443 | 0.770 | -0.577 |
| | 9 | 0.820 | -0.209 | 1.012 | -0.291 |
| | 10 | 0.580 | -0.027 | 0.610 | 0.013 |
| | 11 | 0.493 | 0.038 | 0.523 | 0.078 |
| | 12 | 0.392 | 0.114 | 0.422 | 0.154 |

Bild 5.20: RFEM-Tabelle 4.46 Schnittmuster - Punktkoordinaten

Die Ausgabe erfolgt nach Schnittmustern geordnet. Für jeden FE-Netzknoten werden die *Punktkoordinaten ohne Überlappungen* sowie die *Punktkoordinaten mit Überlappungen* angegeben.

Ausdruckprotokoll

Die Schnittmuster lassen sich im globalen Ausdruckprotokoll von RFEM dokumentieren. Im Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion* werden die Schnittmuster im Register *LF-/LK-Ergebnisse* verwaltet.

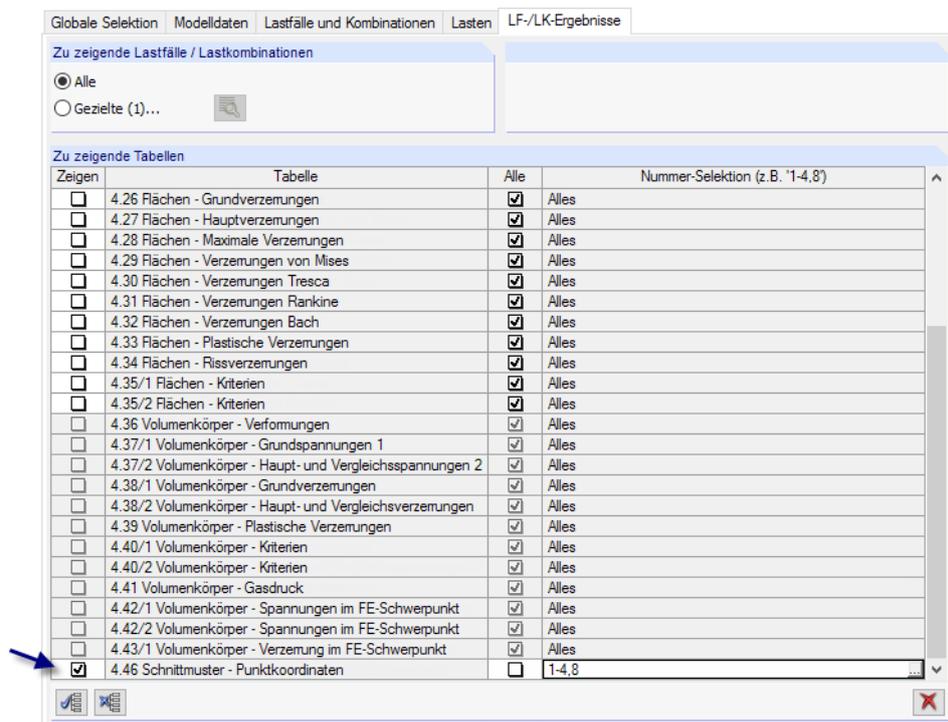


Bild 5.21: Selektion von Schnittmustern im Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion*

Sollen nicht *Alle* Schnittmuster im Ausdruckprotokoll erscheinen, ist das entsprechende Kontrollfeld zu deaktivieren. Die Nummern der relevanten Objekte können dann eingetragen oder über grafisch ausgewählt werden.



