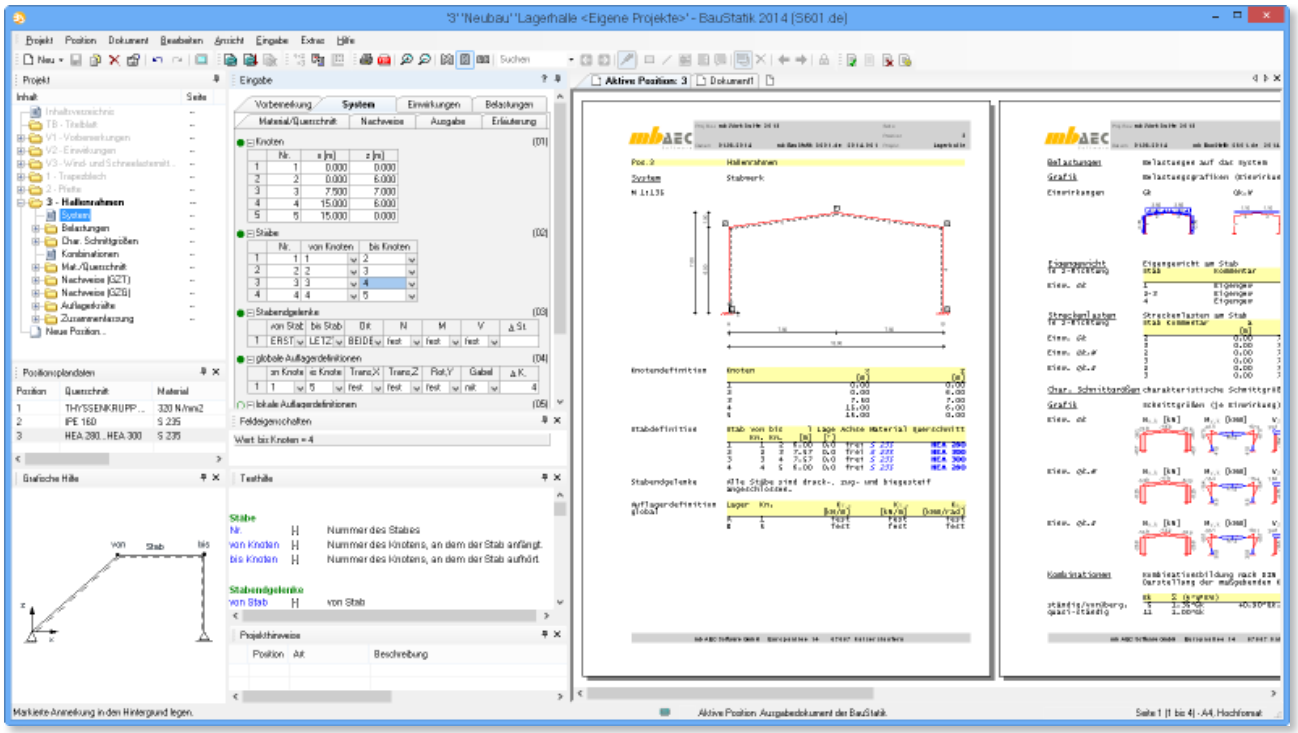
Dipl.-Ing. Katrin Büscher

Ebene Stabwerke aus Stahl

Leistungsbeschreibung des BauStatik-Moduls S601.de Stahl-Bemessung, ebenes Stabwerk - EC 3, DIN EN 1993-1-1:2010-12

Viele in der Baupraxis vorkommende Konstruktionen können als ebene Stabwerke (Rahmensysteme oder Fachwerke) abgebildet werden. Das Ziel einer statischen Berechnung ist die sichere Bemessung des Tragwerks im Hinblick auf Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit. Je nach Tragverhalten sind die Schnittgrößen entweder nach Theorie I. oder II. Ordnung zu ermitteln. Eine Stabilitätsuntersuchung ist unverzichtbarer Bestandteil einer statischen Analyse eines ebenen Stabwerkes.



