

## Programmbeschreibung

### Stab2D-NL, Version 3.0

Stand: November 2024

Autor: Dr.-Ing., Uwe Pfeiffer  
Am Schulland 15, 21224 Rosengarten  
[pfeiffer@tuhh.de](mailto:pfeiffer@tuhh.de)  
[www.u-pfeiffer.de](http://www.u-pfeiffer.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>EINGABE .....</b>	<b>5</b>
2.1	MODELLIERUNG EINES SYSTEMS .....	5
2.1.1	<i>Modellierung, kurz und knapp.....</i>	5
2.1.2	<i>Weitergehende Erläuterungen zur Generierung des Systems .....</i>	6
2.1.3	<i>Hinweise zu Theorie 1. / 2. / 3. Ordnung .....</i>	7
2.2	QUERSCHNITTSEINGABE .....	9
2.2.1	<i>Linear Elastischer Querschnitt .....</i>	10
2.2.2	<i>Nichtlinearer Stahlbetonquerschnitt (Rechteck, Kreis, Plattenbalken).....</i>	13
2.2.3	<i>INCA2-Querschnitt.....</i>	16
2.2.4	<i>Bemessungs-Querschnitt.....</i>	18
2.2.5	<i>Erläuterungen zur Wahl der Baustoffeigenschaften .....</i>	20
2.3	FEDERN / ELASTISCHE BETTUNG .....	21
2.3.1	<i>Definition der Federn.....</i>	21
2.3.2	<i>P-Y-Kurven für horizontal gebettete Pfähle.....</i>	24
2.3.3	<i>Assistent für nichtlineare Federn (Kurvenschar).....</i>	33
2.3.4	<i>Modellierung der Federn im System.....</i>	35
2.4	KNOTENEINGABE .....	38
2.5	STABEINGABE.....	41
2.6	BELASTUNG .....	43
2.7	LASTFÄLLE UND LASTFALLKOMBINATIONEN .....	46
2.8	ASSISTENTEN .....	47
2.8.1	<i>Assistent Parabel erzeugen .....</i>	47
2.8.2	<i>Assistent Linienlasten .....</i>	48
2.8.3	<i>Assistent Eigengewicht.....</i>	49
2.9	RECHENPARAMETER .....	50
2.9.1	<i>Übertragungsverfahren 1 .....</i>	50
2.9.2	<i>Übertragungsverfahren 2 .....</i>	51
2.9.3	<i>FEM-Lösung.....</i>	52
2.9.4	<i>Ergebnisse .....</i>	53
2.9.5	<i>Protokoll .....</i>	54
2.10	LASTSTUFEN .....	55
2.11	BERECHNUNG .....	57
2.12	KOORDINATENSYSTEM UND VORZEICHENREGELUNG .....	58
2.13	MINI-CAD .....	60
2.14	IMPORT VON DXF-DATEIEN.....	62
<b>3</b>	<b>BEARBEITEN VON ELEMENTEN.....</b>	<b>63</b>
3.1	SELEKTIEREN VON ELEMENTEN (MARKIEREN).....	63
3.2	EIGENSCHAFTEN DER ELEMENTE VERÄNDERN .....	64
3.3	SHORT-CUTS .....	65
3.4	VERSCHIEBEN.....	66

3.5	SPIEGELN .....	67
3.6	ROTIEREN .....	68
<b>4</b>	<b>ANSICHT / AUSGABE .....</b>	<b>69</b>
4.1	LASTFÄLLE/ KOMBINATIONEN .....	69
4.2	ZOOM .....	70
4.3	EINGABEDATEN NUMERISCH .....	70
4.4	GRAFIKEXPORT ALS BMP ODER METAFILE .....	71
4.5	DRUCKEN DER GRAFIK .....	71
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>73</b>
5.1	BERECHNUNG .....	73
5.1.1	<i>Berechnung durchführen .....</i>	<i>73</i>
5.1.2	<i>Fehlermeldungen am Ende der Rechnung .....</i>	<i>74</i>
5.2	GRAFISCHE ERGEBNISSE .....	76
5.3	NUMERISCHE ERGEBNISSE .....	79
5.4	EINZELERGEBNISSE GRAFISCH .....	80
5.5	LAST-WEG-DIAGRAMM .....	81
5.6	LADEN / SPEICHERN / LÖSCHEN .....	82
5.7	LÖSCHEN VON ERGEBNISSEN .....	83
<b>6</b>	<b>EXTRAS .....</b>	<b>84</b>
6.1	EINSTELLUNGEN .....	84
6.2	MESSEN .....	86
6.3	INCA2 STARTEN .....	87
6.4	SPRACHOPTIONEN DEUTSCH / ENGLISCH .....	87
<b>7</b>	<b>RECHENALGORITHMEN .....</b>	<b>88</b>
7.1	GRUNDLEGENDE VORGEHENSWEISE .....	88
7.2	ÜBERTRAGUNGSVERFAHREN .....	89
7.3	FINITE ELEMENT METHODE .....	90
7.4	AUFTRETENDE PROBLEME .....	90
7.5	LITERATUR .....	91
<b>8</b>	<b>BAUSTOFFE .....</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>BEISPIELE .....</b>	<b>94</b>
9.1	ALLGEMEINES .....	94
9.2	BEISPIEL 1 – ZWEIFELDTRÄGER .....	95
9.3	ELASTISCH GEBETTETE SYSTEME, SCHUTZDALBEN SPEICHERSTADT HAMBURG .....	104
9.3.1	<i>Aufgabenstellung .....</i>	<i>104</i>
9.3.2	<i>System .....</i>	<i>104</i>
9.3.3	<i>Ergebnisse .....</i>	<i>108</i>
<b>10</b>	<b>LIZENZIERUNG, ENTWICKLUNG UND AUTOR .....</b>	<b>111</b>
10.1	LIZENZIERUNG .....	111
10.2	ENTWICKLUNG .....	111
10.3	AUTOR .....	112

# 1 Einleitung

Mit dem Steigen der architektonischen Ansprüche, dem gleichzeitigen Einsatz hochfester Betone und Wahl neuer (z.B. fugenloser) Bauverfahren steigen die Anforderungen an die Güte einer statischen Berechnung. Eine übliche lineare Ermittlung der Schnittgrößen mit anschließender nichtlinearer Querschnittsbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann daher diesen Ansprüchen oft nicht mehr gerecht werden. Zu groß sind die Unterschiede zwischen den ermittelten und den wirklich vorhandenen Schnittgrößen. Die daraus resultierenden Bauteilabmessungen können nicht nur unwirtschaftlich sein, sondern andererseits auch zu unterdimensionierten Tragwerken führen.

Allgemein werden nichtlineare Berechnungen deshalb bei folgenden Problemstellungen durchgeführt:

- Stützenberechnungen: Schnittgrößen verformungsabhängig, notwendig für Sicherheit des Tragwerkes
- Verformungen von Tragwerken (Aufreißen des Betons, Schwinden und Kriechen): Ermittlung der Verformung von schlanken Bauteilen, notwendig für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit
- Neue Bauverfahren ohne Fugen: Aufreißen (Steifigkeitsabnahme) führt zu einer Reduktion der Zwangsbeanspruchungen, ermöglicht wirtschaftliche Konstruktionen
- Allgemein: wenn der Querschnitt aufreißt und eine neue Verteilung der Steifigkeiten zu einer Änderung der Schnittgrößen und zu größeren Verformungen führt

Um Stahlbetontragwerke in ihrer Gesamtheit nichtlinear untersuchen zu können, wurde das vorliegende Stabwerksprogramm Stab2D-NL entwickelt, in dem einerseits das nichtlineare Verhalten des Stahlbetons unter Biegung und Normalkraft (inklusive Schwinden und Kriechen des Betons sowie Tension Stiffening) als auch sehr große Verformungen (Theorie 3. Ordnung) berücksichtigt werden. Die Effekte aus Theorie 2. Ordnung sind damit immer berücksichtigt.

## Systembeschränkungen

Seitens des Programms gibt es die Beschränkung auf jeweils 32.000 Elemente eines jeden Typs (Knoten, Stäbe, Lasten etc.). Diese Beschränkung ist jedoch eher theoretischer Natur, da Speicherkapazität und Rechenleistung auch heutiger Rechner für eine nichtlineare Berechnung derartig großer Systeme noch nicht ausreichen werden.

## 2 Eingabe

### 2.1 Modellierung eines Systems

#### 2.1.1 Modellierung, kurz und knapp

Mit folgender Vorgehensweise erstellen Sie Systeme in Stab2D-NL und berechnen diese:

#### 1. Querschnitte erstellen (Menü *DEFINITION* => *QUERSCHNITTE*) mit folgenden Optionen:

- linear-elastischer Querschnitt: Rechteck / Kreis / Plattenbalken / I-Profil / selbstdefiniert  
*oder*
- nichtlinearer Querschnitt: Rechteck / Kreis / Plattenbalken mit nichtlinearen Baustoffeigenschaften  
*oder*
- für kompliziertere nichtlineare Querschnitte (z.B. Spannbetonträger) einen INCA2-Querschnitt erstellen und anschließend einlesen:
  - a) Projektverzeichnis auf dem Datenträger erstellen,
  - b) zum Programm INCA2 wechseln, alle benötigten Querschnitte erzeugen und im Projektverzeichnis abspeichern (richtige Baustoffeigenschaften beachten!)
  - c) zum Programm Stab2D-NL zurückkehren und leere Stab2D-NL-Datei im gleichen Verzeichnis abspeichern
  - d) bei den Querschnitten den Karteikartenreiter *INCA2* auswählen und dort die entsprechende INCA2-Datei auswählen*oder*
- Bemessungsquerschnitt: Rechteck / Kreis / Plattenbalken, linear-elastische Berechnung mit nachgeschalteter Ermittlung der erforderlichen Bewehrung  
*oder*
- nichtlinearer Schleuderbetonquerschnitt

#### 2. System erstellen

- Knoten erzeugen (per Koordinateneingabe oder Mausklick, Randbedingungen beachten)
- Stäbe erzeugen (per Maus => Knoten verbinden)
- Belastungen aufbringen, dabei möglichst gleich die Zuordnung in Lastfälle beachten
- Lastfälle in Lastfallkombinationen zusammenfassen, evtl. Beschriftung der Lastfälle ändern

#### 3. Berechnung durchführen

- Lastfälle oder Lastfallkombination markieren und Berechnung durchführen (Taste *F9*)

## 2.1.2 Weitergehende Erläuterungen zur Generierung des Systems

### Querschnitte

Bei der Erstellung von Querschnitten wird bei dem linear-elastischen Querschnittstyp ein E-Modul eingegeben. Bei allen anderen Querschnitten müssen Baustoffe für den Querschnitt und für die Bewehrung ausgewählt werden. Standardmäßig sind hier einige häufig benutzte Baustoffe vordefiniert, die im Bedarfsfall aus einer Tabelle durch den Benutzer ergänzt werden können.

### Knoten

Zuerst müssen Knoten erzeugt werden (Button [KNOTEN ERZEUGEN](#) oder im Menü [EINGABE => KNOTEN](#)). Dies kann entweder durch numerische Eingabe oder durch Klicken mit der Maus erfolgen. Das wahlweise eingeblendete Raster ist dabei behilflich. Mit einem Klick auf die rechte Maustaste kehrt man zum numerischen Eingabefenster zurück, wo die Funktion beendet werden kann.

### Stäbe

Anschließend werden die Stäbe definiert (Button [STABZUG](#) oder im Menü [EINGABE => STABZUG](#)). Nach Wahl eines Querschnitts und entsprechender Randbedingungen (Gelenke) werden die Stäbe durch einfaches Anklicken und Verbinden der einzelnen Knoten erzeugt. Mit der Wahl von unterschiedlichen Querschnitten am Anfang und am Ende werden gevoutete Träger erzeugt. Achten Sie bitte darauf, dass Anfangs- und Endquerschnitt vom gleichen Typ sind (mehr dazu beim Thema Stab erzeugen).

Mit einem Klick auf die rechte Maustaste kehrt man zum numerischen Eingabefenster zurück, wo die Funktion beendet werden kann.

### Lasten

Im Anschluss daran können die **Lasten** erzeugt werden (Knotenlast, Einzellast auf Stab, Linienlast auf Stab). Wählen Sie den entsprechenden Typ, tragen die Belastungswerte in die vorgesehenen Felder ein und klicken anschließend die Knoten oder Stäbe an, denen diese Last zugeordnet werden soll. Achten Sie bitte gleich bei der Eingabe darauf, die einzelnen Belastungen in Lastfällen zu gruppieren. Eine spätere Zusammenfassung zu Lastfallkombinationen ist so sehr viel einfacher möglich.

### Lastfallkombination

Wie bereits erwähnt, ist jetzt das Zusammenfassen der einzelnen Lastfälle zu Lastfallkombinationen sinnvoll. Im Menü unter [DEFINITION => LASTFALLKOMBINATION](#) können sie sowohl Kombinationen mit Vorfaktoren erstellen als auch die Lastfälle ordnen sowie beschriften, um später eine einfachere Zuordnung zu gewährleisten.

### Berechnungsparameter

Als letztes können die Berechnungsparameter, ein wichtiger Punkt bei nichtlinearen Berechnungen, kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden. Ungeachtet dessen wird mit den Standardparametern in den allermeisten Fällen eine Berechnung ohne Probleme möglich sein.

## Durchführen der Berechnung

Anschließend kann die Berechnung erfolgen. Wählen Sie dazu bitte im Menü [ERGEBNISSE => BERECHNUNG MIT DARGESTELLTEN LASTEN](#). Wie die Bezeichnung bereits sagt, werden nur die Lasten berücksichtigt, die gerade ausgewählt wurden. Um einen Überblick zu erhalten, wählen Sie im Menü [ANSICHT => ANZEIGE LASTFÄLLE](#) (oder Taste [F7](#)). In diesem Fenster werden alle Lastfälle und Kombinationen aufgeführt, die markierten Einträge sind aktuell sichtbar und werden damit bei der Berechnung berücksichtigt.

Vor der Berechnung wird im Programmverzeichnis eine Sicherheitskopie des aktuellen Systems abgespeichert (Dateiname `Sicherheitskopie vor dem Rechnen.s2d`).

### 2.1.3 Hinweise zu Theorie 1. / 2. / 3. Ordnung

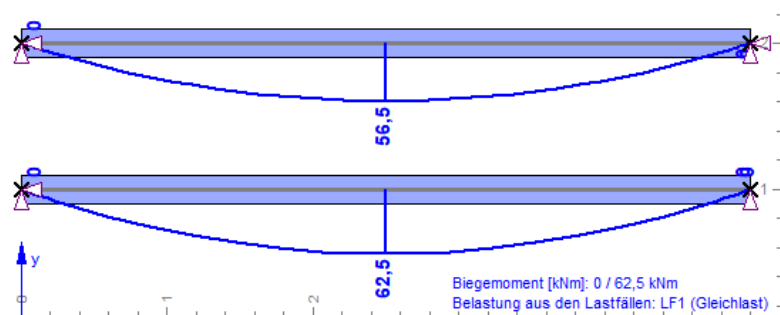
Die Berechnung mit Stab2D-NL erfolgt immer nach Theorie 3. Ordnung, also unter Berücksichtigung von großen Verformungen. Dies bedeutet, dass die Lösung und auch die Kontrolle der im Gleichgewicht stehenden Kräfte immer am verformten System erfolgen. Die Effekte aus Theorie 2. Ordnung sind damit immer berücksichtigt.

Eine Berechnung nach Theorie 1. Ordnung, also am unverformten System, ist mit Stab2D-NL nicht möglich. Hintergrund ist, dass in Stab2D-NL alle Gleichungen für das benutzte Übertragungsverfahren konsequent nur für sehr große Verformungen aufgestellt und implementiert wurden. Für einfache Systeme mit „üblichen“ Steifigkeiten ist der Unterschied meist gering, ist jedoch beim Vergleich mit anderen Programmen, die nach Theorie 1. Ordnung rechnen, zu berücksichtigen.

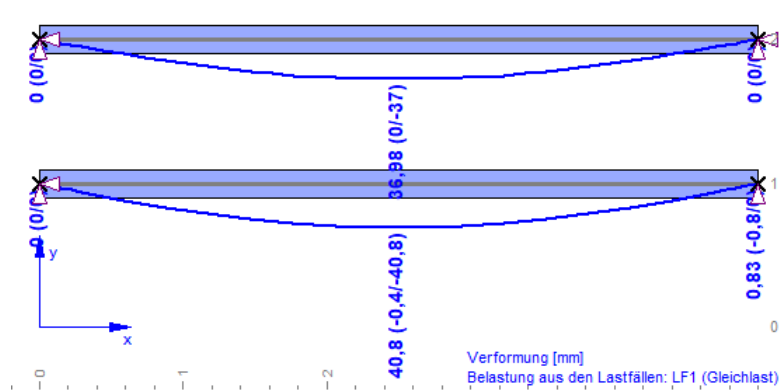
Ein einfaches Beispiel ist die Modellierung eines Einfeldträgers (0,2 m x 0,2 m,  $E = 30.000 \text{ N/mm}^2$ ) unter Gleichlast, der im oberen System auf beiden Seiten in x-Richtung gehalten wird und im unteren System nur am linken Auflager. Programme, die nur nach Theorie 1. oder 2. Ordnung rechnen, sollten für beide Systeme die gleichen Ergebnisse erhalten ( $M = q L^2 / 8 = 20 \cdot 5^2 / 8 = 62,5 \text{ kNm}$ ).



In Stab2D-NL ergibt sich aufgrund der Festhaltung in x-Richtung für das obere System eine erhebliche Zugnormalkraft im System und demzufolge ein anderes Biegemoment:

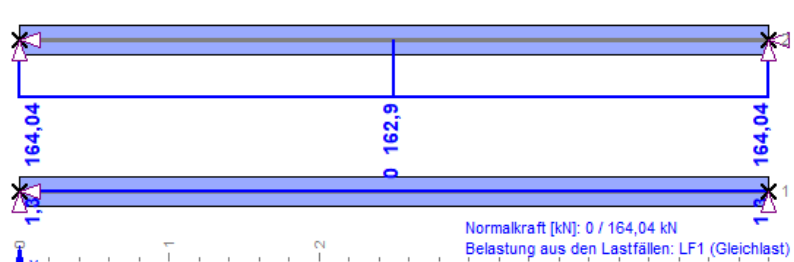


Verformungen in [mm]



Beim unteren System verschiebt sich das rechte Auflager um 0,83 mm nach innen, da sich der Balken durchbiegt. Auch im durchgebogenen Zustand ist der Balken immer noch 5 m lang, jetzt jedoch 5 m entlang der Biegelinie gemessen, daher die Verschiebung am rechten Auflager.

Beim oberen System ist die Verschiebung des rechten Auflagers durch die Festhaltung blockiert, so dass sich aufgrund dessen eine Zugkraft im Balken ergibt:



Damit lässt sich auch das Biegemoment des oberen Systems in Feldmitte erklären:

$$M = 62,5 \text{ kNm} - 0,03698 \text{ m} \cdot 162,9 \text{ kN} = 56,5 \text{ kNm}$$

Über die Stablänge ändert sich die Normalkraft geringfügig, da Normalkraft und Querkraft immer auf die lokal verformte Stabachse bezogen werden.

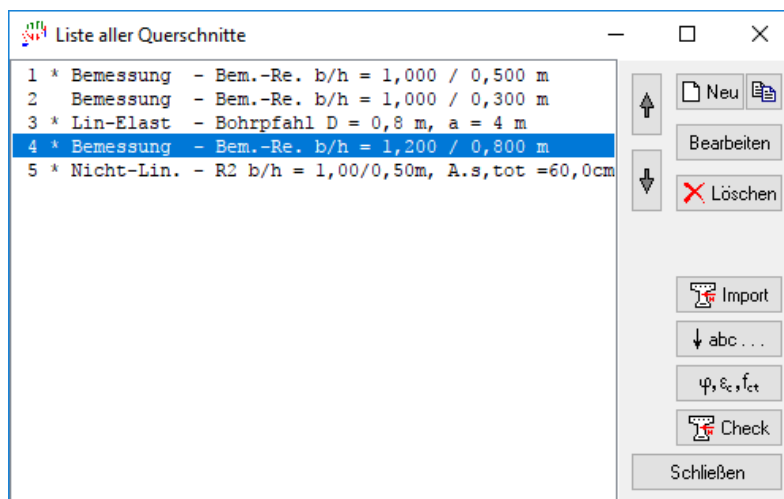


## 2.2 Querschnittseingabe

In Stab2D-NL können folgende fünf Querschnittstypen benutzt werden.

- Linear-Elastisch – Rechnung unbegrenzt linear-elastisch
- Nicht-Linear – nichtlineare Rechnung eines Stahlbetonquerschnitts
- INCA2-Querschnitt – nichtlineare Rechnung eines beliebigen INCA2-Querschnitts (symmetrisch zur z-Achse)
- Bemessungsquerschnitt – Rechnung unbegrenzt linear-elastisch, anschließend Bemessung (Ermittlung der Bewehrung)
- Schleuderbeton – nichtlineare Berechnung eines Stahlbetonquerschnittes mit Vorspannung

Das Eingabefenster finden Sie im Menü unter **DEFINITION => QUERSCHNITTE**. Es öffnet sich folgendes Fenster:



Hier sind alle bereits eingegebenen Querschnitte mit ihrem Namen aufgeführt. Ein Sternchen vor dem Namen kennzeichnet, ob der Querschnitt im System benutzt wird, ein Löschen des Querschnitts ist dann nicht möglich. Weiterhin werden die Querschnitte durchnummeriert.

Folgende Buttons stehen zur Verfügung

- **NEU** – Erstellt einen neuen Querschnitt
- **COPY** – Erstellt einen neuen Querschnitt als Kopie des markierten Querschnitts
- **BEARBEITEN** – Nach dem Selektieren eines Querschnitts kann dieser bearbeitet werden (oder in der Liste Doppelklicken)
- **LÖSCHEN** – Alle selektierten Querschnitte werden gelöscht. Es können nur die Querschnitte gelöscht werden, die im System nicht benutzt werden.
- **IMPORT** – Liest alle im gleichen Verzeichnis befindlichen INCA2-Dateien als Querschnitte ein. Als Querschnittsname wird der Dateiname (ohne Endung) vergeben. Der Bezugspunkt wird standardmäßig auf den geometrischen Schwerpunkt gesetzt.
- **ABC** – Die Querschnitte werden alphabetisch sortiert.

- **PHI, EPS, S, F, CT** - ein neues Fenster öffnet sich, in dem neue Werte für  $\varphi$ ,  $\varepsilon_s$ ,  $f_{ct}$  und GA eingegeben und allen markierten nichtlinearen Querschnitten zugewiesen werden (z.B. Rechnung für  $t = 0$  und für  $t = \infty$ )
- **CHECK** - für den markierten INCA2-Querschnitt wird eine Mk-Linien-Schar berechnet und ausgegeben. Fallende Bereiche in der Mk-Linie (negative Steifigkeiten) sind in einer Stabwerksberechnung mit Tangentensteifigkeiten nicht möglich und werden rot markiert. Liegen diese fallenden Bereiche jedoch außerhalb der zu erwartenden Schnittgrößen, so kann die Rechnung meist ohne Probleme durchgeführt werden.
- **SCHLIEßEN** - Schließt die Querschnittsliste.

## 2.2.1 Linear Elastischer Querschnitt

Querschnitt Nr. 1 bearbeiten

Bezeichnung: Stahlrohr d = 1016 mm, t = 22,2 mm, f<sub>y</sub> = 355 N/mm²

Linear-Elastisch Nicht-Linear INCA2-Querschnitt (NL) Bemessung (Lin.-Elast.) Schleuderbeton

Rohr d = 1,016 m, t = 0,022 m

Rechteck Kreis Plattenb. I-Profil Lin.-El.

☐ Vollquerschnitt ☒ Stahlrohr EN 10220

☐ Rohrquerschnitt

Durchmesser d = 1016 [mm]

Wanddicke t = 22,2 [mm]

Widerstandsmoment W = 0,016852 m³

Querschnittswerte / Steifigkeiten

Querschnittsfläche A = 0,069311 [m²]

Flächenträgheitsm. I = 0,008561 [m⁴]

Biegesteifigkeit EI = 1797818,291 [kNm²]

Schubsteifigkeit GA = 3032353,979 [kN]

Dehnsteifigkeit EA = 14555299,1 [kN]

Wichte = 78,5 [kN/m³] g = 5,441 [kN/m]

Baumstoffkennwerte linear

E-Modul E = 210000 [N/mm²]

Querdehnzahl mu\_e = 0,2 [-]

Schubmodul G = 87500 [N/mm²] ☐ ohne Schubverformung

max. Spannung sigma = 355 [N/mm²]

A = 693,1 cm²  
A.Steq = 346,6 cm²  
I = 8,56e5 cm⁴  
W = 16852 cm³

0,972 m  
22,2 mm  
1,016 m

OK Abbrechen

Für das schnelle Erstellen stehen verschiedene vordefinierte Querschnittstypen, wie Rechteck, Kreis, Plattenbalken oder Doppel-T-Profile sowie selbst definierte Profilkennwerte zur Verfügung. Die Typen Rechteck und Kreis können jeweils auch als Hohlquerschnitt definiert werden. Beim Kreis stehen ergänzend vordefinierte Rohrquerschnitte zur Verfügung, die dem üblichem Lieferprogramm für Stahlrohre bis  $\varnothing 1219$  mm entnommen sind.

Weitere Eingaben sind für den E-Modul erforderlich sowie für die Querdehnzahl, aus der das Programm automatisch den Schubmodul und die Schubsteifigkeit berechnet.

Wahlweise kann eine maximale Spannung ( $\sigma_{zulässig}$ ) eingegeben werden, mit der später bei der Berechnung die Ausnutzung  $\eta = \sigma_{vorhanden} / \sigma_{zulässig}$  ermittelt wird.

Die Querschnittswerte EI, GA und EA werden automatisch berechnet. Ergänzend werden in der grafischen Ausgabe noch einige Querschnittswerte zur Information für den Benutzer angegeben.

### Erläuterungen zur Schubsteifigkeit:


Die Schubverformung trägt meist nur einen kleinen Teil zur Gesamtverformung bei und wird daher von vielen anderen Statikprogrammen vernachlässigt. Im Programm Stab2D-NL wird die Schubverformung mit berücksichtigt, so dass beim Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Programmen oder Formeln geringe Abweichungen im Schnittgrößenverlauf und in den Verformungen auftreten können. Soll die Schubverformung auch in Stab2D-NL vernachlässigt werden, so muss der letzte Karteikartenreiter mit **LIN.-EL.** gewählt und dort bei der Stegfläche ein sehr großer Wert eingetragen werden.

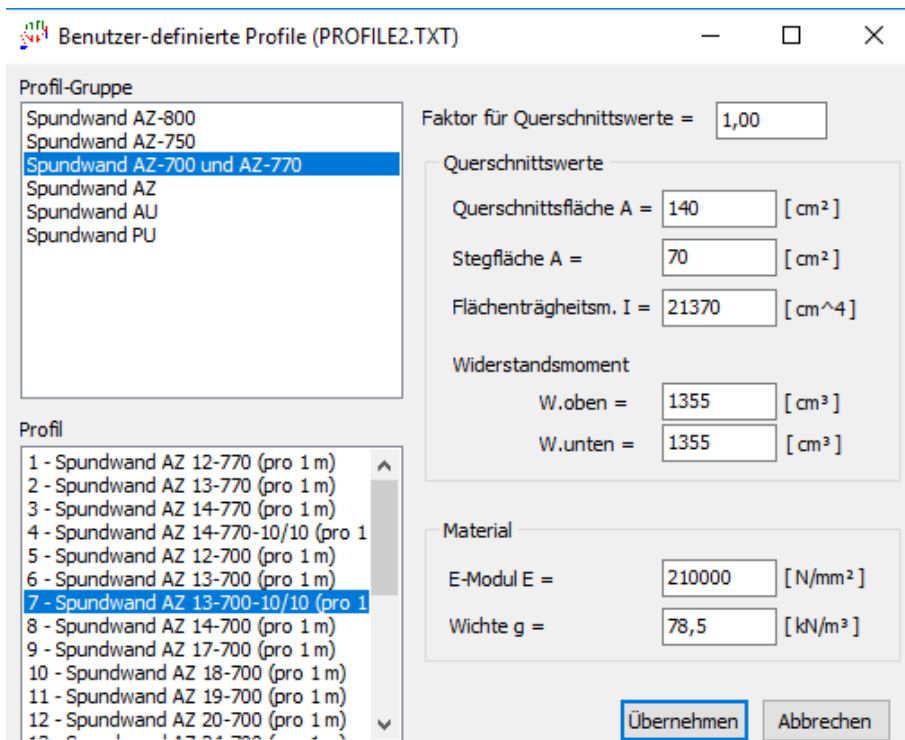
Für die anderen Querschnittstypen werden folgende Schubflächen  $A_{\text{Steg}}$  berücksichtigt:

- Rechteck => gesamter Rechteckquerschnitt
- Rechteck-Hohlkasten => seitliche Wände
- Kreis (Vollquerschnitt) => gesamter Kreisquerschnitt
- Kreisring / Rohr => 50% des gesamten Kreisringquerschnitts, dies entspricht in etwa der seitlichen Fläche, die bei einem Kreisring durch Schub im Wesentlichen beansprucht wird
- Plattenbalken => Stegfläche des Plattenbalkens, jedoch mit Gesamthöhe des Querschnittes
- I-Profil => Stegfläche,  
bei um 90° gedrehtem I-Profil => Flanschflächen
- Frei definierter linear-elastischer Querschnitt => hier kann die Stegfläche durch den Benutzer frei eingegeben werden.

Die angesetzte Fläche dient nur der Steifigkeitsermittlung. Es wird keine Schubspannung ermittelt.

### Benutzer-definierte Querschnitte/Profile

Im Karteikartenreiter **LIN.-EL.** Können über den Button  in einem separaten Fenster vordefinierte Querschnitte eingelesen werden.



**Benutzer-definierte Profile (PROFILE2.TXT)**

Profil-Gruppe

- Spundwand AZ-800
- Spundwand AZ-750
- Spundwand AZ-700 und AZ-770**
- Spundwand AZ
- Spundwand AU
- Spundwand PU

Profil

- 1 - Spundwand AZ 12-770 (pro 1 m)
- 2 - Spundwand AZ 13-770 (pro 1 m)
- 3 - Spundwand AZ 14-770 (pro 1 m)
- 4 - Spundwand AZ 14-770-10/10 (pro 1 m)
- 5 - Spundwand AZ 12-700 (pro 1 m)
- 6 - Spundwand AZ 13-700 (pro 1 m)
- 7 - Spundwand AZ 13-700-10/10 (pro 1 m)**
- 8 - Spundwand AZ 14-700 (pro 1 m)
- 9 - Spundwand AZ 17-700 (pro 1 m)
- 10 - Spundwand AZ 18-700 (pro 1 m)
- 11 - Spundwand AZ 19-700 (pro 1 m)
- 12 - Spundwand AZ 20-700 (pro 1 m)

Faktor für Querschnittswerte = 1,00

Querschnittswerte

Querschnittsfläche A = 140 [cm²]

Stegfläche A = 70 [cm²]

Flächenträgheitsm. I = 21370 [cm⁴]

Widerstandsmoment

W.oben = 1355 [cm³]

W.unten = 1355 [cm³]

Material

E-Modul E = 210000 [N/mm²]

Wichte g = 78,5 [kN/m³]

Übernehmen Abbrechen

Die hier definierten Querschnitte sind in der Datei PROFILE2.TXT abgespeichert und können durch den Benutzer selber editiert werden. Folgende Syntax ist zu berücksichtigen:

```
#      Bezeichnung einer Querschnittsgruppe
//     Kommentare, werden nicht berücksichtigt
Querschnittswerte in unten stehender Reihenfolge, durch Tabulator oder Leerzeichen getrennt
```

### Beispiel

```
#      Spundwand AZ-800
//     A.ges A.Steg I.yy      W.oben  W.unten  E-Modul  Wichte  Bezeichnung
129   64,5   41320  1840   1840   210000  78,5   Spundwand AZ 18-800 (pro 1 m)
141   70,5   45050  2000   2000   210000  78,5   Spundwand AZ 20-800 (pro 1 m)
153   76,5   48790  2165   2165   210000  78,5   Spundwand AZ 22-800 (pro 1 m)
151   75,5   55260  2330   2330   210000  78,5   Spundwand AZ 23-800 (pro 1 m)
163   81,5   59410  2500   2500   210000  78,5   Spundwand AZ 25-800 (pro 1 m)
176   88     63570  2670   2670   210000  78,5   Spundwand AZ 27-800 (pro 1 m)
//
#      Spundwand AZ-750
//     A.ges A.Steg I.yy      W.oben  W.unten  E-Modul  Wichte  Bezeichnung
171   85,5   71540  2810   2810   210000  78,5   Spundwand AZ 28-750 (pro 1 m)
185   92,5   76670  3005   3005   210000  78,5   Spundwand AZ 30-750 (pro 1 m)
198   99     81800  3200   3200   210000  78,5   Spundwand AZ 32-750 (pro 1 m)
//
```

### Eigengewicht

Im Fenster zur Querschnittsdefinition kann unten links die Wichte eingegeben werden. Über die Querschnittsfläche wird damit das Eigengewicht in [kN/m] ermittelt.

Dehnsteifigkeit EA = 14555299,1 [kN]

Wichte = 78,5 [kN/m³] g = 5,441 [kN/m]

Das Eigengewicht kann später über den Assistenten (Menü *EINGABE* => *ASSISTENT: EIGENGEWICHT*) in einem Lastfall als Streckenlast auf die jeweiligen Querschnitte aufgebracht werden.

## 2.2.2 Nichtlinearer Stahlbetonquerschnitt (Rechteck, Kreis, Plattenbalken)

Querschnitt Nr. 2 bearbeiten

Bezeichnung:  ↩ 💾

Linear-Elastisch ☒ Nicht-Linear ☐ INCA2-Querschnitt (NL) ☐ Bemessung (Lin.-Elast.) ☐ Schleuderbeton ☐

Querschnitt:

Bezugspunkt: ☒ geometr. Schwerpunkt ☐ ideeller Schwerpunkt

Vorspannung Bewehrung:  $\epsilon =$   [mm/m]

Querschnittsabmessungen

Querschnitt	Aussparung
Breite = <input type="text" value="1"/> [m]	<input type="text" value=""/> [m]
Höhe = <input type="text" value="0,5"/> [m]	<input type="text" value=""/> [m]

Anordnung und Menge der Bewehrung

☐ R1 (unten) ☒ R2 (unten+oben) ☐ R4 (u+o, seitlich)

$d_u =$   [m]  $d_o =$   [m]

$A_{s,u} =$   [cm²]  $A_{s,o} =$   [cm²]  $A_{re+li} =$   [cm²]

Baustoffe für die Berechnung der Verformung

Querschnitt:

Bewehrung:

☐ Extra Baustoffe für Nachweis der Querschnittstragfähigkeit

Querschnitt:

Bewehrung:

Simulation des zeitabhängigen Verhaltens

Schwinddehnung in [mm/m]:  Info

$\epsilon_{ps} =$   [mm/m] (negativ!)

Kriechen mit  $\phi_{eff} =$   =  quasi ständige Last  $\times$   $\phi$  aktuelle Last

Betonzugfestigkeit mit  % des Anfangswerts berücksichtigen

Grenzdehnungen, Bew. verhältnis ...

$A_c = 0,500 \text{ m}^2$   
 $A_{s,tot} = 60,0 \text{ cm}^2$   
 $\rho = 1,20 \%$

Wichte =  [kN/m³]  $g =$   [kN/m]

OK Abbrechen

Mit diesem Punkt ist eine schnelle Definition üblicher nichtlinearer Stahlbetonquerschnitte möglich. Wählen Sie die Querschnittsform sowie die Baustoffe für Beton und Bewehrung aus, geben die Bewehrungsanordnung an (R1, R2, R4) und ergänzen Sie die fehlenden Angaben für die Abmessungen und Bewehrungsmengen. Beim Klick auf den Button Grenzdehnungen öffnet sich ein weiteres Fenster, in dem die maximalen Dehnungen für Beton und Bewehrung eingegeben werden können. Diese Dehnungen werden für die Berechnung der maximalen Querschnittstragfähigkeit berücksichtigt.

Grenzdehnungen

Beton - Grenzdehnungen [mm/m]

max. Druckdehng.  $\epsilon_{cu} =$

max. Druck zentr.  $\epsilon_{cu,z} =$

☐ max. Zugdehnung

Stahl - Grenzdehnungen [mm/m]

max. Druckdehnung

max. Zugdehnung  $\epsilon_{su} =$

Bewehrungsverhältnis für Bemessung

min. Bewehrungsverhältnis  %

max. Bewehrungsverhältnis  %

OK Abbrechen

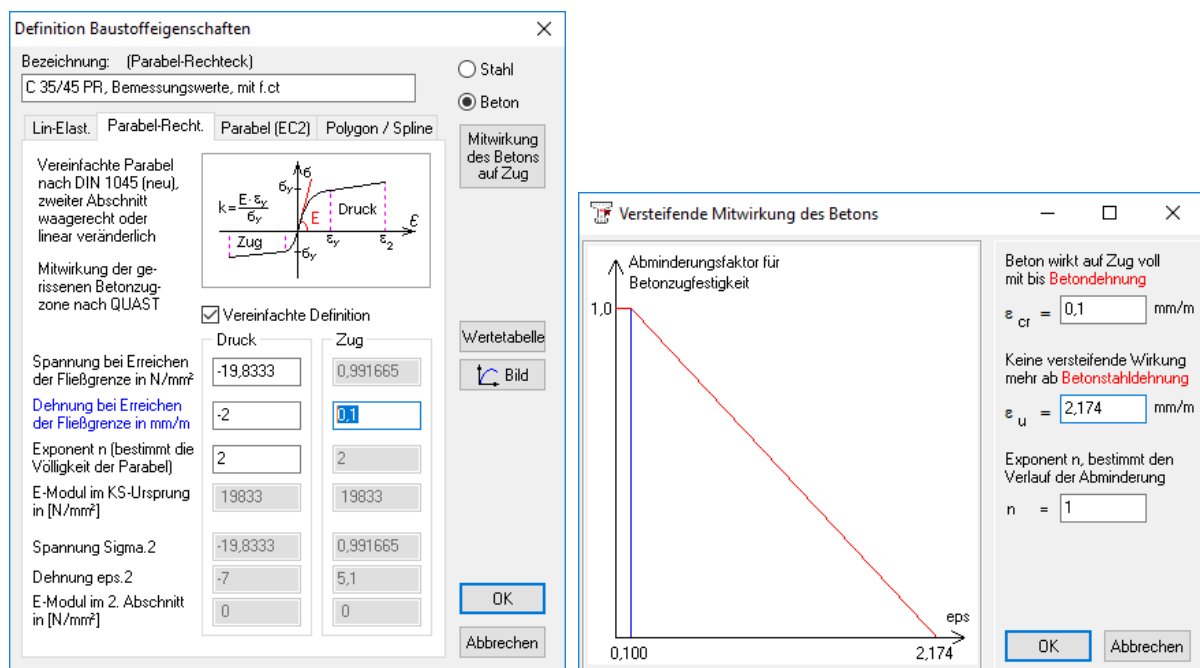
Weiterhin steht der Button **SPEICHERN UNTER** oben rechts zur Verfügung. Damit ist es möglich, den gerade eingegebenen Querschnitt als INCA2-Datei abzuspeichern und mit dem Programm INCA2 gegebenenfalls weiter zu bearbeiten.

Die Schubsteifigkeit  $GA$  wird für diesen Querschnittstyp zu  $GA = 1E12$  kN gesetzt, was einer Vernach-

lässigung der Schubverformung gleich kommt. Für übliche, schlanke Bauteile (Balken) ist diese Näherung ausreichend genau.

Als Baustoffe für die Berechnung von nichtlinearen Querschnitten werden hier üblicherweise die Mittelwerte der Baustoffeigenschaften berücksichtigt. In besonderen Fällen (z.B. Stützenberechnung) können hier auch abgeminderte Mittelwerte (= Stützenbemessungswerte) benutzt werden. Prinzipiell ist es auch möglich, normale Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften zu benutzen, falls man zum Beispiel im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine Momentenumlagerung im Stützbereich eines Durchlaufträgers erhalten möchte und die Spannungen auf die Bemessungswerte limitiert werden sollen.

Beachten Sie bei der Benutzung von Bemessungswerten, dass diese aufgrund des Zugausfalls der Betonzugzone häufig schlechter iterieren. Falls ein Querschnitt mit Bemessungswerten und als R1-Querschnitt definiert wurde, kann ein Abbruch der Berechnung möglich sein. Dies passiert dann, wenn kleine Zugkräfte auftreten, der Querschnitt entsprechend aufreißt und nur noch die einseitig eingelegte Bewehrung wirkt. In diesem Fall wirkt nur noch die punktförmige Bewehrungslage, so dass die Biegesteifigkeit zu Null wird und eine Berechnung demzufolge nicht mehr möglich ist. Abhilfe schafft hier, dass bei der Baustoffeingabe (Menü **DEFINITION** => **BAUSTOFFE**) für den Beton eine geringe Zugfestigkeit mit zum Beispiel  $\varepsilon_{cr} = 0,1 \text{ mm/m}$  eingegeben wird – siehe hierzu nachfolgende Fenster mit beispielhaft eingegebenen Werten. Dadurch wird erreicht, dass auch bei der Nutzung von Bemessungswerten die versteifende Mitwirkung des Betons berücksichtigt wird. Bei Erreichen der Fließgrenze der Bewehrung (hier mit  $\varepsilon_y = 2,174 \text{ mm/m}$  eingegeben) wird die versteifende Mitwirkung zu Null gesetzt.