IB Franz-Josef Mustermann
 Sesamstraße 8, 12345 Musterstadt
 www.mustermann.com

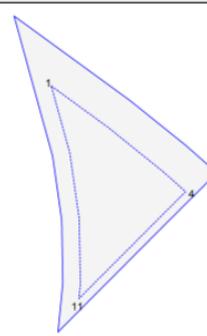
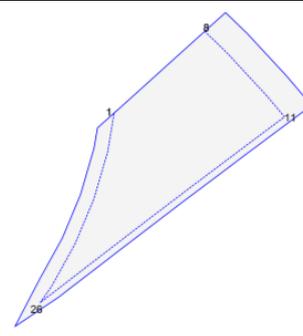
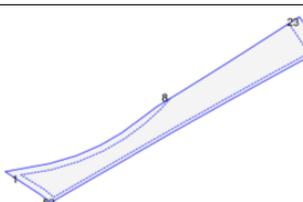
Seite: 10/20
 Blatt: 1
MODELL

Projekt: RF-FORMFINDUNG Modell: CuttingPattern

Datum: 18.10.2016

Beispiele

4.46 SCHNITTMUSTER - PUNKTKOORDINATEN

| Muster Nr. | Punkt Nr. | Koordinaten ohne Überlappungen | | Koordinaten mit Überlappungen | | |
|------------|-----------|--------------------------------|--------|-------------------------------|--------|---|
| | | x [m] | y [m] | x [m] | y [m] | |
| 1 | 1 | -0.334 | -0.631 | -0.549 | -1.038 |  |
| | 2 | -0.008 | -0.391 | 0.114 | -0.549 | |
| | 3 | 0.305 | -0.136 | 0.435 | -0.288 | |
| | 4 | 0.436 | -0.019 | 0.614 | -0.128 | |
| | 5 | 0.297 | 0.121 | 0.333 | 0.157 | |
| | 6 | 0.236 | 0.183 | 0.271 | 0.219 | |
| | 7 | 0.070 | 0.351 | 0.106 | 0.386 | |
| | 8 | 0.050 | 0.371 | 0.086 | 0.407 | |
| | 9 | 0.042 | 0.379 | 0.078 | 0.414 | |
| | 10 | -0.133 | 0.558 | -0.098 | 0.593 | |
| | 11 | -0.176 | 0.601 | -0.296 | 0.794 | |
| | 12 | -0.168 | 0.518 | -0.268 | 0.514 | |
| | 13 | -0.174 | 0.142 | -0.274 | 0.150 | |
| | 14 | -0.228 | -0.243 | -0.327 | -0.222 | |
| | 15 | -0.334 | -0.631 | -0.549 | -1.038 | |
| 2 | 1 | -0.392 | -0.236 | -0.511 | -0.129 |  |
| | 2 | -0.346 | -0.277 | -0.346 | -0.277 | |
| | 3 | -0.160 | -0.445 | -0.160 | -0.445 | |
| | 4 | -0.152 | -0.452 | -0.152 | -0.452 | |
| | 5 | -0.131 | -0.471 | -0.131 | -0.471 | |
| | 6 | 0.043 | -0.630 | 0.043 | -0.630 | |
| | 7 | 0.108 | -0.689 | 0.108 | -0.689 | |
| | 8 | 0.254 | -0.822 | 0.402 | -0.957 | |
| | 9 | 0.415 | -0.863 | 0.559 | -0.902 | |
| | 10 | 0.637 | -0.348 | 0.837 | -0.500 | |
| | 11 | 0.822 | -0.207 | 1.014 | -0.289 | |
| | 12 | 0.593 | -0.035 | 0.623 | 0.005 | |
| | 13 | 0.559 | -0.010 | 0.589 | 0.030 | |
| | 14 | 0.517 | 0.022 | 0.548 | 0.062 | |
| | 15 | 0.323 | 0.169 | 0.353 | 0.209 | |
| | 16 | 0.116 | 0.326 | 0.146 | 0.366 | |
| | 17 | 0.101 | 0.337 | 0.131 | 0.377 | |
| | 18 | 0.087 | 0.348 | 0.117 | 0.388 | |
| | 19 | -0.119 | 0.505 | -0.088 | 0.545 | |
| | 20 | -0.272 | 0.624 | -0.242 | 0.663 | |
| | 21 | -0.341 | 0.677 | -0.311 | 0.717 | |
| | 22 | -0.387 | 0.713 | -0.357 | 0.752 | |
| | 23 | -0.573 | 0.857 | -0.542 | 0.896 | |
| | 24 | -0.759 | 1.001 | -0.729 | 1.041 | |