Allgemeines

Mit dem Modul S601.de können die Schnittgrößen und Verformungen von ebenen Stabwerken nach Theorie I. Ordnung oder nach Theorie II. Ordnung ermittelt werden. Die Tragfähigkeitsnachweise für die gewählten Stahlprofile werden nach dem Verfahren elastisch-elastisch oder nach dem Verfahren elastisch-plastisch geführt. Auf Wunsch sind Knick- und Biegedrillknicknachweise für I-Profile möglich. Neben den üblichen Einzel- und Streckenlasten bzw. -momenten können auch Einflüsse aus Temperatur sowie Auflagerverschiebungen berücksichtigt werden.

System

Im Kapitel „System“ können beliebige ebene Systeme mit bis zu 100 Stäben erzeugt werden. Die Eingabe erfolgt tabellarisch. Neben Knoten und Stäben werden hier auch die Auflager und Gelenke definiert.

Gelenke sind als Stabendgelenke jeweils einem der gelenkig miteinander verbundenen Stäbe zuzuweisen. Normalkraft-, Querkraft- und Momentengelenke, sowie Kombinationen daraus sind möglich.

Über die Funktion „Lokale Auflagerdefinition“ sind Auflager mit freien Winkeln zu den Stäben zu definieren. Elastisch gelagerte Auflagerpunkte werden definiert, indem zunächst ein Auflagerpunkt gesetzt wird, dem im nächsten Schritt unter „Auflagerelastizitäten“ eine Federsteifigkeit zugewiesen wird:

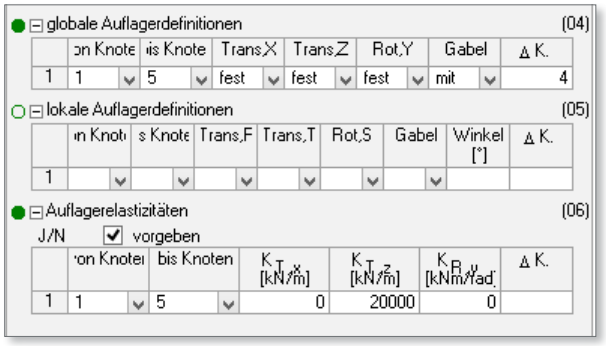


Bild 1. Definition von elastischen Auflagern im Kapitel „System“

Einwirkungen

Projektweite Einwirkungen können aus einer mit dem BauStatik-Modul S030.de erstellten Position übernommen werden. Zusätzlich oder alternativ besteht die Möglichkeit, nur für die aktuelle Position gültige Einwirkungen innerhalb der Stabwerksposition zu definieren.

Für jede positionsbezogene Einwirkung wird festgelegt, ob sie feldweise oder alternierend mit positivem bzw. negativem Vorzeichen angesetzt werden sollen. Über die Zuordnung in Gruppen wird definiert, ob es Lastfälle gibt, die sich gegenseitig ausschließen. Bei Einwirkungen mit gleichem Namen haben die Positionseigenschaften Vorrang vor den Projekteigenschaften.

Außerdem können im Kapitel „Einwirkungen“ auch Namen und Eigenschaften für eigene Kombinationen vergeben werden. Die zugehörigen Lasten sind im Kapitel „Belastungen“ als Bemessungswerte einzugeben. Kombinationen sind bereits Überlagerungen von Einzellastfällen. Sie werden somit weder untereinander noch mit Einwirkungen überlagert.

Belastungen

Das Eigengewicht der Konstruktion wird auf Wunsch automatisch ermittelt. Bild 2 zeigt die weiteren Eingabemöglichkeiten für Lasten.

Neben den üblichen Punkt- und Streckenlasten sind auch Auflagerverschiebungen und Temperaturlasten zu definieren. Wie die anderen Lasten werden auch diese Einflüsse einer Einwirkung zugewiesen. Damit wird festgelegt, ob es sich um einen ständigen, veränderlichen oder außergewöhnlichen Lastfall handelt.

