

pcae-Nachweiskonzept – eine Kurzbeschreibung

(Eine ausführliche Beschreibung finden Sie in dem Handbuch *das pcae-Nachweiskonzept*, das Sie von der **pcae**-Website (www.pcae.de) herunterladen können).

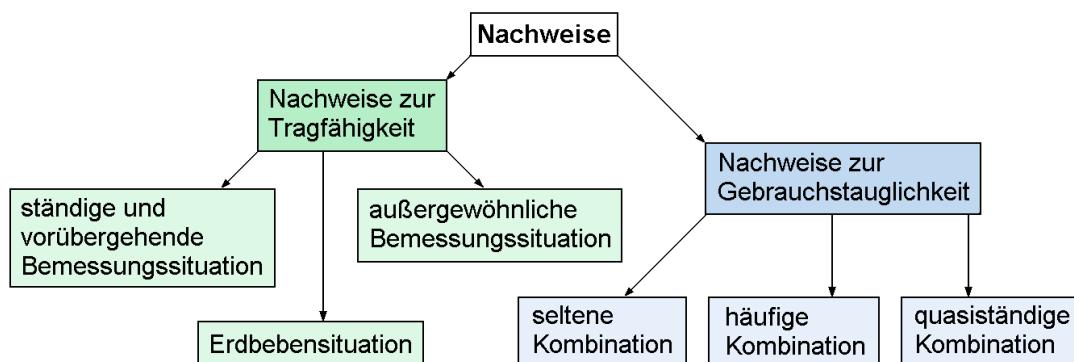
Mit der DIN 1055-100 wird das semiprobabilistische Sicherheitskonzept zur Berechnung der Bemessungsschnittgrößen eingeführt, auf das insbesondere die DIN 1045-1 bereits ausdrücklich Bezug nimmt. Die Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen n. DIN 1055-100 erfolgt mit bestimmten Eigenarten prinzipiell nach dem Schema des Eurocode.

Neuerungen gegenüber der Vorgehensweise in den alten Normen sind die Aufspaltung der Sicherheitsfaktoren auf der Last- und auf der Materialseite sowie die erforderliche Variation von führenden und nicht führenden Verkehrseinwirkungen unter Verwendung von Kombinationsbeiwerten zur wahrscheinlichkeitsbasierten Abschätzung gleichzeitig wirkender Verkehrslasten unterschiedlicher Ursachen.

Das Hauptanliegen des Benutzers moderner Statikprogramme beschränkt sich damit nicht auf die Ermittlung der Schnittgrößen diverser Lastfälle, sondern auf das gesteuerte, automatisierte Führen von Nachweisen in der von den zugrunde liegenden Normen geforderten Form. Speziell bei aus verschiedenen Materialien zusammengesetzten Bauteilen spielen hier unterschiedliche Normen eine Rolle, die ihrerseits auf unterschiedlichen Sicherheitskonzepten basieren.

pcae stellt mit der programmtechnischen Umsetzung dieses Nachweiskonzeptes eine Struktur vor, die sowohl den alten Normen (wie etwa DIN 1052) als auch neuen Vorschriften (DIN 1045-1) bis hin zu Eurocode und DIN-Fachberichten gerecht wird. Die bereitgestellten Eingabemechanismen gewährleisten bei geringem Eingabeaufwand eine korrekte und vollständige Umsetzung der aktuell geforderten Nachweisstruktur mit allen enthaltenen Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten.

DIN 1055-100 wie auch Eurocode unterscheiden auf oberster Ebene zwischen den Nachweisen zur Sicherstellung der Tragfähigkeit und denen der Gebrauchstauglichkeit. Die Tragfähigkeitsnachweise werden ihrerseits in ständige und vorübergehende sowie in außergewöhnliche Bemessungssituationen eingeteilt; die Gebrauchstauglichkeitsnachweise unterscheiden zwischen seltener, häufiger und quasi-ständiger Kombination.



Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen entsprechen den normal zu erwartenden Beanspruchungen (Eigengewicht, Verkehr, Schnee, Wind etc.) und ggf. Bauzuständen. Außergewöhnliche Bemessungssituationen untersuchen Sonderlasten (Anpralllasten, Flugzeugabstürze etc.).

