

**Fassung
August 2013**

Zusatzmodul

RF-GLAS

**Bemessung von Einscheiben-,
Verbund- und Isolierverglasung**

Programm- Beschreibung

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.

© **Dlubal Software GmbH**
Am Zellweg 2 D-93464 Tiefenbach

Tel.: +49 9673 9203-0
Fax: +49 9673 9203-51
E-Mail: info@dlubal.de
Web: www.dlubal.de

Inhalt

	Inhalt	Seite		Inhalt	Seite
1.	Einleitung	4	4.3	Norm	44
1.1	Zusatzmodul RF-GLAS	4	4.4	Berechnung starten	45
1.2	RF-GLAS-Team	5	5.	Ergebnisse	46
1.3	Gebrauch des Handbuchs	6	5.1	Max. Spannungen belastungsweise	47
1.4	Aufruf des Moduls RF-GLAS	6	5.2	Max. Spannungen flächenweise	49
2.	Theoretischer Teil	8	5.3	Spannungen punktweise	50
2.1	Formelzeichen	8	5.4	Max. Verschiebungen	51
2.2	Glasstrukturtypen	9	5.5	Gasdruck	52
2.2.1	Einscheibenglas	9	5.6	Stückliste	52
2.2.2	Verbundglas	9	6.	Ausdruck	54
2.2.3	Isolierverglasung	10	6.1	Ausdruckprotokoll	54
2.3	Steifigkeitsmatrix	12	6.2	Grafikausdruck	54
2.3.1	2D - Berücksichtigung des Schubverbunds zwischen Schichten	12	6.2.1	Ergebnisse am RFEM-Modell	54
2.3.2	3D	14	6.2.2	Ergebnisse in Schichten	56
2.3.3	2D - Keine Berücksichtigung des Schubverbunds zwischen Schichten	14	7.	Allgemeine Funktionen	57
3.	Eingabedaten	16	7.1	Einheiten und Dezimalstellen	57
3.1	Basisangaben	16	7.2	Export der Ergebnisse	58
3.1.1	Tragfähigkeit	17	7.3	RF-GLAS und RFEM	59
3.1.2	Gebrauchstauglichkeit	18	8.	Beispiele	60
3.2	Schichten	19	8.1	Ermittlung der Steifigkeitsmatrizelemente	60
3.3	Linienlager	22	8.2	Isolierglas	65
3.4	Knotenlager	25	8.2.1	Berechnung in RF-GLAS	66
3.5	Randstäbe	28	8.2.2	Kontrolle der Berechnung	72
3.6	Klimalasten-Parameter	29	8.3	Isolierglas nach TRLV, Anhang A	77
3.7	Lasteinwirkungsdauer	31	8.4	Gekrümmtes Isolierglas	80
3.8	Gebrauchstauglichkeitsparameter	32	8.4.1	Berechnung in RF-GLAS	81
4.	Berechnung	33	8.4.2	Kontrolle der Berechnung	87
4.1	Details	34	A	Literatur	91
4.1.1	Spannungen	35	B	Index	92
4.1.2	Ergebnisse	40			
4.2	Details für Schichtenaufbau	41			

1. Einleitung

1.1 Zusatzmodul RF-GLAS

Das Zusatzmodul RF-GLAS von DLUBAL SOFTWARE berechnet Verformungen und Spannungen von Glasflächen. Es ermöglicht die Generierung aller Glastypen wie Einscheiben-, Verbund-scheiben- und Isolierverglasung. Zudem kann der Schubverbund zwischen den Schichten berücksichtigt werden.

Es steht eine umfangreiche Materialbibliothek mit den gängigen Glassorten, Folien und Gasen zur Verfügung. Die Bibliothek enthält die wesentlichen Materialparameter nach E DIN EN 13474, DIN 18008-1:2010-12, den technischen Regeln TRLV:2006-08 sowie DIBt-Zulassung. Daneben besteht die Möglichkeit, weitere Materialien in die Bibliothek aufzunehmen.

Bei Isolierverglasung werden in der Berechnung nicht nur äußere Lasten, sondern auch Temperatur-, atmosphärische Druck- und Höhenlagenänderungen mit einem Einfluss auf die eingeschlossene Gasschicht berücksichtigt. Zusätzlich steht eine vereinfachte Berechnungsmethode nach Anhang A der DIN 18008-1:2010-12 oder TRLV:2006-08 zur Verfügung.

Dieses Handbuch enthält alle notwendigen Informationen für die Arbeit mit RF-GLAS. Am Ende des Handbuchs finden Sie typische Beispiele für Glasberechnungen.

RF-GLAS ist wie andere Module vollständig in RFEM integriert. Es erscheint damit auf der Benutzeroberfläche als Bestandteil des Hauptprogramms. Das ansprechende Layout von RF-GLAS mit seinen intuitiv bedienbaren Tabellen und Dialogfenstern erleichtern die Arbeit mit dem Programm. Die Ergebnisse der Glasberechnung einschließlich der grafischen Darstellung können auch in das RFEM-Ausdruckprotokoll übergeben werden. Dies erlaubt einen einfachen und vor allem übersichtlich geordneten Nachweis.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei Ihrer Arbeit mit RFEM und RF-GLAS.

Ihr Team von DLUBAL SOFTWARE GMBH

1.2 RF-GLAS-Team

An der Entwicklung von RF-GLAS waren beteiligt:

Programmkoordinierung

Dipl.-Ing. Georg Dlubal
Dipl.-Ing. (FH) Younes El Frem

Ing. Pavel Bartoš

Programmierung

Doc. Ing. Ivan Němec, CSc.
Mgr. Petr Zajíček

Ing. Lukáš Weis
Mgr. Vítězslav Štembera, Ph.D.

Querschnitts- und Materialdatenbank

Ing. Jan Rybín, Ph.D.

Programmdesign, Dialogbilder, Icons

Dipl.-Ing. Georg Dlubal

MgA. Robert Kolouch

Programmkontrolle

Mgr. Vítězslav Štembera, Ph.D.
Ing. Iva Horčíčková

Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Lex

Handbuch, Hilfesystem und Übersetzungen

Ing. Fabio Borriello
Ing. Dmitry Bystrov
Eng.º Rafael Duarte
Ing. Jana Duníková
Ing. Lara Freyer
Alessandra Grosso
Bc. Chelsea Jennings
Jan Jeřábek
Ing. Ladislav Kábrt
Ing. Aleksandra Kociolek
Mgr. Michaela Kryšková
Dipl.-Ing. Tingting Ling

Ing. Roberto Lombino
Eng.º Nilton Lopes
Mgr. Ing. Hana Macková
Ing. Téc. Ind. José Martínez
MA Translation Anton Mitleider
Dipl.-Ü. Gundel Pietzcker
Mgr. Petra Pokorná
Ing. Zoja Rendlová
Dipl.-Ing. Jing Sun
Ing. Marcela Svitáková
Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl
Ing. Marcin Wardyn

Technische Unterstützung und Endkontrolle

M.Eng. Cosme Asseya
Dipl.-Ing. (BA) Markus Baumgärtel
Dipl.-Ing. Moritz Bertram
M.Sc. Sonja von Bloh
Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß
Dipl.-Ing. Frank Faulstich
Dipl.-Ing. (FH) René Flori
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frenzel
Dipl.-Ing. (FH) Walter Fröhlich
Dipl.-Ing. Wieland Götzler
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Hörold
Dipl.-Ing. (FH) Paul Kieloch

Dipl.-Ing. (FH) Bastian Kuhn
Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Lex
Dipl.-Ing. (BA) Sandy Matula
Dipl.-Ing. (FH) Alexander Meierhofer
M.Eng. Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier
Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Rehm
M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler
M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Frank Sonntag
Dipl.-Ing. (FH) Christian Stautner
Dipl.-Ing. (FH) Lukas Sühnel
Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl

1.3 Gebrauch des Handbuchs

Da Themen wie Systemvoraussetzungen oder Installation ausführlich im RFEM-Handbuch beschrieben sind, wird darauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Stattdessen liegt der Schwerpunkt dieses Handbuchs auf den Besonderheiten des Zusatzmoduls RF-GLAS.



Die Beschreibung des Moduls orientiert sich an Reihenfolge und Aufbau der Eingabe- und Ergebnismasken. Im Text werden die beschriebenen **Schaltflächen** (Buttons) in eckige Klammern gesetzt, z. B. [Sichtmodus]. Gleichzeitig sind sie am linken Rand abgebildet. Die **Begriffe** der Dialoge, Tabellen und Menüs sind durch *Kursivschrift* hervorgehoben, sodass die Erläuterungen gut nachvollzogen werden können.

Am Ende des Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie trotzdem nicht fündig werden, so können Sie auf der Website www.dlubal.de die Suchfunktion nutzen, um die Liste aller *Fragen und Antworten* nach bestimmten Kriterien zu filtern.

1.4 Aufruf des Moduls RF-GLAS

Es bestehen in RFEM mehrere Möglichkeiten, das Zusatzmodul RF-GLAS zu starten.

Hauptmenü

Sie können RF-GLAS aufrufen mit dem RFEM-Menü

Zusatzmodule → Sonstige → RF-GLAS.

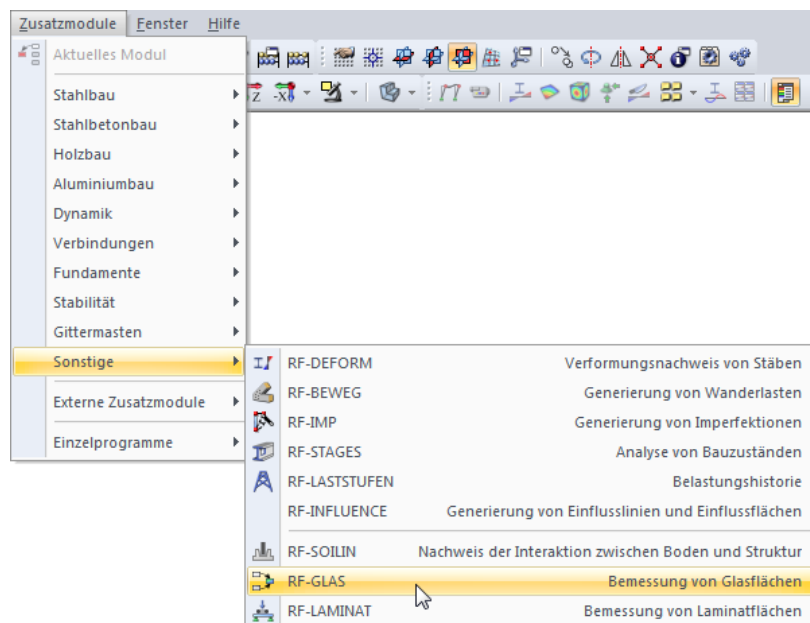


Bild 1.1: Hauptmenü: Zusatzmodule → Sonstige → RF-GLAS

Navigator

Alternativ können Sie RF-GLAS im *Daten-Navigator* starten:

Zusatzmodule → RF-GLAS - Bemessung von Glasflächen.

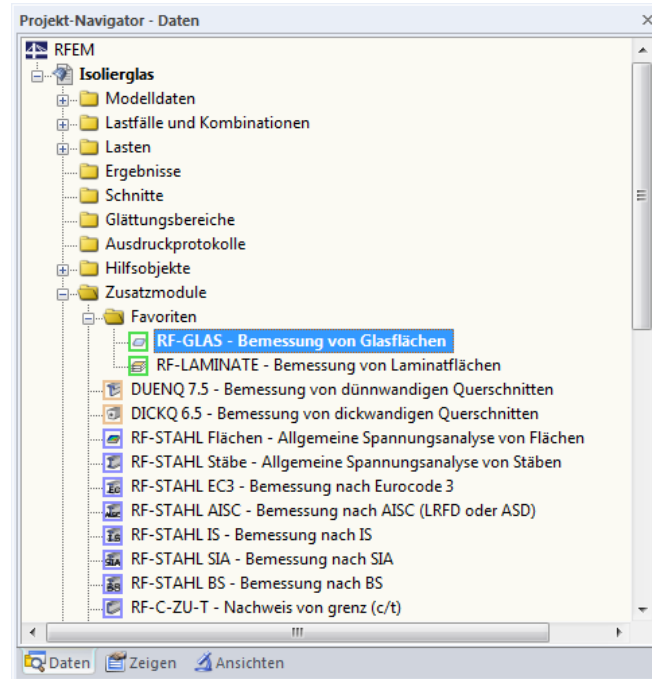


Bild 1.2: Daten-Navigator: Zusatzmodule → RF-GLAS

Panel

Wenn im RFEM-Modell bereits RF-GLAS-Ergebnisse vorliegen, können Sie das Zusatzmodul auch über das Panel starten:

Stellen Sie den RF-GLAS-Fall in der Lastfallliste der RFEM-Symbolleiste ein. Lassen Sie über die Schaltfläche [Ergebnisse ein] die Verformungen oder Spannungen grafisch darstellen.

Im Panel können Sie nun die Schaltfläche [RF-GLAS] zum Aufruf des Moduls benutzen.

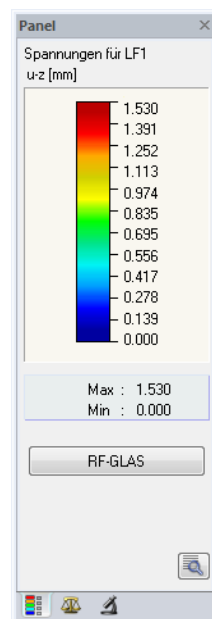
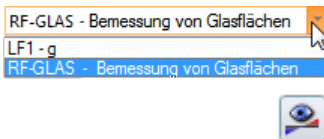


Bild 1.3: Panel-Schaltfläche [RF-GLAS]

2. Theoretischer Teil

In diesem Kapitel werden die theoretischen Prinzipien des RF-GLAS-Moduls kurz vorgestellt.

2.1 Formelzeichen

t	Dicke der einzelnen Schichten [m]
E	E-Modul [Pa]
G	Schubmodul [Pa]
ν	Querdehnzahl [-]
γ	Spezifisches Gewicht [N/m ³]
α_T	Wärmedehnzahl [1/K]
σ_{grenz}	Grenzspannung [Pa]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
d_{ij}	Elemente der TeilstEIFigkeitsmatrix [Pa]
D_{ij}	Elemente der Gesamtsteifigkeitsmatrix [Nm, Nm/m, N/m]
σ_x, σ_y	Normalspannungen [Pa]
$\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$	Schubspannungen [Pa]
n	Anzahl der Schichten [-]
z	z-Achsenkoordinate [m]
T	Temperatur [K]
p	Druck [Pa]
H	Höhenlage [m]
V	Volumen [m ³]
m_x	Biegemoment, das Spannungen in Richtung der x-Achse [Nm/m] erzeugt
m_y	Biegemoment, das Spannungen in Richtung der y-Achse [Nm/m] erzeugt
m_{xy}	Drillmoment [Nm/m]
v_x, v_y	Querkraft [N/m]
n_x	Normalkraft in Richtung der x-Achse [N/m]
n_y	Normalkraft in Richtung der y-Achse [N/m]
n_{xy}	Schubfluss [N/m]

2.2 Glasstrukturtypen

Wie in Kapitel 1.1 erwähnt, ist zwischen Einscheiben-, Verbund- und Isolierverglasung zu unterscheiden. Die Modellierung der einzelnen Typen wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2.2.1 Einscheibenglas

Einscheibenverglasung stellt den einfachsten Fall dar. Sie kann modelliert werden durch eine

- 2D-Berechnung (Plattentheorie) oder
- 3D-Berechnung (Modellierung mit Volumenkörpern).

Die Berechnung nach der Plattentheorie stößt bei Platten mit extremer Dicke an ihre Grenzen. In diesem Fall muss mit Volumenkörpern modelliert werden. Ein Näherungskriterium für eine gültige Berechnung nach der Plattentheorie ergibt sich durch das Verhältnis $t/L \leq 0.05$, mit t : Dicke und L : Länge der Plattenseite (bzw. charakteristische Abmessung des Modells).

2.2.2 Verbundglas

Verbundglas besteht aus mindestens zwei Glasscheiben, die durch eine Zwischenschicht verbunden sind, die in den meisten Fällen aus Folie bzw. Gießharz besteht.

Verbundglas kann modelliert werden durch

- 2D-Berechnung mit Schubverbund zwischen Schichten (Plattentheorie)
- 3D-Berechnung (Modellierung mit Volumenkörpern)
- 2D-Berechnung ohne Schubverbund zwischen Schichten (Plattentheorie)

2D-Berechnung mit Schubverbund zwischen Schichten

Die auf Grundlage des Schichtenaufbaus berechnete Steifigkeit wird einer oder mehreren ausgewählten Flächen zugewiesen. Die Fläche wird mithilfe der gängigen Flächenelemente modelliert.

3D-Berechnung

Die Folie, die die einzelnen Glasscheiben verbindet, ist in der Regel wesentlich dünner als das Glas. Das Produkt aus der Foliendicke und dem Schubmodul $t \cdot G$ ist in etwa um 3-7 Dezimalstellen kleiner als das Produkt aus Glasdicke und Schubmodul des Glases. Dies bedeutet, dass es zu einer deutlichen Schubverzerrung in Glas und Folie kommt (siehe Bild 2.2) und die Berechnung nach der 2D-Plattentheorie zu falschen Ergebnissen führt. In diesem Fall empfiehlt sich eine 3D-Berechnung, die zu genauen Ergebnissen führt, aber zeitaufwendiger ist.

2D-Berechnung ohne Schubverbund zwischen Schichten

Es ist auch möglich, die Berechnung nach der 2D-Plattentheorie ohne Schubverbund zwischen Schichten durchzuführen. Die Glasscheiben „gleiten“ dann übereinander. Diese Berechnung wird für Dauerlasten empfohlen, bei denen die Schubtragfähigkeit einer verbindenden Folie nicht berücksichtigt werden sollte, weil deren Eigenschaften von der Lastdauer und Temperatur abhängen.

Die drei erwähnten Optionen werden in Bild 2.1 dargestellt.

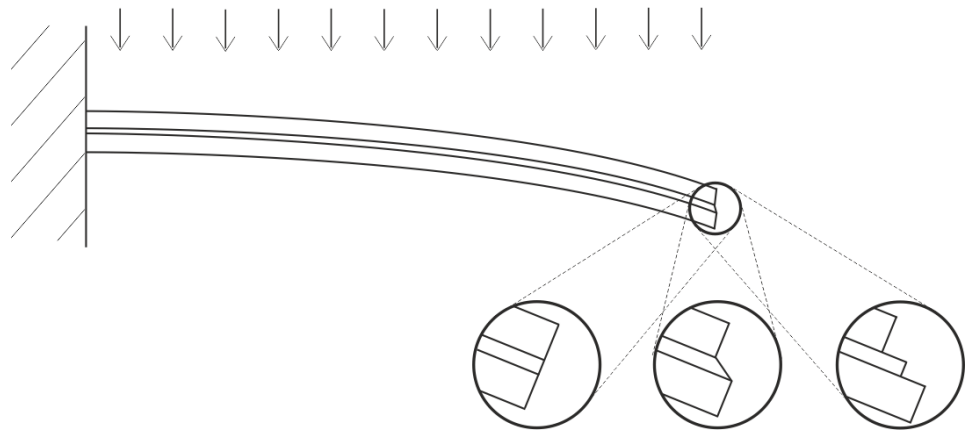


Bild 2.1: Biegebeanspruchtes Verbundglas nach 2D-Platten-Theorie mit Schubverbund (links), 3D-Modellierung (Mitte) und nach 2D-Platten-Theorie ohne Schubverbund (rechts)

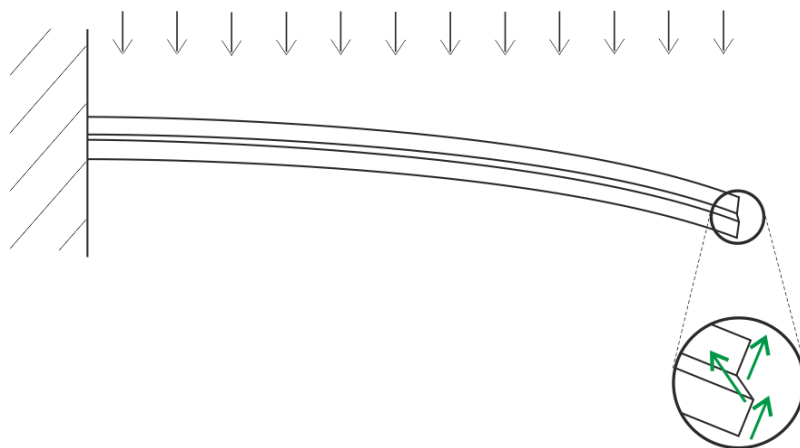


Bild 2.2: Schubverzerrung bei Verbundglas (3D-Modellierung)

2.2.3 Isolierverglasung

Dieser Glastyp wird stets nach Theorie III. Ordnung (große Verformungen) unter Anwendung des NEWTON-RAPHSON-Verfahrens berechnet.

Isolierverglasung besteht aus einzelnen Glasplatten, Gasschicht, Abstandhalter sowie Primär- und Sekundärdichtung. Diese Bauteile sind wesentlich für das Gesamtverhalten der Verglasung. Neben dem Verbund von einzelnen Schichten lassen sich in RF-GLAS außerdem die Eigenschaften der Sekundärdichtung sowie die Klimalasten-Parameter einstellen.

Bei Isolierglas verläuft die Berechnung in 3D, deshalb werden alle Schichten mit Volumen modelliert. Eine Schicht des Typs *Gas* wird mit einem Volumenelement modelliert, das speziell für diese Berechnung erstellt wurde. Dabei handelt es sich um das so genannte „Gas zwischen zwei Flächen“. Das ideale Gasgesetz wird dann in der Berechnung berücksichtigt. Glas wird bei Temperatur T_p , Druck p_p und Anfangsgasvolumen V_0 (einer bestimmten Zwischenschicht) hergestellt.

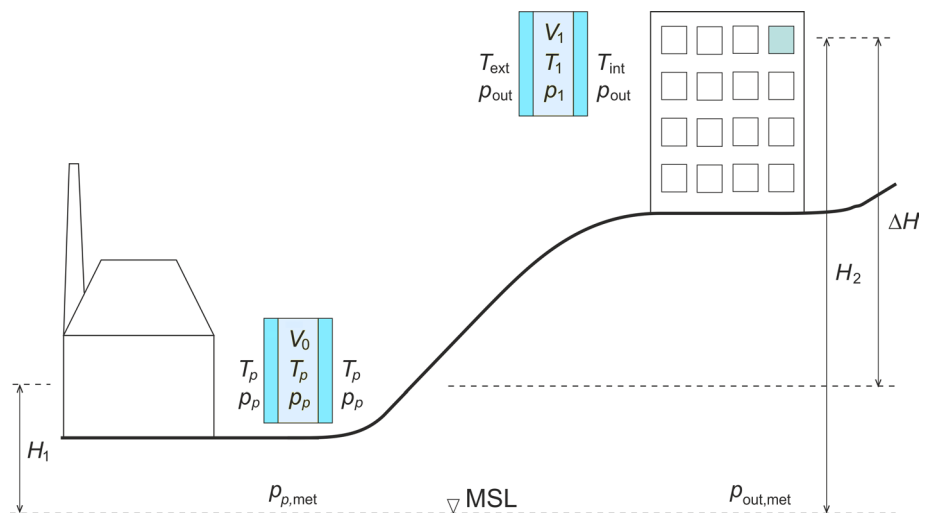


Bild 2.3: Klimalast-Parameter für Herstellung (links) und Nutzung (rechts), MSL = Höhe über mittlerem Meeresspiegel

Eine Last infolge einer Temperaturänderung wird in eine Änderung des Umgebungsdrucks p_{out} mithilfe des Koeffizienten c_1 umgewandelt. Der Umgebungsdruck p_{out} umfasst die atmosphärische Druckänderung umgerechnet auf den Meeresspiegel Δp_{met} , den Einfluss der Gaserwärmung ΔT und die höhenlagenbedingte Druckänderung ΔH . Sie wird wie folgt ermittelt:

$$p_{out} = p_p + \Delta p_{met} - c_1 \Delta T - c_2 \Delta H \quad (2.1)$$

$$\Delta p_{met} = p_{out,met} - p_{p,met} \quad (2.2)$$

$$\Delta T = T_1 - T_p \quad (2.3)$$

$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad (2.4)$$

mit

$$c_1 = \frac{p_p}{T_p} \text{ Pa/K} \quad (2.5)$$

$$c_2 = 12 \text{ Pa/m} \quad (2.6)$$

Das Ergebnis erfüllt zudem die Gleichgewichtsbedingung

$$p_p V_0 = p_1 V_1 \quad (2.7)$$

H_1	Höhenlage bei Herstellung	$p_{p,met}$	Atmosphärischer Druck auf Höhe des Meeresspiegels (Herstellung)
H_2	Höhenlage bei Nutzung	$p_{out,met}$	Atmosphärischer Druck auf Höhe des Meeresspiegels (Nutzung)
ΔH	Höhenunterschied $H_2 - H_1$	p_p	Druck bei Herstellung
T_p	Temperatur bei Herstellung	p_{out}	Umgebungsdruck bei Nutzung
T_{ext}	Temperatur auf der äußeren Glasseite (Nutzung)	p_1	Gasdruck bei Nutzung
T_{int}	Temperatur auf der inneren Glasseite (Nutzung)	V_0	Anfangsvolumen des Gases
T_1	Gastemperatur (Nutzung)	V_1	Endvolumen des Gases

Tabelle 2.1: Formelzeichen für Isolierglas

2.3 Steifigkeitsmatrix

Als isotropes Material wird Glas definiert durch den Elastizitätsmodul E , den Schubmodul G und die Querdehnzahl ν :

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2.8)$$

2.3.1 2D - Berücksichtigung des Schubverbunds zwischen Schichten

Es wird eine Platte bestehend aus n isotropen Materialschichten betrachtet. Jede Schicht hat die Dicke t_i und eine minimale und maximale z-Koordinate $z_{i;\min}$, $z_{i;\max}$.

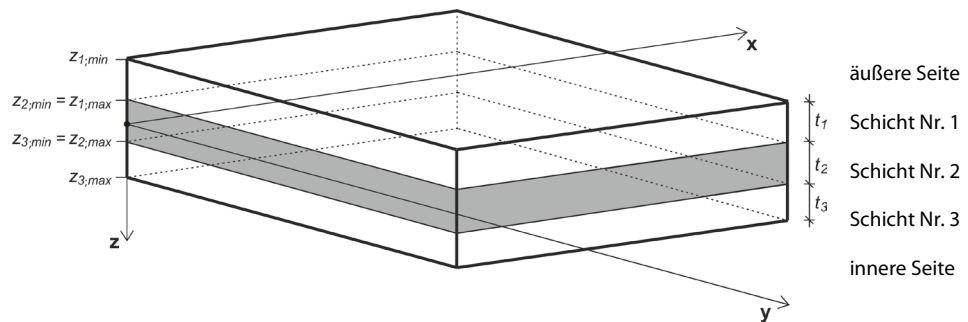


Bild 2.4: Schichtenaufbau

Die Steifigkeitsmatrix für jede Schicht \mathbf{d}_i definiert sich wie folgt

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} d_{i;11} & d_{i;12} & 0 \\ & d_{i;22} & 0 \\ \text{sym.} & & d_{i;33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & \frac{\nu_i E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ & \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ \text{sym.} & & G_i \end{bmatrix}, \quad G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)} \quad i = 1, \dots, n \quad (2.9)$$

Gesamtsteifigkeitsmatrix:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{17} & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & \text{sym.} & D_{27} & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & \text{sym.} & \text{sym.} & D_{38} \\ & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{Bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{17} & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & \text{sym.} & D_{27} & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & \text{sym.} & \text{sym.} & D_{38} \\ & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

	Biegung und Torsion
	Schub
	Membran
	Exzentrizität

Steifigkeitsmatrixelemente (Biegung und Torsion) [Nm]

$$\begin{aligned}
 D_{11} &= \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^3 - z_{i;\min}^3}{3} d_{i;11} & D_{12} &= \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^3 - z_{i;\min}^3}{3} d_{i;12} \\
 D_{22} &= \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^3 - z_{i;\min}^3}{3} d_{i;22} & D_{33} &= \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^3 - z_{i;\min}^3}{3} d_{i;33}
 \end{aligned}$$

Steifigkeitsmatrixelemente (Exzentrizitätseinwirkung) [Nm/m]

$$\begin{aligned}
 D_{16} &= \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^2 - z_{i;\min}^2}{2} d_{i;11} & D_{17} &= \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^2 - z_{i;\min}^2}{2} d_{i;12} \\
 D_{27} &= \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^2 - z_{i;\min}^2}{2} d_{i;22} & D_{38} &= \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^2 - z_{i;\min}^2}{2} d_{i;33}
 \end{aligned}$$

Steifigkeitsmatrixelemente (Membran) [N/m]

$$\begin{aligned}
 D_{66} &= \sum_{i=1}^n t_i d_{i;11} & D_{67} &= \sum_{i=1}^n t_i d_{i;12} \\
 D_{77} &= \sum_{i=1}^n t_i d_{i;22} & D_{88} &= \sum_{i=1}^n t_i d_{i;33}
 \end{aligned}$$

Steifigkeitsmatrixelemente (Schub) [N/m]

Auf das ausführliche Berechnungsverfahren für die Schubelemente der Steifigkeitsmatrix soll hier nicht näher eingegangen werden. Es sei lediglich folgender Zusammenhang angeführt:

$$\max_i \left(\frac{5}{6} G_i t_i \right) \leq D_{44} = D_{55} \leq \frac{5}{6} \max_i (G_i) \sum_{i=1}^n t_i \quad (2.12)$$

2.3.2 3D

Bei einer Modellierung mit Volumenelementen wird folgende Steifigkeitsmatrix verwendet:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{\nu}{E} & \frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E} & \frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2.13)$$

sym.

2.3.3 2D - Keine Berücksichtigung des Schubverbunds zwischen Schichten

Es wird eine Platte aus n isotropen Materialien ohne Schubverbund der einzelnen Schichten betrachtet. Jede Schicht hat eine Dicke t_i und eine minimale und maximale z-Koordinate

$z_{i;\min}, z_{i;\max}$.

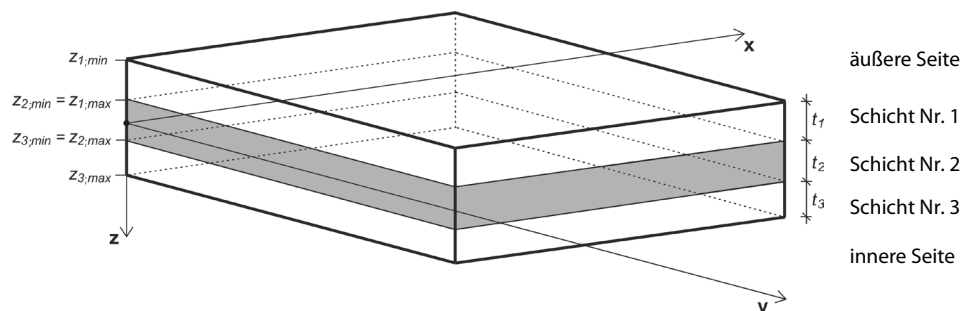


Bild 2.5: Schichtenaufbau

Die Steifigkeitsmatrix für jede Schicht \mathbf{d}_i ergibt sich wie folgt:

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} d_{i;11} & d_{i;12} & 0 \\ & d_{i;22} & 0 \\ \text{sym.} & & d_{i;33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & \frac{\nu_i E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ & \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ \text{sym.} & & G_i \end{bmatrix}, \quad G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)} \quad i = 1, \dots, n \quad (2.14)$$

Gesamtsteifigkeitsmatrix:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{Bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

	Biegung und Torsion
	Schub
	Membran

Steifigkeitsmatrizelemente (Biegung und Torsion) [Nm]

$$D_{11} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^3}{12} d_{i;11} \quad D_{12} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^3}{12} d_{i;12} \quad D_{22} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^3}{12} d_{i;22} \quad D_{33} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^3}{12} d_{i;33}$$

Steifigkeitsmatrizelemente (Membran) [N/m]

$$D_{66} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i;11} \quad D_{67} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i;12} \quad D_{77} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i;22} \quad D_{88} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i;33}$$

Steifigkeitsmatrizelemente (Schub) [N/m]

$$D_{44} = \sum_{i=1}^n \frac{5}{6} G_{i;11} t_i \quad D_{55} = \sum_{i=1}^n \frac{5}{6} G_{i;22} t_i$$

3. Eingabedaten

Nach dem Aufruf von RF-GLAS erscheint ein neues Fenster. Links wird ein Navigator angezeigt, der die verfügbaren Masken verwaltet.

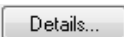
Die bemessungsrelevanten Daten sind in mehreren Eingabemasken zu definieren.



Eine Maske lässt sich durch Anklicken des Eintrags im Navigator aufrufen. Mit den links dargestellten Schaltflächen wird die vorherige bzw. nächste Maske eingestellt. Das Blättern durch die Masken ist auch mit den Funktionstasten [F2] (vorwärts) und [F3] (rückwärts) möglich.



Nach der Eingabe aller Daten kann die [Berechnung] gestartet werden.



Über die Schaltfläche [Details] öffnet sich der gleichnamige Dialog, in dem die Spannungen und anzuzeigenden Ergebnismasken festgelegt werden können (siehe Kapitel 4.1.1, Seite 35).



Die Schaltfläche [Norm] ruft einen Dialog auf, in dem die Grenzwerte der Durchbiegung und andere Berechnungsparameter eingestellt werden können.



Über die Schaltfläche [Grafik] gelangt man in das RFEM-Arbeitsfenster.



Mit [OK] werden die Eingabedaten gesichert und das Modul RF-GLAS verlassen. [Abbrechen] beendet das Zusatzmodul, ohne die Daten zu speichern.



3.1 Basisangaben

In Maske 1.1 *Basisangaben* sind die Flächen und Einwirkungen für den Nachweis auszuwählen. Die beiden Register verwalten die Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen für die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit.

Bemessen von



Der Abschnitt oben verwaltet die nachzuweisenden Flächen. Falls nur bestimmte Flächen untersucht werden sollen, ist das Kontrollfeld *Alle* zu deaktivieren: Damit wird das Eingabefeld zugänglich, sodass die Nummern der relevanten Flächen eingetragen werden können. Die Liste der voreingestellten Nummern kann per Doppelklick selektiert und dann durch manuelle Eingaben überschrieben werden. Über die Schaltfläche [↖] lassen sich die Flächen grafisch im RFEM-Arbeitsfenster auswählen. Die Liste der bereits angegebenen Flächennummern kann mit der Schaltfläche [X] wieder gelöscht werden.



Kommentar

Dieses Feld befindet sich am unteren Ende der Maske. Hier können Sie Anmerkungen und Erläuterungen zum aktuellen RF-GLAS-Fall eintragen.

