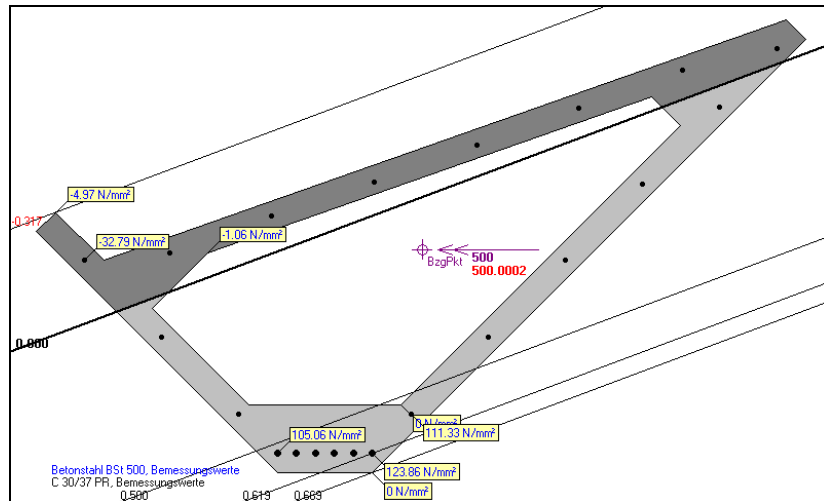


INCA2



Programmbeschreibung

INCA2, Version 3.0

Stand: Oktober 2024

Autor: Dr.-Ing., Uwe Pfeiffer
Am Schulland 15, 21224 Rosengarten
pfeiffer@tuhh.de
www.u-pfeiffer.de

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	5
2	EIN-/AUSGABE SYSTEM UND LASTFALL.....	6
2.1	QUERSCHNITTS-DATEI	6
2.2	ALLGEMEINE VORGEHENSWEISE ZUR QUERSCHNITTSEINGABE	7
2.3	EINGABE DER BAUSTOFFE.....	9
2.3.1	<i>Baustoffliste</i>	<i>9</i>
2.3.2	<i>Materialgesetze.....</i>	<i>10</i>
2.3.3	<i>Wechsel zwischen Bemessungswerten und Mittelwerten.....</i>	<i>11</i>
2.4	EINGABE VON PUNKTEN FÜR POLYGONE ODER ALS BEWEHRUNG	12
2.4.1	<i>Variante 1: Einzelne Punkte.....</i>	<i>12</i>
2.4.2	<i>Variante 2: Punkte als Liste</i>	<i>13</i>
2.4.3	<i>Vorhandenen Punkt ändern</i>	<i>14</i>
2.5	EINGABE VON BETONFLÄCHEN (POLYGONEN)	15
2.5.1	<i>Polygon.....</i>	<i>15</i>
2.5.2	<i>Polygon als Liste von Punkten</i>	<i>17</i>
2.5.3	<i>Eingabe Rechteck</i>	<i>18</i>
2.5.4	<i>Eingabe Kreis</i>	<i>18</i>
2.5.5	<i>Assistenten für komplette Querschnitte.....</i>	<i>19</i>
2.5.6	<i>Assistent für Schleuderbetonstützen</i>	<i>21</i>
2.6	LASTFALL-EINGABE	22
2.7	GRENZDEHNUNG / PARAMETER.....	23
2.8	TITEL/BESCHREIBUNG FÜR DAS SYSTEM	24
2.9	EINGABE VORDEHNUNG/VORKRÜMMUNG	24
2.10	AUSGABE DER QUERSCHNITTS- UND EINGABEDATEN	28
2.10.1	<i>Querschnitt Drucken</i>	<i>28</i>
2.10.2	<i>Grafik in Zwischenablage</i>	<i>28</i>
2.10.3	<i>Grafik als BMP speichernr</i>	<i>28</i>
2.10.4	<i>Eingabedaten Grafik in Zwischenablage.....</i>	<i>29</i>
2.10.5	<i>Eingabedaten (numerisch + Grafik)</i>	<i>30</i>
2.11	IMPORT DXF-DATEI.....	30
3	BEARBEITEN	31
3.1	SELEKTIEREN.....	31
3.2	ZOOMFUNKTIONEN	31
3.3	SCHIEBEN, SPIEGELN, ROTIEREN	32
3.4	LÖSCHEN	33
3.5	EIGENSCHAFTEN	33
4	ERGEBNISSE	34
4.1	DEHNUNGSZUSTAND (INTERAKTIV).....	34
4.2	AUSGABE DER ERGEBNISSE	35
4.3	SPANNUNGSVERTEILUNG UND DEHNUNGSEBENE ALS 3D-ANIMATION	37
4.4	QUERSCHNITTSWERTE	39

4.5	SPANNUNGSRESULTIERENDE	40
4.6	SICHERHEITSNACHWEIS	41
4.7	BEMESSUNG	41
4.8	INTERAKTIONSDIAGRAMM $N / M_y / M_z$	43
4.9	M/K-LINIE	45
4.10	M/N-LINIE	47
4.11	M_y / M_z -LINIE	49
4.12	ERGEBNISSE LÖSCHEN	49
5	MENÜ EXTRAS	50
5.1	EINSTELLUNGEN	50
5.1.1	<i>Darstellung</i>	50
5.1.2	<i>Bearbeiten</i>	51
5.1.3	<i>Bild Materialgesetz</i>	52
5.1.4	<i>Ergebnisse</i>	52
5.2	MESSEN	54
5.3	BETON-NETTOFLÄCHE	54
5.4	ÜBERSICHT SHORTCUTS	55
6	MODELLIERUNG DER BAUSTOFFE	56
6.1	LINEAR-ELASTISCH	56
6.2	PARABEL-RECHTECK	57
6.3	PARABEL (EC2)	61
6.4	POLYGON / SPLINE	63
6.5	BAUSTOFF BETON – MATERIALKENNWERTE	65
6.5.1	<i>Bemessungswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit</i>	65
6.5.2	<i>Mittelwerte der Baustoffeigenschaften</i>	67
6.6	ANWENDUNG DER BAUSTOFFE IN STAB2D-NL UND INCA2	71
6.7	MITWIRKUNG DES BETONS AUF ZUG IN DER GERISSENEN BETONZUGZONE	74
6.7.1	<i>Spannungsverteilung in der gerissenen Zugzone</i>	74
6.7.2	<i>Modellierung in INCA2</i>	74
6.7.3	<i>Anwendungsgrenzen</i>	78
6.7.4	<i>Verhalten bei Vordehnung des Betons oder der Bewehrung (z.B. Schwinden)</i>	79
6.7.5	<i>Anwendungsprobleme und Lösungen</i>	80
6.7.6	<i>Auszug aus Heft 415 des DAfStb, Beuth Verlag, Berlin, 1990</i>	81
6.8	GRENZDEHNUNGEN, HINWEISE ZU VERSCHIEDENEN NORMUNGEN	84
6.9	STAHLBETON NACH DIN 1045, AUSGABE 1988 (ALTE NORMUNG)	85
6.9.1	<i>Baustoffe nach DIN 1045, Ausgabe 1988</i>	85
6.9.2	<i>Sicherheitskonzept nach DIN 1045, Ausgabe 1988</i>	86
6.9.3	<i>Berechnung nach DIN 1045 (88)</i>	86
6.9.4	<i>Vergleichsrechnungen mit Interaktions-Diagrammen (z.B. aus Schneider-Bautabellen, 12. Ausgabe)</i>	87
6.10	UMRECHNUNG DIN 1045 (AUSGABE 88) UND AKTUELLER EC2	89
6.11	BAUSTOFFE AUS DER DIN 1045 VOR 1972	90
6.12	SCHWINDEN UND KRIECHEN	92
6.12.1	<i>Schwinden des Betons</i>	92
6.12.2	<i>Kriechen des Betons</i>	95
7	RECHENALGORITHMEN	97