Während die Differenzierung zwischen den Bemessungssituationen von der zu untersuchenden Belastungskombination und dem Ursprung ihrer Anteile abhängt, entscheidet bei den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen der spezielle Nachweistyp, ob er für eine seltene, eine häufige oder eine quasi-ständige Kombination zu führen ist.

Bei der Betrachtung der Bauwerksbelastung sprechen die Normen von Einwirkungen. Eine Einwirkung ist die Summe aller Lasten derselben Ursache und darf nicht mit einem Lastfall (Teileinwirkung) verwechselt werden. Z. B. sind bei Windlasten die Lastfälle Wind von links, Wind von rechts, Wind von vorne etc. einzeln zu untersuchen. Sie alle gehören aber zur Einwirkung der Windlasten, da der Wind die Ursache darstellt.

Während in den früheren Normen für einen Nachweis i.d.R. ein Sicherheitsfaktor an zentraler Stelle (auf der Materialseite) berücksichtigt werden musste, werden gemäß den neuen Normen Sicherheitsbeiwerte den einzelnen (mit Unsicherheiten belegten) Eingangsgrößen zugeordnet. Hierbei sind ein Teilsicherheitsbeiwert für die Materialseite, ein Teilsicherheitsbeiwert für die Lastseite und Kombinationsbeiwerte für die Lastkombinationsseite, die die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens verschiedener Einwirkungen berücksichtigen, im Einzelnen zu betrachten.

Der Teilsicherheitsbeiwert auf der Lastseite unterscheidet zum einen zwischen ständigen und veränderlichen Einwirkungen, zum anderen zwischen günstigen und ungünstigen Auswirkungen. (Die Werte für die einzelnen Sicherheitsbeiwerte sind im Handbuch *das pcae-Nachweiskonzept* abgedruckt).

Es ist plausibel, dass beim Tragfähigkeitsnachweis eine veränderliche Einwirkung nur an Stellen mit ungünstiger Auswirkung mit einem erhöhten Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden muss. An Stellen, wo sie sich günstig auswirkt, muss sie unberücksichtigt bleiben. Sich günstig auswirkende ständige Einwirkungen sind hingegen (da sie ständig wirken) mit dem Teilsicherheitsbeiwert 1.0 zu berücksichtigen. Bei ungünstiger Auswirkung ist der Faktor 1.35 zu wählen.

Die Kombinationsbeiwerte sind letztlich Abminderungsfaktoren, die der Unwahrscheinlichkeit Rechnung tragen, dass alle definierten veränderlichen Einwirkungen in voller Größe gleichzeitig wirksam sind.

Für jede der oben besprochenen Nachweisklassen ist in Eurocode / DIN 1055-100 eine für die Extremabildungsvorschrift als auch für die Bildung der Lastkollektive verbindliche Kombinationsformel angegeben. Sie liefern beim Tragfähigkeitsnachweis den Bemessungswert einer Schnittgröße. Für die Gebrauchstauglichkeitsnachweise legen sie fest, was unter seltener, häufiger bzw. quasi-ständiger Kombination zu verstehen ist.

Grenzzustand der Tragfähigkeit

für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen

$$\sum_i (\gamma_G \cdot G_{k,i}) + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i})$$

für außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$\sum_i (G_{k,i}) + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i})$$

für Erdbebensituationen

$$\sum_i (G_{k,i}) + A_{Ed} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i})$$

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

für seltene Kombinationen

$$\sum_i (G_{k,i}) + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i})$$

für häufige Kombinationen

$$\sum_i (G_{k,i}) + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i})$$

für quasi-ständige Kombinationen

$$\sum_i (G_{k,i}) + \sum_i (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i})$$

Hierin bedeuten

$G_{k,i}$ charakteristischer Wert der ständigen Einwirkung i. Werte werden in EC1 bzw. DIN 1055 festgelegt.

$Q_{k,i}$ charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung gemäß EC1 bzw. DIN 1055. Ist $i=1$, so spricht man von der führenden veränderlichen Einwirkung (Leitwert). Alle anderen veränderlichen Einwirkungen sind nicht führende Einwirkungen (Begleitwerte).

γ_G Teilsicherheitsbeiwert für eine ständige Einwirkung. Hierbei ist zu untersuchen, ob sich die zugeordnete Einwirkung i im betrachteten Bemessungspunkt günstig oder ungünstig auswirkt.

