

1 Plattenberechnung im Zustand 2

1.1 DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Durchbiegungen Zustand 2

Bei der Durchbiegungsberechnung wird nachgewiesen, dass eine zur Lastkombination zugehörige Durchbiegung einen definierten Wert nicht überschreitet. DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4.3, ermöglicht es, die Begrenzung der Verformungen durch eine direkte Berechnung mit nichtlinearen Stoffgesetzen für Beton und Stahl nachzuweisen.

In *44*-ALFA wird dazu iterativ ein Verformungszustand gesucht, der unter Einhaltung der vorgegebenen Stoffgesetze im Gleichgewicht mit der Lastkombination steht.

1.2 Grundlagen der Berechnung

Realistische Verformungsberechnungen von Stahlbetonbauteilen sind nur unter Berücksichtigung des Reißens des Betons (Zustand 2) und des Fließens der Bewehrung möglich. Durch die zeitabhängigen Einflüsse infolge Kriechen und Schwinden des Betons werden die Durchbiegungen zusätzlich spürbar erhöht.

Die Durchbiegungen von Stahlbetonplatten können unter Berücksichtigung dieser Einflüsse ein Vielfaches der Werte der nach Elastizitätstheorie berechneten Platte erreichen.

Die wirklichkeitsnahe Berücksichtigung dieser Einflüsse macht die Anwendung aufwendiger nichtlinearer Berechnungen notwendig.

Voraussetzung einer Verformungsberechnung nach Zustand 2 ist die genaue Kenntnis der zugrunde liegenden Bewehrung. Deshalb erfolgt dieser Berechnungsschritt erst nach den Standardstahlbetonnachweisen und einer Vorgabe der schlussendlich gewählten Bewehrung.

Die erforderliche Bewehrung des Tragfähigkeitsnachweises und die Zusatzbewehrung aus den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen, wie z.B. Rissnachweis oder Ermüdungs- bzw. Spannungsnachweis, werden in *44*-ALFA standardmäßig bei der Grundbewehrung des Durchbiegungsnachweises nach Zustand 2 berücksichtigt.

Für die vorgegebenen Lastkombinationen (Lastkollektive, Generierungsvorschriften) werden iterativ die Verformungen und Verzerrungen ermittelt, die mit den Beanspruchungen im Gleichgewicht stehen. Aus den so errechneten Durchbiegungen können bei Vorgabe einer zulässigen Durchbiegung (s. positionsbezogene Bemessungsoptionen S. 4) Durchbiegungsausnutzungen bestimmt werden.

Die hierbei verwendeten Stoffgesetze für Beton und Stahl haben folgende Eigenschaften

- die Querschnitte bleiben bei der Verformung eben, auch wenn der Querschnitt infolge Überschreitens der Betonzugfestigkeit gerissen ist
- zwischen Beton und Bewehrung herrscht vollkommener Verbund. Damit weisen die Querschnittsfasern von Stahl und Beton, die im gleichen Abstand von der Dehnungs-Nulllinie liegen, die gleiche Dehnung auf.
- zur Berechnung der Betonspannungen bzw. Betonschnittgrößen werden Elemente aus mehreren Schichten verwendet (s. Theoretische Grundlagen), in denen die Spannungen nach der Scheibentheorie mit einem zweiachsigen inkrementellen orthotropen Stoffgesetz ermittelt werden. Die Festigkeitssteigerung durch mehraxialen Druck wird nicht berücksichtigt.
- der gerissene Beton wird als Kontinuum mit vielen sehr kleinen Rissen betrachtet (Smeared Crack Approach)
- die Zugfestigkeit des Betons kann optional berücksichtigt werden. Kriechen und Schwinden werden bei Bedarf auch auf der Zugseite angesetzt.
- die Berücksichtigung des Betonkriechens bei der nichtlinearen Systemanalyse erfolgt vereinfachend durch Modifikation der zugrunde liegenden Spannungsdehnungslinie des Betons. Diese wird in Dehnungsrichtung mit dem Faktor $(1+\phi)$ skaliert. Auch die zugehörige Grenzdehnung wird mit $(1+\phi)$ multipliziert.
- der vorhandene Betonstahl wird als verschmiertes Bewehrungsnetz modelliert. Dabei wird der errechnete Dehnungszustand in die Bewehrungsrichtungen (1, 2) der jeweiligen Betonstahllage transformiert. Für die Spannungsermittlung wird die gewählte Spannungsdehnungslinie des Stahls verwendet.
- nach jedem Iterationsschritt der Gleichgewichtsiteration wird eine Kontrolle der jeweils zulässigen Grenzdehnungen für Beton und Betonstahl durchgeführt. Falls die Dehnungsausnutzung eine gewisse Größe überschreitet, wird die Iteration mit einer entsprechenden Meldung abgebrochen. Die Größe kann vom Anwender vorgeben werden.

- es werden nur die Flächenpositionen nach Zustand 2 berechnet. Unter- bzw. Überzüge können in Plattentragwerken wegen ihrer speziellen Geometrie nur im Zustand 1 berücksichtigt werden.

1.3

Theoretische Grundlagen

Zur Berechnung der Betonspannungen bzw. Betonschnittgrößen werden die Flächenelemente in mehrere Schichten aufgeteilt.

In den Schichten werden die Spannungen nach der Scheibentheorie mit einem zweiachsigen inkrementellen orthotropen Stoffgesetz ermittelt (s. /3/ Abs. 1.9, S. 13).

Der inkrementelle Dehnungszustand ($\Delta\epsilon_{xx}$, $\Delta\epsilon_{yy}$, $\Delta\epsilon_{xy}$) der einzelnen Schicht wird dazu zunächst in die Dehnung der Hauptrichtung ($\Delta\epsilon_{11}$, $\Delta\epsilon_{22}$, $\Delta\epsilon_{12} = 0.0$) transformiert.

Mit den tangentialen Steifigkeiten E_1 , E_2 der Hauptrichtungen und den zugehörigen Querkontraktionen ν_{12} , ν_{21} (mit $\nu_{12} \cdot E_1 = \nu_{21} \cdot E_2$ und $\nu_{12} \cdot \nu_{21} = \nu \cdot \nu$) ergibt sich dann das inkrementelle orthotrope Stoffgesetz, wobei sich der Wert von G aus der Forderung nach Richtungsunabhängigkeit ergibt.

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\tau_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \begin{bmatrix} E_1 & \nu_{12} \cdot E_1 & 0 \\ \nu_{21} \cdot E_2 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon_{11} \\ \Delta\epsilon_{22} \\ \Delta\epsilon_{12} \end{bmatrix}$$

... mit ... $G = 0.25 \cdot (E_1 + E_2 - 2 \cdot \nu \cdot \sqrt{E_1 \cdot E_2})$

Die fiktive Größe der äquivalenten einachsigen Dehnungen ϵ_{c1} , ϵ_{c2} wird als diejenige Dehnung eingeführt, die bei gegebenen Spannungen σ_{c1} , σ_{c2} in den Hauptrichtungen vorhanden wäre, wenn die Spannung in der orthogonalen Richtung Null ist.

Dadurch können die einachsigen Betonspannungsdehnungslinien (s. Abs. ???, S. ???) für den zweiachsigen Fall angewendet werden.