7.1	SPANNUNGSINTEGRATION	97
7.2	ITERATIONSVERFAHREN.....	99
7.3	GRENZDEHNUNGEN / DEHNUNGSKENNZIFFERN (DKZ).....	101
7.3.1	<i>Grenzdehnungen</i>	101
7.3.2	<i>DKZ - Dehnungskennziffer</i>	102
8	BEISPIELE	103
8.1	BEISPIEL 1 – EINFACHER RECHTECKQUERSCHNITT	104
8.2	BEISPIEL 2 – SPANNBETONTRÄGER.....	107
8.3	BEISPIEL 3 – NACHTRÄGLICH ERGÄNZTER BRÜCKENQUERSCHNITT	110
8.4	BEISPIEL 4 – VERBUNDTRÄGER.....	115
8.5	BEISPIEL 5 – NACHTRÄGLICH ERGÄNZTER STÜTZENQUERSCHNITT	118
8.6	BEISPIEL 6 – VERFORMUNGSBERECHNUNG EINES EINFELDTRÄGERS	122
8.6.1	<i>System</i>	122
8.6.2	<i>Belastung</i>	122
8.6.3	<i>Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit</i>	123
8.6.4	<i>Verformung im Gebrauchszustand</i>	123
8.6.5	<i>Verformung im Gebrauchszustand mit Schwinden und Kriechen</i>	125
8.7	NICHTLINEARE STÜTZENRECHNUNG MIT INCA2 UND ABAS.....	127
8.7.1	<i>Handrechnung mit dem vereinfachten Modellstützenverfahren</i>	128
8.7.2	<i>Nichtlineare Berechnung mit INCA2 und ABAS</i>	129
8.8	INTERAKTIONSDIAGRAMME N_x / M_y	131
8.8.1	<i>Dimensionsbehaftetes Interaktionsdiagramm</i>	131
8.8.2	<i>Dimensionsloses Interaktionsdiagramm</i>	132
9	SPRACHE	133
10	AUTOREN.....	134
10.1	ENTWICKLUNG	134
10.2	VERTRIEBSFORM DES PROGRAMMS / LIZENZIERUNG.....	135
10.3	HAFTUNGSAUSSCHLUSS	136
10.4	AUTOR	137

1 Einleitung

Dieses Programm dient der interaktiven Berechnung beliebig zusammengesetzter Querschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft; insbesondere Massivbauquerschnitte. Rechengrundlage sind lineare oder nichtlineare Spannungsdehnungsbeziehungen. Vorspannung, Schwinden und Kriechen, die versteifende Mitwirkung des Betons in der gerissenen Zugzone oder nachträglich ergänzte Querschnitte können berücksichtigt werden.

Durch die allgemeine Formulierung der Berechnungsalgorithmen ist es möglich, nicht nur Querschnitte aus Beton und Betonstahl zu berechnen, sondern auch beliebige andere Baustoffe wie zum Beispiel Holz oder Kunststoffe zu benutzen, sofern sich die Baustoffeigenschaften mit den Spannungsdehnungslinien modellieren lassen. Mit welchen Materialgesetzen sich welche Baustoffeigenschaften modellieren lassen, lesen Sie bitte im Hilfe-Punkt Spannungsdehnungslinien / Baustoffeigenschaften nach.

Die Querschnitte können einerseits als Polygon aus geradlinig umrandeten Flächen (z.B. Beton) oder großen Aussparungen in solchen Flächen, andererseits aus punktförmigen Einzelflächen (z.B. Bewehrung) oder kleinen Aussparungen (z.B. Hüllrohren) gebildet werden.

Die Einwirkungen und Schnittgrößen werden wahlweise auf den Betonschwerpunkt, den ideellen Schwerpunkt oder auch jeden anderen beliebigen Punkt bezogen.

Ausführliche Erläuterungen zum grundlegenden Rechenverfahren (Spannungsintegration, Iterationsverfahren) geben Busjaeger, Quast (1990): Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft (Programm MasQue), Heft 415 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln.

2 Ein-/Ausgabe System und Lastfall

2.1 Querschnitts-Datei

Alle Eingabewerte für das Programm INCA2 werden in einer Datei mit der Endung ***.inc** gespeichert. Werden die Daten der aktuellen Datei vom Benutzer geändert, erfolgt beim Öffnen einer neuen Datei oder beim Verlassen des Programms eine Sicherheitsabfrage zum Speichern.



von links nach rechts:

- | | |
|-----------|--|
| Neu | es wird ein leerer Datensatz erstellt; die Baustoffe aus der Datei Standard-Baustoffe.inc werden geladen,
Shortcut: Strg + N |
| Öffnen | ein Dialog zum Öffnen einer INCA2-Datei erscheint,
Shortcut: Strg + O |
| Speichern | ein Dialog zum Speichern einer INCA2-Datei erscheint,
Shortcut: Strg + S |

Außerdem ist im Menü **Datei** der Unterpunkt **Speichern als** verfügbar.

Die Daten in der ***.inc** - Datei sind im binären Format abgespeichert, welches ein schnelles und einfaches Öffnen und Speichern ermöglicht. Um die Daten (wie Koordinaten der Punkte, Polygone, Lastfälle) als Text lesen zu können, wählen Sie bitte den Menüpunkt **Datei** mit dem Unterpunkt **Eingabedaten (num.)**.

Insbesondere für Vorführungszwecke (Vorlesung etc.) ist es sinnvoll, eine Querschnitts-Datei nach getätigten Änderungen schnell wieder in ihrem ursprünglichen Zustand herstellen zu können. Dazu klicken Sie auf den Button **ReLoad**:

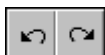


ReLoad möglich



ReLoad nicht möglich (noch keine Änderungen nach letztmaligem Speichern vorgenommen oder Datei wurde nicht gespeichert)

Für das Arbeiten mit INCA2 stehen außerdem eine Rückgängig- sowie eine Wiederherstellen-Funktion zur Verfügung (**Undo** und **Redo**, bis zu 64 mal):



Shortcut für Rückgängig: Strg + Z

2.2 Allgemeine Vorgehensweise zur Querschnittseingabe

Die Eingabe eines Querschnittes erfolgt üblicherweise in folgender Reihenfolge:

1. Definition der Baustoffe (bzw. Nutzung der vordefinierten Baustoffe)
2. Erstellen von Punkten für Polygone
3. Verbinden der Punkte zu einem Polygon, Zuweisung eines Baustoffes
4. Erstellen von Punkten für die Bewehrung, Zuweisen eines Durchmessers und eines Baustoffes
5. Definition eines Lastfalls $N_x / M_y / M_z$
6. Durchführen der Berechnung (Dehnungszustand, Sicherheitsnachweis etc.)

Für das Erstellen der Polygone sowie für das Erstellen von Standardquerschnitten (Rechteck, Kreis, I-Profil, Schleuderbetonstützen) stehen mehrere Assistenten zur Verfügung, die die Eingabe deutlich vereinfachen.