γ_Q Teilsicherheitsbeiwert für eine veränderliche Einwirkung. Hierbei ist zu untersuchen, ob sich die zugeordnete Einwirkung im betrachteten Bemessungspunkt günstig oder ungünstig auswirkt.

$\psi_{j,i}$ Kombinationsbeiwert

A_d charakteristischer Wert der Sonderlast gemäß EC1 bzw. DIN 1055.

Wenn nicht von vornherein klar ist, welche veränderliche Einwirkung führend ist (also den maßgeblichen Anteil an den Schnittgrößen in allen Punkten des Systems liefert), müssen entsprechende Alternativen untersucht werden. Sicherheit gewinnt man nur dadurch, dass jede veränderliche Einwirkung einmal den Part der führenden Einwirkung übernimmt und jeweils mit den verbleibenden veränderlichen Einwirkungen, versehen mit dem jeweiligen (abmindernden) Kombinationsbeiwert, überlagert wird. So gesehen stellen die Kombinationsformeln jeweils nur eine von n zu untersuchenden Alternativen dar, wobei n die Anzahl der Verkehrseinwirkungen ist.

Die von **pcae** eingeführte verallgemeinerte Darstellung der o. g. Formeln liefert ein Auswertungsschema für alle definierten Nachweisklassen

$$\sum_i \left(\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{F\inf} \\ \gamma_{F\sup} \end{array} \right\} S_{G,i} \right) + \left\{ \begin{array}{l} \gamma_{F\inf} \\ \gamma_{F\sup} \end{array} \right\} \psi_{\text{dom}} S_{Q,1} + \sum_{i>1} \left(\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{F\inf} \\ \gamma_{F\sup} \end{array} \right\} \psi_{\text{sub}} S_{Q,i} \right)$$

$S_{G,i}$ Schnittgrößen aus den Lastfällen der ständigen Einwirkungen

$S_{Q,i}$ Schnittgrößen aus den Lastfällen der Verkehrseinwirkungen. Mit $i=1$ sind die Lastfälle der führenden Einwirkungen zusammengefasst.

$\gamma_{F\inf}$ Teilsicherheitsbeiwert für eine günstige Auswirkung

$\gamma_{F\sup}$ Teilsicherheitsbeiwert für eine ungünstige Auswirkung

ψ_{dom} Kombinationsbeiwert für die führende Verkehrseinwirkung

ψ_{sub} Kombinationsbeiwert für nicht-führende Verkehrseinwirkung

Die Überlagerung der Schnittgrößen kann durchgeführt werden, wenn die vier Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte für jede definierte Einwirkung gegeben sind. Eine Tabelle, die diese Faktoren für die definierten Einwirkungen ausweist hat somit Definitionscharakter für die regelkonforme Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen. Mit Verweis auf die o.a. Summierungsformel nennen wir die so festgelegte Tabelle eine "Extrembildungsvorschrift".

Zu jedem auf linearen Berechnungen (mit Gültigkeit des Superpositionsgegesetzes) basierenden Nachweis reicht i.d.R. eine derartige Extrembildungsvorschrift für die erforderliche Schnittgrößenüberlagerung aus. Jedoch ist mit Sicherheit an jedem Nachweisschnitt oder auch an jeder Stelle eines Nachweisschnittes (z.B. oben/unten) eine andere Schnittgrößenkombination maßgebend.

Wem das noch nicht genug ist: Für nichtlineare Berechnungen, bei denen Schnittgrößen nicht superponiert werden dürfen, sind in der beschriebenen Kombination Lastfallkollektive zu bilden. Ein Lastkollektiv stellt jedoch immer nur gerade einen speziellen Untersuchungsfall dar. Dementsprechend müssen hinreichend viele Lastkollektive definiert werden, um möglichst alle maßgebenden Lastkombinationen zu untersuchen.

Selbst bei alltäglichen Tragwerken mit geringen Anzahlen von Einwirkungen und Lastfällen ergeben sich schnell Lastkollektivanzahlen in der Größe von zehntausenden Fällen, die selbst bei den heutigen leistungsfähigen Rechnern zu unerträglichen Rechenzeiten führen. Auch für diesen Fall stellen die Nachweisprogramme Algorithmen bereit, die Anzahl der Lastkollektive automatisiert zu reduzieren.