## Zeitabhängiges Verhalten von Stahlbeton

Wie beim nachfolgenden INCA2-Querschnitt auch können für den nichtlinearen Querschnitt die Werte für eine Rechnung für  $t = 0$ , für  $t = \infty$  bzw. für einen beliebigen Zeitpunkt  $t$  eingegeben werden (Schwinden, Kriechen, Abnahme der Betonzugfestigkeit).

Für  $t = 0$  sind dies üblicherweise folgende Werte:

Simulation des zeitabhängigen Verhaltens

Schwinddehnung in [mm/m] Info

eps.s =  [ mm/m ] (negativ!)

Kriechen mit phi.eff =  =  $\frac{\text{quasi ständige Last}}{\text{aktuelle Last}} \times \text{phi}$

Betonzugfestigkeit mit  % des Anfangswerts berücksichtigen

Für  $t = \infty$  sind spezifisch für den jeweiligen Querschnitt die Werte für das Schwinden und für das Kriechen zu ermitteln. Beim Kriechbeiwert ist der effektive Kriechbeiwert einzugeben, der das Verhältnis zwischen ständiger Last und der aktuellen Belastung berücksichtigt. Damit ist der Kriechbeiwert von der jeweils gewählten Lastfallkombination abhängig, so dass der Beiwert prinzipiell jeweils angepasst werden müsste.

Die Betonzugfestigkeit wird z.B. bei der Berechnung eines Kranbahnbalkens durch häufiges Überfahren des Kranes reduziert. Sinnvoll sind hier Werte für eine Reduktion auf 50 bis 70%.

Beispielhaft für  $t = \infty$ :

Simulation des zeitabhängigen Verhaltens

Schwinddehnung in [mm/m]

eps.s =  [mm/m] (negativ!)

Kriechen mit phi.eff =  =  $\frac{\text{quasi ständige Last}}{\text{aktuelle Last}} \times \text{phi}$

Betonzugfestigkeit mit  % des Anfangswerts berücksichtigen

[Info](#)

Ergänzend kann oben rechts eine Vorspannung der Bewehrung definiert werden. So können beispielsweise einfache Spannbetonquerschnitte modelliert werden, die nur eine Spannstahlbewehrung enthalten.

Der Punkt **Extra Baustoffe für Nachweis der Querschnittstragfähigkeit** ist derzeit noch nicht fertig programmiert und daher grau.

### 2.2.3 INCA2-Querschnitt

Querschnitt Nr. 1 bearbeiten

Bezeichnung  [Name](#) [Icon](#)

Linear-Elastisch Nicht-Linear **INCA2-Querschnitt (NL)** Bemessung (Lin.-Elast.) Schleuderbeton

Liste der INCA2-Querschnitte im Projekt-Verzeichnis  
D:\Daten - Uwe\Delphi XE2\Stab2D-NL\

▼

Bezugspunkt  
☒ geometr. Schwerpunkt.  
☐ ideeller Schwerpunkt  
☐ Koordinatenursprung

Schubverformungen  
☒ Schubverf. vernachlässigen  
☐ linear-elastisch mit GA  
☐ GA mit Abminderung  
 GA =  kN

Simulation des zeitabhängigen Verhaltens

Schwinddehnung in [mm/m]

eps.s =  [mm/m] (negativ!)

Kriechen mit phi.eff =  =  $\frac{\text{quasi ständige Last}}{\text{aktuelle Last}} \times \text{phi}$

Betonzugfestigkeit mit  % des Anfangswerts

[Info](#)

Querschnittshöhe = 0,8 m  
 z.oben = 0,400 m / z.unten = 0,400 m  
 d.1 = 0,05 m / d.2 = 0,05 m  
 A.c = 0,32 m<sup>2</sup>

Wichte =  [kN/m<sup>3</sup>] g =  [kN/m]

[OK](#) [Abbrechen](#)

Diagramm des Querschnitts mit Bewehrungspunkten (1) bis (12) und Dimensionen (0,4 m Breite, 0,8 m Höhe).

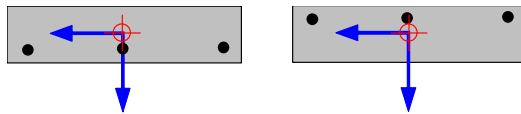
Baustoffe: [1] - Betonstahl BSt 500 BiLinear  
 [2] - C30/37 PR  
 Bewehrung: [1] - A.s = 3,14 cm<sup>2</sup>, Mat-Nr. 1  
 [2] - A.s = 25,13 cm<sup>2</sup>, Mat-Nr. 1  
 [3] - A.s = 12,57 cm<sup>2</sup>, Mat-Nr. 1  
 Polygone: [1] - A = 0,32 m<sup>2</sup>, Mat-Nr. 2  
 A.ges = 0,32 m<sup>2</sup> / A.s.ges = 40,84 cm<sup>2</sup> / roh = 1,28 %

In einer aufzuklappenden Liste werden alle in diesem Verzeichnis befindlichen INCA2-Dateien aufgelistet. Wählen Sie die gewünschte Datei aus und bestimmen Sie den Bezugspunkt. Für die meisten Berechnungen wird die Wahl des geometrischen Schwerpunktes am günstigsten sein, nur bei veränderlichen Querschnitten entlang eines Stabzuges (z.B. veränderliche Plattenbreite bei Plattenbalken)

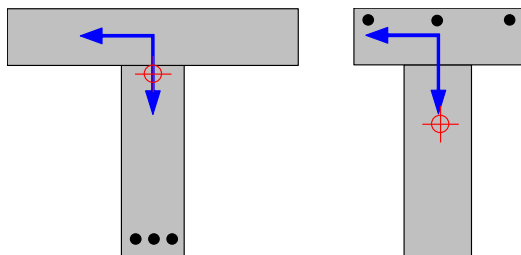


sollte der Nutzer die Lage des Bezugspunktes genauer analysieren und per Lage des Koordinatenursprungs diesen bestimmen.

Beispiel durchlaufende Platte, überall ist der Schwerpunkt gleich dem Bezugspunkt



Beispiel Plattenbalken, Schwerpunkt ändert sich, als Bezugspunkt sollte der Koordinatenursprung gewählt werden



Die Schubsteifigkeit kann auf drei verschiedene Arten definiert werden:

- Vernachlässigung der Schubverformung (intern wird mit  $GA = 1E12$  kN gerechnet)
- Berücksichtigung mit einem konstanten Wert für  $GA$  gemäß Eingabe
- Die dritte Option **GA MIT ABMINDERUNG** sieht eine interne Reduzierung der gewählten Schubsteifigkeit  $GA$  vor. Dazu wird während der Rechnung der aktuelle Dehnungszustand ausgewertet und die linear elastische und die aktuelle tangentielle Biegesteifigkeit ermittelt. Die vereinfachte Annahme ist jetzt, dass die Schubsteifigkeit auf den gleichen prozentualen Wert abfällt wie die Biegesteifigkeit.

Weiterhin kann in dieser Eingabemaske Schwinden und Kriechen berücksichtigt werden, wie dies bereits für den **NICHTLINEAREN QUERSCHNITT** erläutert wurde. Mit der Eingabe von  $\varepsilon_s$  für das Schwinden wird Programm-intern eine Druckvordehnung auf die Bewehrung aufgebracht. Die Bewehrung möchte sich gerne wieder ausdehnen, wird jedoch vom Beton daran gehindert, in dem daher Zugspannungen entstehen. Das Schwinden, ebenso wie eine Vorspannung oder Vorverkrümmung des INCA2-Querschnitts werden während der Rechnung schrittweise aufgebracht. Dazu steht bei der Definition der Laststufen die Möglichkeit zur Verfügung, entsprechend eines bestimmten Lastverlaufes Schwinden etc. aufzubringen. Der Grund hierfür ist, dass Schwinden oder Vorspannung beim Aufbringen in einem Lastschritt meist zu einer starken Verkürzung des Balkens führen, freie Verformbarkeit vorausgesetzt. Durch die erste Rechnung im Volleinspannzustand ergibt sich jedoch eine sehr hohe Normalkraft (Zug), die evtl. zu Problemen bei der Konvergenz führen kann.

Bei Eingabe eines Kriechbeiwertes werden die Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons in Richtung der Dehnungen mit dem Faktor  $(1 + \varphi)$  gestreckt. Das Strecken erfolgt entweder von Beginn der Rechnung an oder frei wählbar einem Lastverlauf zugeordnet.

Da die Zugfestigkeit des Betons und damit die versteifende Mitwirkung in der gerissenen Betonzone im Laufe der Zeit abnimmt (über Jahre bei Dauerbelastung, Kranüberfahrten etc.), kann über

die Eingabe eines prozentualen Wertes die Höhe der aktuell wirkenden Zugfestigkeit bestimmt werden.

Für weitergehende Erläuterungen sowie Beispiele schauen Sie bitte im Kapitel [MODELLIERUNG DER BAUSTOFFE, 6.10 SCHWINDEN UND KRIECHEN](#) nach.

Mit dem kleinen Button [NAME](#) oben rechts kann der Name des Querschnitts vom Programm generiert werden. In diesem Fall wird einfach der INCA2-Dateiname übernommen.

Im rechten Fenster wird eine Grafik des Querschnitts mit den wichtigsten Eingabewerten ausgegeben. Insbesondere kann darüber geprüft werden, welche Baustoffe im INCA2-Querschnitt definiert sind.

Unten links kann die Wichte eingegeben werden. Mit der ermittelten Fläche (Summe aller Polygone) wird programmintern das Eigengewicht des Querschnitts pro laufenden Meter berechnet. Falls der INCA2-Querschnitt z.B. ein Verbundquerschnitt aus Betonquerschnitt und Stahlträger ist, muss die Wichte im Verhältnis der Flächen angepasst werden.

## 2.2.4 Bemessungs-Querschnitt

**Querschnitt Nr. 1 bearbeiten**

Bezeichnung:  ← Name 📁

Linear-Elastisch Nicht-Linear **INCA2-Querschnitt (NL)** Bemessung (Lin.-Elast.) Schleuderbeton

Querschnitt: **Rechteck**

Querschnittsabmessungen Rechteck / Hohlkasten

	Querschnitt	Aussparung
Breite b =	<input type="text" value="0,5"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [m]
Höhe h =	<input type="text" value="0,3"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [m]

E-Modul =  [N/mm²] ⓘ

Anordnung der Bewehrung

d<sub>unten</sub> =  [m] ☒ R1, Bew. jeweils auf Zugseite

d<sub>oben</sub> =  [m] ☐ R2, symmetrische Bewehrung

☐ R4, allseitige Bewehrung

Baustoffe für die Bemessung

Beton:  ▼

Stahl:  ▼

Steifigkeit

Querschnittsfläche A = 0,15 m²

Trägheitsmoment I = 0,001125 m⁴

Biegesteifigkeit EI = 25875 kNm²

Schubsteifigkeit GA = 1437500 kN

Dehnsteifigkeit EA = 3450000 kN

Die Berechnung der Schnittgrößen erfolgt mit linear-elastischen Steifigkeiten. Anschließend erfolgt eine Bemessung mit Ermittlung der Bewehrungsmenge.

Bewehrung einseitig, bei negativem Moment auf der Oberseite

Wichte =  [kN/m³] g =  [kN/m]

Bei Wahl dieses Typs wird ein linear-elastischer Querschnitt erzeugt (wie Typ 1). Im Anschluss an die Stabwerksberechnung wird für diesen Querschnitt mit den angegebenen Baustoffeigenschaften die erforderliche Bewehrung ermittelt. Sinnvollerweise sollten deshalb als Baustoffe die Bemessungswerte gewählt werden.

Der E-Modul des Betons ist einzugeben. Für eine bessere Näherung der Schnittgrößen und Verformungen kann hier ein abgeminderter E-Modul angegeben werden, der das Aufreißen des Betons in etwa berücksichtigt. Als erste Näherung bietet sich  $B_{II} = 70\% \cdot B_I$  an und damit ca.  $E_{II} = 70\% \cdot E_I$ .

Für die Rechteckquerschnitte und für den Plattenbalken kann die Anordnung der Bewehrung gewählt werden:

- **R1** – Die Bewehrung wird immer auf der gezogenen Seite des Querschnittes angeordnet und dafür die Menge ermittelt. Bei einem positiven Moment (Zugzone unten) wird die Bewehrung also auf der Unterseite angeordnet. Bei einem negativen Biegemoment entsprechend auf der Oberseite, dann mit  $d_{oben}$  als Randabstand.
- **R2** – Obere und untere Bewehrung werden in gleicher Menge angeordnet (50% + 50%). Die nach der Berechnung angegebene Bewehrung ist die Gesamtmenge aus oberer + unterer Bewehrung ( $A_{s,ges} = A_{unten} + A_{oben}$ ).
- **R4** – Obere und untere sowie die seitliche Bewehrung werden in gleicher Menge angeordnet. Die nach der Berechnung angegebene Bewehrung ist die Gesamtmenge aus  
 $A_{s,ges} = A_{unten} + A_{oben} + A_{links} + A_{rechts}$  (alle Teilmengen sind gleich)

Durch Klick auf den Button **GRENZDEHNUNGEN, BEW. VERHÄLTNIS** öffnet sich ein weiteres Fenster mit den entsprechenden Eingabewerten.

The dialog box 'Grenzdehnungen' has the following fields:

- Beton - Grenzdehnungen [mm/m]:**
  - max. Druckdehng.  $\epsilon_{cu}$ : -3,5
  - max. Druck zentr.  $\epsilon_{cu,z}$ : -2
  - ☐ max. Zugdehnung: 100
- Stahl - Grenzdehnungen [mm/m]:**
  - max. Druckdehnung: -5
  - max. Zugdehnung  $\epsilon_{su}$ : 25
- Bewehrungsverhältnis für Bemessung:**
  - min. Bewehrungsverhältnis: 0,3 %
  - max. Bewehrungsverhältnis: 4 %
- Buttons: OK, Abbrechen

Mit dem minimalen und maximalen Bewehrungsverhältnis definieren Sie die minimale und maximale Bewehrung. Ist die erforderliche Bewehrung kleiner als die minimale Bewehrung, wird die minimale Bewehrung gewählt und der Ausnutzungsgrad für diese Bewehrungsmenge bestimmt und ausgegeben. Gleiches gilt beim Überschreiten des maximalen Bewehrungsverhältnisses. Der Querschnitt wäre in so einem Fall nicht tragfähig.

Die Ermittlung der Bewehrung ist ein iterativer Rechengang. Die Bewehrungsmenge wird solange variiert, bis die Sicherheit genau 1,0 ist. Es kann daher passieren, dass diese Iteration in einigen Fällen nicht konvergiert. In diesem Fall wird in einer Meldung nach der Rechnung darauf hingewiesen.

Mit dem Button **NAME** oben rechts kann der Name des Querschnitts vom Programm generiert werden, der die wichtigsten Eingabedaten enthält.

### 2.2.5 Erläuterungen zur Wahl der Baustoffeigenschaften

Um ein Stahlbetontragwerk nichtlinear berechnen zu können, ist es wichtig, für die Querschnitte die richtigen Baustoffeigenschaften zu wählen. Nach dem aktuellen Sicherheitskonzept müssen generell die relevanten (!) streuenden Einflussgrößen mit einem Sicherheitsbeiwert beaufschlagt werden. Für einen Durchlaufträgers ist es unerheblich, ob der E-Modul des Betons ein wenig größer oder kleiner ist, die Schnittgrößen ändern sich dadurch nicht oder nur sehr unmerklich. Im Durchschnitt wird der Beton daher die im Labor ermittelten Eigenschaften besitzen, so dass man für die Schnittgrößenermittlung die charakteristischen Werte für die Verformung, in diesem Fall die Mittelwerte der Baustoffeigenschaften benutzen sollte.

Liegt jedoch ein verformungsbeeinflusstes Problem vor (Stützenberechnung), so hängen die Schnittgrößen in starkem Maße von den Baustoffeigenschaften ab. Aus diesem Grund müssen die charakteristischen Werte der Verformung (Mittelwerte) mit einem Teilsicherheitsbeiwert beaufschlagt werden. Beim Beton unterliegt sowohl die Festigkeit als auch der E-Modul starken Streuungen, weshalb beide Werte abgemindert werden. Beim Betonstahl ist der E-Modul auch bei schlechten Festigkeitswerten nahezu konstant mit  $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$ , weshalb in diesem Fall nur die Festigkeit bei gleichbleibendem E-Modul abgemindert werden muss.

Je nach Anwendungsfall müssen also die richtigen Baustoffkennwerte im INCA2-Datensatz oder in Stab2D-NL benutzt werden. Es empfiehlt sich bei der Verwendung von INCA2-Querschnitten, auch die Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften mit in den INCA2-Datensatz aufzunehmen, da so im Anschluss an die Schnittgrößenermittlung schnell und einfach ein Sicherheitsnachweis in INCA2 durchgeführt werden kann.

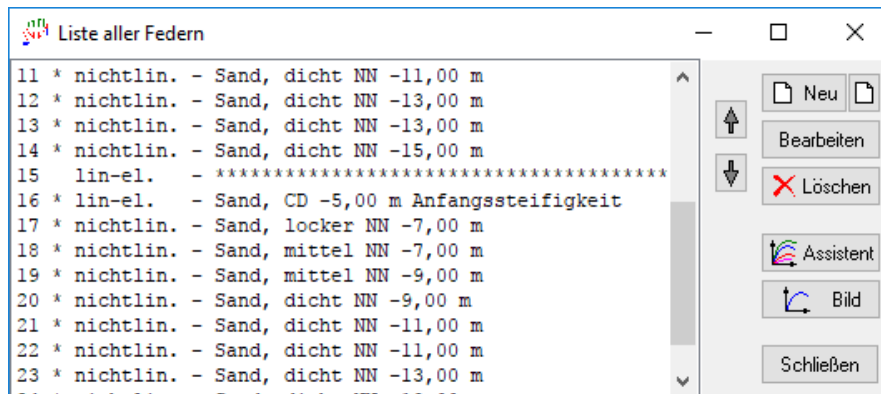
Die in der Normung verankerten Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigen die üblichen Streuungen für die Baustoffeigenschaften von Beton und Stahl. Falls eine besondere Güteüberwachung z.B. in einem Fertigteilwerk stattfindet und eine gleichbleibende Qualität mit sehr geringen Streuungen nachgewiesen wird, so können im Einzelfall auch geringere Teilsicherheitsbeiwerte mit der Prüfbehörde vereinbart werden.

Für weitergehende Erläuterungen öffnen Sie bitte die beiliegende Hilfe-Datei für INCA2 in Kapitel 6.5. Hier finden Sie detaillierte Erläuterungen zu den Baustoffeigenschaften.

## 2.3 Federn / Elastische Bettung

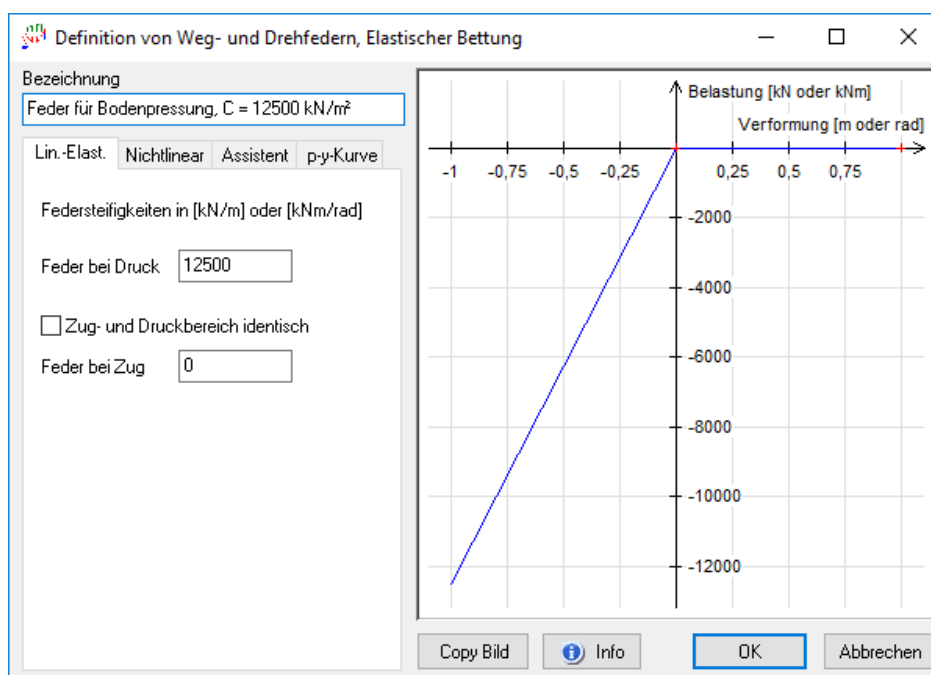
### 2.3.1 Definition der Federn

Für die Arbeit mit Weg- und Drehfedern oder mit einer elastischen Bettung müssen zuerst die Federkennwerte (Steifigkeiten bzw. Last-Verformungs-Kurven) definiert werden. Mit Wahl des Menüpunktes **DEFINITION => FEDER / ELAST. BETTUNG** öffnet sich folgendes Fenster mit einer Liste aller bisher definierten Federn:

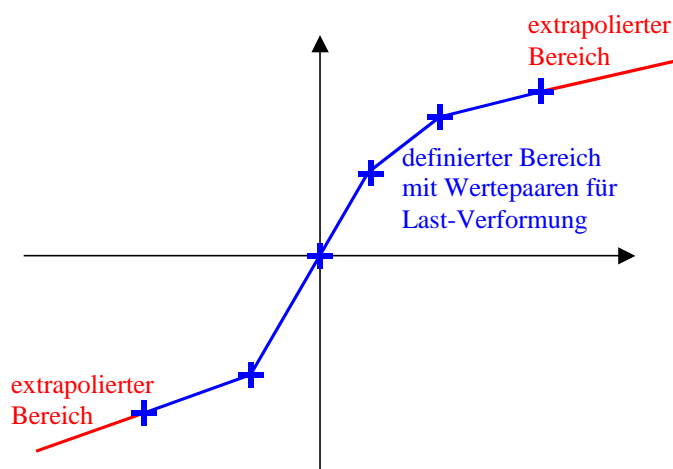
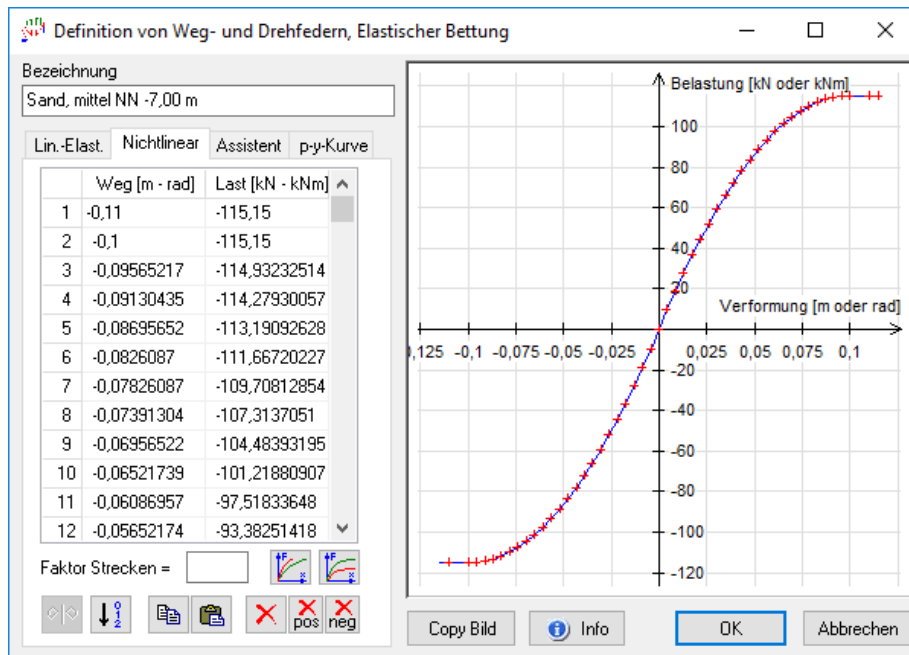


Hier haben Sie die Möglichkeit, neue Federn zu erstellen, bestehende zu verändern oder zu löschen. Bereits benutzte Federn werden mit einem Sternchen (\*) markiert. Grundlegend können linear-elastische sowie nichtlineare Federn definiert werden.

Bei der **LINEAR-ELASTISCHEN FEDER** können bereits die Druck- und Zugbereiche getrennt angegeben werden, so dass z.B. für ein Fundament nur eine Druckbettung zur Verfügung steht:



Für eine **NICHTLINEARE FEDER** werden bis zu 50 Wertepaare der Last-Verformungskurve als Polygonzug angegeben. Zu beachten ist, dass bei einer Berechnung mit dieser Kurve der jeweils erste und letzte Abschnitt extrapoliert wird, wenn die aktuelle Verformung kleiner bzw. größer als der jeweilige Wert ist. Weiterhin muss die Feder durch den Koordinatenursprung gehen (0 / 0).



Bei symmetrischen Last-Verformungs-Kurven ist es möglich, nur eine Seite der Kurve einzugeben und die andere Seite mit dem Button **SPIEGELN DER WERTE** zu erzeugen. Wenn bereits beide Seiten eingegeben wurden oder bereits mehr als 25 Wertepaare vorhanden sind, dann ist dieser Knopf deaktiviert.

Weiterhin stehen bei der nichtlinearen Feder Hilfestellungen zur Verfügung, wenn Daten von Excel eingefügt und nach Excel exportiert werden sollen. Außerdem können alle Wertepaare gelöscht werden oder gezielt nur die positiven oder negativen Werte.

Die Einheiten für diese Last-Verformungskurve richten sich danach, wie Sie diese Feder später im System benutzen. Die Grundeinheiten sind [kN], [m] und [rad]. Folgende Möglichkeiten ergeben sich:

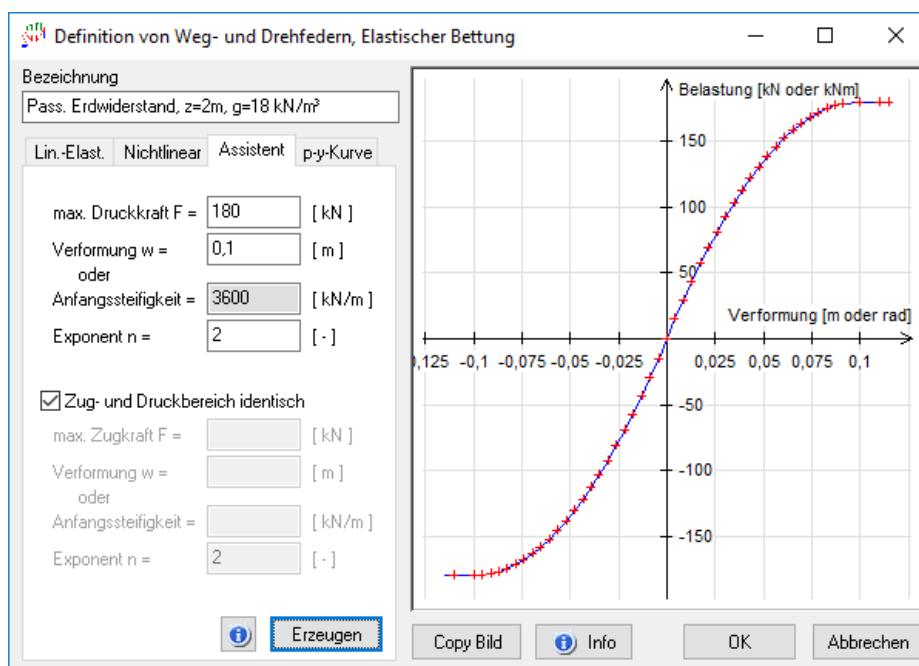
### Linear-Elastisch, Eingabe einer Federsteifigkeit

Wegfeder	Einzelfedersteifigkeit	[ kN / m ]
Drehfeder	Drehfedersteifigkeit	[ kNm / rad ]
elast. Bettung	Bettungssteifigkeit	[ kN/m/m ]

### Nichtlinear, Eingabe von Wertepaaren für Last und Verformung

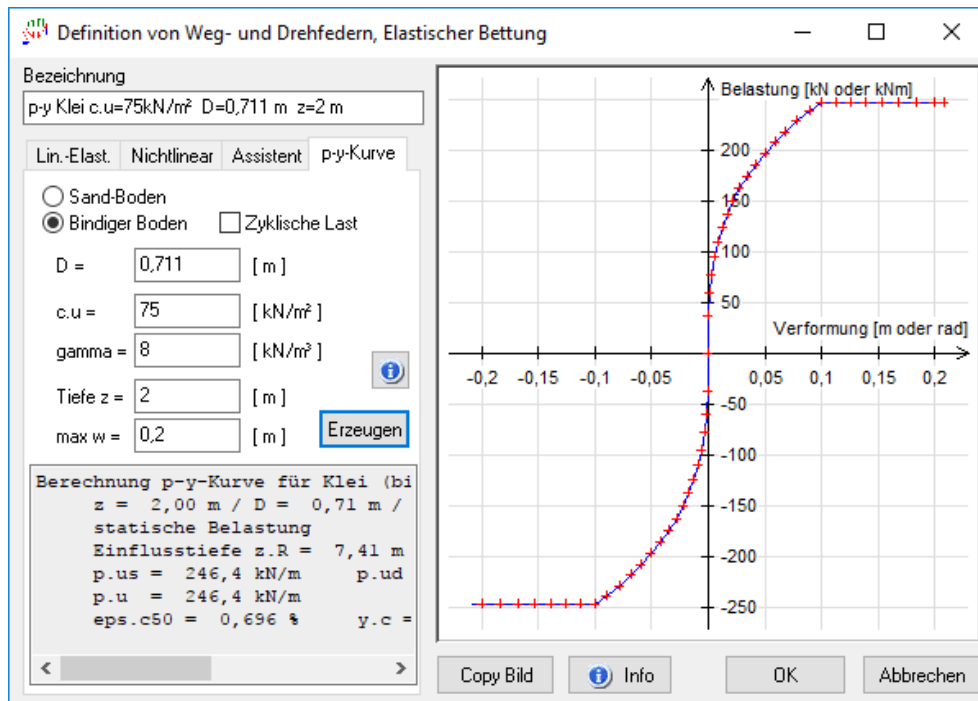
Wegfeder	Kraft und Verschiebung	[ kN ] und [ m ]
Drehfeder	Moment und Verdrehung	[ kNm ] und [ rad ]
elast. Bettung	Spannung und Verschiebung	[ kN/m ] und [ m ]

Für die Definition von nichtlinearen Federn steht im dritten Karteikartenreiter ein **ASSISTENT** zur Verfügung. Hier können Sie einen Parabel-ähnlichen Verlauf definieren, indem Sie die maximale Spannung sowie den maximalen Verschiebeweg eingeben. Der Exponent  $n$  bestimmt die Völligkeit der Kurve. Wahlweise kann die Anfangssteifigkeit oder die Verformung  $w$  als Eingangswert berücksichtigt werden. Nach Klick auf den Button **ERZEUGEN** wird eine nichtlineare Feder erzeugt.



### 2.3.2 P-Y-Kurven für horizontal gebettete Pfähle

Weiterhin steht in einem 4. Karteikartenreiter die Definition von **P-Y-KURVEN** gemäß der Richtlinie DNV-OS-J101 (Ausgabe 2007) zur Verfügung für die Berechnung von horizontal gebetteten Pfählen.



Eingangsparameter sind

- Bodenart: Sand oder bindiger Boden
- bei Sand: Sand unter Wasser (reduzierte Anfangssteifigkeit) oder oberhalb Grundwasserspiegel (normale Anfangssteifigkeit)
- Zyklische Belastung, hierfür erfolgt je nach Bodenart Sand / bindiger Boden eine Abminderung der Bettungsspannung
- Durchmesser des Pfahles (Rohr) bzw. Breite des Trägers
- Scherfestigkeit des Bodens:
  - Winkel der inneren Reibung für sandige Böden (zwischen  $\varphi = 20^\circ$  und  $40^\circ$ )
  - undrainierte Scherfestigkeit  $c_u$  für bindige Böden (zwischen 10 und 600 kN/m<sup>2</sup>)
- Wichte des Bodens  $\gamma$ , gegebenenfalls unter Auftrieb
- **Tiefe z** unter der Geländeoberfläche

Bitte beachten Sie, dass aus den Werten  $\gamma$  und  $z$  die vertikale Spannung  $\sigma_v = \gamma \cdot z$  berechnet wird und daraus der passive Erdwiderstand für die p-y-Kurve. Bei Wechsel der Bodenschichten und daraus resultierenden starken Änderungen der Wichte (z.B. oben Sand mit  $\gamma' = 11$  kN/m<sup>3</sup> und darunter Torf mit  $\gamma' = 1$  kN/m<sup>3</sup>) sollte daher das  $\gamma$  angepasst werden, so dass sich in etwa die jeweilige Vertikalspannung in der jeweiligen Tiefe  $z$  ergibt.

Weiterhin ist zu beachten, dass bei Sand für  $z = 0$  keine Feder erzeugt werden kann (Federreaktion ist Null). Für einen bindigen Boden mit  $c_u$  ist für  $z = 0$  eine Feder definierbar.



- **max w** = Verformung, bis zu der die Kurve berechnet und ausgegeben wird  
Es ist zu prüfen, bis zu welcher Verformung die p-y-Kurve bzw. Feder in der späteren Berechnung benötigt wird. Wird die Feder im statischen System nur wenige Millimeter verformt, so reicht hier ein Wert von z.B. 1 cm = 0,01 m. Bei schlechterem Baugrund oder größeren Pfahlverschiebungen kann die Verformung auch deutlich höher liegen, so dass der Wert für **max w** entsprechend höher zu wählen ist. Der Wert von **max w** beeinflusst nicht die Form der Kurve, sondern nur den zu berechnenden Teil der p-y-Kurve.

Für bindige Böden werden im Baugrundgutachten häufig Werte für  $\phi'$  und  $c'$  angegeben. Die Berechnung mit p-y-Kurven erfordert bei bindigen Böden jedoch üblicherweise die Eingabe der undrainierten Scherfestigkeit  $c_u$ . Hintergrund ist, dass über die Bettung von Pfählen bei den meisten real vorkommenden Systemen meistens Verkehrslasten wie Wind, Wellen, Schiffsanprall o.ä. abgetragen werden. Diese kurzzeitig wirkenden Lasten bauen in bindigen Böden einen Porenwasserüberdruck auf, so dass undrainierte Verhältnisse herrschen und demzufolge die undrainierte Scherfestigkeit  $c_u$  zu benutzen ist.

Nach Eingabe aller Werte und Betätigung des Buttons **ERZEUGEN** wird die Feder vom Programm berechnet und als nichtlineare Feder definiert. Zur Kontrolle gibt es eine Textausgabe für einige weitere Eingangswerte und Zwischenergebnisse für die p-y-Kurven.

#### Beispiel für Sand:

$\phi = 36^\circ$  /  $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$  /  $\phi_{\text{Pfahl}} = 0,8 \text{ m}$  / unter Wasser

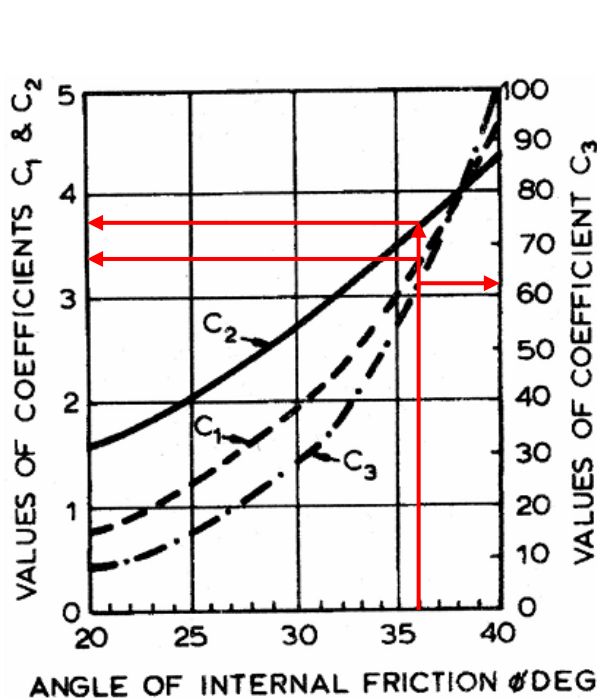


Figure 4, Coefficient as function of friction angle

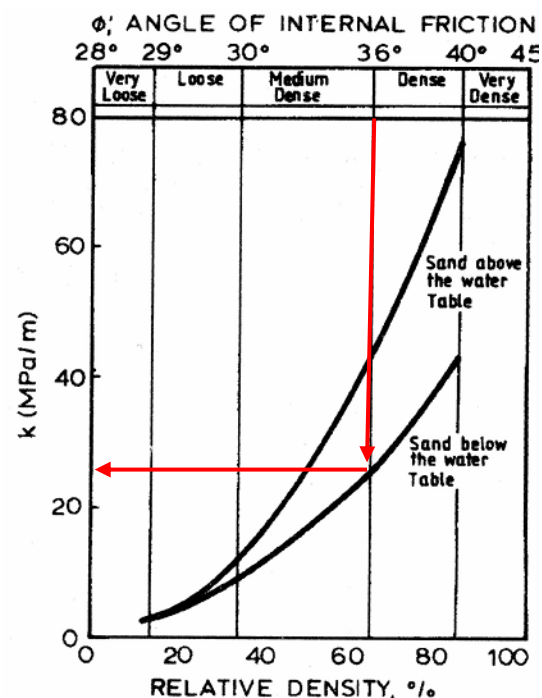


Figure 5, Initial modulus of subgrade reaction k as function of friction angle  $\phi$

Koeffizienten gemäß DNV-OS-J101, Anhang F, Abschnitt B300, Abbildung 4

$$C_1 = 3,31 / C_2 = 3,67 / C_3 = 61,99$$

Für die Koeffizienten  $C_1 / C_2 / C_3$  wird intern in Stab2D-NL eine Ausgleichsfunktion (Polynom 5. Grades) benutzt, die das Diagramm aus dem DNV-Standard bestmöglich abbildet. Die Kurven aus dem DNV sind nur im Bereich  $\varphi = 20^\circ$  bis  $40^\circ$  definiert. Wird ein Winkel der inneren Reibung außerhalb dieses Bereichs eingegeben, erfolgt eine Fehlermeldung.

Anfangssteifigkeit gemäß DNV-OS-J101, Anhang F, Abschnitt B300, Abbildung 5

$$k = 25.505 \text{ kN/m (Anfangssteifigkeit, Abbildung 5)}$$

Analog zu den anderen Beiwerten wird auch hier ein Ausgleichspolynom benutzt, um die Anfangssteifigkeit über und unter Wasser gemäß DNV-Diagramm abzubilden.

Im Diagramm des DNV ist die Anfangssteifigkeit nur im Bereich von ca.  $29^\circ$  bis  $40^\circ$  angegeben. Werden Werte oberhalb von  $40^\circ$  oder kleiner als  $20^\circ$  durch den Benutzer eingegeben, erfolgt eine Fehlermeldung und die Berechnung wird abgebrochen. Werden Werte zwischen  $20^\circ$  und  $28^\circ$  eingegeben, so wird als Anfangssteifigkeit  $k = 2.500 \text{ kN/m}$  benutzt.