Das Stoffgesetz kann mit Hilfe inkrementeller äquivalenter einachsiger Dehnungen $\Delta\epsilon_{c1}$, $\Delta\epsilon_{c2}$ in entkoppelter Form geschrieben werden

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{bmatrix} \frac{1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \begin{bmatrix} 1 & \nu_{12} \\ \nu_{21} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon_{c1} \\ \Delta\epsilon_{c2} \end{bmatrix} \quad \dots \text{mit} \dots$$

$$\Delta\epsilon_{c1} = E_1 \cdot \Delta\epsilon_{c1} \quad \dots \text{mit} \dots \quad \Delta\epsilon_{c1} = 1 / (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}) \cdot (\Delta\epsilon_{11} + \nu_{12} \cdot \Delta\epsilon_{22})$$

$$\Delta\epsilon_{c2} = E_2 \cdot \Delta\epsilon_{c2} \quad \dots \text{mit} \dots \quad \Delta\epsilon_{c2} = 1 / (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}) \cdot (\nu_{21} \cdot \Delta\epsilon_{11} + \Delta\epsilon_{22})$$

Durch Integration der inkrementellen äquivalenten einachsigen Dehnungen zu den äquivalenten einachsigen Dehnungen ϵ_{c1} , ϵ_{c2} lassen sich die Betonspannungen σ_{c1} , σ_{c2} und die tangentialen Steifigkeiten E_1 , E_2 aus dem gewählten einachsigen Stoffgesetz berechnen

$$\Delta\epsilon_{c1} = \int d\epsilon_{c1} \approx \sum \Delta\epsilon_{c1} = \sum \Delta\sigma_{11} / E_1$$

$$\Delta\epsilon_{c2} = \int d\epsilon_{c2} \approx \sum \Delta\epsilon_{c2} = \sum \Delta\sigma_{22} / E_2$$

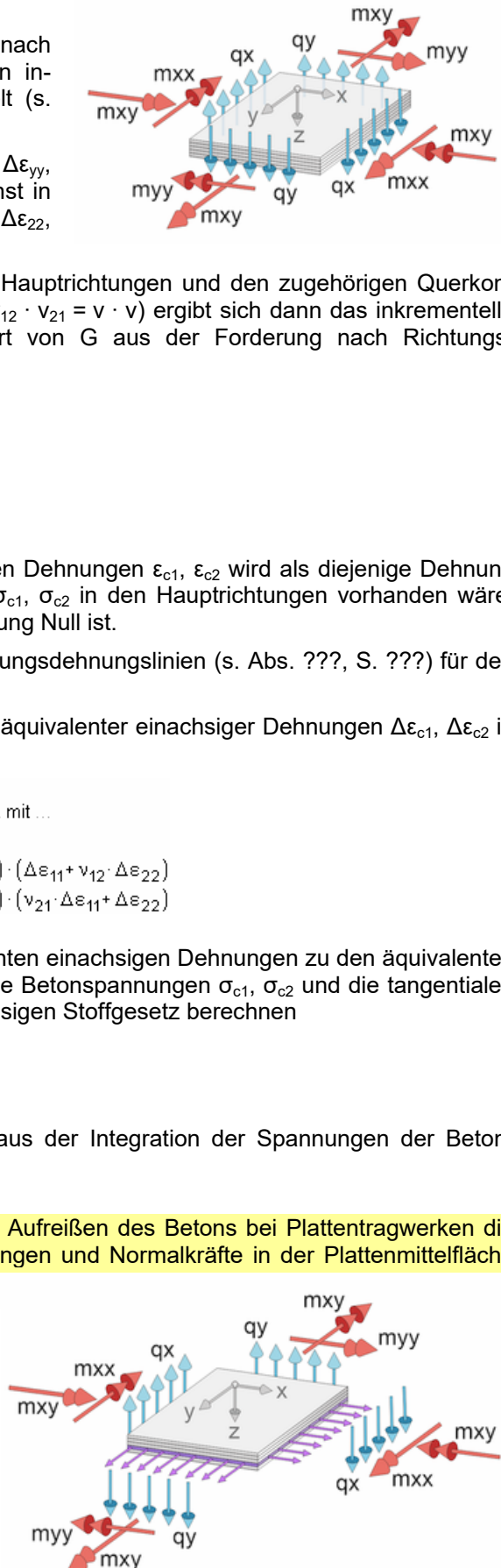
Die Betonschnittgrößen ergeben sich dann aus der Integration der Spannungen der Betonschichten über die Flächenhöhe.



Es ist zu beachten, dass sich z.B. durch das Aufreißen des Betons bei Plattentragwerken die Dehnungsnulllinie verschiebt, so dass Dehnungen und Normalkräfte in der Plattenmittelfläche zu erwarten sind!

Die Bewehrung wird als verschmierte Stahlage des Stahlbetonquerschnitts realisiert.

Zur Berechnung der Stahlspannungen bzw. Stahlschnittgrößen werden die Dehnungen in die Richtung der entsprechenden Stahlage transformiert.



Aus der zugehörigen Spannungsdehnungslinie können die Spannung und die tangentielle Steifigkeit berechnet werden.

Die Schnittgrößen ergeben sich dann mit Hilfe der vorhandenen Bewehrungsmenge.

1.4

Zugfestigkeit des Betons

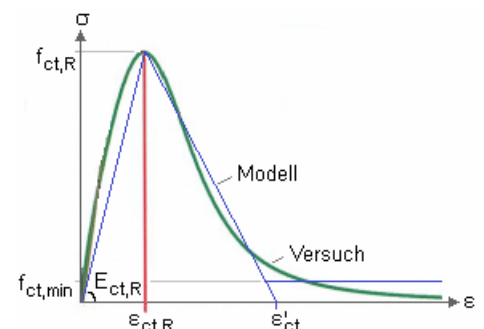
Die realitätsnahe Abbildung des Betons in einer Spannungsdehnungsbeziehung erfordert die Berücksichtigung der - wenn auch geringen - Zugspannungen, die der Beton aufnehmen kann. Jedoch reduziert die Zugfestigkeit besonders in geringer belasteten Bereichen der Flächenposition die Durchbiegung enorm. Die Umsetzung erfolgt in den **pcae**-Programmen durch eine Erweiterung der Beton-Spannungsdehnungslinie.

Versuche (s. /8/) haben gezeigt, dass die Zug-Kennlinie im Vergleich zur Druck-Kennlinie einen weniger gekrümmten, nahezu linearen Verlauf annimmt. Im Unterschied zum Druck ist die Tragfähigkeit jedoch nicht mit Erreichen der maximalen Zugfestigkeit erreicht, sondern es erfolgt eine Entfestigungsphase, wobei infolge der Verbundspannungen auch im gerissenen Zustand eine Restzugfestigkeit verbleibt.

Die Zugfestigkeit f_{ct} weist eine hohe Streuung (ca. +/- 30%) auf, so dass in der Norm neben dem Mittelwert f_{ctm} die Quantilwerte $f_{ct,0.05}$ und $f_{ct,0.95}$ angegeben werden.

Je nach Bausituation ist daher abzuschätzen, welche Zugfestigkeit zu verwenden ist.

Standardmäßig wird in den **pcae**-Programmen mit $f_{ct,R} = f_{ctm}$ (s.a. EC 2, 7.4.3(4)) gerechnet. Die Biegezugfestigkeit n. EC 2, 3.1.8, wird nicht verwendet.



Der Zug-E-Modul E_{ct} unterscheidet sich als Tangentenmodul nur wenig von dem Druck-E-Modul E_{cm} . Jedoch wird zur Beschreibung der Spannungsdehnungslinie (s. Grafik) der Sekantenmodul benötigt.

Er kann n. /8/ berechnet werden mit $E_{ct,R} = 40 \cdot 10^3 \cdot (1 - e^{(-f_{ctm}/2.7)})$ und entspricht damit je nach Betonfestigkeit 75 - 85 $\cdot E_{cm}$. In den **pcae**-Programmen wird er standardmäßig verwendet.

Die Zugbruchdehnung des Betons ergibt sich damit zu $\epsilon_{ct,R} = f_{ct,R} / E_{ct,R}$.