Zur Generierung eines neuen Querschnitts stehen folgende Funktionen zur Verfügung:



von links nach rechts:

- neuer Punkt
- neue Punkte in einer Liste
- Polygon erzeugen
- Rechteck erzeugen
- Kreis erzeugen

In den jeweiligen Fenstern müssen Sie die Baustoffeigenschaften für den Beton und für die Bewehrung auswählen.

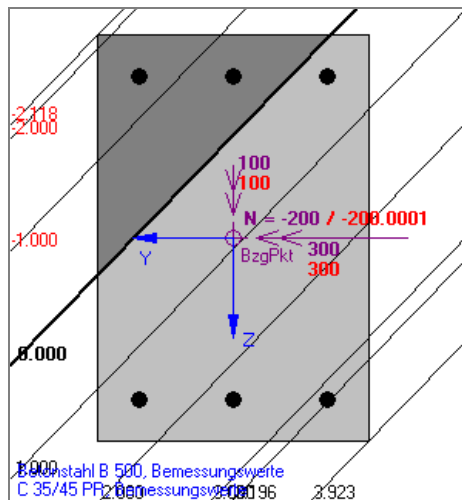
Im Unterpunkt Systeminfo können Sie einen Titel eingeben. Dort erhalten Sie auch Informationen über Ihren Querschnitt, wie Anzahl der Punkte oder benutzter Baustoffe.

Bei der Erstellung müssen Sie darauf achten, dass Ihr Querschnitt mindestens einen Bewehrungsstab (oder Polygon) mit zugfestem Baustoff enthält, andernfalls ist eine Berechnung nicht möglich. Im Abschnitt Spannungsdehnungslinien finden Sie weitere Erläuterungen.

Koordinatensystem

Das Koordinatensystem ist wie folgt definiert:

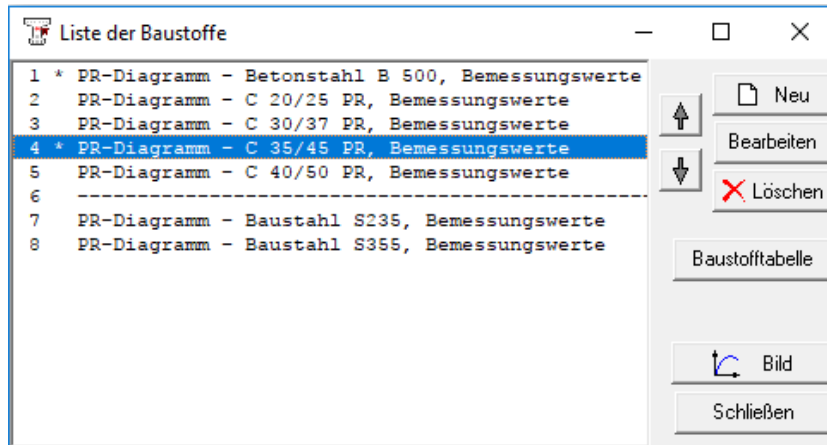
- Y-Achse nach links, z-Achse nach unten
- Winkel bei der Rotation ist mathematisch positiv definiert (Gegenuhrzeigersinn)
- Druckkräfte N_x sind negativ, Zugkräfte N_x sind positiv
- Positives Biegemoment M_y dreht um die y-Achse und erzeugt auf der Oberseite Druck, auf der Unterseite Zug
- Positives Biegemoment M_z dreht um die z-Achse und erzeugt auf der linken Seite Druck, auf der rechten Seite Zug



2.3 Eingabe der Baustoffe

2.3.1 Baustoffliste

Menü **Eingabe**, Unterpunkt **Baustoffe**, eine Liste mit den bisherigen Baustoffen öffnet sich:



Von diesem Fenster aus können Baustoffe neu erzeugt, geändert oder gelöscht werden. In der Liste sind alle bisherigen Baustoffe aufgeführt. Ein Sternchen zu Beginn bedeutet, dass dieser Baustoff benutzt wird, dann folgt die Art des Materialgesetzes, dann der Name.

Die Buttons auf der rechten Seite haben folgende Funktionen:

- Die Buttons mit den **Pfeilen** dienen dem Sortieren der Materialien. Klicken Sie ein Material an, das jetzt in der Liste nach oben oder nach unten bewegt werden kann.
- Button **Neu** – Ein neues Fenster öffnet sich, in dem ein neuer Baustoff eingegeben werden kann. Näheres zu den einzelnen Materialgesetzen lesen Sie bitte unter Punkt Spannungslinien nach.
- Button **Bearbeiten** – Der in der Liste markierte Baustoff kann in einem neuen Fenster bearbeitet werden.
- Button **Löschen** – Alle markierten Baustoffe werden gelöscht. Werden die zu löschenden Baustoffe zurzeit im Querschnitt benutzt, so erfolgt vor dem Löschen eine Sicherheitsabfrage. Die Baustoffe können zwar gelöscht werden, jedoch muss vor der Berechnung des Querschnitts ein neuer Baustoff dem Polygon oder der Bewehrung zugewiesen werden.
- Button **Baustofftabelle** – In einem neuen Fenster werden vordefinierte Baustoffe angezeigt, die in der Datei **Baustoffe.inc** abgespeichert sind. Dort können Baustoffe ausgewählt und in die aktuelle INCA2-Datei übernommen werden. Diese Datei **Baustoffe.inc** kann durch den Benutzer normal in INCA2 geöffnet und angepasst werden.
- Button **Bild** – Gibt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der markierten Baustoffe in einem neuen Fenster aus. Der Wertebereich für die Darstellung (min und max ϵ) ergibt sich aus den gewählten Grenzdehnungen für den Querschnitt.
- Button **Schließen** – Schließt das Fenster mit der Baustoff-Liste.

2.3.2 Materialgesetze

Für die Neudefinition eines Baustoffes oder für die Bearbeitung eines vorhandenen Baustoffes stehen folgende Spannungs-Dehnungs-Linien (Materialgesetze) zur Verfügung, die über den Karteikartenreiter ausgewählt werden:

1. Linear-Elastisch
2. Parabel-Rechteck
3. Parabel-ähnliche Funktion gemäß EC2 für Verformungsberechnungen
4. Polygon / Spline

Beispiel für einen Beton C40/50, Bemessungswerte, mit dem Parabel-Rechteck-Diagramm:

Definition Baustoffeigenschaften

Bezeichnung: (Parabel-Rechteck)
C 35/45 PR, Bemessungswerte

☐ Stahl
☒ Beton

Lin-Elast. Parabel-Recht. Parabel (EC2) Polygon / Spline

Vereinfachte Parabel nach DIN 1045 (neu), zweiter Abschnitt waagrecht oder linear veränderlich

Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone nach QUASt

☒ Vereinfachte Definition

Spannung bei Erreichen der Fließgrenze in N/mm²: -19.8333

Dehnung bei Erreichen der Fließgrenze in mm/m: -2

Exponent k (bestimmt die Völligkeit der Parabel): 2

E-Modul im KS-Ursprung in [N/mm²]: 19833

Spannung Sigma.2: -19.8333

Dehnung eps.2: -7

E-Modul im 2. Abschnitt in [N/mm²]: 0

Druck: -19.8333

Zug: 0

Wertetabelle

Bild

OK

Abbrechen

Mitwirkung des Betons auf Zug

Erläuterungen zu den verschiedenen Materialgesetzen, den jeweiligen Anwendungsgebieten, Vor- und Nachteilen werden in Kapitel **6 Modellierung der Baustoffe** gegeben. Da es erfahrungsgemäß bei der korrekten Wahl der Baustoffe die meisten Anwendungsfehler in INCA2 gibt, werden die Nutzer gebeten, dieses Kapitel sorgfältig zu lesen.