Begriffe

Lastbild: Ein Lastbild ist entweder eine Linienlast, eine Einzellast, eine Temperaturlast, eine Stützensenkung etc. Die Eigenschaften eines Lastbildes sind durch seine geometrische Lage, seine Lastordinaten und seine Zuordnung zum belasteten Objekt (Stab oder Knoten) sowie zu einem Lastfall gegeben.

Lastfall: Ein Lastfall ist immer eindeutig einer Einwirkung zugeordnet. Er kann beliebig viele Lastbilder aufnehmen. Die Lastbilder eines Lastfalles wirken immer gemeinsam. Ein Lastfall ist damit die kleinste auswählbare Einheit in der Ergebnisdarstellung. Der Lastfalltyp ist die wesentliche Eigenschaft eines Lastfalles. Er legt fest, ob die Schnittgrößen und Verformungen (Zustandsgrößen) des Lastfalls additiv oder gruppenweise alternativ zu überlagern sind.

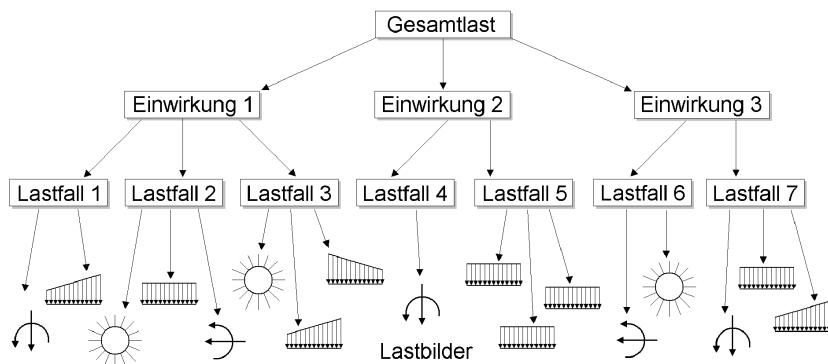
additiv: Eine additive Überlagerung besagt, dass die Verformungen und Schnittgrößen eines Lastfalles bei der Extremwertbildung immer (entweder günstig oder ungünstig wirkend) berücksichtigt werden.

alternativ: Weist der Lastfalltyp die Zuordnung zu einer alternativen Gruppe aus, so wird bei der Extremwertbildung nur der Lastfall berücksichtigt, der sich am betrachteten Punkt am ungünstigsten von allen Lastfällen dieser Gruppe herausstellt.

Einwirkung: Eine Einwirkung kann beliebig viele Lastfälle enthalten. Der Einwirkungstyp ist die wesentliche Eigenschaft einer Einwirkung. Er legt fest, ob die der Einwirkung zugeordneten Lastfälle ständige Lasten (wie Eigengewicht) oder veränderliche Lasten (Verkehrslasten) enthalten. Neben diesen Charakteristika können Einwirkungen auch zu Zwangslasten und Sonderlasten deklariert werden.

Eine Einwirkung vom Typ *Sonderlast* bewirkt bei der Lastkombination für den Tragfähigkeitsnachweis automatisch eine außergewöhnliche Bemessungssituation.

Einwirkungen vom Typ *veränderliche Last* können bzgl. der Lastart näher gekennzeichnet werden. Mit Hilfe dieser Informationen können die Programme auf die richtigen Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte zugreifen und die Extremierungstabelle automatisch füllen.



Imperfektionen: Mit Hilfe von Imperfektionen in Form von Schiefstellungen und Vorverkrümmungen werden Ungenauigkeiten in der Herstellung des Bauwerkes berücksichtigt.