Nach Erreichen der Zugbruchdehnung tritt die sog. Entfestigung ein, d.h. der Beton kann weiterhin Zugspannungen aufnehmen. Der Entfestigungsbereich $\delta\epsilon = \epsilon'_{ct} - \epsilon_{ct,R}$ wird als Vielfaches der Zugbruchdehnung beschrieben mit $\delta\epsilon = fak \cdot \epsilon_{ct,R}$.

Standardmäßig entspricht in den **pcae**-Programmen der Entfestigungs-E-Modul dem Zug-E-Modul, sodass gilt $fak = 1$.

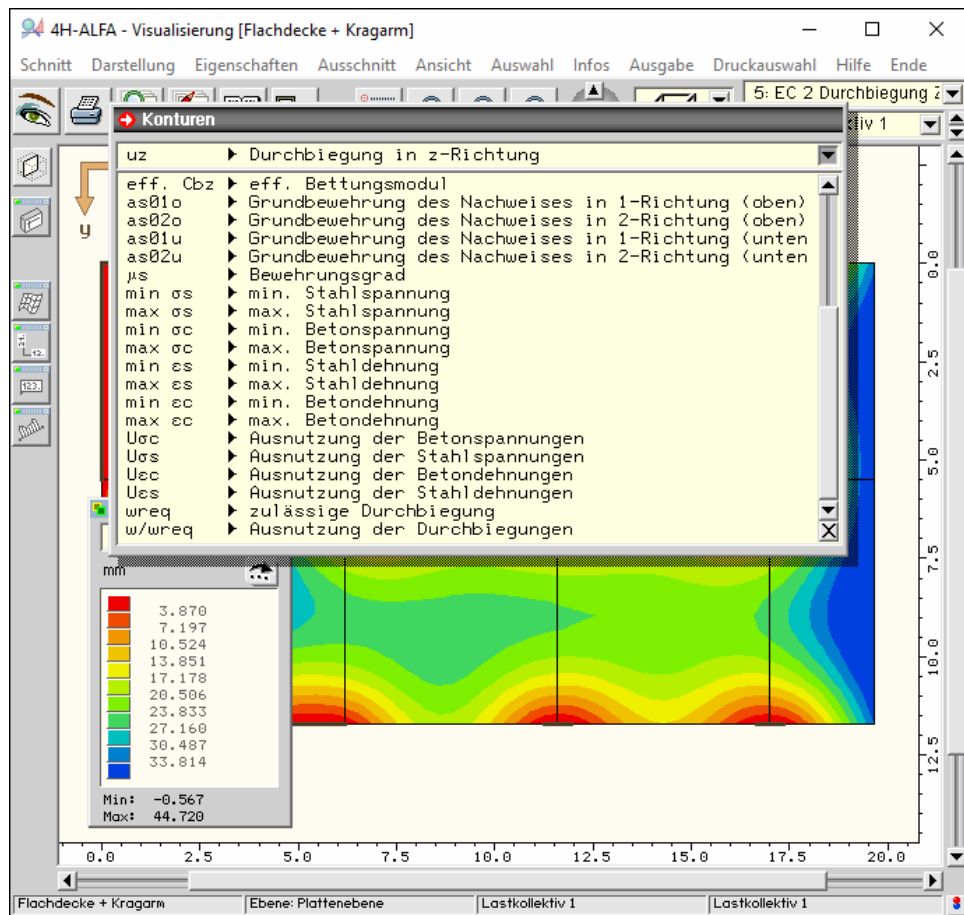
Aufgrund der Verbundwirkung bleibt im Beton eine Restzugspannung $f_{ct,min}$ erhalten, die bis zum Zugversagen der Bewehrung wirkt. Standardmäßig wird in den **pcae**-Programmen eine Restzugfestigkeit von 10 % der Zugfestigkeit angesetzt, d.h. $f_{ct,min} = 0.1 \cdot f_{ct,R}$.

Kriechen und Schwinden wirken im Zug- und Druckbereich gleichermaßen, so dass der Kriechbeiwert ϕ_{∞} und das Schwindmaß ϵ_{cs} auch auf die Zugseite übertragen werden. Der Entfestigungsbereich wird beim Kriechen nicht verändert.



In den **pcae**-Programmen wird standardmäßig die Zug-Spannungsdehnungslinie mit Entfestigung verwendet.

In der Ergebnisvisualisierung können zusätzlich zu der Durchbiegung bzw. Durchbiegungsausnutzung weitere Zwischenergebnisse angezeigt werden, die dazu dienen, die Resultate zu verstehen (z.B. Konturen).



Grundbewehrungen

Die as-Werte as01o / as02o / as01u / as02u sind die dem Durchbiegungsnachweis zugrunde liegenden Grundbewehrungen. Je nach Nachweiseinstellung ist dies die im Eingabeprogramm definierte Grundbewehrung oder die Bewehrung, die sich aus den vorher durchgeführten Nachweisen ergeben hat (Standardeinstellung).

Es lassen sich die extremalen Spannungen bzw. Dehnungen für den Beton bzw. die Bewehrungsstähle (min σ_s , ..., max ϵ_c) darstellen.

Aus den zulässigen Spannungen und Dehnungen ergeben sich daraus die entsprechenden Spannungs- und Dehnungsausnutzungen.

Beim Beton werden nur die Druckspannungen bzw. -dehnungen bei der Berechnung der Ausnutzungen berücksichtigt.

Die Beton- und Stahlspannungsausnutzung ist durch das verwendete Stoffgesetz durch 1.0 begrenzt. Es kann jedoch passieren, dass die iterativ ermittelten Dehnungen die zulässigen Beton- bzw. Stahldehnungen überschreiten. Dann ist die zugehörige Dehnungsausnutzung größer als 1.0 und es wird eine entsprechende Warnung ausgegeben. Anhand der Ausnutzung lässt sich in einem solchen Fall oftmals der Ort des Problems erkennen.

Positionsbezogene Bemessungsoptionen

In den positionsbezogenen Bemessungsoptionen kann eine zulässige Durchbiegung w_{req} vorgegeben werden, aus der dann die Durchbiegungsausnutzung $U_w = \max w / w_{\text{req}}$ berechnet wird.

Positionsbezogene Bemessungsoptionen

Allgemein | DIN 1045 | DIN 1045-1 | Eurocode 2

$\Delta\sigma_{\text{Rsk}}$ 85.0 N/mm² Längsbewehrung
 $\Delta\sigma_{\text{RskV}}$ 80.0 N/mm² Spannungsschwingbreite der Querkraftbewehrung
 t_0 28 d Zeitpunkt der Erstbelastung des Betons

☒ **Spannungsnachweis**
 Vorgabe: ☒ Faktor ☐ zul σ
 zul σ_o = 0.60 * f_{ck} = -12.0 N/mm²
 zul σ_s = 0.80 * f_{yk} = 400.0 N/mm²

☒ **Dichtigkeitsnachweis**
 min x_D 30.0 mm minimale Druckzonendicke

Durchbiegung Z2
☒ Ausnutzung berechnen
 w_{req} 25.0 mm zulässige Durchbiegung
☒ Betonzugspannungen berücksichtigen ☐ pcae-standard
 $E_{\text{ct,R}}$ 22359.4 N/mm² Rechenwert des Zug-E-Moduls
 $f_{\text{ct,R}}$ 2.21 N/mm² Rechenwert der Betonzugfestigkeit
 $\varepsilon_{\text{ct,R}}$ 0.099 ‰ Dehnungsbereich der Zugspannung
☒ einschl. Entfestigung
 fak ε'_{ct} 1.00 Entfestigungsbereich bzgl. $\varepsilon_{\text{ct,R}}$
 fak $f_{\text{ct,min}}$ 0.10 Mindestzugspannung bzgl. $f_{\text{ct,R}}$

Werden Betonzugspannungen berücksichtigt, können die Beiwerte für den Zug-E-Modul, die Betonzugfestigkeit sowie die Faktoren für den Entfestigungsbereich und die Mindestzugspannung vorgegeben werden.