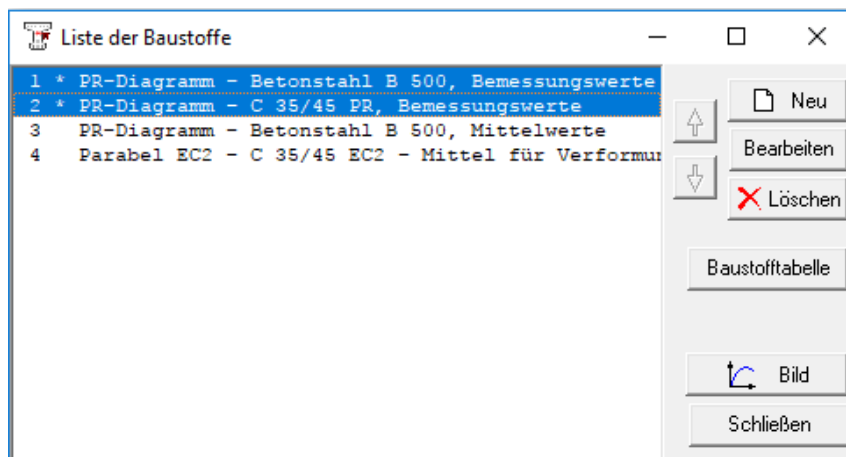
2.3.3 Wechsel zwischen Bemessungswerten und Mittelwerten

Besonders bei nichtlinearen Berechnungen zur Ermittlung der Verformung oder der Schnittgrößen ist es wichtig, zur Verformungsberechnung die Mittelwerte der Baustoffeigenschaften zu benutzen, bei der Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit jedoch die Bemessungswerte. Je nach Berechnungswunsch müssen damit die Eigenschaften für den Beton und für die Bewehrung jeweils geändert werden.

Um die vorgenannten Berechnungen durchzuführen, wird man in den meisten Fällen zwei Baustoffe für den Beton und zwei Baustoffe für die Bewehrung in der INCA2-Datei benutzen. Um den angesprochenen Wechsel zwischen den Baustoffeigenschaften möglichst einfach durchzuführen, genügt ein Klick auf den Button



in der rechten, oberen Ecke des Hauptfensters von INCA2. Dazu müssen die Baustoffe in der Tabelle jedoch in Gruppen sortiert und wie in folgendem Fenster zu sehen angeordnet sein.



Wie zu sehen ist, sind die Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften in erster und zweiter Position, die Mittelwerte in dritter und vierter Position angeordnet. Das Sternchen vor dem Namen kennzeichnet, ob der Baustoff aktuell benutzt wird. Mit dem Klick auf den „Wechselbutton“ im Hauptfenster von INCA2 wird die Eigenschaft des Betonquerschnitts von den Bemessungswerten auf die Mittelwerte gesetzt (aus Nr. 2 wird Nr. 4), das gleiche gilt für die Bewehrung (aus Nr. 1 wird Nr. 3).

2.4 Eingabe von Punkten für Polygone oder als Bewehrung

Über das Menü *Eingabe*, Unterpunkt *Punkt*, oder



2.4.1 Variante 1: Einzelne Punkte

- Knotennummer - wird automatisch vorgegeben
- Knotenkoordinaten y und z eingeben
- Auswahl, ob es sich um einen Polygonpunkt oder um einen Bewehrungsstab handelt

Falls Bewehrung:

- Wahl der Bewehrungsgruppe
Die Bewehrung wird in Gruppen zusammengefasst, die jeweils eine Baustoffeigenschaft und ggfs. Vordehnung aufweisen. Dadurch kann später beispielsweise die Bemessung nur für Gruppe 2 durchgeführt werden. Außerdem ist das Bearbeiten leichter, da z.B. alle Stäbe einer Bewehrungsgruppe gemeinsam selektiert werden können.
- Wahl eines Baustoffes
- Vordehnung / Vorkrümmung in einem extra Fenster eingeben (z.B. Vorspannung eines Spannstahls)
- Durchmesser (oder Querschnittsfläche)
- OK – Knoten wird erzeugt und Fenster geschlossen
- Anwenden – Knoten wird erzeugt, Fenster bleibt für Eingabe des nächsten Knotens geöffnet
- Punkte mit der Maus erzeugen
 - Eingabemaske schließt sich,
 - mit der linken Maustaste Knoten erzeugen
 - mit der rechten Maustaste zurück zur Eingabemaske

Zur **Vorspannung eines Spannstahls** lesen Sie bitte in Kapitel 8.2 die Hinweise zur Modellierung für „Vorspannung im Spannbett“ und „Vorspannen mit nachträgliches Verbund“. In Abhängigkeit der Art der Vorspannung ist eine etwas andere Vordehnung für den Spannstahl zu definieren.

2.4.2 Variante 2: Punkte als Liste

Hier können Sie mehrere Punkte gleichzeitig durch Eingabe als freie Tabelle (wie im folgenden Bild gezeigt) oder in Feldern erzeugen. Außerdem haben Sie die Möglichkeit, diese Punkte sofort zu einem Polygon zusammenzufassen.

Punkte in einer Liste erzeugen

Knotenkoordinaten (y / z) in [m]

Freie Tabelle | Tabelle mit Feldern

y/z-Werte mit Trennzeichen (kein Komma), ein Wertepaar pro Zeile

0.5	-0.4
0.5	-0.275
0.075	-0.25
0.075	0.3
0.175	0.4
0.175	0.5
-0.175	0.5
-0.175	0.4
-0.075	0.3
-0.075	-0.25
-0.5	-0.275
-0.5	-0.4

Art der Punkte
☐ Polygonepunkte ☐ Bewehrungspkt.
☒ Neues Polygon

Polygontyp
☒ Querschnitt ☐ Aussparung

Bewehrungsgruppe

Baustoff
 3 - C 30/37 PR, Bemessung

Vordehnung / Vorkrümmung

Bewehrungsquerschnitt
 Durchmesser [mm] oder
 Fläche [cm²]

Bei der Eingabe der Bewehrung können Sie entweder den Durchmesser oder die Querschnittsfläche eingeben. Zur Erleichterung der Eingabe stehen jeweils kleine Scrollleisten zur Verfügung. Falls Sie hier jedoch negative Querschnittsflächen für eine Aussparung (z.B. Hüllrohr für Spannglieder) eingeben möchten, müssen Sie die Querschnittsfläche manuell eingeben.

Mit der Wahl der Bewehrungsgruppe fassen Sie die einzelnen Stäbe zu einer Gruppe zusammen, der ein Material und gegebenenfalls eine Vordehnung/Vorkrümmung zugeordnet wird. Vorzugsweise wird z.B. Zugbewehrung, Druckbewehrung und konstruktive Bewehrung in jeweils einer Gruppe zusammengefasst. Bei der Bemessung des Querschnitts für eine Belastung kann dann z.B. nur die Zugbewehrung angepasst werden, die konstruktive Bewehrung bleibt konstant.