| | 25 | -0.816 | 1.045 | -0.785 | 1.085 | |
| | 26 | -0.919 | 1.125 | -1.100 | 1.297 | |
| | 27 | -0.839 | 1.010 | -0.924 | 0.957 | |
| | 28 | -0.671 | 0.706 | -0.752 | 0.663 | |
| | 29 | -0.537 | 0.383 | -0.632 | 0.350 | |
| | 30 | -0.438 | 0.042 | -0.536 | 0.019 | |
| | 31 | -0.392 | -0.236 | -0.511 | -0.129 | |
| 3 | 1 | -2.539 | 1.118 | -2.785 | 1.069 |  |
| | 2 | -2.065 | 1.039 | -2.087 | 0.942 | |
| | 3 | -1.632 | 0.909 | -1.667 | 0.815 | |
| | 4 | -1.247 | 0.740 | -1.292 | 0.651 | |
| | 5 | -0.907 | 0.541 | -0.962 | 0.458 | |
| | 6 | -0.608 | 0.319 | -0.672 | 0.242 | |
| | 7 | -0.345 | 0.075 | -0.545 | 0.145 | |
| | 8 | -0.205 | -0.083 | -0.418 | 0.048 | |
| | 9 | -0.095 | -0.152 | -0.095 | -0.152 | |
| | 10 | -0.034 | -0.189 | -0.034 | -0.189 | |
| | 11 | 0.166 | -0.314 | 0.166 | -0.314 | |
| | 12 | 0.395 | -0.439 | 0.395 | -0.439 | |
| | 13 | 0.414 | -0.470 | 0.414 | -0.470 | |
| | 14 | 0.488 | -0.517 | 0.488 | -0.517 | |
| | 15 | 0.651 | -0.621 | 0.651 | -0.621 | |
| | 16 | 0.870 | -0.760 | 0.870 | -0.760 | |
| | 17 | 0.885 | -0.770 | 0.885 | -0.770 | |
| | 18 | 0.900 | -0.780 | 0.900 | -0.780 | |
| | 19 | 1.119 | -0.920 | 1.119 | -0.920 | |
| | 20 | 1.324 | -1.053 | 1.324 | -1.053 | |
| | 21 | 1.368 | -1.081 | 1.368 | -1.081 | |
| | 22 | 1.404 | -1.104 | 1.404 | -1.104 | |
| | 23 | 1.644 | -1.260 | 1.612 | -1.369 | |
| | 24 | 1.755 | -1.106 | 1.920 | -1.220 | |
| | 25 | 1.958 | -0.794 | 2.161 | -0.848 | |
| | 26 | 1.926 | -0.776 | 1.950 | -0.733 | |
| | 27 | 1.647 | -0.623 | 1.671 | -0.579 | |
| | 28 | 1.494 | -0.534 | 1.508 | -0.490 | |
| | 29 | 1.373 | -0.473 | 1.397 | -0.429 | |
| | 30 | 1.169 | -0.360 | 1.193 | -0.316 | |
| | 31 | 1.119 | -0.332 | 1.143 | -0.288 | |
| | 32 | 1.082 | -0.312 | 1.107 | -0.268 | |
| | 33 | 0.871 | -0.194 | 0.896 | -0.151 | |
| | 34 | 0.672 | -0.083 | 0.697 | -0.040 | |
| | 35 | 0.623 | -0.055 | 0.648 | -0.012 | |
| | 36 | 0.369 | 0.090 | 0.394 | 0.133 | |
| | 37 | 0.104 | 0.238 | 0.129 | 0.281 | |

RFEM 5.07.05 - Allgemeine 3D-Tragwerke nach FEM

www.dlubal.com

Bild 5.22: Punktkoordinaten und Grafiken der Schnittmuster im Ausdruckprotokoll

DXF-Export

Die geebene Geometrie des Schnittmusters kann in eine DXF-Datei exportiert werden über das RFEM-Menü

Datei → **Exportieren**



oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

Es erscheint der aus RFEM bekannte *Export*-Dialog.