3.1.1 Tragfähigkeit

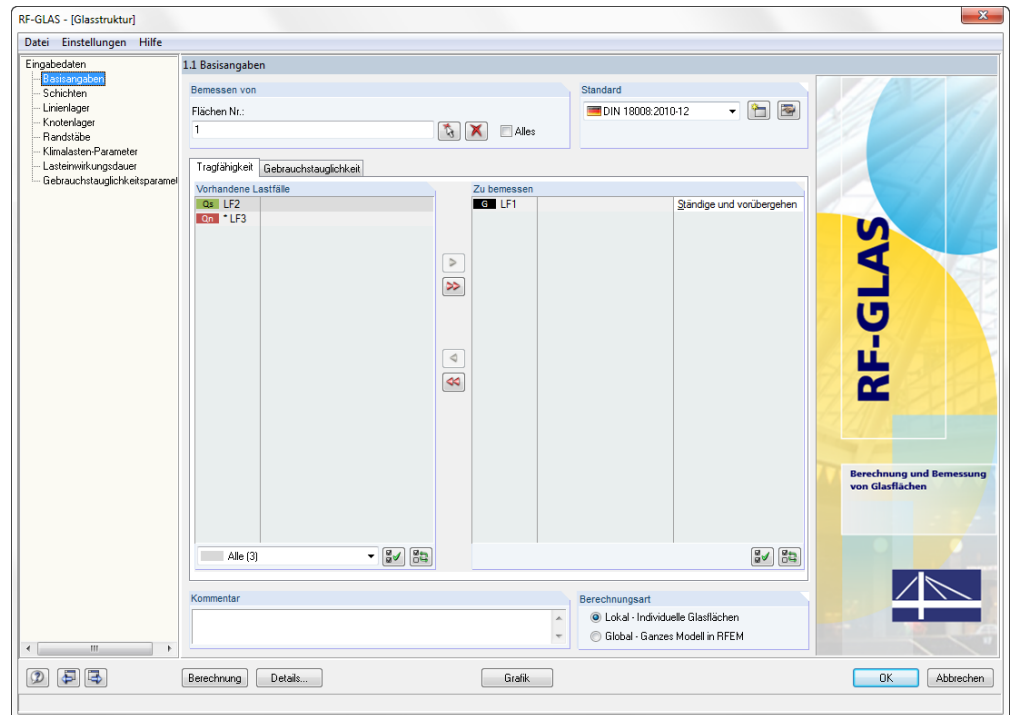


Bild 3.1: Maske 1.1 Basisangaben, Register Tragfähigkeit

Vorhandene Lastfälle

In diesem Abschnitt sind alle Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet, die in RFEM angelegt wurden.



Mit der Schaltfläche [►] lassen sich selektierte Einträge in die Liste *Zu Bemessen* nach rechts übertragen. Die Übergabe kann auch per Doppelklick erfolgen. Die Schaltfläche [►►] übergibt die komplette Liste nach rechts.

Die Mehrfachauswahl von Lastfällen ist – wie in Windows üblich – mit gedrückter [Strg]-Taste möglich. So lassen sich mehrere Lastfälle gleichzeitig übertragen.

Falls ein Lastfall mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet ist wie z. B. LF3 in Bild 3.1, so kann dieser nicht bemessen werden: Hier handelt es sich um einen Lastfall ohne Lastdaten oder um einen Imperfektionslastfall. Für Isolierglas jedoch gilt eine Ausnahme: Dieser Glastyp kann auch nur durch eine Änderung der Temperatur, des atmosphärischen Drucks oder der Höhenlage belastet werden (siehe Kapitel 3.6, Seite 29). Ist in Maske 1.2 *Schichten* mindestens eine Gasschicht definiert, verschwindet in Maske 1.1 *Basisangaben* das Sternchen (*) bei einem Lastfall ohne Lastdaten, sodass der Lastfall für den Nachweis ausgewählt werden kann.

Am Ende der Liste sind verschiedene Filteroptionen verfügbar. Sie erleichtern es, die Einträge nach Lastfällen, Kombinationen oder Einwirkungskategorien geordnet zuzuweisen. Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:



	Alle Lastfälle in der Liste werden selektiert.
	Die Auswahl der Lastfälle wird umgekehrt.

Tabelle 3.1: Schaltflächen im Register *Tragfähigkeit*



Da die Berechnung von Isolierglas immer nach Theorie III. Ordnung erfolgt (große Verformungen), können bei Isolierglas keine Ergebniskombinationen untersucht werden.

Zu bemessen

In der rechten Spalte werden die zur Bemessung gewählten Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet. Mit [◀] oder per Doppelklick lassen sich selektierte Einträge wieder aus der Liste entfernen. Die Schaltfläche [◀◀] leert die ganze Liste.

Die Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen können folgenden Bemessungssituationen zugewiesen werden:

- *Ständige und vorübergehende*
- *Außergewöhnlich*

Diese Einteilung steuert den Teilsicherheitsbeiwert γ_M der Materialeigenschaften. Die Beiwerte können im Dialog *Norm* überprüft werden (siehe Kapitel 4.3, Seite 44).

3.1.2 Gebrauchstauglichkeit

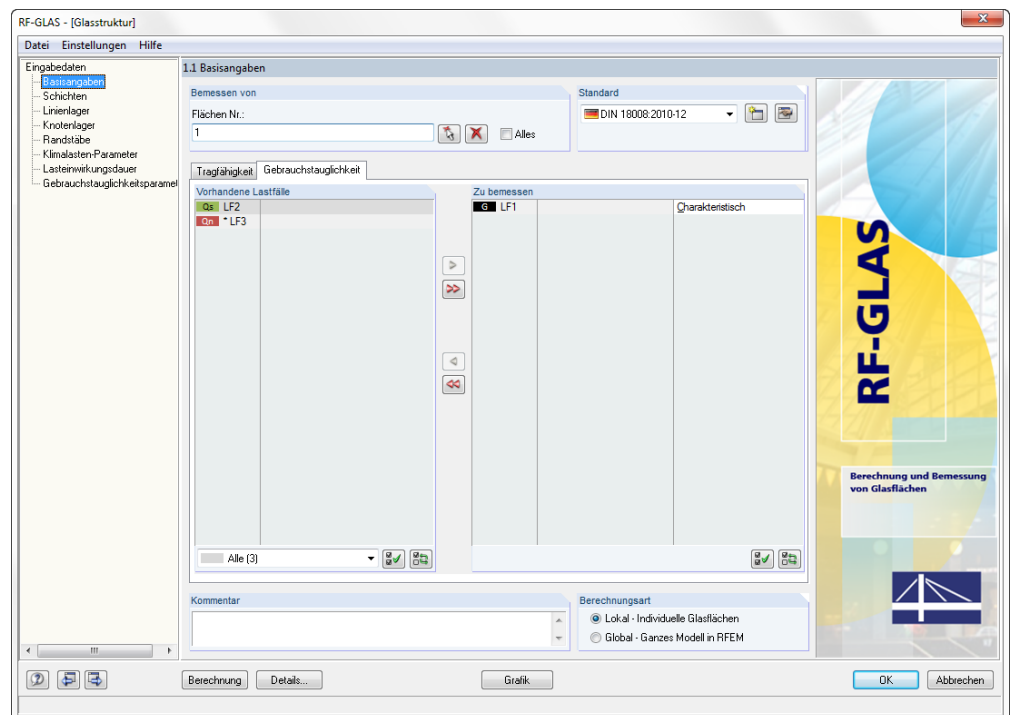


Bild 3.2: Maske 1.1 Basisangaben, Register Gebrauchstauglichkeit

Vorhandene Lastfälle

In diesem Abschnitt sind alle Lastfälle sowie Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet, die in RFEM angelegt wurden. Nach der Übergabe von Einträgen in den rechten Dialogabschnitt *Zu bemessen* erscheint im Navigator die zusätzliche Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeit*.

Zu bemessen

Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen lassen sich wie im Kapitel 3.1.1 beschrieben hinzufügen oder wieder entfernen.

In diesem Abschnitt ist den einzelnen Lastfällen, Last- und Ergebniskombinationen eine Bemessungssituation zuzuweisen – *Charakteristisch*, *Häufig* oder *Quasi-ständig*. Auf Grundlage dieser Auswahl gelten verschiedene Grenzwerte für die Durchbiegung. Diese Grenzwerte können im Dialog *Norm* angepasst (siehe Kapitel 4.3, Seite 44).

3.2 Schichten

1.2 Schichten

Schichten

Schicht Nr.	A Schicht- typ	B Material Bezeichnung	C Dicke t [mm]	D Elastizitätsmodul E [N/mm ²]	E Schubmodul G [N/mm ²]	F Querdehnzahl ν [-]	G Spez. Gewicht γ [kN/m ³]	H Wärmedehnz α _T [1/K]
1	Glas	Einscheibensicherheitsglas (ESG)	10.00	70000.000	28455.000	0.230	25.00	9.0
2	Folie	PVB 22 °C Belastung bis 3 min	0.38	3.000	1.001	0.499	10.70	8.0
3	Glas	Einscheibensicherheitsglas (ESG)	11.00	70000.000	28455.000	0.230	25.00	9.0
4								
5	Glas							
6	Folie							
7	Glas (SZR)							
8								
9								
10								
11								
12								

Info

Schicht Nr.: 4

• Gewicht: [kN/m²]

Σ Dicke: 21.38 [mm]

Σ Gewicht: 0.529 [kN/m²]

1: Einscheibensicherheitsglas (ESG)
2: PVB 22 °C Belastung bis 3 min
3: Einscheibensicherheitsglas (ESG)

Lokalachse z
Richtung
unten

Bild 3.3: Maske 1.2 Schichten


In dieser Maske sind die einzelnen Schichten der Glasstruktur zu definieren. Für jeden Bemessungsfall kann ein Schichtenaufbau eingegeben werden. In Spalte A *Schichttyp* stehen die drei Optionen **Glas**, **Folie** und **Gas** zur Auswahl.

Die Materialien können in einer Bibliothek ausgewählt werden, in der bereits viele Materialien hinterlegt sind. Die Materialbibliothek ist über die links dargestellte Schaltfläche zugänglich. Sie können auch den Cursor in das relevante Feld der Spalte B *Materialbezeichnung* setzen und dann auf die erscheinende Schaltfläche [...] klicken oder die Funktionstaste [F7] drücken.

In der Materialbibliothek (siehe Bild 3.4) wird im Abschnitt *Filter* die Materialkategorie voreingestellt, die für den in Spalte A angegebenen Schichttyp geeignet ist.

Die Auswahlmöglichkeiten der Materialien können mithilfe der Auswahllisten *Norm-Gruppe* bzw. *Norm* eingeschränkt werden. In der Liste *Material zum Übernehmen* können Sie ein Material auswählen und dessen Parameter im unteren Teil des Dialogs kontrollieren.

Um ein Material in die Maske 1.2 *Schichten* zu importieren, benutzen Sie die Schaltfläche [OK], drücken die Taste [↵] oder führen einen Doppelklick auf das Material aus. Danach können alle Materialparameter direkt im Modul angepasst werden.



B Material Bezeichnung
Einscheibensicherheitsglas (ESG)
PVB 22 °C Belastung bis 3 min
Einscheibensicherheitsglas (ESG)

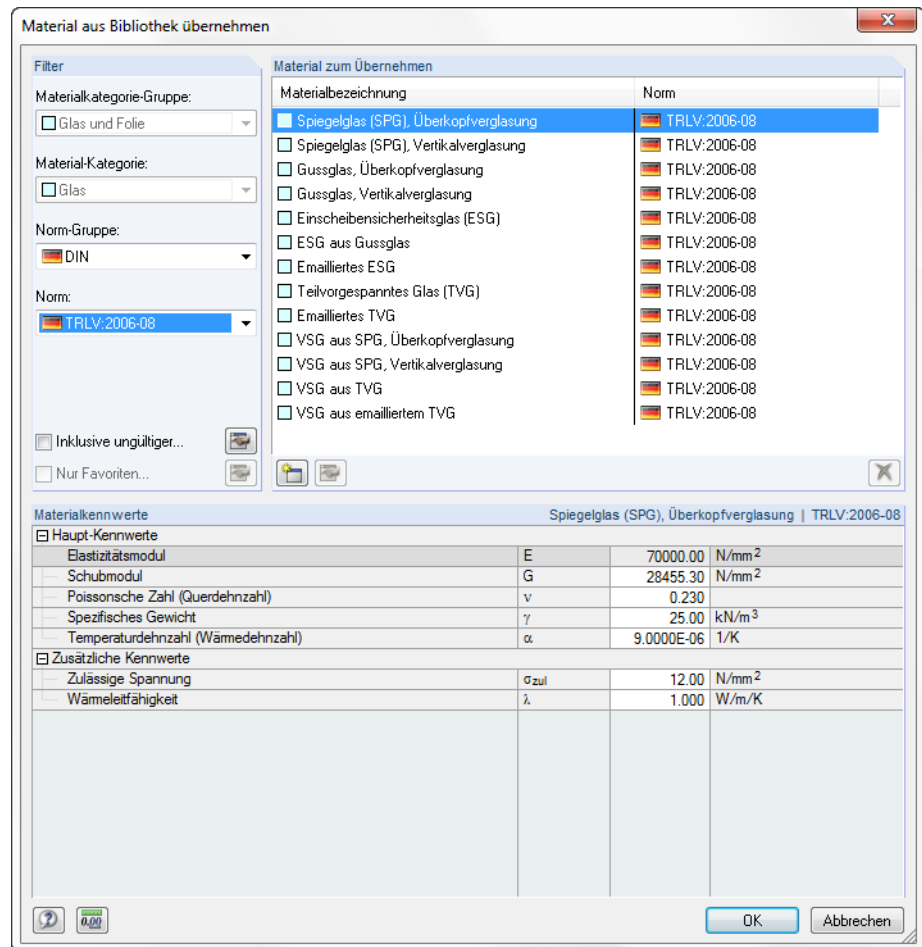


Bild 3.4: Materialbibliothek

Bei den TRLV-Regeln (Technische Regeln für Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen) wird in der Bibliothek zwischen vertikaler und horizontaler Überkopfverglasung unterschieden. Das folgende Bild verdeutlicht den Unterschied. Für Glastypeen, die diese Unterteilung nicht kennen, sind die Parameter für beide Verglasungstypen identisch.

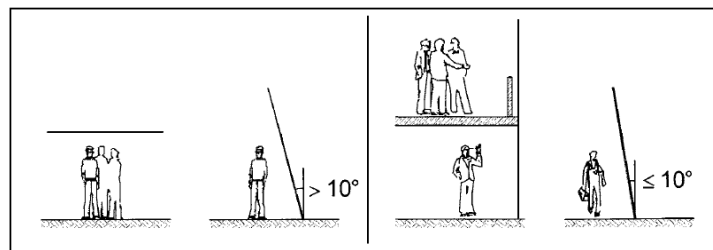


Bild 3.5: Horizontalverglasung (links), Vertikalverglasung (rechts) [6]

Die einzelnen Schichten können einen festen (Glas oder Folie) oder einen gasartigen Zustand aufweisen. Enthält die Verglasung eine Gasschicht (d. h. bei Isolierglas), dann wird angezeigt, welche Seite die innere und welche die äußere ist (siehe Bild 3.6). Diese Information ist wichtig für die Eingabe weiterer Parameter in Maske 1.6 *Klimalast-Parameter*, die bei einer Gasschicht zusätzlich im Navigator erscheint (siehe Kapitel 3.6, Seite 29).



Eine Gasschicht muss immer von zwei Seiten durch Schichten aus festem Material (Glas oder Folie) eingeschlossen sein.

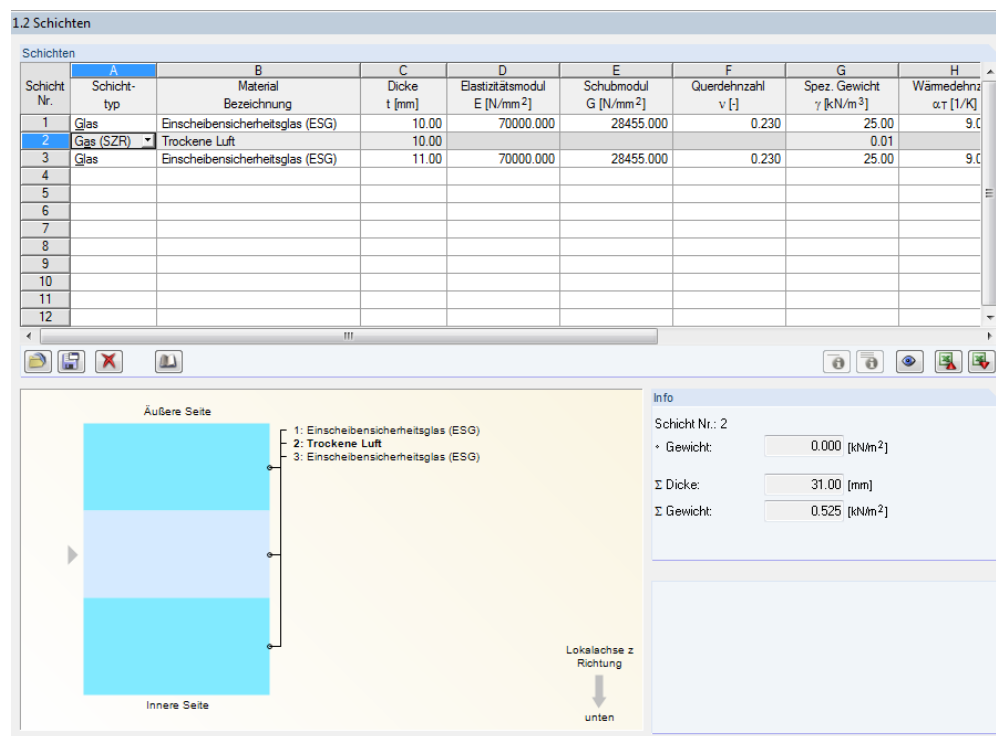


Bild 3.6: Maske 1.2 *Schichten* - Isolierglas

Die Schaltflächen unterhalb der Tabelle sind mit folgenden Funktionen belegt:










Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Gespeicherte Schichten einlesen	Liest einen zuvor gespeicherten Schichten-aufbau wieder ein
	Schichten speichern unter	Speichert den aktuellen Schichtenaufbau als Vorlage für andere Modelle
	Löscht alle Schichten	Löscht alle Daten in Maske 1.2
	Material aus Bibliothek übernehmen	Öffnet den Dialog <i>Material aus Bibliothek übernehmen</i>
	Steifigkeitsmatrixelemente der Schicht anzeigen	Zeigt die in Kapitel 2.3 auf Seite 12 erklärten Elemente der Steifigkeitsmatrix an
	Erweiterte Steifigkeitsmatrixelemente anzeigen	Zeigt die in Kapitel 2.3 auf Seite 12 erklärten Elemente der globalen Steifigkeitsmatrix an
	In den Sichtmodus wechseln	Wechselt in die RFEM-Oberfläche für eine grafische Überprüfung, ohne RF-GLAS zu beenden
	An MS Excel übergeben	Exportiert den Inhalt der Maske nach MS Excel oder OpenOffice.org Calc (→ Kapitel 7.2, S. 58)
	Aus MS Excel übernehmen	Importiert den Inhalt einer MS Excel- oder OpenOffice.org Calc-Tabelle in Maske 1.2

Tabelle 3.2: Schaltflächen in Maske 1.2 *Schichten*

Im Abschnitt *Info* rechts unten werden Informationen zum Gewicht der ausgewählten Schicht sowie zu Gesamtgewicht und -dicke des Modells angezeigt.

3.3 Linienlager

1.3 Linienlager

Lagertyp		A		B	
Lager Nr.	An Linien Nr.	Lager	Typ	Lager	Typ
1	1-4	Gelenkig	Typ 1		
2		Gelenkig	Typ 1		
		Gelenkig	Typ 2		
		Gelenkig	Typ 3		
		Gelenkig	Typ 4		
		Gelenkig	Typ 5		
		Gelenkig	Typ 6		
		Gelenkig	Typ 7		
		Symmetrie			
		Eingespannt			
		Benutzerdefiniert			

Stützung bzw. Einspannung

Schicht Nr.	Lager-Anordnung	Bezugs-System	Drehung β [°]	Lagerung bzw. Feder [kN/m ²]			Einspannung bzw. Feder [kNm/m]		
				u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z
1	Mitte	Lokal	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Mitte	Lokal	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Lokales Bezugssystem wird wie folgt definiert

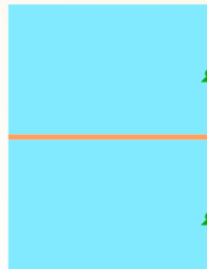


Bild 3.7: Maske 1.3 Linienlager

Der Nachweis in RF-GLAS erfordert ein präzises statisches Modell. Hierfür stehen neun vordefinierte Linienlagertypen sowie ein benutzerdefinierbarer Typ zur Auswahl. Die in RF-GLAS eingegebenen Lager werden nur für dieses Modell verwendet; sie haben keinen Einfluss auf RFEM.

In Spalte A sind die *Linien* anzugeben, an denen das Lager wirkt. In Spalte B kann ein Standard-Lagertyp (*Gelenkig - Typ 1 bis Typ 7*, *Symmetrie* und *Eingespannt*) oder ein benutzerdefiniertes Lager ausgewählt werden. Letzteres ist in der unteren Tabelle der Maske zu spezifizieren. Das dynamische Bild zeigt zur Kontrolle die Stellen der Linienlager an den Schichten an. Alle vordefinierten Linienlager sind auf das lokale Koordinatensystem bezogen, das für RF-GLAS folgendermaßen definiert ist: Achse x ist die Mittellinie der aktuellen Linie, Achse y in der Ebene einer in RFEM definierten Fläche und Achse z steht senkrecht zur RFEM-Fläche.

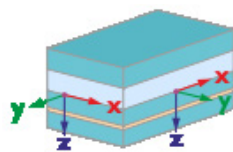
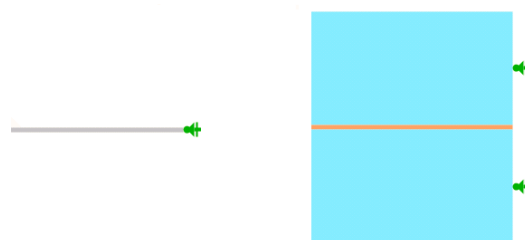



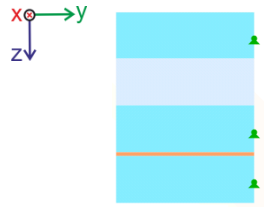

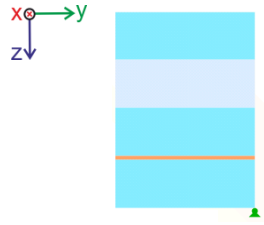
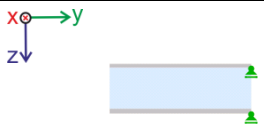
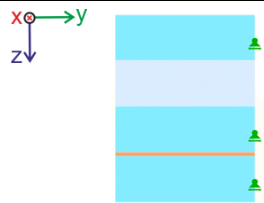
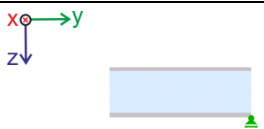
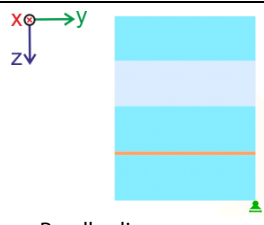

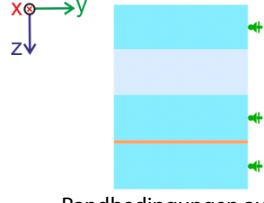
Bild 3.8: Lokales Koordinatensystem von RF-GLAS



Bei Verbundglas bestehen Unterschiede zwischen 2D- und 3D-Berechnung in den Randbedingungen für die Linienlagertypen *Gelenkig* (Typen 1, 3, 5, 7). Wenn die Berechnung in 2D (nach Plattendtheorie) erfolgt, sind die Lager gelenkig. Bei der 3D-Berechnung hingegen (Volumenmodell) sind die Lager teilweise eingespannt. Das folgende Bild verdeutlicht den Unterschied:

Bild 3.9: Linienlager des Typs *Gelenkig - Typ 5*: 2D-Berechnung (links) und 3D-Berechnung (rechts)

Die vordefinierten Lagertypen sind in folgender Tabelle erläutert:

Gelenkig - Typ 1		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen auf der Mittellinie der Glasschicht	$u_x = u_y = u_z = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 2		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen am unteren Rand der unteren Glasschicht	$u_x = u_y = u_z = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 3		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen auf den Mittellinien der Glasschichten	$u_z = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 4		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen am unteren Rand der unteren Glasschicht	$u_z = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 5		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen auf der Mittellinie der Glasschichten	$u_x = u_y = 0$ $\varphi_z = 0$


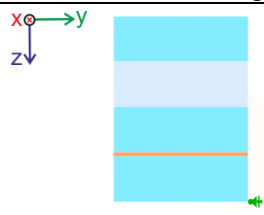

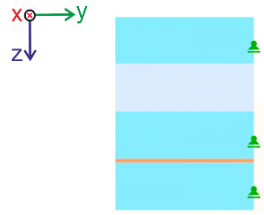

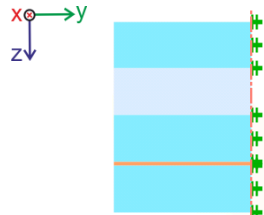

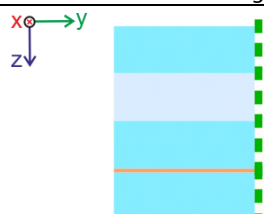
Gelenkig - Typ 6		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen am unteren Rand der untersten Glasschicht	$u_x = u_y = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 7		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen auf der Mittellinie der Glasschichten	$u_x = u_z = 0$ $\varphi_y = \varphi_z = 0$
Symmetrie		
Diese Randbedingung empfiehlt sich für Fälle, bei denen die Symmetrie eines Modells genutzt werden soll. Die Bedingung enthält nicht nur korrekte Linienlager, sondern auch ein geeignetes Material der Seitenfläche, die keine Steifigkeit des Modells zur Folge hat.		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen auf allen Linien sämtlicher Schichten	$u_y = 0$ $\varphi_x = \varphi_z = 0$
Eingespannt		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen auf allen Linien sämtlicher Schichten	$u_x = u_y = u_z = 0$ $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$

Tabelle 3.3: Vordefinierte Linienlagertypen

Benutzerdefinierte Lager können in der unteren Tabelle eingegeben werden (siehe Bild 3.7) – für Glasschichten, die Linien dieser Tabelle enthalten. In dieser Tabelle ist die *Lageranordnung* auszuwählen und das *Bezugssystem* festzulegen. Es kann zwischen dem lokalen Koordinatensystem von RF-GLAS (direkt in der Tabelle zu definieren) und dem globale Koordinatensystem gewählt werden. Ferner können eine Drehung des lokalen Koordinatensystems um die Achse x mit dem Winkel β festgelegt sowie die Freiheitsgrade im Detail definiert werden.

Wie bei den vordefinierten Lagern werden die selektierten Linien mit den gewählten Linienlagern in der Dialoggrafik angezeigt.

In Maske 1.3 stehen drei Schaltflächen mit den folgenden Funktionen zur Verfügung:




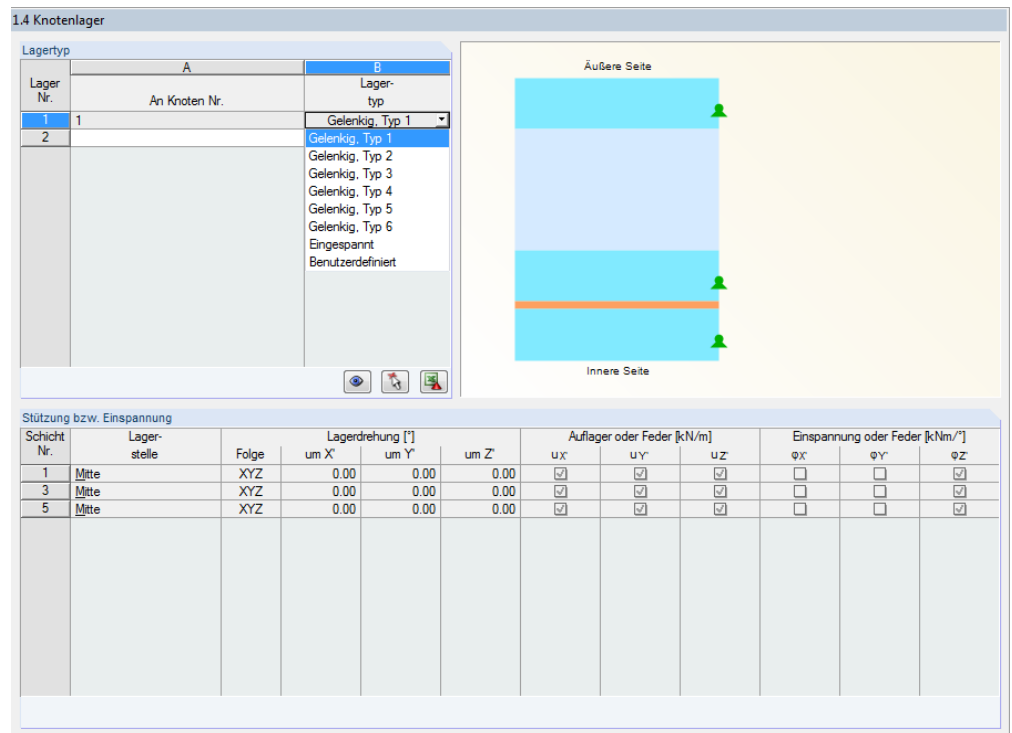
Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Sichtmodus	Wechselt in die RFEM-Oberfläche für eine grafische Überprüfung, ohne RF-GLAS zu beenden
	Grafikauswahl	Ermöglicht die grafische Auswahl einer Linie im RFEM-Arbeitsfenster
	MS Excel	Exportiert den Inhalt der Maske nach MS Excel oder OpenOffice.org Calc (→ Kapitel 7.2, Seite 58)

Tabelle 3.4: Schaltflächen in Maske 1.3 *Linienlager*

3.4 Knotenlager



1.4 Knotenlager

Lagertyp

Lager Nr.	A	B
	An Knoten Nr.	Lager-typ
1	1	Gelenkig, Typ 1
2		Gelenkig, Typ 1
		Gelenkig, Typ 2
		Gelenkig, Typ 3
		Gelenkig, Typ 4
		Gelenkig, Typ 5
		Gelenkig, Typ 6
		Eingespannt
		Benutzerdefiniert


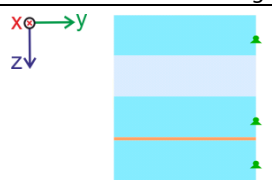

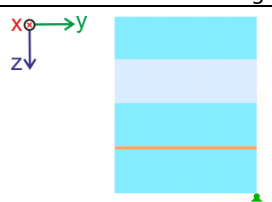

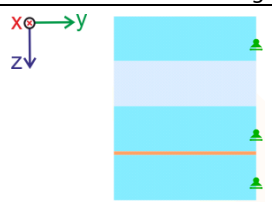

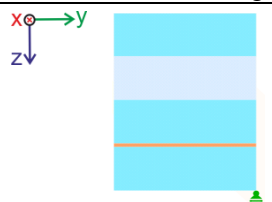

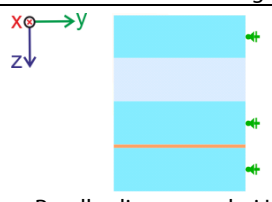
Stützung bzw. Einspannung

Schicht Nr.	Lager-stelle	Folge	Lagerdrehung [°]			Auflager oder Feder [kN/m]			Einspannung oder Feder [kNm/m]		
			um X'	um Y'	um Z'	u_x	u_y	u_z	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z
1	Mitte	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Mitte	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Mitte	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Bild 3.10: Maske 1.4 *Knotenlager*

In dieser Maske können Knotenlager definiert werden. In Spalte A sind die *Knoten* anzugeben, an denen das Lager wirkt. In Spalte B kann ein Standard-Lagertyp (*Gelenkig - Typ 1 bis Typ 6, Eingespannt*) oder ein benutzerdefiniertes Lager ausgewählt werden. Letzteres ist in der unteren Tabelle zu spezifizieren. Das dynamische Bild zeigt zur Kontrolle die genaue Anordnung der Knotenlager an den einzelnen Schichten an.

Die vordefinierten Lagertypen sind in folgender Tabelle erläutert:

Gelenkig - Typ 1		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen bei Knoten auf der Mittellinie der Glasschicht	$u_x = u_y = u_z = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 2		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen am unteren Rand der untersten Glasschicht	$u_x = u_y = u_z = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 3		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen bei Knoten auf der Mittellinie der Glasschicht	$u_z = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 4		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen am unteren Rand der untersten Glasschicht	$u_z = 0$ $\varphi_z = 0$
Gelenkig - Typ 5		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen bei Knoten auf der Mittellinie der Glasschicht	$u_x = u_y = 0$ $\varphi_z = 0$

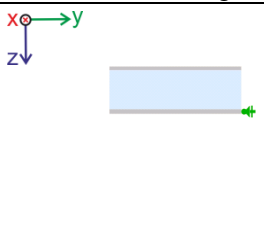
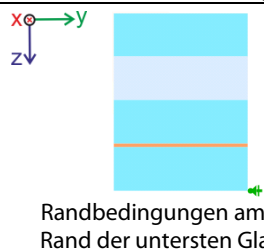
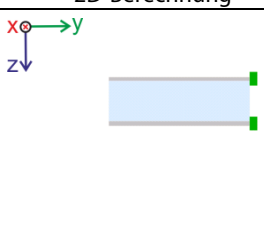
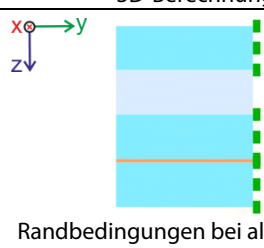
Gelenkig - Typ 6		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen am unteren Rand der untersten Glasschicht	$u_x = u_y = 0$ $\varphi_z = 0$
Eingespannt		
2D-Berechnung	3D-Berechnung	Randbedingungen
	 Randbedingungen bei allen Knoten auf allen Mittellinien aller Schichten	$u_x = u_y = u_z = 0$ $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$

Tabelle 3.5: Vordefinierte Knotenlagertypen

Benutzerdefinierte Lager können in der unteren Tabelle eingegeben werden (siehe Bild 3.10) – für Glasschichten, die Knoten dieser Tabelle enthalten. Zunächst ist die *Lagerstelle* und eventuell eine *Lagerdrehung* anzugeben. Dann können die Freiheitsgrade im Detail definiert werden.

In Maske 1.4 stehen die gleichen Schaltflächen wie in Maske 1.3 zur Verfügung (siehe Tabelle 3.4, Seite 25).