Unterhalb eines definierten Bewehrungspunktes befindet sich im Normalfall noch der Beton. Im Menü unter **Extras** => **Einstellungen** => Karteikartenreiter **Ergebnisse** kann gewählt werden, ob dieser Betonanteil berücksichtigt oder abgezogen werden soll. Um ein Rechenergebnis per Handrechnung zu überprüfen, kann es sinnvoll sein, mit der Brutto-Betonfläche zu rechnen (keine Aussparung). Insbesondere für höher bewehrte Querschnitte mit hochfestem Beton sollten die Aussparungen für die Bewehrung jedoch nicht mehr vernachlässigt und eine Rechnung mit der Nettobetonfläche durchgeführt werden. Bei hochbewehrten Stützen mit hochfesten Betonen kann die Tragfähigkeit ansonsten schnell um 10% und mehr überschätzt werden.

Bei der Ausgabe der detaillierten numerischen Ergebnisse werden die Bewehrungspunkte mit einem Sternchen (*) markiert ausgegeben, bei denen eine Aussparung berücksichtigt wurde.

Werden gewollt oder versehentlich zwei Punkte mit den gleichen Koordinaten definiert, so erfolgt eine Warnung mit der Option, den Punkt nicht oder trotzdem zu erzeugen (sinnvoll z.B. bei Hüllrohr mit innenliegenden Spanngliedern). In der grafischen Ausgabe auf dem Bildschirm ist es relativ schwer zu erkennen, ob zwei oder mehrere Punkte übereinander liegen. Erst in der numerischen Ausgabe sind solche Punkte zu erkennen.

Es können beliebig viele Punkte erzeugt werden.

2.4.3 Vorhandenen Punkt ändern

- Punkt markieren (wird dann rot)
- Menü **Bearbeiten**, Unterpunkt **Eigenschaften**, oder Tastenkombination **Alt+Enter**, oder Doppelklick auf das Element, oder Button 
- Eingabemaske öffnet sich (Koordinaten, Querschnittsfläche)
- Änderungen vornehmen und bestätigen

Vorhandenen Punkt löschen

- einen oder mehrere Punkte mit der Maus selektieren
- Entf-Taste drücken, oder Menü **Bearbeiten**, Unterpunkt **Löschen**

Mehrfachselektion - Hinweis

Wollen Sie mehrere Punkte gleichzeitig ändern, können Sie diese durch das Ziehen eines Fensters gemeinsam selektieren oder durch einfaches Anklicken mit der linken Maustaste bei gleichzeitig gedrückter Strg-Taste markieren (wie in anderen Windows-Programmen auch). Wenn Sie jetzt nach einer Mehrfachselektion den Button für die Eigenschaften wählen, werden nur die Felder mit Werten belegt, bei denen die Punkte die gleiche Eigenschaft aufweisen.

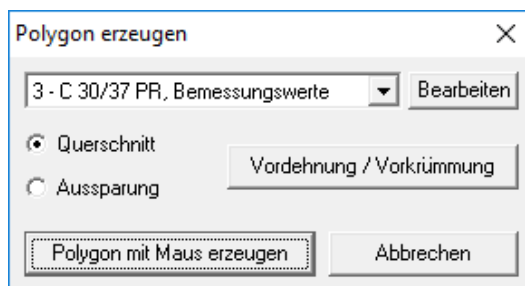
2.5 Eingabe von Betonflächen (Polygonen)

Im Menü **Eingabe** stehen Ihnen mehrere Möglichkeiten zur Erzeugung von Betonflächen bzw. allgemein Polygonen zur Verfügung:

1. Polygon erzeugen
2. Punkte erzeugen und zu einem Polygon zusammenfassen
3. Rechteck
4. Kreis
5. Vordefinierte Querschnitte
6. Schleuderbetonstützen

2.5.1 Polygon

Mit dieser Eingabevariante erzeugen Sie durch Verbinden von vorher definierten Punkten einen beliebigen Querschnitt. Dieser muss aus mindestens 3 und darf maximal aus 100 Punkten bestehen. Im Menü **Eingabe**, Unterpunkt **Polygon**, öffnet sich folgendes Fenster:

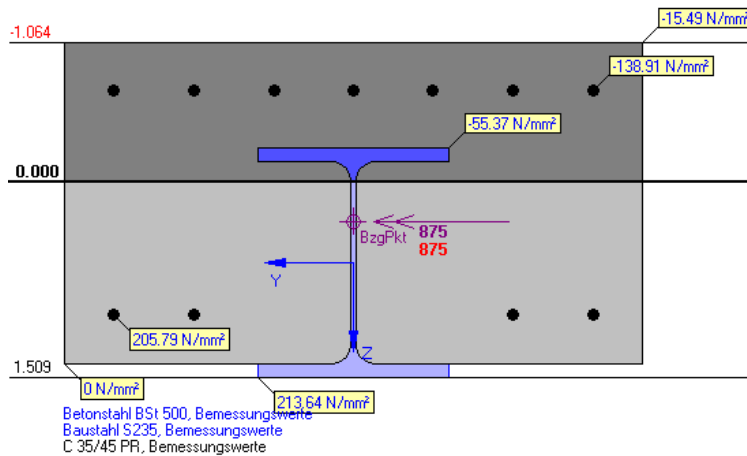


- Material aus der Klapp-Box auswählen (falls noch kein Material definiert wurde, muss es erst erzeugt werden)
- Querschnitt oder Aussparung wählen
- Vordehnung / Vorkrümmung eingeben (z.B. für nachträglich ergänzte Querschnittsbereiche, Fertigteile mit Ortbetonerfüllung, Preflexträger etc.)
- Button **Polygon mit Maus erzeugen** wählen, Eingabemaske schließt sich
- Punkte per Mausklick verbinden, zum Schließen des Polygons wieder den ersten Punkt anklicken
- rechte Maustaste, um die Eingabe abubrechen und zur Eingabemaske zurückzukehren

Achtung: Es können maximal 100 Punkte zu einem Polygon zusammengefasst werden! Polygone mit positivem Flächeninhalt werden hellgrau dargestellt, Ausschnitte in Betonflächen in weiß (ohne Schraffur). Es können beliebig viele Polygone erzeugt werden.

Darstellung von Polygonen

Bei der Darstellung der Polygone wird zwischen Beton (grau) und Stahl (blau) unterschieden. Nach einer Dehnungsberechnung wird die Druckzone (in nachfolgendem Beispiel auf der Oberseite) jeweils dunkler dargestellt.



Vorhandenes Polygon ändern

Polygon markieren und den Button Eigenschaften wählen (bzw. im Menü Bearbeiten oder Alt+Enter). In diesem Fenster können Sie die Eigenschaften des Polygons ändern.

Das Fenster 'Polygon Nr.: 5' zeigt die Eigenschaften des Polygons. Die Materialauswahl ist auf '2 - C45/55, Bemessungswerte' gesetzt. Die Option 'Baustoff bearbeiten' ist aktiv. Die Option 'Querschnitt' ist ausgewählt. Die Option 'Aussparung' ist deaktiviert. Die Option 'Vordehnung / Vorkrümmung' ist deaktiviert. Die Option 'Details' ist deaktiviert. Die Option 'OK' ist aktiv. Die Option 'Abbrechen' ist deaktiviert.

Nach Klick auf den Button Details erweitert sich das Fenster. Werden die Eigenschaften von mehreren Polygonen angezeigt, so werden unter Details die Querschnittswerte der markierten Polygonflächen ausgegeben.