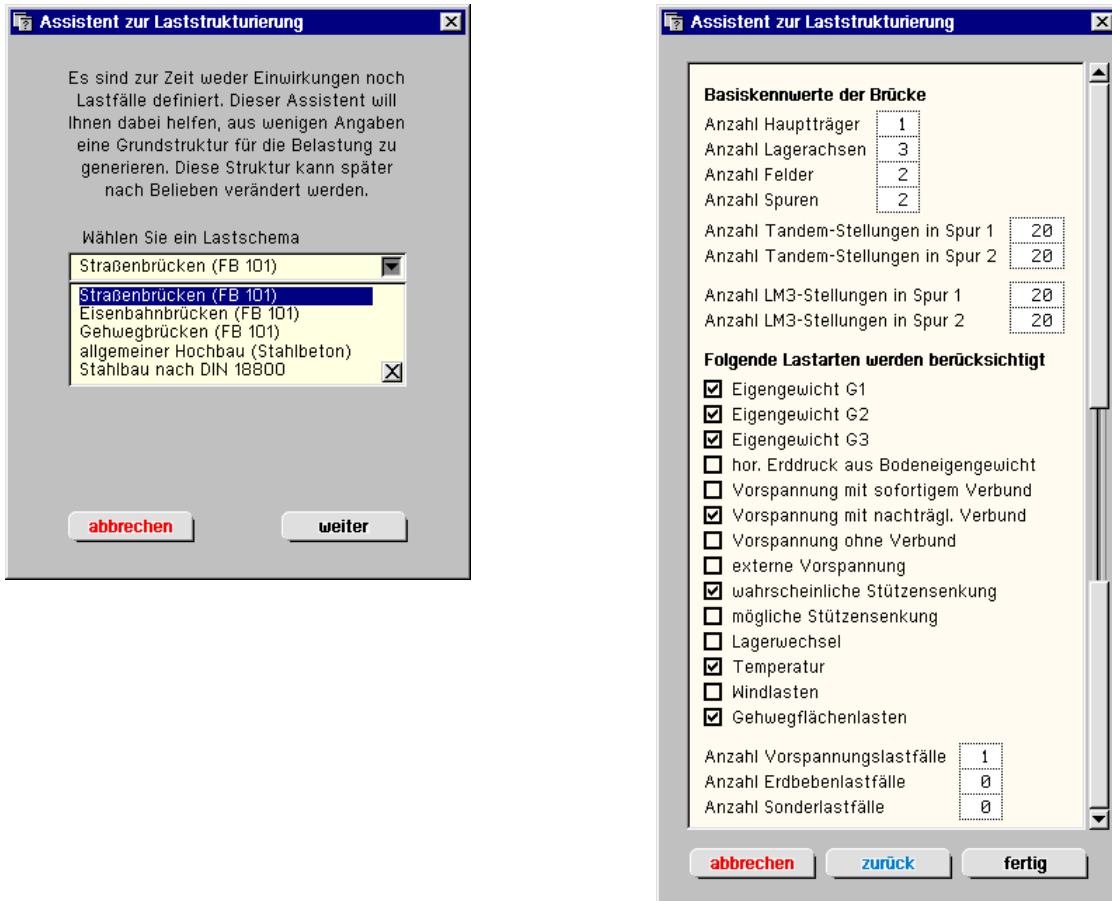
Extrembildungsvorschrift: Eine Extrembildungsvorschrift legt fest, wie linear berechnete Verformungen und Schnittgrößen überlagert werden sollen, um die zu bemessenden bzw. nachzuweisenden Größen zu erhalten. Extrembildungsvorschriften werden innerhalb der **pcae**-Programme mit Hilfe von Tabellen beschrieben, die den Einwirkungen (in Ausnahmefällen auch direkt den Lastfällen) Faktoren zuordnen. Je nach zugrunde liegender Norm bestehen die Faktoren aus Sicherheits- und Kombinationsbeiwerten. Die Tabellen werden von den Programmen mit den Normen zugeordneten unterschiedlichen Algorithmen ausgewertet. Da bei dieser Vorgehensweise das Superpositionsgebot Gültigkeit besitzen muss, kommen Extrembildungsvorschriften nur bei der linearen Berechnungen zum Einsatz.

Lastkollektiv: In einem Lastkollektiv werden unterschiedliche Lastfälle mit Faktoren gewichtet zusammengefasst. Genauer gesagt werden die Ordinaten der Lastbilder aller im Lastkollektiv aufgeführter Lastfälle mit den ihnen zugeordneten Faktoren multipliziert in einem neuen Lastfall aufsummiert. Die Verformungen und Schnittgrößen eines so definierten Lastkollektivs werden (wie Lastfälle) neu berechnet. Dies ist die einzige zulässige Methode, bei der nichtlinearen Berechnung die vorgeschriebene Faktorisierung der zugrundeliegenden Normen zu berücksichtigen. Während i.d.R. bei der linearen Berechnung sowohl Extrembildungsvorschriften als auch Lastkollektive eingesetzt werden können, sind Extrembildungsvorschriften bei der nichtlinearen Berechnung unzulässig.