Auflagerverschiebungen werden bezogen auf das globale Koordinatensystem als Verschiebung in x- bzw. z-Richtung eingegeben. Außerdem können Verdrehungen um die y-Achse vorgegeben werden.

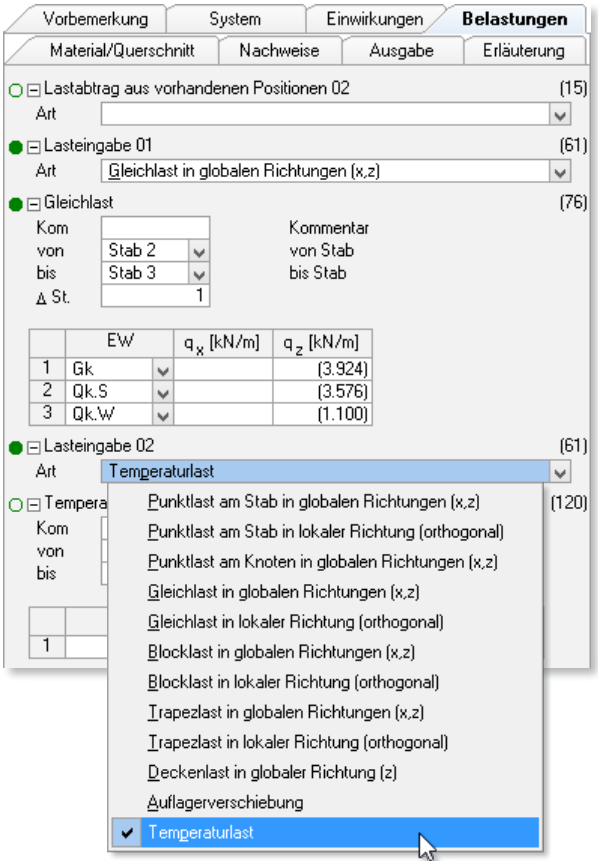


Bild 2. Lastarten in S601.de

Auflagerkräfte aus vorangegangenen Positionen können auf einfachem Weg als Belastung auf die aktuelle Position angesetzt werden. Dafür steht die Funktion „Lastabtrag“ zur Verfügung.

Nach Definition der Einwirkungen und Eingabe der zugehörigen Belastungen werden die Bemessungslasten unter Berücksichtigung der geltenden Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte ermittelt.

Material und Querschnitte

Im Kapitel „Material/Querschnitt“ kann ein Werkstoff aus einer Liste der genormten Stahlgüten ausgewählt werden. Außerdem steht eine Profil-Datenbank zur Verfügung, die handelsübliche Profilquerschnitte enthält.

Die ausgewählten Querschnitte können in Normallage oder um 90° gedreht vorgesehen werden. Darüberhinaus wird in diesem Kapitel definiert, welche Querschnitte gegen Verdrehungen gesichert und seitlich gehalten sein sollen.

Materialeigenschaften können für mehrere Stäbe gleichzeitig oder auch für einzelne Stäbe vorgeben werden. Wenn viele Stäbe mit den gleichen Materialeigenschaften vorkommen, ist es sinnvoll, diese Eigenschaften zunächst allen Stäben zuzuweisen. Ausnahmen werden dann über die Definition von weiteren Querschnitten berücksichtigt. Wenn wie im beschriebenen Fall für einen Stab mehrere Querschnitte eingegeben sind, gilt immer die Eingabe mit der höchsten Querschnittsnummer.