Ist der **pcae**-Standard aktiviert, werden die Werte sinnvoll vorbelegt (s. Kap. 1.4 *Zugfestigkeit des Betons*).

Ergebnisse in den Knoten

Durch Doppelklicken eines Elementknotens lassen sich übersichtlich alle Knotenergebnisse simultan anzeigen.

Informationen

suche nach [] SCHRIFTGRÖSSE ABC ABC ABC

Knoten 2200 in Position 8
 Nachweis 5 [EC 2 Durchbiegung Z2 K+S]: Lastkollektiv 1: Lastkollektiv 1

Koordinaten, Dicke, Bettungsmodul
 $X = x = 19.65 \text{ m}$, $Y = y = 8.90 \text{ m}$, $d = 0.26 \text{ m}$, $C_{bz} = 0.0 \text{ kN/m}^3$

Verformungen
 $u_z = 44.611 \text{ mm}$, $v_x = -0.7344 \text{ ‰}$, $v_y = -9.2964 \text{ ‰}$

Momente
 $m_{xx} = 0.1798 \text{ kNm/m}$, $m_{yy} = 9.809 \text{ kNm/m}$, $m_{xy} = 0.4694 \text{ kNm/m}$
 $m_1 = 9.8318 \text{ kNm/m}$, $m_2 = 0.157 \text{ kNm/m}$, $\alpha_m = 87.22^\circ$

Querkräfte
 $q_x = 1.6735 \text{ kN/m}$, $q_y = 3.0012 \text{ kN/m}$
 $q_1 = 3.4363 \text{ kN/m}$, $\alpha_q = 60.86^\circ$

Grundbewehrung des Nachweises (oben)
 $as_{01o} = 5.70 \text{ cm}^2/\text{m}$, $as_{02o} = 5.70 \text{ cm}^2/\text{m}$

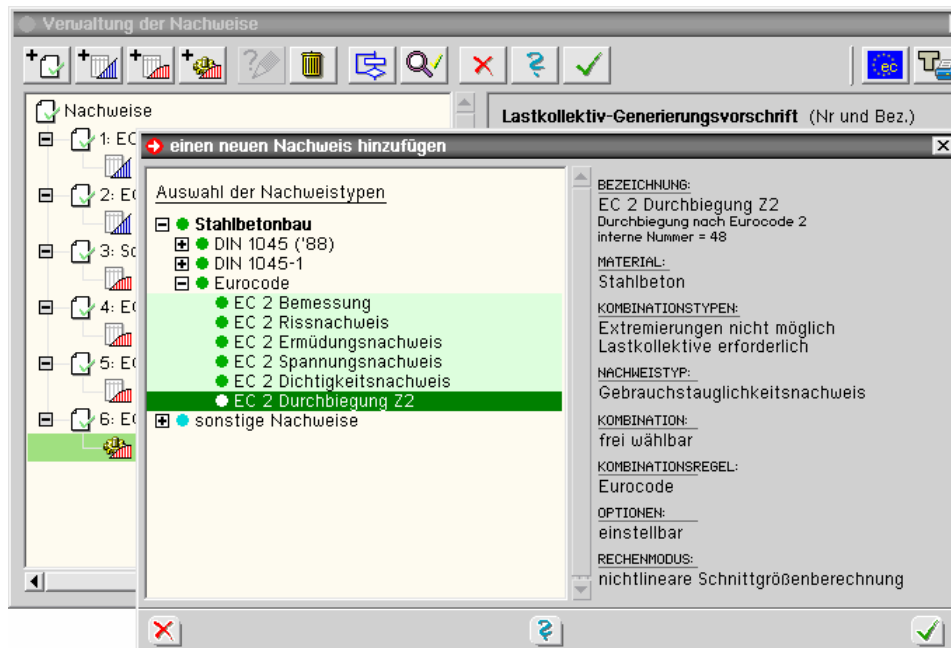
Grundbewehrung des Nachweises (unten)
 $as_{01u} = 7.00 \text{ cm}^2/\text{m}$, $as_{02u} = 11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$

Betonergebnisse des Nachweises (Zustand 2)
 $\min \sigma_c = -1.253 \text{ MN/m}^2$, $\max \sigma_c = 0.000 \text{ MN/m}^2$, $U_{\sigma c} = 0.033$
 $\min \varepsilon_c = -0.1282 \text{ ‰}$, $\max \varepsilon_c = 0.5367 \text{ ‰}$, $U_{\varepsilon c} = 0.010$

Bewehrungsergebnisse des Nachweises (Zustand 2)
 $\min \sigma_s = -86.604 \text{ MN/m}^2$, $\max \sigma_s = 14.972 \text{ MN/m}^2$, $U_{\sigma s} = 0.165$
 $\min \varepsilon_s = -0.4330 \text{ ‰}$, $\max \varepsilon_s = 0.0749 \text{ ‰}$, $U_{\varepsilon s} = 0.017$

zulässige Durchbiegung
 $w_{\text{req}} = 25.00 \text{ mm}$, $w/w_{\text{req}} = 1.784$

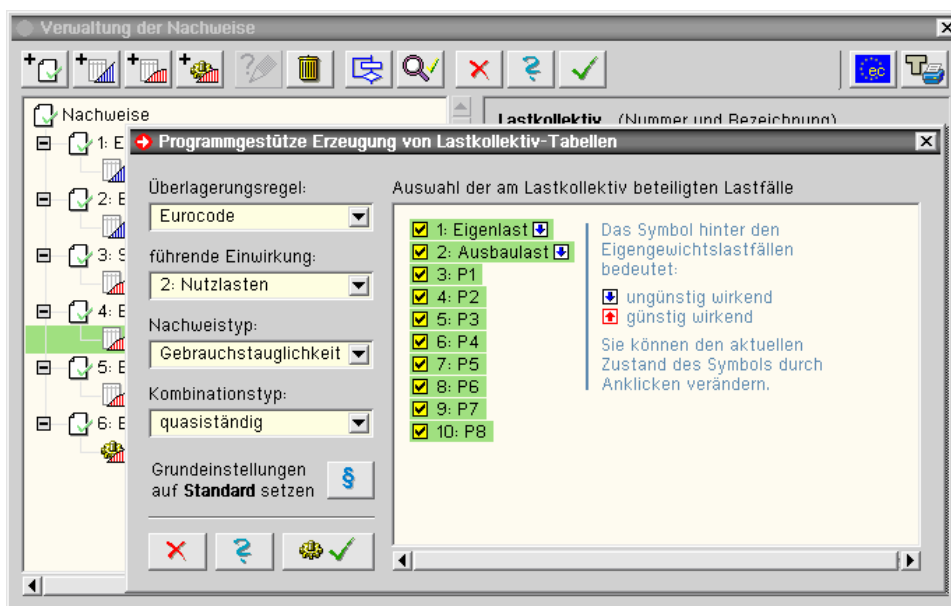
Der Nachweis der Durchbiegungen im Zustand 2 wird in der *Verwaltung der Nachweise* eingerichtet.



Unabhängig von der Reihenfolge der erzeugten Nachweise werden die Nachweisergebnisse **EC 2 Durchbiegung Z2** erst nach Berechnung aller anderer Nachweise in einem nachfolgenden Schritt ermittelt, da standardmäßig die im ersten Schritt ermittelte Bewehrung als Grundbewehrung des Durchbiegungsnachweises angesetzt wird.

Lastfallkollektive

Die realistischen Verformungen sind von den beanspruchungsabhängigen Steifigkeiten des Stahlbetons abhängig, so dass keine Überlagerung aus vorab ermittelten Lastfallergebnissen erfolgen kann, sondern Lastkombinationen in Form von Lastkollektiven bzw. Generierungsvorschriften verwendet werden müssen.