Faktor zur Berücksichtigung einer statischen / dynamischen Beanspruchung:

$$A = \begin{cases} 0.9 & \text{for cyclic loading} \\ (3 - 0.8 \frac{X}{D}) \geq 0.9 & \text{for static loading} \end{cases}$$

$$A = \text{Max}(3 - 0.8 \cdot 3 \text{ m} / 0,8 \text{ m} , 0.9) = 0,90 \quad \text{hier für statische Belastung, Tiefe } X = 3 \text{ m}$$

Bei geringen Tiefen (kleiner als ca.  $2,6 \cdot \varnothing$ ) ergibt sich der Beiwert A in den Grenzen zwischen 3,0 und 0,9, so dass die p-y-Kurven für diesen Tiefenbereich eine höhere Tragfähigkeit liefern. Zum Beispiel

$$A = \text{Max}(3 - 0.8 \cdot 1,5 \text{ m} / 0,8 \text{ m} , 0.9) = 1,50 \quad \text{hier für statische Belastung, Tiefe } X = 1,5 \text{ m}$$

Ermittlung des maximalen horizontalen Widerstandes  $p_{\text{ultimate}}$  :

$$p_u = \begin{cases} (C_1 X + C_2 D) \gamma' X & \text{for } 0 < X \leq X_R \\ C_3 D \gamma' X & \text{for } X > X_R \end{cases}$$

$$p_{us} = (C_1 \cdot z + C_2 \cdot D) \cdot \gamma \cdot z = (3,31 \cdot 3 + 3,67 \cdot 0,8) \cdot 11 \cdot 3 = 424 \text{ kN/m}$$

$$p_{ud} = C_3 \cdot D \cdot \gamma \cdot z = 61,99 \cdot 0,8 \cdot 11 \cdot 3 = 1637 \text{ kN/m}$$

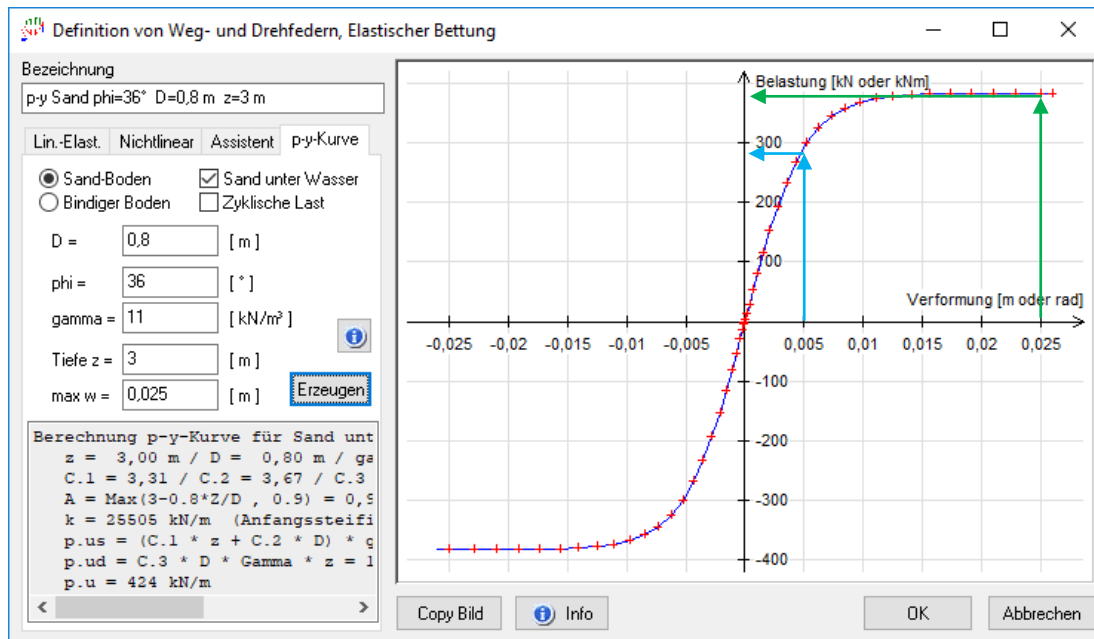
$$p_u = 424 \text{ kN/m}$$

$p_{us}$  = max. Widerstand, wenn Bruchfigur (passiver Erdwiderstand) an der Geländeoberseite austritt

$p_{ud}$  = max. Widerstand, wenn der Boden bei horizontaler Bewegung des Pfahles um den Pfahl drum herum fließt. Dieses Kriterium wird ab einer bestimmten Tiefe maßgebend ( $X_R$ ).

Form der p-y-Linie mit

$$p = A p_u \tanh\left(\frac{kX}{A p_u} y\right)$$



z.B.  $p = 0,9 \cdot 424 \text{ kN/m} \cdot \tan_{\text{hyp}} (25.505 \text{ kN/m} \cdot 3 \text{ m} / [0,9 \cdot 424 \text{ kN/m}] \cdot 0,005 \text{ m}) = 291 \text{ kN}$   
 $p = 0,9 \cdot 424 \text{ kN/m} \cdot \tan_{\text{hyp}} (25.505 \text{ kN/m} \cdot 3 \text{ m} / [0,9 \cdot 424 \text{ kN/m}] \cdot 0,025 \text{ m}) = 381,6 \text{ kN}$

### Beispiel für bindigen Boden (Ton / Klei):

$$z = 3,00 \text{ m} / \varnothing = 0,80 \text{ m} / \gamma = 9,0 \text{ kN/m}^3 / c_u = 50,0 \text{ kN/m}^2$$

Ermittlung des maximalen horizontalen Widerstandes  $p_{\text{ultimate}}$  :

$$p_u = \begin{cases} (3s_u + \gamma' X)D + J s_u X & \text{for } 0 < X \leq X_R \\ 9s_u D & \text{for } X > X_R \end{cases}$$

$J$  = dimensionslose, empirische Konstante zwischen 0,25 und 0,5

empfohlener Wert gemäß DNV für weichen normal konsolidierten Klei ist 0,5

Dieser Wert  $J = 0,5$  ist fest eingestellt und kann nicht geändert werden.

$s_u = c_u$  = undrainierte Scherfestigkeit des Bodens

$$p_{us} = (3 \cdot 50 \text{ kN/m}^2 + 9 \text{ kN/m}^3 \cdot 3 \text{ m}) \cdot 0,8 \text{ m} + 0,5 \cdot 50 \text{ kN/m}^2 \cdot 3 \text{ m} \\ = 141,6 + 75 = 216,6 \text{ kN/m}$$

$$p_{ud} = 9 \cdot 50 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,8 \text{ m} = 360,0 \text{ kN/m}$$

$$p_u = 216,6 \text{ kN/m}$$

$p_{us}$  = max. Widerstand, wenn Bruchfigur (passiver Erdwiderstand) an der Geländeoberseite austritt

$p_{ud}$  = max. Widerstand, wenn der Boden bei horizontaler Bewegung des Pfahles um den Pfahl drum herum fließt. Dieses Kriterium wird ab einer bestimmten Tiefe maßgebend ( $X_R$ ).

- $p_u$  = ultimate resistance per unit length (kN/m).  
 $c_u$  = undrained shear strength for undisturbed clay soil samples (kPa).  
 $D$  = pile diameter (m).  
 $\gamma'$  = effective unit weight of soil (kN/m<sup>3</sup>).  
 $J$  = dimensionless empirical coefficient with values in the range 0.25–0.50. The upper limit holds for soft normally consolidated cohesive soils.  
 $X$  = depth below soil surface (m).  
 $X_R$  = depth below soil surface to bottom of reduced resistance zone in m. For a condition of constant strength with depth Eqs. (a) and (b) are solved simultaneously to give:

$$X_R = \frac{6 D}{\gamma' \frac{D}{c_u} + J}$$

Einflusstiefe  $x_R = z_R = 7,45$  m

Für statische Belastung ergibt sich die p-y-Kurve zu

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left( \frac{y}{y_c} \right)^{1/3} & \text{for } y \leq 8y_c \\ p_u & \text{for } y > 8y_c \end{cases}$$

Für eine zyklische Belastung und  $x > x_R$

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left( \frac{y}{y_c} \right)^{1/3} & \text{for } y \leq 3y_c \\ 0.72 p_u & \text{for } y > 3y_c \end{cases}$$

Für eine zyklische Belastung und  $x < x_R$

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left( \frac{y}{y_c} \right)^{1/3} & \text{for } y \leq 3y_c \\ 0.72 p_u \left( 1 - \left( 1 - \frac{X}{X_R} \right) \frac{y - 3y_c}{12y_c} \right) & \text{for } 3y_c < y \leq 15y_c \\ 0.72 p_u \frac{X}{X_R} & \text{for } y > 15y_c \end{cases}$$

mit

$$y_c = 2.5 \varepsilon_c D \quad \varepsilon_c = 0,850 \% \quad y_c = 2,5 \cdot 0,85 \cdot 0,8 = 0,017 \text{ m}$$

$\varepsilon_c$  = Dehnung des Probekörpers bei Erreichen von 50% der maximalen Festigkeit ( $c_u$ )  
 im Laborversuch für einen Versuch zur undrainierten Scherfestigkeit einer  
 ungestörten Bodenprobe

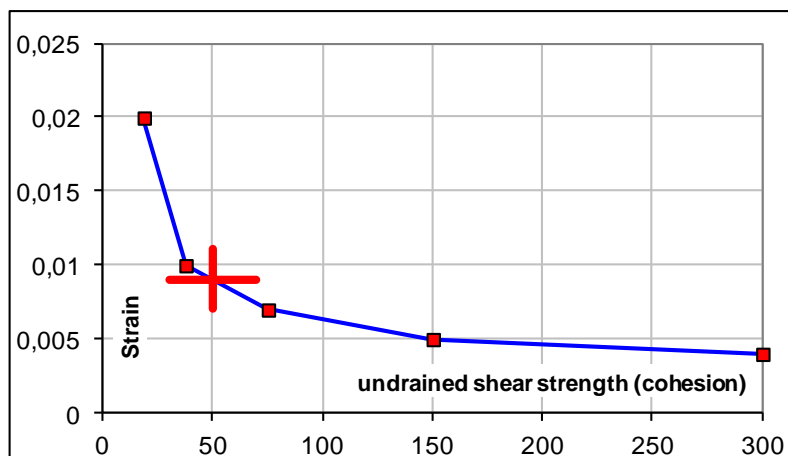
Erfahrungswerte für  $\varepsilon_c$  (bzw.  $\varepsilon_{50}$ ) gemäß API 2000:

Undrained Shear Strength (kPa)	Strain Factor, $\varepsilon_{50}$
$\leq 24$	0.02
24 ~ 48	0.01
48 ~ 96	0.007
96 ~ 200	0.005
$\geq 200$	0.004

gerundet	für $c_u$ zwischen 12 und 25 kN/m <sup>2</sup>	$\varepsilon_c = 0,02$	
	für $c_u$ zwischen 25 und 50 kN/m <sup>2</sup>	$\varepsilon_c = 0,01$	
	für $c_u$ zwischen 50 und 100 kN/m <sup>2</sup>	$\varepsilon_c = 0,007$	
	für $c_u$ zwischen 100 und 200 kN/m <sup>2</sup>	$\varepsilon_c = 0,005$	
	für $c_u$ zwischen 200 und 400 kN/m <sup>2</sup>	$\varepsilon_c = 0,004$	
	für $c_u > 400$ kN/m <sup>2</sup>	$\varepsilon_c = 0,001$	*)

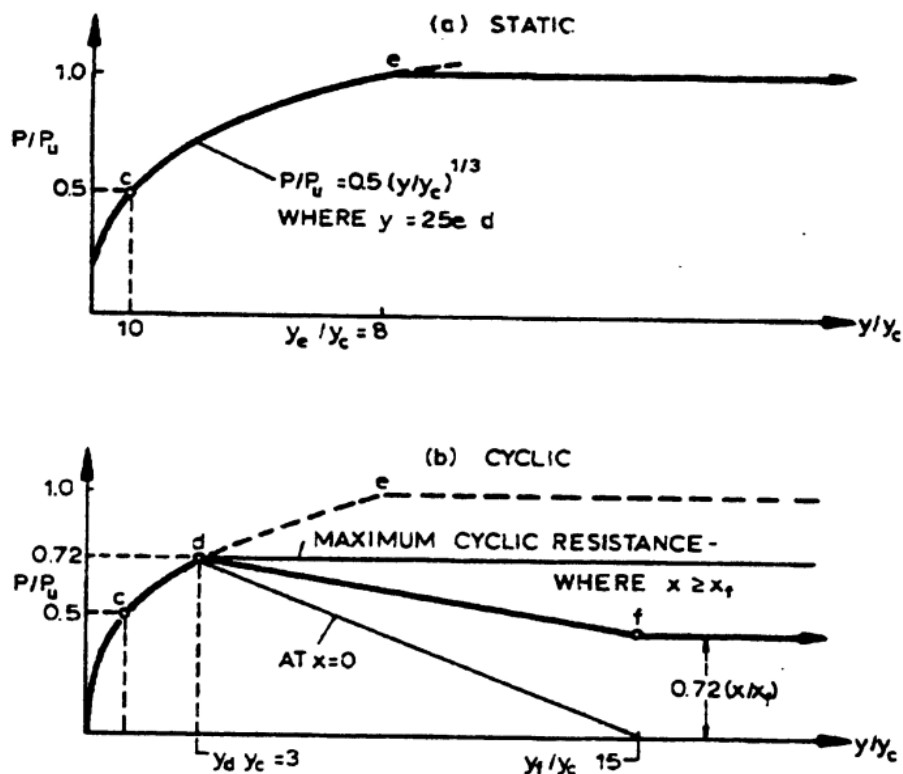
\*) gemäß „Essentials of Offshore Structures“, D.V.Reddy and A.S.J. Swamidas, CRC Press

Um Sprünge in der Funktion von  $\varepsilon_c$  und damit auch in der resultierenden p-y-Kurve zu vermeiden, werden für die  $c_u$ -Intervalle die jeweils mittleren Werte  $c_{u,mitte}$  benutzt und dazwischen linear interpoliert. Als funktionaler Zusammenhang ergibt sich damit folgendes Diagramm:



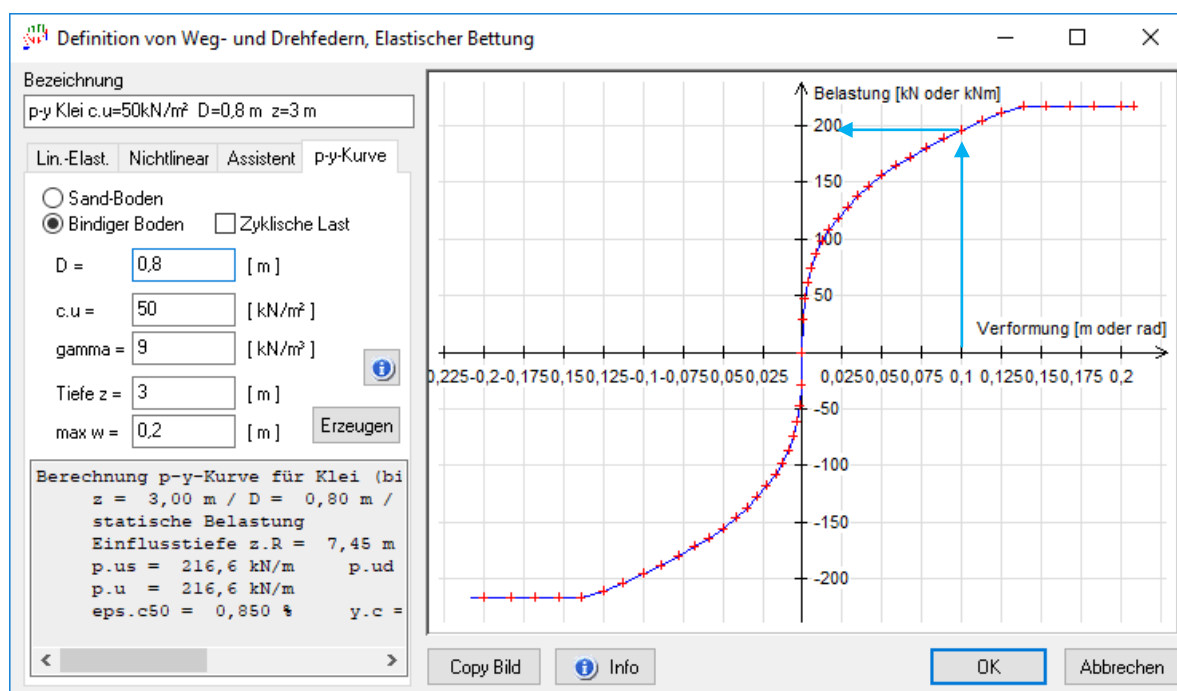
Die Werte für  $\varepsilon_c$  bzw. der vorgenannte funktionale Zusammenhang sind im Programm fest eingestellt und können vom Benutzer nicht verändert werden.

Kurven für Ton / Klei, gemäß DNV und Classification Note 30.4



**Fig. 3.2**  
**Criteria for predicting p-y curves.**  
 (a) short-time static loading, (b) equilibrium under initial cyclic loading and (c) reloading after cycling.

Beispiel für statische Last



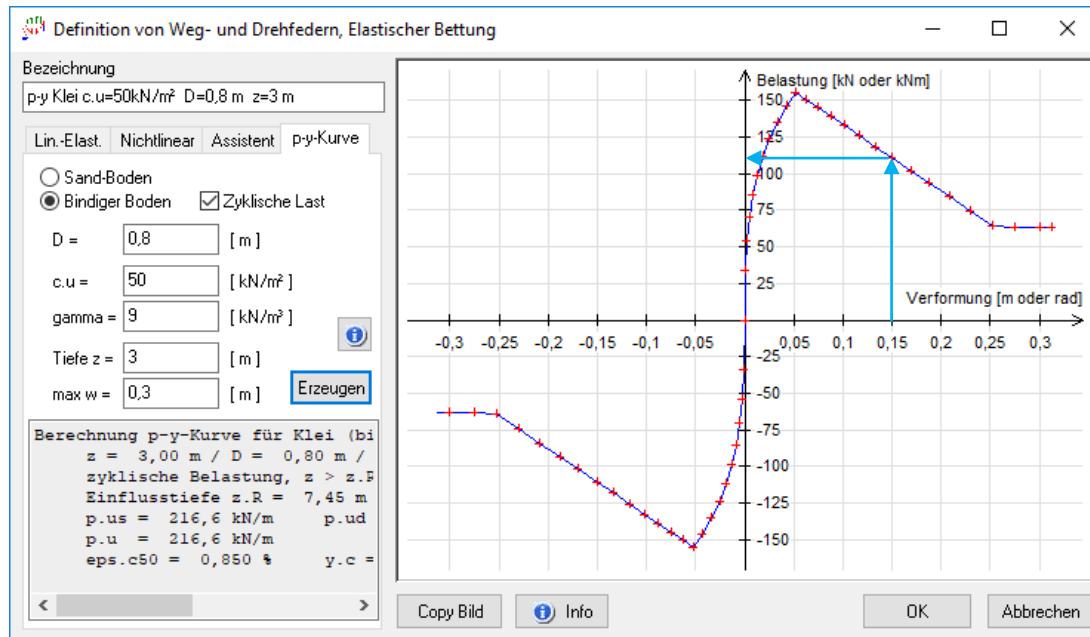
$$8 \cdot y_c = 8 \cdot 0,017 \text{ m} = 0,136 \text{ m}$$

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c}\right)^{1/3} & \text{for } y \leq 8y_c \\ p_u & \text{for } y > 8y_c \end{cases}$$

$$p = 216,6 / 2 \cdot (0,1 / 0,017)^{0,333} = 195,5 \text{ kN/m}$$

Für Verformungen größer  $8 y_c$  begrenzt auf  $p = p_u = 216,6 \text{ kN/m}$ .

### Beispiel für zyklische Last



Für eine zyklische Belastung und  $x < x_R$  mit  $3 \text{ m} < 7,45 \text{ m}$

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c}\right)^{1/3} & \text{for } y \leq 3y_c \\ 0,72 p_u \left(1 - \left(1 - \frac{X}{X_R}\right) \frac{y - 3y_c}{12y_c}\right) & \text{for } 3y_c < y \leq 15y_c \\ 0,72 p_u \frac{X}{X_R} & \text{for } y > 15y_c \end{cases}$$

$$3 \cdot y_c = 3 \cdot 0,017 \text{ m} = 0,051 \text{ m}$$

$$p = 0,72 \cdot 216,6 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{3}{7,45}\right) \cdot \frac{(0,15 - 0,051)}{(12 \cdot 0,017)}\right] = 110,7 \text{ kN/m}$$

Für Verformungen größer  $15 y_c$  begrenzt auf  $p = 0,72 \cdot 216,6 \cdot 3 / 7,45 = 62,8 \text{ kN/m}$ .

## Hinweise zur Verwendung von p-y-Kurven

- Die p-y-Kurven basieren auf Versuchen, die an Pfählen in der Größenordnung 0,5 m bis 1,0 m durchgeführt wurden. Daher sollten die p-y-Kurven für große Pfahldurchmesser ( $> 2$  m) oder kleine Durchmesser ( $< 0,2$  m) mit der nötigen Vorsicht angewendet werden.
- Durch die automatische Limitierung auf den maximalen Bettungswiderstand  $p_u$  ist kein weiterer Nachweis für den passiven Erdwiderstand erforderlich. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit sollte der übliche geotechnische Teilsicherheitsbeiwert für den passiven Erdwiderstand berücksichtigt werden ( $\gamma_{Ep} = 1,4 / 1,3 / 1,2$ ), der bei der Definition der elastischen Bettung für den Stab eingegeben werden kann. Die p-y-Kurve wird dabei vertikal gestaucht, das heißt, die maximale Spannung und die Anfangssteifigkeit werden abgemindert.
- Bei Nutzung der Option „zyklische Belastung“ wird der dargestellte Kurvenverlauf sowohl für die Hin- als auch für die Rückverformung berücksichtigt. Eine Rückverformung würde normalerweise einen klaffenden Spalt zwischen Boden und Pfahl ergeben, so dass die Rückverformung einer anderen Kurve folgt. Dieser Effekt wird in Stab2D-NL zurzeit nicht modelliert.
- Bei wechselnden Bodenschichten mit deutlich unterschiedlicher Wichte, siehe Hinweis zu Beginn des Kapitels mit Anpassung der Wichte.
- Beim Aufbringen der Federn als elastische Bettung auf den Stab kann für einen Stab eine Anfangs- und eine Endfeder definiert werden. Während der Berechnung wird an den Zwischenpunkten im Stab jeweils zwischen diesen beiden Federn interpoliert. Da die Federn über die Tiefe in den meisten Fällen linear skalierbar sind, reicht eine Teilung in 2 m oder 3 m-Abschnitten häufig aus. Im Bereich der Grenztiefe  $X_R$  sollte eine Feder definiert werden, da die Federn ober- und unterhalb von  $X_R$  Unterschiede aufweisen. Federn für Ton unterhalb  $X_R$  verändert sich nicht mehr.
- Die p-y-Kurven sind für eine ebene Geländeoberfläche definiert. Sollen Pfähle in einer Böschung installiert werden und die horizontale Belastung erfolgt in Richtung der fallenden Böschung, so sind die Tragfähigkeiten der Federn abzumindern. Nach Ansicht des Verfassers kann dafür folgende Näherung benutzt werden:

Berechnung Erddruckbeiwert  $K_{pgh}$  für den passiven Erdwiderstand für

- horizontale Oberfläche  $K_{pgh, \text{horizontal}}$
- geneigte Oberfläche  $K_{pgh, \text{geneigt}}$

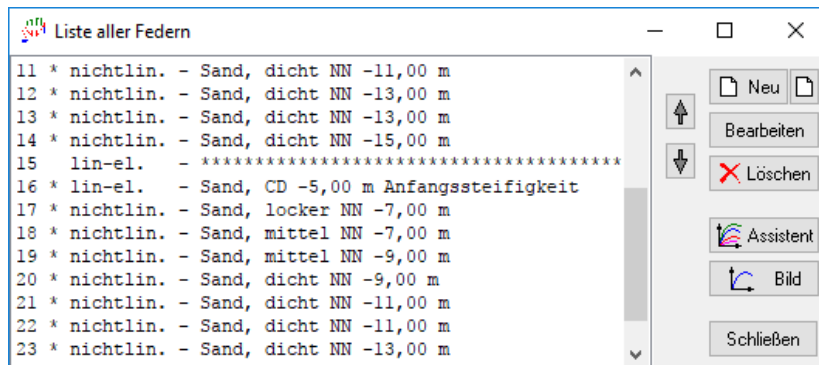
Bei der Definition später im Stabwerkssystem wird ein zusätzlicher (Sicherheits-) Faktor von  $K_{pgh, \text{horizontal}} / K_{pgh, \text{geneigt}}$  berücksichtigt.

Hintergrund dieser Näherung ist, dass die p-y-Kurven grundlegend in ähnlicher Art den passiven Erdwiderstand abbilden, wie dies die übliche Erddrucktheorie liefert. Ergänzend wird für die Pfahlbettung berücksichtigt, dass sich die Belastung im Boden zu den Seiten hin ausbreiten kann und die Spannung im Boden bereits nach kurzem Abstand vom Pfahl sehr kleine Werte erreicht. Dadurch werden Steifigkeit und Tragfähigkeit höher im Vergleich zu einem Bodenstreifen mit der Breite eines Pfahles.



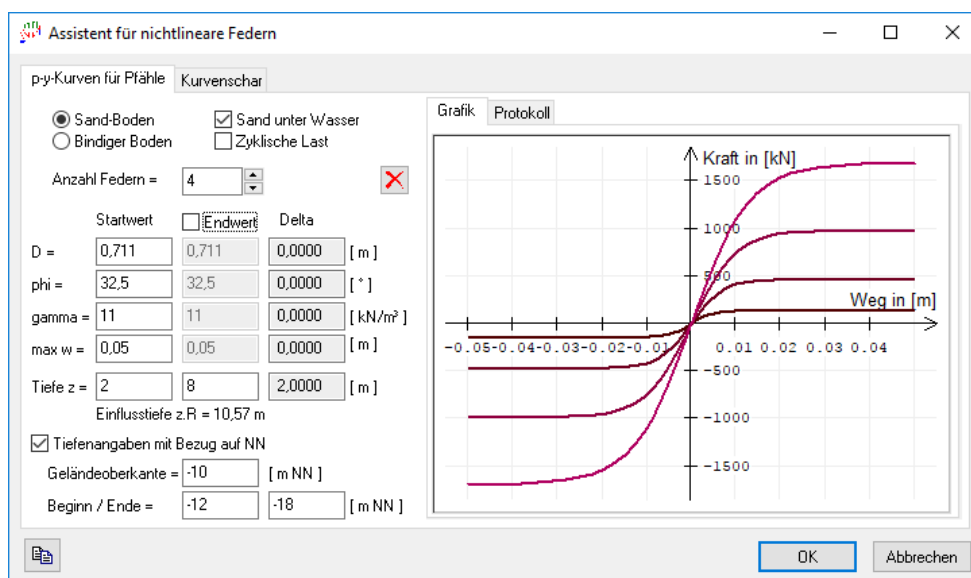
### 2.3.3 Assistent für nichtlineare Federn (Kurvenschar)

Im Fenster mit der Liste aller Federn können Sie den Button **ASSISTENT** wählen, um eine Kurvenschar zu erzeugen.

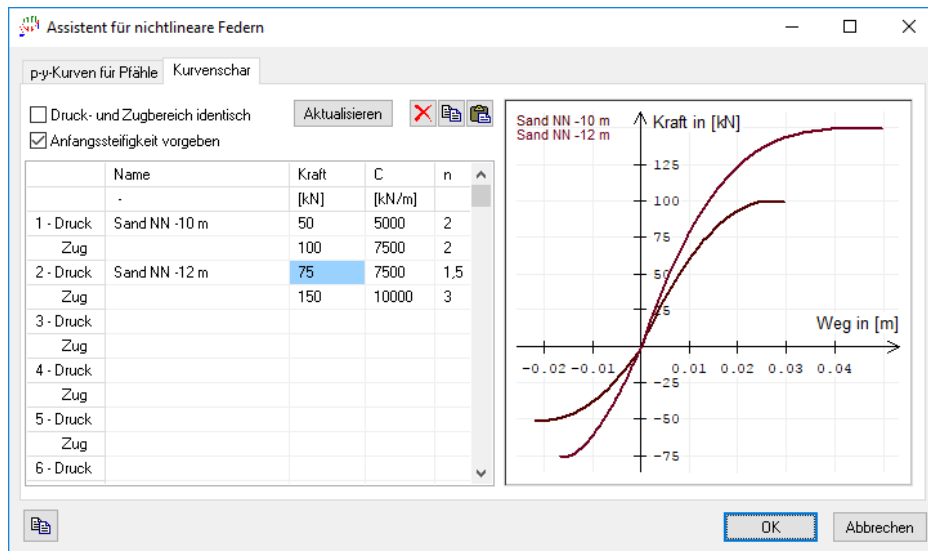


Im Anschluss öffnet sich nachfolgendes Fenster, in dem analog zu den zuvor beschriebenen p-y-Kurven die Eingangswerte für Sand oder für bindigen Boden eingegeben werden können. Zur Erzeugung einer Kurvenschar können für alle Parameter „von“-„bis“-Werte gewählt werden. Falls sich beispielsweise die Kennwerte über die Tiefe linear ändern, kann dies berücksichtigt werden, indem z.B. eine Scherfestigkeit für die oberste Feder und eine höhere Scherfestigkeit für die unterste Feder definiert werden.

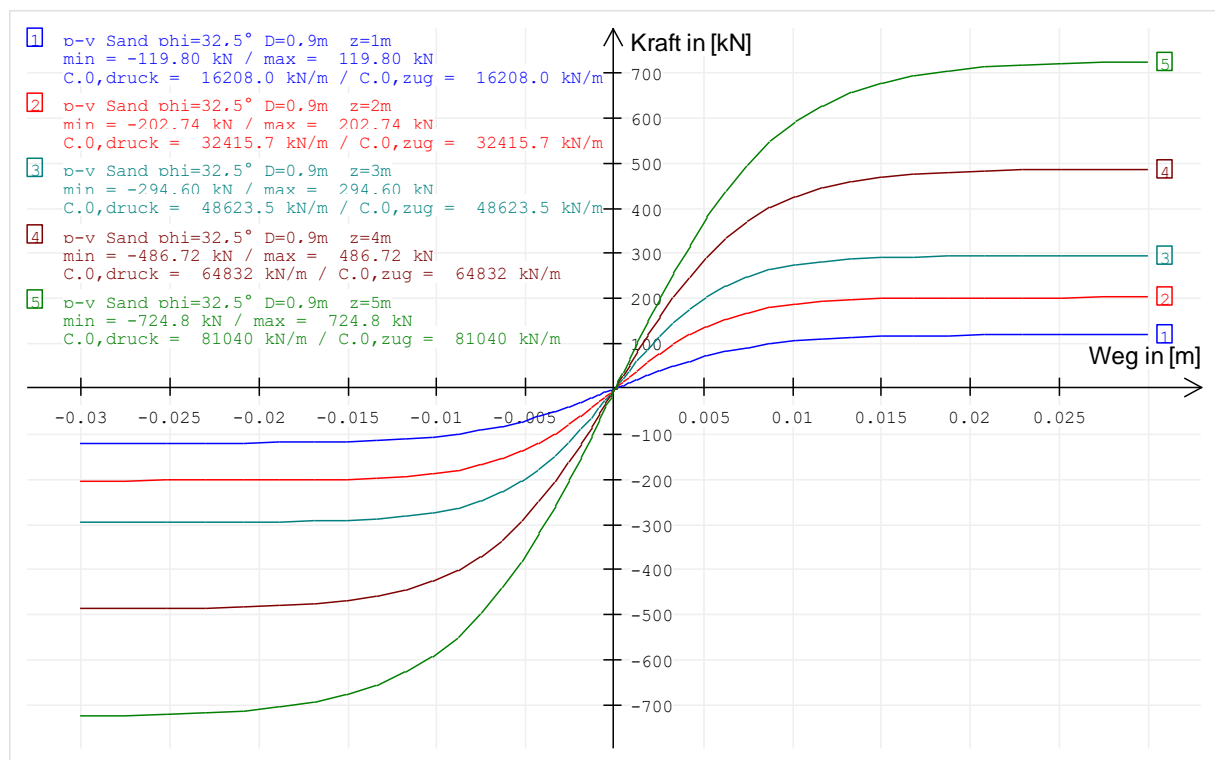
Zusätzlich zur grafischen Ausgabe der Federn können auch die numerischen Ergebnisse der Berechnung der p-y-Kurven ausgegeben werden. Nach Klick auf den **OK**-Button werden die Federn erzeugt und man kehrt zur Liste der Federn zurück.



Im zweiten Karteikartenreiter steht die Definition einer Kurvenschar mit Parabel-ähnlichem Verlauf zur Verfügung, z.B. für den Passiven Erdwiderstand. Die Eingabe erfolgt analog zu den bereits zuvor erläuterten nichtlinearen Kurven.

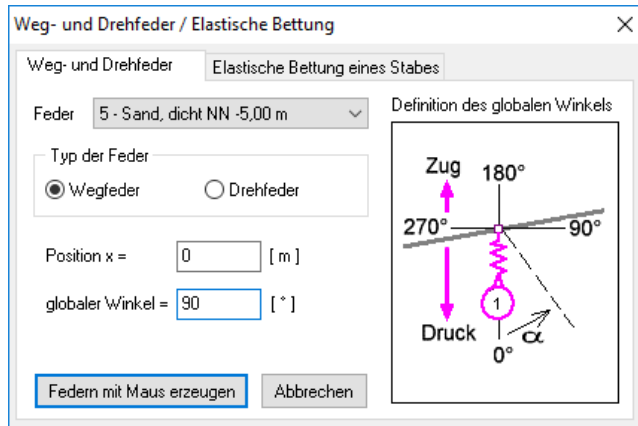


In der Liste der Federn können mehrere Federn markiert und dafür die Grafik ausgegeben werden. In der Grafik werden ergänzend die wichtigsten numerischen Kennwerte der Federn angezeigt.



### 2.3.4 Modellierung der Federn im System

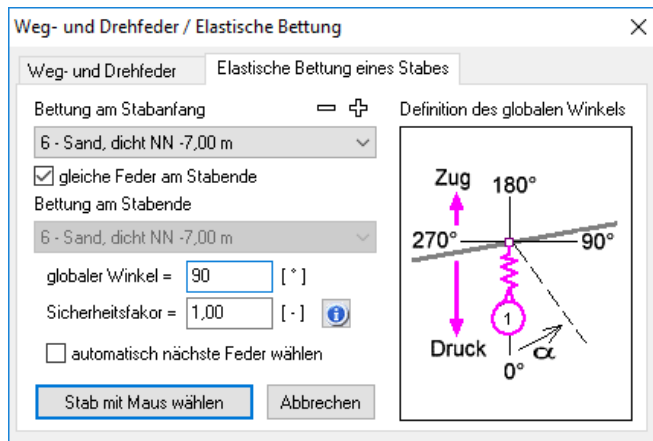
Zum Erzeugen einer Feder im System wählen Sie bitte im Menü den Punkt *EINGABE => FEDER / ELAST. BETTUNG* oder klicken den entsprechenden Button in der Menüleiste an.



Federn können im Programm Stab2D-NL nur auf Stäbe aufgebracht werden. Dies kann entweder als Einzelfeder an jeder beliebigen Stelle des Stabes oder als elastische Bettung des gesamten Stabes erfolgen. Bis auf den Punkt *DREHFEDER* ist die Angabe eines globalen Winkels erforderlich. Skizzen zur Orientierung der Feder im globalen Koordinatensystem erleichtern die Eingabe.

Für die elastische Bettung ist weiterhin die Angabe einer Bettungsfeder zu Beginn und einer Bettungsfeder am Ende möglich. Während der Rechnung wird über die Stablänge zwischen diesen beiden Werten linear interpoliert. Für übliche Bodenschichten ist es daher im Normalfall ausreichend, wenn eine Feder an der Oberkante der Schicht und eine weitere Feder an der Unterkante definiert werden. Im Fall von p-y-Kurven für Sand sind gegebenenfalls bis zu einer Tiefe von ca.  $2,6 \cdot \varnothing$  ein oder zwei weitere Federn einzuschalten, da die Federn durch den Faktor A hier nicht-linear mit der Tiefe veränderlich sind. Wenn der Hauptanteil der Belastung tiefer abgetragen wird, kann dies vernachlässigt werden.

Für die elastische Bettung können Sie einen Sicherheitsbeiwert definieren. Mit diesem Wert werden die Spannungen (und Steifigkeiten) während der Berechnung reduziert, so dass zum Beispiel die Modellierung des Erdwiderstands im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit  $\gamma_{Ep} = 1,40$  (für BS-P) oder ähnlichem sehr einfach ohne Änderung der Feder möglich ist.



Nach Wahl aller Eingangswerte klicken Sie auf den Button **FEDERN MIT MAUS** erzeugen. Durch einfaches Anklicken eines Stabes können Sie anschließend die Federn generieren. Mit der Esc-Taste können Sie abbrechen, mit der rechten Maustaste kehren Sie zum vorherigen Fenster wieder zurück. Mit den kleinen „+“ und „-“ Buttons im Fenster für die elastische Bettung können Anfangs- und End-Feder um eins (1) hochgezählt werden. Diese kleine Hilfestellung ist z.B. bei der horizontalen Bettung von Pfählen sinnvoll, da sich die Federn für jeden Pfahlabschnitt über die Tiefe ändern.

Eine elastische Bettung ist für jeden Stab nur in einer Richtung möglich. Soll z.B. für einen geramnten Pfahl sowohl die horizontale Bettung durch den anstehenden Boden als auch der Abtrag der vertikalen Kräfte über Mantelreibung simuliert werden, dann kann der Stab horizontal mit einer elastischen Bettung und vertikal mit mehreren diskreten Wegfedern modelliert werden.

Eine hier definierte Feder kann nicht auf Knoten aufgebracht werden. Erzeugen Sie in diesem Fall eine Feder direkt am Stabanfang oder Stabende.

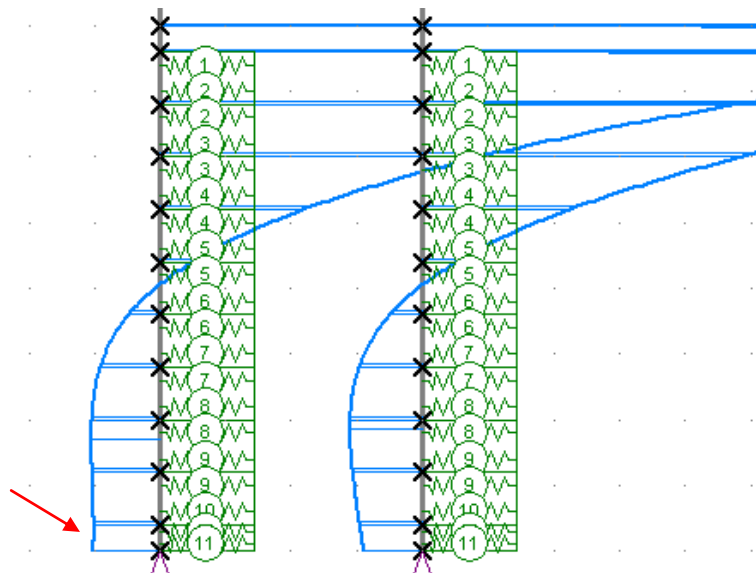
Wird ein Stab mit einer bereits vorhandenen elastischen Bettung angeklickt, dann wird nach einem Hinweis die aktuell gewählte Bettungsfeder für den Stab gesetzt und die alte Feder gelöscht.

### Anmerkungen zur Berechnung elastisch gebetteter Stäbe:

- Der Algorithmus zur Berücksichtigung einer elastischen Bettung arbeitet mit einer Näherung, die für kleine Stabsegmente ausreichend genau ist. Klein bedeutet in diesem Fall, dass die für das Übertragungsverfahren intern benutzte Abschnittslänge kleiner als ca. 10% der charakteristischen Länge ist. Die Wahl der Segmentlänge wird vom Programm automatisch durchgeführt.

Für die Berechnung wird die Verformung am Segmentanfang und am Segmentende bestimmt und damit die zugehörigen exakten Bettungsreaktionen. Vereinfachte Annahme ist jetzt, dass die Bettungsreaktion in diesem Stabsegment linear veränderlich ist.

- Beim Vergleich der Ergebnisse von Stab2D-NL mit den "exakten" Lösungen (analytische Gleichungen) ist es wichtig, die gleichen Eingangswerte zu benutzen. So wird bei der Lösung der Differentialgleichung für einen elastisch gebetteten Balken häufig die Schubverformung vernachlässigt. Mit Stab2D-NL erhält man demzufolge erst dann die gleiche Lösung, wenn die Schubsteifigkeit auf z.B. den Wert  $GA = 1E12$  kN oder höher gesetzt wird. Ansonsten werden sich meist größere Verformungen und kleinere Biegebeanspruchungen ergeben.
- Durch die Berücksichtigung der Schubverformung können sich vor allem bei Querschnitten mit hoher Biegesteifigkeit und relativ dazu kleiner Schubsteifigkeit „merkwürdige“ Verformungen ergeben (z.B. große Rohrquerschnitte). In der folgenden Grafik ist ein derartiges System dargestellt (Rohr  $D = 7,50$  m,  $t = 0,10$  m  $\Rightarrow$  z.B. Gründung eines Monopiles für eine Offshore-Windenergieanlage). Im rechten Abschnitt ist die Verformungsfigur unter Vernachlässigung der Schubverformungen dargestellt, im linken Bild wurden die Schubverformungen berücksichtigt.



## 2.4 Knoteneingabe

Knoten können Sie erstellen, indem Sie entweder in der Buttonleiste **NEUER KNOTEN** oder im Menü **EINGABE  $\Rightarrow$  KNOTEN** wählen. Folgendes Fenster öffnet sich:

Wählen Sie als erstes den Lagerungstyp des Knotens. Achten Sie bitte darauf, dass Sie keine unbeabsichtigten Zwängungen modellieren. Durch Berücksichtigung von Theorie 3. Ordnung sowie der Dehnung der Systemachse unter Momentenbeanspruchung bei Stahlbetonquerschnitten würden ansonsten teilweise recht hohe Normalkräfte im System resultieren, die das Ergebnis auch bei der Biegebeanspruchung recht deutlich verändert können (siehe Kap. 2.1.3)

Ohne Zwängung (Gleitlager)



Mit Zwängung (kein Gleitlager, Normalkräfte im Stab)



Neben den vorgegebenen Lagerbedingungen können auch benutzerdefinierte Lager mit frei gewählten Steifigkeiten und Ausrichtungen definiert werden.