Stabilitätsberechnung von Tragwerken

Die DIN EN 1993-1-1 bietet u.a. die beiden folgenden Möglichkeiten zur Stabilitätsuntersuchung von Stahlkonstruktionen an (vgl. dazu DIN EN 1993-1-1, 5.2.2 (3) und (7)):

a) Es erfolgt eine ebene Stabwerksberechnung zur Ermittlung der Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung unter Ansatz von Schiefstellungen. In der Regel ist kein Ansatz von Vorkrümmungen notwendig. Der Fall Biegeknicken in Stabwerksebene ist mit den Spannungsnachweisen am verformten System abgedeckt. Die Fälle Biegeknicken senkrecht zur Stabwerksebene und Biegedrillknicken erfolgen unter Ansatz der Stablängen als Knicklängen am Ersatzstab.
b) Ohne Ansatz von Imperfektionen werden die Schnittgrößen des Systems nach Theorie I. Ordnung ermittelt. Die Stabilitätsnachweise werden am Ersatzstab geführt, wobei die Knicklängen aus den Knickfiguren der Stäbe abzuleiten sind.

Mit dem Modul S601.de steht ein Werkzeug für diese Art der Stabilitätsnachweise zur Verfügung. Im Kapitel „Nachweise" wird ausgewählt, ob die Schnittgrößenermittlung unter der Berücksichtigung der Einflüsse aus Vorverformungen erfolgen soll.

Ersatzstabnachweise werden im Modul S601.de für alle doppeltsymmetrischen Profile geführt.

Stabilitätsnachweis als Tragwerksberechnung nach Theorie II. Ordnung mit zusätzlichen Ersatzstabnachweisen

Mit Auswahl der Theorie II. Ordnung im Kapitel „Nachweise" öffnet sich ein Fragenkatalog zur Eingabe der Schiefstellungen und Vorkrümmungen.

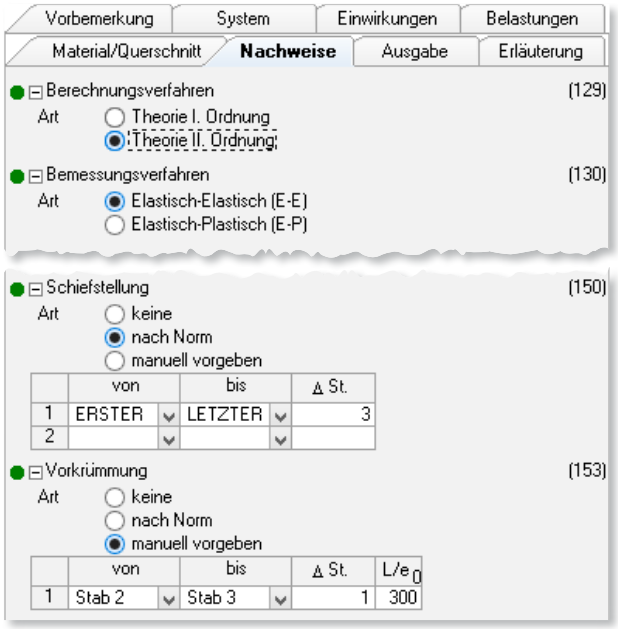


Bild 3. Dialog zur Eingabe der Vorverformungen

DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 5.3.2 regelt die anzusetzende Schiefstellung wie folgt:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

mit

φ_0	Ausgangswert: $\varphi_0 = 1/200$
α_h	Abminderungsfaktor für die Höhe h von Stützen: $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$ jedoch $\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1{,}0$
h	die Höhe des Tragwerks (in m)
α_m	Abminderungsfaktor für die Anzahl der Stützen in einer Reihe: $\alpha_m = \sqrt{0{,}5 \cdot (1 + \frac{1}{m})}$
m	Anzahl der Stützen in einer Reihe. Es zählen nur die Stützen, deren Stützenlast mindestens 50 % der durchschnittlichen Stützenlast übernehmen.

Bei Auswahl der Option Schiefstellung „nach Norm" setzt das Modul auf der sicheren Seite liegend für alle markierten Stäbe eine Schiefstellung von $l/200$ an. Sollen die o.g. Abminderungen berücksichtigt werden, hat der Anwender die Möglichkeit, die Schiefstellungen für jedes Stützenbauteil manuell einzugeben (s. Bild 3).