Das erweiterte Fenster 'Polygone 3, 4' zeigt die Eigenschaften der markierten Polygone. Die Materialauswahl ist auf '2 - C45/55, Bemessungswerte' gesetzt. Die Option 'Baustoff bearbeiten' ist aktiv. Die Option 'Querschnitt' ist deaktiviert. Die Option 'Aussparung' ist ausgewählt. Die Option 'Vordehnung / Vorkrümmung' ist deaktiviert. Die Option 'Details' ist aktiv. Die Option 'OK' ist aktiv. Die Option 'Abbrechen' ist deaktiviert.

Resultierende geometrische Querschnittswerte

Querschnittsfläche $A = -0.09457 \text{ m}^2$

Schwerpunkt $Y / Z = 0.28101 / 0.00028 \text{ [m]}$

$I_{yy} = -0.00037995 \text{ m}^4$ $\alpha = -0.2^\circ$

$I_{zz} = -0.00220509 \text{ m}^4$ $I_1 = -0.00037993 \text{ m}^4$

$I_{yz} = 0.00000637 \text{ m}^4$ $I_2 = -0.00220511 \text{ m}^4$

Werden die Eigenschaften von nur einem Polygon angezeigt, so können zusätzlich die Polygonpunkte editiert, neue hinzugefügt oder Punkte aus dem Polygon entfernt werden.

Polygon Nr.: 5

2 - C45/55, Bemessungswerte Baustoff bearbeiten

☒ Querschnitt ☐ Aussparung Vordehnung / Vorkrümmung

△ Details

Resultierende geometrische Querschnittswerte

Querschnittsfläche $A = 0,37223 \text{ m}^2$
 Schwerpunkt $Y / Z = -0,00000 / 0,00073 \text{ [m]}$

$I_{yy} = 0,00319012 \text{ m}^4$ $\alpha = 0^\circ$
 $I_{zz} = 0,04199035 \text{ m}^4$ $I_1 = 0,04199035 \text{ m}^4$
 $I_{yz} = 0,0 \text{ m}^4$ $I_2 = 0,00319012 \text{ m}^4$

Koordinaten der Polygonpunkte

Nr.	Pkt.	y [m]	z [m]
1	195	0.57	-0.16
2	194	0.58	-0.15
3	185	0.58	-0.12
4	184	0.57	-0.11
5	183	0.57	-0.1
6	182	0.58	-0.09
7	181	0.58	0.11
8	180	0.6005	0.13

neu neu
y z
neu neu

Del

Copy

OK Abbrechen

Weiterhin haben Sie auch in der grafischen Oberfläche die Möglichkeit, Punkte zum Polygon hinzuzufügen. Markieren Sie dazu das gewünschte Polygon (ist dann rot umrandet). Gehen Sie jetzt mit der Maus an die gewünschte Stelle, wo ein weiterer Punkt im Polygon eingefügt werden soll. Nach Klick auf die rechte Maustaste öffnet sich ein Pull-Down-Menü, in dem Sie den zweiten Punkt **Punkt einfügen** wählen. Haben Sie bei den Einstellungen das Raster aktiviert, wird der neue Punkt bei den nächsten „runden“ Raster-Koordinaten erzeugt.

Vorhandenes Polygon löschen

Polygon markieren und **Entf**-Taste drücken (bzw. im Menü **Bearbeiten**, Unterpunkt **Löschen**).

2.5.2 Polygon als Liste von Punkten

Siehe Kapitel **2.4.2 Variante 2: Punkte als Liste**.

2.5.3 Eingabe Rechteck

Menü **Eingabe**, Unterpunkt **Rechteck**, folgendes Fenster öffnet sich:

Das Rechteck definieren Sie durch die Eingabe der Koordinaten von zwei gegenüberliegenden Ecken. Baustoff und Vordehnung / Vorkrümmung können gewählt werden. Anschließend bestimmen Sie, ob es sich um einen Querschnitt, eine Aussparung oder um 4 Bewehrungspunkte handelt. Bei letzterem geben Sie bitte auch noch Durchmesser und Gruppe der Bewehrung an.

Falls Sie die Koordinaten nicht numerisch angeben wollen, haben Sie mit dem Button **Rechteck mit Maus** die Möglichkeit, das Rechteck direkt auf der Zeichenfläche zu erstellen.

2.5.4 Eingabe Kreis

Menü **Eingabe**, Unterpunkt **Kreis**, folgendes Fenster öffnet sich:

Einen Kreis definieren Sie durch Angabe des Mittelpunktes und des Radius. Da der Kreis als Polygon abgebildet wird, ergeben viele Stützpunkte auch eine hohe Genauigkeit, erhöhen aber auch die Rechenzeit. Um ein voll symmetrisches Polygon zu erhalten, sollte die Anzahl der Punkte immer durch 4 teilbar sein.

Wollen Sie einen Querschnitt oder Aussparung erzeugen, so empfiehlt sich die Abbildung als "**Flächengleiches Polygon**". Der Flächeninhalt des Kreises mit dem gewählten Durchmesser und der Flächeninhalt des Polygons stimmen genau überein, die einzelnen Randpunkte liegen aus diesem Grund geringfügig außerhalb des Kreises.

Wollen Sie jedoch einzelne Bewehrungspunkte erzeugen, benutzen Sie bitte die Option "**Einbeschriebenes Polygon**", die Punkte werden in diesem Fall genau auf dem Kreisrand erzeugt.

Falls Sie die Koordinaten und den Radius nicht numerisch angeben wollen, haben Sie mit dem Button "**Kreis mit Maus**" die Möglichkeit, den Kreis direkt auf der Zeichenfläche zu erstellen.

2.5.5 Assistenten für komplette Querschnitte

Menü **Eingabe**, Unterpunkt **Komplette Querschnitte**, folgendes Fenster öffnet sich:

The image shows two screenshots of the "Definition kompletter Querschnitte" dialog box. The left screenshot shows the "I-Profil" tab with the following settings: Profiltyp und Größe: HEB 400; Abmessungen [mm]: Breite x Höhe = 300 x 400; Position Schwerpunkt (y / z): 0,00 0,00; Baustoff: Baustahl S235, Design, gamma = 1,0. The right screenshot shows the "Rechteck" tab with the following settings: Material Beton: C 35/45 PR, Bemessungswerte; Material Stahl: Betonstahl B 500, Bemessungswerte; Breite b = 0,3 [m]; Höhe h = 0,6 [m]; d_{1,2} = 0,065 [m]; Bewehrung verschmiert: A_{s,tot} [cm²]; Bewehrungsdurchmesser: 25 [mm] Anzahl: 6. Both windows have "OK" and "Abbrechen" buttons.

In diesem Fenster können Sie verschiedene Stahlbauprofile bis hin zu Rechteck- und Kreisquerschnitten schnell und einfach erstellen.

I-Profil

Wählen Sie den gewünschten Profiltyp und Größe sowie die anderen Eingabewerte. Die Profildaten befinden sich in der Datei **Profile.txt**, die zwar geändert, jedoch nicht erweitert werden kann.

Rechteck R1-R2-R4

Hier wird ein Rechteckquerschnitt mit jeweils verschmierter Bewehrung erstellt. Die Bewehrungsmengen und Randabstände für die einzelnen Lagen können getrennt angegeben werden (insofern bezieht sich die Bezeichnung R2 und R4 nur auf die Lage der Bewehrung und ist damit nicht ganz korrekt). Die hier erzeugte verschmierte Bewehrung besteht aus jeweils 10 einzelnen Punkten pro Lage, die genau so angeordnet sind, dass Querschnittsfläche und Trägheitsmoment gleich dem eines äquivalenten Rechteckquerschnitts aus Bewehrung sind.