3.5 Randstäbe

1.5 Randstäbe

Zuordnung der Bezugslängen zu den Flächen

Stab Nr.	A	B	C	Querschnitt Nr.		Stabdrehung		Gelenk Nr.		J	K	Kommentar
	An Linien Nr.	Schicht	Lage	Anfang	Ende	Typ	β [°]	Anfang	Ende	Exzentr. Nr.	Teilung Nr.	
1	1-3	5	Mitte	1	1	Winkel	0.00	0	0	0	0	
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												

Bild 3.11: Maske 1.5 Randstäbe

In dieser Maske können Stäbe definiert werden, die am Rand der Glasfläche vorhanden sind.

In Spalte A ist die *Linie* auszuwählen, auf der der Stab liegt. In Spalte B kann die *Schicht* angegeben werden, an deren Mittellinie der Stab angeordnet ist. Hierbei stehen nur Schichten des Typs „Glas“ zur Auswahl. In Spalte C ist die *Lage* der Randstäbe an der Glasschicht festzulegen (Schichtrand oben/unten, Mitte).

In den Spalten D und E kann der *Querschnitt* des Stabes ausgewählt werden, der am Anfang und am Ende der Linie vorliegt. Das Profil muss zuvor in RFEM definiert werden. In den Spalten F und G kann eine mögliche *Stabdrehung* definiert werden. Die Spalten H und I sind für Stabend-*Gelenke* vorgesehen. In Spalte J kann eine *Exzentrizität* und in Spalte K eine *Teilung* definiert werden.

Spalte L schließlich steht für einen Benutzer-*Kommentar* zur Verfügung.

In Maske 1.5 sind die gleichen Schaltflächen wie in Maske 1.3 verfügbar (siehe Tabelle 3.4, Seite 25).

3.6 Klimalasten-Parameter

Diese Maske erscheint nur, wenn in Maske 1.2 mindestens eine Gasschicht ausgewählt wird, sodass der Scheibentyp „Isolierglas“ vorliegt (siehe Kapitel 3.2 *Schichten*).

Einscheibengläser und geschichtete Glasscheiben ohne Gasschicht können nur durch in RFEM definierte Lastfälle belastet werden (Eingabe in Maske 1.1). Isolierglas hingegen kann zusätzlich durch Klimalasten beaufschlagt werden. Diese sind in Maske 1.6 zu definieren.

1.6 Klimalasten-Parameter für Isolierglas

☒ Verwenden

Klimalasten-Parameter - Sommer

Herstellung		Nutzung		Differenz
Temperatur:	19.0 [°C]	Temperatur: Außen:	28.0 [°C]	9.0 [°C]
		Gas:	39.0 [°C]	20.0 [°C]
		Innen:	28.0 [°C]	9.0 [°C]
Atmosph. Druck:	0.103 [N/mm ²]	Atmosph. Druck:	0.101 [N/mm ²]	-0.002 [N/mm ²]
Höhenlage:	0.0 [m]	Höhenlage:	0.0 [m]	0.0 [m]

Klimalasten-Parameter - Winter

☒ Verwenden

Herstellung		Nutzung		Differenz
Temperatur:	27.0 [°C]	Temperatur: Außen:	-10.0 [°C]	-37.0 [°C]
		Gas:	2.0 [°C]	-25.0 [°C]
		Innen:	19.0 [°C]	-8.0 [°C]
Atmosph. Druck:	0.099 [N/mm ²]	Atmosph. Druck:	0.103 [N/mm ²]	0.004 [N/mm ²]
Höhenlage:	0.0 [m]	Höhenlage:	0.0 [m]	0.0 [m]

Lastverteilung

Nr.	Bezeichnung	Lastanteil [%] an der Glasseite	
		Außen	Innen
LF1		100.0	0.0

Einstellungen

☐ Berechnung nach TRLV, Anhang A
Hilfsmodell als allseitig gelagerte rechteckige Scheibe

Bild 3.12: Maske 1.6 *Klimalasten-Parameter für Isolierglas*

Die *Klimalasten-Parameter* werden unterteilt in Sommer- und Winter-Lasten. Der Aufbau der beiden Lastsätze ist identisch. Deshalb genügt es, die einzelnen Lastparameter am Beispiel der **Klimalasten-Parameter - Sommer** zu erläutern (siehe auch folgendes Bild).

Zunächst ist das Kontrollfeld *Verwenden* des relevanten Parametersatzes anzuhaken.

Links sind die Lastparameter *Temperatur*, *Atmosphärischer Druck* und *Höhenlage* zum Zeitpunkt der *Herstellung* der Glasscheibe anzugeben. Rechts davon können die entsprechenden Parameter zum Zeitpunkt der *Nutzung*, d. h. nach dem Einbau der Glasscheibe eingegeben werden.

Die *Temperatur*, die bei der Herstellung für alle Komponenten der Glasscheibe gleich ist, muss für die Nutzung differenziert betrachtet werden: Außentemperatur, Innentemperatur und Gas-temperatur sind für die Nachweise unterschiedlich anzusetzen.

Rechts davon wird jeweils die *Differenz* zwischen Herstellungs- und Nutzungsbedingungen angezeigt.

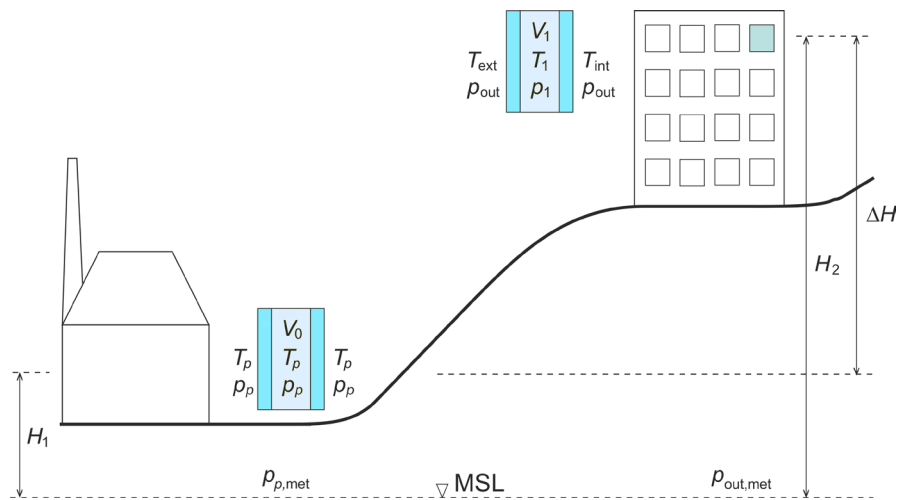


Bild 3.13: Klimabelastungs-Parameter für Herstellung (links) und Nutzung (rechts), MSL = mittlere Meereshöhe

In der Tabelle *Lastverteilung* kann festgelegt werden, wie die in RFEM definierten Lasten anteilmäßig auf die äußere und die innere Glasseite wirken. Die zur Bemessung ausgewählten Einwirkungen sind voreingestellt. In Maske 1.2 *Schichten* ist die Lage der Seiten geregelt:

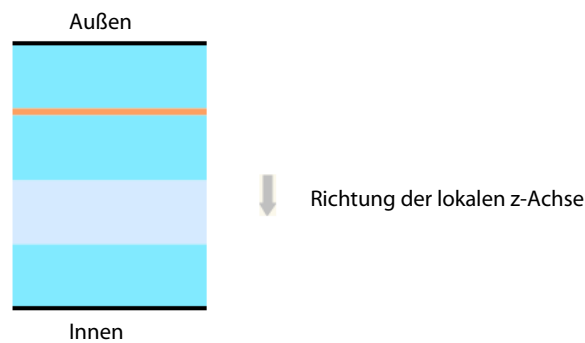


Bild 3.14: Innere und äußere Seite der Isolierverglasung

Für spezielle Modelle lässt sich im Abschnitt *Einstellungen* eine vereinfachte Berechnung nach DIN 18008-2:2010-12, Anhang A oder den Technischen Regeln TRLV, Anhang A aktivieren. Dabei müssen folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Rechteckige Fläche ohne Öffnung
- Genau eine Gasschicht
- Linienlager des Typs *Gelenkig - Typ 7* auf allen Begrenzungslinien
- Belastung nur durch Flächenlast

Für die Berechnung nach TRLV, Anhang A werden immer die Kirchhoffsche Plattentheorie und die Theorie I. Ordnung angewandt (siehe [1], [2], [5]).

Unten rechts sind drei Schaltflächen verfügbar, die mit folgenden Funktionen belegt sind:

Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Standard	Stellt die Klimabelastungs-Parameter nach den gespeicherten Standardeinstellungen ein
	Als Standard setzen	Speichert die aktuellen Klimabelastungs-Parameter als neuen Standard
	Dlubal-Werte einlesen	Stellt die ursprünglichen Voreinstellungen gemäß DIN 18008-2:2010-12, Tabelle 3 ein

Tabelle 3.6: Schaltflächen in Maske 1.6 *Klimabelastungs-Parameter*

Bild 3.15: Maske 1.7 *Lasteinwirkungsdauer*

In Spalte C kann die *Klasse der Lasteinwirkungsdauer* - *KLED* festgelegt werden. Diese Klassen orientieren sich an der Norm DIN 18008-2:2010-12, Tabelle 6. Die Klassifikation der Lastkombinationen richtet sich automatisch nach der maßgebenden Last. Wird in Spalte C ein Eintrag ausgewählt, so wird der entsprechende Beiwert k_{mod} automatisch in Spalte D eingetragen.

Rechts unten befindet sich die Schaltfläche [Export], über die der Tabelleninhalt nach MS Excel oder OpenOffice.org Calc übergeben werden kann.

3.8 Gebrauchstauglichkeitsparameter

Die Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeitsparameter* ist die letzte Eingabemaske.

1.8 Gebrauchstauglichkeitsparameter

Zuordnung der Bezugslängen zu den Flächen

Nr.	A Liste der Flächen	B Bezugslänge		D Krag- fläche	E Kommentar
		Manuell	C L [m]		
1	1	<input type="checkbox"/>	1.000	<input type="checkbox"/>	
2					

Details...

Bild 3.16: Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeitsparameter*

In Spalte A sind die Flächen anzugeben, deren Verformungen untersucht werden sollen.

Spalte B steuert, ob die *Bezugslänge L* manuell festgelegt wird. Wenn das Kontrollfeld *Manuell* leer bleibt, wird automatisch die längste Grenzlinie der gewählten Fläche eingestellt. In Spalte D ist anzugeben, ob eine Kragfläche vorliegt.

Spalte E steht für einen benutzerdefinierten *Kommentar* zur Verfügung.

Die Vorgaben dieser Maske sind für den korrekten Ansatz der Grenzverformungen bedeutsam. Diese Grenzwerte für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit können im Dialog *Norm* überprüft und bei Bedarf angepasst werden (siehe Kapitel 4.3, Seite 44).

4. Berechnung

Berechnung

Vor dem Start der [Berechnung] sollten die Detaileinstellungen für den Nachweis kontrolliert werden. Die entsprechenden Dialoge sind in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Die Berechnung der ausgewählten Flächen in RF-GLAS erfolgt an herausgelösten Systemen: Die Flächen werden separat untersucht, d. h. ohne Wechselwirkung mit dem in RFEM erzeugten Modell.

Das folgende Beispiel zeigt, wie sich die Modellierung in RFEM trotzdem auf die RF-GLAS-Berechnung auswirkt.

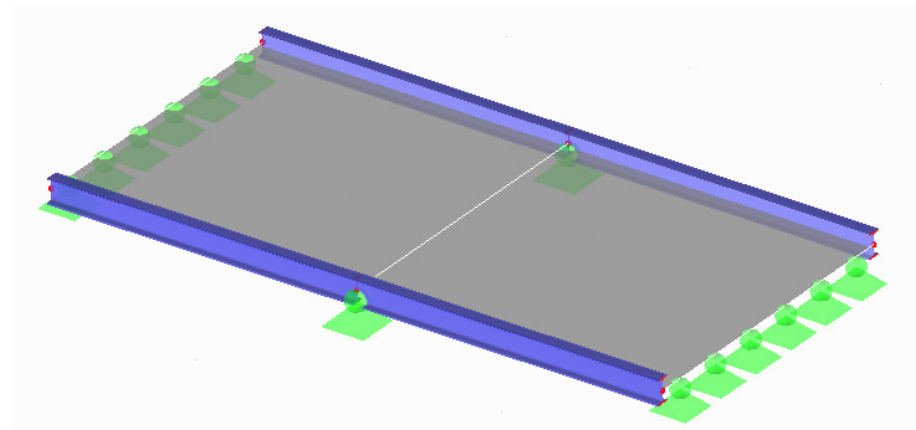


Bild 4.1: RFEM-Modell

- Das Modell wird in Form einer einzigen Fläche erzeugt. In der Mitte ist eine Linie gesetzt. In RF-GLAS erfolgt damit die Berechnung am gleichen Modell wie in RFEM.

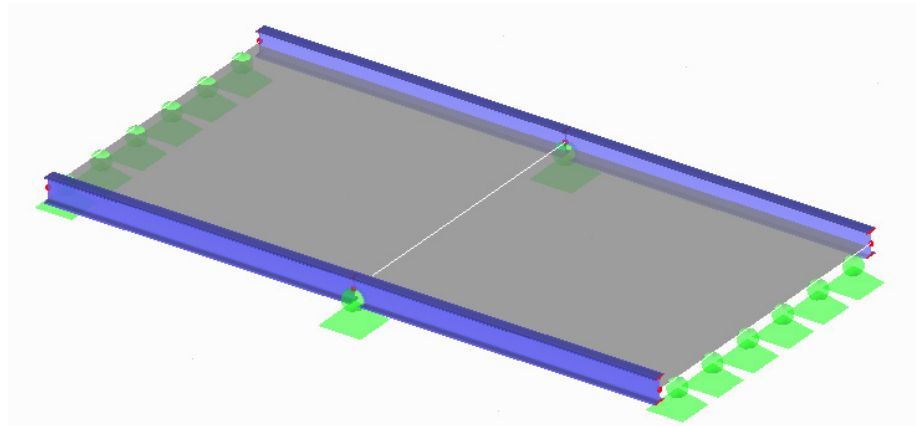


Bild 4.2: RF-GLAS-Modell mit einer Fläche des Typs Glas

- Das Beispiel lässt sich in RFEM auch mit zwei Flächen modellieren. In RF-GLAS werden jedoch in diesem Fall zwei getrennte Modelle erzeugt. Dabei ist erkennbar, dass an gemeinsamen Linien oder Knoten erzeugte Lager (hier Knotenlager) für beide Flächen gelten.

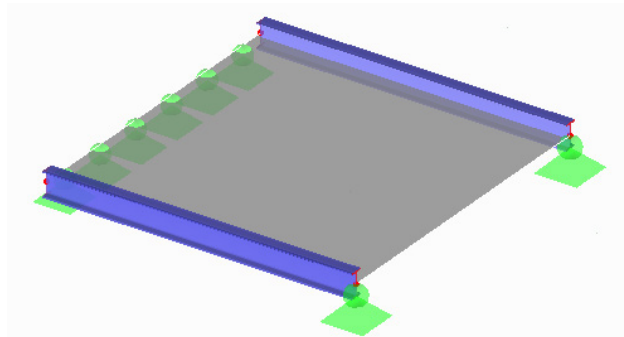


Bild 4.3: Modell der Fläche Nr. 1 in RF-GLAS

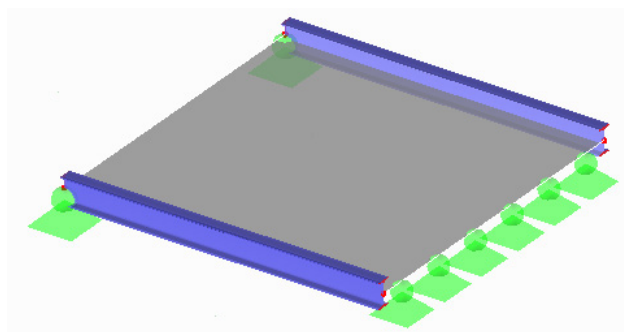


Bild 4.4: Modell der Fläche Nr. 2 in RF-GLAS

4.1 Details

Details...

Die Bemessungsdetails können im entsprechenden Dialog über die Schaltfläche [Details] überprüft werden. Dieser Dialog ist in folgende Register gegliedert:

- Spannungen
- Ergebnisse

Die folgenden Schaltflächen stehen dabei in allen Registern zur Verfügung:





Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Einheiten und Dezimalstellen	Öffnet den Dialog <i>Einheiten und Dezimalstellen</i> → Kapitel 7.1, Seite 57
	Dlubal-Standardwerte	Liest die ursprünglichen Dlubal-Einstellungen in den Dialog <i>Details</i> ein
	Standard	Stellt alle Parameter im Dialog <i>Details</i> nach den zuvor gespeicherten Standardeinstellungen ein
	Als Standard setzen	Speichert die aktuellen Einstellungen als benutzerdefinierten Standard

Tabelle 4.1: Schaltflächen im Dialog *Details*

4.1.1 Spannungen

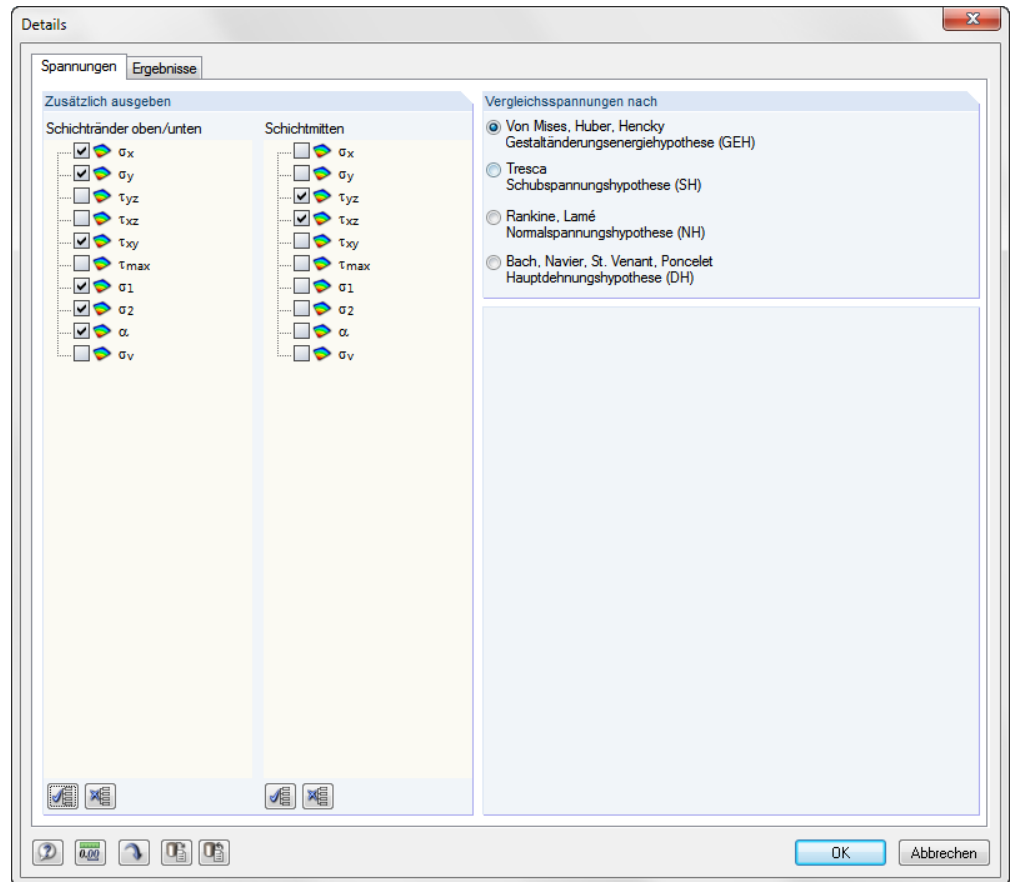


Bild 4.5: Dialog Details, Register Spannungen

Zusätzlich ausgeben



Die Kontrollfelder in diesem Abschnitt steuern, welche Spannungen in den Ausgabemasken angezeigt werden. Die Spannungen sind in die Kategorien *Schichränder oben/unten* und *Schichtmitten* unterteilt. Die Schaltflächen [Alles selektieren] und [Alles deselektieren] erleichtern die Auswahl.

Die Grundspannungen σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} werden in RFEM nach der Finite-Elemente-Methode ermittelt. Weitere Spannungen werden in RF-GLAS aus diesen Grundspannungen ermittelt. In Tabelle 4.2 werden die Formeln vorgestellt, die für eine Einzelschichtplatte gelten.

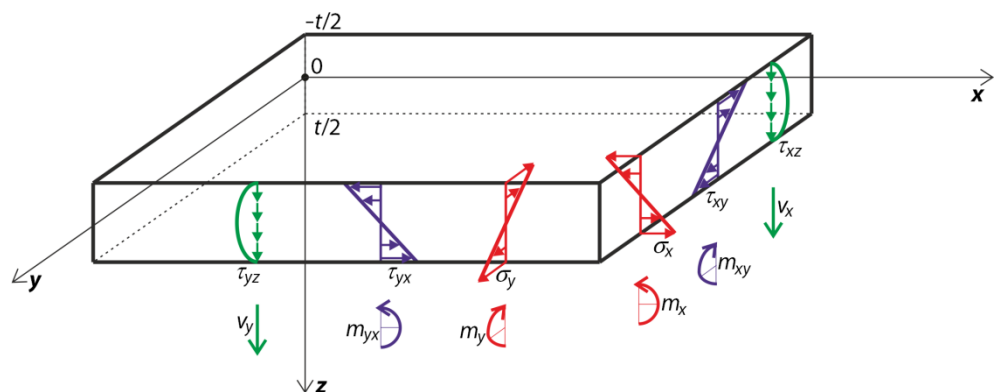


Bild 4.6: Grundspannungen und Vorzeichenregeln für eine biegebeanspruchte Einzelschichtplatte

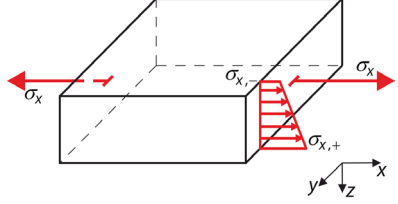
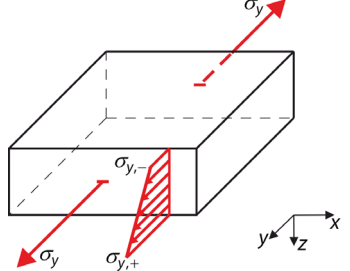
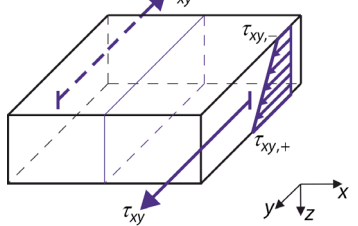
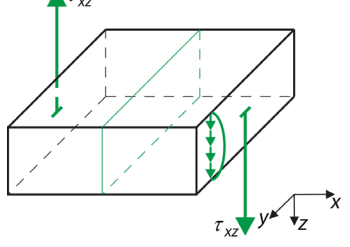
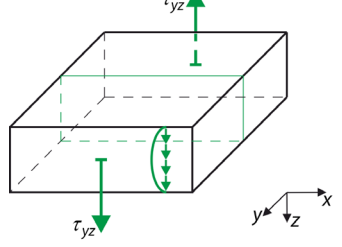
σ_x	<p>Normalspannung in Richtung der x-Achse</p> <ul style="list-style-type: none"> an positiver Flächenseite $\sigma_{x,+} = \frac{n_x}{t} + \frac{6m_x}{t^2},$ <p>mit t = Plattendicke</p> <ul style="list-style-type: none"> an negativer Flächenseite $\sigma_{x,-} = \frac{n_x}{t} - \frac{6m_x}{t^2}$	
σ_y	<p>Normalspannung in Richtung der y-Achse</p> <ul style="list-style-type: none"> an positiver Flächenseite $\sigma_{y,+} = \frac{n_y}{t} + \frac{6m_y}{t^2}$ <ul style="list-style-type: none"> an negativer Flächenseite $\sigma_{y,-} = \frac{n_y}{t} - \frac{6m_y}{t^2}$	
τ_{xy}	<p>Schubspannung in xy-Ebene</p> <ul style="list-style-type: none"> an positiver Flächenseite $\tau_{xy,+} = \frac{n_{xy}}{t} + \frac{6m_{xy}}{t^2}$ <ul style="list-style-type: none"> an negativer Flächenseite $\tau_{xy,-} = \frac{n_{xy}}{t} - \frac{6m_{xy}}{t^2}$	
τ_{xz}	<p>Schubspannung in xz-Ebene</p> <ul style="list-style-type: none"> in Plattenmitte $\tau_{xz} = \frac{3}{2} \frac{v_x}{t}$	
τ_{yz}	<p>Schubspannung in yz-Ebene</p> <ul style="list-style-type: none"> in Plattenmitte $\tau_{yz} = \frac{3}{2} \frac{v_y}{t}$	

Tabelle 4.2: Grundspannungen

Die Spannungen in den einzelnen Schichten werden generell aus den Gesamtdehnungen der Platte berechnet:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{tot}}^T = \left\{ \frac{\partial \varphi_y}{\partial x}, -\frac{\partial \varphi_x}{\partial y}, \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} - \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial x} + \varphi_y, \frac{\partial w}{\partial y} - \varphi_x, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\} \quad (4.1)$$

Die Dehnungen in den einzelnen Schichten werden nach folgender Formel ermittelt:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(z) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \\ -\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} \\ \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} - \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

mit z : Koordinate in Richtung der z -Achse, in der der Spannungswert gesucht wird

Handelt es sich beispielsweise um die i -te Schicht, dann wird die Spannung mit folgender Formel ermittelt:

$$\boldsymbol{\sigma}(z) = \mathbf{d}_i \boldsymbol{\varepsilon}(z) \quad (4.3)$$

mit \mathbf{d}_i : TeilstEIFigkeitsmatrix der i -ten Schicht

Der Einfluss der Querschubspannungen wird ausgedrückt durch die GröÖe:

τ_{max}	Maximale Querschubspannung $\tau_{\text{max}} = \sqrt{\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2}$
---------------------	--

Tabelle 4.3: Maximale Querschubspannung

Tabelle 4.4 zeigt die Formeln für die Berechnung der maximalen Spannungen und der Vergleichsspannungen.

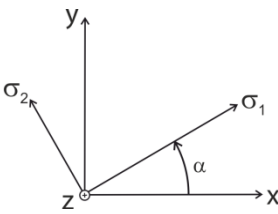
σ_1	Hauptspannung $\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2}$
σ_2	Hauptspannung $\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2}$
α	<p>Winkel zwischen lokaler x-Achse und Richtung der ersten Hauptspannung</p> $\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{atan2}(2\tau_{xy}, \sigma_x - \sigma_y), \quad \alpha \in (-90^\circ, 90^\circ)$ <p>Die Funktion atan2 ist wie folgt implementiert:</p> $\operatorname{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan \frac{y}{x} & x > 0 \\ \arctan \frac{y}{x} + \pi & y \geq 0, x < 0 \\ \arctan \frac{y}{x} - \pi & y < 0, x < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & y > 0, x = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & y < 0, x = 0 \\ 0 & y = 0, x = 0 \end{cases}$ 
σ_v	Vergleichsspannung nach VON MISES, HUBER, HENCKY (Gestaltänderungshypothese) $\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$
	Vergleichsspannung nach TRESCA (Schubspannungshypothese) $\sigma_v = \max \left[\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \frac{ \sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2} \right]$
	Vergleichsspannung nach RANKINE, LAMÉ (Normalspannungshypothese) $\sigma_v = \frac{ \sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2}$
	Vergleichsspannung nach BACH, NAVIER, ST. VENANT, PONCELET (Hauptdehnungshypothese) $\sigma_v = \max \left[\frac{1-\nu}{2} \sigma_x + \sigma_y + \frac{1+\nu}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \nu \sigma_x + \sigma_y \right]$

Tabelle 4.4: Spannungen

Vergleichsspannungen

Die Vergleichsspannungen lassen sich nach vier Ansätzen ermitteln.

Von Mises, Huber, Hencky (Gestaltänderungsenergiehypothese)

Die Gestaltänderungsenergiehypothese ist auch als HMM-Theorie (HUBER, VON MISES, HENCKY) bekannt. Die Vergleichsspannungen werden wie folgt berechnet:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (4.4)$$

Tresca (Schubspannungshypothese)

Die Vergleichsspannung wird üblicherweise wie folgt ermittelt:

$$\sigma_v = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_1 - \sigma_3|, |\sigma_2 - \sigma_3|) \quad (4.5)$$

Bei $\sigma_3 = 0$ kann vereinfacht werden:

$$\sigma_v = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_1|, |\sigma_2|) \quad (4.6)$$

Dies führt zu folgender Gleichung:

$$\sigma_v = \max \left[\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \frac{|\sigma_x + \sigma_y| + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2} \right] \quad (4.7)$$

Rankine, Lamé (Normalspannungshypothese)

Diese Hypothese nach RANKINE wird auch als Normalspannungshypothese bezeichnet. Die Vergleichsspannung ermittelt sich dabei aus den größten Absolutwerten der Hauptspannungen.

$$\sigma_v = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) \quad (4.8)$$

Bei $\sigma_3 = 0$ kann vereinfacht werden:

$$\sigma_v = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|) \quad (4.9)$$

Dies führt zu folgender Gleichung:

$$\sigma_v = \frac{|\sigma_x + \sigma_y| + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2} \quad (4.10)$$

Bach, Navier, St. Venant, Poncelet (Hauptdehnungshypothese)

Die Vergleichsspannungshypothese nach BACH wird auch als „Hauptdehnungshypothese“ bezeichnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Versagen in Richtung der größten Dehnung auftritt. Die Vergleichsspannung wird wie folgt ermittelt:

$$\sigma_v = \max(|\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)|, |\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)|, |\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)|) \quad (4.11)$$

Bei $\sigma_3 = 0$ kann vereinfacht werden:

$$\sigma_v = \max(|\sigma_1 - \nu\sigma_2|, |\sigma_2 - \nu\sigma_1|, \nu|\sigma_1 + \sigma_2|) \quad (4.12)$$

Dies führt zu folgender Gleichung:

$$\sigma_v = \max \left[\frac{1-\nu}{2} |\sigma_x + \sigma_y| + \frac{1+\nu}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \nu |\sigma_x + \sigma_y| \right] \quad (4.13)$$

In den Formeln für die Vergleichsspannungen werden die Einflüsse der Schubspannungen τ_{xz} und τ_{yz} vernachlässigt.

4.1.2 Ergebnisse

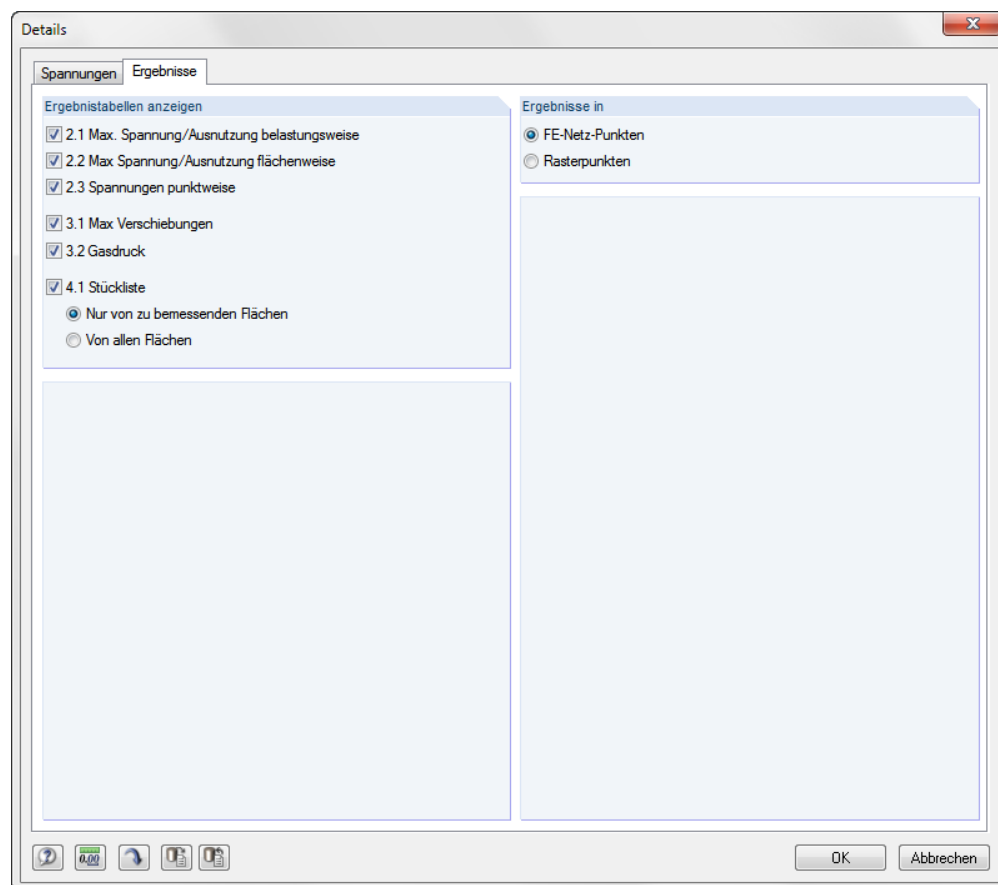


Bild 4.7: Dialog *Details*, Register *Ergebnisse*

Ergebnistabellen anzeigen

In diesem Abschnitt lässt sich festlegen, welche Ergebnismasken angezeigt werden sollen (Spannungen, Verschiebungen, Gasdruck, Stücklisten).

Die Ergebnismasken sind im Kapitel 5 *Ergebnisse* ab Seite 46 beschrieben.

Ergebnisse in

Spannungen und Verschiebungen werden standardmäßig in allen FE-Netz-Punkten angezeigt. Die Ergebnisse können auch in den Rasterpunkten angezeigt werden (siehe RFEM-Handbuch, Kapitel 8.12). Die Rasterpunkte können in RFEM als Eigenschaft einer Fläche definiert werden.

Bei kleinen Flächen kann die Standardmaschenweite des Rasters von 0,5 m dazu führen, dass nur wenige Rasterpunkte (oder sogar nur ein Ergebnistrasterpunkt im Ursprung) existieren. Der Abstand der Rasterpunkte sollte dann in RFEM an die Flächenabmessungen angepasst werden, um mehr Rasterpunkte zu erzeugen.

4.2 Details für Schichtenaufbau



Der Dialog *Details für Schichtenaufbau* ist über die Schaltfläche [Bearbeiten] in den Eingabemasken 1.2 bis 1.6 im oberen Dialogabschnitt *Aktueller Schichtenaufbau* zugänglich.