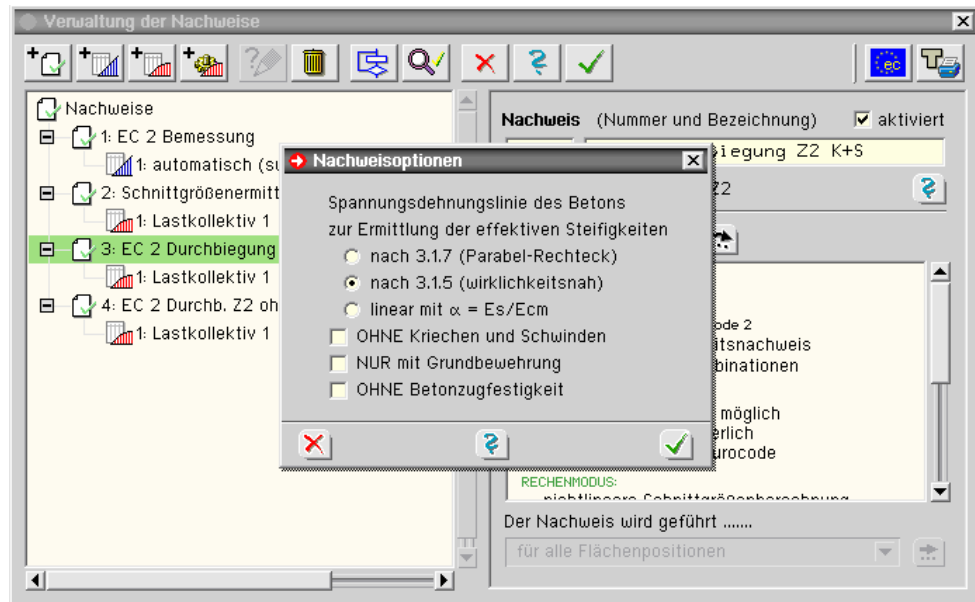


Die **Überlagerungsregel**, der **Nachweistyp** und der **Kombinationstyp** (quasiständig) sind bei der Erzeugung der Lastkollektive dem Standardfall entsprechend eingestellt, können aber jederzeit abgewandelt werden.

Die Anzahl der möglichen Kombinationen steigt mit der Anzahl der Lastfälle exponentiell an, so dass eventuell nur ausgewählte Kombinationen (Volllast, schachbrettartige Zusammenstellungen) berücksichtigt werden sollten.

Nachweisoptionen

Unabhängig von den positionsbezogenen Bemessungsoptionen können weitere Nachweisoptionen vorgegeben werden



Die Spannungsdehnungslinie des Betons kann zur Ermittlung der realistischen Steifigkeiten gewählt werden.

Durch Berechnung **OHNE Kriechen und Schwinden** können z.B. in einem Rechenlauf mit Hilfe zweier Nachweise Durchbiegungen für den Anfangs- und dem Endzustand ermittelt werden.

Standardmäßig wird die im ersten Bemessungsschritt ermittelte Bewehrung (Tragfähigkeit- und Gebrauchszustandsnachweise mit linear berechneten Schnittgrößen) als Grundbewehrung des Durchbiegungsnachweises angesetzt.

Normalerweise schließt sich an den ersten Bemessungsschritt die Wahl der einzulegenden Bewehrung an.

Mit dieser gewählten Bewehrung ist der Durchbiegungsnachweis zu führen.

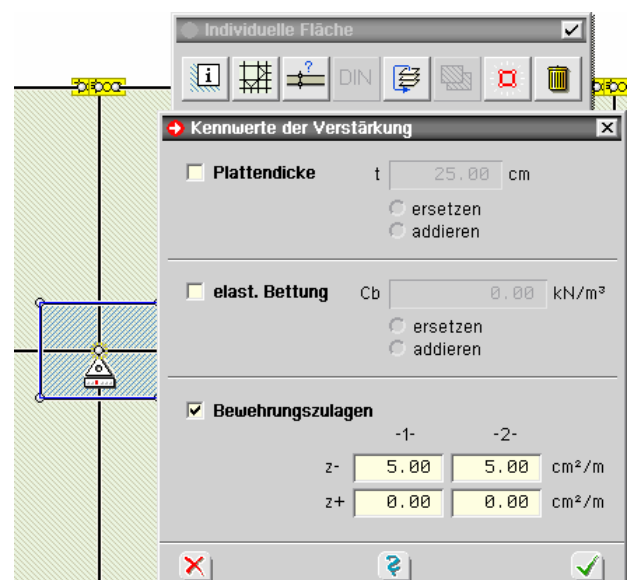
Durch Berechnung **NUR mit Grundbewehrung** können die Bewehrungsergebnisse der vorab geführten Nachweise bei der Bewehrung für den Durchbiegungsnachweis ignoriert werden.

Durch Berechnung **OHNE Betonzugfestigkeit** können z.B. in einem Rechenlauf mit Hilfe zweier Nachweise Durchbiegungen mit und ohne Mitwirken des Betons auf Zug ermittelt werden.

Zulagebewehrung

Neben der Möglichkeit, Grundbewehrung positionsweise zu beschreiben, kann in #ALFA eine Zulagebewehrung über die Erzeugung von Flächen vom Typ **Verstärkung** hinzugefügt werden (hier ein Rechteckbereich über einer Stütze mit zusätzlicher oberer Bewehrung).

Diese Erhöhung wird für alle Finiten-Elemente vorgenommen, deren Schwerpunkt in der Verstärkungsfläche liegt. Die Vorgehensweise erfolgt analog zu der Eingabe lokaler Dicken- bzw. Bettungsänderungen.



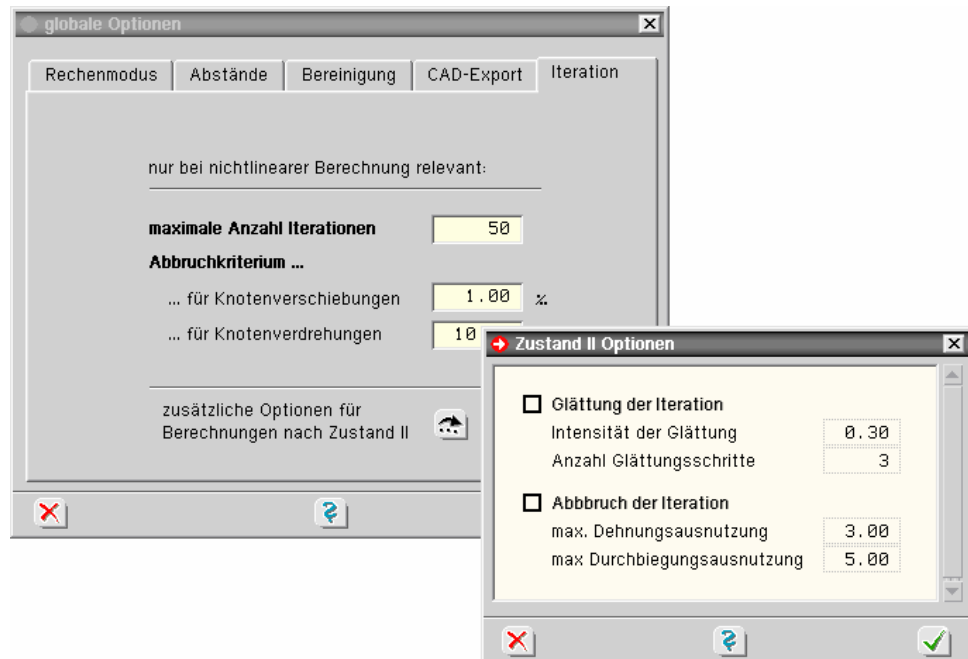
Die Bewehrungsrichtungen 1-2 und die Achsabstände der Bewehrungszulagen entsprechen dabei den Werten der zugrunde liegenden Position.