Stütze (R2-R4)

Handelt es sich um symmetrische Bewehrung (z.B. Stützen), ist diese Variante zu bevorzugen. Außerdem ist es hier möglich, die Anzahl sowie den Durchmesser der Bewehrungsstäbe festzulegen.

Kreis (Kreisring)

Mit diesem Punkt erzeugen Sie einen Kreisquerschnitt, wahlweise einen Kreisringquerschnitt. Der Querschnitt wird als flächengleiches Polygon mit 32 Punkten definiert. Die Bewehrung kann als Gesamtfläche oder per Durchmesser gewählt werden.

Rechteck

Mit diesem Punkt erzeugen Sie Rechteck- bzw. Quadrat-Hohlprofile. Die Ausrundung der Ecken bei typischen Stahl-Hohlprofilen wird durch das Programm und nach Benutzervorgabe berücksichtigt.

Sicherheitsabfrage doppelte Querschnitte / Polygone

Bei Definition der neuen Querschnitte (Polygone) wird geprüft, ob sich an gleicher Stelle bereits ein gleiches Polygon befindet. Wenn dies der Fall ist, erfolgt die Abfrage, ob trotzdem ein neuer Querschnitt (Polygon) erzeugt werden soll. Damit wird verhindert, dass durch den Benutzer versehentlich mehrere Querschnitte an gleicher Stelle erzeugt werden, was optisch in der grafischen Darstellung später nicht mehr nachvollzogen werden kann.

2.5.6 Assistent für Schleuderbetonstützen

Menü **Eingabe**, Unterpunkt **Schleuderbetonstützen**, folgendes Fenster öffnet sich:

Assistent für Schleuderbetonstützen

Betonquerschnitt

Material Beton: C45/55, Bemessungswerte

Außendurchmesser D.a = 1,0 m

Innendurchmesser D.i = 0,6 m

Anzahl Polygonpunkte = 32

Betonfläche A.c = 0.5027 m² Wanddicke t = 0.200 m

Trägheitsmoment I = 0.042726 m⁴ Gewicht g = 12.566 kN/m

Widerstandsmoment W = 0.08545 m³

Bewehrung

Bewehrungsgruppe 1		Bewehrungsgruppe 2		Bewehrungsgruppe 3	
Material Bewehrung	Betonstahl B 500, Bemessungswerte	Spannstahl 1550/1770		Betonstahl B 500, Bemessungswerte	
Durchmesser / Anzahl	D = 8 mm 12	D = 13,82 mm 24		D = 20 mm 12	
	A.s.ges = 12 x 0.50 cm² = 6.03 cm²	A.s.ges = 24 x 1.50 cm² = 36.00 cm²		A.s.ges = 12 x 3.14 cm² = 37.70 cm²	
Randabstand d.1 =	d.1 = 0.045 m	d.1 = 0.065 m		d.1 = 0.085 m	
Vorspannung eps.v =	eps.v = mm/m	eps.v = 5 mm/m		eps.v = mm/m	

☐ Für Berechnung mit Stab2D-NL mit vereinfachter Geometrie erzeugen

Querschnitt Erzeugen **Abbrechen**

In diesem Fenster können Sie Schleuderbetonstützen schnell und einfach erstellen. Eingabewerte sind:

- Außen- und Innendurchmesser
- Angaben für bis zu 3 verschiedene Bewehrungstypen in 3 Lagen, inkl. Angabe der Vorspannung bei Spannstahl

In der Grafik werden die 3 Bewehrungsgruppen in jeweils 3 unterschiedlichen Farben dargestellt.

Wird der Schleuderbeton-Querschnitt über den Button **Querschnitt Erzeugen** neu erzeugt, werden bereits vorhandene Polygone oder Bewehrungspunkte gelöscht.

2.6 Lastfall-Eingabe

Menü **Eingabe**, Unterpunkt **Einwirkungen**, folgende Eingabemaske öffnet sich:

Wählen Sie hier die Nummer des Lastfalls aus und tragen die Werte der Einwirkungen (Normalkraft N_x , Moment M_y und M_z) ein. Wählen Sie den Punkt, auf den die Schnittgrößen bezogen werden sollen (nur bei Normalkraft wichtig). Drucknormalkräfte werden negativ definiert, Zugkräfte sind positiv.

Bezüglich des Sicherheitskonzeptes geben Sie die Schnittgrößen in INCA2 bitte wie folgt ein:

- Grenzzustand der Tragfähigkeit – Schnittgrößen als Bemessungswerte (N_{xd} , M_{yd} , M_{zd}), also inkl. der entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte und ggfs. inkl. Kombinationsbeiwerte
- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – Schnittgrößen als charakteristische Werte (N_{xk} , M_{yk} , M_{zk}), ggfs. inkl. Kombinationsbeiwerte

Grundlegend werden in INCA2 keine programminternen (zusätzlichen) Sicherheits- oder Kombinationsbeiwerte berücksichtigt.

Haben Sie als Bezugspunkt einen beliebigen Punkt des Koordinatensystems ausgewählt, so ist es später möglich, diesen Bezugspunkt mit der Maus per „Drag and Drop“ einfach zu verschieben. Dies ist insbesondere bei Vorführungen nützlich, um die Exzentrizität einer Normalkraft und die daraus folgenden Änderungen der inneren Schnittgrößen oder Verkrümmungen zu erläutern. Auf diese Weise lassen sich z.B. einzelne Punkte der Moment/Verkrümmungsbeziehung berechnen:

$$M = e \cdot N \quad \text{und} \quad 1 / r = \Delta \varepsilon / \Delta z \quad (\text{aus den numerischen Ergebnissen}).$$

Den Bezugspunkt können Sie verschieben, indem Sie den Punkt **Schieben (Einzel)** wählen, es darf also nichts weiter markiert sein.

Bei Wahl des ideellen Schwerpunktes als Bezugspunkt erhalten Sie ein entsprechendes Ergebnis, je nachdem ob Sie im Menüpunkt **Extras** => Unterpunkt **Einstellungen** => Karteikartenreiter **Ergebnisse** den Punkt markiert haben, dass Aussparungen im Beton hinter der Bewehrung berücksichtigt werden sollen oder nicht (**Brutto / Nettofläche des Betons**)

2.7 Grenzdehnung / Parameter

Menü **Eingabe**, Unterpunkt **Grenzdehnungen / Parameter**, folgendes Fenster öffnet sich:

The dialog box 'Berechnungs-Parameter' is divided into several sections:

- Beton - Grenzdehnungen [mm/m]:**
 - max. Druckdehng. ϵ_{cu} : -3,5
 - max. Druck zentr. $\epsilon_{cu,z}$: -2,0
 - ☐ max. Zugdehnung: 100,0
- Stahl - Grenzdehnungen [mm/m]:**
 - max. Druckdehnung: -5,0
 - max. Zugdehnung ϵ_{su} : 25,0
- Dehnungen setzen für Normung nach:**
 - alte DIN 1045 (88)
 - EC 2, aktuell (selected)
- Bewehrungsverhältnis:**
 - min. [%]: 0,1
 - max. [%]: 25
- Iterationen:**
 - max. Anzahl Iterationen: 50 (with up/down arrows)
- Buttons:** Als Standard, OK, Abbrechen

In diesem Fenster können Sie die Grenzdehnungen des Querschnitts festlegen, die für die Berechnung der maximalen Beanspruchbarkeit benötigt werden. Es besteht die Möglichkeit, entsprechend den Normungen vordefinierte Grenzdehnungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit zu benutzen oder die Dehnungen selber frei festzulegen.