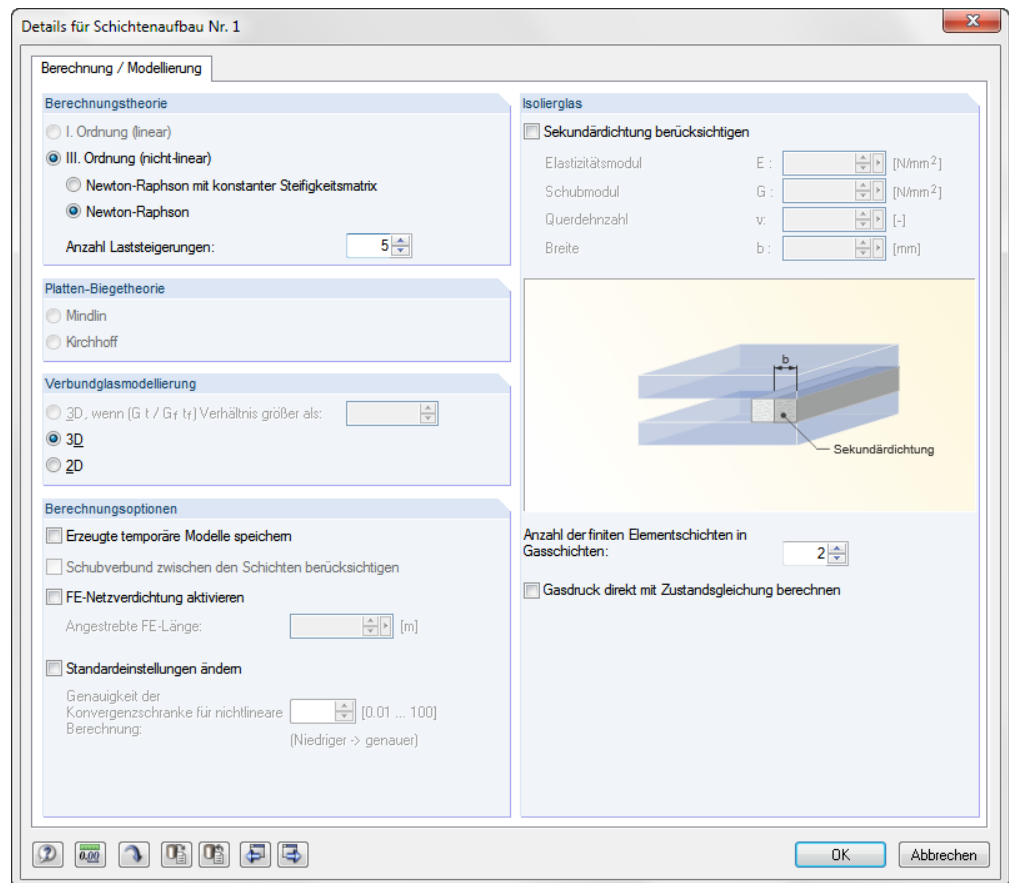


Bild 4.8: Dialog *Details*, Register *Berechnung / Modellierung*

Berechnungstheorie

Dieser Abschnitt des Dialogs steuert, ob die Berechnung nach Theorie *I. Ordnung (linear)* oder *III. Ordnung (nicht-linear)* erfolgt. Die Berechnung nach Theorie *I. Ordnung* ist voreingestellt.

Wenn Isolierglas verwendet wird (mit einer Gasschicht im Scheibenzwischenraum), wird automatisch auf Theorie *III. Ordnung* umgestellt: Die eingeschlossene Gasschicht bringt eine Nicht-linearität in das Modell, die selbst bei kleinen Lastwerten zu Unterschieden zwischen Berechnung nach Theorie *I.* und *III. Ordnung* führt. Die Berechnung nach Theorie *III. Ordnung* liefert hier genauere Ergebnisse. Dabei erfolgt eine iterative Berechnung der Volumenelemente nach *Newton-Raphson mit konstanter Steifigkeitsmatrix* oder *Newton-Raphson*. Die Unterschiede zwischen diesen Verfahren sind im RFEM-Handbuch, Kapitel 7.3.1.1 beschrieben.

Platten-Biegetheorie

Flächen können berechnet werden nach der Biegetheorie von

- Mindlin oder
- Kirchhoff.

Bei der Berechnung nach Mindlin werden Schubdehnungen eingeschlossen, nach Kirchhoff werden diese nicht berücksichtigt. Die Biegetheorie nach Mindlin eignet sich für dicke Platten, die nach Kirchhoff dagegen für relativ dünne Platten.

Da die Schubspannungen τ_{xz} und τ_{yz} in der Theorie nach Kirchhoff nicht genau errechnet werden, werden diese aus den Gleichgewichtsbedingungen ermittelt. Sie können mit den folgenden Formeln berechnet werden

$$\tau_{xz, \max} = \frac{3}{2} \frac{v_x}{t} = 1.5 \frac{v_x}{t} \quad (4.14)$$

$$\tau_{yz, \max} = \frac{3}{2} \frac{v_y}{t} = 1.5 \frac{v_y}{t} \quad (4.15)$$

Verbundglasmodellierung

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, kann die Standardtheorie bei Verbundglas zu inkorrekten Ergebnissen führen. Wenn das Verhältnis $G \cdot t / G_f \cdot t_f$ größer als der definierte Grenzwert ist, wird die Berechnung in 3D geführt. Dabei ist G das Schubmodul des Glases, t die Dicke der Glasschicht, G_f das Schubmodul der Folie und t_f die Foliendicke.

Die Berechnungsart kann auch manuell auf 2D oder 3D gesetzt werden. 3D-Berechnungen sind genauer, jedoch zeitaufwendiger.

Bei Isolierglas (mit einer eingeschlossenen Gasschicht) ist die 3D-Berechnung voreingestellt.

Berechnungsoptionen

In diesem Abschnitt können allgemeine Vorgaben für die RF-GLAS-Berechnung getroffen werden. Über das oberste Kontrollfeld lassen sich *Erzeugte temporäre Modelle speichern*: Wie in Kapitel 3.3 *Linienlager* auf Seite 22 erwähnt, werden Lager und Randstäbe direkt in RF-GLAS eingegeben – ohne Einfluss auf das restliche RFEM-Modell. Ist das Kontrollfeld angehakt, werden beim Speichern in RF-GLAS diese Modelle als neue RFEM-Dateien abgelegt. Sie sind im selben Projektordner wie die Originaldatei zu finden und durch *RF_GLAS*-Zusätze im Dateinamen gekennzeichnet. Nach dem Öffnen einer solchen Datei können die RF-GLAS-Modelle mit allen Lagern, Stäben, Volumenkörpern etc. grafisch in RFEM überprüft werden.

Das Kontrollfeld *Schubverbund zwischen den Schichten berücksichtigen* ist bei Verbundglas mit Folien standardmäßig angehakt, sodass der Schubwiderstand der Verbundfolie berücksichtigt wird. Der Schubverbund zwischen den Schichten ist im Kapitel 2.2.1 *Verbundglas* auf Seite 9 beschrieben.

Wird eine *FE-Netzverdichtung* aktiviert, kann die *Angestrebte FE-Länge* manuell vorgegeben werden.

Über das Kontrollfeld *Standardeinstellungen ändern* kann die Genauigkeit der Konvergenzschranke für die nichtlineare Berechnung beeinflusst werden. Der Faktor 1.0 ist voreingestellt. Der minimale zulässige Wert ist 0,01, der Maximalwert beträgt 100.

Isolierglas

Dieser Dialogabschnitt ist nur bei Isolierglas zugänglich. Nach dem Anhängen des Kontrollfeldes *Sekundärdichtung berücksichtigen* können in den Eingabefeldern unterhalb die Materialeigenschaften und die Breite einer Sekundärdichtung eingegeben werden.

Das folgende Bild veranschaulicht die einzelnen Isolierglaskomponenten.

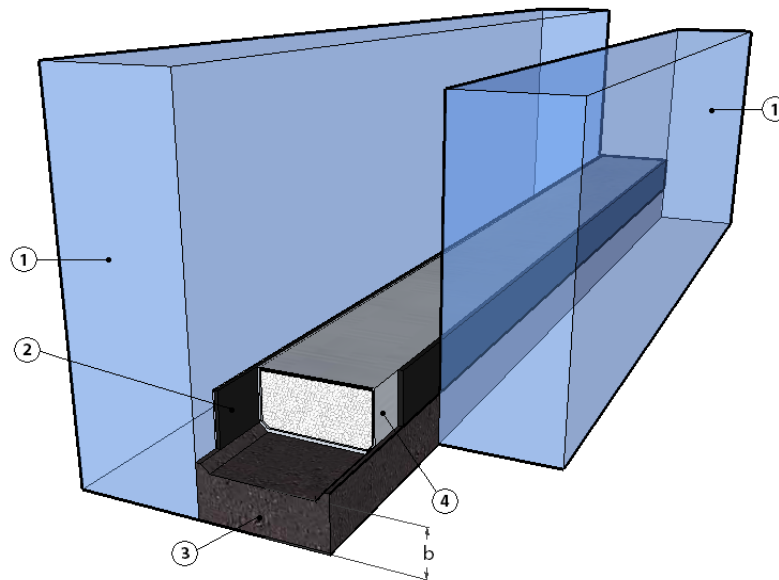


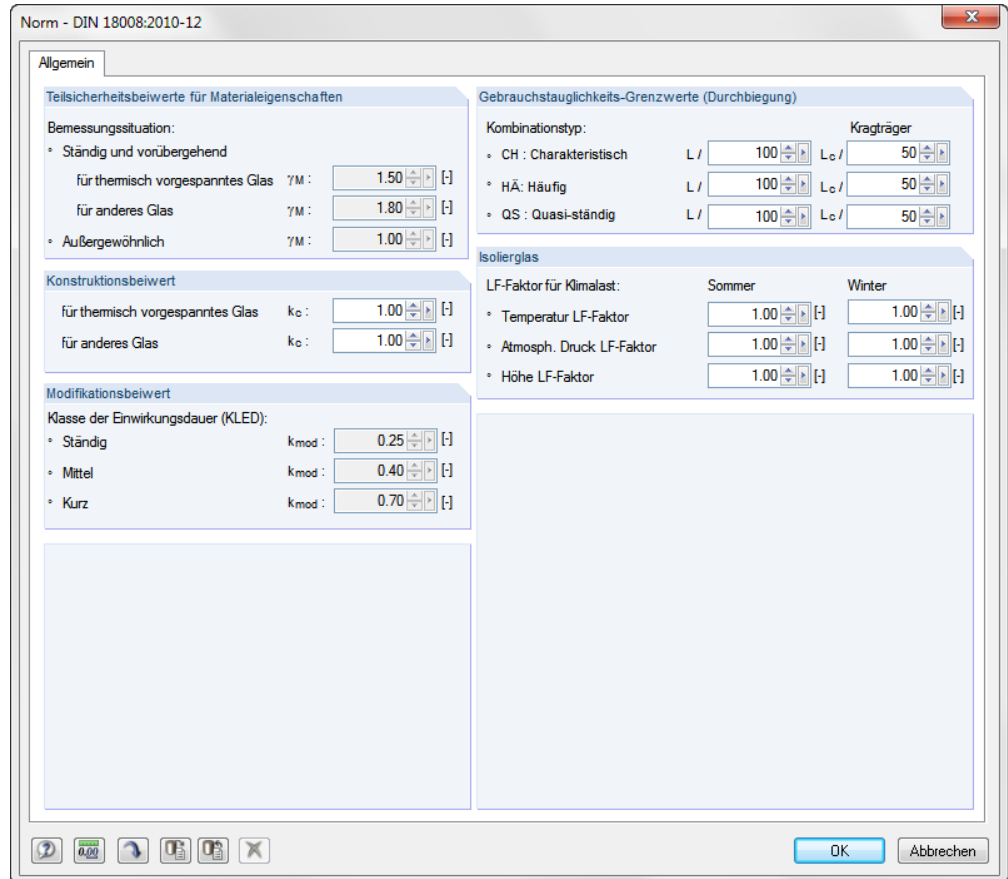
Bild 4.9: Isolierglas mit 1) Glasscheibe, 2) Primärdichtung, 3) Sekundärdichtung und 4) Abstandhalter

Bei Bedarf kann die *Anzahl der finiten Elementschichten in Gasschichten* für Isolierglas angepasst werden.

4.3 Norm

Norm

 Der Dialog *Norm* ist über die gleichnamige Schaltfläche zugänglich.



Norm - DIN 18008:2010-12

Allgemein

Teilsicherheitsbeiwerte für Materialeigenschaften

Bemessungssituation:

- Ständig und vorübergehend
 - für thermisch vorgespanntes Glas γ_M : 1.50 [-]
 - für anderes Glas γ_M : 1.80 [-]
- Außergewöhnlich γ_M : 1.00 [-]

Konstruktionsbeiwert

- für thermisch vorgespanntes Glas k_c : 1.00 [-]
- für anderes Glas k_c : 1.00 [-]

Modifikationsbeiwert

Klasse der Einwirkungsdauer (KLED):

- Ständig k_{mod} : 0.25 [-]
- Mittel k_{mod} : 0.40 [-]
- Kurz k_{mod} : 0.70 [-]

Gebrauchstauglichkeits-Grenzwerte (Durchbiegung)

Kombinationstyp:

- CH: Charakteristisch L / 100 L_c / 50
- HÄ: Häufig L / 100 L_c / 50
- QS: Quasi-ständig L / 100 L_c / 50

Isolierglas

LF-Faktor für Klimabelastung:

	Sommer	Winter
Temperatur LF-Faktor	1.00 [-]	1.00 [-]
Atmosph. Druck LF-Faktor	1.00 [-]	1.00 [-]
Höhe LF-Faktor	1.00 [-]	1.00 [-]

OK Abbrechen

 Bild 4.10: Dialog *Norm*

Teilsicherheitsbeiwerte für Materialeigenschaften

In diesem Abschnitt können die Teilsicherheitsbeiwerte der Materialeigenschaften γ_M für die möglichen Bemessungssituationen überprüft werden. Die Bemessungssituationen sind den einzelnen Lastfällen und Kombinationen in Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Tragfähigkeit* zuzuweisen (siehe Kapitel 3.1.1, Seite 17).

Konstruktionsbeiwert

In diesem Abschnitt lässt sich der Beiwert k_c benutzerdefiniert festlegen.

Modifikationsbeiwert

Die Werte des Modifikationsbeiwerts k_{mod} werden hier für jede Klasse der Lasteinwirkungs-dauer angezeigt. Die Voreinstellungen orientieren sich an DIN 18008-2:2010-12, Tabelle 6. Der Beiwert k_{mod} wird in Maske 1.7 *Lastdauer* den Lastfällen über die Klasse der Lasteinwirkungs-dauer zugewiesen (siehe Kapitel 3.7, Seite 31).

Gebrauchstauglichkeits-Grenzwerte (Durchbiegung)

In den sechs Eingabefeldern können die Grenzwerte der zulässigen Durchbiegung eingestellt werden. Es sind spezifische Vorgaben für die unterschiedlichen Einwirkungskombinationen (*Charakteristisch*, *Häufig* und *Quasi-ständig*) sowie für beidseitig oder nur einseitig gestützte Flächen möglich.

Die Klassifizierung der Lastfälle erfolgt in Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Gebrauchstauglichkeit* (siehe Kapitel 3.1.2, Seite 18). In Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeitsparameter* sind die Referenzlängen L der Flächen festzulegen (siehe Kapitel 3.8, Seite 32).

Der Abschnitt *Isolierglas* steuert den *LF-Faktor*, mit dem die Klimlast zu multiplizieren ist. Die Klimlast wird dann mit diesem Faktor bei jeder Einwirkung berücksichtigt, die in Maske 1.1 *Basisangaben* zur Bemessung ausgewählt ist.

4.4 Berechnung starten

Berechnung

Die [Berechnung] kann über die gleichnamige Schaltfläche In jeder Eingabemaske des Moduls gestartet werden.

Die Berechnung kann auch in der RFEM-Oberfläche gestartet werden: Der Dialog *Zu berechnen* (Menü *Berechnen* → *Zu berechnen*) listet die Bemessungsfälle der Zusatzmodule wie Lastfälle oder Lastkombinationen auf.

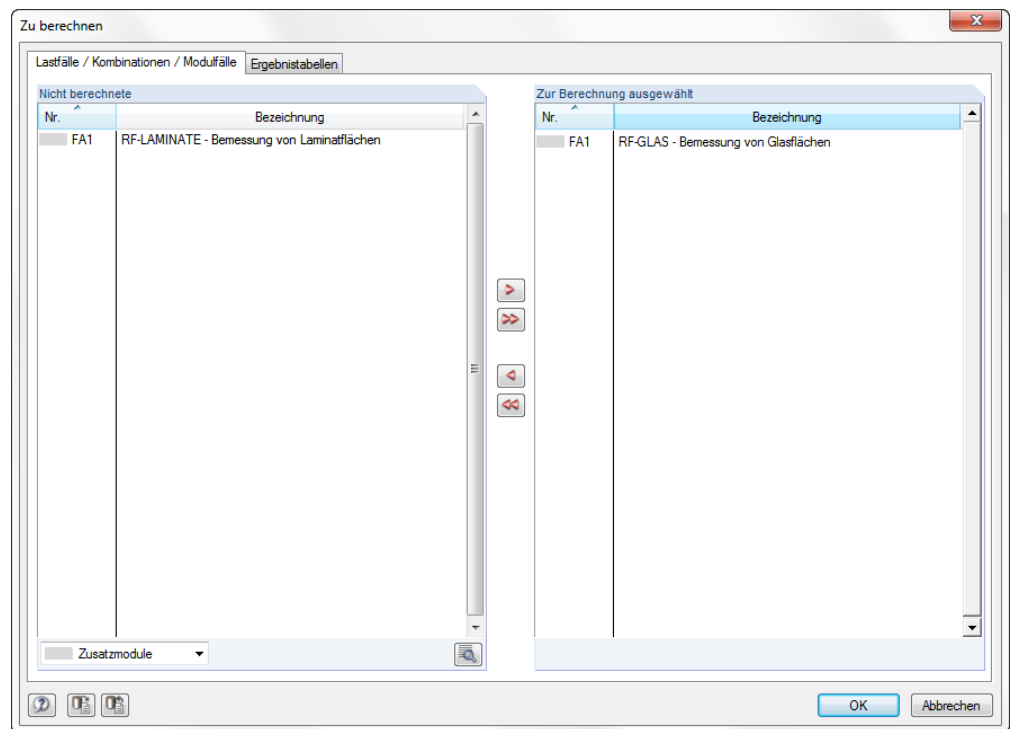


Bild 4.11: Dialog *Zu berechnen* in RFEM

Falls RF-GLAS-Fälle in der Liste *Nicht berechnete* fehlen, ist die Selektion am Ende der Liste auf *Alle* oder *Zusatzmodule* zu ändern.



Mit der Schaltfläche [►] werden die selektierten RF-GLAS-Fälle in die rechte Liste übergeben. [OK] startet dann die Berechnung.



Ein Bemessungsfall kann auch über die Liste der Symbolleiste direkt berechnet werden: Stellen Sie den RF-GLAS-Fall ein und klicken dann die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] an.

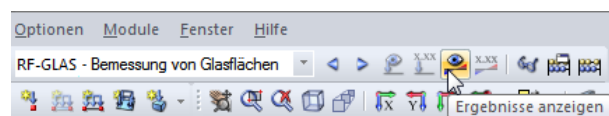


Bild 4.12: Direkte Berechnung eines RF-GLAS-Bemessungsfalls in RFEM

5. Ergebnisse



Details...

OK

Unmittelbar nach der Berechnung erscheint die Maske 2.1 *Max. Spannungen belastungsweise* (siehe Bild 5.1). Die weiteren Ergebnismasken lassen sich durch Anklicken des Eintrags im Navigator direkt ansteuern. Das Blättern durch die Masken ist mit den Schaltflächen [↔] und [⇌] oder den Funktionstasten [F2] und [F3] möglich.

Dialog *Details*, Register *Ergebnisse* steuert, welche Ergebnismasken angezeigt werden (siehe Kapitel 4.1.2, Seite 40).

[OK] sichert die Ergebnisse. RF-GLAS wird beendet und es erfolgt die Rückkehr in das Hauptprogramm.

Für die Auswertung der Ergebnisse sind auch die Schaltflächen hilfreich, die sich unterhalb der Tabellen befinden:







Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Sichtmodus	Ermöglicht den Wechsel in das RFEM-Arbeitsfenster, um die Ansicht zu ändern
	Selektion	Ermöglicht die grafische Auswahl einer Fläche oder eines Punkts, um diese Ergebnisse in der Tabelle anzuzeigen
	Ergebnisverläufe	Blendet die Ergebnisse der aktuellen Zeile in der RFEM-Hintergrundgrafik ein und aus
	Überschreitung	Stellt nur Zeilen dar, in denen die Ausnutzungen größer als 1 und damit der Nachweis nicht erfüllt ist
	Relationsbalken	Blendet die farbigen Bezugsskalen in den Ergebnismasken ein oder aus
	Excel-Export	Öffnet den Dialog <i>Tabelle exportieren</i> → Kapitel 7.2, Seite 58

Tabelle 5.1: Schaltflächen in Ergebnismasken

Das Kapitel 5 *Ergebnisse* stellte die Ergebnismasken der Reihe nach vor.

5.1 Max. Spannungen belastungsweise

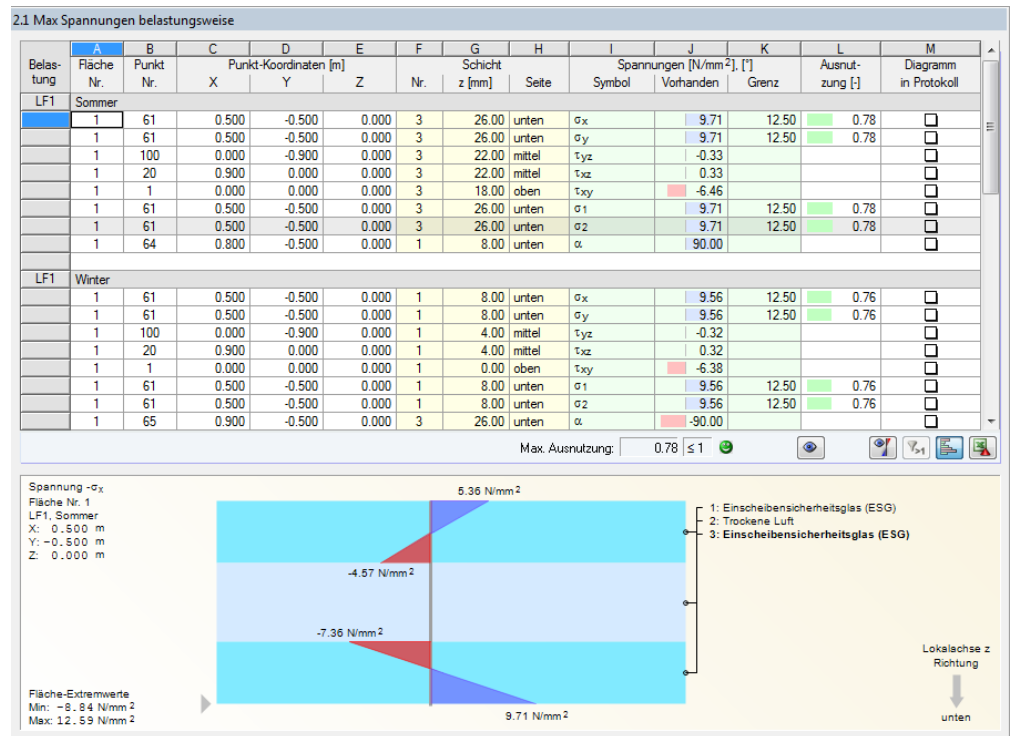


Bild 5.1: Maske 2.1 Max. Spannungen belastungsweise

Diese Maske listet die maximalen Spannungswerte für jeden Lastfall und jede Last- und Ergebniskombination auf, die in Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Tragfähigkeit* zur Bemessung ausgewählt wurde. Die Lastfallnummern werden in den Überschriften der Abschnitte angezeigt.

Fläche Nr.

Es werden die Nummern der Flächen angegeben, in denen sich die maßgebenden Punkte befinden.

Punkt Nr.

In diesen FE- bzw. Rasterpunkten wurde die größte Ausnutzung ermittelt. Der Spannungstyp wird in Spalte I *Symbol* angegeben.

[Details...](#)

Die FE-Netzknoten werden automatisch erzeugt. Die Rasterpunkte hingegen lassen sich in RFEM steuern, denn für Flächen sind benutzerdefinierte Ergebnistraster möglich. Die Funktion ist im Kapitel 8.12 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Im Dialog *Details*, Register *Ergebnisse* kann festgelegt werden, ob die Ergebnisse in FE- oder Rasterpunkten angezeigt werden sollen (siehe Kapitel 4.1.2, Seite 40). Bei einer Änderung erscheint eine Abfrage, ob die Ergebnisse neu berechnet werden sollen.

Punkt-Koordinaten

Die drei Spalten geben die Koordinaten der jeweils maßgebenden FE- oder Rasterpunkte an.

Schicht

In den Spalten F bis H werden die Nummern, die z-Koordinaten und die Seiten der Schichten aufgelistet, an denen die Maximalspannungen auftreten.

Details...

Spannungen

Symbol / Vorhanden

Diese beiden Spalten geben die Spannungen an, die im Register *Spannungen* des Dialogs *Details* festgelegt sind (siehe Kapitel 4.1.1, Seite 40). Es wird jeweils die Spannungsart mit dem Maximalwert ausgegeben.

Grenz

Die Grenzwerte (Grenzspannungen) basieren auf den Materialien, die in Maske 1.2 *Schichten* festgelegt wurden.

Werden der Modifikationsbeiwert k_{mod} , der Konstruktionsbeiwert k_c oder der Teilsicherheitsbeiwert γ_M , verwendet, dann werden die Bemessungsspannungswerte (mit Index d) aus den charakteristischen Grenzspannungswerten (mit Index k) berechnet nach

$$\sigma_{\text{grenz,d}} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot k_c}{\gamma_M} \sigma_{\text{grenz,k}} \quad (5.1)$$

Werden der Modifikations-, Konstruktions- und Teilsicherheitsbeiwert nicht verwendet, dann gilt $k_{\text{mod}} = 1$, $k_c = 1$ und $\gamma_M = 1$.

Ausnutzung

Für die Zugspannungskomponenten σ_x , σ_y , σ_1 und σ_2 wird die Ausnutzung im Hinblick auf die Grenzspannung ermittelt. Wird die Grenzspannung nicht überschritten, ist die Ausnutzung kleiner oder gleich 1 und der Nachweis gilt als erfüllt. Die Werte der Spalte L ermöglichen so eine schnelle Einschätzung der Wirtschaftlichkeit.

Der Ausnutzungsgrad wird nur für positive (Zug) Spannungswerte σ_x , σ_y , σ_1 und σ_2 berechnet, da die Zugsteifigkeit σ_{grenz} für Glas maßgebend ist.

Die folgende Tabelle beschreibt die Berechnung der Ausnutzungen.

Spannungen [Pa]	Ausnutzung [-]
σ_x	$= \frac{\sigma_x}{\sigma_{\text{grenz,d}}}$
σ_y	$= \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{grenz,d}}}$
σ_1	$= \frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{grenz,d}}}$
σ_2	$= \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{grenz,d}}}$

Tabelle 5.2: Ausnutzung

Diagramm im Protokoll

Im unteren Maskenbereich wird der Spannungsverlauf in den Schichten grafisch dargestellt, der am aktuellen Punkt vorliegt (d. h. der Tabellenzeile, in der sich der Cursor befindet).

Über die Kontrollfelder in dieser Spalte können Spannungsbilder ausgewählt werden, um sie auch im Ausprotokoll (siehe Kapitel 6.1, Seite 54) bei den Ergebnissen zu dokumentieren.

 Max. Ausnutzung: 0.78 ≤ 1 

5.2 Max. Spannungen flächenweise

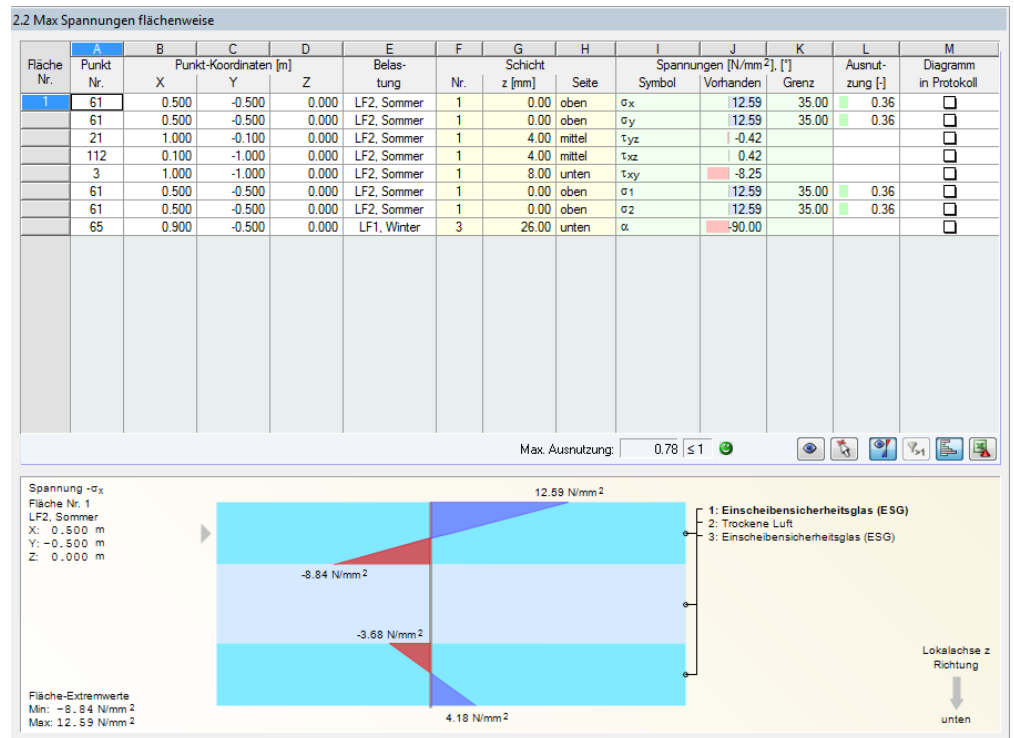


Bild 5.2: Maske 2.2 Max. Spannungen flächenweise

In dieser Ergebnismaske sind die maximalen Spannungsausnutzungen aufgelistet, die für jede der bemessenen Flächen vorliegen.

Die einzelnen Spalten sind im Kapitel 5.1 beschrieben.

5.3 Spannungen punktweise

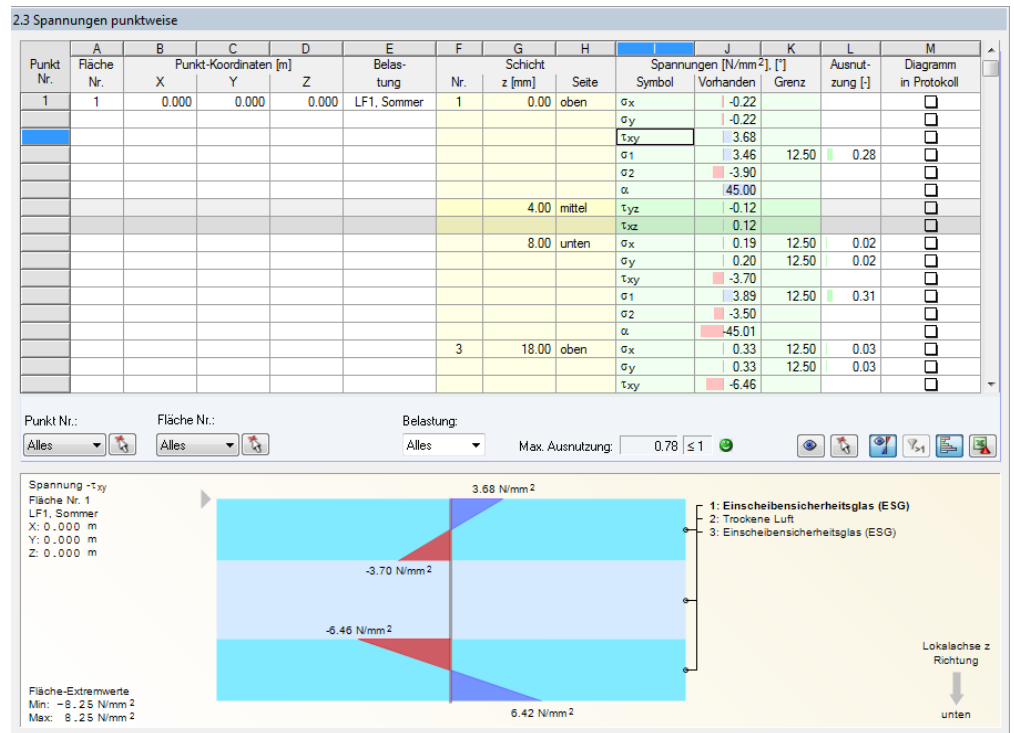
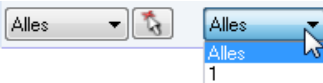


Bild 5.3: Maske 2.3 Spannungen punktweise

Details...

Details...



Es werden die Spannungen und Ausnutzungen für jeden FE-Netz- bzw. Rasterpunkt angegeben, der sich in den bemessenen Flächen befindet. Der Dialog *Details*, Register *Ergebnisse* (siehe Kapitel 4.1.2, Seite 40) steuert, ob die Ergebnisse von FE-Netzknoten oder Rasterpunkten angezeigt werden.

Im Dialog *Details*, Register *Spannungen* kann festgelegt werden, welche Spannungskomponenten in der Tabelle erscheinen.

Die einzelnen Spalten sind im Kapitel 5.1 *Max. Spannungen belastungsweise* beschrieben.

Filtern von Ergebnisspalten

Für eine bessere Übersicht kann die Tabelle nach Punkt- und Flächennummern sowie nach Belastungen gefiltert werden. Die Listen am unteren Ende der Spalten ermöglichen die Auswahl nach Objektnummern. Punkte und Flächen lassen sich über die Schaltfläche [↵] auch grafisch im RFEM-Arbeitsfenster festlegen.

5.4 Max. Verschiebungen

3.1 Max Verschiebungen

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B X	C Y	D Z	E Lastfall	F Bemessungs- komb.	G Paket Nr.	H Verschiebungen [mm] u_z	I Grenz u_z	J Ausnutzung u_z [-]
1	61	0.500	-0.500	0.000	LF1, Sommer	CH	1	-1.391	3.333	0.42
	61	0.500	-0.500	0.000			2	2.406	3.333	0.72
	61	0.500	-0.500	0.000	LF1, Winter	CH	1	2.374	3.333	0.71
	61	0.500	-0.500	0.000			2	-1.352	3.333	0.41
	61	0.500	-0.500	0.000	LF2, Sommer	CH	1	-3.041	3.333	0.91
	61	0.500	-0.500	0.000			2	1.101	3.333	0.33
	61	0.500	-0.500	0.000	LF2, Winter	CH	1	0.679	3.333	0.20
	61	0.500	-0.500	0.000			2	-2.750	3.333	0.82
Maximale Verschiebung / Maximale Ausnutzung										
1	61	0.500	-0.500	0.000	LF2, Sommer	CH	1	-3.041	3.333	0.91
	61	0.500	-0.500	0.000	LF2, Sommer	CH	1	-3.041	3.333	0.91

Max. Ausnutzung: 0.91 ≤ 1

Bild 5.4: Maske 3.1 Max. Verschiebungen

Die Verformungsnachweise werden nur geführt, wenn in Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Gebrauchstauglichkeit* (siehe Kapitel 3.1.2, Seite 18) mindestens ein Lastfall für den Nachweis ausgewählt wurde.