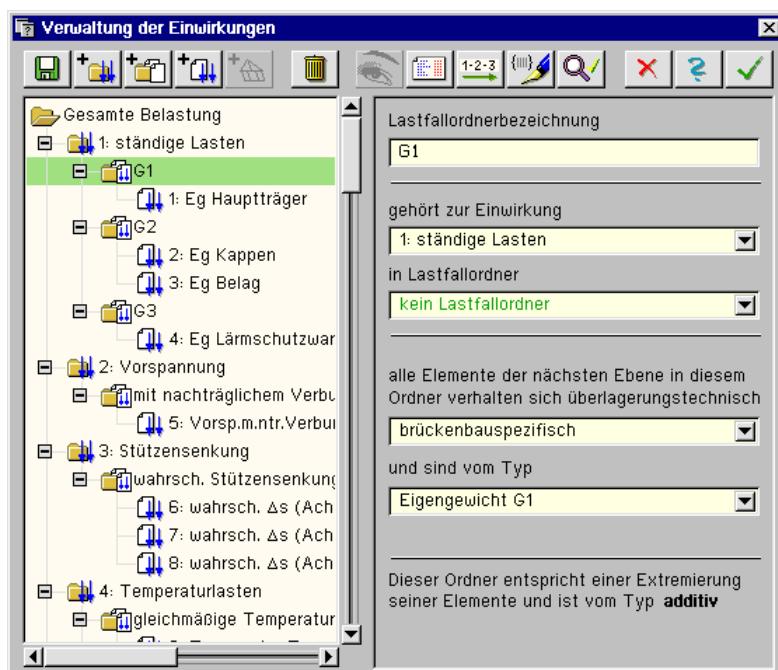
Programmtechnische Umsetzung des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes

Vor Beginn der Lasteingabe sind Einwirkungen und Lastfälle zu definieren. Danach können die Lastbilder (Einzellasten, Linienlasten ...) den einzelnen Lastfällen zugeordnet werden. Letztlich müssen Nachweise eingerichtet werden, denen dann automatisiert Extrembildungsvorschriften und/oder Lastkollektive zugeordnet werden.

Assistent zur Laststrukturierung: Zum Einrichten der Struktur von Einwirkungen und Lastfällen steht ein Assistent zur Verfügung, der einerseits Lastschemata zur Auswahl anbietet und in einem weiteren Eigenschaftsblatt Lastfallanzahlen der unterschiedlichen Einwirkungstypen des gewählten Lastschemas aufnimmt.

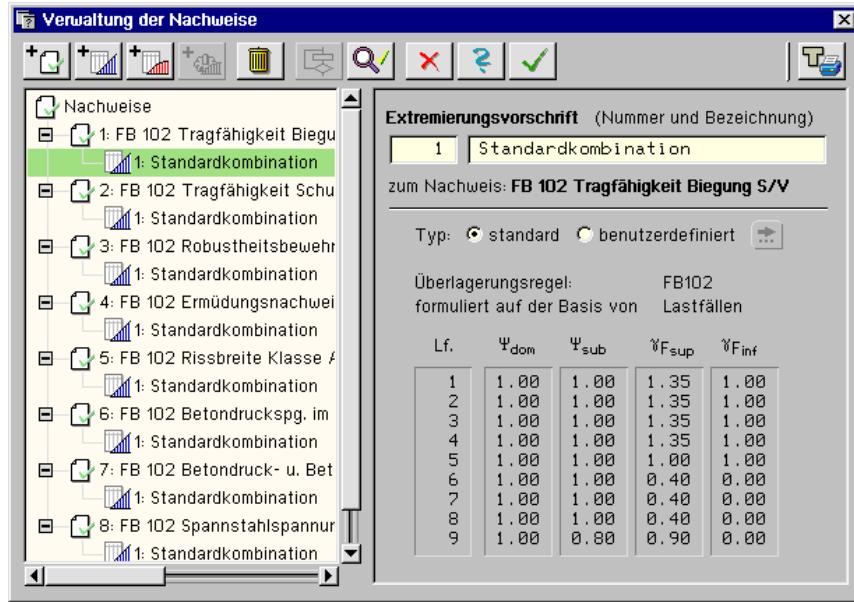


Verwaltung der Einwirkungen: Mit diesen Angaben generiert der Assistent einen kompletten, aus Einwirkungen und darunter befindlichen Lastfällen bestehenden Objektbaum.