Beim Nachweis **EC 2 Durchbiegung Z2** kann über den Button **NUR mit Grundbewehrung** eingestellt werden, dass nur die eingegebene Grundbewehrung der Positionen und die Zulagebewehrung berücksichtigt werden.

Die zugrunde liegende Bewehrung kann als Ergebnis des Nachweises in der Visualisierung eingesehen werden.

Iterationseinstellungen

Die iterative Berechnung der Ergebnisse nach Zustand 2 kann durch folgende Einstellungen beeinflusst werden



Im Register *Iteration* der globalen Optionen können zunächst, wie auch für andere iterative Berechnungen (z.B. Ausschluss von Zugfedern, Steifzahlverfahren), die maximale Anzahl der Iterationen und das Abbruchkriterium eingestellt werden.

Das Abbruchkriterium wird getrennt für Knotenverschiebungen und Knotenverdrehungen angegeben. Fällt die Änderung der Verschiebungen und Verdrehungen in dem Iterationsschritt unter den gewünschten Wert, wird die Iteration beendet. Die Abbruchkriterien beziehen sich dabei auf die maximalen Verschiebungs- bzw. Verdrehungswerte.

Für Berechnungen nach Zustand 2 gibt es zusätzliche Optionen, die nur geändert werden sollten, wenn es zu Problemen bei der Berechnung kommt.

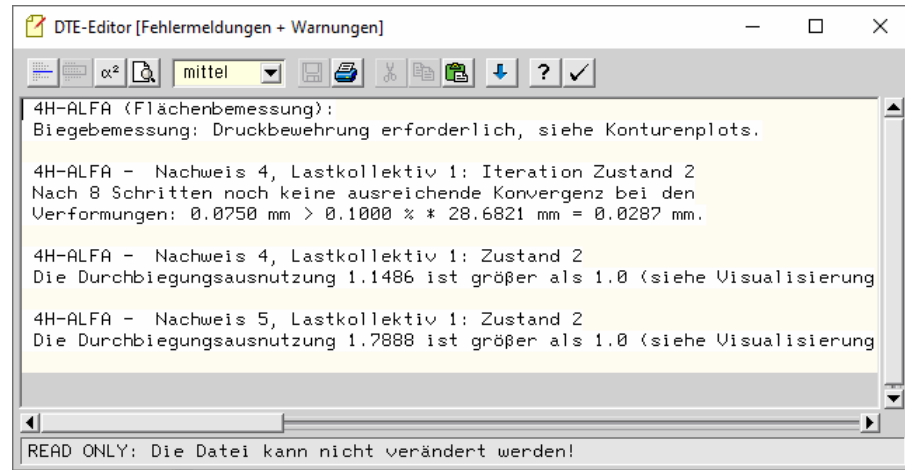
Zur Aktivierung der Optionen muss der Button **Glättung der Iteration** oder **Abbruch der Iteration** gesetzt werden.

Die Glättung der Iteration sorgt dafür, dass der Iterationsfortschritt in kleineren Schritten erfolgt, wodurch ein Hin- und Herspringen in der Iteration oftmals vermieden wird. Die Intensität der Glättung kann zwischen den Werten 0.0 (keine Glättung) und 1.0 (maximale Glättung) eingestellt werden. Die Anzahl der Iterationsschritte, für die die Glättung wirken soll, kann ebenfalls vorgegeben werden.

Es ist zu beachten, dass eine starke Glättung der Iteration die Rechenzeit erhöht!

Es gibt Zustände während der Iteration, wo eine weitere Berechnung nicht sinnvoll erscheint. Die Beton- und Stahlspannungen sind während der Berechnung durch das verwendete Stoffgesetz limitiert. Es kann jedoch passieren, dass die iterativ ermittelten Dehnungen die zulässigen Beton- bzw. Stahldehnungen überschreiten.

Die maximale Dehnungsausnutzung kann vorgegeben werden. Die Berechnung der entsprechenden Lastkombination wird dann bei Überschreitung dieser Dehnungsausnutzung mit einer entsprechenden Meldung abgebrochen.



In den positionsbezogenen Bemessungsoptionen kann eine zulässige Durchbiegung w_{req} vorgegeben werden, aus der eine Durchbiegungsausnutzung $U_w = \max w / w_{\text{req}}$ berechnet wird. Falls diese Ausnutzung den vorgegebenen Wert überschreitet, wird die Iteration ebenfalls beendet.



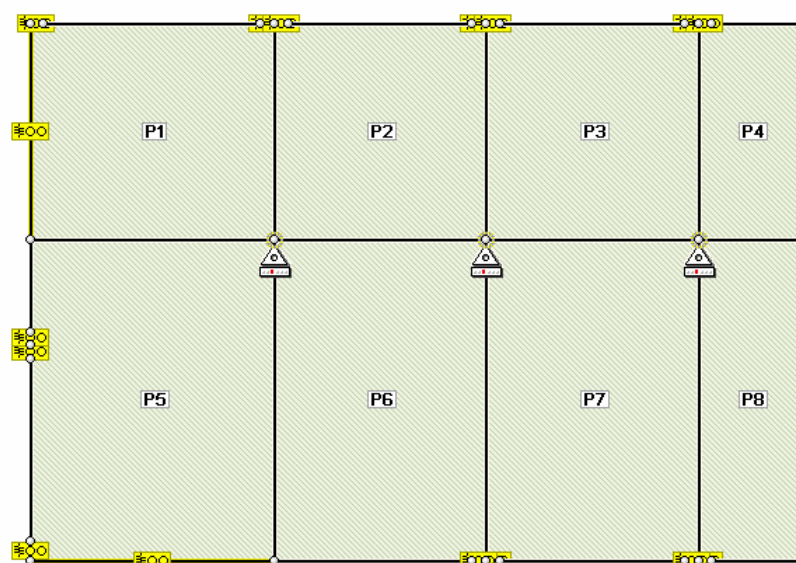
Achtung: Die Ergebnisse sind bei Abbruch der Iteration nicht zulässig!

1.7

Beispielberechnung Flachdecke mit Kragarm im Zustand II

Das nachfolgende Beispiel ist dem Buch /1/ Beispiele zur Bemessung nach Eurocode 2 – Band 2: Ingenieurbau entnommen. Es stellt eine auskragende Flachdecke eines Bürogebäudes dar, für die die Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen ist.

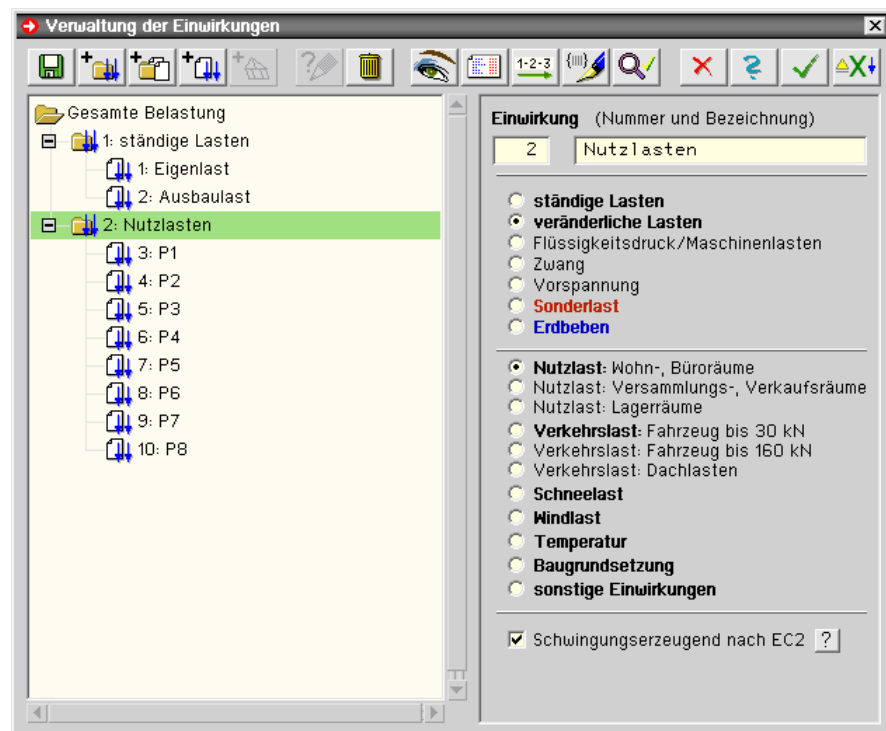
Die Platte besteht aus acht Stahlbetonpositionen (Deckendicke 26 cm, Beton C30/37, Stahl B500) und ist auf Einzelstützen ($C_z = 2214 \text{ MN/m}$) und Wandscheiben ($c_z = 2186.7 \text{ MN/m}^2$) gelagert.