Maske 3.1 gibt die maximalen Verschiebungen aus, die in den Lastfällen oder Kombinationen für Gebrauchstauglichkeit vorliegen und vergleicht sie mit den zulässigen Verformungen. Die Tabelle ist nach Flächennummern geordnet.

Die Spalten A bis D sind im Kapitel 5.1 auf Seite 47 erläutert.

Bemessungskombination

In dieser Spalte finden sich die in Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Gebrauchstauglichkeit* zugewiesenen Bemessungssituationen wieder: Charakteristisch (CH), Häufig (HÄ) oder Quasi-ständig (QS).

Verschiebungen

In der Spalte u_z werden die für den Verformungsnachweis maßgebenden Verschiebungen in Richtung der lokalen Flächenachse z angezeigt. Die Achsen der Flächen können im *Zeigen-Navigator* von RFEM oder über das Flächen-Kontextmenü eingeblendet werden.

Die Werte in Spalte I geben die Grenzverformungen in Richtung der z-Achse jeder Fläche an. Sie ermitteln sich aus den Bezugslängen L, die in Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeitsparameter* festgelegt wurden (siehe Kapitel 3.8, Seite 32) und den Gebrauchstauglichkeits-Grenzwerten des *Norm*-Dialogs (siehe Kapitel 4.3, Seite 44).

Ausnutzung

In der letzten Spalte werden die Quotienten aus vorhandener Verschiebung u_z (Spalte H) und Grenzverschiebung (Spalte I) angegeben. Werden die Grenzverschiebungen eingehalten, so ist die Ausnutzung kleiner oder gleich 1 und der Gebrauchstauglichkeitsnachweis gilt als erfüllt.

Max. Ausnutzung: 0.91 ≤ 1

5.5 Gasdruck

3.2 Gasdruck

Belas- tung	A Fläche Nr.	B Schichte Nr.	C Gasdruck p [MPa]
LF1	Sommer		
	1	2	0.101
LF2	Sommer		
	1	2	0.101
LF1	Winter		
	1	2	0.100
LF2	Winter		
	1	2	0.099

Bild 5.5: Maske 3.2 Gasdruck

Diese Ergebnismaske wird nur angezeigt, wenn in Maske 1.2 *Schichten* mindestens eine Schicht des Typs Gas definiert wurde. Hier werden die *Gasdruck*-Ergebnisse lastfallweise aufgelistet, die in den Gasschichten vorliegen.

5.6 Stückliste

4.1 Stückliste

Fläche Nr.	A Material Bezeichnung	B Dicke t [mm]	C Schicht Anzahl	D Fläche [m ²]	E Oberfläche [m ²]	F Volumen [m ³]	G Gewicht [t]
1	Einscheibensicherheitsglas (ESG)	8.00	2	1.000	2.000	0.016	0.040
	Trockene Luft	10.00	1	1.000	0.000	0.010	0.000
Σ		26.00	3	1.000	2.000	0.026	0.040
Σ Gesamt		26.00	3	1.000	2.000	0.026	0.040

Bild 5.6: Maske 4.1 Stückliste

Abschließend erscheint eine Bilanz der im Bemessungsfall behandelten Flächen. In der Liste sind per Voreinstellung nur die bemessenen Flächen erfasst. Wenn eine Stückliste für alle Flächen des Modells benötigt wird, so kann dies im Dialog *Details*, Register *Ergebnisse* eingestellt werden (siehe Kapitel 4.1.2, Seite 40).

Fläche Nr.

Diese Spalte enthält die Nummern der einzelnen Flächen.

Materialbezeichnung

Die Auflistung erfolgt nach Materialien geordnet.

Dicke t

In Spalte B wird die Dicke der Schichten angezeigt. Hier finden sich die Eingabedaten der Maske 1.2 *Schichten* wieder.

Schicht Anzahl

Diese Spalte gibt an, wie viele Schichten jeweils mit gleichem Material und gleicher Dicke vorliegen.

Fläche

Diese Spalte gibt Aufschluss über die Flächeninhalte der einzelnen Schichten.

Oberfläche

Die Oberfläche ermittelt sich aus den Flächeninhalten der Ober- und Unterseiten einer Fläche. Die Seitenflächen der dünnwandigen Flächen werden vernachlässigt.

Volumen

Das Volumen berechnet sich als das Produkt von Dicke und Flächeninhalt.

Gewicht

In der letzten Spalte wird die Masse jeder Schicht angezeigt. Dieser Eintrag ermittelt sich als Produkt von Volumen und spezifischem Gewicht des verwendeten Materials.

Σ Gesamt

In der letzten Zeile wird jeweils die Summe der einzelnen Spalten angegeben.

6. Ausdruck

6.1 Ausdruckprotokoll

Für die Ergebnisse von RF-GLAS wird – wie in RFEM – ein Ausdruckprotokoll generiert, das mit Grafiken und Erläuterungen ergänzt werden kann. Die Selektion im Ausdruckprotokoll steuert, welche Ein- und Ausgabedaten von RF-GLAS schließlich im Ausdruck erscheinen.



Das Ausdruckprotokoll ist im RFEM-Handbuch beschrieben. Das Kapitel 10.1.3.4 *Selektion der Zusatzmodul-Daten* erläutert, wie die Ein- und Ausgabedaten von Zusatzmodulen für den Ausdruck aufbereitet werden können.



Im Ausdruckprotokoll werden nur die Spannungstypen ausgewiesen, die in den RF-GLAS-Ergebnismasken zu sehen sind. Um daher z. B. die maximalen Schubspannungen zu drucken, sind in RF-GLAS die Spannungen τ_{max} für die Anzeige zu aktivieren. Die Auswahl der Spannungen ist im Kapitel 4.1.1 auf Seite 35 beschrieben.

Bei großen Systemen mit vielen Bemessungsfällen trägt die Aufteilung der Daten in mehrere Ausdruckprotokolle zur Übersichtlichkeit bei.

6.2 Grafikausdruck

6.2.1 Ergebnisse am RFEM-Modell

In RFEM kann jedes Bild, das im Arbeitsfenster angezeigt wird, in das Ausdruckprotokoll übergeben oder direkt zum Drucker geleitet werden. Somit lassen sich auch die am RFEM-Modell gezeigten Spannungen und Ausnutzungen sowie Schnitte für den Ausdruck aufbereiten.



Das Drucken von Grafiken ist im Kapitel 10.2 des RFEM-Handbuchs beschrieben.



Die aktuelle Grafik der RF-GLAS-Ergebnisse kann gedruckt werden über Menü

Datei → Grafik drucken

oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

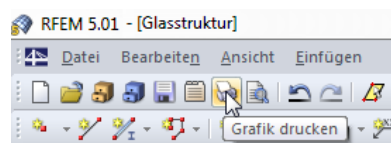
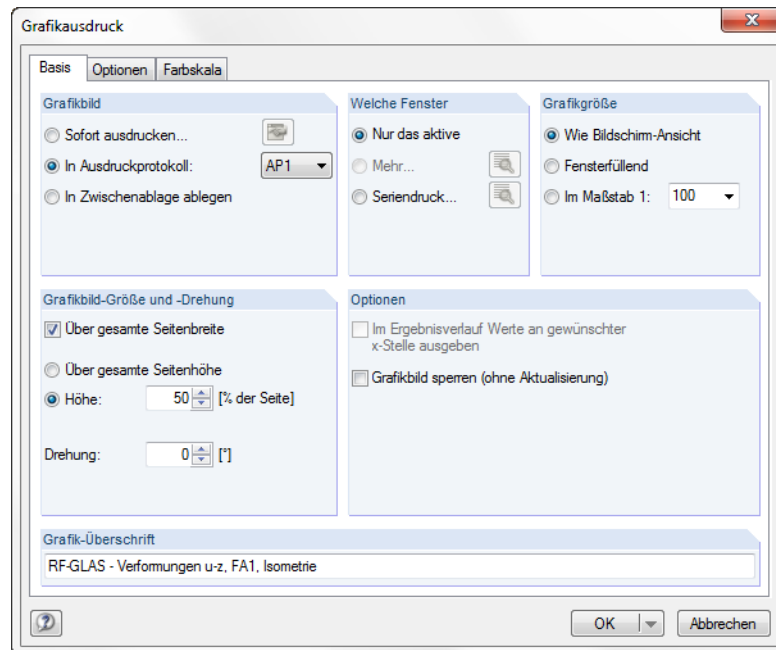


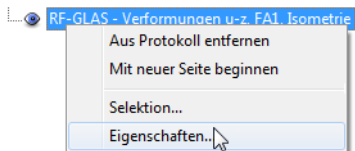
Bild 6.1: Schaltfläche *Grafik drucken* in der RFEM-Symbolleiste

Es wird folgender Dialog angezeigt.

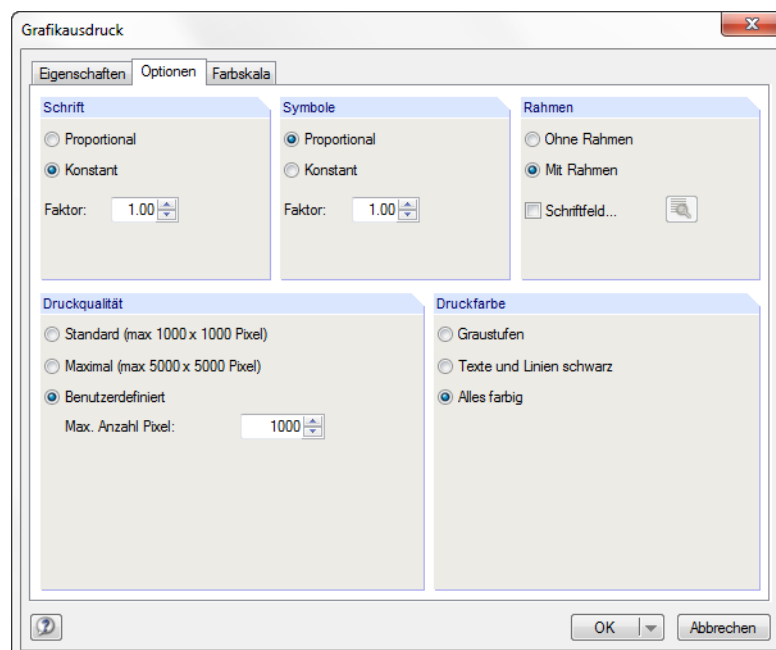
Bild 6.2: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Basis*

Dieser Dialog ist im Kapitel 10.2 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Dort sind auch die übrigen Register *Optionen* und *Farbskala* erläutert.

Eine Grafik kann im Ausdruckprotokoll wie gewohnt per Drag-and-Drop an eine andere Stelle geschoben werden.



Um eine Grafik nachträglich im Ausdruckprotokoll anzupassen, führen Sie einen Rechtsklick auf den entsprechenden Eintrag im Protokoll-Navigator aus. Die Option *Eigenschaften* im Kontextmenü ruft wieder den Dialog *Grafikausdruck* auf, in dem Sie die Anpassungen vornehmen können.

Bild 6.3: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Optionen*

6.2.2 Ergebnisse in Schichten

In den Ergebnismasken 2.1 bis 2.3 wird der Spannungsverlauf in den Schichten dargestellt. Diese Spannungsgrafiken lassen sich über die Kontrollfelder in Spalte M *Diagramm im Protokoll* in das Ausdruckprotokoll übergeben.

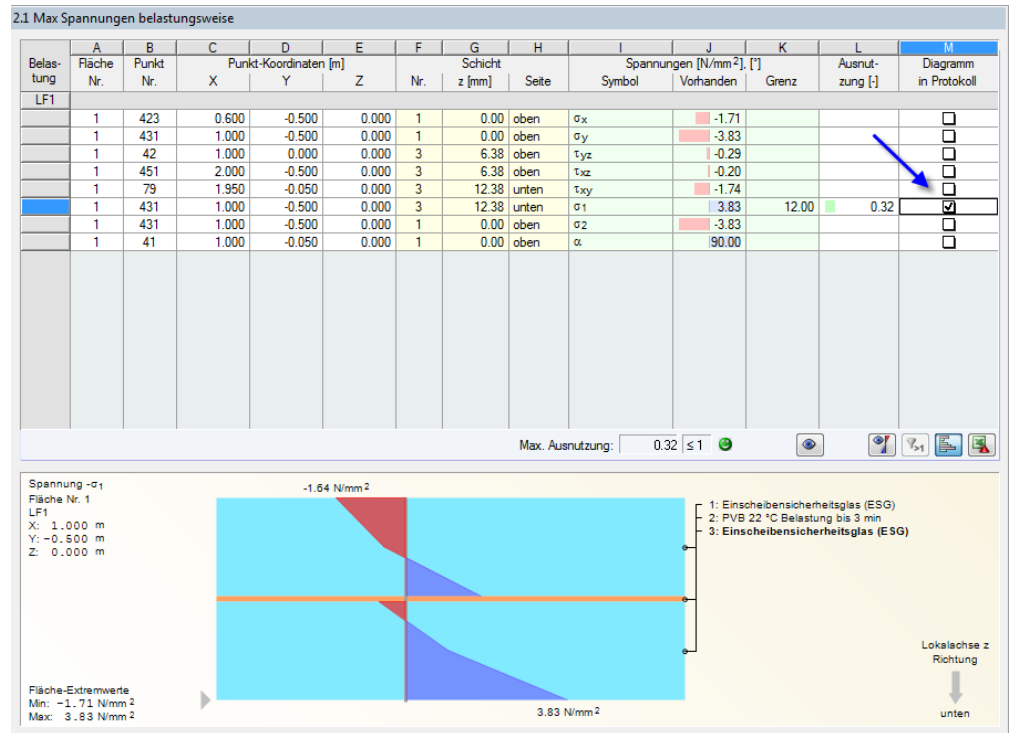


Bild 6.4: Diagramm im Protokoll festlegen

Im Ausdruckprotokoll erscheinen die Grafiken dann im Abschnitt 4.2 *Spannungsverläufe*.

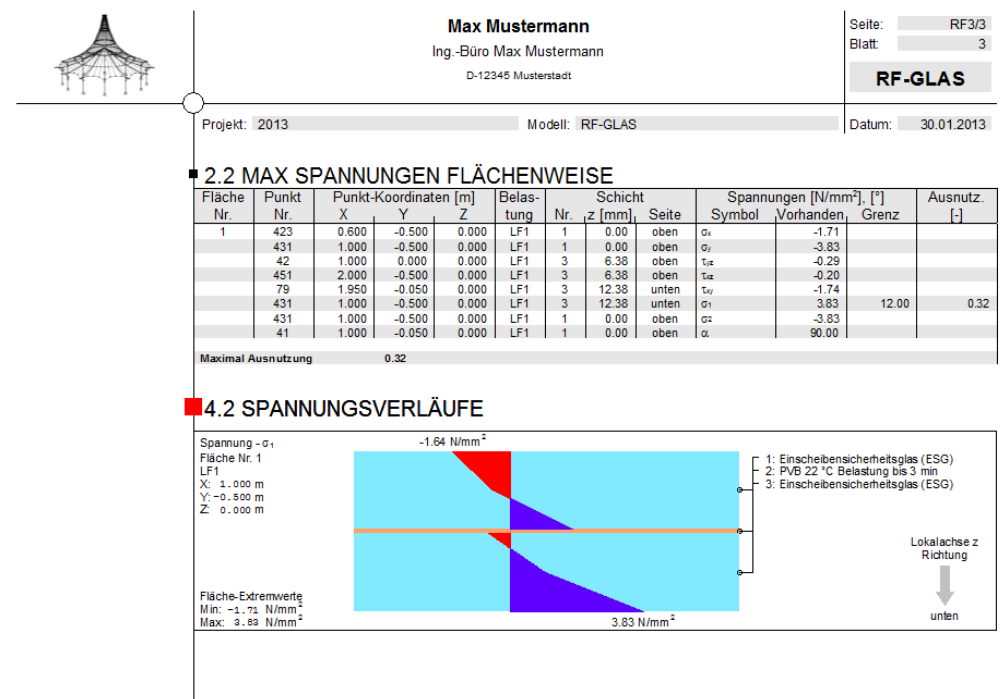


Bild 6.5: Spannungsverlauf im Ausdruckprotokoll

7. Allgemeine Funktionen

Dieses Kapitel beschreibt nützliche Menüfunktionen und stellt Exportmöglichkeiten für die Nachweise vor.

7.1 Einheiten und Dezimalstellen

Die Einheiten und Nachkommastellen werden für RFEM und für die Zusatzmodule gemeinsam verwaltet. In RF-GLAS ist der Dialog zum Anpassen der Einheiten zugänglich über Menü

Einstellungen → Einheiten und Dezimalstellen.

Es erscheint der aus RFEM bekannte Dialog. In der Liste *Programm / Modul* ist RF-GLAS voreingestellt.

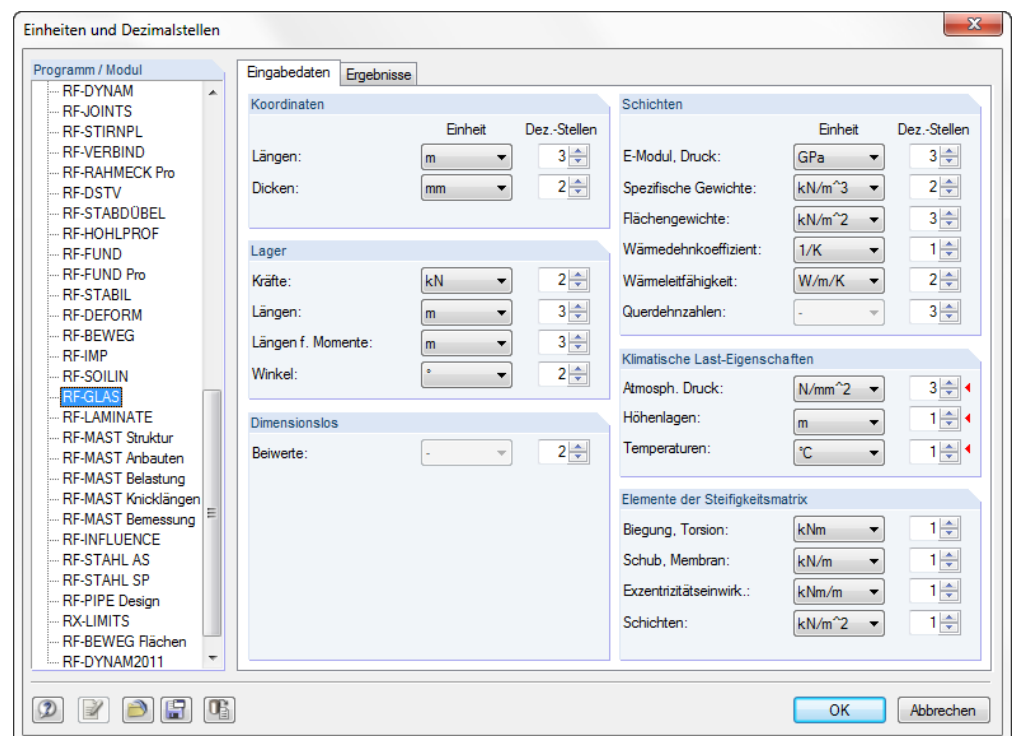


Bild 7.1: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*

Im Bild oben sind einige Einheiten mit einem roten Dreieck markiert (Abschnitt *Klimatische Last-Eigenschaften*). Der Dialog wurde aus Maske 1.6 *Klimalast-Parameter* aufgerufen. Anhand der Markierungen lassen sich die relevanten Einheiten dieser Maske leichter finden.



Die Einstellungen können als Benutzerprofil gespeichert und in anderen Modellen wieder verwendet werden. Diese Funktionen sind im Kapitel 11.1.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

7.2 Export der Ergebnisse

Die Ergebnisse von RF-GLAS lassen sich auch in andere Programme exportieren.

Zwischenablage

Markierte Zellen der Ergebnismasken können mit [Strg]+[C] in die Zwischenablage kopiert und dann mit [Strg]+[V] z. B. in ein Textverarbeitungsprogramm eingefügt werden. Die Überschriften der Tabellenspalten bleiben dabei unberücksichtigt.

Ausdruckprotokoll

Die RF-GLAS-Daten können in das Ausdruckprotokoll gedruckt (siehe Kapitel 6.1, Seite 54) und dort exportiert werden über Menü

Datei → Export in RTF.

Diese Funktion ist im Kapitel 10.1.11 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

Excel / OpenOffice

RF-GLAS ermöglicht den direkten Datenexport zu MS Excel, OpenOffice.org Calc oder in das CSV-Format. Diese Funktion wird aufgerufen über das RF-GLAS-Menü

Datei → Tabellen exportieren.

Es öffnet sich folgender Exportdialog:

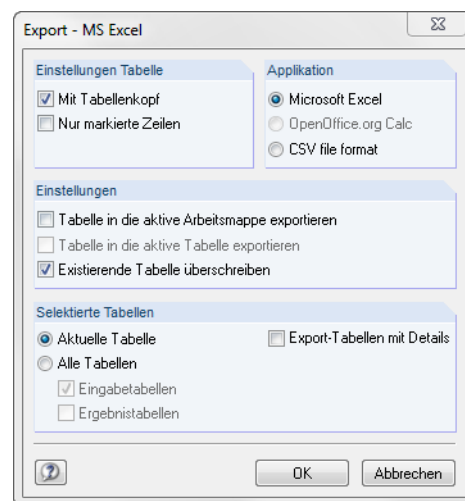
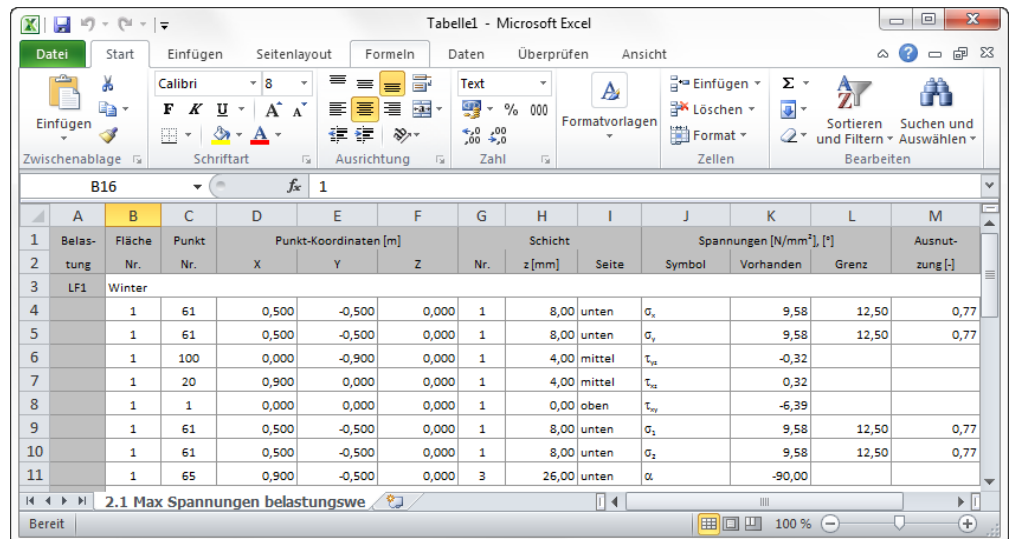


Bild 7.2: Dialog *Export - MS Excel*

Wenn die Auswahl feststeht, kann der Export mit [OK] gestartet werden. Excel bzw. OpenOffice werden automatisch gestartet, d. h. die Programme brauchen nicht im Hintergrund laufen.



The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

1	Belastung	Fläche Nr.	Punkt Nr.	Punkt-Koordinaten [m]			Schicht Nr.	z [mm]	Seite	Spannungen [N/mm ²] [°]			Ausnutzung [-]
2				X	Y	Z				Symbol	Vorhanden	Grenz	
3	LF1	Winter											
4		1	61	0,500	-0,500	0,000	1	8,00	unten	σ_x	9,58	12,50	0,77
5		1	61	0,500	-0,500	0,000	1	8,00	unten	σ_y	9,58	12,50	0,77
6		1	100	0,000	-0,900	0,000	1	4,00	mittel	τ_{xz}	-0,32		
7		1	20	0,900	0,000	0,000	1	4,00	mittel	τ_{yz}	0,32		
8		1	1	0,000	0,000	0,000	1	0,00	oben	τ_{xy}	-6,39		
9		1	61	0,500	-0,500	0,000	1	8,00	unten	σ_z	9,58	12,50	0,77
10		1	61	0,500	-0,500	0,000	1	8,00	unten	σ_2	9,58	12,50	0,77
11		1	65	0,900	-0,500	0,000	3	26,00	unten	α	-90,00		

Bild 7.3: Ergebnisse in Excel – Maske 2.1 Max. Spannungen belastungsweise

7.3 RF-GLAS und RFEM

Jede Fläche, die in RFEM als Flächentyp *Glas* definiert wurde (siehe Bild 7.4), muss in RF-GLAS einem Schichtenaufbau zugewiesen werden.

Umgekehrt werden, wie in Kapitel 3.3 erwähnt, die in RF-GLAS definierten Daten nur für dieses Modul verwendet. Sie haben keinen Einfluss auf die Vorgaben des Hauptprogramms: In RFEM wird jede Fläche durch das *Material* und die *Dicke* beschrieben.

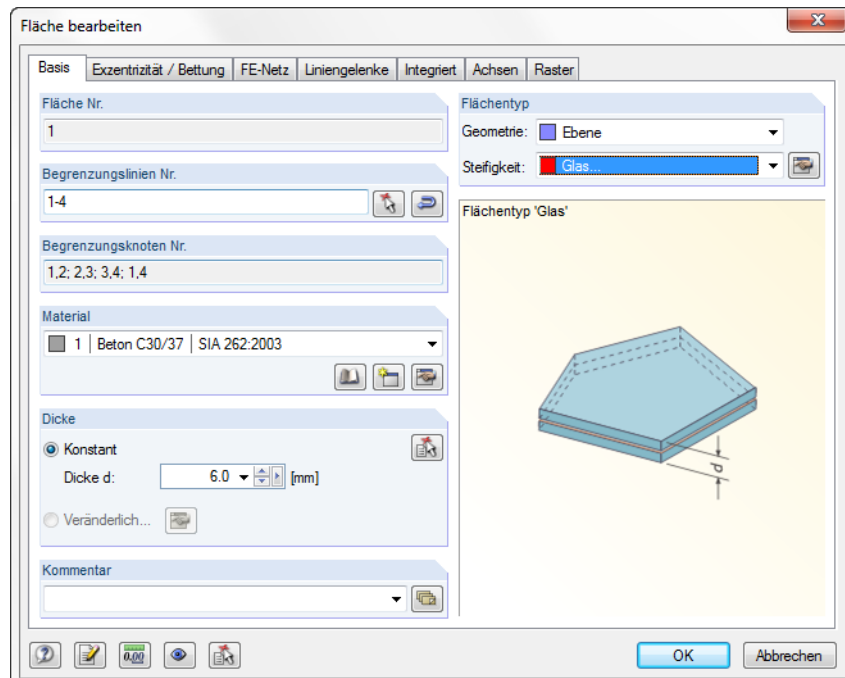


Bild 7.4: RFEM-Dialog Fläche bearbeiten

8. Beispiele

In diesem Kapitel werden verschiedene Beispiele vorgestellt.

8.1 Ermittlung der Steifigkeitsmatrixelemente

Es wird ein Verbundglas untersucht, das aus folgenden Schichten besteht: Ein Einscheibensicherheitsglas (ESG) mit einer Dicke von 12 mm, eine PVB-Folie mit einer Dicke von 1,14 mm und ein ESG mit einer Dicke von 10 mm.

Es wird der Schubverbund zwischen den Schichten berücksichtigt.

Die Berechnung erfolgt nach 2D-Platten-Theorie.

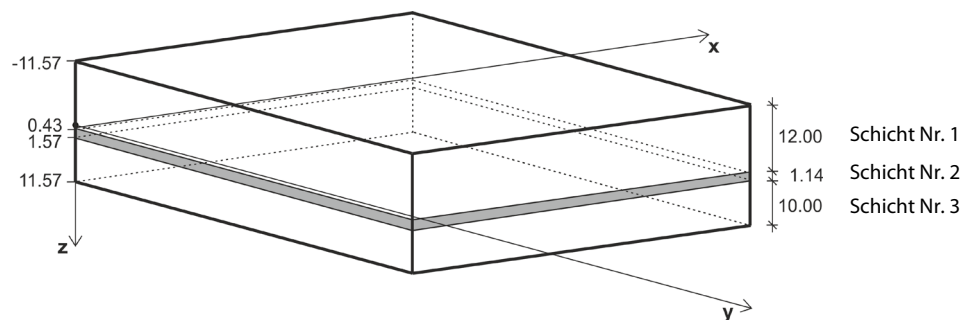


Bild 8.1: Schichtenaufbau

Schicht Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Schicht-typ	Material Bezeichnung	Dicke t [mm]	Elastizitätsmodul E [N/mm ²]	Schubmodul G [N/mm ²]	Querdehnzahl ν [-]	Spez. Gewicht γ [kN/m ³]	Wärmedehnzahl α _T [1/°C]	Grenzspannung σ _{grenz} [N/mm ²]
1	Glas	Einscheibensicherheitsglas (ESG)	12,00	70000,000	28455,300	0,230	25,00	2,7E-02	120,000
2	Folie	PVB 22 °C Belastung bis 10 sec	1,14	12,000	4,003	0,499	10,70	2,7E-02	
3	Glas	Einscheibensicherheitsglas (ESG)	10,00	70000,000	28455,300	0,230	25,00	2,7E-02	120,000

Bild 8.2: Maske 1.2 Schichten

Die Steifigkeitsmatrix der einzelnen Schichten ergibt sich wie folgt

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} d_{i,11} & d_{i,12} & 0 \\ & d_{i,22} & 0 \\ \text{sym.} & & d_{i,33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & \frac{\nu_i E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ & \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ \text{sym.} & & G_i \end{bmatrix}, \quad G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)} \quad i = 1, \dots, n \quad (8.1)$$

$$\mathbf{d}_1 = \begin{bmatrix} \frac{70000}{1-0,23^2} & \frac{0,23 \cdot 70000}{1-0,23^2} & 0 \\ & \frac{70000}{1-0,23^2} & 0 \\ \text{sym.} & & 28455 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 73909,8 & 16999,3 & 0 \\ 16999,3 & 73909,8 & 0 \\ 0 & 0 & 28455,0 \end{bmatrix} \text{ MN/m}^2$$

Matrixelemente		
d11:	<input type="text" value="73909.8"/>	[MN/m ²]
d12:	<input type="text" value="16999.3"/>	[MN/m ²]
d22:	<input type="text" value="73909.8"/>	[MN/m ²]
d33:	<input type="text" value="28455.0"/>	[MN/m ²]

Bild 8.3: Steifigkeitsmatrix Schicht Nr. 1

$$\mathbf{d}_2 = \begin{bmatrix} \frac{12}{1-0.499^2} & \frac{0.499 \cdot 12}{1-0.499^2} & 0 \\ \text{sym.} & \frac{12}{1-0.499^2} & 0 \\ & & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15.98 & 7.97 & 0 \\ 7.97 & 15.98 & 0 \\ 0 & 0 & 4.00 \end{bmatrix} \text{ MN/m}^2$$

Matrizelemente			
d11:	15.98 [MN/m ²]	d12:	7.97 [MN/m ²]
		d22:	15.98 [MN/m ²]
		d33:	4.00 [MN/m ²]

Bild 8.4: Steifigkeitsmatrix Schicht Nr. 2

$$\mathbf{d}_3 = \mathbf{d}_1 = \begin{bmatrix} \frac{70000}{1-0.23^2} & \frac{0.23 \cdot 70000}{1-0.23^2} & 0 \\ \text{sym.} & \frac{70000}{1-0.23^2} & 0 \\ & & 28455 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 73909.8 & 16999.3 & 0 \\ 16999.3 & 73909.8 & 0 \\ 0 & 0 & 28455.0 \end{bmatrix} \text{ MN/m}^2$$

Matrizelemente			
d11:	73909.8 [MN/m ²]	d12:	16999.3 [MN/m ²]
		d22:	73909.8 [MN/m ²]
		d33:	28455.0 [MN/m ²]

Bild 8.5: Steifigkeitsmatrix Schicht Nr. 3

Die Gesamtsteifigkeitsmatrix nimmt dann folgende Form an:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{17} & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & \text{sym.} & D_{27} & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & \text{sym.} & \text{sym.} & D_{38} \\ & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

Auf den folgenden Seiten ist die Ermittlung der Steifigkeitsmatrizelemente beschrieben.