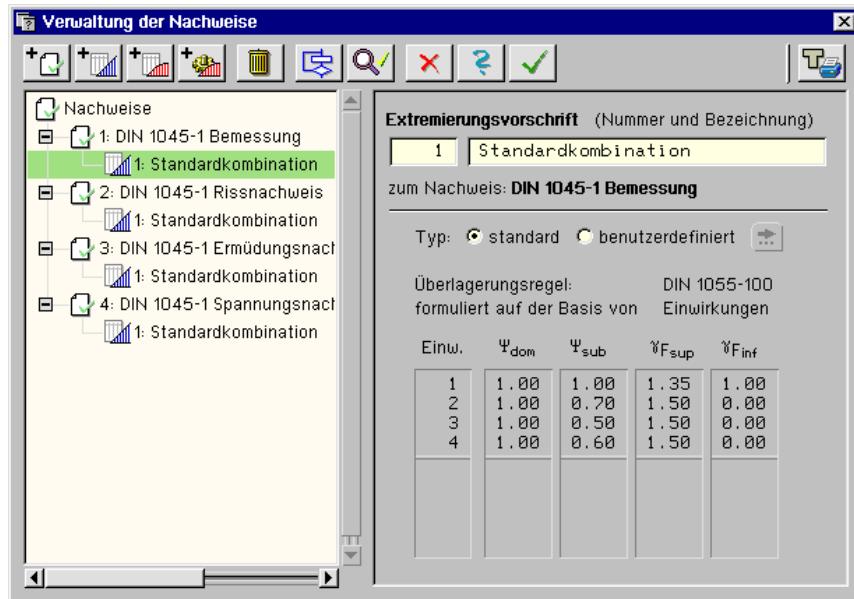


Hiermit sind bereits alle Festlegungen getroffen, um bei Definition eines Nachweises automatisch eine Extremalbildungsvorschrift zur Schnittgrößenüberlagerung bereitstellen zu können.

Verwaltung der Nachweise DIN Fachberichte: Das folgende Eigenschaftsblatt *Verwaltung der Nachweise* zeigt die automatisch erstellte Standardkombination zum DIN Fachbericht-Tragfähigkeitsnachweis Biegung ständig/vorübergehend mit der Tabelle der Lastfälle und ihren Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten.