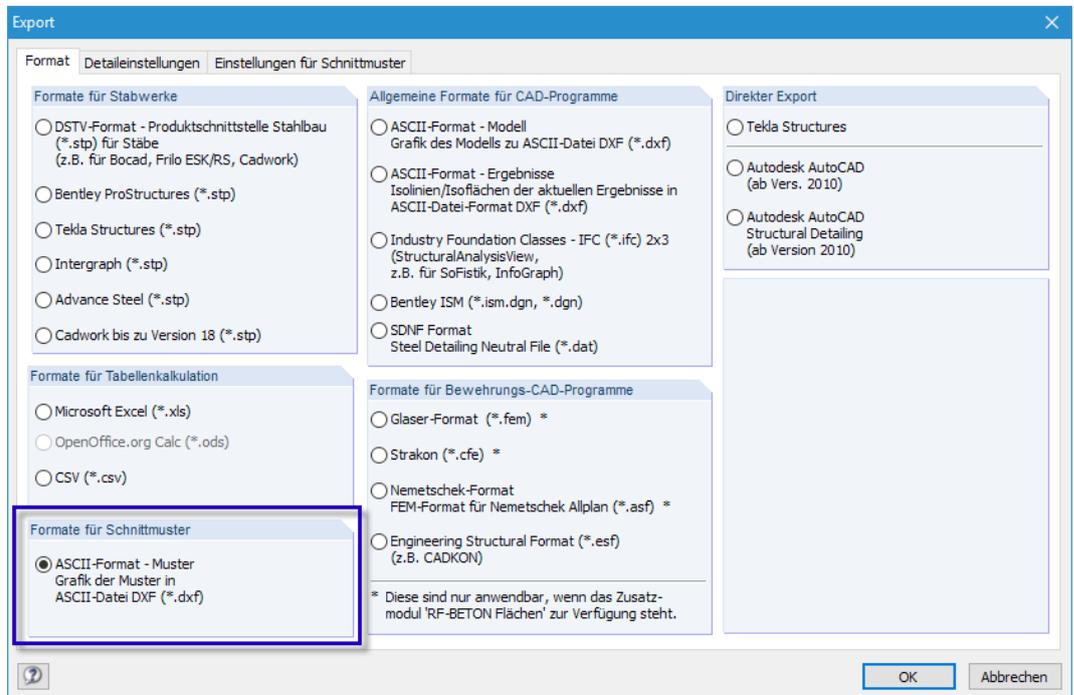


Bild 5.23: Dialog *Export*

Für den Export von Schnittmustern ist das *ASCII-Format* im Abschnitt *Formate für Schnittmuster* auszuwählen.

Im Register *Einstellungen für Schnittmuster* kann die *Anzahl* der Muster je Reihe und der *Abstand* zwischen den Mustern überprüft und bei Bedarf angepasst werden.

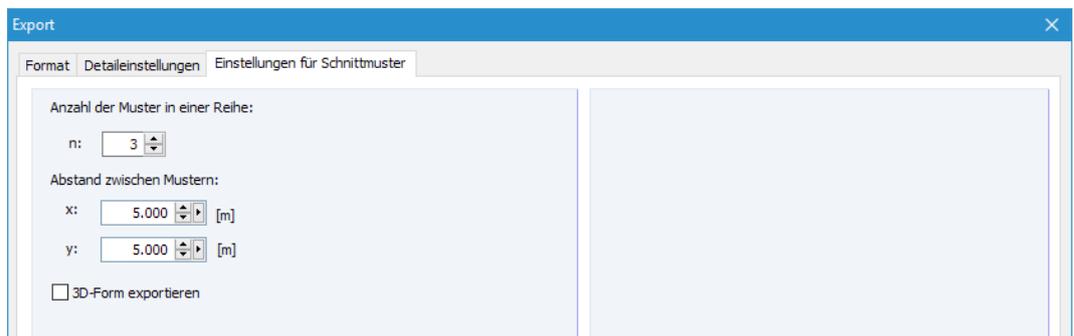


Bild 5.24: Dialog *Export*, Register *Einstellungen für Schnittmuster*



Der Exportvorgang wird mit [OK] gestartet. Im Windows-Dialog *Speichern unter* ist ein Dateiname und der Speicherort der DXF-Datei anzugeben.