Anfangsschiefstellungen können bei Hochbauten vernachlässigt werden, wenn die Horizontalkraft $H_{Ed} \geq 0{,}15 \cdot V_{Ed}$ beträgt. In diesem Fall kann der Ansatz der Schiefstellung vom Anwender unterdrückt werden.

Bei Tragwerken, die als unempfindlich gegenüber Verformungen gelten, kann auf den Ansatz von Vorkrümmungen verzichtet werden. Sie reagieren laut DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 5.3.2 (6) empfindlich auf Verformungen, wenn gilt:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \text{ (bei elastischen Berechnungen)}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \text{ (bei plastischen Berechnungen)}$$

mit

F_{Ed}	Bemessungswert der Einwirkung auf das Tragwerk
F_{cr}	Ideale Verzweigungslast des Gesamttragwerks auf Grundlage der elastischen Anfangssteifigkeit

Bei verformungsempfindlichen Tragwerken kann auf den Ansatz von Vorkrümmungen nur dann verzichtet werden, wenn außerdem kein Bauteilende eingespannt bzw. mit einem anderen Bauteilende biegesteif verbunden ist und der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}$ wie folgt gilt:

$$\bar{\lambda} \leq 0{,}5 \sqrt{\frac{A \cdot f_{yd}}{N_{Ed}}}$$

mit

N_{Ed}	Bemessungswert der Normalkraft
$\bar{\lambda}$	Schlankheitsgrad des Bauteils in der betrachteten Ebene unter der Annahme beidseitig gelenkiger Lagerung

Ansonsten ist rechnerisch eine Vorkrümmung anzusetzen. Wenn die Schnittgrößen unter der Annahme eines elastischen Bauteilverhaltens ermittelt werden und die Querschnittsnachweise mit der linearen Interaktion erfolgen, dürfen laut NA zu DIN EN 1993-1-1, Tab. NA.1 folgende Werte angesetzt werden:

Knicklinie nach DIN EN 1993-1-1:2010-12, Tabelle 6.1	elastische Querschnitts-ausnutzung	plastische Querschnitts-ausnutzung
	e_0/L	e_0/L
a_0	1/900	wie bei elastischer Querschnitts-ausnutzung, jedoch $\frac{M_{pl,k}}{M_{el,k}}$-fach
a	1/550	
b	1/350	
c	1/250	
d	1/150	

Tabelle 1. Vorkrümmung e_0/L von Bauteilen laut NA zu DIN EN 1993-1-1, Tab. NA.1

Innerhalb des Moduls S601.de wird bei Auswahl des Ansatzes nach Norm anhand des beschriebenen Verfahrens ermittelt, ob eine Vorkrümmung anzusetzen ist. Ggf. wird sie gemäß Tabelle 1 angesetzt.

Die Nachweise gegen Biegeknicken in der Stabwerksebene sind mit den zuvor beschriebenen Berechnungsgrundlagen zu führen. Die Fälle „Biegeknicken senkrecht zur Stabwerksebene" und „Biegedrillknicken" sind gesondert nachzuweisen. Beide Nachweise dürfen nach DIN EN 1993-1-1 unter Verwendung der Stablänge als Länge des Ersatzstabes durchgeführt werden. Bild 4 zeigt die entsprechende Auswahlmöglichkeit im Kapitel „Nachweise".