Als Grundbewehrung wird für die Positionen P1 - P4 $aso1 = 5.7$, $aso2 = 5.7$, $asu1 = 7.8$, $asu2 = 5.0 \text{ cm}^2/\text{m}$ und für die Positionen P5 - P8 $aso1 = 5.7$, $aso2 = 5.7$, $asu1 = 7.8$, $asu2 = 11.3 \text{ cm}^2/\text{m}$ gewählt.

Einwirkungen

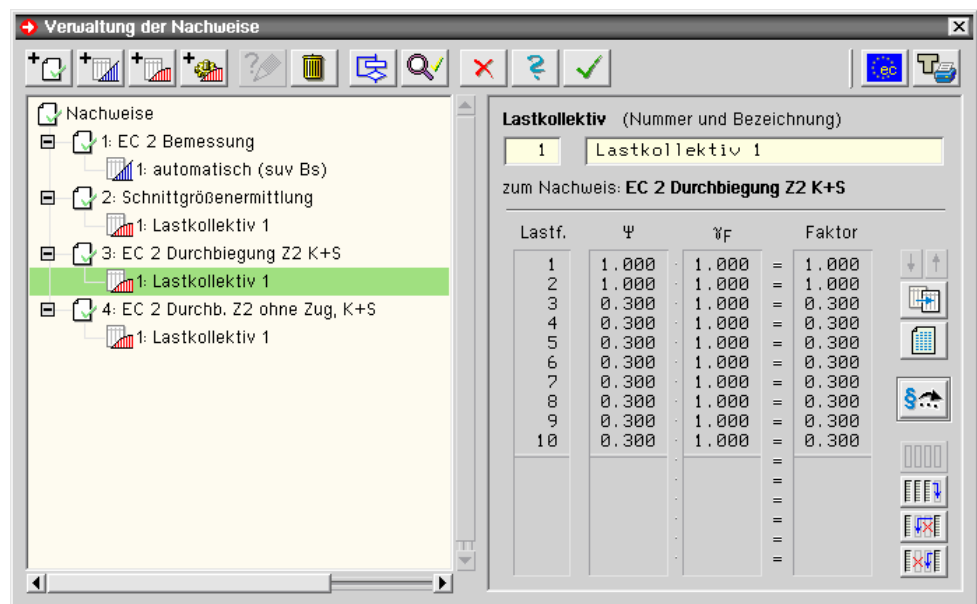
Die Einwirkungen setzen sich aus den ständigen Lasten Eigenlast (LF1) und Ausbaulast (LF2) sowie den Nutzlasten der Positionen P1 bis P8 (LF3 - LF10) zusammen.



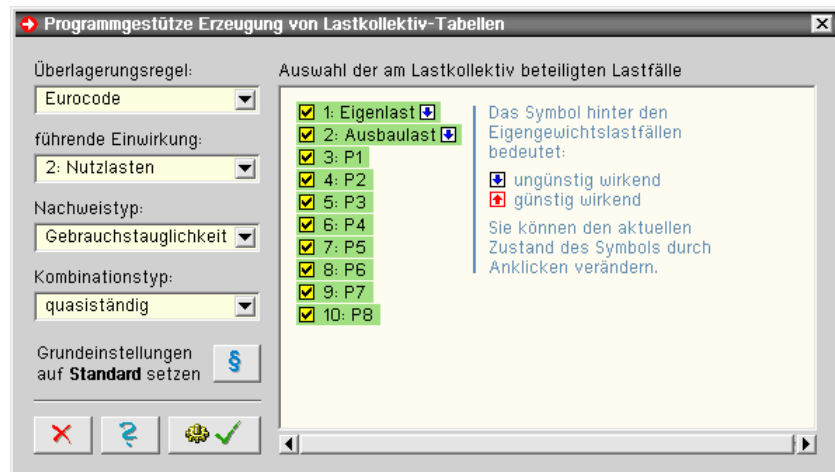
Nachweise

Es wird zunächst der Tragfähigkeitsnachweis **EC 2 Bemessung** mit den Standardextremierungen eingerichtet.

Zur Kontrolle der Durchbiegungen werden die Nachweise **Schnittgrößenermittlung** (linear elastische Berechnung), **EC 2 Durchbiegung Z2 K+S** (Zustand 2 mit Kriechen und Schwinden) und **EC 2 Durchbiegung Z2 ohne Zug K+S** (Zustand 2 mit Kriechen und Schwinden ohne Betonzugfestigkeit) definiert.

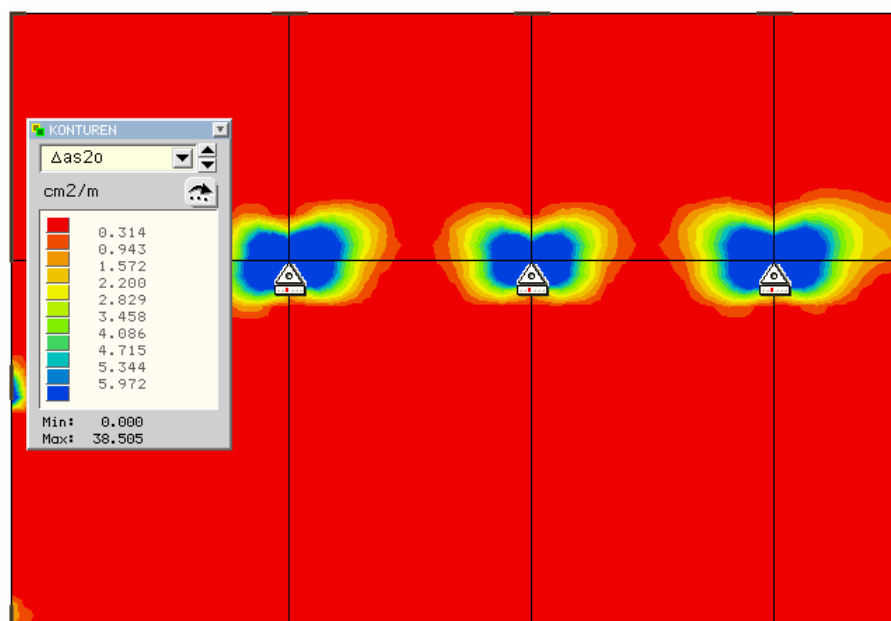
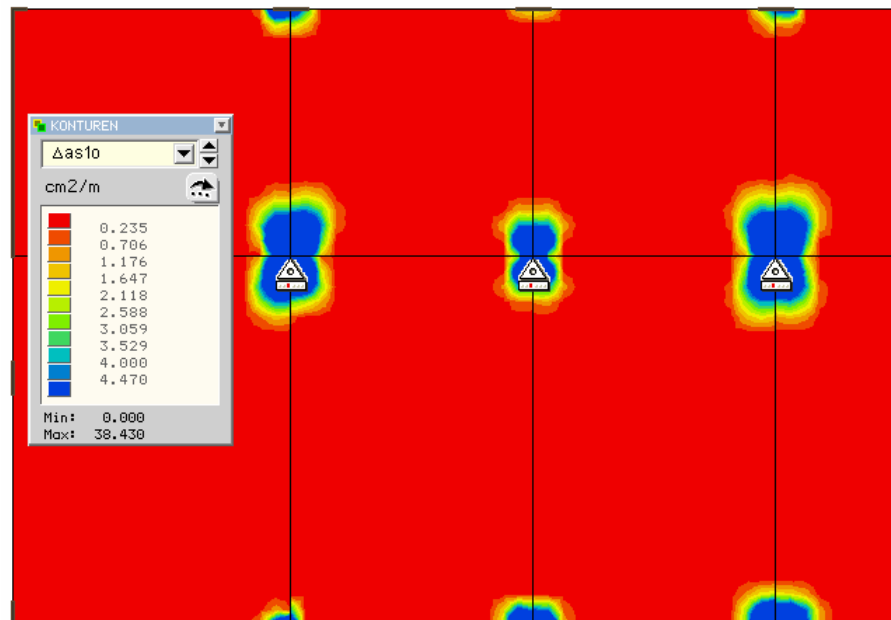