Biege- und Drillsteifigkeitsglieder [N/m]

$$D_{11} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^3 - z_{i;\min}^3}{3} d_{i;11} \quad D_{12} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^3 - z_{i;\min}^3}{3} d_{i;12}$$

$$D_{22} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^3 - z_{i;\min}^3}{3} d_{i;22}$$

$$D_{33} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^3 - z_{i;\min}^3}{3} d_{i;33}$$

$$D_{11} = \frac{(0.43 \cdot 10^{-3})^3 - (-11.57 \cdot 10^{-3})^3}{3} 73909.8 \cdot 10^3 + \frac{(1.57 \cdot 10^{-3})^3 - (0.43 \cdot 10^{-3})^3}{3} 15.98 \cdot 10^3 +$$

$$+ \frac{(11.57 \cdot 10^{-3})^3 - (1.57 \cdot 10^{-3})^3}{3} 73909.8 \cdot 10^3 = 76.2 \text{ Nm}$$

$$D_{12} = \frac{(0.43 \cdot 10^{-3})^3 - (-11.57 \cdot 10^{-3})^3}{3} 16999.3 \cdot 10^3 + \frac{(1.57 \cdot 10^{-3})^3 - (0.43 \cdot 10^{-3})^3}{3} 7.97 \cdot 10^3 +$$

$$+ \frac{(11.57 \cdot 10^{-3})^3 - (1.57 \cdot 10^{-3})^3}{3} 16999.3 \cdot 10^3 = 17.5 \text{ Nm}$$

$$D_{22} = \frac{(0.43 \cdot 10^{-3})^3 - (-11.57 \cdot 10^{-3})^3}{3} 73909.8 \cdot 10^3 + \frac{(1.57 \cdot 10^{-3})^3 - (0.43 \cdot 10^{-3})^3}{3} 15.98 \cdot 10^3 +$$

$$+ \frac{(11.57 \cdot 10^{-3})^3 - (1.57 \cdot 10^{-3})^3}{3} 73909.8 \cdot 10^3 = 76.2 \text{ Nm}$$

$$D_{33} = \frac{(0.43 \cdot 10^{-3})^3 - (-11.57 \cdot 10^{-3})^3}{3} 28455.0 \cdot 10^3 + \frac{(1.57 \cdot 10^{-3})^3 - (0.43 \cdot 10^{-3})^3}{3} 4.0 \cdot 10^3 +$$

$$+ \frac{(11.57 \cdot 10^{-3})^3 - (1.57 \cdot 10^{-3})^3}{3} 28455.0 \cdot 10^3 = 29.3 \text{ Nm}$$

Exzentrizitätsglieder [N/m]

$$D_{16} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^2 - z_{i;\min}^2}{2} d_{i;11} \quad D_{17} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^2 - z_{i;\min}^2}{2} d_{i;12}$$

$$D_{27} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^2 - z_{i;\min}^2}{2} d_{i;22}$$

$$D_{38} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i;\max}^2 - z_{i;\min}^2}{2} d_{i;33}$$

$$D_{16} = \frac{(0.43 \cdot 10^{-3})^2 - (-11.57 \cdot 10^{-3})^2}{2} 73909.8 \cdot 10^3 + \frac{(1.57 \cdot 10^{-3})^2 - (0.43 \cdot 10^{-3})^2}{2} 15.98 \cdot 10^3 +$$

$$+ \frac{(11.57 \cdot 10^{-3})^2 - (1.57 \cdot 10^{-3})^2}{2} 73909.8 \cdot 10^3 = -84.2 \text{ Nm/m}$$

$$D_{17} = \frac{(0.43 \cdot 10^{-3})^2 - (-11.57 \cdot 10^{-3})^2}{2} 16999.3 \cdot 10^3 + \frac{(1.57 \cdot 10^{-3})^2 - (0.43 \cdot 10^{-3})^2}{2} 7.97 \cdot 10^3 +$$

$$+ \frac{(11.57 \cdot 10^{-3})^2 - (1.57 \cdot 10^{-3})^2}{2} 16999.3 \cdot 10^3 = -19.4 \text{ Nm/m}$$

$$D_{27} = \frac{(0.43 \cdot 10^{-3})^2 - (-11.57 \cdot 10^{-3})^2}{2} 73909.8 \cdot 10^3 + \frac{(1.57 \cdot 10^{-3})^2 - (0.43 \cdot 10^{-3})^2}{2} 15.98 \cdot 10^3 + \frac{(11.57 \cdot 10^{-3})^2 - (1.57 \cdot 10^{-3})^2}{2} 73909.8 \cdot 10^3 = -84.2 \text{ Nm/m}$$

$$D_{38} = \frac{(0.43 \cdot 10^{-3})^2 - (-11.57 \cdot 10^{-3})^2}{2} 28455.0 \cdot 10^3 + \frac{(1.57 \cdot 10^{-3})^2 - (0.43 \cdot 10^{-3})^2}{2} 4.0 \cdot 10^3 + \frac{(11.57 \cdot 10^{-3})^2 - (1.57 \cdot 10^{-3})^2}{2} 28455.0 \cdot 10^3 = -32.4 \text{ Nm/m}$$

Membranglieder [N/m]

$$D_{66} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i,11}$$

$$D_{67} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i,12}$$

$$D_{77} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i,22}$$

$$D_{88} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i,33}$$

$$D_{66} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot 73909.8 \cdot 10^3 + 1.14 \cdot 10^{-3} \cdot 15.98 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 73909.8 \cdot 10^3 = 1626030 \text{ N/m}$$

$$D_{67} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot 16999.3 \cdot 10^3 + 1.14 \cdot 10^{-3} \cdot 7.97 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 16999.3 \cdot 10^3 = 373993 \text{ N/m}$$

$$D_{77} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot 73909.8 \cdot 10^3 + 1.14 \cdot 10^{-3} \cdot 15.98 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 73909.8 \cdot 10^3 = 1626030 \text{ N/m}$$

$$D_{88} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot 28455.0 \cdot 10^3 + 1.14 \cdot 10^{-3} \cdot 4.0 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 28455.0 \cdot 10^3 = 626015 \text{ N/m}$$

Schubglieder [N/m]

Der Berechnungsablauf für Schubelemente der Steifigkeitsmatrix wird hier nicht näher erläutert. Es wird lediglich folgende Bedingung nachgewiesen:

$$\max_i \left(\frac{5}{6} G_i t_i \right) \leq D_{44} = D_{55} \leq \frac{5}{6} \max_i (G_i) \sum_{i=1}^n t_i \quad i = 1, \dots, n \quad (8.3)$$

Es gelten die folgenden aus RF-GLAS adaptierten Schubsteifigkeiten:

$$D_{44} = D_{55} = 284550 \text{ N/m}$$

$$\frac{5}{6} G_1 t_1 = \frac{5}{6} 28455 \cdot 12 = 284550 \text{ N/m}$$

$$\frac{5}{6} G_2 t_2 = \frac{5}{6} 4 \cdot 1.14 = 3.8 \text{ N/m}$$

$$\frac{5}{6} G_3 t_3 = \frac{5}{6} 28455 \cdot 10 = 237125 \text{ N/m}$$

$$284550 \leq 284550 = 284550 \leq \frac{5}{6} 28455(12 + 1.14 + 10) = 548707$$

Gesamtsteifigkeitsmatrix

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix}
 76.2 & 17.5 & 0 & 0 & 0 & -84.2 & -19.4 & 0 \\
 & 76.2 & 0 & 0 & 0 & -19.4 & -84.2 & 0 \\
 & & 29.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -32.4 \\
 & & & 284550 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & 284550 & 0 & 0 & 0 \\
 & \text{sym.} & & & & 1626030 & 373993 & 0 \\
 & & & & & & 1626030 & 0 \\
 & & & & & & & 626015
 \end{bmatrix}$$

Elemente der erweiterten Steifigkeitsmatrix

Paket Nr. 1 Fläche Nr. 1

Steifigkeitsmatrix-Elemente (Biegung und Torsion)

D11: 76.2 [kNm] D12: 17.5 [kNm]
 D22: 76.2 [kNm] D33: 29.3 [kNm]

Steifigkeitsmatrix-Elemente (Schub)

D44: 284550.0 [kN/m] D55: 284550.0 [kN/m]

Steifigkeitsmatrix-Elemente (Membran)

D66: 1626030.0 [kN/m] D67: 373993.0 [kN/m]
 D77: 1626030.0 [kN/m] D88: 626015.0 [kN/m]

Steifigkeitsmatrix-Elemente (Exzentrizitätseinwirkungen)

D16: -84.2 [kNm/m] D17: -19.4 [kNm/m]
 D27: -84.2 [kNm/m] D38: -32.4 [kNm/m]

$\begin{bmatrix}
 D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{17} & 0 \\
 D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{sym.} & D_{27} & 0 \\
 D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{38} \\
 & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\
 \text{sym.} & & & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\
 & & & & & & D_{77} & 0 \\
 & & & & & & & D_{88}
 \end{bmatrix}$

$D_{11} \dots D_{33}$ [Nm]
 $D_{44} \dots D_{88}$ [N/m]
 $D_{16} \dots D_{38}$ [Nm/m]

OK

Bild 8.6: Dialog *Elemente der erweiterten Steifigkeitsmatrix*

8.2 Isolierglas

Wir betrachten ein gelenkig gelagertes Isolierglas mit den Abmessungen 1,0 x 1,5 m und einem Schichtenaufbau gemäß Bild 8.7 sowie folgenden Parametern:

Glasscheibengröße in Richtung der x-Achse		$a = 1.0 \text{ m}$
Glasscheibengröße in Richtung der y-Achse		$b = 1.5 \text{ m}$
Dicke der äußeren Glasschicht		$t_1 = 8 \text{ mm}$
Dicke der Luftschicht		$t_2 = 12 \text{ mm}$
Dicke der inneren Glasschicht		$t_3 = 12 \text{ mm}$
Glasparameter	Elastizitätsmodul	$E = 70000 \text{ MPa}$
	Schubmodul	$G = 28455 \text{ MPa}$
	Querdehnzahl	$\nu = 0.23$
Klimalast	Herstellung	Temperatur $T_p = 0 \text{ °C}$
		Atmosphärischer Druck $p_{p,\text{met}} = 101 \text{ kPa}$
		Meereshöhe $H_1 = 0 \text{ m}$
	Nutzung	Temperatur (äußere = Gas = innere) $T_1 = 25 \text{ °C}$
		Atmosphärischer Druck $p_{\text{außen},\text{met}} = 97 \text{ kPa}$
		Meereshöhe $H_2 = 100 \text{ m}$

Tabelle 8.1: Isolierglasparameter

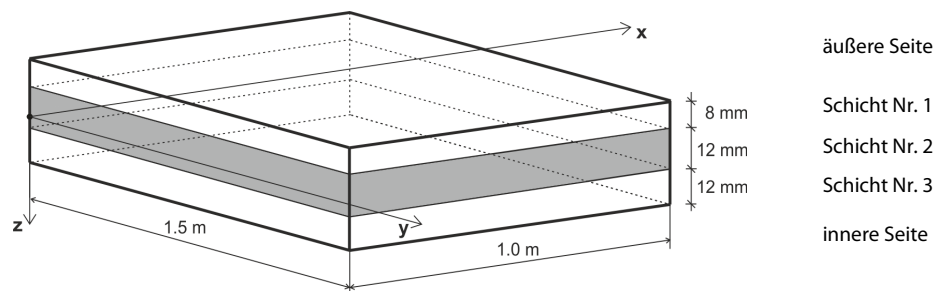


Bild 8.7: Schichtenaufbau

Die Länge der finiten Elemente beträgt 50 mm.

8.2.1 Berechnung in RF-GLAS

Zunächst legen wir in RFEM ein *Neues Modell* an.

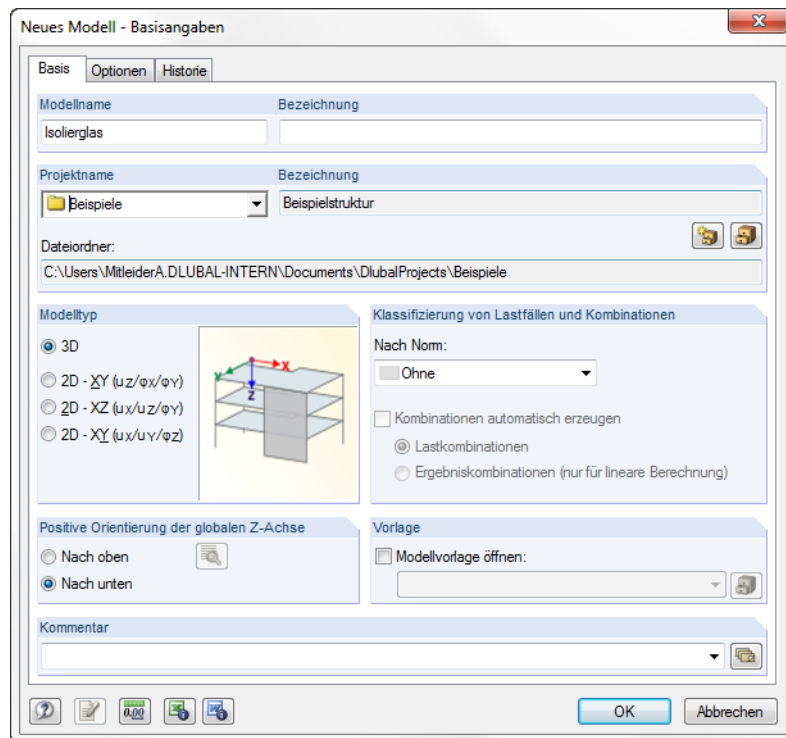


Bild 8.8: Dialog *Neues Modell - Basisangaben*



Nach Eingabe der Basisangaben erzeugen wir eine *Neue Rechteckplatte*: Als Flächentyp wählen wir *Glas* und definieren dann eine Fläche mit den Abmessungen 1,0 m x 1,5 m.

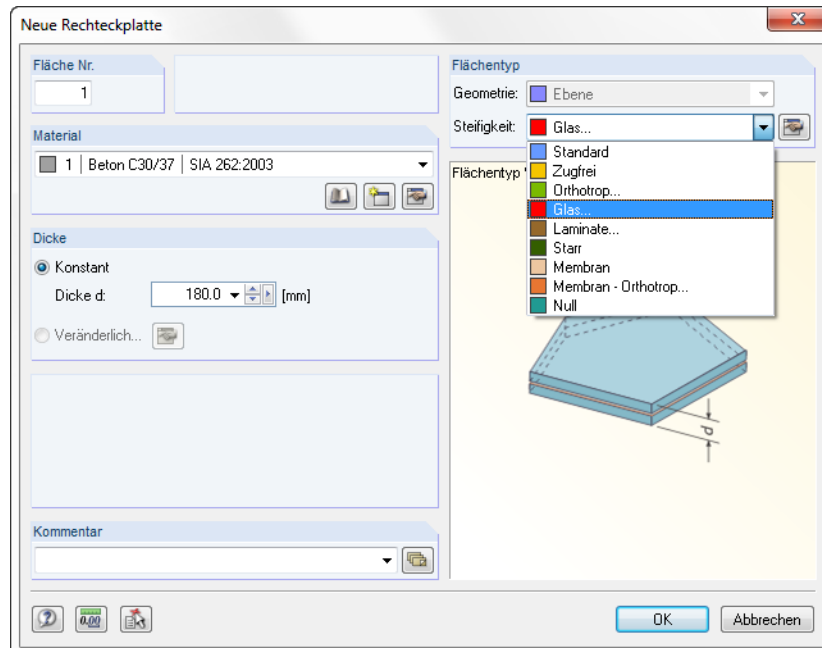


Bild 8.9: Dialog *Neue Rechteckplatte*

Da die Berechnung in RF-GLAS erfolgen soll und die Lager direkt im Modul definiert werden können, brauchen wir in RFEM keine Lager anordnen.



Obwohl im Modell keine äußere Last vorliegt, muss ein Lastfall erzeugt werden, um die Berechnung in RF-GLAS starten zu können. Das Eigengewicht soll **nicht Aktiv** sein.

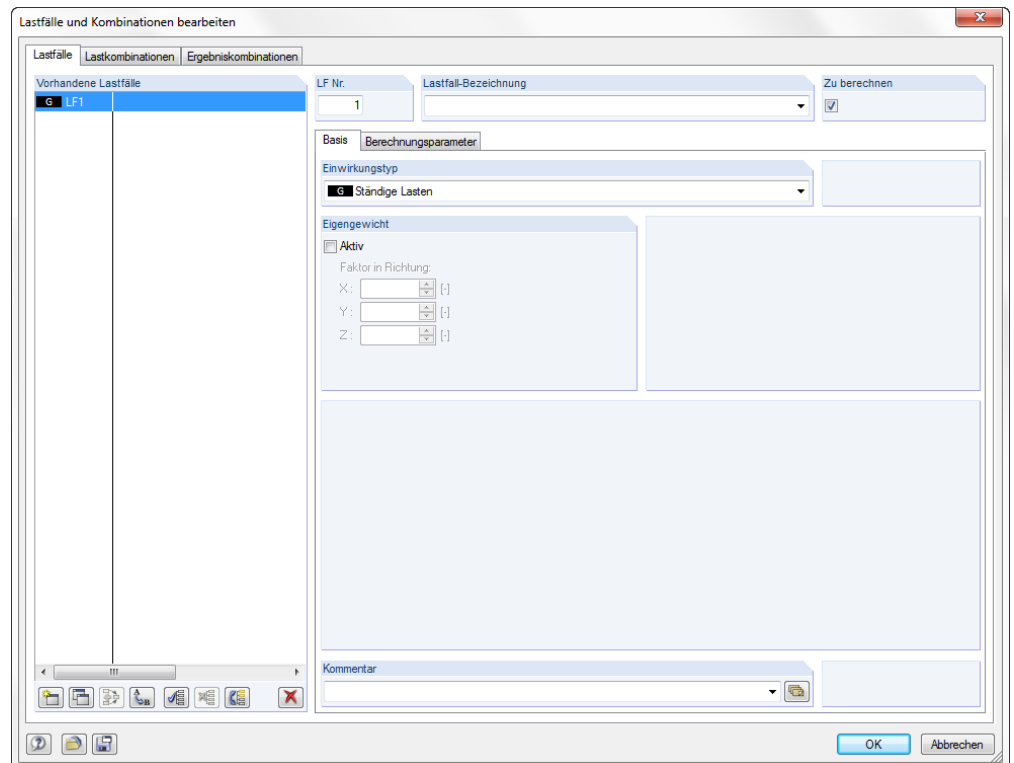


Bild 8.10: Dialog Lastfälle und Kombinatorik bearbeiten

Im Dialog *FE-Netz-Einstellungen* geben wir **0,05 m** als angestrebte Länge der finiten Elemente vor.

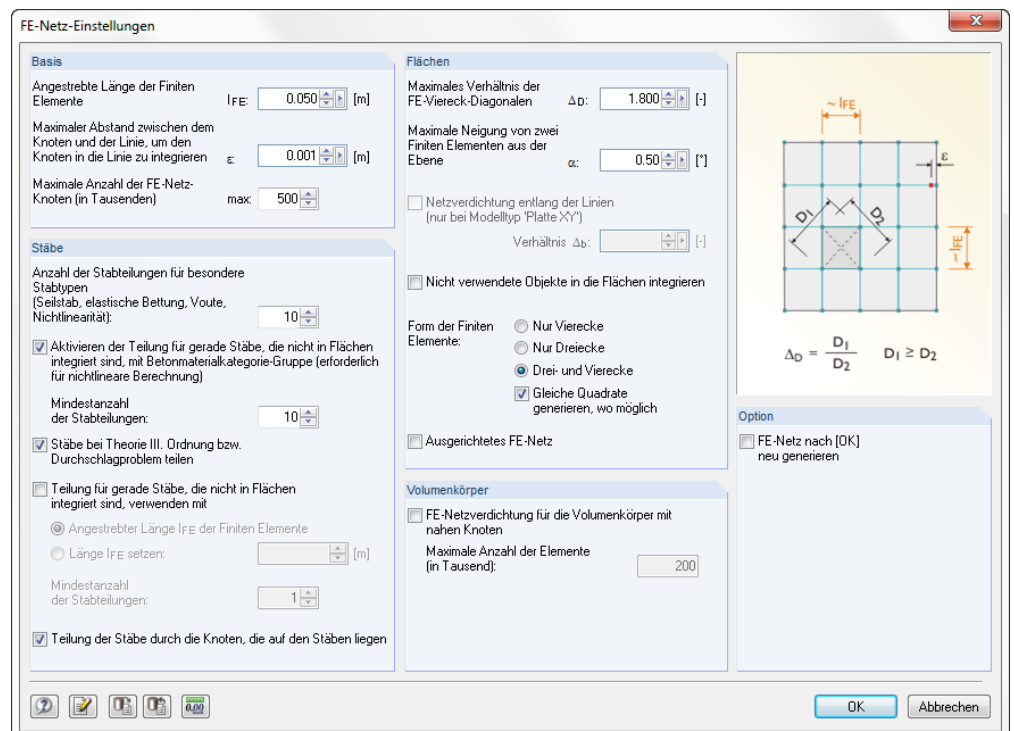


Bild 8.11: Dialog FE-Netz Einstellungen

Nun rufen wir das Modul RF-GLAS auf (siehe Kapitel 1.4).

In Maske 1.1 *Basisangaben* kann kein Lastfall ausgewählt werden, da der LF1 keine Lastdaten enthält. Dies wird durch ein Sternchen (*) angezeigt (siehe Kapitel 3.1.1).

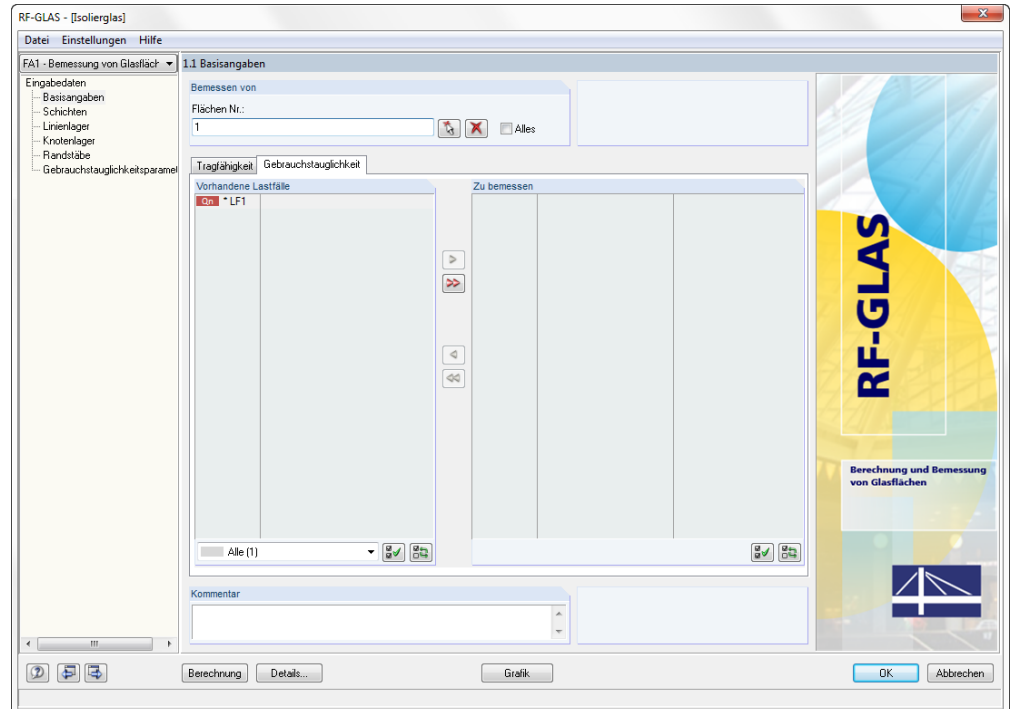


Bild 8.12: RF-GLAS-Maske 1.1 *Basisangaben*

Daher wechseln wir in Maske 1.2 *Schichten*, um ein Isolierglas mit Gasschicht zu definieren. Danach ist es möglich, in Maske 1.1 einen Lastfall auszuwählen.

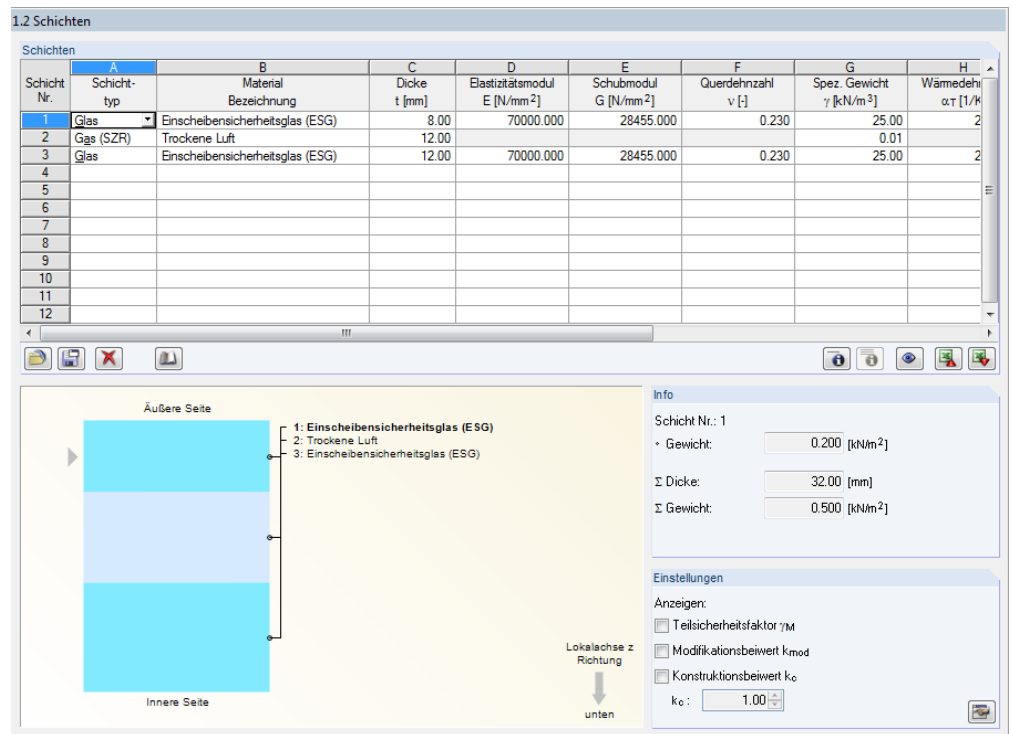


Bild 8.13: Maske 1.2 *Schichten*

Da vorerst nur die Verformung des Modells von Interesse ist, wählen wir den LF1 nur im Register *Gebrauchstauglichkeit* der Maske 1.1 *Basisangaben* aus.

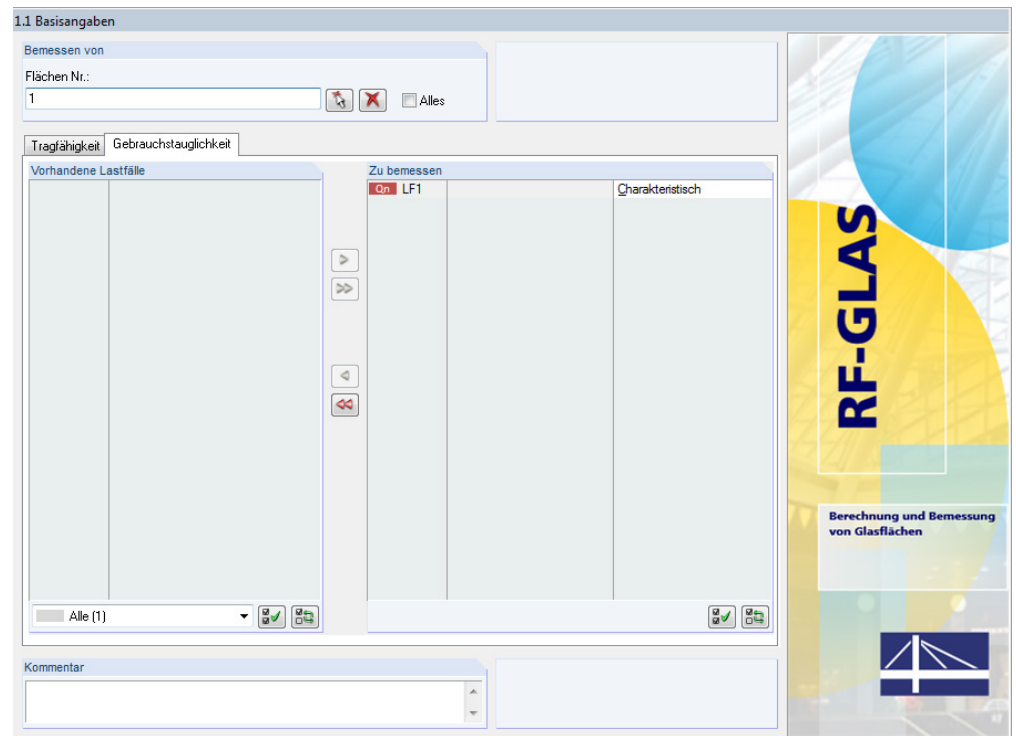


Bild 8.14: Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Dann legen wir in Maske 1.3 *Linienlager* für die Linien 1 bis 4 den Lagertyp *Gelenkig - Typ 1* fest.

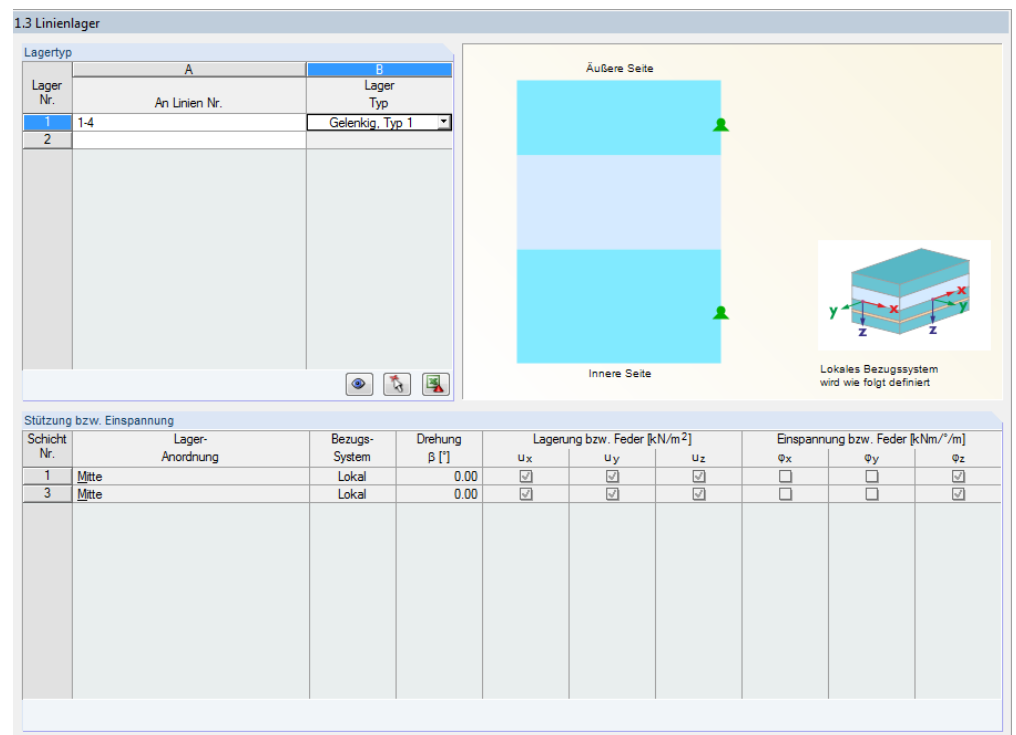


Bild 8.15: Maske 1.3 *Linienlager*

Die Masken 1.4 *Knotenlager* und 1.5 *Randstäbe* lassen wir leer.

Wir setzen die Eingabe in Maske 1.6 *Klimalasten-Parameter für Isolierglas* fort und nehmen folgende Einträge vor:

1.6 Klimalasten-Parameter für Isolierglas

Klimalasten-Parameter - Sommer

☒ Verwenden

Temperatur: Herstellung: 0.0 [°C] Temperatur: Außen: 25.0 [°C] Differenz: 25.0 [°C] LF-Faktor: 1.00

Gas: 25.0 [°C] 25.0 [°C]

Innen: 25.0 [°C] 25.0 [°C]

Atmosph. Druck: Herstellung: 101.00 [kPa] Atmosph. Druck: 97.00 [kPa] -4.00 [kPa]

Höhenlage: 0.0 [m] Höhenlage: 100.0 [m] 100.0 [m]

Klimalasten-Parameter - Winter

☐ Verwenden

Temperatur: Herstellung: [°C] Temperatur: Außen: [°C] Differenz: [°C] LF-Faktor: []

Gas: [°C] [°C]

Innen: [°C] [°C]

Atmosph. Druck: Herstellung: [kPa] Atmosph. Druck: [kPa] [kPa]

Höhenlage: [m] Höhenlage: [m] [m]

Lastverteilung

Nr.	Bezeichnung	Lastanteil [%] an der Glasseite	
		Außen	Innen
LF1		100.0	0.0

Einstellungen

☐ Berechnung nach TRLV, Anhang A
Hillmodell als allseitig gelagerte rechteckige Scheibe

Bild 8.16: Maske 1.6 *Klimalast-Parameter für Isolierglas*

In Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeitsparameter* fügen wir die Fläche Nr. 1 zur *Liste der Flächen* hinzu. Da das Kontrollfeld *Manuell* nicht angehakt ist, wird die *Bezugslänge L* automatisch vervollständigt.

1.8 Gebrauchstauglichkeitsparameter

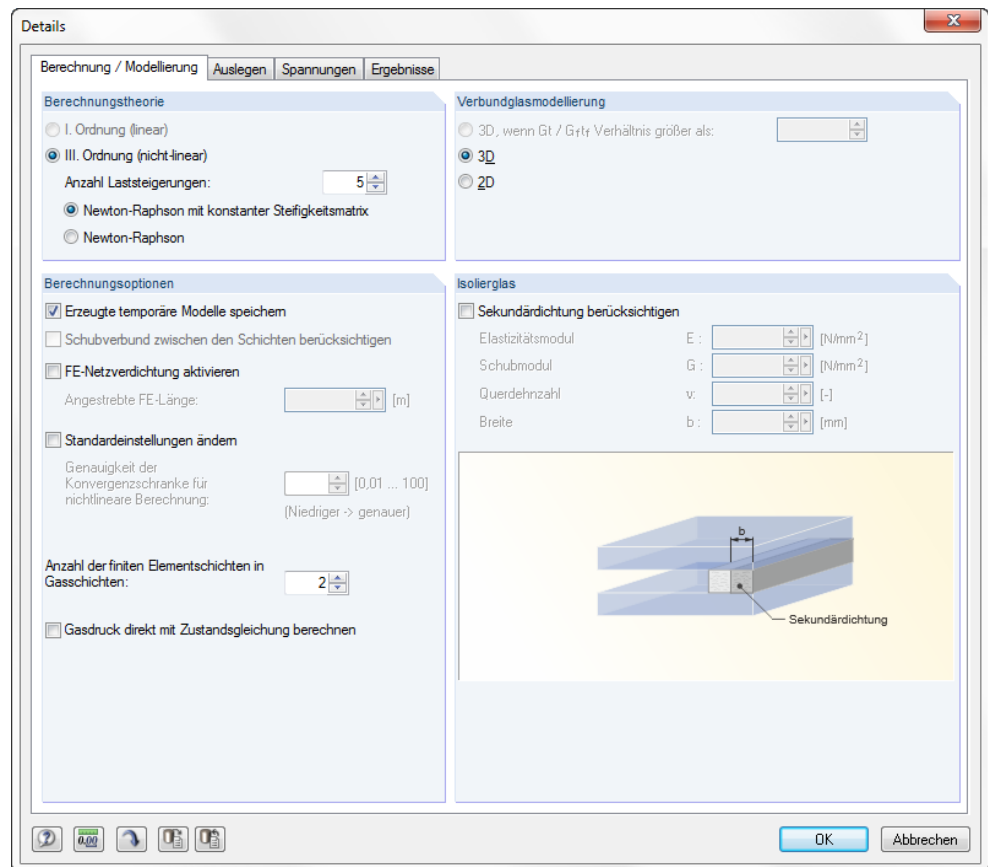
Zuordnung der Bezugslängen zu den Flächen

Nr.	A Liste der Flächen	B Bezugslänge		D Kragfläche	E Kommentar
		Manuell	L [m]		
1	1	<input type="checkbox"/>	1.500	<input type="checkbox"/>	
2					

Bild 8.17: Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeitsparameter*

Details...

Abschließend überprüfen wir noch die Einstellungen im Dialog *Details*.