Anschließend geben Sie die Koordinaten für den Punkt ein:

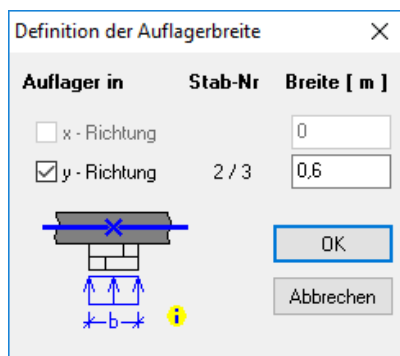
**Numerisch:** Koordinaten in vorgesehene Textboxen eingeben, dann auf den Button [ANWENDEN](#) klicken, um anschließend weitere Punkte zu erzeugen, oder auf den Button [OK](#), um den Punkt zu erzeugen und das Fenster anschließend zu schließen.

**Grafisch:** Button [KNOTEN MIT MAUS](#) erzeugen anklicken, das Fenster wird geschlossen. Per Mausklick können Sie jetzt auf der Zeichenfläche Knoten erzeugen. Mit [ESC](#) wird der Vorgang komplett beendet, beim Klick auf die rechte Maustaste gelangen Sie zum Knoteneingabefenster zurück.

In dem gezeigten Fenster haben Sie noch die Möglichkeit, mit einem Mal eine ganze Liste von Knoten zu erstellen. Klicken Sie dazu auf den zweiten Karteikartenreiter [KNOTEN IN TABELLE](#). In der kleinen Box können Sie jetzt gleich mehrere Knoten eingeben, wobei das Trennzeichen zwischen den Koordinaten x und y beliebig sein darf außer dem Komma oder dem Punkt.

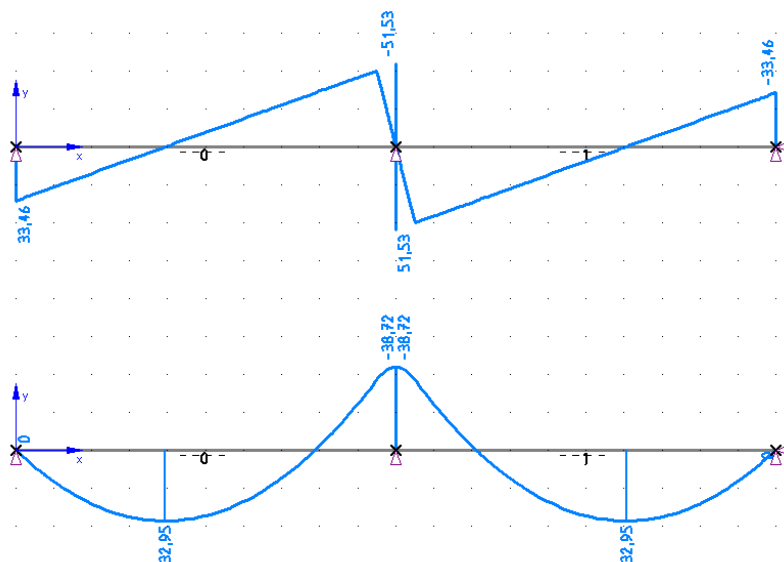
Weiterhin haben Sie die Möglichkeit, eine [AUFLAGERBREITE](#) zu definieren, wodurch eine der Auflagerkraft äquivalente konstante Auflagerpressung berücksichtigt wird. Dies funktioniert jedoch erst, wenn an den Knoten Stäbe in waagerechter oder senkrechter Richtung angeschlossen sind. Wenn Sie sich dann die Eigenschaften eines *einzelnen* Knotens anzeigen lassen, erscheint folgendes Fenster:

In diesem Fenster gibt es zusätzlich einen Button zur Definition der Auflagerbreite. Ein Klick darauf öffnet folgendes Fenster:



Das Programm hat ihr System analysiert und gibt die senkrecht und waagrecht an den Knoten angeschlossenen Stäbe aus. Wenn Stäbe angeschlossen sind (im Beispiel in y-Richtung, also waagrecht), ist die Textbox zur Eingabe einer Auflagerbreite verfügbar. Die Stabnummern sind ebenfalls mit ausgegeben.

Tragen Sie in diese Textbox die gewünschte Auflagerbreite ein. Während der Berechnung wird in einem ersten Iterationsschritt die Auflagerkraft berechnet. Vor Beginn des nächsten Iterationsschrittes wird diese Auflagerkraft als konstante Linienlast (äußere Belastung) im definierten Bereich angesetzt. Das Biegemoment wird damit während der Stabberechnung mittels Übertragungsverfahren automatisch ausgerundet. Damit die Summe aller Kräfte erhalten bleibt, wird zusätzlich am Stabende (bzw. Anfang) die Summe der Auflagerpressung als Einzellast angesetzt. Besonders gut sieht man dieses Vorgehen im Verlauf der Querkraft, der zugehörige Biegemomentenverlauf ist ebenfalls abgebildet:





Sind an dem Knoten zwei Stäbe angeschlossen, so wird die Auflagerkraft gleichmäßig auf beide angrenzenden Stäbe verteilt (Einzugsbereich jeweils die Hälfte der Auflagerbreite).

Ist an dem Knoten nur ein Stab angeschlossen, so wird die gesamte Auflagerkraft auf diesen einen Stab ebenfalls mit der Hälfte der Auflagerbreite aufgebracht.

Eine kurze Information in einer Textbox erhalten Sie auch beim Klick auf die Grafik der Auflagerbreite im letzten Fenster. In der grafischen Ausgabe wird die Definition einer Auflagerbreite durch ein Symbol für eine von unten wirkende Linienlast dargestellt.

## 2.5 Stabeingabe

Stäbe können Sie erstellen, indem Sie entweder in der Buttonleiste **STABZUG** oder im Menü **EINGABE** → **STABZUG** wählen. Folgendes Fenster öffnet sich:

Stab mit gleichem Querschnitt

The dialog box 'Stab / Stabzug erzeugen' has the following settings:

- Stabtyp:** ☒ Biegestab, ☐ Zugstab, ☐ Druckstab
- Gelenke am Stabanfang / Stabende:** A diagram showing a horizontal bar with 'X' marks at both ends.
- ☐ Gelenk am Anfang, ☐ Gelenk am Ende
- Querschnitt:**
  - Anfang: 5 - AZ 36-700N
  - ☒ Endquerschnitt wie Anfangsquerschnitt
  - Ende: 5 - AZ 36-700N
- Buttons at the bottom: 'Stab mit Maus erzeugen' (highlighted), 'Abbrechen', and 'Liste >>'.

Stab mit veränderlichem Querschnitt (Voute)

The dialog box 'Stab / Stabzug erzeugen' has the following settings:

- Stabtyp:** ☒ Biegestab, ☐ Zugstab, ☐ Druckstab
- Gelenke am Stabanfang / Stabende:** A diagram showing a horizontal bar with 'X' marks at both ends.
- ☐ Gelenk am Anfang, ☐ Gelenk am Ende
- Querschnitt:**
  - Anfang: 2 · R1 b/h = 1,00/0,165m, A<sub>s,tot</sub> = 11,77cm², S
  - ☐ Endquerschnitt wie Anfangsquerschnitt
  - Ende: 3 · R1 b/h = 1,00/0,32m, A<sub>s,tot</sub> = 11,77cm², Stü
- Text below: 'Anfangs- und Endquerschnitt gleicher Typ Stahlbeton'
- Buttons at the bottom: 'Stab mit Maus erzeugen' (highlighted), 'Abbrechen', and 'Liste >>'.

Im oben gezeigten Fenster können Sie neben normalen Biegestäben (Standard) auch reine Zug- oder Druckstäbe (Fachwerkstäbe) definieren. Damit können zum Beispiel Seile in Systemen definiert werden, die auf Druck ausfallen oder Druckverbindungen, die auf Zug versagen. Beachten Sie bitte, dass auf diese Druck- und Zugstäbe keine Last aufgebracht werden darf, da der Stab ausfallen kann und die Last dementsprechend undefiniert wäre. In der aktuellen Version von Stab2D-NL ist es bisher nur möglich, linear-elastische Querschnitte für Druck/Zugstäbe zu benutzen. Eine Voutung ist zurzeit ebenfalls noch nicht implementiert.

Wählen Sie weiterhin Momentengelenke sowie einen Querschnitt für den Stab, bei Voutung einen Anfangs- und einen Endquerschnitt.

Drücken Sie anschließend den Button **STAB MIT MAUS** erzeugen, das Fenster wird geschlossen. Jetzt können Sie die Punkte per Mausklick mit Stäben verbinden. Die Taste **ESC** beendet die Funktion, ein Klick auf die rechte Maustaste lässt Sie zum Eingabefenster zurückkehren.

In der grafischen Ausgabe können die Stäbe mit der Stabnummer sowie mit der gestrichelten Faser versehen werden (im Menü unter [EXTRAS](#)  $\Rightarrow$  [EINSTELLUNGEN](#)  $\Rightarrow$  [DARSTELLUNG](#)). Damit ist es möglich, genau zu erkennen, wo die Ober- und Unterseite des Stabes ist - wichtig vor allem bei der Benutzung von unsymmetrischen Querschnitten.

Weiterhin haben Sie im gezeigten Fenster die Möglichkeit, Stäbe per Definition des Anfangs- und Endknotens zu erzeugen. Klicken Sie dazu auf den Button [LISTE](#), so dass sich das Fenster nach rechts erweitert. In der hier erscheinenden Box können Sie jeweils Anfangs- und Endknoten als Nummer eingeben.

### **Flip, Stabrichtung umdrehen:**

Ist ein Stab falsch herum angeordnet worden, können Sie diesen markieren, anschließend die rechte Maustaste anklicken und im erscheinenden Menü den Punkt [FLIP, STABRICHTUNG UMDREHEN](#) wählen. Jetzt werden Anfangs- und Endknoten vertauscht. Achten Sie jedoch darauf, dass die Belastungen des Stabes gegebenenfalls auch geändert werden müssen, wenn diese lokal definiert sind.

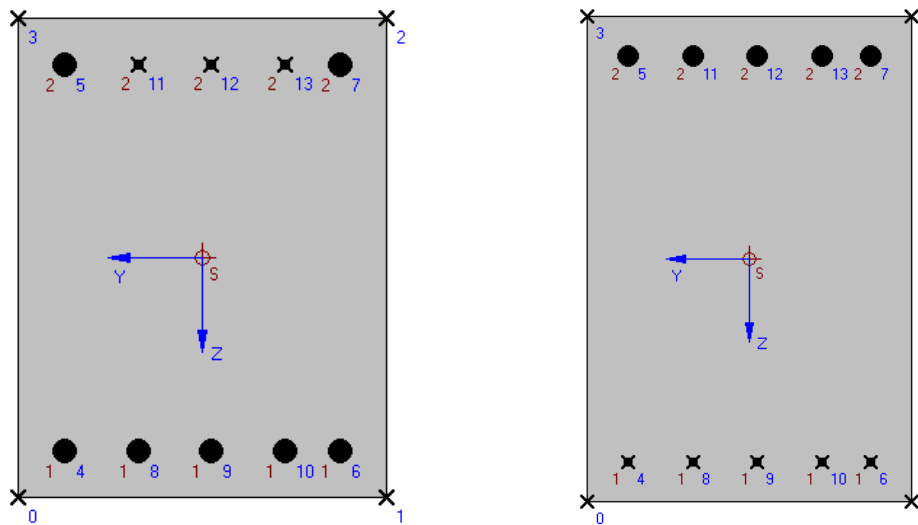
### **Anmerkung zu gevouteten Querschnitten:**

Achten Sie bei dieser Wahl bitte darauf, dass die Anfangs- und Endquerschnitt vom gleichen Typ sind. Eine Hilfestellung wird bei der Wahl der Querschnitte im Fenster mit ausgegeben. Nicht kompatible Typen werden vom Programm erkannt, die Erzeugung eines Stabes ist dann nicht möglich.

Bei Wahl von zwei INCA2-Querschnitten ist es wichtig, dass jedes Element des ersten Querschnitts (Punkt, Polygon, Material etc.) ein gleiches Element (mit evtl. anderen Eigenschaften) im zweiten Querschnitt hat. Während der Rechnung wird per linearer Interpolation zwischen den einzelnen Elementen ein jeweils aktueller INCA2-Querschnitt an der Stelle  $x$  erzeugt. Erstellen Sie den zweiten Querschnitt am besten, indem Sie den ersten Querschnitt unter einem zweiten Namen abspeichern und anschließend Bewehrungs- und Polygonpunkte in ihre neue Lage verschieben und gegebenenfalls die Bewehrungsmenge oder Vorspannung ändern. Fügen Sie keine Punkte etc. hinzu oder löschen Sie welche! Mit der linearen Interpolation verändert sich bei symmetrischen Querschnitten auch der Schwerpunkt linear. Bei der Voutung von Plattenbalken ist dies jedoch nicht der Fall, was damit zu geringfügig unterschiedlichen Ergebnissen führt im Vergleich zur jeweils exakten Schwerpunktslage der Querschnitte.

Zu Beginn der Rechnung erfolgt die Kontrolle der INCA2-Querschnitte. Wenn Fehler auftreten, werden Sie darauf hingewiesen. Die Berechnung wird dann nicht durchgeführt.

Beispiel für zwei INCA2-Querschnitte, die in einem gevouteten Stab benutzt werden. Achten Sie auf die korrekte Nummerierung der Bewehrungs- und Polygonpunkte.

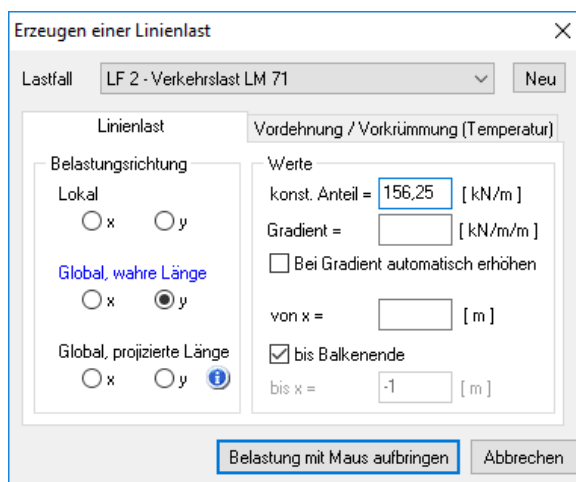


## 2.6 Belastung

Nachdem das System in seiner Struktur eingegeben ist, können die Lasten definiert werden. Folgende Lastarten stehen zur Verfügung:

- Knotenlast (Kraft, Moment / Weg, Verdrehung)
- Einzellast auf Stab (Kraft, Moment)
- Streckenlast auf Stab (Kraft / (Temperatur)-Dehnung und -Verkrümmung)

Beispiel für das Erzeugen einer neuen Linienlast:



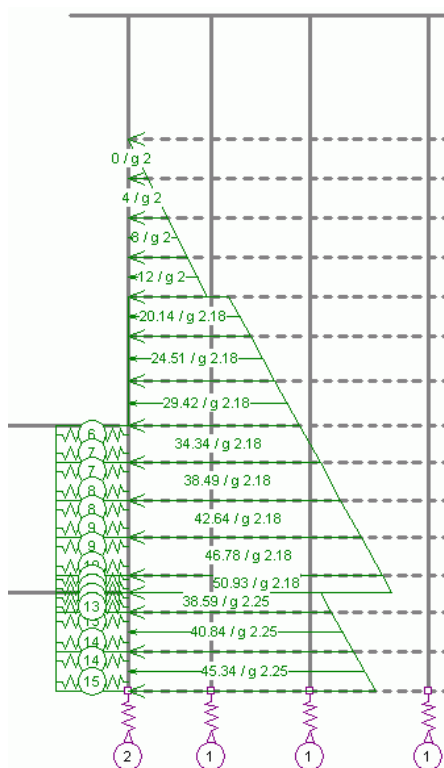
Die jeweiligen Fenster für die anderen Lasttypen erreichen Sie per Buttonleiste oder im Menü

*EINGABE.*

Wählen Sie im jeweiligen Fenster zuerst den Lastfall, zu dem die Belastung zugeordnet werden soll. Erzeugen Sie gegebenenfalls einen neuen Lastfall per nebenstehendem Button **NEU**. Wählen Sie den genauen Typ, Angriffsrichtung etc. und ergänzen Sie fehlenden Werte. Anschließend wählen Sie den Button **LAST MIT MAUS** aufbringen, das Fenster wird dann geschlossen. Die Belastung wird aufgebracht, indem Sie jetzt die entsprechenden Elemente (Stäbe oder Knoten) anklicken.

Bei Lasten mit Gradient (z.B. Erddruckverläufe etc.) können Sie ein Häkchen bei "**GRADIENT AUTOMATISCH ERHÖHEN**" setzen. Anschließend können Sie mehrere Stäbe entlang der Belastung anklicken, wobei der Anfangswert der Belastung für den jeweils nächsten Stab entsprechend des Gradienten erhöht wird.

z.B. Lastverlauf aktiver Erddruck



### Vorzeichenkonvention

Da das Koordinatensystem für die Eingabe der Knoten derart gewählt wurde, dass die x-Achse nach rechts und die y-Achse nach oben zeigen, muss bei der Definition der Belastung eine kleine Ungenauigkeit der Vorzeichenregelung in Kauf genommen werden (Man möge dem Autor diese Ungenauigkeit verzeihen). Korrekt wäre, dass eine positive Kraft im Allgemeinen auch eine positive Verschiebung erzeugt. Damit sich das System infolge Eigengewicht nach unten verformt, müssten demzufolge negative Werte für die Eigengewichtsbelastung eingegeben werden. Um dies jedoch zu vermeiden, wurde bei der Definition der Kräfte das Vorzeichen umgedreht. Eine positive Belastung (infolge Eigengewicht) erzeugt damit eine negative Verschiebung. Ebenso verhält es sich mit der Definition der Biegemomente.

Ausschließlich die Weggrößen, die als Zwangsverformung aufgebracht werden, wurden im Programm Vorzeichenrichtig implementiert. Positive Weggrößen ergeben damit eine Verformung entweder nach rechts, nach oben oder links herum drehend.

### **Lastfälle anzeigen und ausblenden**

Achten Sie bitte darauf, dass der gewählte Lastfall auch angezeigt wird (Lastfall anzeigen), da ansonsten zwar die Last aufgebracht, aber in der Zeichnung erst einmal nicht dargestellt wird.

Achten Sie bitte weiterhin darauf, jedes Element nur einmal anzuklicken, da ansonsten die Belastung mehrmals aufbracht werden kann. In der Zeichnung ist dies anschließend nicht zu erkennen, da die Lasten einfach zweimal übereinander gezeichnet werden. Im Fall einer Knotenlast wird bereits während der Eingabe darauf hingewiesen, im Falle einer Linienlast erfolgt ein Hinweis vor Beginn einer Rechnung.

Für projizierte Lasten mit Gradient wird der Gradient auf die projizierte und nicht auf die reale Stablänge bezogen. Beispiel für Stab im Raum unter  $45^\circ$  und mit  $L_{\text{ges}} = 14,142 \text{ m}$ :

Projizierte Länge  $L_p = 10 \text{ m}$

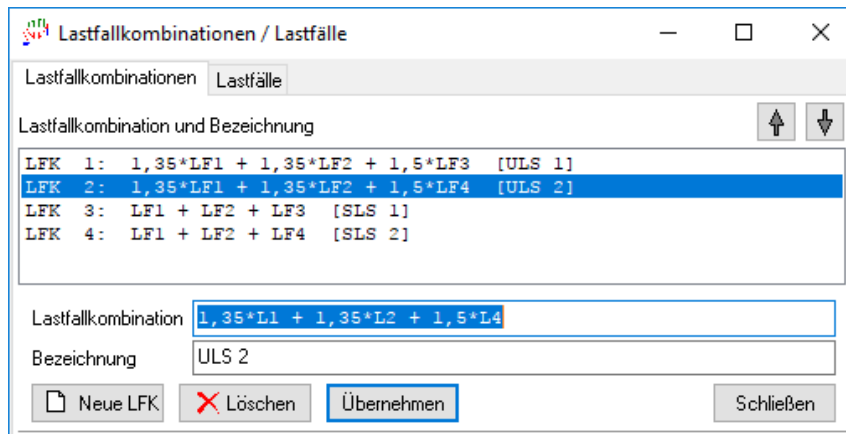
Last am Stabanfang  $p = 5 \text{ kN/m}$

Gradient =  $2 \text{ kN/m/m}$

Last am Stabende =  $5 + 2 \cdot 10 \text{ m} = 25 \text{ kN/m}$

## 2.7 Lastfälle und Lastfallkombinationen

Nach dem Erzeugen der Lasten und deren Zuordnung in Lastfällen können diese noch zu Lastfallkombinationen zusammengefasst werden. Wählen Sie dazu im Menü **DEFINITION**  $\Rightarrow$  **LASTFALLKOMBINATION**, folgendes Fenster öffnet sich:

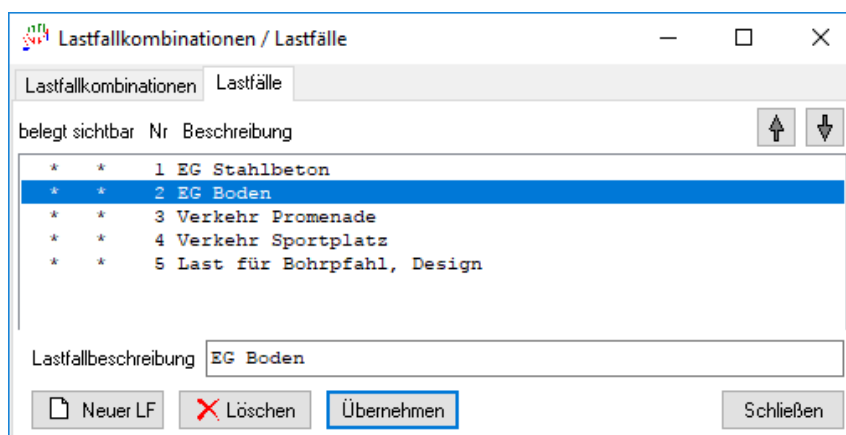


Hier sind alle bereits erzeugten Lastfallkombinationen aufgelistet. In der unten stehenden Textbox können Sie diese ändern oder neue erstellen. Die Syntax sei an folgendem Beispiel erläutert:

$$1,35 \cdot L1 + 1,5 \cdot L2 - 0,9 \cdot L4$$

Die Lastfälle werden mit **Lx** bzw. **LFx** (**x** = Nummer des Lastfalls) bezeichnet. Vorfaktoren (z.B. für Teilsicherheitsbeiwerte, Kombinationsbeiwerte) sind erlaubt, jedoch nur einer pro Lastfall. Der Vorfaktor kann auch negativ sein. Das Setzen von Klammern ist derzeit noch nicht möglich. Die Lastfälle in einer Lastfallkombination können in beliebiger Reihenfolge eingegeben werden. Nach der Eingabe werden die Lastfälle einer LFK aber durch das Programm sortiert.

Im zweiten Teil dieses Fensters (Karteikartenreiter **LASTFÄLLE**), können die Lastfälle beschriftet und mit den Pfeiltasten oben rechts sortiert werden.



Das Erzeugen sowie das Löschen von Lastfällen ist hier ebenso möglich.

Die Sternchen vor den Lastfällen zeigen an, ob der Lastfall belegt ist (es also Lasten in diesem Lastfall gibt) und ob der Lastfall gerade angezeigt wird (Anzeigen von Lastfällen).

Mit den Pfeiltasten können sowohl die Lastfälle als auch die Lastfallkombinationen in der Reihenfolge vertauscht werden.

## 2.8 Assistenten

Für einige Standardaufgaben bei der Modellierung eines Systems sind im Menü *EINGABE* folgende Assistenten im Programm implementiert:

- Parabel erzeugen
- Linienlasten
- Eigengewicht

### 2.8.1 Assistent Parabel erzeugen

Mit diesem Assistenten wird ein parabelförmiger Stabzug mit einer zu wählenden Werte für Spannweite und Parabelstich erzeugt. Ergänzend kann auch gleich eine Belastung aufgebracht werden. Die Parabel stellt die Näherung für die Kettenlinie (Cosinus hyperbolicus) dar, z.B. für die Modellierung von Seiltragwerken oder ähnlich weichen Systemen.

**Parabel erzeugen (Seilstruktur)**

Spannweite

Parabelstich  $f_p$

$(x_0/y_0)$

Geometrie

Spannweite = 10 [m]    Anzahl der Stäbe = 40

Parabelstich = 1 [m]

Stabquerschnitt: Kreis d = 20 mm

$x.0 / y.0 = 0 / 0$  [m]

☒ Belastung aufbringen

Lastfall: LF 1    Neu

Belastung in y-Richtung

☒ wahre Länge (Eigengewicht)

☐ projizierte Länge (Schnee)

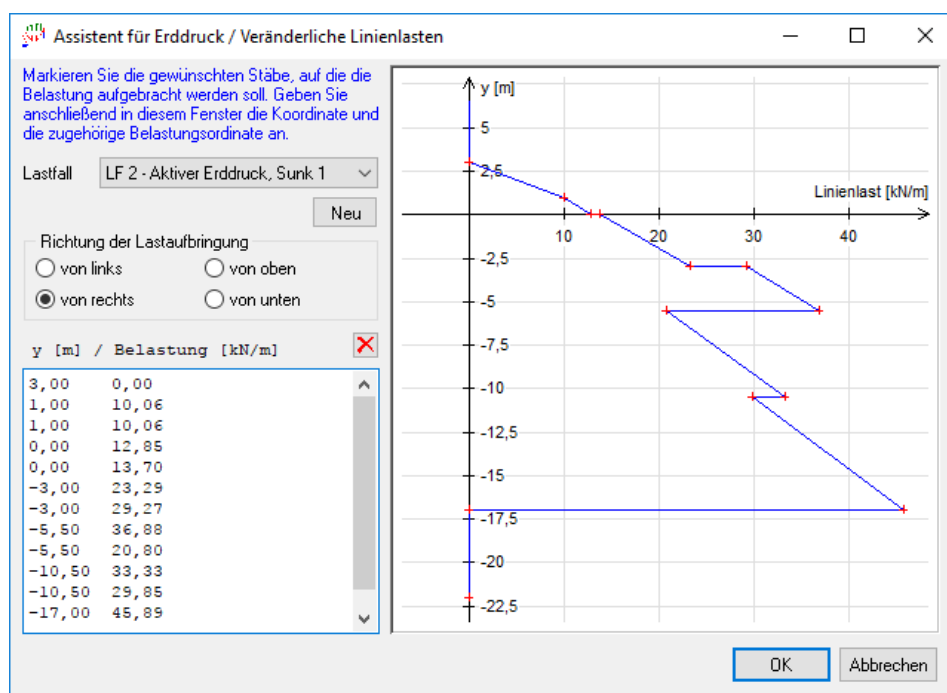
Belastung: 0,1 [kN/m]

OK    Abbrechen

## 2.8.2 Assistent Linienlasten

Mit diesem Assistenten können über die Höhe oder Länge veränderliche Linienlasten sehr einfach aufgebracht werden, z.B. Erddruckverlauf aus dem aktiven Erddruck, Windlasten über die Höhe veränderlich. Gehen Sie dazu wie folgt vor:

- Selektieren der Stäbe, auf die die Belastung aufgebracht werden soll
- Öffnen des Assistenten über das Menü **EINGABE** => Assistent Linienlasten
- Eingabe des Lastverlaufes mit y-Koordinate (bzw. x) und dem jeweiligen Wert der Linienlast
- Auswahl, aus welcher Richtung die Belastung aufgebracht werden soll
- Button **OK**





### 2.8.3 Assistent Eigengewicht

Mit diesem Assistenten kann das jeweilige Eigengewicht auf die Stäbe aufgebracht werden. Voraussetzung ist die Eingabe der Wichte durch den Benutzer bei der Querschnittsdefinition, so dass sich das Programm über die Querschnittsfläche das Eigengewicht in [kN/m] ermitteln kann.

**Assistent für Eigengewicht**

Lastfall: **LF 3 - Eigengewicht** Neu

Faktor für x-Richtung =  (positiv = nach links)

Faktor für y-Richtung =  (positiv = nach unten)

Belastung für folgende Querschnitte

<input checked="" type="checkbox"/>	[1] = 12,177 kN/m - D = 2,000 m / t = 25 mm, f.y = 4
<input checked="" type="checkbox"/>	[2] = 14,575 kN/m - D = 2,000 m / t = 30 mm, f.y = 4
<input checked="" type="checkbox"/>	[3] = 14,575 kN/m - D = 2,000 m / t = 30 mm, f.y = 4
<input checked="" type="checkbox"/>	[4] = 19,335 kN/m - D = 2,000 m / t = 40 mm, f.y = 4
<input checked="" type="checkbox"/>	[5] = 21,696 kN/m - D = 2,000 m / t = 45 mm, f.y = 4
<input type="checkbox"/>	[6] = 0,0000 kN/m - -----
<input checked="" type="checkbox"/>	[7] = 13,617 kN/m - D = 2,000 m / t = 25+3 = 28 mm,
<input checked="" type="checkbox"/>	[8] = 16,008 kN/m - D = 2,000 m / t = 30+3 = 33 mm,
<input checked="" type="checkbox"/>	[9] = 16,008 kN/m - D = 2,000 m / t = 30+3 = 33 mm,
<input checked="" type="checkbox"/>	[10] = 20,753 kN/m - D = 2,000 m / t = 40+3 = 43 mm,
<input checked="" type="checkbox"/>	[11] = 23,107 kN/m - D = 2,000 m / t = 45+3 = 48 mm,

OK Abbrechen

Die zu berücksichtigenden Querschnitte können ausgewählt werden. Außerdem ist ein Faktor anzugeben, mit dem das Eigengewicht beim Aufbringen zu multiplizieren ist. Nach Klick auf den Button OK werden im ausgewählten Lastfall entsprechenden Linienlasten auf den ausgewählten Stäben neu erzeugt.

Zu beachten ist, dass bei späterer Änderung des Querschnittes diese Linienlasten nicht automatisch angepasst werden! In so einem Fall muss die Änderung des Eigengewichtes manuell durch den Benutzer vorgenommen werden oder alternativ über die neue Generierung der Lasten mittels Assistent.

Durch die Auswahl eines Faktors für die x-Richtung können beispielsweise sehr einfach Erdbebenlasten in horizontaler Richtung für die Berechnung mit statischer Ersatzlast aufgebracht werden.

## 2.9 Rechenparameter

Für die Genauigkeit der Ergebnisse sowie für das Konvergenzverhalten einer nichtlinearen Rechnung sind die Rechenparameter von großer Bedeutung. Da eine nichtlineare Rechnung immer ein iterativer Prozess ist, werden hier vor allem die Abbruchschranken definiert. Die sinnvolle Definition dieser Werte für eine schnelle und konvergente Rechnung erfordert auch immer ein klein wenig Erfahrung. So kann es durchaus vorkommen, dass ein nichtlineares Problem mit einer bestimmten Wertekombination sehr gut konvergiert, mit anderen Rechenparametern jedoch divergiert.

Sie erreichen diesen Punkt im Menü unter **DEFINITION => PARAMETER**. Die Rechenparameter gliedern sich in drei Unterpunkte. Im vierten und fünften Karteikartenreiter können die Ausgabe der Ergebnisse sowie die Protokollierung von Zwischenergebnissen festgelegt werden.

### 2.9.1 Übertragungsverfahren 1

Parameter / Berechnungskriterien

Übertragung 1    Übertragung 2    FEM-Lösung    Ergebnisse    Protokollierung

Teilung der Stababschnitte

minimale Stabteilung zu Beginn der Rechnung: 16

bzw. max. anfängliche Größe der Stababschnitte: 0,5 m

min. Größe der Abschnitte nach Verfeinerung: 0,002 m

Bei Bedarf Verfeinerung der Teilung mit Faktor: 1

Bei Voutung: Sofortige Verfeinerung mit Faktor: 3

Formel zur Berechnung der neuen Zwischenteilung T

$$T = \left( \frac{B_{alt}}{B_{neu}} - 1 \right) \cdot m \leq N$$

m = 20    N = 40

Theoretischer Fehler  $1/m = 5 \%$

Diese Werte als Standard setzen    OK    Abbrechen

Für die Berechnung eines einzelnen Stabes wird das sogenannte Übertragungsverfahren benutzt. Dazu wird der Stab bereits zu Beginn in kleinere Abschnitte geteilt. Während der Rechnung erfolgt dann je nach Bedarf eine feinere Teilung (z.B. große Änderung der Steifigkeitswerte, benutzte Näherung für Normalkrafteinfluss nicht ausreichend).

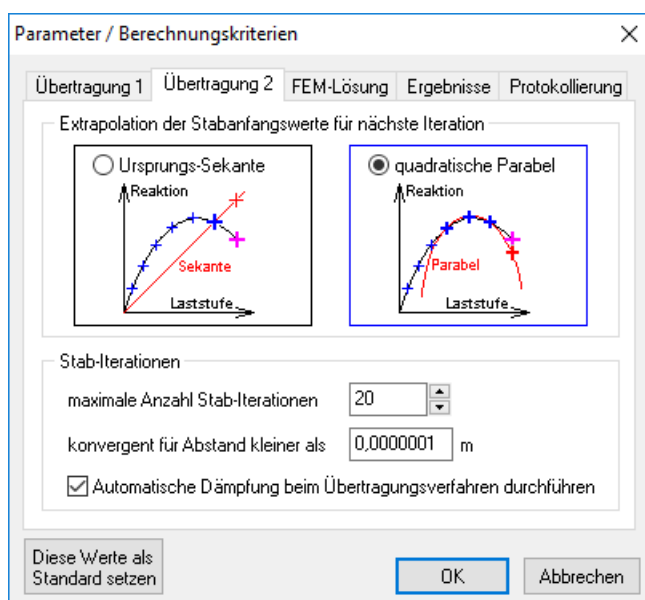
Die anfängliche Teilung wird mit dem ersten Parameter über die Anzahl der Elemente (hier 16) festgelegt, bei sehr langen Stäben jedoch über die Länge, die hier auf 0,50 m gesetzt wurde. Bei Verfeinerung während der Rechnung wird die minimale Stablänge auf 0,002 m begrenzt.

Die Gleichungen des Übertragungsverfahrens berücksichtigen den Normalkrafteinfluss mittels eines Näherungsansatzes. Bei sehr großen Verformungen (wirklich groß, z.B. 2 m Durchbiegung bei 10 m Spannweite) sollte zur Genauigkeitssteigerung der gesamte Stab feiner geteilt werden, hier mit einer zusätzlichen Teilung festgelegt.

Ist der Stab gevoutet, ändern sich die Steifigkeitswerte bereits im Zustand I kontinuierlich, so dass eine feinere Anfangsteilung sinnvoll ist (Faktor = 3, die Anfangsteilung beträgt also  $3 \times 16 = 48$ ).

Wie erwähnt, wird während der Stabberechnung an jeder Stelle mit der aktuellen Steifigkeit gerechnet. Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens ändert sich diese von Abschnitt zu Abschnitt. Je nach Änderung der Steifigkeiten sollten Zwischenpunkte eingeschoben werden, um die Genauigkeit der Lösung zu erhöhen. Die Ermittlung der Anzahl der Zwischenpunkte hängt vom Verhältnis der Biegesteifigkeiten zwischen Abschnittsanfang und Abschnittsende ab, die Formel ist im Fenster dargestellt. Mit den beiden Werten „m“ und „N“ kann die Teilung beeinflusst werden. Ein großes „m“ (Anstieg) ergibt bereits bei kleineren Steifigkeitsunterschieden eine hohe Anzahl an weiteren Zwischenteilungen. Begrenzt wird die Anzahl der Zwischenteilungen durch den Wert „N“ (Obergrenze). Große Werte für „m“ und „N“ erhöhen in gewissem Maße die Genauigkeit, teilweise auch die Iterationsgeschwindigkeit durch bessere Näherung der Steifigkeiten (Lösung konvergiert besser). Die einzelne Stabberechnung dauert dann jedoch länger. Zu große Werte sind deshalb nicht angebracht.

## 2.9.2 Übertragungsverfahren 2



Beim Aufbringen der Belastung in Lastschritten wird versucht, die neuen Stabanfangswerte (Biegemoment, Normalkraft etc.) durch Extrapolation aus den Ergebnissen der vorherigen Laststufen zu schätzen. Dies kann entweder linear (Ursprungssekante) oder quadratisch mit den letzten drei Werten erfolgen. Prinzipiell ist die quadratische Extrapolation genauer, ist jedoch in einigen Fällen bei hin und her springenden Ergebnissen nicht von Vorteil.

Im unteren Teil des Fensters wird die Anzahl der Stabiterationen eingestellt. Zu Beginn der Rechnung (Startwerte sind alle unbekannt) werden für nichtlineare Probleme meist 7 oder 8 Stab-Iterationen benötigt. Im Verlauf der Rechnung (es liegen bereits Schätzwerte vor), reichen meist 2 oder 3 Stab-Iterationen aus. Als maximale Anzahl ist der Wert 20 deshalb eine gute Wahl.

Die Stabiteration wird abgebrochen, wenn das im Übertragungsverfahren ermittelte Stabende mit seiner Soll-Lage (Koordinaten des Endknotens) genügend genau übereinstimmt. Im Bild wurde der max. zulässige Abstand auf 0,0000001 m = 0,0001 m gesetzt. Zwar ist dieser Wert extrem klein gewählt, andererseits ergeben sich bei steifen Stahlbetontragwerken durch kleine Abweichungen be-

reits leicht ungenaue Ergebnisse für die Schnittgrößenverläufe und für die Gradienten. Je nach System können auch größere Werte von 0,001 mm oder 0,01 mm gewählt werden. Größere Werte werden jedoch nicht empfohlen, da dadurch die Genauigkeit der Steifigkeitsmatrix kleiner wird und der Iterationsaufwand ansteigt.

### 2.9.3 FEM-Lösung

The screenshot shows a dialog box titled 'Parameter / Berechnungskriterien' with a close button (X) in the top right corner. It has five tabs: 'Übertragung 1', 'Übertragung 2', 'FEM-Lösung' (selected), 'Ergebnisse', and 'Protokollierung'. The 'FEM-Lösung' tab contains two main sections: 'Iterationen' and 'Konvergenz / Divergenz'. In the 'Iterationen' section, there are two input fields: 'Anzahl der Lastschritte' with the value '10' and a button 'Lastverlauf ...' to its right, and 'Anzahl der Iterationen pro Laststufe' with the value '15'. Below these is a checked checkbox labeled 'Automatische Dämpfung bei FEM-Lösung durchführen'. The 'Konvergenz / Divergenz' section has three input fields: 'konvergent für Kraft kleiner als' with the value '0,01', 'bei Zwischenerg. kleiner als' with the value '0,2', and 'divergent für Kraft größer als' with the value '10000000'. Each of these fields is followed by the text 'kN bzw. kNm'. At the bottom left is a button 'Diese Werte als Standard setzen', and at the bottom right are buttons 'OK' and 'Abbrechen'.

Nachdem jeder Stab für sich berechnet und die lokale Steifigkeitsmatrix aufgestellt wurde, werden diese in der globalen K-Matrix und dem Kräftevektor zusammengefasst. Dieser Teil wird damit als Finite-Elemente-Lösung bezeichnet.

Für ein nichtlineares Problem, dessen Endergebnisse im plastischen Bereich liegen, ist es sinnvoll, die Belastung in Lastinkrementen aufzubringen (hier 10 Lastschritte). Weniger Laststufen bieten sich bei Berechnungen z.B. im Gebrauchszustand an, wo die Ergebnisse der Querschnitte noch weit unterhalb der plastischen Bereiche sind. Für Berechnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit, insbesondere auch verformungsbeeinflusste Probleme (z.B. Stützen) können für eine konvergente Lösung evtl. auch mehr Lastschritte erforderlich sein. Dieser Parameter muss für das jeweilige Problem vom Benutzer getestet werden. Die hier gewählten 10 Lastschritte stellen in den meisten Fällen einen eher zu hohen Wert dar, die meisten Systeme konvergieren auch mit 2 oder 3 Lastschritten.

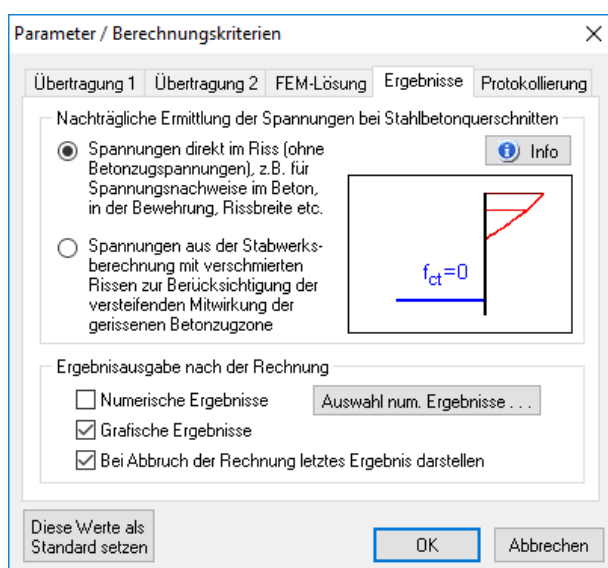
Klicken Sie auf den Button **LASTVERLAUF**. Es erscheint ein weiteres Fenster, in dem Sie den **VERLAUF DER LASTSTUFEN** genauer definieren können.