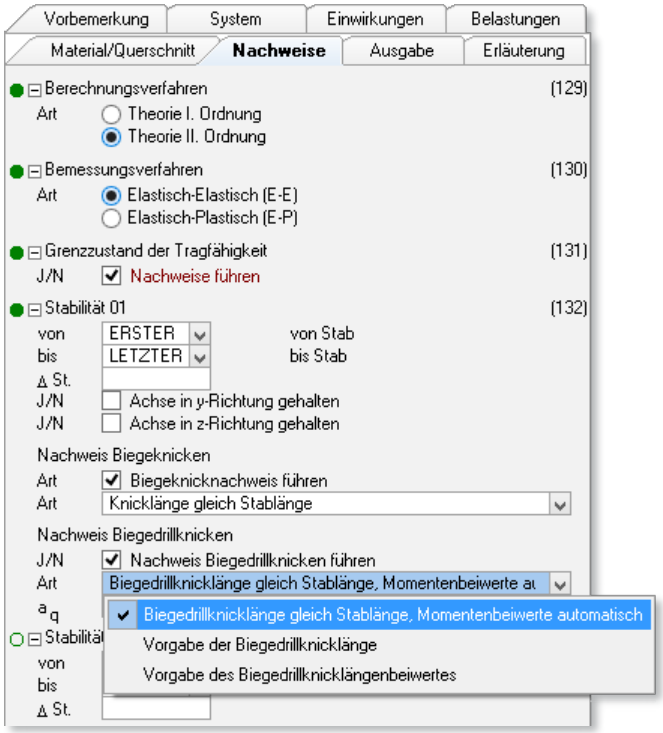


Bild 4. Auswahl der Stabilitätsnachweise

Stabilitätsnachweis als Tragwerksberechnung nach Theorie I. Ordnung mit Ersatzstabnachweisen

Alternativ zu den Stabilitätsnachweisen auf Grundlage der Schnittgrößenberechnungen nach Theorie II. Ordnung unter Ansatz von Vorverformungen können die Stabilitätsnachweise auch unter Ansatz der Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung geführt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Ersatzstabnachweise mit den tatsächlichen Knicklängen geführt werden.

Diese Knicklängen sind vom Anwender anhand der Knickfigur des Gesamtsystems abzuschätzen. Hilfestellungen hierzu gibt es zum Beispiel in [3]. Das Modul S601.de bietet die Möglichkeit der Eingabe über die Knicklänge oder über den Knicklängenbeiwert (vgl. Bild 4).

DIN EN 1993-1-1 gibt den Nachweis der Interaktion für auf Biegung und Druck belastete Bauteile mit Querschnitten der Querschnittsklassen 1-3 wie folgt an:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1{,}0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1{,}0$$

Dabei sind:

χ_y und χ_z	Abminderungsbeiwerte für Biegeknicken
χ_{LT}	Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken
$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$	Interaktionsbeiwerte

Die Interaktionsbeiwerte k_{ij} werden nach DIN EN 1993-1-1, Anhang B, Tabelle B.1 ermittelt. Dafür wird der äquivalente Momentenbeiwert C_m benötigt, der anhand der Tabelle B.3 der DIN [1] bestimmt werden kann.

Nach DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.2(2) lässt sich der Abminderungsbeiwert χ_{LT} berechnen. Der dazu erforderliche Korrekturbeiwert C_1 kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.:

Momentenverlauf	C_1
M	1,00
M	1,12
M	1,35
M, ψ·M, -1 ≤ ψ ≤ 1	1,77 – 0,77 · ψ
M	1,35

Tabelle 2. Momentenbeiwert C_1 für Einfeldträger aus [4]

Mit den so ermittelten Eingabewerten können die Stabilitätsnachweise ohne eine Stabwerksberechnung nach Theorie II. Ordnung durchgeführt werden.

Durch die Berechnung der erforderlichen Eingabewerte mag das hier beschriebene Verfahren zur Stabilitätsberechnung zunächst aufwändiger erscheinen als das im vorangegangenen Kapitel beschriebene Verfahren. Vorteile hat es aber besonders, wenn die Auflagerkräfte noch in mehrere Bauteile weitergeleitet und mit anderen Lasten überlagert werden müssen. Bei der Berechnung nach Theorie I. Ordnung werden die charakteristischen Werte der Auflagerkräfte ausgegeben. Auflagerkräfte der Berechnungen nach Theorie II. Ordnung erhält man nur als Bemessungswerte der Überlagerungen.

Spannungsnachweise

Die Spannungsnachweise werden mit dem Modul S601.de wahlweise nach dem Verfahren elastisch-elastisch oder nach dem Verfahren elastisch-plastisch geführt.