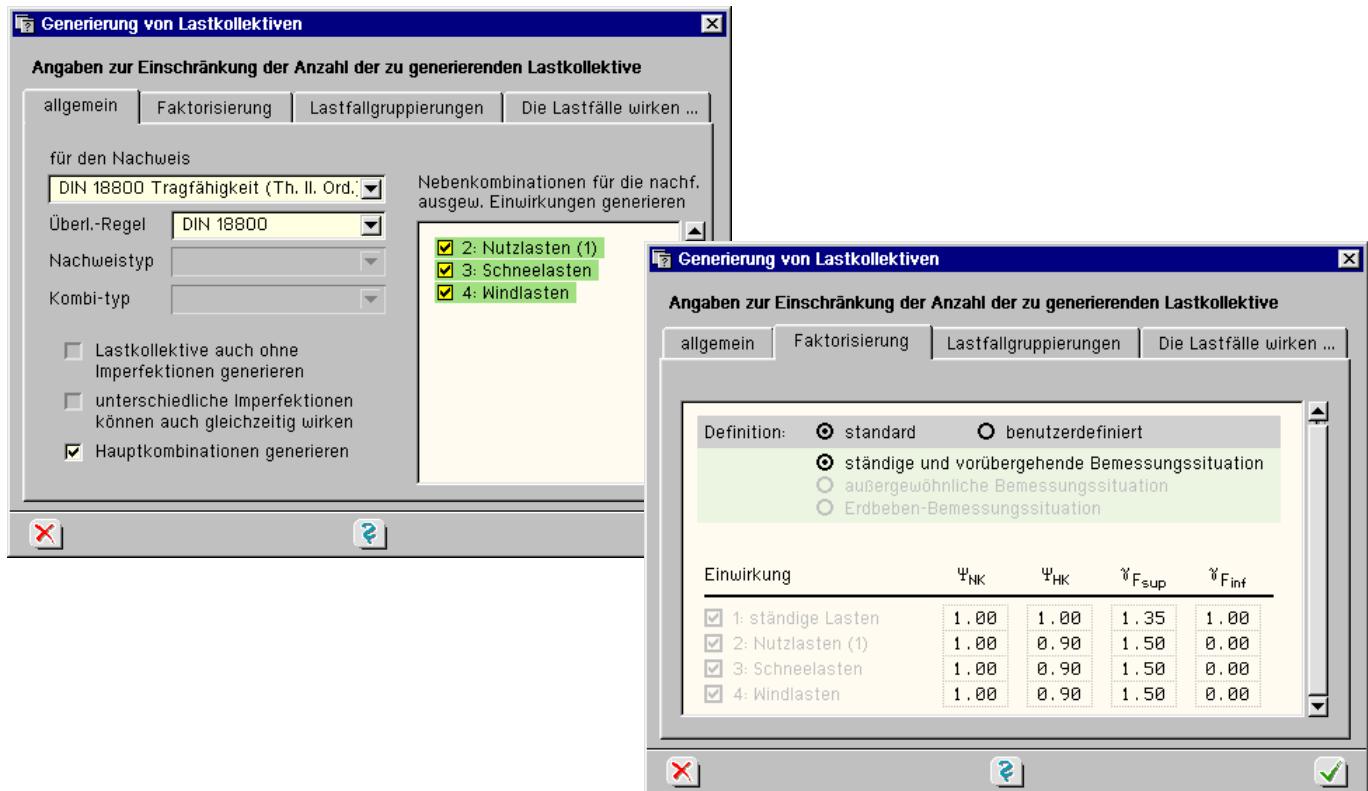


Verwaltung der Nachweise DIN 1045-1: Das folgende Eigenschaftsblatt zeigt eine Nachweisstruktur für Bemessung und Nachweise entsprechend DIN 1045-1 mit den automatisch erstellten Tabellen der Einwirkungen und ihren Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten.



Generierung von Lastfallkollektiven: Für nichtlineare Nachweise sind Lastfallkollektive zu bilden, da das Superpositionsgebot keine Gültigkeit besitzt. Zur Erzeugung der Lastkollektive steht ein automatischer Generator zur Verfügung.

Die folgenden Eigenschaftsblätter zeigen eine Generierung für einen Tragfähigkeitsnachweis nach DIN 18800.



Mit diesen Angaben werden die erforderlichen Lastfallkollektive gebildet. Eine Tabelle zeigt das Generierungsergebnis.

Faktoren	Lastfälle ...							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Lastkollektiv Auto #1	1.00	—	—	—	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #2	1.35	—	—	—	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #3	1.00	1.35	—	—	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #4	1.35	1.35	—	—	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #5	1.00	—	1.35	—	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #6	1.35	—	1.35	—	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #7	1.00	1.35	1.35	—	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #8	1.35	1.35	1.35	—	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #9	1.00	—	—	1.35	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #10	1.35	—	—	1.35	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #11	1.00	1.35	—	1.35	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #12	1.35	1.35	—	1.35	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #13	1.00	—	1.35	1.35	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #14	1.35	—	1.35	1.35	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #15	1.00	1.35	1.35	1.35	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #16	1.35	1.35	1.35	1.35	—	—	—	—
Lastkollektiv Auto #17	1.00	—	—	—	1.35	—	—	—
Lastkollektiv Auto #18	1.35	—	—	—	1.35	—	—	—
Lastkollektiv Auto #19	1.00	1.35	—	—	1.35	—	—	—
Lastkollektiv Auto #20	1.35	1.35	—	—	1.35	—	—	—

Endergebnis der Nachweise: Jede der nach den neueren Normen zu führenden Bemessungen/Nachweise liefert ein zugehöriges Teilergebnis, dessen Ergebniswerte von den Programmen zur Sichtung bereitgehalten werden.

Zu jedem Nachweis gehört aber auch eine Zusammenfassung der maximalen Ergebnisse aller zum Nachweis gehörenden Extremierungen/Lastfallkollektive.

Abschließend erfolgt als Quintessenz aus allen Bemessungen/Nachweisen eine Zusammenfassung der sich absolut maximal ergebenden Endergebnisse.