In jeder Laststufe wird solange iteriert, bis entweder die maximale Anzahl erreicht wird (hier 15) oder der Fehler (maximum unbalanced load) die Abbruchgenauigkeit unterschritten hat. Die Abbruchgenauigkeit wird mit zwei Werten definiert. Der erste Wert (hier 0,01 kN) ist für das Endergebnis wichtig, wo eine hohe Genauigkeit gefordert ist. Der zweite Wert (hier 0,2 kN) ist nur für die Zwischenergebnisse während der Iteration maßgebend, wo die Genauigkeit im Normalfall nicht entscheidend ist. Es soll nur gewährleistet werden, dass ein ausreichend guter Schätzwert für den nächsten Lastschritt zur Verfügung steht.

Der letzte Punkt, divergent für Kraft größer als (hier 1E7), ist für den Abbruch der Rechnung zuständig, falls das System divergiert.

Am Ende einer Berechnung wird überprüft, ob die nicht im Gleichgewicht stehende Kraft kleiner ist als der hier eingegebene Grenzwert. Falls die nicht im Gleichgewicht stehende Kraft größer ist als der Grenzwert, erfolgt ein Hinweis für den Benutzer mit Angabe der entsprechenden Kraft. An dieser Stelle ist durch den Benutzer zu entscheiden, ob das Ergebnis ausreichend genau ist. Beispielsweise ist es bei Berechnung einer Brücke mit Auflagerkräften von 1000 kN und mehr akzeptabel, wenn eine Kraft von vielleicht 1 kN nicht im Gleichgewicht steht.

## 2.9.4 Ergebnisse

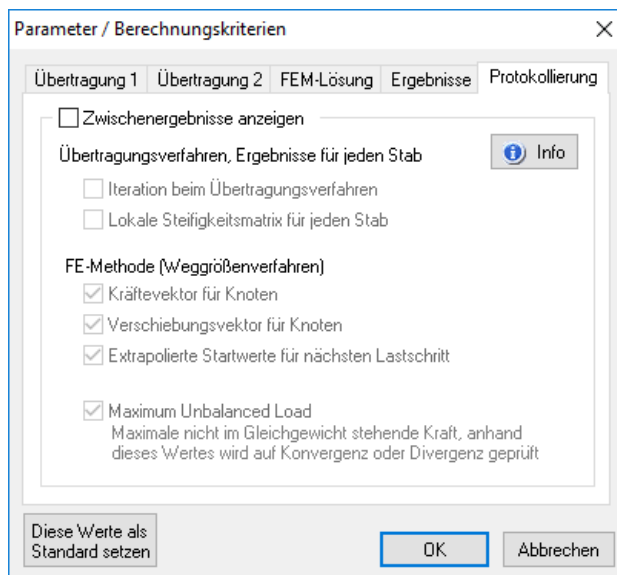


Am Ende der Rechnung werden bei nichtlinearen Querschnitten die Spannungen im Beton und in der Bewehrung ermittelt. Das kann einerseits direkt im Riss erfolgen, also unter Ausschluss der Zugspannungen des Betons. Diese Werte sind vor allem in der Ingenieurpraxis für weitere Nachweise der Gebrauchstauglichkeit oder der Ermüdung notwendig.

Als zweite Option steht die Ermittlung der Spannungen unter Berücksichtigung der versteifenden Mitwirkung der Betonzugzone zur Verfügung. Hier werden die Werte im Prinzip direkt aus der Stabwerksrechnung übernommen und die Spannungen bei der Betrachtung von verschmierten Rissen ermittelt. Diese Werte, insbesondere die Betonzugspannungen, sind als *Rechenwerte* zu verstehen und entsprechen näherungsweise den im Mittel auftretenden Spannungen im Stahlbetonquerschnitt. Für weitere Nachweise in der Ingenieurpraxis sind diese Werte nicht relevant und dürfen nicht verwendet werden. Prinzipiell könnten diese Werte für Vergleichsrechnungen mit anderen Programmen genutzt werden oder um die Ergebnisse der Verformungsrechnung etc. genauer zu analysieren.

Weiterhin kann hier das Verhalten nach der Rechnung eingestellt werden. In diesem Fall werden am Ende der Rechnung automatisch die grafischen Ergebnisse angezeigt.

## 2.9.5 Protokoll

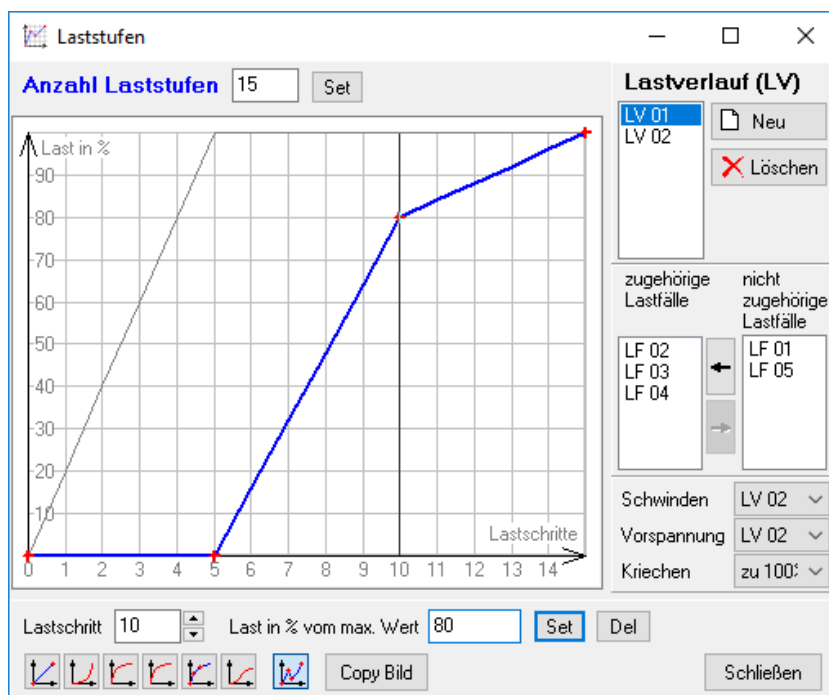


Hier regeln Sie das Protokoll-Verhalten während der Rechnung. Falls ein System nicht konvergiert, kann es sinnvoll sein, sich die FEM-Zwischenergebnisse mit Kräfte- und Verschiebungsvektor ausgeben zu lassen. Damit erhält man evtl. Anhaltspunkte, welche Kraft zu groß wird oder welcher Knoten zu große Verformungen erleidet. Beachten Sie jedoch, dass vor allem bei größeren Systemen mit vielen Knoten und Stäben die Protokollierung einen sehr großen Teil der Rechenzeit in Anspruch nehmen kann. Daher sollte üblicherweise die Protokollierung ausgeschaltet sein.

## 2.10 Laststufen

Bei einer nichtlinearen Berechnung ist es sinnvoll, die Belastung nicht in einem Schritt, sondern in mehreren Laststufen aufzubringen. Da die in einer ersten linearen Rechnung ermittelten Schnittgrößen sehr häufig von den nichtlinearen Ergebnissen abweichen, kann es passieren, dass bei der Berechnung in einem einzigen Lastschritt die Tragfähigkeit an einigen Stellen überschritten und die nachfolgende Iteration schwierig wird. Insbesondere bei Berechnungen, bei denen sich die Querschnitte im plastischen Bereich befinden, sollte mit kleinen Lastschritten gearbeitet werden. Man muss dem System sozusagen "Zeit geben, sich umzulagern".

Die Definition der Laststufen erreichen Sie im Menü unter **DEFINITION => LASTSTUFEN** oder im Menü unter **DEFINITION => PARAMETER**, wo Sie den dritten Karteikartenreiter **FEM-LÖSUNG** wählen. Nachdem Sie in diesem Fenster die Anzahl der Lastschritte gewählt haben, klicken Sie auf den Button **VERLAUF** und folgendes Fenster erscheint.



In der Grafik sehen Sie den Verlauf der Belastung über die einzelnen Laststufen aufgetragen. In diesem Beispiel erfolgte die Definition von zwei Lastverläufen. In Lastverlauf **LV 02** (graue Kurve) ist Lastfall **LF 01** enthalten, in dem beispielsweise das Eigengewicht der Konstruktion bis Lastschritt 5 zu 100% aufgebracht wird und im weiteren konstant bleibt.

Die anderen drei Lastfälle (LF 02 bis LF 04) sind im Lastverlauf **LV 01** zusammengefasst (blaue Kurve). In den ersten Lastschritten werden diese Lastfälle noch nicht aufgebracht (Wert = 0). Von Lastschritt 5 an bis Lastschritt 10 erfolgt eine Steigerung bis 80% des Endwertes, bis Lastschritt 15 dann die Erhöhung auf 100%.

Mit dieser Formulierung der verschiedenen Lastverläufe ist es möglich, sehr leicht ein Experiment nachzuvollziehen, in dem das Eigengewicht bereits vor Beginn der Messungen wirkt. Eine Wegnahme

der Lasten ist zwar auch möglich, bleibende Verformungen (plastische Bewehrung oder geschädigter Beton) werden jedoch nicht berücksichtigt!

Schwinden, Vorspannung und Kriechen können rechts unten jeweils getrennt einem Lastverlauf zugeordnet werden und gelten für die benutzten INCA2-Querschnitte sowie für die anderen nichtlinearen Querschnitte. Mit **VORSPANNUNG** sind alle Vordehnungen und Vorkrümmungen gemeint, die bereits im INCA2-Querschnitt modelliert wurden. **SCHWINDEN** ist die zusätzliche Vordehnung (der Bewehrung), die in Stab2D-NL bei der Querschnittsdefinition eingegeben wird und mit der der INCA2-Querschnitt erst während der Rechnung beaufschlagt wird. Für das **KRIECHEN** wird der Kriechbeiwert  $\varphi$  und die Abminderung der Zugfestigkeit benutzt, die ebenfalls bei der Querschnittsdefinition in Stab2D-NL eingegeben werden. Damit werden die Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons während der Rechnung verändert.

Mit den getrennten Definitionen für Schwinden, Vorspannung und Kriechen lässt sich z.B. ein System für  $t = 0$  mit äußerer Last + Vorspannung belasten, wobei alle zeitabhängigen Effekte noch zu Null gesetzt sind. Erst in den folgenden Lastschritten wird bei gleicher äußerer Belastung Schwinden und Kriechen aufgebracht, so dass man die zeitabhängigen Effekte gut studieren kann. Zu beachten ist jedoch, dass die Modellierung des Kriechens mit dem Strecken der Spannungs-Dehnungs-Linie mit dem Faktor  $(1+\varphi)$  nur eine Näherung darstellt.

Unten links im Fenster befinden sich folgende Buttons für vordefinierte Last-Verläufe:

- Linear
- Quadratisch, Scheitelpunkt im Ursprung (für labile Seilsysteme)
- Quadratisch, Scheitelpunkt oben rechts
- Kubisch, Scheitelpunkt oben rechts
- Tri-Linear
- Sinus-förmig
- Benutzer-definiert (hier markiert)

Wird die letzte Option **BENUTZER-DEFINIERT** gewählt, kann man in der Grafik mit der Maus jeden Punkt anwählen und in der unten stehenden Textbox einen neuen Wert für die Belastung eingeben. Einmal **RETURN** drücken oder den Button **SET** anklicken und der Wert wird in die Grafik übernommen. Mit dem Button **DEL** (Delete) wird der markierte Punkt gelöscht und wieder ein linearer Zusammenhang zwischen den verbleibenden Punkten hergestellt.

Mit dem Button **COPYBILD** wird die Grafik in einem extra Fenster als Metafile ausgegeben.

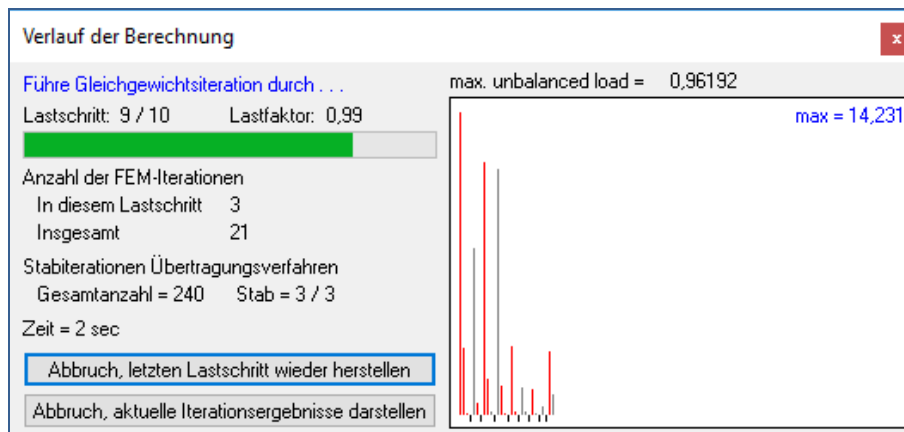
In der rechten Seite des Fensters stehen die Funktionen zu den bereits zuvor erläuterten Lastverläufen zur Verfügung. In der oberen Textbox sind alle bisher erstellten Lastverläufe zu sehen. Der markierte Lastverlauf wird in der Grafik mit der blauen Linie dargestellt, alle anderen in grau. Im unteren Bereich erfolgt die Ausgabe der zum Lastverlauf zugehörigen und nicht zugehörigen Lastfälle. Durch die zwei Pfeil-Buttons können die Lastfälle zugeordnet werden.



## 2.11 Berechnung

Mit der Taste F9 bzw. im Menü **ERGEBNISSE => BERECHNUNG MIT DARGESTELLTEN LASTEN** können Sie das System berechnen lassen. Beachten Sie bitte, dass für die Berechnung die aktuell markierten (dargestellten) Lastfälle berücksichtigt werden (siehe auch Anzeige von Lastfällen mit **F7**) bzw. die markierte Lastfallkombination.

Während der Rechnung wird das Hauptfenster ausgeblendet und es erscheint eine Fortschrittsanzeige, aus der Sie alle wichtigen Daten während der Berechnung entnehmen können



In dieser Anzeige finden Sie auch zwei Buttons, mit der Sie die Rechnung gezielt abbrechen können. Mit dem Button **ABBRUCH, LETZTEN LASTSCHRITT WIEDER HERSTELLEN** wird die aktuelle Laststufe abgebrochen und die Ergebnisse des letzten Lastschrittes dargestellt. Dazu wird für das gespeicherte Ergebnis des letzten Lastschrittes (Knotenverformungen und Stabanfangswerte) nochmals eine Rechnung durchgeführt, um die kompletten Ergebnisse für Stäbe zu erhalten.

Mit dem Button **ABBRUCH, AKTUELLE ITERATIONSERGEBNISSE DARSTELLEN** wird die Berechnung ebenfalls abgebrochen, jedoch der aktuelle Stand der Ergebnisse dargestellt.

Sinnvoll sind diese Optionen, wenn man am Wert für *Max. Unbalanced Load* feststellt, dass die Lösung divergiert oder immer hin und her springt.

In der Grafik auf der rechten Seite des Fensters werden die Werte für *Max. Unbalanced Load* dargestellt, der Wert für die maximal nicht im Gleichgewicht stehende Kraft an den Knoten. Diese Kraft kann erst im zweiten Iterationsschritt ermittelt werden. Rote Linien stehen für einen negativen Wert, graue Linien für einen positiven Wert. Im Laufe der Rechnung sollten diese Werte immer kleiner werden. Ein ständiger Wechsel zwischen den Farben (bzw. zwischen pos. und neg. Werten) könnte auf ein Springen der Lösung hindeuten.

Am Ende der Iteration werden alle Stäbe noch einmal mit dem Übertragungsverfahren berechnet, um die letzten berechneten Knotenverformungen exakt wiederzugeben. Außerdem wird bei INCA2-Querschnitten sowie bei den nichtlinearen Querschnitten noch ein Sicherheitsnachweis an jeder Stabposition durchgeführt und die Spannung ermittelt. Bei den Bemessungs-Querschnitten wird die erforderliche Bewehrung ermittelt. Je nach benutzten Querschnitten kann es nach Ende der Iteration deshalb noch einen kleinen oder größeren Moment dauern, bis die Ergebnisse dargestellt werden.

Nach durchgeführter Rechnung wird das gezeigte Fenster geschlossen und die normale Programmoberfläche erscheint wieder. Je nach Einstellung können jetzt automatisch folgende Ausgaben erfolgen:

- Berechnungsprotokoll in einem Textfenster
- grafische Ergebnisse (Steuerungsfenster links oben)
- numerische Ergebnisse in einem Textfenster

Am Ende der Rechnung kann es vorkommen, dass das Programm eine Meldung zu einem "nicht konvergenten Ergebnis" ausgibt. In diesem Fall ist die aktuell nicht im Gleichgewicht stehende Kraft (max. unbalanced load) größer als die Konvergenzschranke. Prüfen Sie daher die vom Programm ermittelte nicht im Gleichgewicht stehende Kraft, ob die Konvergenzschranke nur geringfügig überschritten wurde (dann ist das Ergebnis meist noch in Ordnung) oder ob der Wert für „max. unbalanced load“ deutlich zu groß ist.

## 2.12 Koordinatensystem und Vorzeichenregelung

Die Intention bei der Wahl des Koordinatensystems und der Vorzeichenregelung war, eine möglichst einfache und intuitive Benutzung zu ermöglichen. Aus diesem Grund werden alle wichtigen Größen (z.B. Belastung, Auflagerreaktionen) immer grafisch mit Richtungspfeil ausgegeben, so dass anhand dessen die Richtung und damit auch das Vorzeichen kontrolliert werden kann.

### Knotenkoordinaten

Das Koordinatensystem für die Eingabe der Knoten wurde derart gewählt, dass die x-Achse nach rechts und die y-Achse nach oben zeigen.

### Äußere Belastung - Kraftgröße -

Positive Werte für die globale Belastung wirken nach unten bzw. nach links. Damit wurde bei der Definition der Belastung eine kleine Ungenauigkeit in Kauf genommen. Korrekt wäre, dass eine positive Kraft im allgemeinen auch eine positive Verschiebung erzeugt. Damit sich das System infolge Eigengewicht nach unten verformt, müssten demzufolge negative Werte für die Eigengewichtsbelastung eingegeben werden. Um dies jedoch zu vermeiden, wurde bei der Definition der Kräfte das Vorzeichen umgedreht. Eine positive Belastung (infolge Eigengewicht) erzeugt damit eine negative Verschiebung. Ebenso verhält es sich mit der Definition der Biegemomente.

### Äußere Belastung - Weggröße -

Die Weggrößen, die als Zwangsverformung aufgebracht werden, wurden im Programm Vorzeichenrichtig implementiert. Positive Weggrößen ergeben damit eine Verformung entweder nach rechts, nach oben oder links herum drehend.

**Auflagerreaktionen**

Positive Werte für die Auflagerreaktionen wirken in Richtung der positiven Achsen des Koordinatensystems. Wird z.B. ein normaler Einfeldträger mit seinem Eigengewicht belastet, so zeigen die Auflagerkräfte nach oben und sind positiv.

Gleiches gilt auch für die Biegemomente bei Einspannungen.

**Federkräfte**

An dieser Stelle wurde wieder eine kleine Ungenauigkeit in Kauf genommen, um die Bedienung (hoffentlich) zu vereinfachen. Da der häufigste Fall wohl die elastische Bettung eines Fundamentes in vertikaler Richtung sein wird, ist die vertikale Feder als Standardfall eingestellt (Drehwinkel gleich Null). Eine Verschiebung nach unten ergibt Druckkräfte in der Feder (negative Werte), die der Verformung entgegenwirken (also nach oben zeigen).

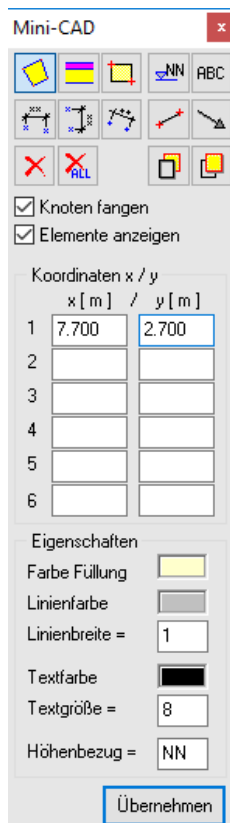
Um sicher die richtige Wirkungsrichtung zu erkennen, werden bei der grafischen Ausgabe die Pfeile entsprechend dieser Wirkungsrichtung eingezeichnet.

**Stabschnittgrößen**

Hier gilt die übliche Definition aus der Balkenstatik.

## 2.13 Mini-CAD

Zur Dokumentation von Ergebnissen für eine Statik ist es hilfreich, weitere Beschriftungen, Maßketten, Bodenprofile oder ähnliches im statischen System zu ergänzen. Hierfür steht eine Mini-CAD-Oberfläche zur Verfügung, welches über die Funktionstaste F12 oder über die Button-Leiste aufgerufen werden kann.



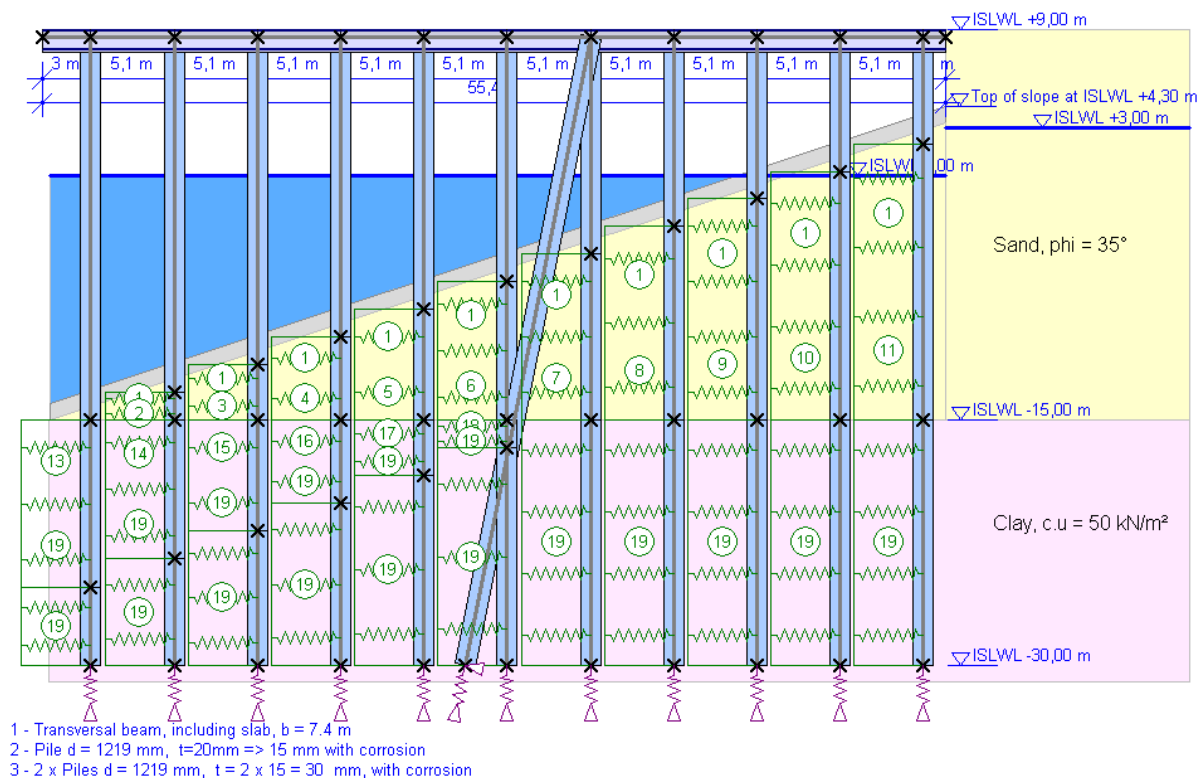
Folgende Funktionen sind implementiert:

- |              |  |
|--------------|--|
| Polygon      | Polygon mit maximal 6 Ecken erzeugen. Farbe der Umrandung sowie der Füllung sind auszuwählen. Anschließend können per Mausklick die Ecken des Polygons definiert werden. Mit Doppelklick am letzten Eckpunkt oder Return wird die Eingabe beendet und das Polygon erzeugt. |
| Bodenschicht | Bodenschichten mit Ober- und Unterkante erzeugen. Die Bodenschichten haben die Eigenschaft, dass diese bei jeder Zoom-Stufe jeweils formatfüllend bis zum Rand gezeichnet werden.  |
| Rechteck     | Rechteck mit Definition der beiden gegenüber liegenden Ecken erzeugen.   |
| Höhe NN      | Eine Höhenkote einfügen. Falls statt der Vorgabe „NN“ eine andere Höhenbezeichnung erforderlich ist, kann diese unten rechts eingegeben werden (z.B. NHN = Normal Höhen Null / CD = Chart Datum / SKN = Seekartennull . . . )  |
| Maßketten    | Maßketten horizontal, vertikal oder mit beliebiger Ausrichtung einfügen. Dazu müssen jeweils Start- und Endpunkt der Maßlinie sowie die Lage der Beschriftungslinie mit der Maus angeklickt werden.  |

Linie	Linie erzeugen
Pfeil	Pfeil erzeugen
Löschen	Löschen der ausgewählten Elemente oder wahlweise Löschen aller Elemente.
Reihenfolge	Elemente in der Zeichenreihenfolge nach vorne oder nach hinten legen (z.B. Text vor eine Füllfläche).

Wenn das Fenster für Mini-CAD angezeigt wird, können die erzeugten Elemente angeklickt und verändert werden. Wenn das Fenster für Mini-CAD geschlossen wird, so sind die Zeichenelemente gesperrt und können nicht verändert werden. Dies ist von Vorteil, da so anschließend nur das statische System bearbeitet werden kann und man dabei nicht in Konflikt mit im Hintergrund befindlichen Grafik-Elementen kommt.

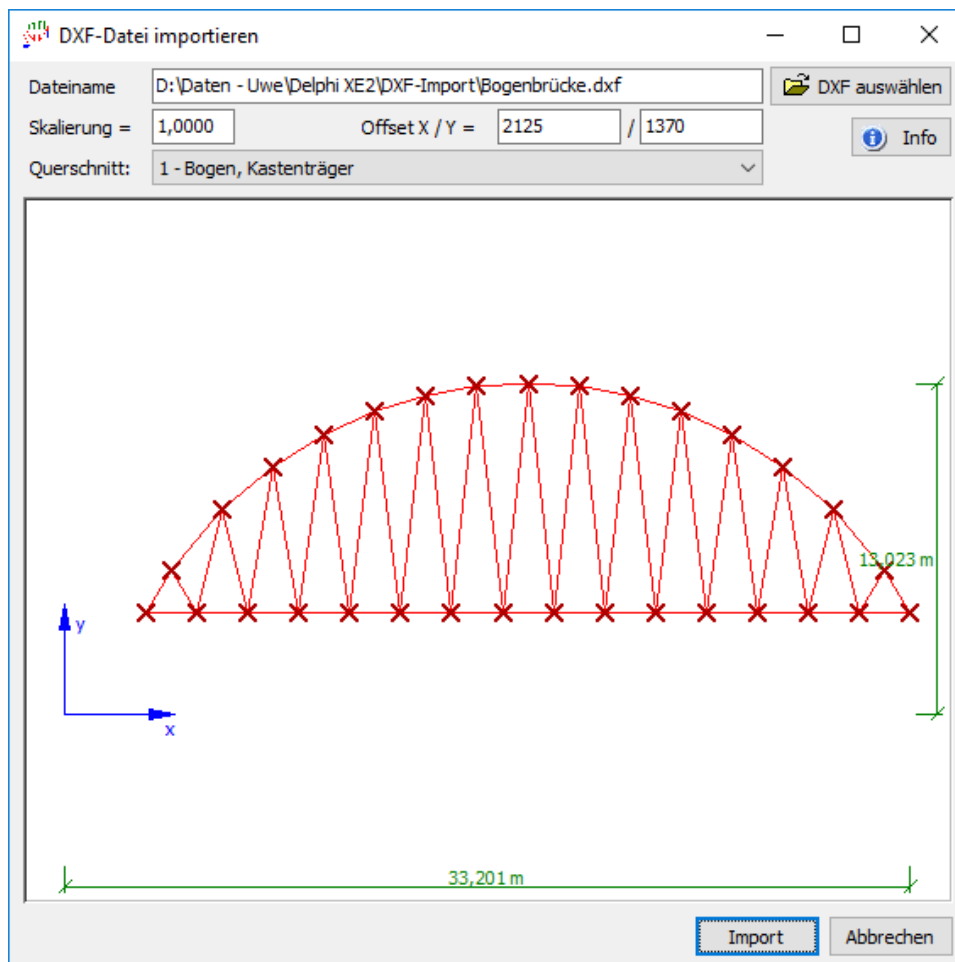
Ein typisches System für eine Kaimauer in der Konstruktionsweise „Piled Deck“ wurde beispielsweise wie folgt mit Mini-CAD ergänzt. ISLWL steht hier für „Indian Spring Low Water Level“.



Beim Speichern der Stab2D-NL-Eingabedatei wird für die Zeichenelemente eine zusätzliche Datei mit gleichem Namen und der Endung \*.s2d\_z angelegt.

## 2.14 Import von DXF-Dateien

Über den Menüpunkt *DATEI => IMPORT DXF* können DXF-Dateien eingelesen werden. Importiert werden bisher ausschließlich Polylinien, die später in Stab2D-NL als Stabzüge generiert werden. Folgendes Fenster öffnet sich, in dem eine Vorschau der einzulesenden DXF-Datei angezeigt wird. Außerdem können hier Werte für den Offset (Verschieben des Koordinatenursprungs) sowie ein Skalierungsfaktor angegeben werden.



Beachten Sie beim Erstellen der DXF-Dateien, dass ausschließlich **Polylinien** benutzt werden. Andere Linien, Blöcke oder ähnliches werden nicht berücksichtigt. Zwischen den verschiedenen DXF-Versionen gibt es geringe Unterschiede, die von Stab2D-NL nicht erkannt werden. Prüfen Sie daher nach dem Einlesen der Datei, ob alle Elemente korrekt übernommen wurden.

## 3 Bearbeiten von Elementen

### 3.1 Selektieren von Elementen (Markieren)

Grundsätzlich ist jedes Element mit der Maus selektierbar. Der *FANGRADIUS* ist im Menü unter *EXTRAS* => *EINSTELLUNGEN* => *BEARBEITEN* einstellbar.

Beim Klick auf mehrere, dicht beieinander liegende Elemente wird nach folgender Priorität selektiert:

Knoten > Stab > Belastung

Mit gedrückter *SHIFT*-Taste wird diese Reihenfolge umgedreht, so dass gilt

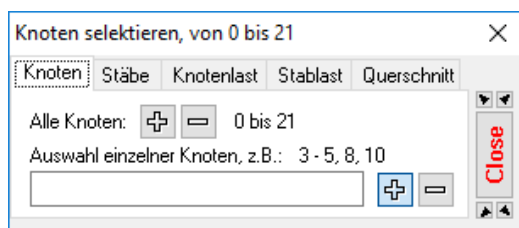
Belastung > Stab > Knoten

Die zweite Möglichkeit ist von Vorteil bei Selektion von Belastungen, insbesondere Einzellasten, die sich ansonsten nur sehr schwer selektieren lassen.

Bei gedrückter *STRG*-Taste können mehrere Elemente hintereinander selektiert und auch wieder reSelektiert werden.

Wird beim ersten Klick kein Element im Fangradius des Mauszeigers gefunden, kann bei gedrückter Maustaste ein Fenster aufgezo-gen werden, wodurch alle vollständig im Fenster liegenden Elemente selektiert werden.

Zusätzlich zur Selektion mit der Maus wurde ein eigenes Fenster zum gezielten Selektieren von Elementen implementiert. Wählen Sie im Menü *BEARBEITEN* => *SELEKTIEREN* und folgendes Fenster erscheint.



Hier haben Sie die Möglichkeit, die vier aufgeführten Elemente Knoten, Stäbe, Knotenlast und Stablast gezielt mit Wahl der Knoten / Stabnummer zu selektieren. Geben Sie dazu einfach die Nummer bzw. Nummernbereiche in die Textbox ein und drücken dann die Return-Taste. Je nach gedrückten Button "+" oder "-" werden die Elemente entweder zusätzlich selektiert oder aus der aktuellen Markierung herausgenommen. Weiterhin können Sie im 5. Karteikartenreiter Stäbe gezielt nach Querschnitten selektieren.

#### Anmerkung zur Selektion von Knoten:

Wenn die Knoten vom Benutzer ausgeblendet wurden, können diese auch nicht selektiert werden. Um die Knoten wieder einzublenden und damit auch selektieren zu können, wählen Sie im Menü bitte *EXTRAS* => *EINSTELLUNGEN* => *DARSTELLUNG* und markieren dort das entsprechende Kontrollkästchen (Siehe Menü *EINSTELLUNGEN*).

## 3.2 Eigenschaften der Elemente verändern

Nach dem Selektieren von Elementen können deren Eigenschaften geändert werden. Dazu wählen Sie bitte

*ALT + EINGABETASTE*

oder

Button *EIGENSCHAFTEN*



oder

*DOPPELCLICK* auf das Element

oder

Menü *BEARBEITEN => EIGENSCHAFTEN*

Anschließend öffnet sich je nach selektiertem Objekt das zugehörige Fenster, die ähnlich aufgebaut sind wie die Fenster beim Erstellen. Werden mehrere Objekte gleichzeitig markiert, werden in das Fenster nur die jeweils gleichen Eigenschaften eingetragen, die unterschiedlichen Eigenschaften bleiben frei.

Bei den Eigenschaften eines einzelnen Knotens werden nach einer Berechnung zusätzlich die Verformungen mit ausgegeben. Bei den Eigenschaften eines einzelnen Stabes wird dessen Länge mit angegeben. Bei den Eigenschaften einer Linienlast wird die aktuelle Länge der Belastung sowie die resultierende Kraft mit ausgegeben.

### Knoten-Eigenschaften:

Mit dem Programm Stab2D-NL können Sie für einen Knoten eine Auflagerbreite definieren. Nähere Informationen dazu finden Sie beim Punkt *KNOTEN-DEFINITION*.



### 3.3 Short-Cuts

Folgende Short-Cuts sind implementiert:

F1	Hilfe
F5	Ergebnisse laden oder speichern
F7	Anzeige der Lastfälle
F8	Anzeige der Ergebnisse
F9	Berechnung mit den dargestellten Lasten
Strg + N	Neues System
Strg + O	System Öffnen
Strg + S	System Speichern
Strg + P	Grafik drucken
Strg + Q	Querschnitte bearbeiten
Strg + A	Abstand messen
Strg + W	Winkel mit drei Punkten messen
Strg + C	Kopiert die aktuelle Grafik in die Zwischenablage
Strg + F	Screenshot von einem zu wählenden Grafikausschnitt in die Zwischenablage kopieren
Str + I	Programm INCA2 starten
Alt + Eingabe	Anzeige der Eigenschaften von selektierten Elementen
Entf	Alle selektierten Elemente werden gelöscht
Strg gedrückt	Es können mehrere Elemente selektiert werden
Shift gedrückt	Es wird in umgekehrter Reihenfolge selektiert (normal: Knoten > Stab > Last)

Für die Zoom-Funktionen wurden folgende Tasten eingeführt

+	Zoom in, vergrößern
-	Zoom out, verkleinern
*	Zoom Alles
/	Refresh (Zeichnung wird noch mal neu ausgegeben)

Maus

Scrollrad	Scrollrad drehen: Zoom in / Zoom out
Scrollrad klicken und verschieben	Ansicht verschieben
linke Maustaste	Selektieren
rechte Maustaste	Menü öffnet sich

### 3.4 Verschieben

Sind keine Elemente (Stäbe oder Knoten) markiert, steht die Funktion **VERSCHIEBEN FÜR EINZELNE ELEMENTE** mit der Maus zur Verfügung. Klicken Sie dazu auf den Button **SCHIEBEN** oder wählen im Menü **BEARBEITEN** den Unterpunkt **SCHIEBEN**. Klicken Sie jetzt das gewünschte Element mit der Maus an, halten die Maustaste gedrückt und positionieren das Element an seinem neuen Ort durch Loslassen der Maustaste. Durch Drücken der **ESC-TASTE** oder der **RECHTEN MAUSTASTE** wird dieser Modus beendet.

Sind Knoten oder Stäbe markiert, öffnet sich nach Wahl des Menüpunktes **BEARBEITEN => SCHIEBEN** oder **Doppelklick (!)** auf den Button **SCHIEBEN** folgendes Fenster:

Hier können Sie die x/y-Werte für die Verschiebung festlegen und auswählen, ob und wie oft die selektierten Elemente kopiert werden sollen. Sie haben allerdings auch die Möglichkeit, nach Klick auf den **BUTTON SCHIEBEN MIT DER MAUS** die Positionierung in der grafischen Oberfläche vorzunehmen.

Sind Knoten oder Stäbe markiert und Sie klicken nur einmal auf den Button **SCHIEBEN** so erscheint das zuvor beschriebene Fenster nicht, so dass Sie gleich mit der Maus verschieben, nicht jedoch kopieren können. Ein Klick auf die rechte Maustaste lässt das Fenster jedoch erscheinen.

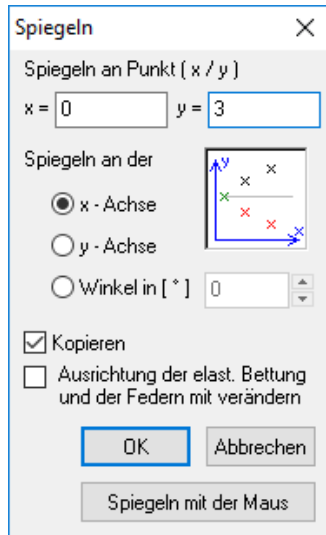
Im Fenster Schieben haben Sie die Möglichkeit, verschiedene Varianten der Verschiebung auszuwählen. Das sind:

- Relativverschiebung unter Angabe von  $\Delta x$  und  $\Delta y$
- Absolutverschiebung unter Angabe zweier Punkte
- Verschieben unter Angabe der Länge und eines Winkels

Mit dem kleinen Button jeweils in der oberen rechten Ecke können die Eingabefelder gelöscht werden. Wenn Sie vor dem Verschieben im Menü **EXTRAS => ABSTAND ZW. 2 PUNKTEN** gewählt und gemessen haben, dann wird das Ergebnis in das Fenster **SCHIEBEN** übertragen.

### 3.5 Spiegeln

Sind Knoten oder Stäbe markiert, öffnet sich nach Wahl des Menüpunktes **BEARBEITEN** => **SPIEGELN** oder **Doppelklick (!)** auf den Button **SPIEGELN** folgendes Fenster:



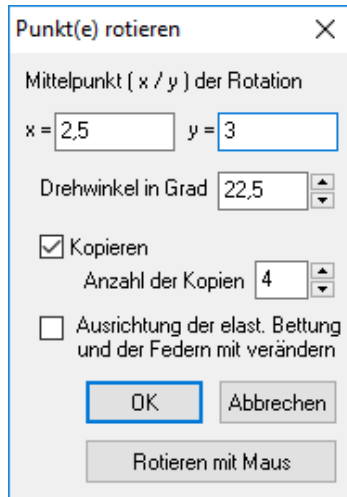
Hier können Sie die Koordinaten und Ausrichtung der Spiegelachse festlegen und ob die Objekte kopiert werden sollen. Mit Wahl des Buttons **SPIEGELN MIT DER MAUS** wird das Fenster geschlossen, so dass Sie die Spiegelachse in der grafischen Oberfläche festlegen können.

Letzte Funktion (ohne kopieren) wird auch aktiviert, wenn Sie nur einmal auf den Button **SPIEGELN** klicken.

Wird ein Stab mit einer elastischen Bettung kopiert, kann es je nach Spiegelachse passieren, dass die Bettung eine andere Richtung in Bezug auf den Stab aufweist. Mit Wahl der Option „Ausrichtung der elast. Bettung und der Federn mit verändern“ wird der Winkel der Bettung bzw. der Feder an die neue Lage des Stabes angepasst.