Nach dem erfolgreichen [Speichern] erscheint eine entsprechende Meldung.

Anschließend kann die DXF-Datei im CAD-Programm geöffnet und entsprechend aufbereitet werden.

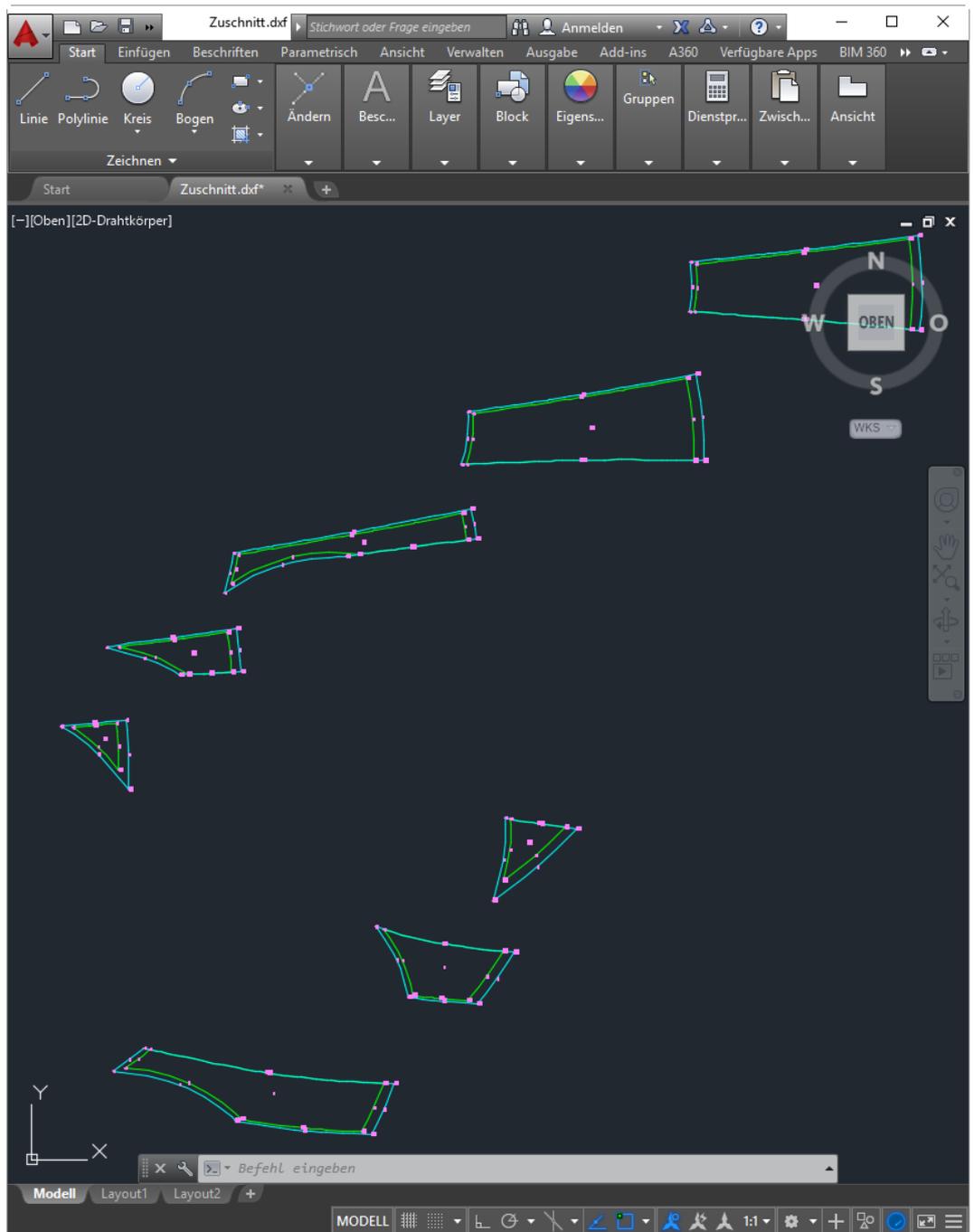


Bild 5.25: Schnittmuster in AutoCAD



Zuschnittlinien und Zugabelinien sind in verschiedenen Layern organisiert.

Index

| | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| A | | |
| Achsensystem | 17, 23, 27 | |
| Ausdruckprotokoll | 47 | |
| B | | |
| Basisangaben | 6, 33 | |
| Begrenzungslinie | 42, 43 | |
| Berechnung | 11, 43 | |
| Berechnungsparameter | 7, 43 | |
| D | | |
| Dreieckelement | 31 | |
| Durchschnittliche Seilkraft | 32 | |
| DXF-Export | 49 | |
| E | | |
| Eigengewicht | 3, 7, 19 | |
| Ergebnisse | 12, 46 | |
| Export | 46 | |
| F | | |
| FE-Netz | 13, 31 | |
| Fläche | 30 | |
| Flächentyp | 8 | |
| Formfindung | 2, 7, 11, 15, 25 | |
| G | | |
| Genauigkeit | 43 | |
| Geodätisch | 36 | |
| Glättung | 43 | |
| Gleichgewichtsform | 2 | |
| Gleichgewichtsvorspannung | 2, 4, 16, 17, 19 | |
| I | | |
| Innendruck | 8, 9, 23 | |
| Isotrope Vorspannung | 23, 25 | |
| Iteration | 7, 16, 20, 29, 43 | |
| K | | |
| Kegelmembran | 25 | |
| Kettfaden | 9, 39 | |
| Kettrichtung | 17, 20, 23, 30 | |