Bild 8.18: Dialog *Details*, Register *Berechnung / Modellierung*

Berechnung

Wir starten die [Berechnung]. Da ein Isolierglas vorliegt, erfolgt die Berechnung in 3D, bei der die einzelnen Schichten als Volumenkörper analysiert werden.

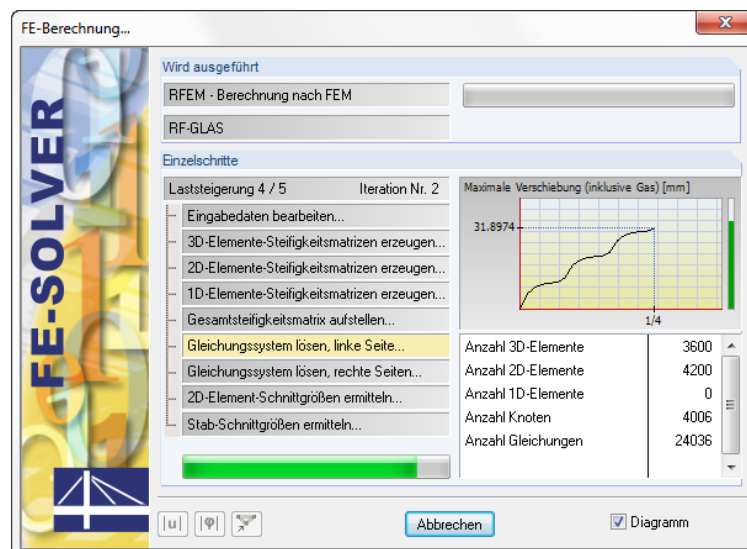


Bild 8.19: Berechnung

Bei der Berechnung wird ein Diagramm mit dem Verlauf der maximalen Verschiebung inklusive der Verschiebung in den Gaselementen angezeigt. Da die Verschiebungen beachtlich sind (siehe Bild), wird Isolierglas immer nach Theorie III. Ordnung (Theorie großer Verformungen) berechnet. Dadurch wird die Modellgeometrie korrekt erfasst.

Nach der Berechnung werden in Maske 3.1 *Max. Verschiebungen* die Verschiebungen der Glasscheiben ausgegeben.

3.1 Max Verschiebungen

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B Punkt-Koordinaten [m] X	C Y	D Z	E Lastfall	F Bemessungs-komb.	G Paket Nr.	H Verschiebungen [mm] u _z	I Grenz u _z	J Ausnutzung u _z [%]
1	326	0.500	0.750	0.000	LF1, Sommer	CH	1	-2.801	5.000	0.56
	326	0.500	0.750	0.000			2	0.979	5.000	0.20
Maximale Verschiebung / Maximale Ausnutzung										
1	326	0.500	0.750	0.000	LF1, Sommer	CH	1	-2.801	5.000	0.56
	326	0.500	0.750	0.000	LF1, Sommer	CH	1	-2.801	5.000	0.56

Max. Ausnutzung: 0.56 ≤ 1

Bild 8.20: Maske 3.1 *Max. Verschiebungen*

8.2.2 Kontrolle der Berechnung

Wir überprüfen dieses Beispiel mit RFEM. Da die Berechnung des Isolierglases in 3D erfolgt, müssen wir das RFEM-Modell mit den Anpassungen in RF-GLAS abgleichen. Hierzu wurde im Dialog *Details* das Kontrollfeld *Erzeugte temporäre Modelle speichern* angehakt (siehe Bild 8.18).

Wir öffnen dieses generierte Modell mit RFEM (es befindet sich im selben Projektordner wie die Originaldatei). In diesem Modell löschen wir das Gasvolumen. Dann weisen wir den Scheiben-Volumenkörpern eine Flächenlast p zu. Sie kann wie folgt aus der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase bestimmt werden:

$$\frac{pV}{T} = \text{konst.} \quad (8.4)$$

$$\frac{p_p V_{01}}{T_p} = \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_1 [V_{01} + C_v (p_1 - p_{out})]}{T_1} \quad (8.5)$$

mit C_v : Nachgiebigkeit der Glasplatten, definiert als

$$C_v(p) = \frac{V(p)}{p} \text{ m}^3/\text{Pa} \quad (8.6)$$

mit $V(p)$: Volumen zwischen unverformter und verformter Position der Glasschicht infolge des Drucks p . Der Wert der Nachgiebigkeit ist vom momentanen Druckwert abhängig.

Details...

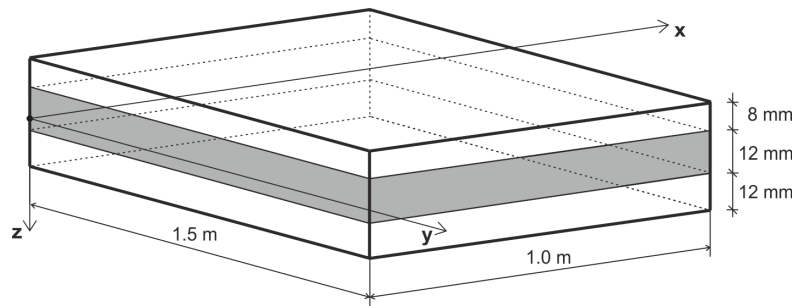


Bild 8.21: Schichtenaufbau

Das Anfangsgasvolumen bei diesem Beispiel beträgt:

$$V_{01} = a \cdot b \cdot t_2 = 1.0 \cdot 1.5 \cdot 0.012 = 0.018 \text{ m}^3$$

Der Außengasdruck während der Nutzung wird wie folgt berechnet:

$$p_{\text{out}} = p_{\text{out,met}} - c_2 \cdot H_2 = p_{p,\text{met}} + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot H_2 = p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \Delta H \quad (8.7)$$

Durch Substitution erhalten wir:

$$\frac{p_p V_{01} T_1}{T_p} = p_1 \left[V_{01} + C_v (p_1 - p_p - \Delta p_{\text{met}} + c_2 \Delta H) \right]$$

$$C_v p_1^2 + \left[V_{01} - C_v (p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \Delta H) \right] p_1 - \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p} = 0$$

Der innere Gasdruck während der Nutzung ist dann

$$p_1 = \frac{C_v (p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{\left[V_{01} - C_v (p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) \right]^2 + 4 C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2 C_v}$$

$$p_p = p_{p,\text{met}} - c_2 \cdot H_1 = 101000 - 12 \cdot 0 = 101000 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{\text{met}} = p_{\text{out,met}} - p_{p,\text{met}} = 97000 - 101000 = -4000 \text{ Pa}$$

$$p_{\text{out}} = p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H = 101000 - 4000 - 12 \cdot (100 - 0) = 95800 \text{ Pa}$$

Der Faktor C_v hängt von Lagertyp, Abmessungen und Steifigkeit der Glasscheiben ab.

Er wird nach folgender Formel berechnet:

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} \quad (8.8)$$

$$C_{v1}(p) = \frac{V_1}{p} = \frac{1}{p} \int_0^a \int_0^b w_1(x, y) dx dy \quad (8.9)$$

$$C_{v2}(p) = \frac{V_2}{p} = \frac{1}{p} \int_0^a \int_0^b w_2(x, y) dx dy \quad (8.10)$$

mit C_{v1} : Nachgiebigkeit von Schicht 1

C_{v2} : Nachgiebigkeit von Schicht 3

Da dieser Faktor vom Druck $p = p_1 - p_{\text{out}}$ abhängt, erfolgt die Berechnung iterativ.

1. Iterationsschritt

Bei $p_1 = 100800$ Pa erhalten wir

$$p = p_1 - p_{\text{out}} = 100800 - 95800 = 5000 \text{ Pa}$$

RFEM ermittelt bei nicht-linearer Analyse mit einer FE-Länge von 50 mm und einer Belastung von $p = 5000$ Pa maximale Durchbiegungen von

$$w_1 = -6.144 \text{ mm und } w_2 = 3.207 \text{ mm.}$$

Mithilfe des Moduls RF-IMP erhalten wir die Verformungen der einzelnen Punkte im Modell. Dann kann das Volumen zwischen der verformten Fläche und der Fläche vor der Verformung, d. h. $V_1 = 4.054 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ und $V_2 = 2.046 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, berechnet werden.

$$C_{v1}(p) = \frac{V_1}{p} = \frac{4.054 \cdot 10^{-3}}{5000} = 8.108 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$C_{v2}(p) = \frac{V_2}{p} = \frac{2.046 \cdot 10^{-3}}{5000} = 4.092 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 8.108 \cdot 10^{-7} + 4.092 \cdot 10^{-7} = 1.220 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = \frac{C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{\left[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H)\right]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2C_v}$$

Es wird nun die Wurzel aus der vorherigen Formel neu berechnet:

$$\begin{aligned} & \sqrt{\left[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H)\right]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}} = \\ & = \sqrt{\left[0.018 - 1.220 \cdot 10^{-6} \cdot 95800\right]^2 + 4 \cdot 1.220 \cdot 10^{-6} \frac{101000 \cdot 0.018 \cdot 298.15}{273.15}} = 0.1395 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Der Gasdruck ergibt sich dann zu:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{\left[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H)\right]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2C_v} = \\ &= \frac{1.220 \cdot 10^{-6} \cdot 95800 - 0.018 + 0.1395}{2 \cdot 1.220 \cdot 10^{-6}} = 97695 \text{ Pa} \end{aligned}$$

2. Iterationsschritt

Bei $p_1 = 97695$ Pa erhalten wir

$$p = p_1 - p_{\text{out}} = 97695 - 95800 = 1895 \text{ Pa}$$

RFEM ermittelt mit dieser Belastung von $p = 1895$ Pa maximale Durchbiegungen von

$$w_1 = -3.501 \text{ mm und } w_2 = 1.323 \text{ mm.}$$

Die Verformungen der Punkte werden wieder mit RF-IMP ermittelt. Danach lassen sich mit $V_1 = 2.254 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ und $V_2 = 0.840 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ die Volumen der Verformungen bestimmen.

$$C_{v1}(p) = \frac{V_1}{p} = \frac{2.254 \cdot 10^{-3}}{1895} = 1.189 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$C_{v2}(p) = \frac{V_2}{p} = \frac{0.840 \cdot 10^{-3}}{1895} = 4.434 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 1.189 \cdot 10^{-6} + 4.434 \cdot 10^{-7} = 1.633 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = \frac{C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{\left[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) \right]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2C_v}$$

Es wird nun die Wurzel aus der vorherigen Formel neu berechnet:

$$\begin{aligned} & \sqrt{\left[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) \right]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}} = \\ & = \sqrt{\left[0.018 - 1.633 \cdot 10^{-6} \cdot 95800 \right]^2 + 4 \cdot 1.633 \cdot 10^{-6} \frac{101000 \cdot 0.018 \cdot 298.15}{273.15}} = 0.1792 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Der Gasdruck ergibt sich dann zu:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{\left[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) \right]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2C_v} = \\ &= \frac{1.633 \cdot 10^{-6} \cdot 95800 - 0.018 + 0.1792}{2 \cdot 1.633 \cdot 10^{-6}} = 97271 \text{ Pa} \end{aligned}$$

3. Iterationsschritt

Der Ablauf der weiteren Schritte ist identisch. Es werden nur die wichtigsten Werte angegeben.

$$p = p_1 - p_{\text{out}} = 97271 - 95800 = 1471 \text{ Pa}$$

$$w_1 = -2.922 \text{ mm}, w_2 = 1.034 \text{ mm}$$

$$V_1 = 1.873 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3, V_2 = 0.656 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 1.274 \cdot 10^{-6} + 4.464 \cdot 10^{-7} = 1.720 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = 97204 \text{ Pa}$$

4. Iterationsschritt

$$p = p_1 - p_{\text{out}} = 97204 - 95800 = 1404 \text{ Pa}$$

$$w_1 = -2.823 \text{ mm}, w_2 = 0.988 \text{ mm}$$

$$V_1 = 1.808 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3, V_2 = 0.627 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 1.288 \cdot 10^{-6} + 4.468 \cdot 10^{-7} = 1.734 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = 97194 \text{ Pa}$$

5. Iterationsschritt

$$p = p_1 - p_{\text{out}} = 97194 - 95800 = 1394 \text{ Pa}$$

$$w_1 = -2.807 \text{ mm}, w_2 = 0.981 \text{ mm}$$

$$V_1 = 1.797 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3, V_2 = 0.623 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 1.290 \cdot 10^{-6} + 4.468 \cdot 10^{-7} = 1.737 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = 97192 \text{ Pa}$$

6. Iterationsschritt

$$p = p_1 - p_{\text{out}} = 97192 - 95800 = 1392 \text{ Pa}$$

$$w_1 = -2.804 \text{ mm}, w_2 = 0.980 \text{ mm}$$

$$V_1 = 1.796 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3, V_2 = 0.622 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 1.290 \cdot 10^{-6} + 4.469 \cdot 10^{-7} = 1.737 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = 97192 \text{ Pa}$$

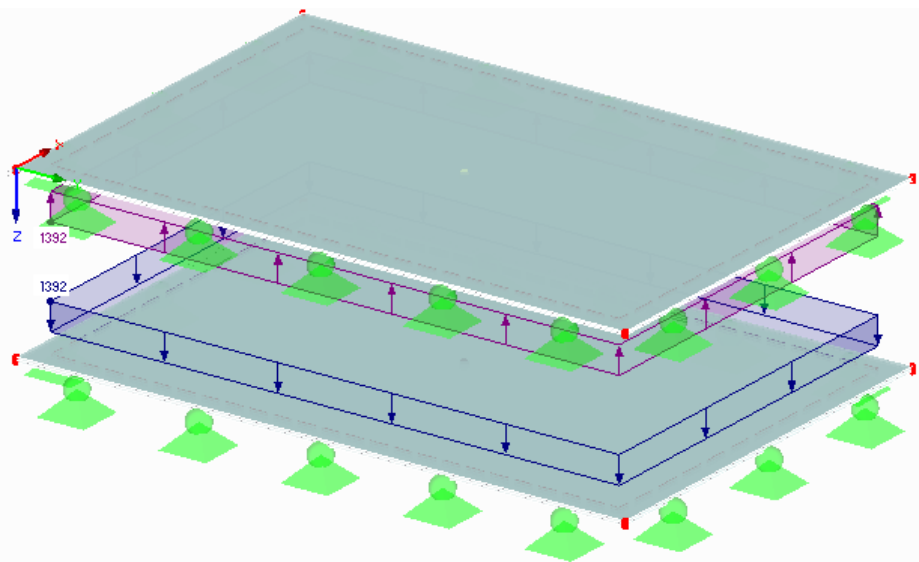


Bild 8.22: RFEM-Modell

7. Iterationsschritt

$$p = p_1 - p_{\text{out}} = 97192 - 95800 = 1392 \text{ Pa}$$

$$w_1 = -2.804 \text{ mm}, w_2 = 0.980 \text{ mm}$$

$$V_1 = 1.796 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3, V_2 = 0.622 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 1.290 \cdot 10^{-6} + 4.469 \cdot 10^{-7} = 1.737 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = 97192 \text{ Pa}$$

Da die Ergebnisse beim sechsten und siebten Iterationsschritt identisch sind, wird der Iterationsprozess abgebrochen. Als maximale Durchbiegungen ergeben sich somit

$$w_1 = -2.804 \text{ mm}, w_2 = 0.980 \text{ mm}.$$

Die RF-GLAS-Ergebniswerte betragen $w_1 = -2.801 \text{ mm}$ und $w_2 = 0.979 \text{ mm}$, sodass die Ergebnisse bestätigt sind.

8.3 Isolierglas nach TRLV, Anhang A

Wir berechnen das im Kapitel 8.2 vorgestellte Beispiel nach TRLV, Anhang A (bzw. DIN 18008-2: 2010-12, Anhang A).

Das Modell muss hierfür folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Rechteckige Fläche ohne Öffnung
- Genau eine Gasschicht
- Linienlager des Typs *Gelenkig - Typ 7* auf allen Begrenzungslinien
- Belastung nur durch Flächenlast

Die Berechnung erfolgt nach Theorie I. Ordnung und KIRCHHOFFScher Biegetheorie ([1], [2], [5]).

Glasscheibengröße in Richtung der x-Achse		$a = 1.0 \text{ m}$
Glasscheibengröße in Richtung der y-Achse		$b = 1.5 \text{ m}$
Dicke der äußeren Glasschicht		$t_1 = 8 \text{ mm}$
Dicke der Luftschicht		$t_2 = 12 \text{ mm}$
Dicke der inneren Glasschicht		$t_3 = 12 \text{ mm}$
Glasparameter	Elastizitätsmodul	$E = 70000 \text{ MPa}$
	Schubmodul	$G = 28455 \text{ MPa}$
	Querdehnzahl	$\nu = 0.23$
Klimalast	Herstellung	Temperatur $T_p = 0 \text{ °C}$
		Atmosphärischer Druck $p_{p,\text{met}} = 101 \text{ kPa}$
		Meereshöhe $H_1 = 0 \text{ m}$
	Nutzung	Temperatur (außen = Gas = innen) $T = 25 \text{ °C}$
		Atmosphärischer Druck $p_{\text{out},\text{met}} = 97 \text{ kPa}$
		Meereshöhe $H_2 = 100 \text{ m}$

Tabelle 8.2: Isolierglasparameter

Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel erhält die äußere Glasschicht zusätzlich eine äußere Last von $w_1 = 1 \text{ kN/m}^2$, die in RFEM einzugeben ist.

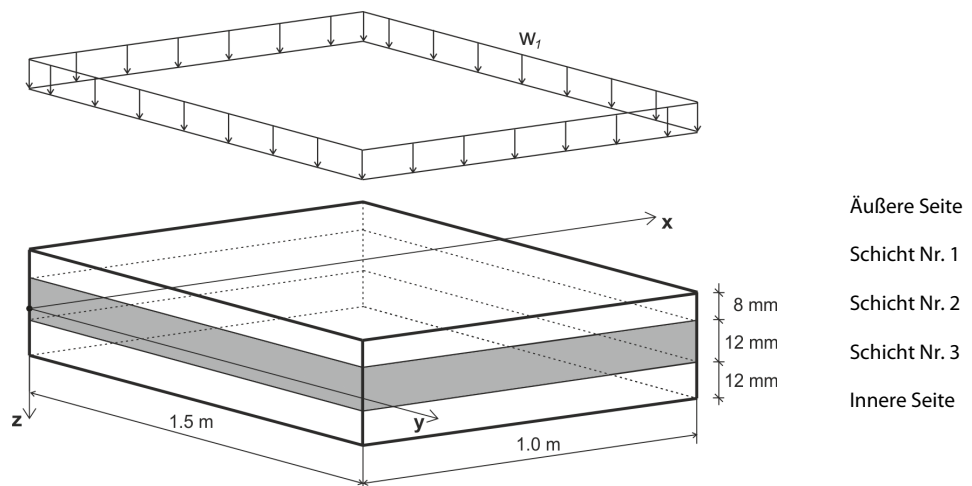


Bild 8.23: Darstellung der Belastungen

Der Anteil der äußeren Glasscheibe an der Gesamtbiegesteifigkeit beträgt:

$$\delta_1 = \frac{t_1^3}{t_1^3 + t_2^3} = \frac{8^3}{8^3 + 12^3} = 0.2286 \quad \text{TRLV, Anhang A, Gleichung A1}$$

Der Anteil der inneren Glasscheibe an der Gesamtbiegesteifigkeit beträgt:

$$\delta_2 = \frac{t_2^3}{t_1^3 + t_2^3} = \frac{12^3}{8^3 + 12^3} = 0.7714 \quad \text{TRLV, Anhang A, Gleichung A2}$$

Die charakteristische Kantenlänge ist dann:

$$a^* = 28.9 \cdot \sqrt[4]{\frac{t_3 \cdot t_1^3 \cdot t_2^3}{(t_1^3 + t_2^3) B_V}} \quad \text{TRLV, Anhang A, Gleichung A3}$$

mit B_V : aus Verhältnis $a/b = 1000/1500 = 0.667$

a/b	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
B_V	0.0194	0.0237	0.0288	0.0350	0.0421	0.0501	0.0587	0.0676	0.0767	0.0857

TRLV, Anhang A, Tabelle A1

Durch lineare Interpolation erhalten wir:

$$B_V = 0.0373.$$

$$a^* = 28.9 \cdot \sqrt[4]{\frac{t_3 \cdot t_1^3 \cdot t_2^3}{(t_1^3 + t_2^3) B_V}} = 28.9 \cdot \sqrt[4]{\frac{12 \cdot 8^3 \cdot 12^3}{(8^3 + 12^3) 0.0373}} = 546 \text{ mm}$$

Der Faktor φ ermittelt sich zu:

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1000}{546}\right)^4} = 0.081 \quad \text{TRLV, Anhang A, Gleichung A4}$$

Der Druck im Isolierglas infolge klimatischer Veränderungen beträgt:

$$p_0 = c_1 \Delta T - \Delta p_{\text{met}} + c_2 \Delta H = 340 \cdot 25 - (97000 - 101000) + 12 \cdot 100 = 13700 \text{ Pa} = 13.7 \text{ kN/m}^2$$

TRLV, Anhang A, Gleichung A5

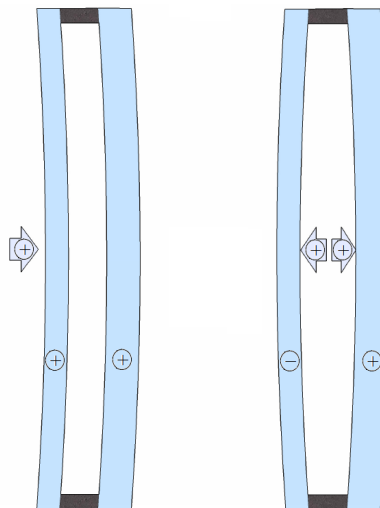


Bild 8.24: Windlast w_1 (links) und Last infolge klimatischer Änderungen p_0 (rechts)

Die folgende Tabelle zeigt die Lastverteilung für die einzelnen Glasscheiben:

Belastung auf		Lastanteil für	
		Äußere Scheibe	Innere Scheibe
Äußere Scheibe	Wind w_1	$(\delta_1 + \varphi \delta_2) \cdot w_1$	$(1 - \varphi) \delta_2 \cdot w_1$
	Schnee s	$(\delta_1 + \varphi \delta_2) \cdot s$	$(1 - \varphi) \delta_2 \cdot s$
Innere Scheibe	Wind w_2	$(1 - \varphi) \delta_1 \cdot w_2$	$(\varphi \delta_1 + \delta_2) \cdot w_2$
Beide Scheiben	Innerer Druck p_0	$-\varphi \cdot p_0$	$+\varphi \cdot p_0$

TRLV, Anhang A, Tabelle A2

In unserem Fall gilt:

Belastung auf		Lastanteil für	
		Äußere Scheibe	Innere Scheibe
Äußere Scheibe	w_1	$(0.2286 + 0.081 \cdot 0.7714) \cdot 1.0 = 0.29 \text{ kN/m}^2$	$(1 - 0.081) \cdot 0.7714 \cdot 1.0 = 0.71 \text{ kN/m}^2$
Beide Scheiben	p_0	$-0.081 \cdot 13.7 = -1.11 \text{ kN/m}^2$	$0.081 \cdot 13.7 = 1.11 \text{ kN/m}^2$

Tabelle 8.3: Belastung für Glasscheiben

Die Gesamtbelastung beträgt somit:

- Äußere Glasscheibe $f_1 = 0.29 + (-1.11) = -0.82 \text{ kN/m}^2$
- Innere Glasscheibe $f_2 = 0.71 + 1.11 = 1.82 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe in RF-GLAS nehmen wir wie im Kapitel 8.2 beschrieben vor. In Maske 1.6 *Klimalast-Parameter* haken wir die Option *Berechnung nach TRLV, Anhang A* an.

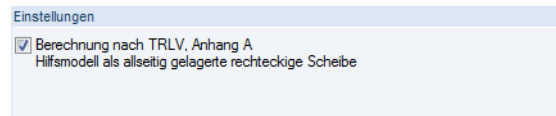


Bild 8.25: Berechnung nach TRLV, Anhang A

Im Abschnitt *Lastverteilung* dieser Maske überprüfen wir, ob 100 % der Last *Außen* wirken.

Im Dialog *Details*, Register *Berechnung / Modellierung* wählen wir die Berechnung nach Theorie *I. Ordnung* aus und haken das Kontrollfeld *Erzeugte temporäre Modelle speichern* an.

Die [Berechnung] liefert maximale Durchbiegungen von $w_1 = -2.015 \text{ mm}$, $w_2 = 1.323 \text{ mm}$.

Wenn wir das generierte Modell in RFEM öffnen, können wir die Lasten der Glasflächen anzeigen lassen und überprüfen.

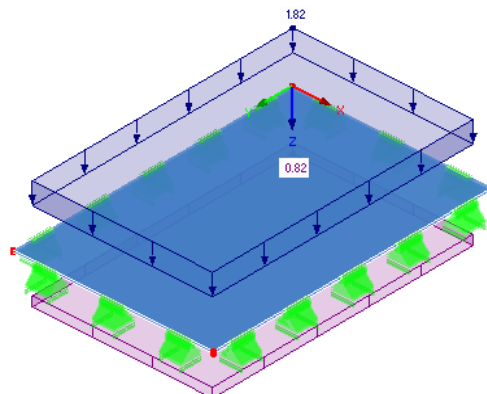


Bild 8.26: RFEM-Modell mit Belastung

Details...

Berechnung

8.4 Gekrümmtes Isolierglas

Es wird ein eingespanntes gekrümmtes Isolierglas untersucht, dessen Schichtenaufbau in Bild 8.27 dargestellt ist. Es gelten folgende Parameter:

Glasscheibenabmessung in Richtung der x-Achse $x \ y \ z$		$a = 1.0 \text{ m}$
Innenradius der Krümmung		$R = 3.0 \text{ m}$
Zentriwinkel		$\alpha = 30^\circ$
Dicke der Glasscheibe 1		$t_1 = 5 \text{ mm}$
Dicke der Luftschicht		$t_{SZR} = 12 \text{ mm}$
Dicke der Glasscheibe 2		$t_2 = 5 \text{ mm}$
Dicke der Folie		$t_f = 0.76 \text{ mm}$
Dicke der Glasscheibe 3		$t_3 = 5 \text{ mm}$
Glasparameter	Elastizitätsmodul	$E = 70000 \text{ MPa}$
	Schubmodul	$G = 28455 \text{ MPa}$
	Querdehnzahl	$\nu = 0.23$
Folienparameter	Elastizitätsmodul	$E = 3 \text{ MPa}$
	Schubmodul	$G = 1 \text{ MPa}$
	Querdehnzahl	$\nu = 0.499$
Klimalast	Herstellung	Temperatur $T_p = 0^\circ \text{C}$
		Atmosphärischer Druck $p_{p,met} = 101 \text{ kPa}$
		Meereshöhe $H_1 = 0 \text{ m}$
	Nutzung	Temperatur (außen = Gas = innen) $T_1 = 25^\circ \text{C}$
		Atmosphärischer Druck $p_{out,met} = 101 \text{ kPa}$
		Meereshöhe $H_2 = 0 \text{ m}$

Tabelle 8.4: Parameter des gekrümmten Isolierglases mit Einspannung

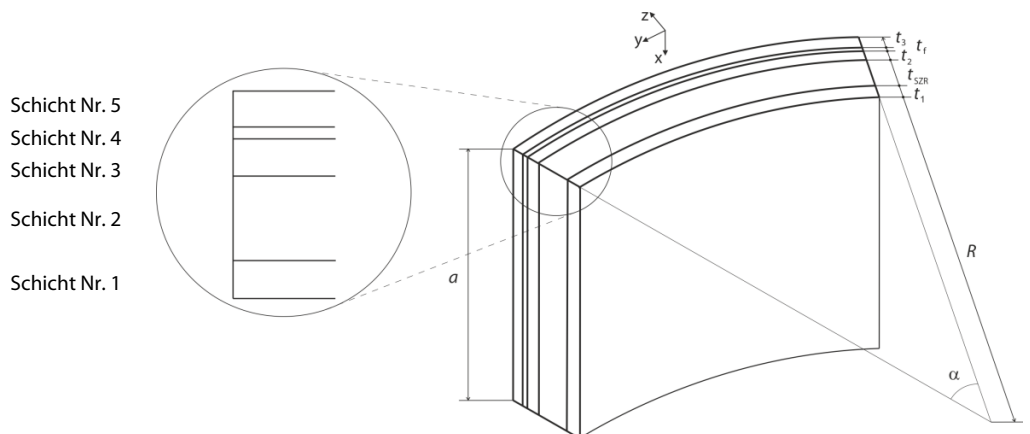


Bild 8.27: Gekrümmtes Glas

Die Länge der finiten Elemente beträgt 50 mm.

8.4.1 Berechnung in RF-GLAS

Zunächst legen wir in RFEM ein *Neues Modell* an.

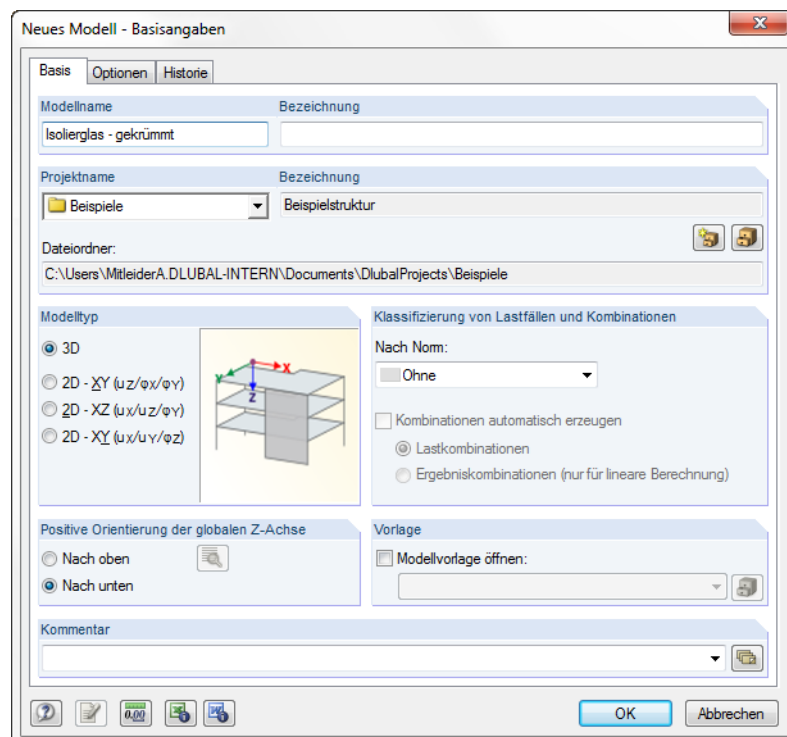


Bild 8.28: Dialog *Neues Modell - Basisangaben*



Nach Eingabe der Basisangaben definieren wir einen *Bogen* mittels *Mittel-, Randknoten* und *Öffnungswinkel*. Der Abstand zwischen Mittel- und Randknoten beträgt 3 m, der Winkel 30°.



Danach öffnen wir den Dialog *Linie extrudieren in Fläche*. Die Höhe definieren wir $h = 1\text{ m}$ und den Versatz mit $e = 0\text{ m}$. Danach überprüfen wir, ob das Flächennachsensystem wie im folgenden Bild gezeigt ausgerichtet ist. Ist dies nicht der Fall, so kehren wir es um oder drehen es.

Da die Berechnung in RF-GLAS erfolgen soll und die Lager direkt im Modul definiert werden können, brauchen wir in RFEM keine Lager anordnen.

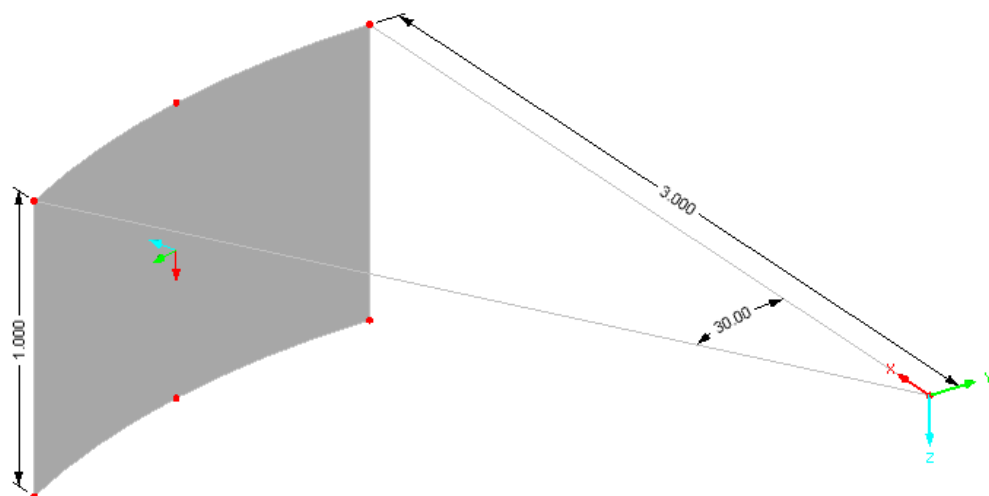


Bild 8.29: Bogen definieren und Linie in Fläche extrudieren



Obwohl im Modell keine äußere Last vorliegt, muss ein Lastfall erzeugt werden, um die Berechnung in RF-GLAS starten zu können. Das Eigengewicht soll **nicht Aktiv** sein.

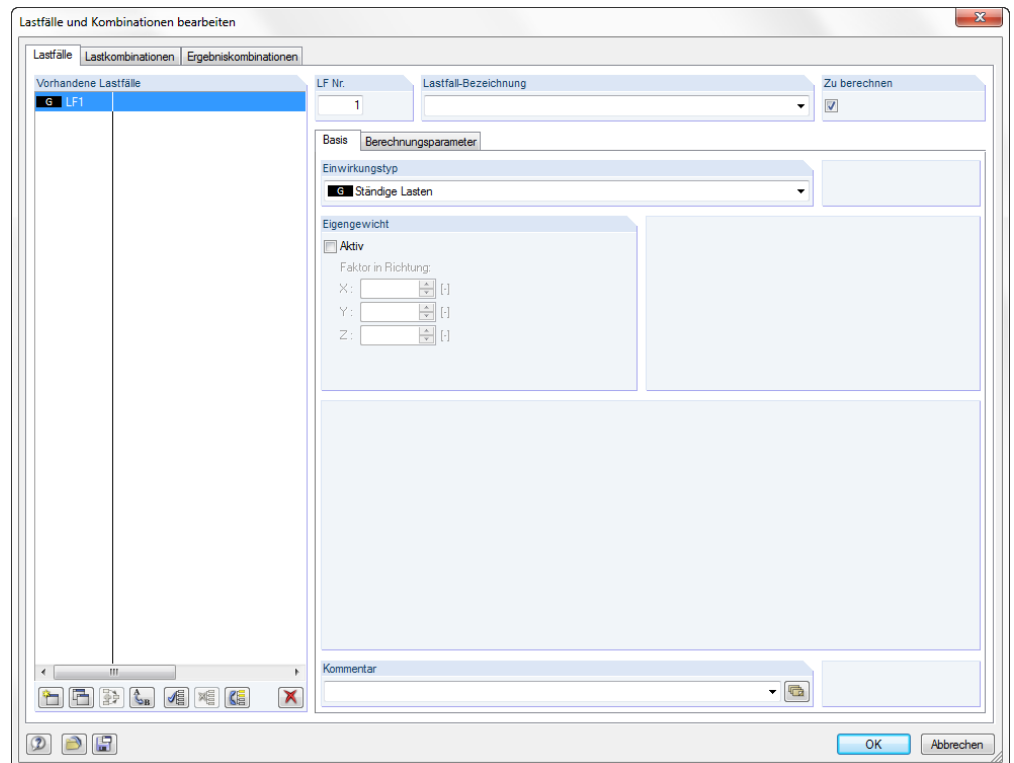


Bild 8.30: Dialog Lastfälle und Kombinatorik bearbeiten

Im Dialog *FE-Netz-Einstellungen* geben wir **0,05 m** als angestrebte Länge der finiten Elemente vor.