### 3.6 Rotieren

Sind Knoten oder Stäbe markiert, öffnet sich nach Wahl des Menüpunktes [BEARBEITEN](#) => [ROTIEREN](#) oder **Doppelklick (!)** auf den Button [ROTIEREN](#) folgendes Fenster:



Punkt(e) rotieren

Mittelpunkt ( x / y ) der Rotation

x = 2,5 y = 3

Drehwinkel in Grad 22,5

☒ Kopieren

Anzahl der Kopien 4

☐ Ausrichtung der elast. Bettung und der Federn mit verändern

OK Abbrechen

Rotieren mit Maus

Hier können Sie die Koordinaten des Drehmittelpunktes sowie den Winkel der Drehung festlegen und ob die Objekte kopiert werden sollen. Sind Stäbe mit elastischer Bettung markiert und sollen diese rotiert werden, so kann ein Häkchen beim letzten Feld sinnvoll sein. In diesem Fall wird die Ausrichtung der elastischen Bettung oder auch der Federn relativ zum Stab beibehalten. Das ist zum Beispiel sinnvoll bei der Erzeugung von rotationssymmetrischen Tunnelschalen mit allseitiger elastischer Bettung.

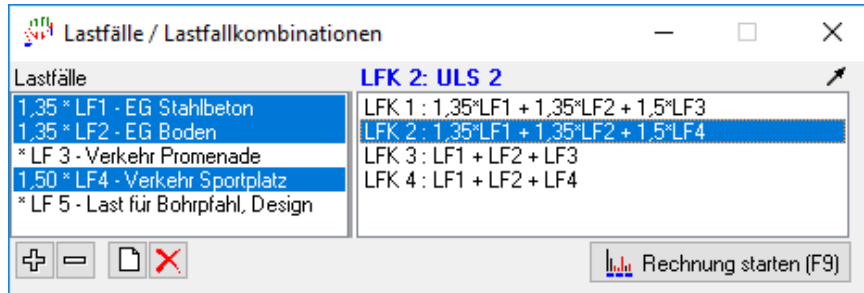
Mit Wahl des Buttons [ROTIEREN MIT DER MAUS](#) wird das Fenster geschlossen, so dass Sie die Werte für die Rotation in der grafischen Oberfläche festlegen können.

Letzte Funktion (ohne kopieren) wird auch aktiviert, wenn Sie nur einmal auf den Button Rotieren klicken.

## 4 Ansicht / Ausgabe

### 4.1 Lastfälle/ Kombinationen

Mit der Taste F7 oder im Menü **ANSICHT => ANZEIGE LASTFÄLLE** rufen Sie folgendes Fenster auf:



In diesem Fenster sehen Sie alle definierten Lastfälle und Lastfallkombinationen. Weiterhin werden in diesem Fenster die Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen gewählt, die aktuell dargestellt werden soll und bei einer anschließenden Berechnung auch berücksichtigt werden. Im oben gezeigten Bild ist die zweite Lastfallkombination gewählt, die zugehörigen Lastfälle sind ebenfalls markiert. Bei einer Berechnung mit dieser Auswahl wird die Lastfallkombination 2 benutzt, wobei die markierten Lastfälle mit ihren jeweiligen Vorfaktoren berücksichtigt werden.

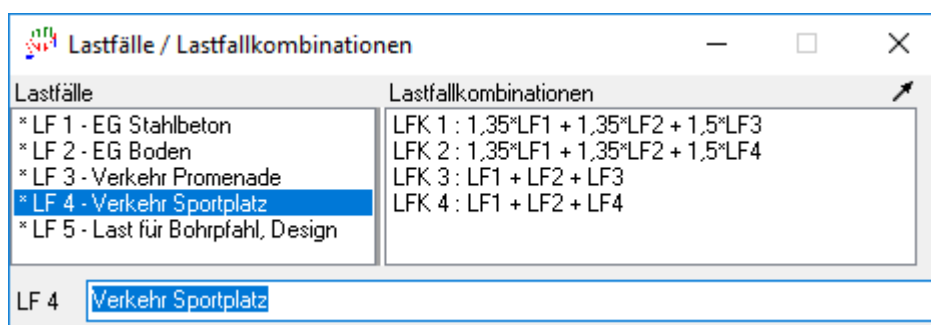
Sind dagegen nur die drei Lastfälle markiert (nicht die Lastfallkombination), werden die Lastfälle mit dem Faktor 1,0 berücksichtigt.

Mehrere Lastfälle wählen Sie aus, indem Sie die Maus bei gedrückter linker Maustaste ziehen oder bei gedrückter Strg-Taste weitere Lastfälle anklicken. Bei den Lastfallkombinationen kann nur jeweils eine Kombination aktiv sein.

Weiterhin gibt es die Buttons "+" und "-", mit denen alle Lastfälle markiert und demarkiert werden können. Der dritte Button erzeugt einen neuen Lastfall, der vierte Button erlaubt das Löschen der gewählten Lastfälle, wobei jedoch nur leere Lastfälle gelöscht werden können.

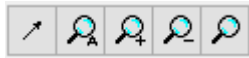
In der oberen rechten Ecke gibt es noch einen Pfeil. Bei Klick auf diesen Button wird das Fenster in die obere linke Ecke des Bildschirms verschoben.

Wenn Sie auf einen Lastfall doppelklicken oder die Taste F2 drücken, können Sie den Namen des Lastfalls ändern. Ein abschließendes Return übernimmt den Namen.



## 4.2 Zoom

Die Zoomfunktionen sind über die Buttonleiste abrufbar.



Bedeutung der Reihenfolge nach:

Bildausschnitt schieben	der Bildausschnitt kann anschließend per Maus in die gewünschte Richtung verschoben werden
Zoom Alles	das gesamte System wird fensterfüllend dargestellt
Vergrößern	System wird mit dem Faktor 1,25 vergrößert dargestellt
Verkleinern	System wird mit dem Faktor 0,8 verkleinert dargestellt
Zoom-Fenster	mit der Maus kann anschließend der zu vergrößernde Bereich ausgewählt werden
Maus-Scrollrad	Scrollrad drehen: Zoom in / Zoom out Scrollrad klicken und schieben: Ansicht verschieben

Ein Teil der Funktionen steht auch als Hotkey auf der Tastatur zur Verfügung. Mit den Tasten "+" und "-" auf dem Ziffernblock der Tastatur kann man sich zusätzlich rein und raus zoomen. Mit der "\*" - Taste wird die Funktion "Zoom Alles" aufgerufen.

## 4.3 Eingabedaten numerisch

Bei Wahl dieses Menüpunktes *DATEI => AUSGABE => EINGABEDATEN (NUMERISCH)* werden alle Eingabedaten des Systems in numerischer Form in einem extra Textfenster ausgegeben:

- Knotenkoordinaten
- Stäbe
- Querschnitte
- Baustoffe / Materialkennwerte
- Federn
- Belastungen, nach Lastfällen sortiert
- Lastfälle, Lastfallkombinationen

## 4.4 Grafikexport als BMP oder Metafile

Mit Wahl dieses Menüpunktes *DATEI => AUSGABE => GRAFIKEXPORT ALS BMP/METAFILE* wird die aktuelle Grafik als Bitmap (Pixel-orientiertes Bildformat) oder als Metafile (Vektor-orientiertes Bildformat) ausgegeben.

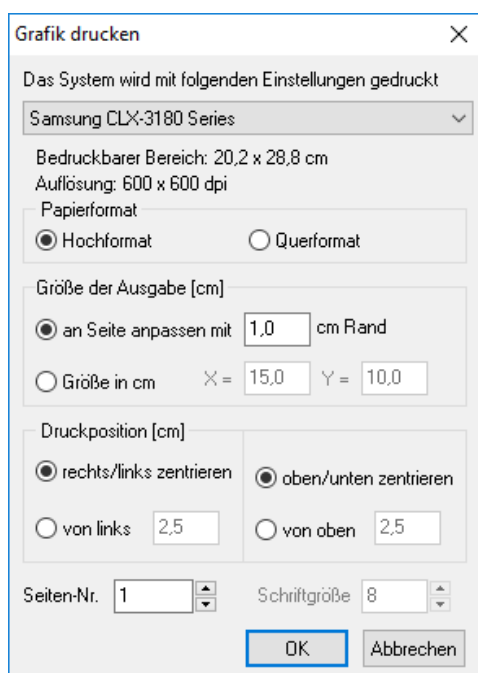
Das Bitmap (\*.bmp) wird sofort auf dem Datenträger im True Color-Format (16,7 Mill. Farben) gespeichert. Eine Nachbearbeitung mit einem Grafikprogramm zur Reduzierung der Farben und damit zur Verkleinerung der Dateigröße ist empfehlenswert.

Das Metafile wird in einem extra Fenster ausgegeben. Von dort kann es entweder gespeichert werden (\*.emf oder \*.wmf) oder aber über die Zwischenablage (kopieren) direkt in ein anderes Programm (z.B. Word) eingefügt werden. Beachten Sie dabei bitte, dass im allgemeinen das Vektorformat platzsparender ist. Bei Ergebnisdarstellungen können jedoch viele hundert Linien für das Ergebnis eines Stabes gezeichnet werden, so dass bei größeren Systemen das Vektorformat an seine Grenzen stößt. In solch einem Fall ist die Speicherung als Bitmap vorzuziehen.

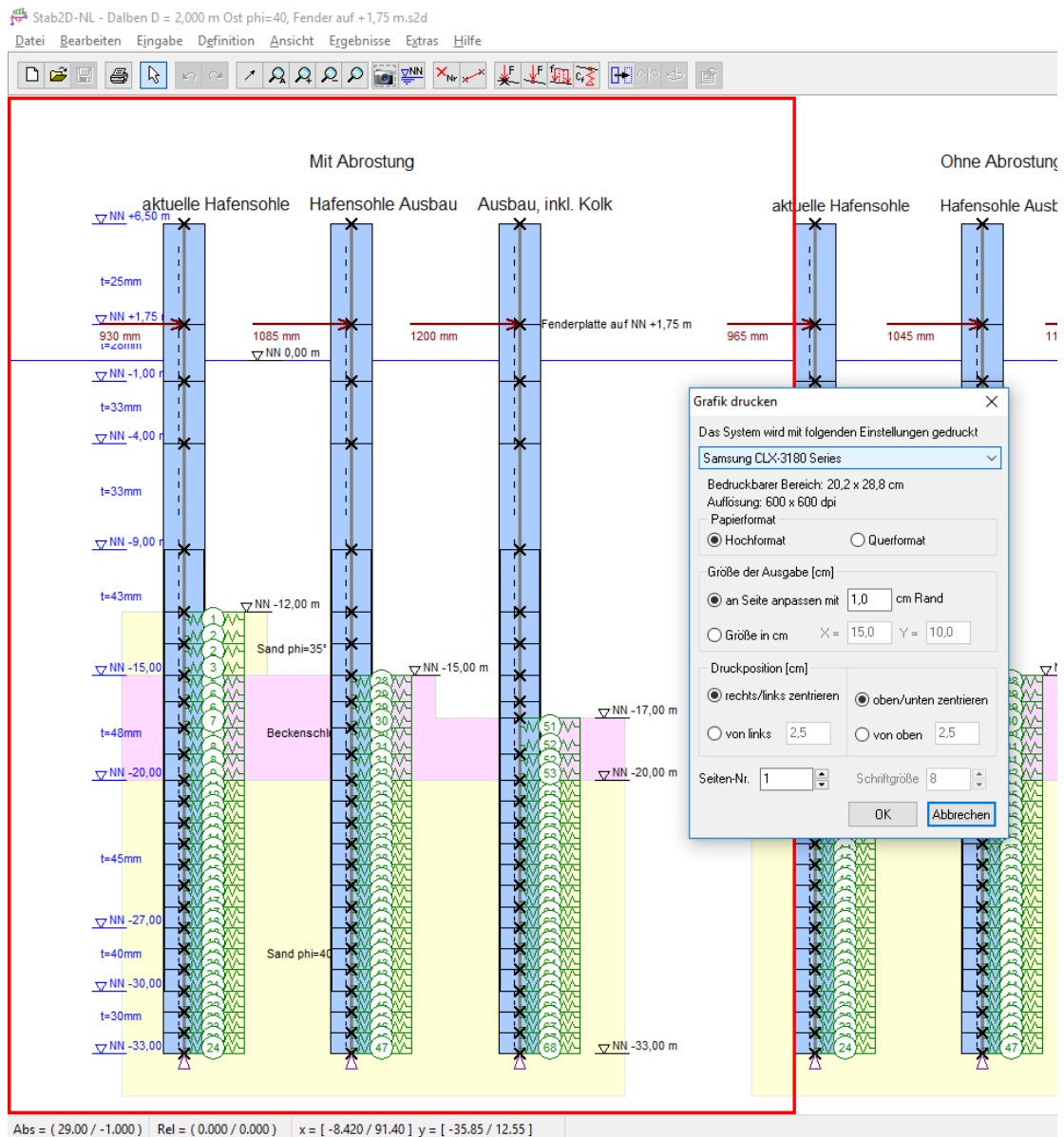
Mit dem Shortcut Strg + C wird die aktuelle Grafik als Bitmap in der Zwischenablage abgelegt und kann dann direkt zum Beispiel in Word eingefügt werden.

## 4.5 Drucken der Grafik

Mit Wahl dieses Menüpunktes *DATEI => DRUCKEN* (oder Strg + P) wird die aktuelle Grafik auf einem Drucker Ihrer Wahl ausgegeben. Folgendes Fenster öffnet sich, in dem Sie weitere Einstellungen für das Format oder die Seitennummerierung vornehmen können.



Gedruckt wird ein rot umrandeter Bereich als Auswahl der gesamten Systemgrafik. Bei geöffnetem Druckfenster können Sie den Bereich so hinschieben und zoomen, dass der zu druckende Bereich optimal angepasst ist.



Beim Drucken werden die Lizenzierungsinformationen in der Kopfzeile mit ausgegeben.



## 5 Ergebnisse

### 5.1 Berechnung

Nach der vollständigen Eingabe des Systems und Kontrolle der Rechenparameter kann das System berechnet werden. Durch Wahl des Menüpunktes **ERGEBNISSE => BERECHNUNG MIT DARGESTELLTEN LASTEN** oder der Taste **F9** wird die Rechnung gestartet. Für die Berechnung werden immer die markierten Lastfälle bzw. die markierte Lastfallkombination berücksichtigt.

#### 5.1.1 Berechnung durchführen

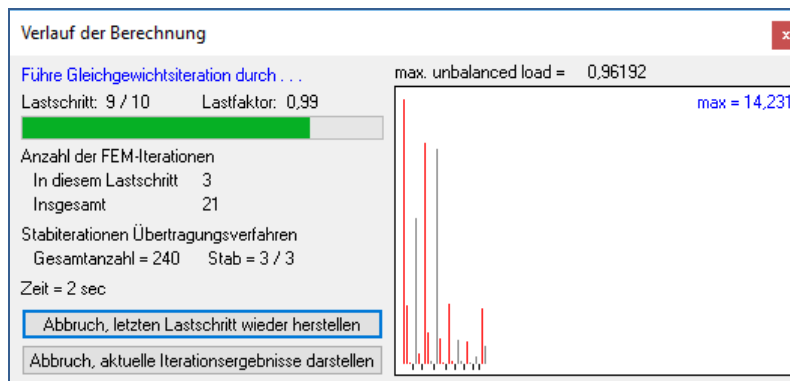
Vor der eigentlichen Berechnung wird das System geprüft und gegebenenfalls Fehlermeldungen ausgegeben, die zu einem Abbruch der Rechnung führen können. Folgende Sachverhalte werden überprüft:

- freie Knoten dürfen nicht existieren
- korrekte Definition der Auflagerbreite (nur an waagerechten oder senkrechten Stäben)
- Stäbe müssen mit ihren Endgelenken richtig angeschlossen sein
- benutzte INCA2-Querschnitte müssen existieren und korrekt definiert sein:
  - Kontrolle bei gevouteten Stäben
  - Kontrolle auf schiefe Biegung (Symmetrie)
- Belastung vorhanden, Kontrolle der Weggrößen
- doppelte Linienlasten vorhanden, evtl. Fehler bei der Eingabe

Außerdem werden zu Beginn der Rechnung die linearen Steifigkeiten der INCA2-Querschnitte ermittelt (=Tangentensteifigkeiten im Koordinatenursprung).

Bei größeren INCA2-Querschnitten kann es vorkommen, dass durch numerische Ungenauigkeiten die Symmetrie geringfügig verletzt wird. Kontrollieren Sie gegebenenfalls noch einmal die Koordinaten in der INCA2-Datei, ob diese auch wirklich spiegelsymmetrisch sind. Wenn dies erfüllt ist, kann die Rechnung bei einer derartigen Meldung eigentlich ohne Probleme trotzdem durchgeführt werden.

Während der Rechnung wird das Hauptfenster ausgeblendet und es erscheint eine Fortschrittsanzeige, aus der Sie alle wichtigen Daten entnehmen können



Erläuterungen dazu finden Sie unter Punkt 2.11 Berechnungen.

### 5.1.2 Fehlermeldungen am Ende der Rechnung

Nach dem Ende der Rechnung können folgende Meldungen auftreten

#### *Ergebnis nicht konvergent*

Der verbleibende Fehler (Maximum unbalanced load) ist größer als der Vorgabewert. Jetzt muss der Nutzer selber entscheiden, ob die Genauigkeit ausreicht oder eine neue Berechnung mit geänderten Rechenparametern oder Eingangswerten durchgeführt werden sollte.

#### *Stabiteration nicht konvergent*

Jeder einzelne Stab wird mit dem Übertragungsverfahren berechnet. Auch dieser Vorgang ist eine Iteration, deren Lösung in diesem Fall nicht konvergiert hat. Die Stabnummer, bei dem keine konvergente Lösung erreicht wurde, wird angezeigt. Das Ergebnis ist damit falsch bzw. stellt nur eine grobe Näherung dar. Erkennbar ist dies vor allem an der Verformungsfigur des Systems. Das Ende des betreffenden Stabs sollte bei einem größeren Fehler nicht am nächsten Knoten enden, sondern einen kleinen Versatz aufweisen.

#### *Steifigkeiten falsch ermittelt*

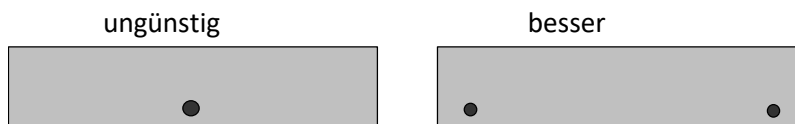
Während der Stabberechnung mit dem Übertragungsverfahren muss für einen INCA2-Querschnitt an jeder Stelle der Dehnungszustand berechnet werden. Meist wegen Überschreiten der Tragfähigkeit konnte der Dehnungszustand nicht bestimmt werden (es existiert keiner mehr bei zu großen Beanspruchungen), so dass stattdessen 1/10 der Steifigkeit des Querschnitts am Koordinatenursprung (lineare Steifigkeit des Querschnitts) angesetzt wurde. Ein anderer Grund kann auch sein, dass die Mk-Linie für diesen Querschnitt im Bereich III (plastischer Bereich) wieder fällt (negative Tangentensteifigkeit). Wenn Schnittgrößen im Stab kurz vor dem Maximum der Mk-Linie sind, kann es passieren, dass (aus Versehen) ein Ergebnis auf dem fallenden Ast ermittelt wird.

### Tragfähigkeit überschritten

Nach erfolgreicher Rechnung wird für alle INCA2-Querschnitte ein Sicherheitsnachweis durchgeführt. Zwar wird der Sicherheitsnachweis mit den gleichen Baustoffeigenschaften wie für die Schnittgrößenermittlung durchgeführt, jedoch liefert dieser Wert schon mal einen guten Anhaltspunkt. Verwechseln Sie diesen Punkt deshalb bitte nicht mit der eigentlichen Querschnittstragfähigkeit, die mit den Bemessungswerten der Baustoffeigenschaften ermittelt wird!

Das Überschreiten der Tragfähigkeit bedeutet jedoch nur, dass die vom Nutzer definierten Grenzdehnungen des Querschnitts überschritten wurden.

Insbesondere bei sehr kleinen Beanspruchungen kann es vorkommen, dass die Iteration des Sicherheitsnachweises nicht erfolgreich war, obwohl die Tragfähigkeit noch nicht überschritten wird. Dies liegt häufig an der Modellierung des Querschnitts mit nur einem Bewehrungsstab in der Mitte, günstiger sind zwei Stäbe rechts und links:



### Fehler bei der Bemessung

Nach der linear elastischen Rechnung dieses Querschnittstyps wird die Bewehrung entsprechend der einwirkenden Schnittgrößen  $N_x$  und  $M_y$  ermittelt. Die Ermittlung der Bewehrung ist eine Iteration, bei der die Bewehrung so lange variiert wird, bis die Sicherheit genau 1,0 beträgt. Auch die Ermittlung der Sicherheit selber ist eine Iteration. In einigen Fällen kann es daher vorkommen, dass die Iterationen nicht konvergieren. In diesem Fall wird  $A_s = 0$  gesetzt, ebenso wie der Ausnutzungsgrad  $1 / \gamma$ .

## 5.2 Grafische Ergebnisse

Die Ausgabe der grafischen Ergebnisse des Gesamtsystems lässt sich in folgendem Fenster steuern. Das Fenster kann entweder über die Taste **F8** oder übers Menü **ERGEBNISSE => ERGEBNISSE GRAFISCH (GESAMT)** aufgerufen werden.



Folgende Grafiken können dargestellt werden

$V_z$  Querkraft in [kN]

GA Schubsteifigkeit in [kN]

$N_x$  Normalkraft in [kN]

$\varepsilon_0$  Dehnung  $\varepsilon_0$  im Bezugspunkt des Querschnitts (meist Schwerpunkt) in [mm/m]

$D_{II}$  tangentielle Dehnsteifigkeit des Querschnitts in [kN], nicht zu verwechseln mit einer Sekantensteifigkeit!

$M_y$  Biegemoment in [kNm]

$k_z$  Verkrümmung des Querschnitts in [1/1000 m]

$B_{II}$  tangentielle Biegesteifigkeit des Querschnitts in [kNm<sup>2</sup>], nicht zu verwechseln mit einer Sekantensteifigkeit

Auflagerkräfte global und lokal (bei gedrehten Auflagern)

Elastische Bettung

Verformung, inklusive der Beschriftung der Knotenverformungen

Ausgabe von  $x$ ,  $y$ ,  $\varphi$  in [mm] bzw. [1/1000 rad]

- $1 / \gamma$       Ausnutzungsgrad, reziproker Wert des Sicherheitsnachweises,  
Für INCA2-Querschnitte und nichtlineare Querschnitte wird der Ausnutzungsgrad für die jeweilige Schnittgrößenkombination  $N_x / M_y$  mit den Rechenroutinen von INCA2 ermittelt. Falls bei linearen Querschnitten eine maximal zulässige Spannung eingegeben wurde, dann wird ebenfalls die Ausnutzung in Bezug auf die maximal zulässige Spannung ermittelt.  
Bei Bemessungsquerschnitten erfolgt die Ermittlung des Ausnutzungsgrades wie folgt:  
Fall 1: Erforderliche Bewehrung liegt zwischen dem minimalen und maximalen Bewehrungsverhältnis. Damit weist der Querschnitt mit der angezeigten Bewehrung genau die erforderliche Tragfähigkeit auf, so dass der Ausnutzungsgrad = 1,0 ist.  
Fall 2: Erforderliche Bewehrung ist kleiner als die minimal gewählte Bewehrung (über minimales Bewehrungsverhältnis gewählt). Der Ausnutzungsgrad wird daher für diese minimale Bewehrung ermittelt und ist kleiner als 1,0.  
Fall 3: Erforderliche Bewehrung ist größer als die maximal gewählte Bewehrung (über maximales Bewehrungsverhältnis gewählt). Der Ausnutzungsgrad wird daher für die maximale Bewehrung ermittelt und ist größer als 1,0. Der Querschnitt wäre hierfür also nicht tragfähig.
- $A_{s,tot}$       Bewehrungsmenge des gesamten Querschnitts:  
Bemessungsquerschnitte: berechnete erforderliche Bewehrung aus der Bemessung  
Nichtlineare Querschnitte: vorhandene, durch den Nutzer eingegebene Bewehrungsmenge (also kein Rechenergebnis, sondern nur zur Kontrolle der Eingabe).  
Es wird jeweils die Gesamtbewehrungsmenge ausgegeben. Bei R2-Querschnitten liegt demzufolge die Hälfte der angezeigten Bewehrung oben, die andere Hälfte auf der Unterseite. Bei R4-Querschnitten sind jeweils 25% der angezeigten Bewehrung auf die 4 Seiten verteilt. Bei R1 Querschnitten liegt die Bewehrung jeweils auf der Zugseite.
- $\sigma, \varepsilon$       Spannungen vom Beton bzw. vom Stahl  
Bei linearen Querschnitten werden mit  $\sigma_{Stahl}$  die Spannungen am Querschnittsrand ausgegeben.  
Bei nichtlinearen Querschnitten wird die Spannung des jeweils am weitesten außen liegenden Querschnittsteils angegeben. Liegt bei einem INCA2-Querschnitt also außen eine schlaffe Bewehrung und weiter innen eine vorgespannte Spannstahlbewehrung, so erfolgt die Ausgabe der Spannung der schlaffen Bewehrung.  
Beachten Sie bitte bei der Ausgabe der Beton- und Stahlspannungen für nichtlineare Querschnitte (Typ 2 und 3), welche Option Sie für die Ermittlung dieser Werte gewählt haben. Diese können entweder direkt im Riss ermittelt werden (Betonzugspannungen werden zu Null gesetzt) oder direkt aus der Rechnung mit der Methode der verschmierten Risse übernommen. Die Einstellungen dazu können Sie unter [EINGABE => PARAMETER](#) (Hilfe-Thema 2.9.4 Ergebnisse) vornehmen.
- $\varepsilon$       Dehnungen am Querschnittsrand

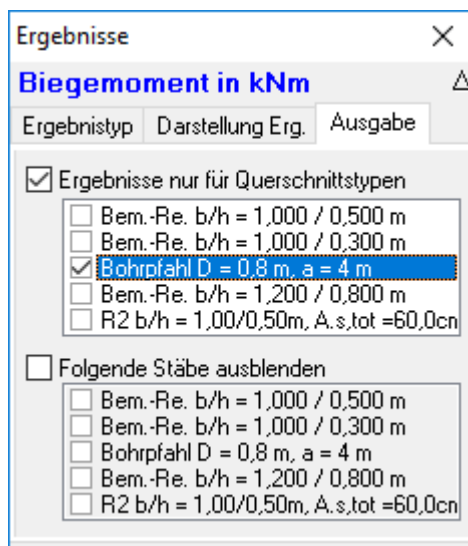
Mit dem Scrollbalken im unteren Bereich kann man die Skalierung der dargestellten Ergebnisse im Bereich von 21 bis 9000 Pixel einstellen. Ist die Ausgabe der Verformungen aktiviert, wird hier die Überhöhung der Verformungen eingestellt.

Im zweiten Teil des Fensters kann die grafische Ausgabe beeinflusst werden, indem Elemente zur besseren Darstellung ein- oder ausgeblendet werden.



Der Punkt **NUR SELEKTIERTE STÄBE** stellt nur das Ergebnis der aktuell markierten Stäbe dar. Diese Option ist hilfreich, wenn man in einem großen System mit sich überlappenden Ergebnissen die Übersicht wahren möchte. **LINIENFARBE** und **DICKE** der Linie können ebenso gewählt werden. Mit dem **COPY-BUTTON** wird die aktuelle Darstellung als Metafile (Vektorgrafik) exportiert und in einem extra Fenster dargestellt. Von dort aus kann das Metafile entweder gespeichert oder über die Zwischenablage direkt in ein anderes Programm (z.B. Word) eingefügt werden. Dort muss gegebenenfalls die Option **INHALTE EINFÜGEN => METAFILE** gewählt werden. Starten Sie in diesem Fall bitte zuerst Word und öffnen das gewünschte Dokument. Gehen Sie anschließend zu Stab2D-NL und kopieren die Grafik in die Zwischenablage. Anschließend können Sie in Word die Grafik einfügen.

Im dritten Teil des Fensters kann die Ergebnisdarstellung abhängig vom Querschnitt gewählt werden.



In der oberen rechten Ecke befindet sich noch ein kleiner Pfeil, der das Fenster kurzzeitig verkleinert, ein nochmaliger Klick auf diesen Pfeil (dann nach unten) vergrößert das Fenster wieder.

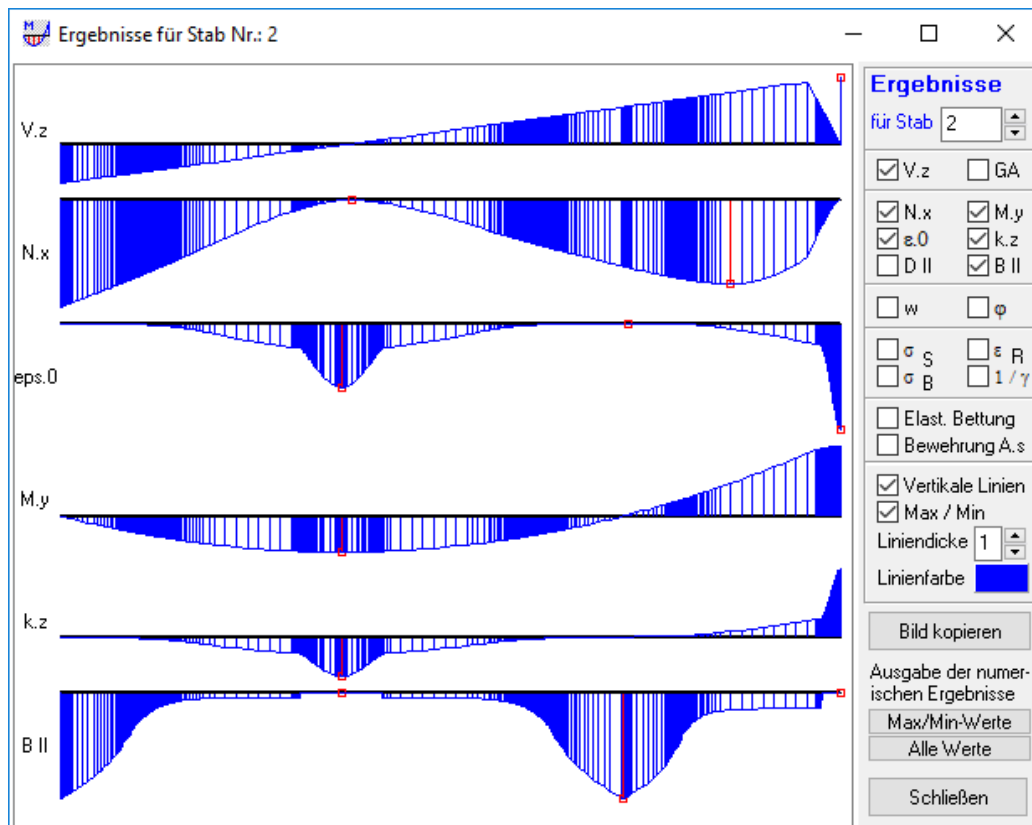
### 5.3 Numerische Ergebnisse

Im Menüpunkt **ERGEBNISSE => ERGEBNISSE NUMERISCH** werden die Ergebnisse der letzten Berechnung in Textform ausgegeben. Zuerst erscheint noch ein Fenster, in dem die Ausgabewünsche markiert werden. Anschließend erfolgt die Textausgabe in ein extra Fenster.

Bei den Ergebnissen der Stäbe werden nur die Stabanfangs- und Stabendwerte sowie die Maximal- und Minimalwerte ausgegeben.

## 5.4 Einzelergebnisse grafisch

Um Zusammenhänge besser erkennen zu können, ist es häufig von Vorteil, alle relevanten Größen eines Stabes in einer Grafik zu sehen. Wählen Sie im Menü **ERGEBNISSE => EINZELERGEBNISSE GRAFISCH** und folgendes Fenster erscheint.



Auf der rechten Seite können Sie die dargestellten Ergebnisse beeinflussen. Wie in der Grafik zu sehen ist, lassen sich schön die Bereiche gerissener und ungerissener Zustand unterscheiden. Besonders deutlich wird das am Verlauf der Biegesteifigkeiten.

Die vertikalen Linien geben an, an welcher Stelle vom Programm Stababschnitte gebildet wurden. Im plastischen Bereich oder in Bereichen mit veränderlicher Biegesteifigkeit wurden dementsprechend viele Unterteilungen vorgenommen.

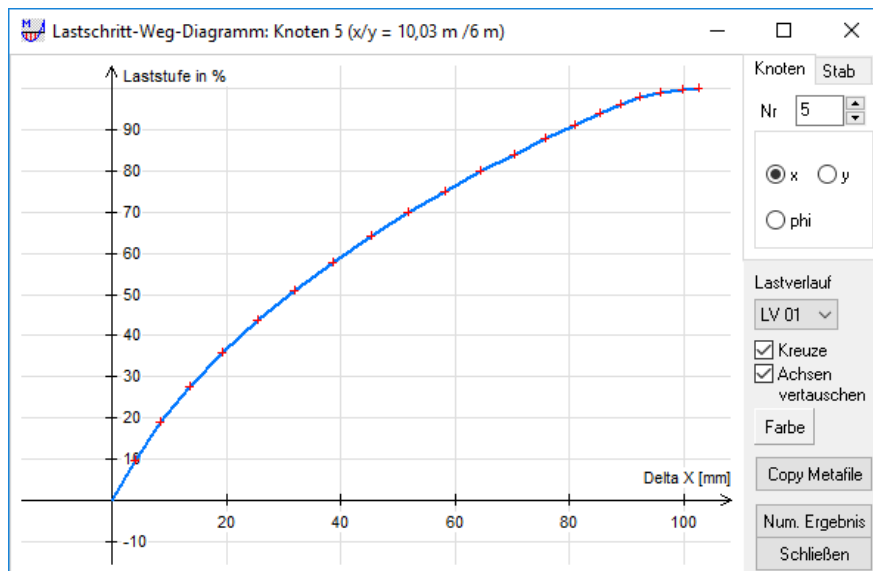
Das Erscheinungsbild lässt sich mit der Farbwahl und der Liniendicke beeinflussen. Der Button **COPY BILD** erstellt ein Metafile (Vektorgrafik) in einem extra Fenster.

Die numerischen Ergebnisse können sehr detailliert (Button **ALLE WERTE**) oder komprimiert mit maximalen und minimalen Werten (Button **MAX/MIN-WERTE**) ausgegeben werden.



## 5.5 Last-Weg-Diagramm

Zum Nachrechnen von Experimenten ist es sinnvoll, z.B. die Verformung in jedem einzelnen Lastschritt zu kennen, um diese mit den gemessenen Werten vergleichen zu können. Wählen Sie dazu im Menü **ERGEBNISSE => LAST-WEG-DIAGRAMM** und folgendes Fenster öffnet sich:



In diesem Fenster haben Sie die Möglichkeit, die **VERFORMUNGEN** eines Knotens oder die **ANFANGSGRÖßEN** eines Stabes zu betrachten.

Bei Auswahl der Option **Knoten** können Sie sich die Verformungen  $x / y$  und  $\phi$  über die Laststufen ausgeben lassen.

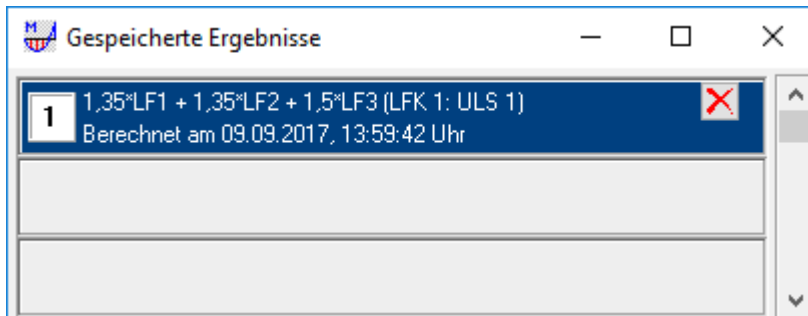
Bei der Option **Stäbe** werden die Anfangswerte der Stäbe dargestellt (nur die Anfangswerte!). Für einen am Anfang fest eingespannten Stab (kein Stabanfangsgelenk) bedeutet dies, dass die Verformungen  $w_x$ ,  $w_y$  und  $\phi$  für alle Laststufen Null sind, die Werte für  $N_x$ ,  $Q_z$  und  $M_y$  weisen Werte ungleich Null auf. Für einen Stab, an dem sich am Anfang ein Momentengelenk befindet, ist damit  $M_y$  überall näherungsweise gleich Null, der Wert von  $\phi$  (Stabanfangsverdrehung) wird sich über die Laststufen ändern.

Die Kreuze markieren die berechneten Punkte und können ein- und ausgeblendet werden.

Mit dem Button **COPY METAFILE** wird ein Metafile (Vektorgrafik) in einem extra Fenster erstellt. Mit dem Button **NUM. ERGEBNIS** können Sie sich die Ergebnisse in numerischer Form in einem extra Fenster ausgeben lassen.

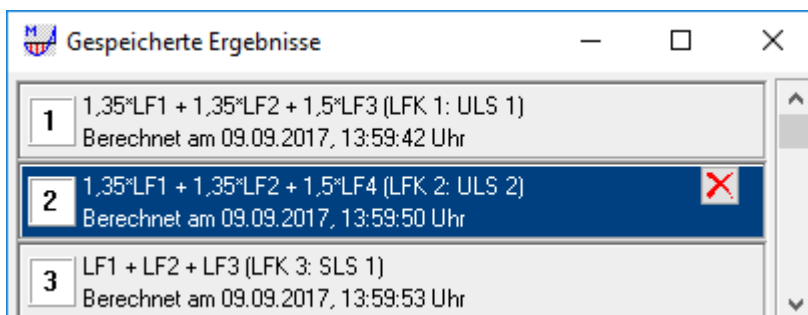
## 5.6 Laden / Speichern / Löschen

Bei aufwändigen Berechnungen bzw. mehreren zu berechnenden Lastfallkombinationen kann es sinnvoll sein, das eben berechnete Ergebnis zu speichern. Gehen Sie dazu nach erfolgreicher Berechnung im Menü **ERGEBNISSE** auf den **UNTERPUNKT LADEN/SPEICHERN/LÖSCHEN**. Beim erstmaligen Aufruf erscheint folgendes Fenster:



Das gerade eben ermittelte Ergebnis wurde mit dem Aufruf dieses Befehls in einer Ergebnis-Datei xxx.erg abgespeichert (xxx steht für den Stab2D-NL-Dateinamen ohne Endung).

Die voreingestellte Bezeichnung des berechneten Ergebnisses kann per Doppelklick geändert und mit Return bestätigt werden. Für weitere Ergebnisse (andere Lastfälle etc.) ist diese Vorgehensweise identisch. Nach mehrmaligem Rechnen könnte dieses Fenster damit wie folgt aussehen:



Mit dem rechten Button ist ein Löschen ausgewählter Ergebnisse möglich.

Beachten Sie bitte, dass in der Ergebnisdatei nur die Endergebnisse, nicht jedoch die Zwischenergebnisse abgespeichert werden. Ein Betrachten der Ergebnisse über die Laststufen (Last-Weg-Diagramm) ist somit nicht mehr möglich.

## 5.7 Löschen von Ergebnissen

Mit dem Menüpunkt *ERGEBNISSE => ERGEBNISSE LÖSCHEN* können Sie die berechneten Ergebnisse löschen. Der verwendete Speicher für die Ergebnisdarstellung wird freigegeben.

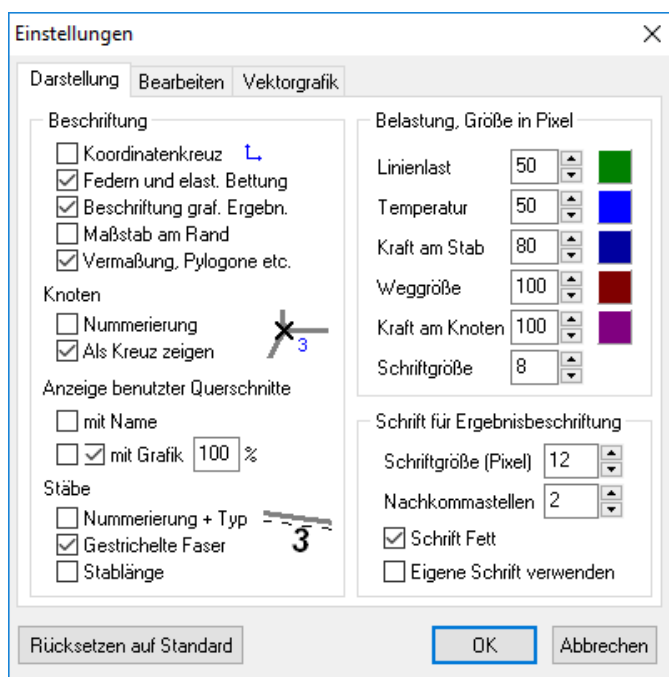
Unabhängig davon wird bei jeder Änderung des Systems (z.B. Ändern der Knotenkoordinaten) nachgefragt, ob evtl. vorhandene Ergebnisse gelöscht werden sollen. Zwar können Sie sich hier auch dafür entscheiden, die Ergebnisse zu behalten, sollten diese Option jedoch im Anbetracht einer ordentlichen Vorgehensweise nicht wählen. Bei Veränderung des Systems (Löschen oder Hinzufügen eines Knotens/Stabes) kann es bei Wahl von *Nicht Löschen* passieren, dass beim Zeichnen eine Fehlermeldung ausgegeben wird (Zugriffsverletzung etc.), da versucht wird, auf ein nicht vorhandenes Element (z.B. Knoten) zu zugreifen. Dies kann gegebenenfalls dazu führen, dass das Programm per Task-Manager beendet werden muss.