Als Lastkombination wird diesen Nachweisen jeweils ein Lastkollektiv aller Lastfälle (Volllast, entspricht $G + 0.3 \cdot Q$) vom Kombinationstyp **quasiständig** hinzugefügt.



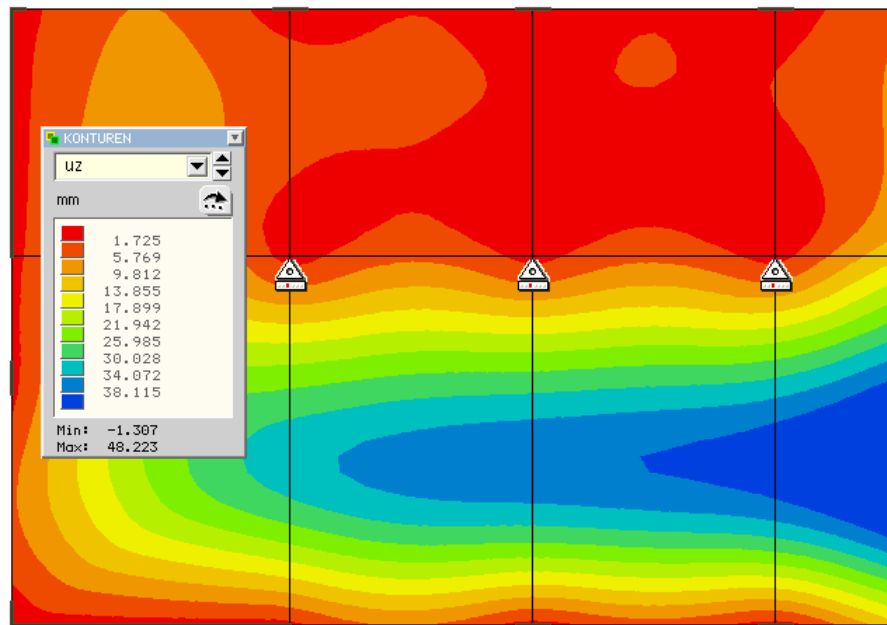
Ergebnisse der Biegebemessung

Gegenüber der oben angegebenen Grundbewehrung ergibt sich aus der Bemessung nur in den Stütz- und Eckbereichen in den oberen Bewehrungslagen eine erforderliche Bewehrungserhöhung Δs .



Durchbiegung im Zustand 2

Als maximale Durchbiegung ergibt sich im Nachweis *EC 2 Durchbiegung Z2 K+S* ein Wert von 48.22 mm, der sehr gut dem in der Literatur angegebenen Wert von 45 mm entspricht.



Die maximale Durchbiegung beim Nachweis *Schnittgrößenermittlung* (linear elastische Berechnung, nur Betonsteifigkeit) beträgt 9.86 mm.

Beim Nachweis *EC 2 Durchbiegung Z2 ohne Betonzugfestigkeit* ergeben sich 81.4 mm.

1.8

Zusätzliche Bemerkungen

Folgende zusätzliche Bemerkungen sollen die Durchführung des Durchbiegungsnachweises und das Verständnis der Ergebnisse erleichtern.

- Es ist zu beachten, dass sich durch das einseitige Aufreißen des Betons bei Plattentragwerken die Dehnungsnulllinie verschiebt, so dass Dehnungen und Normalkräfte in der Plattenmittelfläche zu erwarten sind! Deshalb werden die Durchbiegungen nach Zustand 2 auch für Platten intern mit Faltwerkselementen berechnet.
- Bei Punktlagern und Linienlagerenden kann es aufgrund von Spannungskonzentrationen bei der FE-Berechnung zu einer zu großen Steifigkeitsabminderung kommen, die Krümmungen bzw. Verformungen werden in diesen Bereichen überschätzt. Durch Modellierung von Lagerungen durch elastisch gebettete Teilbereiche statt durch Punktlager werden oftmals kleinere Durchbiegungen ermittelt.
- Bei zu großen Durchbiegungen bzw. dem Abbruch der Iteration lohnt es sich, die Dehnungsausnutzungen zu kontrollieren. An den Stellen maximaler Dehnungsausnutzung ist i.d.R. zu wenig Bewehrung vorhanden oder die Platte ist zu dünn.
- Zur Abschätzung der Durchbiegung reicht es aus, zunächst (evtl. in einer Kopie des Bauteils) mit einer kleineren Elementkantenlänge zu rechnen.
- Bevor man alle möglichen Lastkombinationen berechnet (z.B. Generierungsvorschrift), sollten zuerst ausgewählte Kombinationen untersuchen (Volllast, schachbrettartige Zusammenstellungen). In der quasiständigen Bemessungssituation sind die Kombinationsbeiwerte mancher Einwirkungsarten recht klein, so dass sie keinen großen Einfluss auf die maximale Durchbiegung haben.
- Voraussetzung der Berechnung realistischer Durchbiegungen ist eine genaue Beschreibung der gewählten Bewehrung. Zumindest sollten in jedem Fall ein Tragfähigkeits- und ein Rissnachweis durchgeführt werden.
- Zur nachträglichen Änderung der gewählten Bewehrung kann man die Grundbewehrung der Positionen abändern oder in Teilbereichen (s. Verstärkungsflächen) Bewehrungszulagen definieren.

- /1/ Beispiele zur Bemessung nach Eurocode 2, Band 2: Ingenieurbau, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V., Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2015
- /2/ Stempniewski, L., Eibl, J. - Finite Elemente im Stahlbetonbau, Betonkalender 1993, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1993
- /3/ Darwin, D., Pecknold, D.A.W. - Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete, A Report on a Research Project Sponsored by The National Science Foundation, Research Grant GI 29934, University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois 1974
- /4/ Ulrich Häussler-Combe - Computational Methods for Reinforced Concrete Structures, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin 2015
- /5/ Seung Jin Choi, Halil Kiziltan - Zur Berechnung der Durchbiegungen von Stahlbetonplatten unter Berücksichtigung wirklichkeitsnaher Materialmodelle, Eigenverlag der TU Dortmund, Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen, Heft 5 der Schriftenreihe Betonbau, Dortmund 2014
- /6/ DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Januar 2011
- /7/ DIN EN 1992-1-1/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe April 2013
- /8/ Stefan Röhling, Heinz Meichsner - Rissbildung im Stahlbetonbau, Fraunhofer IRB Verlag, 2018