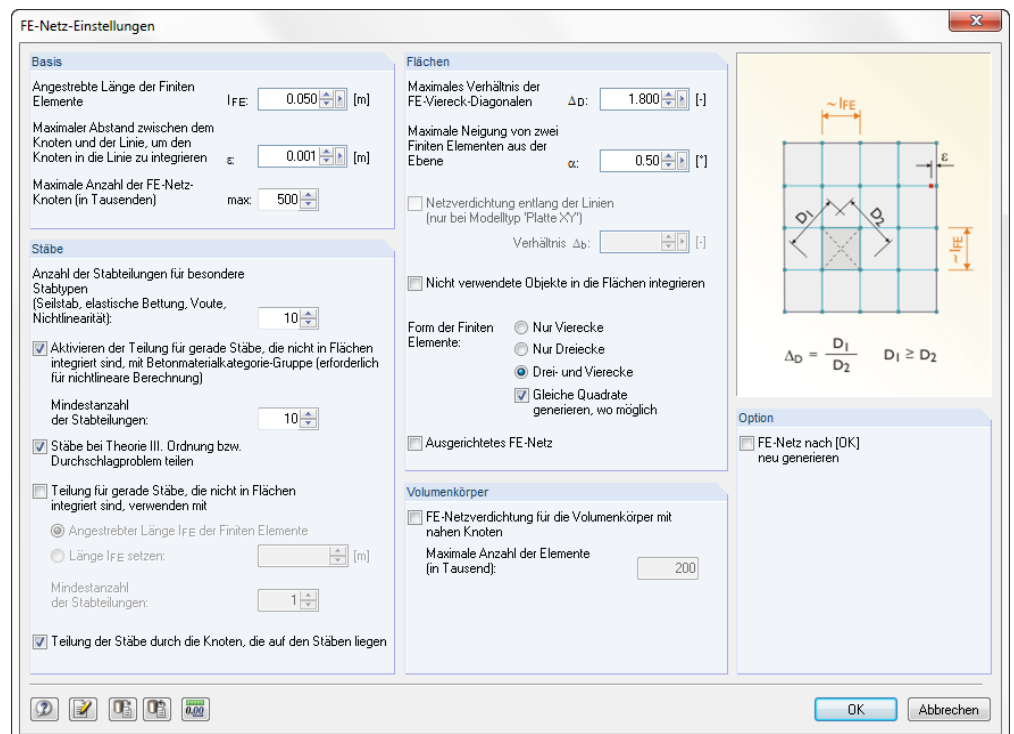


Bild 8.31: Dialog FE-Netz Einstellungen

Nun rufen wir das Modul RF-GLAS auf.

In Maske 1.1 *Basisangaben* kann kein Lastfall ausgewählt werden, da der LF1 keine Lastdaten enthält. Dies wird durch ein Sternchen (*) angezeigt (siehe Kapitel 3.1.1).

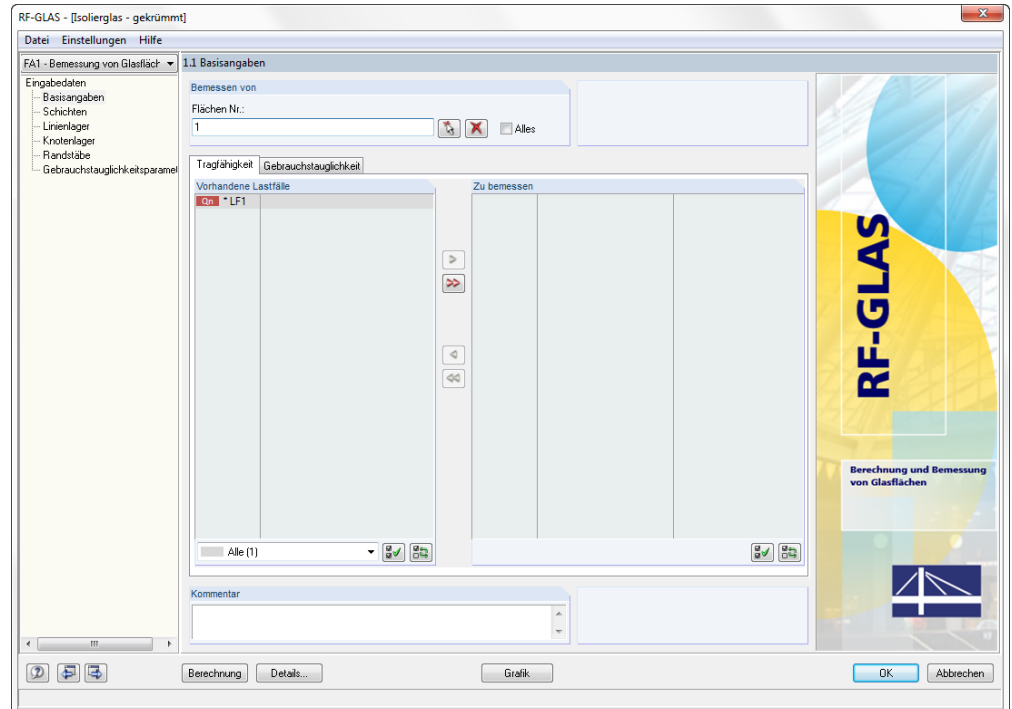


Bild 8.32: Maske 1.1 *Basisangaben*

Daher wechseln wir in Maske 1.2 *Schichten*, um ein Isolierglas mit Gasschicht zu definieren. Danach ist es möglich, in Maske 1.1 einen Lastfall auszuwählen.

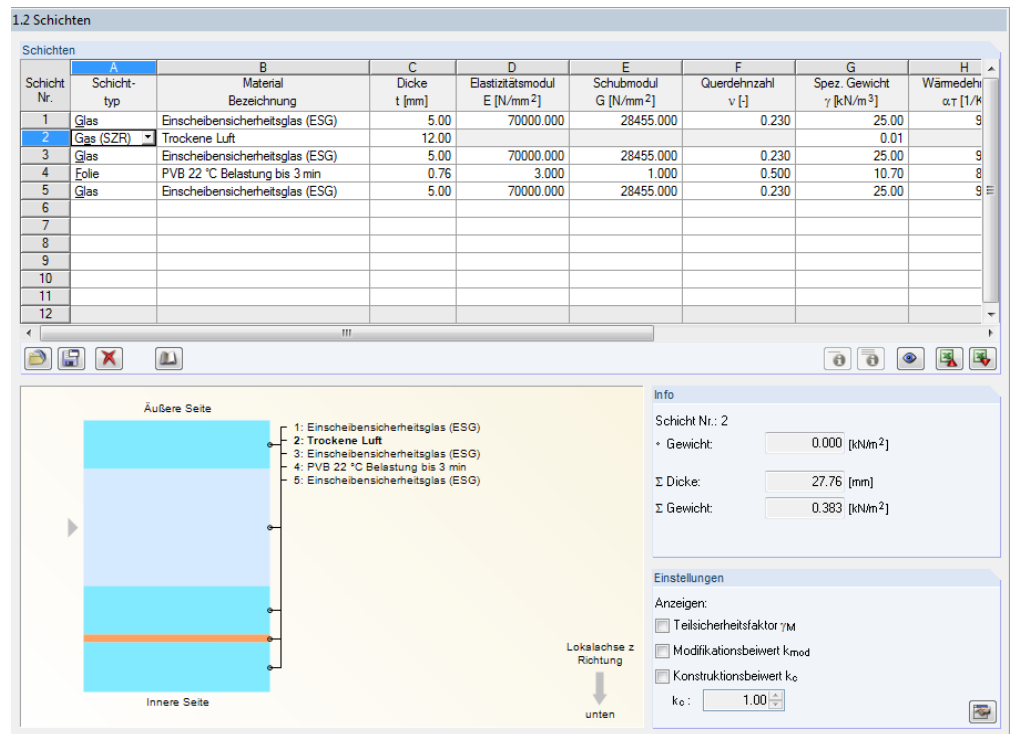


Bild 8.33: Maske 1.2 *Schichten*

Da vorerst nur die Verformung des Modells von Interesse ist, wählen wir den LF1 nur im Register *Gebrauchstauglichkeit* der Maske 1.1 *Basisangaben* aus.

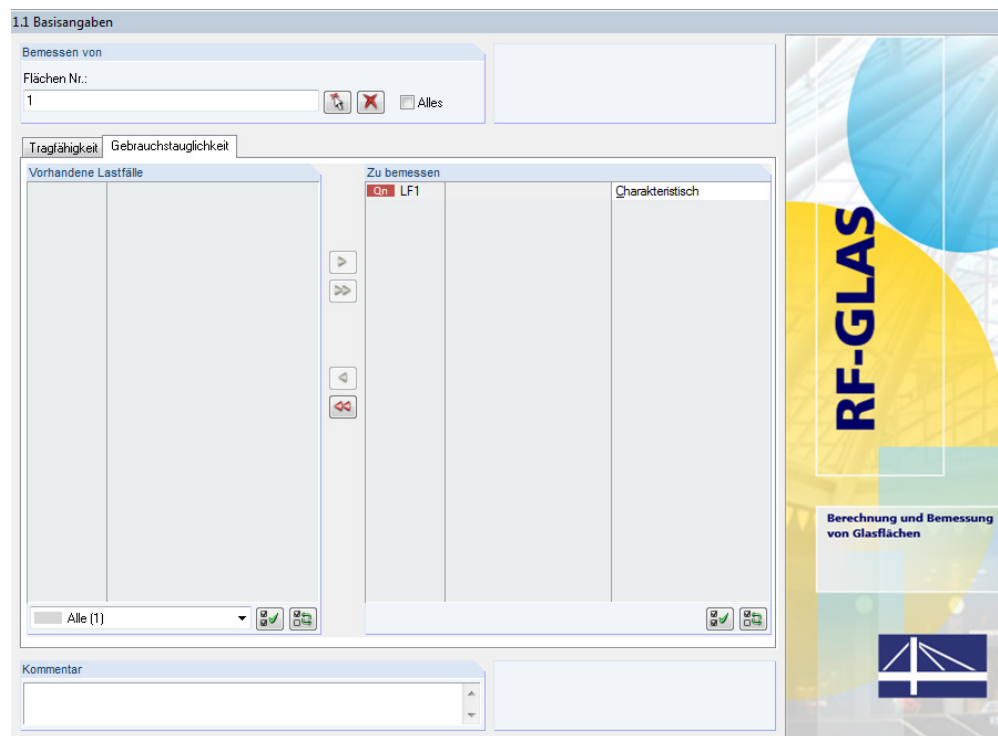


Bild 8.34: Maske 1.1 *Basisangabe*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Dann legen wir in Maske 1.3 *Linienlager* für die Linien 1 bis 4 den Lagertyp *Eingespannt* fest.

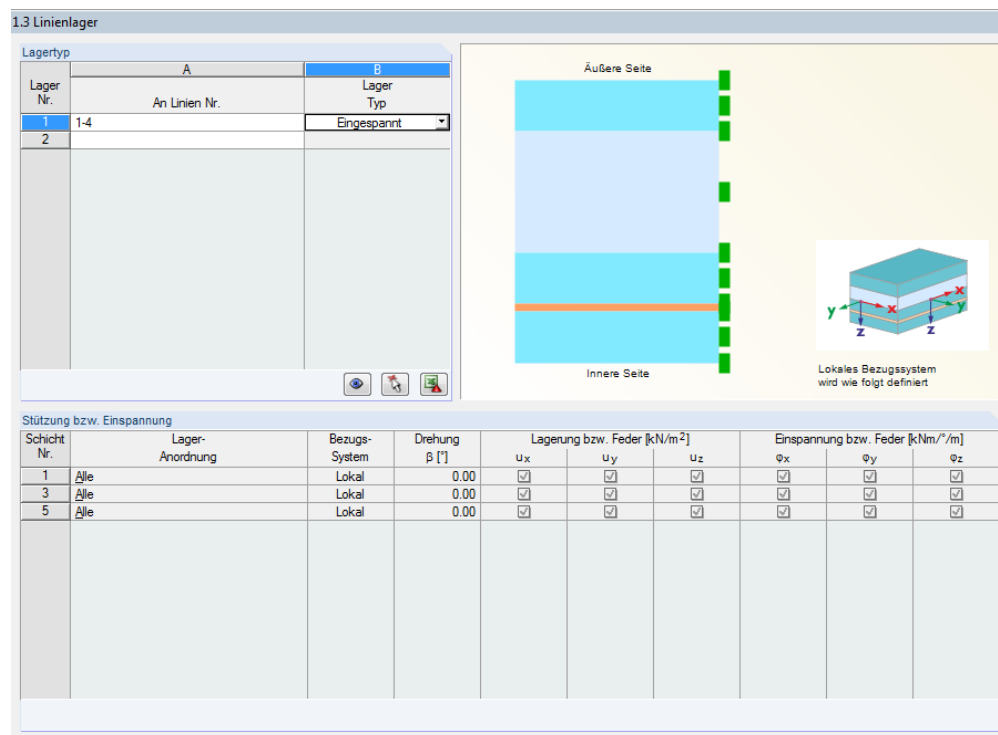


Bild 8.35: Maske 1.3 *Linienlager*

Die Masken 1.4 *Knotenlager* und 1.5 *Randstäbe* lassen wir leer.

Wir setzen die Eingabe in Maske 1.6 *Klimalasten-Parameter für Isolierglas* fort und nehmen folgende Einträge vor:

1.6 Klimalasten-Parameter für Isolierglas

Klimalasten-Parameter - Sommer

☒ Verwenden

Temperatur: Herstellung: 0.0 [°C] Temperatur: Außen: 25.0 [°C] Nutzung: 25.0 [°C] Differenz: 25.0 [°C] LF-Faktor: 1.00

Gas: 25.0 [°C] Innen: 25.0 [°C] Differenz: 25.0 [°C]

Atmosph. Druck: Herstellung: 0.101 [N/mm²] Atmosph. Druck: 0.101 [N/mm²] Differenz: 0.000 [N/mm²]

Höhenlage: 0.0 [m] Höhenlage: 0.0 [m] Differenz: 0.0 [m]

Klimalasten-Parameter - Winter

☐ Verwenden

Temperatur: Herstellung: [°C] Temperatur: Außen: [°C] Nutzung: [°C] Differenz: [°C] LF-Faktor: [°C]

Gas: [°C] Innen: [°C] Differenz: [°C]

Atmosph. Druck: Herstellung: [N/mm²] Atmosph. Druck: [N/mm²] Differenz: [N/mm²]

Höhenlage: [m] Höhenlage: [m] Differenz: [m]

Lastverteilung

Nr.	Bezeichnung	Lastanteil [%] an der Glasseite	
		Außen	Innen
LF1		100.0	0.0

Einstellungen

☐ Berechnung nach TRLV, Anhang A
Hillmodell als allseitig gelagerte rechteckige Scheibe

Bild 8.36: Maske 1.6 *Klimalast-Parameter für Isolierglas*

In Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeitsparameter* fügen wir die Fläche Nr. 1 zur *Liste der Flächen* hinzu. Da das Kontrollfeld *Manuell* nicht angehakt ist, wird die *Bezugslänge L* automatisch vervollständigt.

1.8 Gebrauchstauglichkeitsparameter

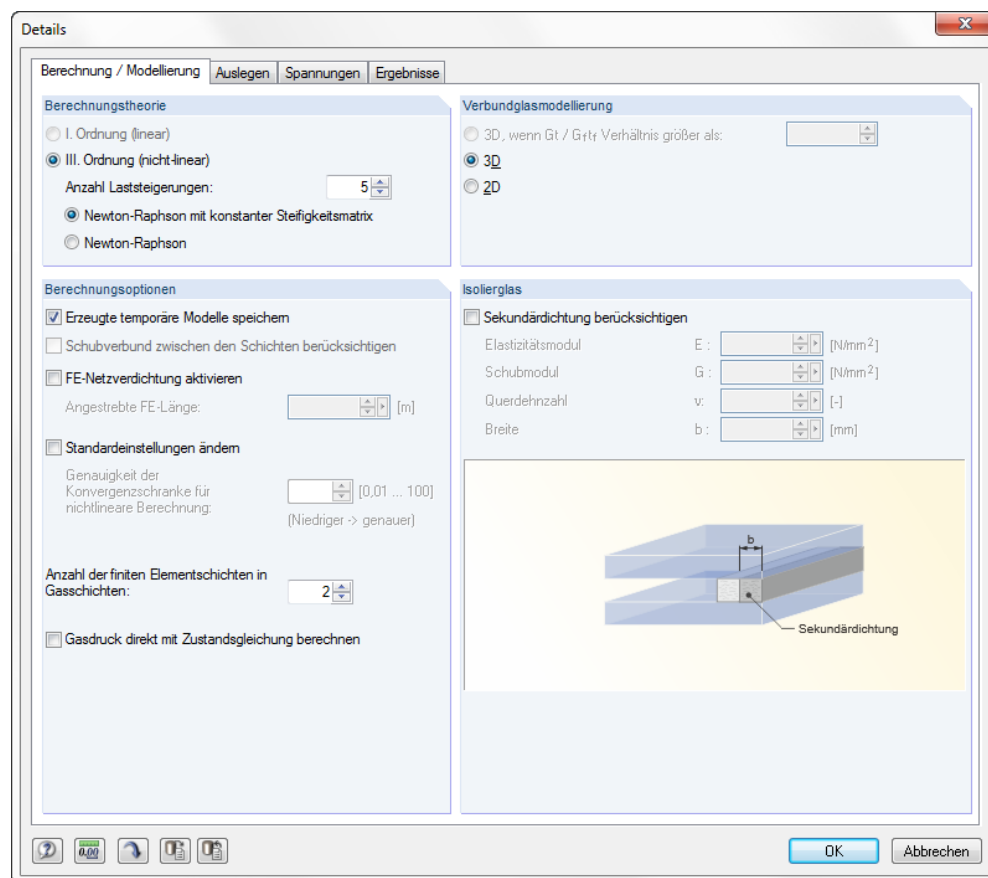
Zuordnung der Bezugslängen zu den Flächen

Nr.	Liste der Flächen	Bezugslänge		Kragfläche	Kommentar
		Manuell	L [m]		
1	1	<input type="checkbox"/>	1.571	<input type="checkbox"/>	
2					

Bild 8.37: Maske 1.8 *Gebrauchstauglichkeitsparameter*

Details...

Abschließend überprüfen wir noch die Einstellungen im Dialog *Details*.

Bild 8.38: Dialog *Details*, Register *Berechnung / Modellierung*

Berechnung

Wir starten die [Berechnung]. Da ein Isolierglas vorliegt, erfolgt die Berechnung in 3D, bei der die einzelnen Schichten als Volumenkörper analysiert werden.

In Maske 3.1 *Max. Verschiebungen* werden die Verschiebungen der Glasscheiben ausgegeben.

3.1 Max Verschiebungen

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B X	C Punkt-Koordinaten [m] Y	D Z	E Lastfall	F Bemessungs- komb.	G Paket Nr.	H Verschiebungen [mm] u _z	I Grenz u _z	J Ausnutzung u _z [%]	
1	421	1.148	2.772	0.600	LF1, Sommer	CH	1	-0.265	5.236	0.05	
	454	1.148	2.772	0.650			2	0.123	5.236	0.02	
Maximale Verschiebung / Maximale Ausnutzung											
1	421	1.148	2.772	0.600	LF1, Sommer	CH	1	-0.265	5.236	0.05	
	421	1.148	2.772	0.600			1	-0.265	5.236	0.05	

Bild 8.39: Maske 3.1 *Max. Verschiebungen*

Details...

8.4.2 Kontrolle der Berechnung

Wir überprüfen dieses Beispiel mit RFEM. Da die Berechnung des Isolierglases in 3D erfolgt, müssen wir das RFEM-Modell mit den Anpassungen in RF-GLAS abgleichen. Hierzu wurde im Dialog *Details* das Kontrollfeld *Erzeugte temporäre Modelle speichern* angehakt (siehe Bild 8.18).

Wir öffnen dieses generierte Modell mit RFEM (es befindet sich im selben Projektordner wie die Originaldatei). In diesem Modell löschen wir das Gasvolumen. Dann weisen wir den Scheiben-Volumenkörpern eine Flächenlast p zu. Sie kann wie folgt aus der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase bestimmt werden:

$$\frac{pV}{T} = \text{konst.} \quad (8.11)$$

$$\frac{p_p V_{01}}{T_p} = \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_1 [V_{01} + C_v (p_1 - p_{\text{out}})]}{T_1} \quad (8.12)$$

mit C_v : Nachgiebigkeit der Glasplatten, definiert als

$$C_v(p) = \frac{V(p)}{p} \text{ m}^3/\text{Pa} \quad (8.13)$$

mit $V(p)$: Volumen zwischen unverformter und verformter Position der Glasschicht infolge des Drucks p . Der Wert der Nachgiebigkeit ist vom momentanen Druckwert abhängig.

Das Anfangsgasvolumen bei diesem Beispiel beträgt:

$$V_{01} = a \cdot b \cdot t_2 = 1.0 \cdot 1.5 \cdot 0.012 = 189.153 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Der Außengasdruck während der Nutzung wird wie folgt berechnet:

$$p_{\text{out}} = p_{\text{out,met}} - c_2 \cdot H_2 = p_{p,\text{met}} + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot H_2 = p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \Delta H \quad (8.14)$$

Durch Substitution erhalten wir:

$$\frac{p_p V_{01} T_1}{T_p} = p_1 [V_{01} + C_v (p_1 - p_p - \Delta p_{\text{met}} + c_2 \Delta H)]$$

$$C_v p_1^2 + [V_{01} - C_v (p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \Delta H)] p_1 - \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p} = 0$$

Der innere Gasdruck während der Nutzung ist dann

$$p_1 = \frac{C_v (p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{[V_{01} - C_v (p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H)]^2 + 4 C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2 C_v}$$

$$p_p = p_{p,\text{met}} - c_2 \cdot H_1 = 101000 - 12 \cdot 0 = 101000 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{\text{met}} = p_{\text{out,met}} - p_{p,\text{met}} = 101000 - 101000 = 0 \text{ Pa}$$

$$p_{\text{out}} = p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H = 101000 - 0 - 12 \cdot (100 - 0) = 101000 \text{ Pa}$$

Der Faktor C_v hängt von Lagertyp, Abmessungen und Steifigkeit der Glasscheiben ab. Er wird nach folgender Formel berechnet:

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} \quad (8.15)$$

$$C_{v1}(p) = \frac{V_1}{p} = \frac{1}{p} \int_0^a \int_0^b w_1(x, y) dx dy \quad (8.16)$$

$$C_{v2}(p) = \frac{V_2}{p} = \frac{1}{p} \int_0^a \int_0^b w_2(x, y) dx dy \quad (8.17)$$

mit C_{v1} : Nachgiebigkeit von Schicht 1

C_{v2} : Nachgiebigkeit von Schicht 3

Da dieser Faktor vom Druck $p = p_1 - p_{out}$ abhängt, erfolgt die Berechnung iterativ.

1. Iterationsschritt

Bei $p_1 = 106000$ Pa erhalten wir

$$p = p_1 - p_{out} = 106000 - 10100 = 5000 \text{ Pa}$$

RFEM ermittelt bei nicht-linearer Analyse mit einer FE-Länge von 50 mm und einer Belastung von $p = 5000$ Pa maximale Durchbiegungen von

$$w_1 = -0.178 \text{ mm und } w_2 = 0.084 \text{ mm.}$$

Mithilfe des Moduls RF-IMP erhalten wir die Verformungen der einzelnen Punkte im Modell. Dann kann das Volumen zwischen der verformten Fläche und der Fläche vor der Verformung, d. h. $V_1 = 14.997 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ und $V_2 = 7.478 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$, berechnet werden.

$$C_{v1}(p) = \frac{V_1}{p} = \frac{14.997 \cdot 10^{-5}}{5000} = 2.999 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$C_{v2}(p) = \frac{V_2}{p} = \frac{7.478 \cdot 10^{-5}}{5000} = 1.496 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 2.999 \cdot 10^{-8} + 1.496 \cdot 10^{-8} = 4.495 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = \frac{C_v(p_p + \Delta p_{met} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{met} - c_2 \cdot \Delta H)]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2C_v}$$

Es wird nun die Wurzel aus der vorherigen Formel neu berechnet:

$$\begin{aligned} & \sqrt{[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{met} - c_2 \cdot \Delta H)]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}} = \\ & = \sqrt{[189.153 \cdot 10^{-4} - 4.495 \cdot 10^{-8} \cdot 101000]^2 + 4 \cdot 4.495 \cdot 10^{-8} \frac{101000 \cdot 189.153 \cdot 10^{-4} \cdot 298.15}{273.15}} = \\ & = 0.02412 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Der Gasdruck ergibt sich dann zu:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{C_v(p_p + \Delta p_{met} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{met} - c_2 \cdot \Delta H)]^2 + 4C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2C_v} = \\ &= \frac{4.495 \cdot 10^{-8} \cdot 101000 - 189.153 \cdot 10^{-4} + 0.02412}{2 \cdot 4.495 \cdot 10^{-8}} = 108351 \text{ Pa} \end{aligned}$$

2. Iterationsschritt

Bei $p_1 = 108351 \text{ Pa}$, erhalten wir

$$p = p_1 - p_{\text{außen}} = 108351 - 101000 = 7351 \text{ Pa}$$

RFEM ermittelt mit dieser Belastung von $p = 7351 \text{ Pa}$ maximale Durchbiegungen von

$$w_1 = -0.265 \text{ mm} \text{ und } w_2 = 0.123 \text{ mm}.$$

Die Verformungen der Punkte werden wieder mit RF-IMP ermittelt. Danach lassen sich mit $V_1 = 2.212 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ und $V_2 = 1.099 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ die Volumen der Verformungen bestimmen.

$$C_{v1}(p) = \frac{V_1}{p} = \frac{2.212 \cdot 10^{-4}}{7351} = 3.008 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$C_{v2}(p) = \frac{V_2}{p} = \frac{1.099 \cdot 10^{-4}}{7351} = 1.494 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 3.008 \cdot 10^{-8} + 1.494 \cdot 10^{-8} = 4.503 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = \frac{C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) - V_{01} + \sqrt{\left[V_{01} - C_v(p_p + \Delta p_{\text{met}} - c_2 \cdot \Delta H) \right]^2 + 4 C_v \frac{p_p V_{01} T_1}{T_p}}}{2 C_v} = 108349 \text{ Pa}$$

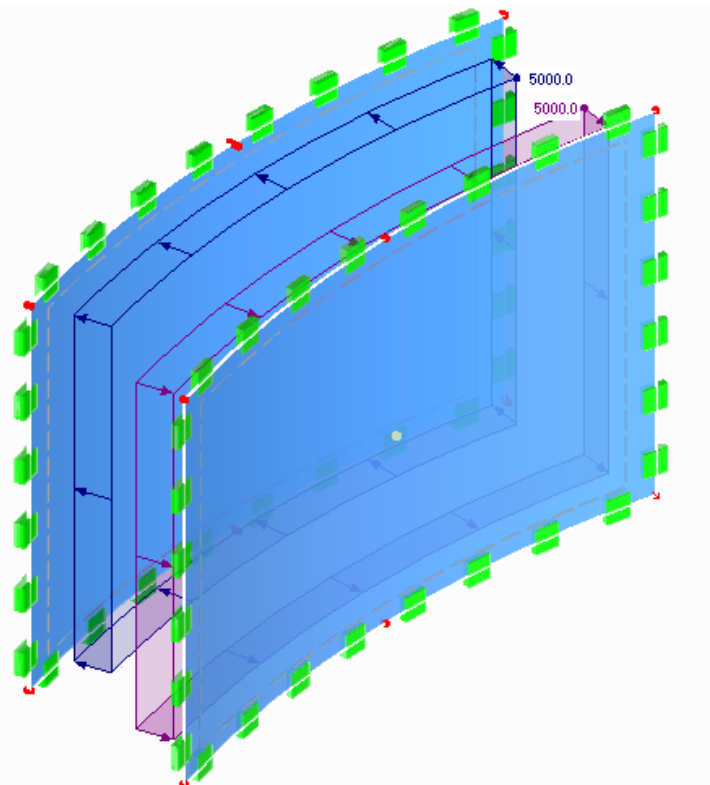


Bild 8.40: RFEM-Modell

3. Iterationsschritt

Der Ablauf der weiteren Schritte ist identisch. Es werden nur die wichtigsten Werte angegeben.

$$p = p_1 - p_{out} = 108349 - 101000 = 7349 \text{ Pa}$$

$$w_1 = -0.265 \text{ mm}, w_2 = 0.123 \text{ mm}$$

$$V_1 = 2.210 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3, V_2 = 1.098 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} = 3.008 \cdot 10^{-8} + 1.494 \cdot 10^{-8} = 4.502 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa}$$

$$p_1 = 108349 \text{ Pa}$$

Da die Ergebnisse beim zweiten und dritten Iterationsschritt identisch sind, wird der Iterationsprozess abgebrochen. Als maximale Durchbiegungen ergeben sich somit

$$w_1 = -0.265 \text{ mm}, w_2 = 0.123 \text{ mm}.$$

Die RF-GLAS-Ergebniswerte betragen $w_1 = -0.265 \text{ mm}$ und $w_2 = 0.123 \text{ mm}$, sodass die Ergebnisse bestätigt sind.

A Literatur

- [1] TRLV. *Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen*. August 2006. 9 S.
- [2] WELLER, Bernhard, et al. *Glasbau-Praxis : Konstruktion und Bemessung*. Berlin : Bauwerk, 2009. 263 S. ISBN 978-3-89932-190-6.
- [3] WELLER, Bernhard, et al. *Glasbau-Praxis in Beispielen : Konstruktion und Berechnung*. Berlin : Bauwerk, 2005. 150 S. ISBN 3-934369-47-2.
- [4] DIN 18008-1. *Glas im Bauwesen — Bemessungs- und Konstruktionsregeln — Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen*. Dezember 2010. 14 S.
- [5] DIN 18008-2. *Glas im Bauwesen — Bemessungs- und Konstruktionsregeln — Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen*. Dezember 2010. 13 S.
- [6] OFNER, Robert. *Leichtbau und Glasbau: Bemessung von Glaskonstruktionen*, Vorlesungsskript. Technische Universität Graz, Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, Wintersemester 2003/2004.
- [7] David R. LIDE, ed. *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 89th Edition (Internetversion 2009)*, CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL.

B Index

A

Atmosphärischer Druck	29
Ausdruckprotokoll	48, 54, 55, 56
Ausnutzung	48, 51
Außergewöhnlich	18

B

Bach	39
Basisangaben	16
Beenden von RF-GLAS	16, 46
Bemessen	16
Bemessungssituation	18, 44, 51
Benutzerprofil	57
Berechnung	16, 33
Berechnung nach TRLV, Anhang A	77
Berechnung starten	45
Berechnungstheorie	41
Bezugslänge	32, 51
Blättern in Masken	16, 46

C

Charakteristisch	18, 51
------------------------	--------

D

Details	16, 34
Dezimalstellen	57
Diagramm	48, 56
DIN 18008-2, Anhang A	30
Durchbiegung	18, 44, 51

E

Einheiten	57
Einwirkungskombination	44
Ergebniskombination	17
Ergebnisse	40, 46
Ergebnistabellen	40
Excel	58
Export der Ergebnisse	58
Exportieren	21, 25

F

FE-Netz	42
FE-Netz-Knoten	50
FE-Netz-Punkt	40, 47
Filter	19, 50
Folie	9, 19, 20, 42

Formelzeichen	8
---------------------	---

G

Gas	19, 20, 29
Gasdruck	52
Gebrauchstauglichkeit	18, 44
Gebrauchstauglichkeitsparameter	32
Gewicht	21, 53
Glas	19, 20
Grafik	16, 21, 25
Grafikausdruck	54
Grenzspannung	48
Grenzwerte	18
Grundspannungen	35

H

Häufig	18, 51
Herstellung	29
Höhenlage	29
Horizontalverglasung	20

I

Importieren	21
Installation	6
Isolierglas	20, 29, 43, 65
Isolierverglasung	10

K

Kirchhoff	41
Klimalasten	29
Knotenlager	25
Kommentar	16
Konstruktionsbeiwert	44
Koordinaten	47

L

Lagertyp	22, 25
Lasteinwirkungsdauer	31
Lastfall	16, 17, 18, 31
Lastverteilung	30
Linienlager	22, 69, 84

M

Masken	16
Materialbibliothek	19, 21
Max. Spannungen belastungsweise	47
Max. Spannungen flächenweise	49

Mindlin.....	41	Sekundärdichtung.....	10
MISES, von.....	39	Sichtmodus.....	21, 46
Modifikationsbeiwert.....	31, 44, 48	Sommer.....	29
N		Spannungen.....	35, 48
Navigator.....	16, 46	Spannungen punktweise.....	50
NEWTON-RAPHSON.....	41	Spannungsverlauf.....	56
Norm.....	44	Ständige und vorübergehende.....	18
Normalspannung.....	36	Starten von RF-GLAS.....	6
Nutzung.....	29	Steifigkeitsmatrix.....	12
P		Steifigkeitsmatrixelemente.....	60
Panel.....	7	Stückliste.....	52
Platten-Biegetheorie.....	41	T	
Q		Teilsicherheitsbeiwert.....	18, 44
Quasi-ständig.....	18, 51	Temperatur.....	29
Querschubspannung.....	37	Temporäre Modelle speichern.....	42
R		Tragfähigkeit.....	17
Randstäbe.....	28	TRESCA.....	39
RANKINE.....	39	TRLV, Anhang A.....	20, 30
Rasterpunkt.....	40, 47, 50	V	
Relationsbalken.....	46	Verbundglas.....	9, 42
RFEM.....	59	Vergleichsspannung.....	39
S		Verschiebungen.....	51
Schichten.....	19, 37, 41, 47, 59	Vertikalverglasung.....	20
Schubspannung.....	36, 42	Volumen.....	53
Schubverbund zwischen Schichten.....	9, 12, 14, 42	W	
		Winter.....	29