## 6 Extras

### 6.1 Einstellungen

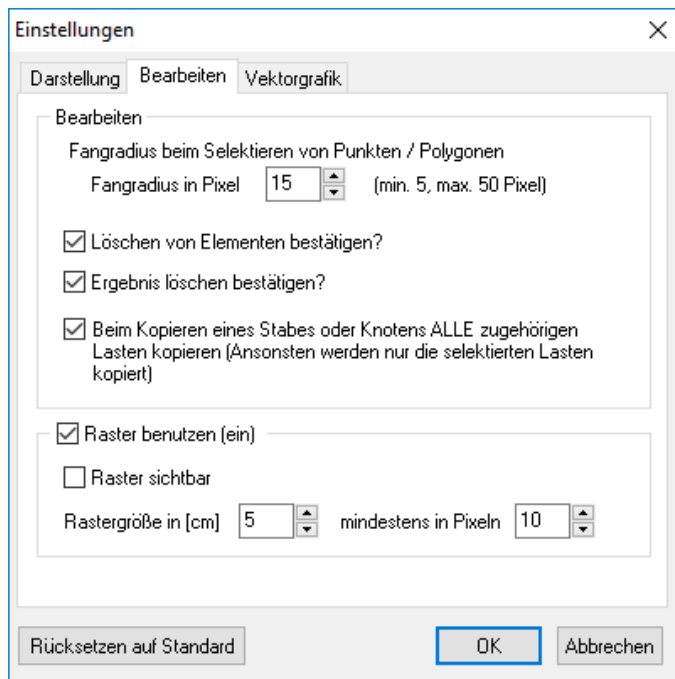
Im Menü **EXTRAS => EINSTELLUNGEN** werden alle Einstellungen für Stab2D-NL vorgenommen, die das Erscheinungsbild beeinflussen. Dieser Punkt steht ebenfalls im Menü unter **ANSICHT => EINSTELLUNGEN** zur Verfügung. Das Fenster gliedert sich in vier Karteikartenreiter.

#### Teil 1 - Darstellung



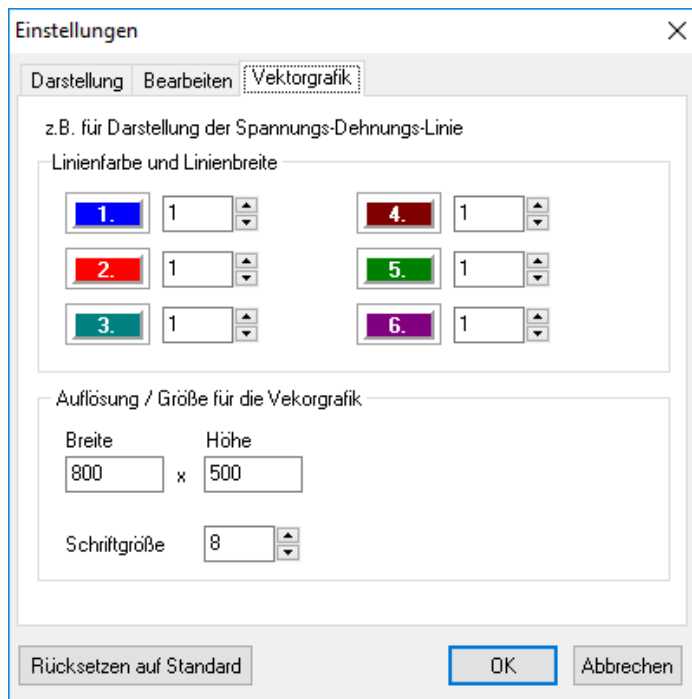
In diesem Fenster werden die meisten Einstellungen vorgenommen, die das Erscheinungsbild der Zeichnung des Systems bestimmen. Im oberen Teil können verschiedene Elemente ein- und ausgeblendet werden. Beachten Sie bitte, dass beim Ausblenden der Knotenkreuze, ein Knoten auch nicht selektiert werden kann. Weiterhin können Sie hier die Farben und Größen der verschiedenen Belastungstypen einstellen, ebenso das Erscheinungsbild der Beschriftung.

## Teil 2 - Bearbeiten



Der Fangradius bestimmt, in welcher Entfernung Objekte beim Selektieren noch erkannt werden. Größere Werte sind angenehm beim Arbeiten, da man die Maus nicht so genau führen muss, können jedoch bei sehr dicht liegenden Elemente zu Schwierigkeiten beim richtigen Selektieren führen. Weiterhin wird in diesem Fenster das Verhalten beim Löschen eingestellt. Das Raster stellt eine angenehme Zeichenhilfe dar. Ist es aktiviert, werden z.B. beim Erzeugen von Knoten mit der Maus, die Koordinaten auf die Rasterpunkte gesetzt (auch beim Schieben, Spiegeln etc.).

### Teil 3 - Vektorgrafik



In vielen Fällen kommt es vor, dass ein Funktionsverlauf grafisch dargestellt werden soll (z.B. Materialgesetz, Ausgabe der Federkennlinien). Dazu wird meist ein Metafile (Vektorgrafik) erzeugt, wobei bei den Funktionsgraphen die hier definierten Linieneigenschaften (Farbe + Dicke) benutzt werden. Ebenso werden für diese Metafiles die hier angegebenen Abmessungen (Höhe, Breite) benutzt.

## 6.2 Messen

Im Menüpunkt **EXTRAS** werden Funktionen zum Messen von Abständen zwischen zwei Punkten (Strg + A) bzw. Messen des Winkels (Strg + W) zwischen drei Punkten aufgerufen. Klicken Sie nach Wahl dieses Menüpunktes mit der Maus einfach zwei oder drei Punkte an und Sie erhalten das Ergebnis in einer Messagebox. Sie können nur Knoten für das Messen benutzen!

Wurde eine Berechnung für das System durchgeführt, wird außerdem die aktuelle Verschiebung der Knoten bzw. die Relativverschiebung zwischen diesen beiden Knoten ausgegeben.

## 6.3 INCA2 starten

Mit dem Menüpunkt **EXTRAS => INCA2 STARTEN** (Strg + I) ist es möglich, das Programm Stab2D-NL auszublenden und INCA2 zu starten. Hier können Sie Querschnitte eingeben, mit denen Sie später in Ihren Stab2D-NL-Systemen arbeiten. In der Buttonleiste oben rechts befindet sich ebenfalls ein Button zum Starten von INCA2.

Shortcut: Strg + I

## 6.4 Sprachoptionen Deutsch / Englisch

Oben rechts im Hauptfenster des Programms Stab2D-NL können Sie per Klick auf den entsprechenden Button zwischen einer englischen und deutschen Programmoberfläche wechseln. Das Programm INCA2 muss separat in der dortigen Benutzeroberfläche umgestellt werden. Beachten Sie, dass einige Meldungen während der Berechnung vom Programmmodul INCA2 erzeugt werden, so dass die dortige Spracheinstellung benutzt wird.

## 7 Rechenalgorithmen

Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über das benutzte Rechenverfahren. Für weitergehende Erläuterungen ist eine Literaturliste mit einigen das Thema betreffenden Veröffentlichungen beigelegt.

### 7.1 Grundlegende Vorgehensweise

Eine sehr leistungsfähige Methode zur nichtlinearen Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen ist das Übertragungsverfahren. Mit einer zuvor berechneten Momenten-Verkrümmungs-Beziehung ist es möglich, die jeweils richtigen Verkrümmungen und Biegesteifigkeiten bei der Stabberechnung zu benutzen. Damit lässt sich nicht nur der Übergang ungerissen / gerissen gut abbilden, auch die Berechnung mit Fließen der Bewehrung ist ohne Einfügen plastischer Gelenke sowie ohne Lastinkremente in nur einem Lastschritt möglich.

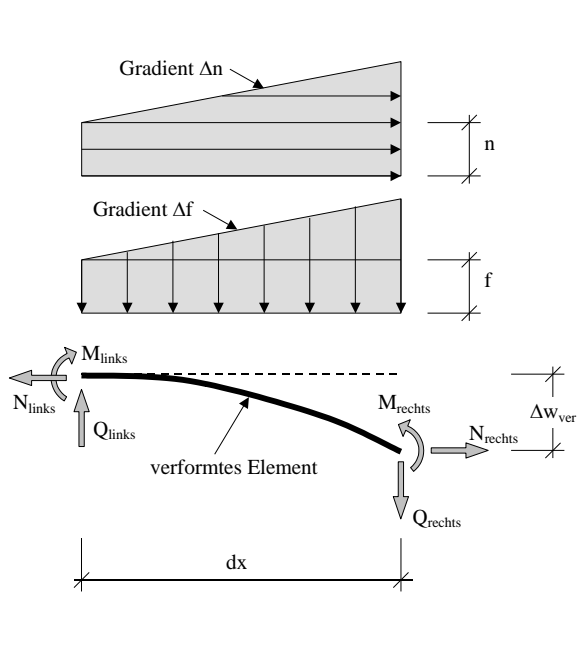
Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass einerseits die  $M_k$ -Linie im Voraus bestimmt werden muss und andererseits nur Durchlaufträger oder Stützen mit vertretbarem Aufwand berechnet werden können. Durch die Kopplung von nichtlinearer Querschnittsberechnung, Übertragungsverfahren und FE-Methode ergibt sich jedoch die Möglichkeit, auch größere ebene Rahmenstrukturen nichtlinear berechnen zu können. Eine Erweiterung auf den 3D-Fall ist ebenso möglich.

Dazu wird jeder Balken des Tragwerkes im Volleinspannzustand mit dem Übertragungsverfahren berechnet. Die benötigten Werte für Verkrümmung und Biegesteifigkeit sowie Dehnung  $\varepsilon_0$  und Dehnsteifigkeit werden jeweils für die aktuelle Beanspruchung  $N_x / M_y$  mittels einer nichtlinearen Querschnittsberechnung bestimmt. Unter Nutzung der 1-Zustände des Übertragungsverfahrens ist es dann möglich, die lokale Steifigkeitsmatrix für den Balken sowie den zugehörigen Kräftevektor zu ermitteln. Die Lösung der globalen K-Matrix liefert im Anschluss die Knotenverformungen.



## 7.2 Übertragungsverfahren

Die Berechnung beginnt mit der vorläufigen Unterteilung des Stabes in mehrere Elemente der Länge  $dx$ . Sind die Zustandsgrößen auf der linken Seite eines Elements sowie die äußeren Belastungen bekannt, so können über das Kräfte- und Momentengleichgewicht die sogenannten Übertragungsgleichungen aufgestellt und damit die Zustandsgrößen auf der rechten Seite ermittelt werden. In Gleichung (2) ist beispielhaft die Berechnung des Biegemoments unter Berücksichtigung von Theorie 2. Ordnung dargestellt, in Gleichung (1) die Berechnung der vertikalen Verformung  $\Delta w_{\text{ver}}$ . Der Näherungsansatz für die Berücksichtigung der Normalkraft ist für kleine Elemente der Länge  $dx$  ausreichend genau.



$$x_1 = \left( \left( \left( \Delta f \cdot \frac{dx}{5} + f \right) \cdot \frac{dx}{4} - Q_{\text{left}} \right) \cdot \frac{dx}{3} - M_{\text{left}} \right) \cdot \frac{dx^2}{2} \cdot \frac{1}{[B_{II}]} - \left( \left( \Delta f \cdot \frac{dx}{3} + f \right) \cdot \frac{dx}{2} - Q_{\text{left}} \right) \cdot dx \cdot \frac{1}{[GA]} - (k_{\Delta T} + [k_0]) \cdot \frac{dx^2}{2} - \left[ \frac{\partial k}{\partial N} \right] \cdot \Delta N \cdot \frac{dx^2}{6}$$

$$x_2 = 1 - \left( \left( \Delta n \cdot \frac{dx}{5} + n \right) \cdot \frac{dx}{4} + N_{\text{left}} \right) \cdot \frac{dx^2}{6} \cdot \frac{1}{[B_{II}]} + \left( \left( \Delta n \cdot \frac{dx}{3} + n \right) \cdot \frac{dx}{2} + N_{\text{left}} \right) \cdot \frac{1}{[GA]}$$

$$\Delta w_{\text{ver}} = \frac{x_1}{x_2} \quad (1)$$

$$M_{\text{rechts}} = M_{\text{links}} - \left( \left( \Delta f \cdot \frac{dx}{3} + f \right) \cdot \frac{dx}{2} - Q_{\text{links}} \right) \cdot dx - \left( \left( \Delta n \cdot \frac{dx}{3} + n \right) \cdot \frac{dx}{2} + N_{\text{links}} \right) \cdot \Delta w_{\text{ver}} \quad (2)$$

Zur Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens des Stahlbetons werden an jedem Stababschnitt jeweils zur aktuellen Schnittgrößenkombination der Dehnungszustand sowie die zugehörigen tangentialen Steifigkeiten berechnet. Ändert sich jedoch die Biegesteifigkeit von einem Segment zum nächsten sehr stark, so wird dieser Abschnitt feiner geteilt, um die sich verändernde Steifigkeit genauer zu erfassen.

Durch diese adaptive Teilung wird erreicht, dass die Diskretisierung des Tragwerkes genauso fein wie erforderlich durchgeführt wird: Bereiche mit geringen Steifigkeitsänderungen werden in große Abschnitte geteilt, Bereiche mit steilen Gradienten entsprechend in kleine Abschnitte.

Mit dieser gezeigten Formulierung ist es möglich, bei gegebenen Startwerten am linken Ende des Balkens die Zustandsgrößen für den gesamten Balken zu berechnen. Die zunächst unbekannten Startwerte werden auf iterativem Wege ermittelt (entspricht dem Lösen einer DGL als Randwertaufgabe). Ziel ist, die Startwerte ( $N_x$  /  $Q$  /  $M$ ) am Stabanfang so zu wählen, dass die Verformung am Stabende exakt der Lage des dortigen Knotens entspricht.

### 7.3 Finite Element Methode

Wurden bereits beim Übertragungsverfahren Inkremente ( $\Delta N_x / \Delta Q_z / \Delta M_y$ ) benutzt, um die Auswirkungen der Startwerte ( $N_x / Q_z / M_y$ ) auf die Endwerte ( $w_x, w_y, \varphi$ ) zu untersuchen, so können diese 1-Zustände ebenfalls zur Bestimmung der Lokalen Steifigkeitsmatrix benutzt werden. Dazu wird anschaulich an jedem Freiheitsgrad eine 1-Verformung aufgebracht und die nötigen Kräfte bestimmt, um das System in dieser ausgelenkten Lage im Gleichgewicht zu halten. Der sich ergebende Kräftevektor repräsentiert damit eine Spalte der K-Matrix.

Nach Berechnung aller Stäbe mittels Übertragungsverfahren kann damit die globale Steifigkeitsmatrix erstellt und das lineare Gleichungssystem gelöst werden. Die sich ergebenden Knotenverformungen stellen den Ausgangspunkt für den nächsten Iterations- oder Lastschritt dar.

### 7.4 Auftretende Probleme

Insbesondere das Übertragungsverfahren hat sich bei den bisherigen Berechnungen auch nahe des Grenzzustandes der Tragfähigkeit als sehr stabil erwiesen. Durch die anschließende integrale Betrachtung eines längeren Stabes in der lokalen Steifigkeitsmatrix, wird auch die FE-Iteration günstig beeinflusst. Probleme bei anderen FE-Programmen, die aus den großen Unterschieden in der Steifigkeitsmatrix infolge stark unterschiedlicher Steifigkeiten resultieren, werden damit umgangen.

Nichtsdestotrotz gibt es auch nach ständiger Weiterentwicklung der Iterationsalgorithmen in einigen Fällen Konvergenzprobleme im Grenzzustand der Tragfähigkeit, wenn die Biegesteifigkeit zum Beispiel auf ca. 1/1000 des ungerissenen Wertes abgefallen ist. Diese Probleme werden jedoch durch die berücksichtigten Effekte wie Dehnung der Systemachse bei Momentenbeanspruchung oder Theorie 3. Ordnung hervorgerufen, sind damit grundlegender Natur und äußern sich in einer Verkleinerung des Konvergenzradius. Eine nachhaltige Verbesserung der Konvergenz ergibt sich damit durch das Berechnen eines guten Startwertes für den nächsten Iterationsschritt sowie genauer Kenntnis des Iterationsgebietes.

Problematisch ist vor allem, dass die Belastungs-Verformungs-Beziehung (Mk-Linie) jeweils in Abhängigkeit der Normalkraft neu bestimmt wird und nicht konstant bleibt. Da diese Beziehung vor allem im Grenzzustand der Tragfähigkeit extrem empfindlich von  $N_x$  abhängt, können sich während der Iteration Zustände oberhalb der Tragfähigkeit ergeben, obwohl sich das Endergebnis eigentlich noch unterhalb der Tragfähigkeit des Systems befindet.

## 7.5 Literatur

Die folgenden Literaturangaben können teilweise von der Homepage des Arbeitsbereiches Massivbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg als PDF-Datei heruntergeladen werden.

- [1] Pfeiffer, U., Quast, U.: *Discussion of „Numerical Investigation of Fiber Reinforced Concrete Polymers Poststrengthened Concrete Slabs“ by Matthias Hörmann, Horst Menrath, and Ekkehard Ramm*, Journal of Engineering Mechanics, May 2003, 581-582.
- [2] Pfeiffer, U.: *Die Nichtlineare Berechnung ebener Rahmentragwerke aus Stahlbeton*, Beiträge zum Forschungskolloquium des DAfStb am 20./21. März 2003, Technische Universität Hamburg-Harburg, S. 171 - 180.
- [3] Pfeiffer, U., Quast, U.: *Some advantages of 1D-modelling instead of 2D- or even 3D-modelling for non-linear analysis of reinforced concrete frames*, proceedings EURO-C 2003 Congress, St. Johann im Pongau, Austria, 16.-19. März 2003, S. 805-816,  
Download im Internet unter <http://www.mb.tu-harburg.de/texte/PDF-Dokumente/Pfeiffer-Quast-Euro-C.pdf>
- [4] Quast, U.: *Elementare Stahlbetonberechnungen mit Euler, Gauß und Broyden*, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 10 / 2002  
Download im Internet unter <http://www.mb.tu-harburg.de/texte/PDF-Dokumente/elementare-berechnungen.pdf>
- [5] Pfeiffer, U.: *Non-linear calculation of plane reinforced concrete frames*, PhD.-Symposium, München, Sept. 2002  
Download im Internet unter [http://www.mb.tu-harburg.de/texte/PDF-Dokumente/Pfeiffer\\_09\\_2002.pdf](http://www.mb.tu-harburg.de/texte/PDF-Dokumente/Pfeiffer_09_2002.pdf)
- [6] Quast, U.: *Zum nichtlinearen Berechnen im Stahlbeton- und Spannbetonbau*. Beton- und Stahlbeton 89 (1994), H. 9, S. 250-253, H. 10, S. 280-284.
- [7] Busjaeger, D.; Quast, U.: *Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft (Programm MASQUE)*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton, Heft 415, 1990

- [8] Quast, U.: *Zur Mitwirkung des Betons in der Zugzone*, Beton- und Stahlbetonbau 75, H. 10, 247-250.
- [9] Quast, U.: *Rechenansätze in Form einer Spannungsdehnungsbeziehung für das Mitwirken des Betons in der gerissenen Zugzone von Stahlbetonquerschnitten*, Bericht aus dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1-64.
- [10] Quast, U.: *Verfahrensgerechte Berücksichtigung des Kriechens bei programmgesteuerter Berechnung schlanker Stahlbetonstäbe*, Bauingenieur, Nr.2, 1978, S. 41-42
- [11] Quast, U.: *Anwendung des Reduktionsverfahrens zur Bemessung von Stahlbeton-Stabwerken nach Theorie II. Ordnung*. Beton- und Stahlbetonbau 5, 1976, S. 115-118
- [12] Pfeiffer, U.: *Die nichtlineare Berechnung ebener Rahmen aus Stahl- oder Spannbeton mit Berücksichtigung der durch das Aufreißen bedingten Achsendehnung*. Cuvillier Verlag Göttingen, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2004. Auszüge unter [www.u-pfeiffer.de](http://www.u-pfeiffer.de) => About me => Dissertation

## 8 Baustoffe

Zur genauen Modellierung der Baustoffe lesen Sie die bitte die INCA2-Hilfe in Kapitel 6 mit folgendem Inhalt:

<b>6</b>	<b>MODELLIERUNG DER BAUSTOFFE .....</b>	<b>53</b>
6.1	LINEAR-ELASTISCH .....	53
6.2	PARABEL-RECHTECK .....	54
6.3	PARABEL (EC2) .....	58
6.4	POLYGON / SPLINE .....	60
6.5	BAUSTOFF BETON – MATERIALKENNWERTE .....	62
6.5.1	<i>Bemessungswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit .....</i>	<i>62</i>
6.5.2	<i>Mittelwerte der Baustoffeigenschaften .....</i>	<i>64</i>
6.6	ANWENDUNG DER BAUSTOFFE IN STAB2D-NL UND INCA2 .....	68
6.7	MITWIRKUNG DES BETONS AUF ZUG IN DER GERISSENEN BETONZUGZONE .....	71
6.7.1	<i>Spannungsverteilung in der gerissenen Zugzone .....</i>	<i>71</i>
6.7.2	<i>Modellierung in INCA2 .....</i>	<i>71</i>
6.7.3	<i>Anwendungsgrenzen .....</i>	<i>75</i>
6.7.4	<i>Verhalten bei Vordehnung des Betons oder der Bewehrung (z.B. Schwinden) .....</i>	<i>76</i>
6.7.5	<i>Anwendungsprobleme und Lösungen .....</i>	<i>77</i>
6.7.6	<i>Auszug aus Heft 415 des DAfStb, Beuth Verlag, Berlin, 1990.....</i>	<i>78</i>
6.8	GRENZDEHNUNGEN, HINWEISE ZU VERSCHIEDENEN NORMUNGEN .....	81
6.9	STAHLBETON NACH DIN 1045, AUSGABE 1988 (ALTE NORMUNG) .....	82
6.9.1	<i>Baustoffe nach DIN 1045, Ausgabe 1988.....</i>	<i>82</i>
6.9.2	<i>Sicherheitskonzept nach DIN 1045, Ausgabe 1988 .....</i>	<i>83</i>
6.9.3	<i>Berechnung nach DIN 1045 (88).....</i>	<i>83</i>
6.9.4	<i>Vergleichsrechnungen mit Interaktions-Diagrammen (z.B. aus Schneider-Bautabellen, 12. Ausgabe).....</i>	<i>84</i>
6.10	UMRECHNUNG DIN 1045 (AUSGABE 88) UND AKTUELLER EC2.....	86
6.11	BAUSTOFFE AUS DER DIN 1045 VOR 1972 .....	87
6.12	SCHWINDEN UND KRIECHEN .....	89
6.12.1	<i>Schwinden des Betons.....</i>	<i>89</i>
6.12.2	<i>Kriechen des Betons .....</i>	<i>92</i>

Die üblichen Anwendungsfälle der Baustoffkennwerte in Stab2D-NL in Kombination mit INCA2 sind in Kapitel 6.6 beschrieben.

## 9 Beispiele

### 9.1 Allgemeines

Dem Programm Stab2D-NL sind Beispiele zu folgenden Themen beigefügt:

- Balkensysteme: 2-Feldträger, nichtlinear gerechnet
- Experiment - Journal of Engineering Mechanics: Nachrechnung eines in der Literatur veröffentlichten Experiments
- Halle aus Fertigteilen: Untersuchung des Tragverhaltens von gekoppelten Stützen
- Theorie 3. Ordnung: 1-Feldträger mit sehr großer Durchbiegung, Hängedach mit einseitiger Schneelast, Seiltragwerk
- Versuchsbalken AB Massivbau: Nachrechnung von drei im Arbeitsbereich Massivbau der TUHH durchgeführten Balken-Experimenten
- elastisch gebetteter Balken

Weitere Erläuterungen zu diesen und weiteren Beispielen werden an dieser Stelle noch eingefügt.

## 9.2 Beispiel 1 – Zweifeldträger

### 1. Erstellen eines Querschnitts

Menü **DEFINITION**

=> **QUERSCHNITTE** => **NEU**

=> **LIN.-ELAST.** => **EINGABE QUERSCHNITTSWERTE** => **RECHTECK**

Breite  $b = 1,00 \text{ m}$  / Höhe  $h = 0,20 \text{ m}$  / E-Modul  $E = 32000 \text{ N/mm}^2$

Mit **OK** die Eingabe bestätigen. Dann mit dem Button „Name“ oben rechts automatisch einen Namen erzeugen („Rechteck  $b / h = 1.000 / 0.200 \text{ m}$ “). Dann Fenster mit der Liste der Querschnitte schließen.

### 2. Erstellen von Knoten und Auflagern

Menü **EINGABE** => **KNOTEN**

Folgende 3 Punkte erzeugen. Koordinaten und Lagerungsbedingungen eingeben und jeweils mit dem Button „**ANWENDEN**“ erzeugen. Anschließend mit dem Button „**ABBRECHEN**“ das Fenster schließen.

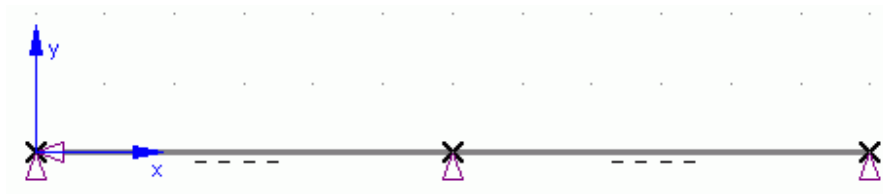
Pkt. 1	$x = 0 / y = 0$	Lagerung: gelenkig
Pkt. 2	$x = 5 / y = 0$	Lagerung: Benutzerdefiniert, $y = \text{fest}$
Pkt. 3	$x = 10 / y = 0$	Lagerung: Benutzerdefiniert, $y = \text{fest}$

Anschließend einmal **Zoom ALLES** in der Buttonleiste wählen oder die \*-Taste drücken.

### 3. Erstellen von Stäben

Menü **EINGABE** => **STABZUG**

Im sich öffnenden Fenster brauchen keine weiteren Änderungen vorgenommen werden. Mit einem Klick auf den Button **STAB MIT MAUS ERZEUGEN** wird das Fenster geschlossen und durch nacheinander Anklicken der Punkte 1 bis 3 werden 2 Stäbe erzeugt. Das System stellt sich jetzt wie folgt dar:



### 4. Belastung aufbringen

Menü **EINGABE** => **STRECKENLAST AUF STAB**



Als Belastung folgenden Wert eingeben, Rechnung für 1 m Breite

$$0,20 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 5,0 \text{ kN/m}$$

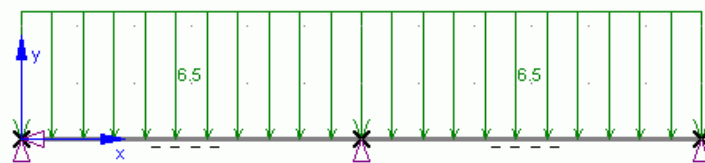
EG Betonplatte

$$0,06 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 1,5 \text{ kN/m}$$

ca. EG Fußbodenaufbau (Estrich etc.)

$$\text{Summe} = 6,50 \text{ kN/m}$$

Anschließend den Button **BELASTUNG MIT MAUS AUFBRINGEN** wählen und die Stäbe jeweils einmal anklicken. Die Belastung wird dann sofort dargestellt.



Mit einem Klick der rechten Maustaste zum Eingabefenster für Linienlasten zurückkehren. Dort den Button **NEU** wählen und einen neuen Lastfall 2 erzeugen. Anschließend eine Verkehrslast von 5 kN/m eingeben und Feld 1 mit dieser Last beaufschlagen.

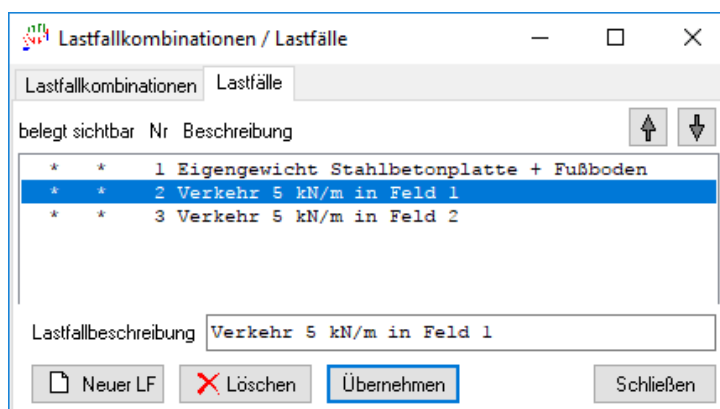
Wiederum mit einem Klick der rechten Maustaste zum Eingabefenster zurückkehren und einen 3. Lastfall erzeugen. Jetzt Feld 2 mit dieser Last beaufschlagen.

Mit Escape die Eingabe der Linienlast beenden.

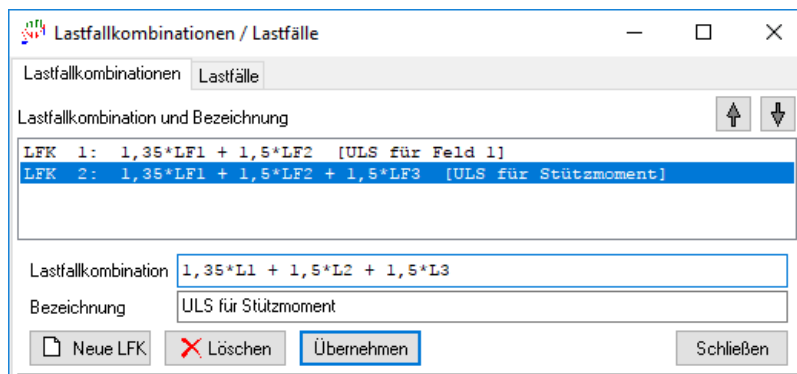
## 5. Lastfälle und Lastfallkombinationen

Menü **DEFINITION** => **LASTFALLKOMBINATIONEN**

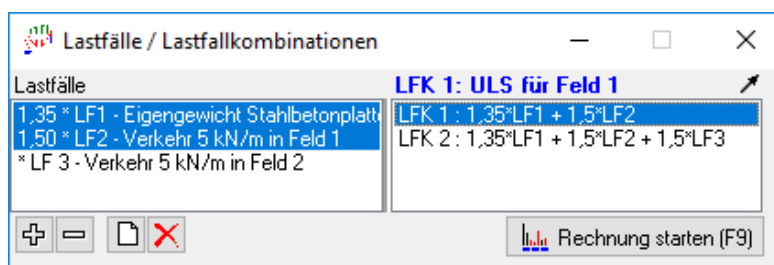
Im Fenster den zweiten Karteikartenreiter **LASTFÄLLE** wählen und die Beschriftung wie folgt durchführen:



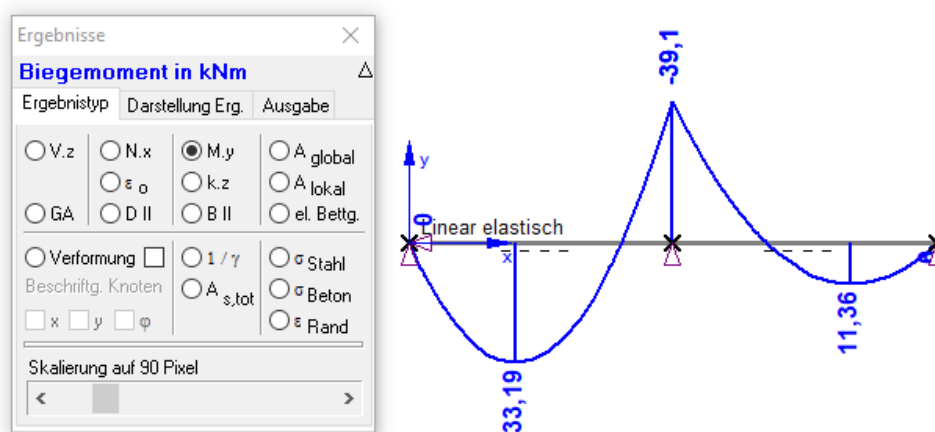
Dann den Karteikartenreiter **LASTFALLKOMBINATIONEN** wählen und 2 Kombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit erzeugen.



Fenster schließen und anschließend im Menü **ANSICHT** das Fenster zur Anzeige der Lastfälle und Lastfallkombinationen wählen (**ANZEIGE LASTFÄLLE F7**).



Lastfallkombination 1 wählen und die Rechnung starten (**F9** oder den Button **RECHNUNG STARTEN** anklicken). Die Rechnung wird durchgeführt, anschließend öffnet sich ein zusätzliches Fenster zur Steuerung der Ergebnisausgabe.



Die Ausgabe der Ergebnisse kann entweder grafisch auf dem Drucker oder numerisch (Menü **ERGEBNISSE** => **EINZELERGEBNISSE NUMERISCH**) erfolgen.

Mit dem gezeigten Beispiel wurden alle Berechnungen linear-elastisch durchgeführt.

## 6. Bemessung Stahlbetonquerschnitt

Mit dem Programm Stab2D-NL ist auch eine automatische Bemessung (Ermittlung der Biegebewehrung) möglich. Erzeugen Sie dazu einen neuen Querschnittstyp, indem Sie im Menü **DEFINITION** => **QUERSCHNITTE** den Button **NEU** anklicken. Als Typ wählen Sie jetzt **BEMESSUNG (LIN.)** (vorletzter Karteikartenreiter).

Querschnitt Nr. 1 bearbeiten

Bezeichnung: Bem.-Re. b/h = 0,500 / 0,300 m

Linear-Elastisch Nicht-Linear INCA2-Querschnitt (NL) **Bemessung (Lin.-Elast.)** Schleuderbeton

Querschnitt: Rechteck

E-Modul = 32000 [N/mm²]

Querschnittsabmessungen Rechteck / Hohlkasten

Querschnitt	Aussparung
Breite b = 1 [m]	0 [m]
Höhe h = 0,2 [m]	0 [m]

Anordnung der Bewehrung

d unten = 0,04 [m] ☒ R1, Bew. jeweils auf Zugseite

d oben = 0,04 [m] ☐ R2, symmetrische Bewehrung

☐ R4, allseitige Bewehrung

Baustoffe für die Bemessung

Beton: 2 - C 30/37 PR, Bemessungswerte

Stahl: 1 - Betonstahl B 500, Bemessungswerte

Grenzdehnungen, Bew.verhältnis...

Steifigkeit

Querschnittsfläche A = 0,2 m²

Trägheitsmoment I = 0,00066667 m⁴

Biegesteifigkeit EI = 21333,3 kNm²

Schubsteifigkeit GA = 2666666,7 kN

Dehnsteifigkeit EA = 6400000 kN

Die Berechnung der Schnittgrößen erfolgt mit linear-elastischen Steifigkeiten. Anschließend erfolgt eine Bemessung mit Ermittlung der Bewehrungsmenge.

Wichte = 25 [kN/m³] g = 5 [kN/m]

OK Abbrechen

Die Abmessungen und der E-Modul werden wie zuvor gewählt. Zusätzlich müssen die Randabstände der Bewehrung sowie die zu verwendenden Baustoffe für die Bemessung ausgewählt werden. Achten Sie hier bitte darauf, die Bemessungswerte bei den Baustoffen zu wählen. Die Mittelwerte werden dagegen für eine spätere Verformungsrechnung benutzt.

Als Querschnittstyp wird **R1** gewählt. Dabei wird automatisch auf der Zugseite die Bewehrung ermittelt.

Ändern Sie außerdem noch die Werte für Grenzdehnung und das min/max. Bewehrungsverhältnis. Klicken Sie dazu auf den Button unten rechts **GRENZDEHNUNGEN, BEW. VERHÄLTNIS**. Das minimale Bewehrungsverhältnis sollte in diesem Fall einer gering bewehrten Deckenplatte zu 0,1 % gewählt werden.

Grenzdehnungen

Beton - Grenzdehnungen [mm/m]

max. Druckdehng.  $\epsilon_{cu}$  -3,5

max. Druck zentr.  $\epsilon_{cu,z}$  -2

☐ max. Zugdehnung 100

Stahl - Grenzdehnungen [mm/m]

max. Druckdehnung -5

max. Zugdehnung  $\epsilon_{su}$  25

Bewehrungsverhältnis für Bemessung

min. Bewehrungsverhältnis 0,1 %

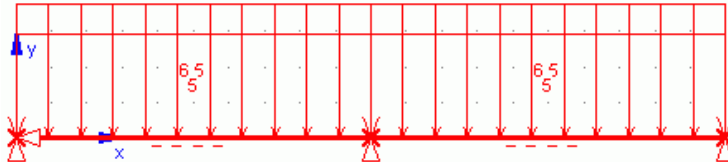
max. Bewehrungsverhältnis 4 %

OK Abbrechen

Fenster mit **OK** schließen.

Klicken Sie anschließend auf den Button **NAME** oben rechts, um den Namen des Querschnitts zu aktualisieren. Fenster mit **OK** schließen, die Querschnittsliste ebenfalls schließen.

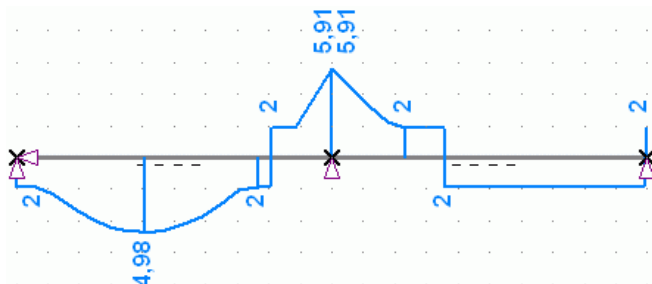
Markieren Sie als nächstes das System, indem Sie mit der Maus einen Rechteckbereich aufziehen (Klicken, geklickt halten und ziehen, dann loslassen).



Kopieren Sie das System, indem Sie im Menü auf **BEARBEITEN** => **SCHIEBEN** gehen und dort eine Verschiebung in y-Richtung um 5 m eingeben sowie das Feld **KOPIEREN** mit einem Häkchen versehen. Anschließend mit **OK** bestätigen.

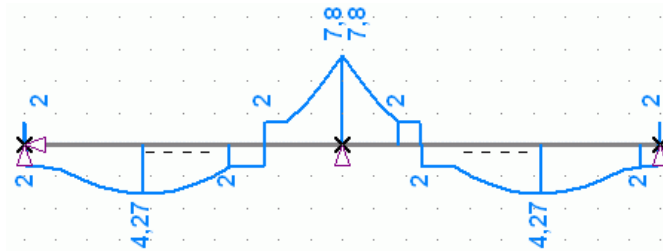
Stellen Sie mit **ZOOM ALLES (\*)** das gesamte System auf dem Bildschirm dar. Wählen Sie dann nacheinander die beiden Stäbe vom kopierten System mit einem Doppelklick aus und ändern den Querschnitt auf den Bemessungsquerschnitt Nr. 2. Führen Sie die Rechnung für Lastfallkombination 1 noch einmal durch (Taste **F9**).

Die Schnittgrößen, Verformungen etc. werden jetzt noch einmal neu berechnet und stimmen für beide Querschnitte überein. Wählen Sie als Ausgabe die Bewehrung  $A_{s,tot}$ . Angezeigt wird jeweils die Gesamtbewehrung des Querschnitts an der jeweiligen Stelle, in diesem Fall also die Bewehrung auf der Zugseite.



Im Feld sind damit mindestens  $A_s = 4,98 \text{ cm}^2/\text{m}$  Bewehrung B500 B erforderlich.

Wählen Sie als nächstes die Lastfallkombination 2 und führen Sie auch hier die Rechnung durch.



Im Stützbereich sind damit mindestens  $A_s = 7,8 \text{ cm}^2/\text{m}$  Bewehrung B500 B erforderlich.

## 7. Nichtlineare Berechnung

Erzeugen Sie einen weiteren Querschnitt (**DEFINITION** => **QUERSCHNITTE** => **NEU**) und wählen diesmal Karteikartenreiter 2 (**STAHLBETON (NL)**). Die Dimensionen geben Sie bitte wie zuvor ein. Als Baustoff wählen Sie **C 30/37 Mittelwerte** bzw. **Betonstahl BSt 500 Mittelwerte**.

Im Weiteren muss die Bewehrung definiert werden, wobei hier vereinfacht ein einheitlicher Querschnitt für den Feld- und Stützenbereich benutzt wird.

Unten 8 D 10 mm =  $6,28 \text{ cm}^2/\text{m}$

Oben 8 D 12 mm =  $9,05 \text{ cm}^2/\text{m}$

Die Felder für Schwinden, Kriechen etc. bleiben vorerst unverändert. Mit dem Button **Name** kann automatisch ein Name generiert werden.