Es wird nachgewiesen, dass die Normal- und Schubspannungen oder die Vergleichsspannung die jeweiligen Grenzspannungen nach DIN EN 1993-1-1 nicht überschreiten.

Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstrauglichkeit

Ein Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist mit dem Modul S601.de auf Wunsch für alle oder für ausgewählte Stäbe möglich. Wahlweise werden eigene Grenzwerte des Anwenders oder die Beschränkungen $l/300$ für Felder und $l/150$ für Kragarme eingesetzt.

Der Anwender wählt aus, welche Kombinationsregel für den Nachweis gelten soll:

- Häufige Kombination:
$$E_d = \sum_{j\geq 1}^{n} G_{k,j} + P_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1}^{n} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$
- Quasi-ständige Kombination
$$E_d = \sum_{j\geq 1}^{n} G_{k,j} + P_k + \sum_{i\geq 1}^{n} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$
- Seltene Kombination
$$E_d = \sum_{j\geq 1}^{n} G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i>1}^{n} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Die seltene Kombination entspricht der charakteristischen Kombination nach DIN EN 1990.

Ausnutzungsüberschreitungen und -unterschreitungen

Mit der Funktion „Zulässige Ausnutzungsüberschreitungen und -unterschreitungen“ kann getrennt für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eingestellt werden, ab welchem Ausnutzungsgrad Fehlermeldungen angezeigt werden sollen. In manchen Fällen erscheint es dem Anwender möglicherweise sinnvoll, Verformungsüberschreitungen um wenige Prozentpunkte zu tolerieren.

Bei einer Vorbemessung mag es dagegen angezeigt sein, sich einen Puffer für noch unbekannte Einflüsse zu schaffen. Durch Eingabe eines negativen Wertes wird dann erreicht, dass bereits bei unter 100% Ausnutzung eine Fehlermeldung ausgegeben wird. Unabhängig von dieser Einstellung wird immer der tatsächliche Ausnutzungsgrad ausgegeben.

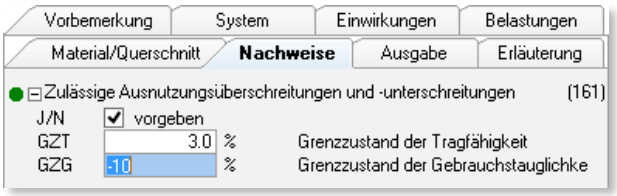


Bild 5. Definition von zulässigen Ausnutzungsüberschreitungen/ -unterschreitungen

Ausgabe

Wie von anderen Modulen gewohnt, steht eine Ausgabesteuerung zur Verfügung, die es ermöglicht, Berechnungsgrundlagen und -ergebnisse nach den eigenen Bedürfnissen prüffähig und nachvollziehbar auszugeben.

Dipl.-Ing. Katrin Büscher
mb AEC Software GmbH
mb-news@mbaec.de

Literatur

[1] DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009
[2] DIN EN 1993-1-1/NA: 2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
[3] Petersen, Christian: Stahlbau - Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Springer Vieweg Wiesbaden, 4. Auflage, 2013
[4] Wagenknecht, Gerd: Bemessungs- und Konstruktionshilfen für Stahlbauwerke nach Eurocode 3 (DIN EN 1993-1-1:2010-12 und DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12); mb AEC Software GmbH 2012

! Aktuelle Angebote

S601.de **Stahl-Bemessung, ebenes Stabwerk - EC 3, DIN EN 1993-1-1:2010-12** **399,- EUR**

Leistungsbeschreibung siehe nebenstehenden Fachartikel

Es gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen. Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Alle Preise zzgl. Versandkosten und MwSt. – Hardlock für Einzelplatzlizenz je Arbeitsplatz erforderlich (95,- EUR). Folgelizenz-/Netzwerkbedingungen auf Anfrage. – Stand: August 2014

Unterstütztes Betriebssystem: Windows 10 (64)

Preisliste www.mbaec.de