| Kompensation | 39, 40 | |
| Konturlinie | 12 | |
| Konvergenz | 7, 43 | |
| Kraftdichte | 32 | |
| L | | |
| Linie | 34, 35 | |
| Linientyp | 42 | |
| M | | |
| Mapping Process | 44 | |
| Material | 3, 19 | |
| Membran | 4, 8, 14, 15, 20 | |
| Minimale Energie | 44 | |
| Modul aktivieren | 6, 33 | |
| N | | |
| Neigung | 12 | |
| NURBS | 7, 13 | |
| O | | |
| Orthotrope Vorspannung | 3, 18, 23 | |
| Orthotropie | 8 | |
| P | | |
| Pneumatische Membran | 8, 9, 23 | |
| Projektionsmethode | 4, 8, 25, 29 | |
| Punktkoordinaten | 46, 47 | |
| R | | |
| Randbedingungen | 3 | |
| S | | |
| Schnitt | 35, 36 | |
| Schnittgrößen | 16, 21 | |
| Schnittlinie | 34 | |
| Schnittmuster | 37 | |
| Schussfaden | 9, 39 | |
| Schussrichtung | 17, 20, 23, 30 | |
| Schweißlinie | 42 | |
| Seil | 9, 14, 15, 25, 30, 32 | |
| Seildurchhang | 10 | |
| Stabtyp | 9 | |
| T | | |
| Temporäre Formfindungslager | 10, 21, 22 | |
| Toleranz | 7, 43 | |
| U | | |
| Überlappung | 47 | |
| Updated Reference Strategy | 4 | |
| V | | |
| Viereckelement | 31 | |
| Vorläufige Formfindung | 7 | |
| Vorspannung | 3, 4, 9, 15, 20, 23, 25, 28 | |

| | |
|-----------------|----------|
| Z | |
| Zugmethode..... | 4, 8, 14 |
| Zuschläge..... | 41 |