Querschnitt Nr. 1 bearbeiten

Bezeichnung: R2 b/h = 1,00/0,20m, A<sub>s,tot</sub> = 15,3cm<sup>2</sup>

Linear-Elastisch Nicht-Linear INCA2-Querschnitt (NL) Bemessung (Lin.-Elast.) Schleuderbeton

Querschnitt: Rechteck

Bezugspunkt: ☒ geometr. Schwerpunkt ☐ ideeller Schwerpunkt

Vorspannung Bewehrung:  $\epsilon = 0$  [mm/m]

Abmessungen Rechteck / Hohlkasten

Querschnitt	Aussparung
Breite = 1 [m]	[m]
Höhe = 0,2 [m]	[m]

Anordnung und Menge der Bewehrung

☐ R1 (unten) ☒ R2 (unten+oben) ☐ R4 (u+o, seitlich)

$d_u = 0,04$  [m]  $d_o = 0,04$  [m]

$A_{s,u} = 6,28$  [cm<sup>2</sup>]  $A_{s,o} = 9,05$  [cm<sup>2</sup>]  $A_{re+li} =$  [cm<sup>2</sup>]

Baustoffe für die Berechnung der Verformung

Querschnitt: 7 - C 30/37 EC2 - Mittel für Verformung

Bewehrung: 6 - Betonstahl B 500, Mittelwerte

☐ Extra Baustoffe für Nachweis der Querschnittstragfähigkeit

Querschnitt: 7 - C 30/37 EC2 - Mittel für Verformung

Bewehrung: 6 - Betonstahl B 500, Mittelwerte

Simulation des zeitabhängigen Verhaltens

Schwinddehnung in [mm/m]:  $\epsilon_{s,s} =$  [mm/m] (negativ!)

Kriechen mit  $\phi_{eff} =$  [mm/m] =  $\frac{\text{quasi ständige Last}}{\text{aktuelle Last}} \times \phi$

Betonzugfestigkeit mit 100 % des Anfangswerts berücksichtigen

Grenzdehnungen, Bew.verhältnis ...

A<sub>c</sub> = 0,200 m<sup>2</sup>  
A<sub>s,tot</sub> = 15,3 cm<sup>2</sup>  
 $\rho = 0,77 \%$

Wichte = 25 [kN/m<sup>3</sup>] g = 5 [kN/m]

OK Abbrechen

Kopieren Sie im Anschluss das System wie zuvor auch schon ein weiteres Mal und ändern die Querschnitte auf den eben erzeugten Querschnitt Nr. 3. Führen Sie dann die Rechnung zum Beispiel für Lastfallkombination 1 noch einmal durch und vergleichen im Anschluss die Ergebnisse. Insbesondere Biegemoment und Verformung haben sich merklich geändert. Probieren Sie gleiches mit Lastfallkombination 2.

## 8. Verformungsrechnung im Gebrauchszustand

Erzeugen Sie im Menü **DEFINITION** neue **LASTFALLKOMBINATIONEN** wie folgt:

$$L1 + 0,5 \cdot L2$$

und

$$L1 + 0,5 \cdot L2 + 0,5 \cdot L3$$

Bei diesen Lastfallkombinationen wird 50% der Verkehrslast als wirkend angenommen. Ändern Sie weiterhin beim Querschnitt Nr. 3 die zeitabhängigen Werte für Schwinden und Kriechen wie folgt:

$$\epsilon_s = -0,50 \text{ mm/m}$$

$$\varphi_{\text{eff}} = 1,5$$

$$\text{Zugfestigkeit} = 70\%$$

Simulation des zeitabhängigen Verhaltens

Schwinddehnung in [mm/m] Info

eps.s =  [ mm/m ] (negativ!)

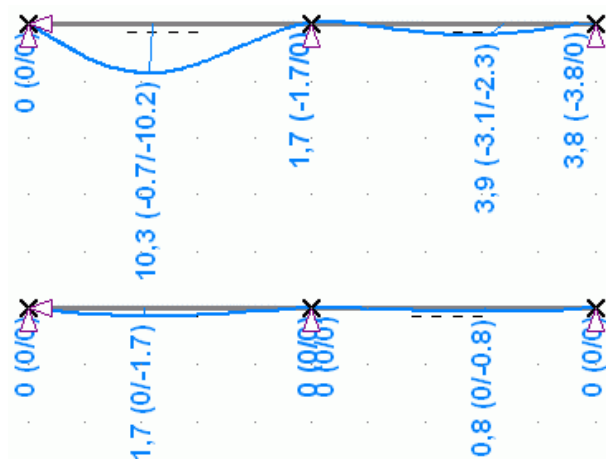
Kriechen mit phi.eff =  =  $\frac{\text{quasi ständige Last}}{\text{aktuelle Last}} \times \text{phi}$

Betonzugfestigkeit mit  % des Anfangswerts berücksichtigen

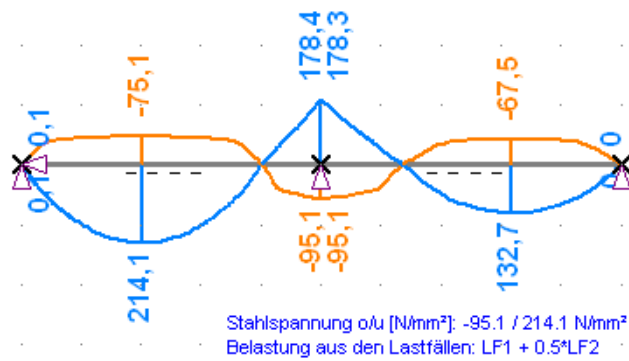
Ohne genauere Rechnung können die genannten Werte für diese Beispielrechnung benutzt werden. Als Erfahrungswert kann gesagt werden, dass die rechnerische Zugfestigkeit des Betons im Laufe der Zeit bei wiederholter Be- und Entlastung auf ca. 50 – 70% der Anfangsfestigkeit abfällt.

Bestätigen Sie Ihre Änderungen mit **OK**. und führen Sie die Rechnung für Lastfallkombination 3 durch ( $L1 + 0,5 \cdot L2$ ).

Besonders auffällig sind jetzt die Unterschiede in der Verformung. Feld 1 biegt sich um ca. 10,3 mm durch.



Mit dem Wert der Stahlspannung oder Betonspannung können anschließend weitere Nachweise im Gebrauchszustand durchgeführt werden (Rissbreitenbegrenzung, Begrenzung der Spannungen, Ermüdung etc.).



## 9.3 Elastisch Gebettete Systeme, Schutzdalen Speicherstadt Hamburg

### 9.3.1 Aufgabenstellung

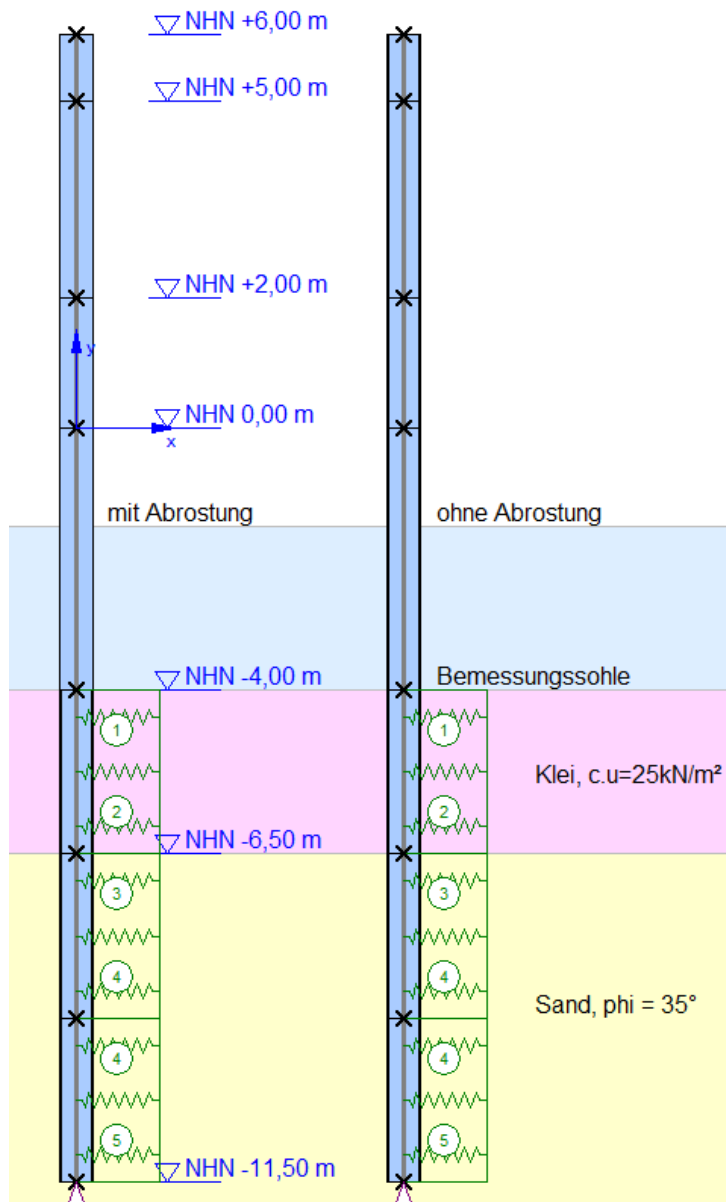
Für die Speicherstadt in Hamburg sind Schutzdalen zu dimensionieren, die z.B. vor Brückenwiderlagern oder anderen, ins Wasser ausragenden Bauteilen angeordnet werden. Im Fall eines Schiffsanpralls durch eine Barkasse sollen sowohl das Schiff als auch das jeweilige Bauteil weitestgehend geschützt werden.

Die Berechnung des Dalbens erfolgt als elastisch gebetteter Balken mit Anwendung der p-y-Kurven. Nachzuweisen sind Eisdruck sowie eine aufnehmbare Energie aus Schiffsanprall in der Größenordnung von  $E = 25 \text{ kNm}$  (für kleinere Schiffe).

### 9.3.2 System

Modellierung der p-y-Kurven für Dalben  $\varnothing 508 \text{ mm}$ , Stahlgüte S 460

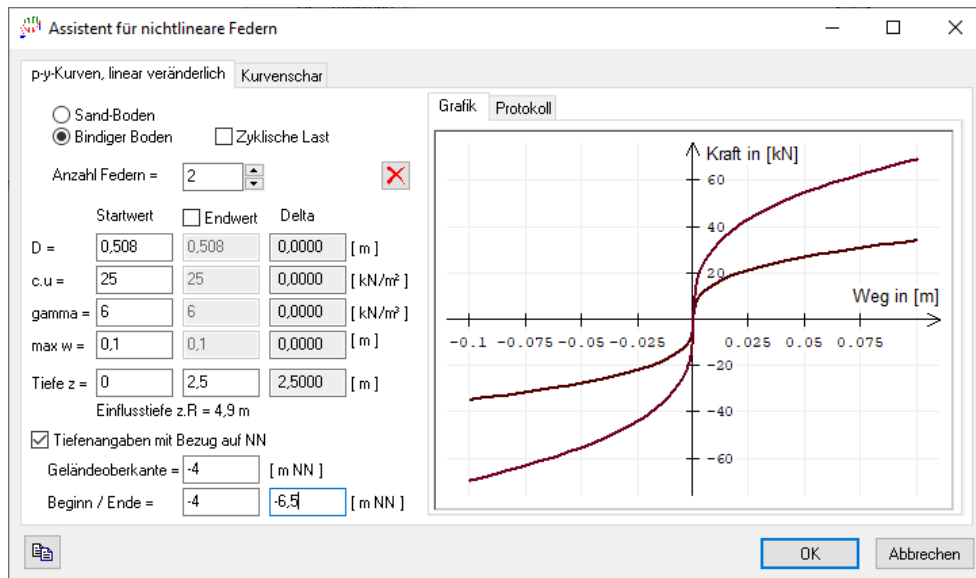
Hafensohle auf NHN -3,0 m => Bemessungssohle auf NHN -4,00 m, mit Kolk



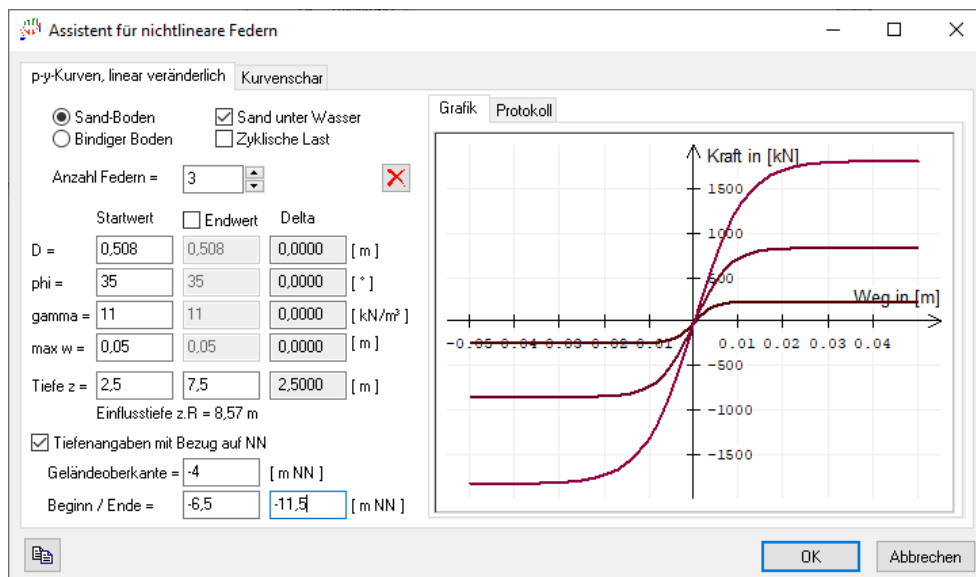


Zur Modellierung der p-y-Kurven wählen Sie im Menü **DEFINITION** den Unterpunkt **FEDER / ELAST. BETTUNG** und in dem sich öffnenden Fenster den Button **ASSISTENT**.

Die obere Bodenschicht ist ein Klei, wobei für die Definition der p-y-Kurve die undrainierte Kohäsion sowie die Wichte erforderlich sind. Für die Modellierung dieser Bodenschicht mit  $d = 2,5$  m Dicke sind zwei Federn ausreichend, zwischen denen während der Berechnung interpoliert wird.

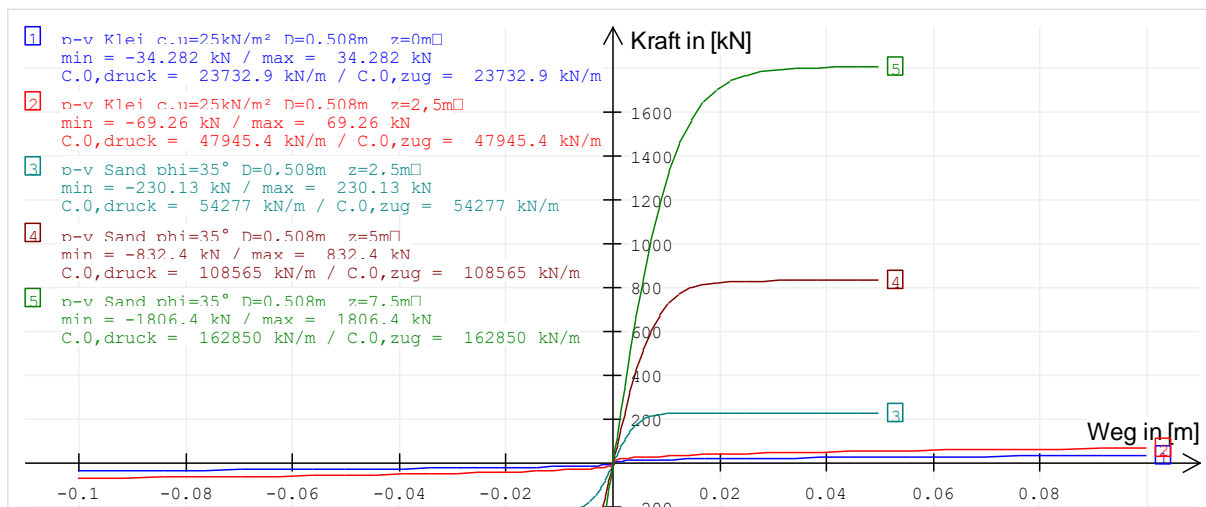


Für die Definition der p-y-Kurven für den Sand gehen Sie analog vor und wählen erneut den Assistenten. Für die 5 m Einbindetiefe in den Sand wurden 3 Federn gewählt, was ebenfalls ausreichend genau ist.



Der jeweils einzugebende Wert „max w“ für den Definitionsbereich der p-y-Kurve ist so zu wählen, dass die Verformung des Dalbens im Boden kleiner ist als die dort definierte p-y-Feder.

Mit den vorgenannten Eingabewerten und dem Assistenten sind damit folgende p-y-Kurven definiert:



Im nächsten Schritt definieren Sie die Punkte für die Dalben, wobei Knoten an den Stellen der Last-einleitung sowie entsprechend der Baugrundsichtung zu definieren sind.

Für den vergleichsweise kleinen Dalben wird ein einheitlicher Rohrquerschnitt über die gesamte Dalbenlänge gewählt. Für diesen erfolgt eine Berechnung „ohne Abrostung“ und eine Berechnung für das Ende der Lebensdauer für den Zustand „mit Abrostung“. Im vorliegenden Fall wurden folgende Werte abgestimmt:

#### Querschnittswerte für Rohr $\varnothing 508 \text{ mm} \times 17,5 \text{ mm}$

ohne Abrostung mit  $t = 17,5 \text{ mm}$

mit Abrostung mit  $t = 17,5 \text{ mm} - 8 \text{ mm} = 9,5 \text{ mm}$  im Wasserbereich

mit  $t = 17,5 \text{ mm} - 2 \text{ mm} = 15,5 \text{ mm}$  im Boden

Damit sind 3 Kreisquerschnitte zu definieren. Vereinfachend ist es ausreichend, den Außendurchmesser gleich zu belassen und die Wanddicke der Abrostung entsprechend zu reduzieren.

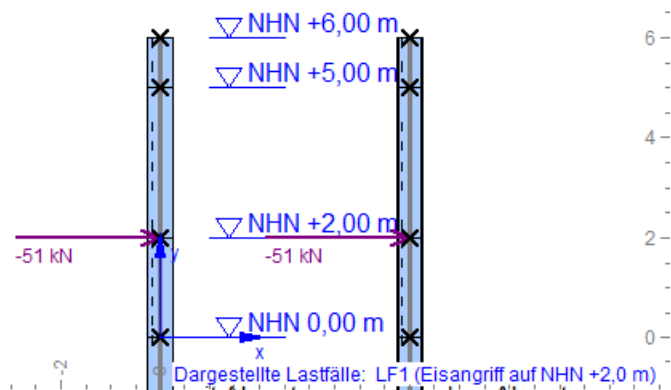
Liste aller Querschnitte		
1 *	Lin-Elast	- Kreisring d = 508 mm, t = 17,5 mm, f.y = 460 N/mm <sup>2</sup>
2 *	Lin-Elast	- Kreisring d = 508 mm, t = 9,5 mm, f.y = 460 N/mm <sup>2</sup>
3 *	Lin-Elast	- Kreisring d = 508 mm, t = 15,5 mm, f.y = 460 N/mm <sup>2</sup>

## Belastung

Lastfall 1 – Eisangriff auf NHN +2,0 m (Standardfall)

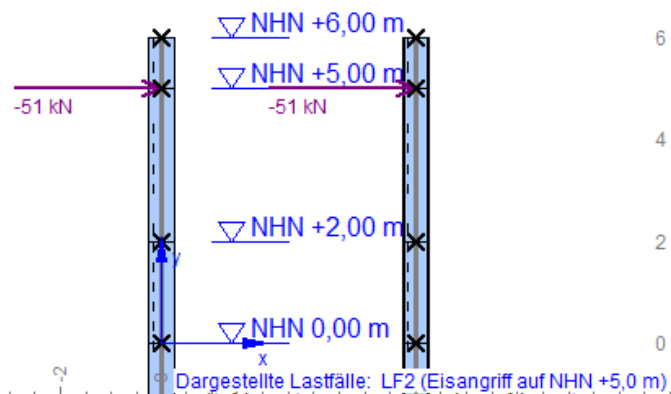
Für gebrochenes Eis darf im Hamburger Hafen vereinfachend nachfolgender Ansatz gewählt werden:

$$F_{\text{Eis}} = 100 \text{ kN/m} \cdot \phi = 100 \text{ kN/m} \cdot 0,508 \text{ m} = 51 \text{ kN}$$



Lastfall 2 – Eisdruck auf NHN +5,0 m

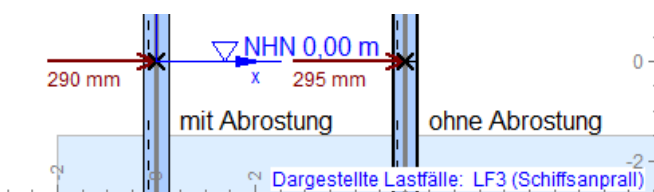
In Kombination mit einer Sturmflut kann Eisdruck auf NHN +5,0 m auftreten.



Lastfall 3 – Schiffsanprall

Für den Schiffsanprall wird eine Verformung in maßgebender Höhe (hier NHN ±0,00 m) aufgebracht, so dass mit der berechneten Verformung die aufnehmbare Anprallenergie ermittelt werden kann.

Die Verformung wird dabei iterativ solange gesteigert, bis die maximale Stahlspannung erreicht oder das System instabil wird.



Grundlegend ist die Dalbenbemessung so aufgebaut, dass für ein gewähltes System (Dalbenrohr, Material, Einbindetiefe etc.) aufnehmbare Lasten oder aufnehmbare Energien nachgewiesen werden können. Eine Optimierung des Dalbens bzgl. Materialverbrauch oder Einbindelänge erfolgt iterativ durch den Tragwerksplaner, indem das System angepasst wird und Teile davon neu modelliert werden.

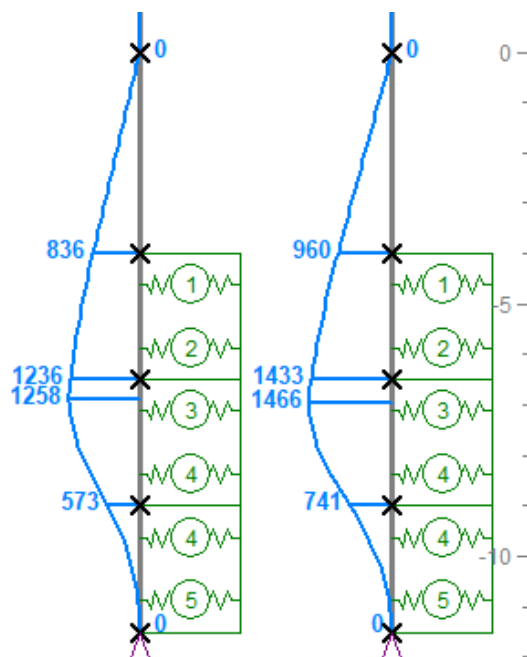
Für die Berechnung eines Schutzdalbens sind in diesem speziellen Fall keine weiteren Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite zu berücksichtigen ( $\gamma = 1,0$ ).

### 9.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse für Eisdruck sind nicht maßgebend und werden daher nicht weiter dokumentiert.

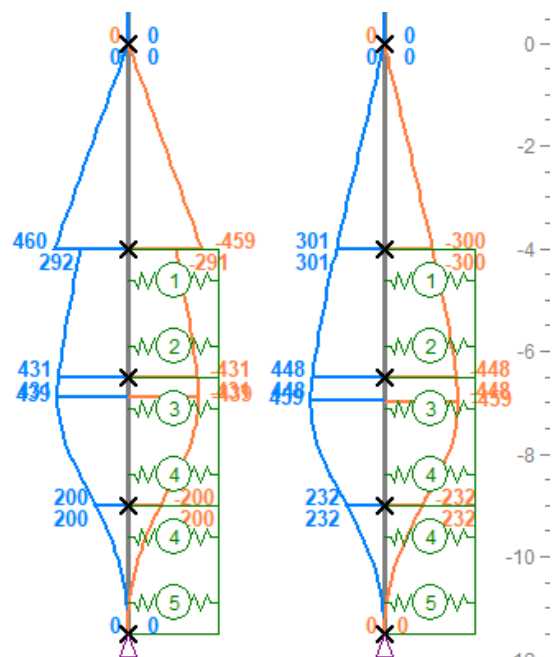
#### Ergebnisse für Schiffsanprall (Lastfall 3)

Biegemoment in [kNm]



Biegemoment [kNm]: 0 / 1466 kNm  
Belastung aus den Lastfällen: LF3 (Schiffsanprall)

Stahlspannung in [N/mm<sup>2</sup>]

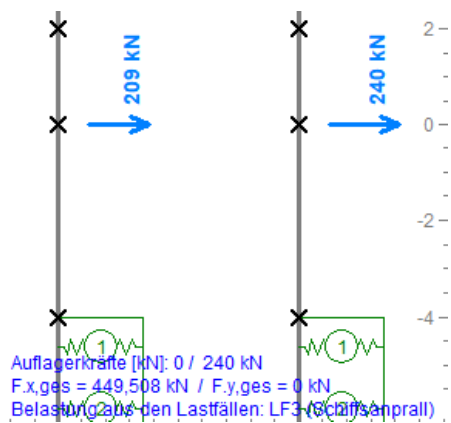


Stahlspannung o/u [N/mm<sup>2</sup>]: -459 / 460 N/mm<sup>2</sup>  
Belastung aus den Lastfällen: LF3 (Schiffsanprall)

$$\sigma_s = 460 \text{ N/mm}^2 < 460 \text{ N/mm}^2$$

Die einwirkende Weggröße im Lastfall 3 wurde iterativ solange gesteigert, bis der Rohrquerschnitt (Stahl S 460) vollständig ausgenutzt wird. Die Einspannung des Dalbens in den Boden weist noch Reserven auf.

Reaktionskraft in [kN]



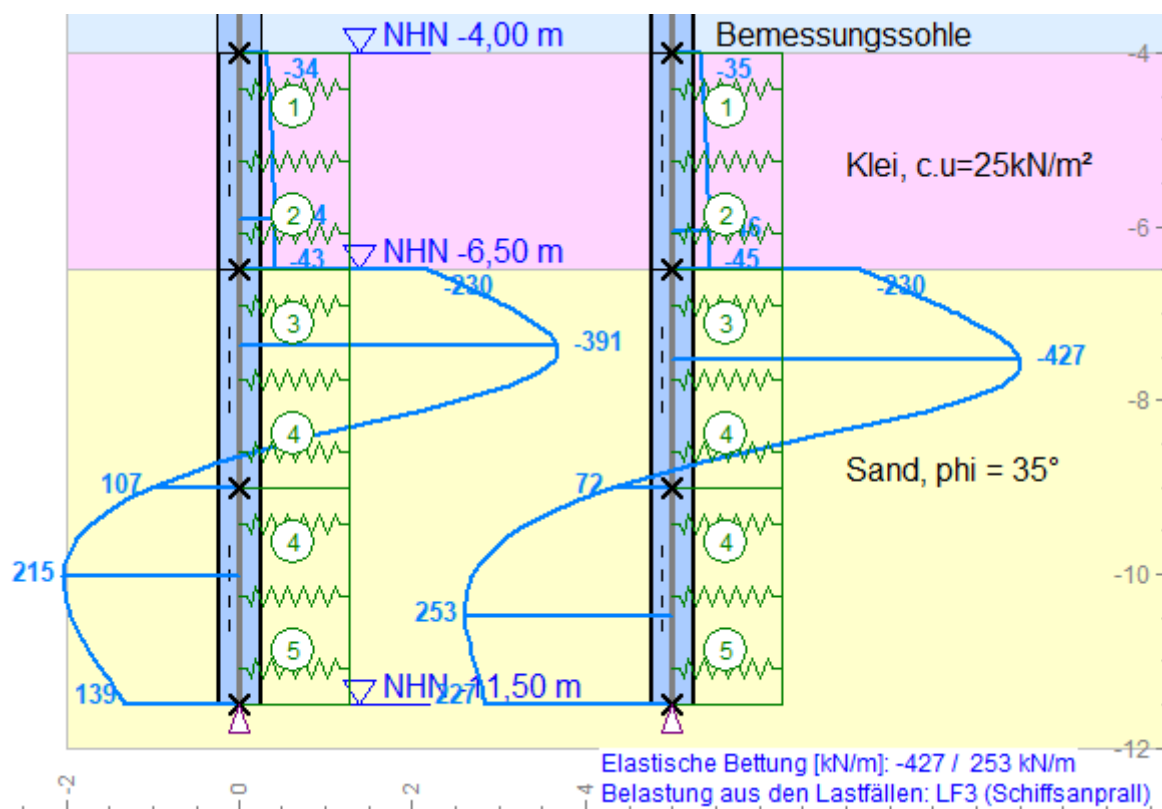
Mit der Reaktionskraft kann die aufnehmbare Energie ermittelt werden

$$E = \frac{1}{2} \cdot F \cdot w$$

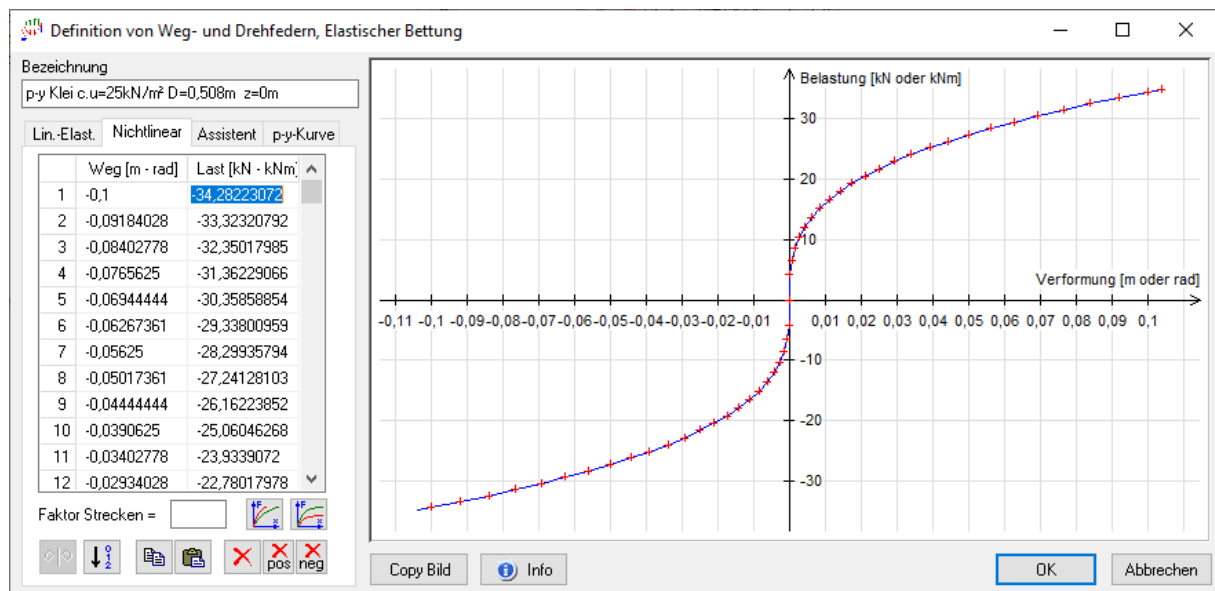
$$E_{\text{mit Abrostung}} = \frac{1}{2} \cdot 209 \text{ kN} \cdot 0,29 \text{ m} = 30,3 \text{ kNm} > 25 \text{ kNm} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

$$E_{\text{ohne Abrostung}} = \frac{1}{2} \cdot 240 \text{ kN} \cdot 0,295 \text{ m} = 35,4 \text{ kNm} > 25 \text{ kNm} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

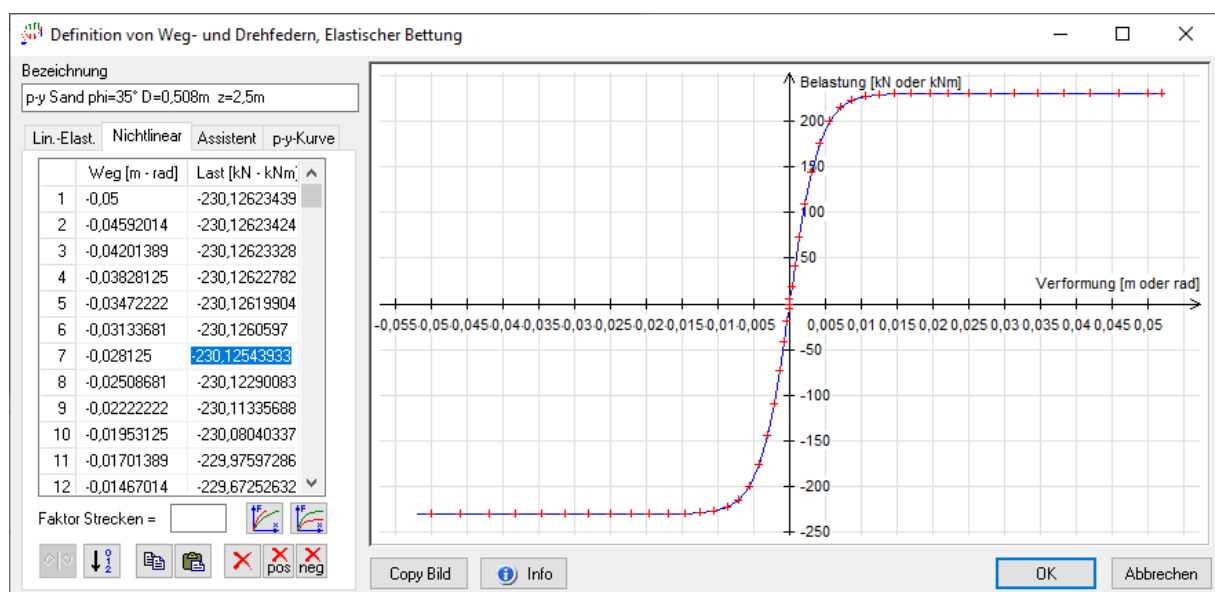
Bettungsreaktion im Boden



Im rechten System weist der Klei an der Hafensohle eine Bettungsreaktion von 35 kN/m auf bei einer Verformung von  $w = 106$  mm. Damit ist der Definitionsbereich der erstellten p-y-Kurve bereits leicht überschritten. Jedoch wird intern bei Überschreitung die definierte Kurve mit den letzten beiden Punkten linear extrapoliert, so dass die Genauigkeit für die Dalbenberechnung weiterhin ausreichend ist. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, vor allem die oberen Bodenschichten mit einem ausreichend gewählten „max w“ zu definieren und dies im Nachgang zu überprüfen.



Die Feder Nr. 3 (Sand) reagiert mit max.  $p = 230$  kN/m bei einer Verformung von  $w = 27,7$  mm. Der Sandboden ist damit vollständig ausgenutzt, da die Bettungsreaktion bereits im horizontalen Abschnitt der p-y-Kurve liegt. Der Definitionsbereich mit max  $w = 50$  mm wurde ausreichend gewählt.



# 10 Lizenzierung, Entwicklung und Autor

## 10.1 Lizenzierung

### ***Nutzung an Hochschulen, für Lehre und Forschung***

Im Rahmen einer **nichtkommerziellen** Nutzung ist das Programm *Freeware* und darf frei benutzt und auch an Dritte weiter gegeben werden. Eine Lizenzgebühr an den Autor ist nicht zu entrichten. Hochschulen und öffentliche Einrichtungen werden jedoch gebeten, sich im Internet unter

[www.u-pfeiffer.de](http://www.u-pfeiffer.de), Unterpunkt *Stab2D-NL*

registrieren zu lassen. Nach kurzer Bearbeitungszeit erhalten Sie per E-Mail eine Registrierungsdatei, in der Name und Anschrift der Hochschule vermerkt sind. Im Info-Fenster oder beim Ausdrucken aus Stab2D-NL werden diese Informationen mit ausgegeben.

### ***Kommerzielle Nutzung in Ingenieurbüros, Baufirmen etc.***

Im Rahmen eines **kommerziellen** Einsatzes ist eine Lizenzgebühr an den Autor zu entrichten. Aktuelle Informationen zur Lizenzgebühr erhalten Sie ebenfalls im Internet unter [www.u-pfeiffer.de](http://www.u-pfeiffer.de), Unterpunkt *Stab2D-NL*.

## 10.2 Entwicklung

Das Programm Stab2D-NL wurde am Arbeitsbereich Massivbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg von Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer entwickelt. Ziel war es, ein leistungsfähiges Werkzeug zur nichtlinearen Untersuchung ebener Stabwerke zu erstellen, um Bauwerke mit Zwangsbeanspruchungen, mehrteilige, gekoppelte Stützen bzw. ganz allgemein Stahlbetontragwerke in ihrer Gesamtheit (Interaktion Stütze und Riegel) zu untersuchen. Vorhandene, meist kommerzielle Programme waren zum einen nur selten in der Lage, nichtlinear rechnen zu können, zum anderen wurden einige Zusammenhänge (z.B. versteifende Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone) anders formuliert, als vom Autor gewünscht. Da die kommerziellen Programme außerdem meist nur auf die Bemessung von Stahlbetontragwerken ausgelegt sind, in der eigenen Arbeit aber Systeme mit vorgegebener Bewehrung bis zum Grenzzustand belastet werden sollten, ergab sich der nächste Grund für die Entwicklung eines eigenen Programms. In der Summe sind die beschränkten Eingriffsmöglichkeiten in die Rechenweise bei kommerziellen Programmen zwar für die tägliche Praxis im Ingenieurbüro von Vorteil, reichen für wissenschaftliche Untersuchungen jedoch im Normalfall nicht aus.

Seit 2002 wurde und wird das Programm erfolgreich in Diplom- und Vertieferarbeiten in unterschiedlichen Fachbereichen eingesetzt (Massivbau, Stahlbau, Mauerwerksbau, Erforschung neuer Bauweisen). Seit 2003 ist das Programm in etlichen Ingenieurbüros, Baufirmen und an einer Vielzahl von Universitäten im Einsatz, um eher nichtalltägliche Probleme zu lösen. Durch die Nutzung des Programms in Ingenieurbüros im praktischen Einsatz ergaben sich etliche Verbesserungen insbesondere an der Benutzeroberfläche des Programmes. Anregungen sind daher gerne willkommen. Neue Programmversionen finden Sie in ca. halbjährlichen Abständen im Internet unter [www.u-pfeiffer.de](http://www.u-pfeiffer.de).

Das Programm und insbesondere der Rechenkern haben die Testphase bis 2004 inzwischen gut durchlaufen. Nichtsdestotrotz gilt:

Obwohl das Programm nach bestem Wissen entwickelt und getestet wurde, kann eine völlige Fehlerfreiheit nicht garantiert werden. Es wird deshalb an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass für etwaige Schäden, die durch Benutzung des Programms entstehen, keine Haftung übernommen werden kann. Hinweise und Verbesserungsvorschläge sind jederzeit willkommen.

Bei Fragen und Anregungen schreiben Sie bitte an:

Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer

e-mail: [pfeiffer@tuhh.de](mailto:pfeiffer@tuhh.de)

<http://www.u-pfeiffer.de>

Die aktuelle postalische Adresse sowie die Erreichbarkeit per Telefon und Mail finden Sie immer im Internet unter [www.u-pfeiffer.de](http://www.u-pfeiffer.de).

### 10.3 Autor

Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer

Jahrgang	1974
1992	Abitur, Goethe-Gymnasium in Schwerin
1994 - 1999	Studium der Fachrichtung Bauwesen und Umwelttechnik an der Technischen Universität Hamburg-Harburg Vertiefungsrichtungen: Massivbau, Stahlbau, Baumechanik/Baustatik
1999 - 2004	Assistent im Arbeitsbereich Massivbau (TUHH) unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Quast
2004	Promotion zum Thema: Die nichtlineare Berechnung ebener Rahmen aus Stahl- oder Spannbeton mit Berücksichtigung der durch das Aufreißen bedingten Achsendehnung
seit 2004	Mitarbeiter im Ingenieurbüro Sellhorn, Hamburg, <a href="http://www.sellhorn-hamburg.de">www.sellhorn-hamburg.de</a> Leiter Tragwerksplanung, Prokurist Projekte insbesondere im Stahlwasserbau, Kaimauern national und international, fugenlose Bauwerke, Instandsetzung historischer Bauwerke, Brücken



**Entwickelte Programme**

seit 1993	<b>Vektor-As</b> - Mathematikprogramm für die gymnasiale Stufe zur Vektorrechnung (Programmiersprache Turbo Pascal 6.0, MS-DOS)
seit 1997	<b>Truss2D-NL</b> - Programm zur nichtlinearen Berechnung von Fachwerken, mit Berücksichtigung großer Verformungen und nichtlinearer Materialgesetze mit bleibender Verformung (Programmiersprache Visual Basic, ab Win 3.11)
seit 1998	<b>INCA2</b> - Programm zur interaktiven Berechnung von Massivbauquerschnitten unter zweiachsiger Biegung mit Normalkraft (Programmiersprache Delphi 4.0, ab Win 95)
seit 2001	Entwicklung von <b>Stab2D-NL</b> (Programmiersprache Delphi, Nutzung ab Win 95)

© Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer, 2001 - 2024

ehemals Institut für Massivbau, Technische Universität Hamburg-Harburg

letzte Änderung: 25.11.2024