Es müssen sowohl Dehnungen für den Beton als auch für den Stahl festgelegt werden. Die Zugdehnung beim Beton ist eher von untergeordneter Bedeutung und sollte möglichst so festgelegt werden, dass dieser Wert nie maßgebend wird. Nur im Fall eines Querschnittes, bei dem die Bewehrung genau auf dem Rand liegt, verhindert diese Eingabe einen unmöglichen Dehnungszustand (Verkrümmung unendlich). Für weitere Informationen lesen Sie bitte auch den [Hilfepunkt 6.8](#).

Im unteren Bereich des Fensters haben Sie die Möglichkeit, das Bewehrungsverhältnis und die Anzahl der Iterationen bei einer Querschnittsberechnung einzugeben.

Bei normalen, einfachen Querschnitten genügen häufig 5 bis 7 Iterationen für ein konvergentes Ergebnis. Im Fall von nachträglich ergänzten Querschnitten sind aber auch schnell mehr Berechnungen nötig. Die Anzahl der Iterationen sollte deshalb größer als 30 sein. Wenn jedoch nach 50 bis 100 Iterationen immer noch kein Gleichgewicht erreicht ist, dann wird es wahrscheinlich auch kein stabiles Ergebnis mehr geben. 100 ist also eine sinnvolle Begrenzung nach oben, der Wert 50 hat sich für die meisten Fälle als ausreichend erwiesen.

Das Bewehrungsverhältnis ist für die Bemessung eines Querschnitts wichtig und verhindert eine Über- bzw. Unterbewehrung. Diese Werte werden bei der Bemessung als Startwerte für die Iteration benutzt. Es wird kontrolliert, ob die Sicherheit für das minimale Bewehrungsverhältnis bereits gegeben ist oder ob selbst mit dem maximalen Bewehrungsverhältnis keine Sicherheit erreicht werden kann.

Anmerkung für vorgespannte Querschnitte:

Mit der erläuterten Vorgehensweise kann es passieren, dass bei der Bemessung einer vorgespannten Bewehrung die Meldung einer nicht ausreichenden Tragfähigkeit erscheint. Für den Fall des maximalen Bewehrungsverhältnisses war der Querschnitt damit so stark vorgespannt, dass die Vorspannung den Betonquerschnitt überlastet hat. In so einem Fall kann es sinnvoll sein, das maximale Bewehrungsverhältnis etwas zu reduzieren.

2.8 Titel/Beschreibung für das System

Im letzten Punkt des Menüs **Eingabe** können Sie einen kurzen Text (maximal 65 Zeichen) für das System eingeben, der z.B. beim Drucken mit ausgegeben wird.

Außerdem finden Sie hier Informationen zur Systemgröße, wie Anzahl Punkte, Querschnitte und Baustoffe.

2.9 Eingabe Vordehnung/Vorkrümmung

Bei der Eingabe von Polygonen oder Bewehrungsstäben ist es auch immer möglich, für das entsprechende Querschnittsteil eine Vordehnung bzw. Vorkrümmung zu definieren.

Anwendungsgebiete einer Vordehnung (Vorspannung):

- Eine Vordehnung ergibt sich zum Beispiel bei Spannbeton. Die Spannung in den Spannstählen kann als äquivalente Vordehnung (hier Zug) auf die Spannlitzen aufgebracht werden.
- Beim Schwinden verkürzt sich der Beton gleichmäßig, wird jedoch durch die Bewehrung daran gehindert. Im Beton baut sich somit eine Zugspannung auf, in der Bewehrung eine Druckspannung. Die Modellierung kann damit entweder über eine Zugvordehnung des Betons erfolgen oder über eine Druckvordehnung der Bewehrung.

Anwendungsgebiete einer Vorkrümmung:

Eine Vorkrümmung (+ Vordehnung) ergibt sich z.B. bei nachträglich ergänzten Betonfertigteilen (längere Balken), die ohne Zwischenunterstützung betoniert werden. Durch die Belastung aus Frischbeton biegt sich der Fertigteilbalken durch und erhält bereits eine Belastung, der Frischbeton ist nach dem Erhärten jedoch noch spannungsfrei. Erst durch eine weitere Belastung (Ausbaulasten, Verkehr) beteiligt sich auch dieser neue Beton an dem Abtragen der Lasten.

Die Vordehnung + Vorkrümmung wird als Dehnungsebene in folgendem Fenster eingegeben:

Vordehnung / Vorverkrümmung

$\text{eps}(y,z) = \text{eps.0} + y \cdot k.y + z \cdot k.z$
 $\text{eps}(y,z) = 5 + y \cdot 0 + z \cdot 0$
 [mm/m] [mm/m/m] [mm/m/m]

Punkt zum Testen der Dehnungsebene

$y = 0$ $z = 0$ [m]

eps(y,z) = 5 mm/m

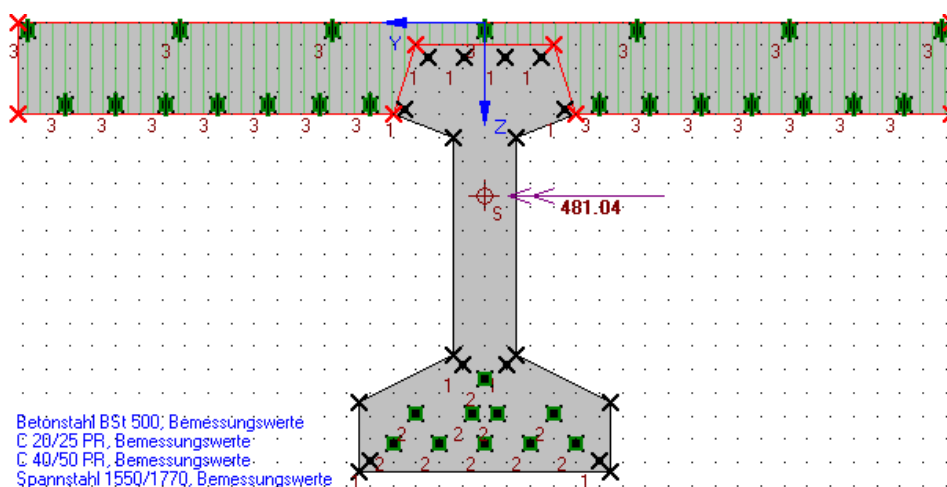
OK Abbrechen

In den oberen drei Textfeldern geben Sie die Dehnungsebene ein, die Sie im Fall eines nachträglich ergänzten Querschnitts aus einer ersten Rechnung des Fertigteils unter Betonierlast erhalten haben. Wichtig dabei ist, dass Sie die Vorzeichen jeweils vertauschen, so dass „aktuelle Dehnungsebene“ + „Dehnungsebene aus Vordehnung“ in der Summe Null ergeben und damit der zusätzliche Beton für diese Belastung spannungsfrei bleibt.

Zur besseren Kontrolle, ob alle Werte korrekt eingegeben wurden, kann ein Punkt testweise eingegeben werden. In dieser Faser wird dann die Dehnung zur Kontrolle berechnet.

Weitere Informationen zur Vordehnung insbesondere bei der Mitwirkung des Betons auf Zug in der gerissenen Betonzugzone finden Sie Kapitel [8.3 Beispiel 3 – Nachträglich ergänzter Brückenquerschnitt](#).

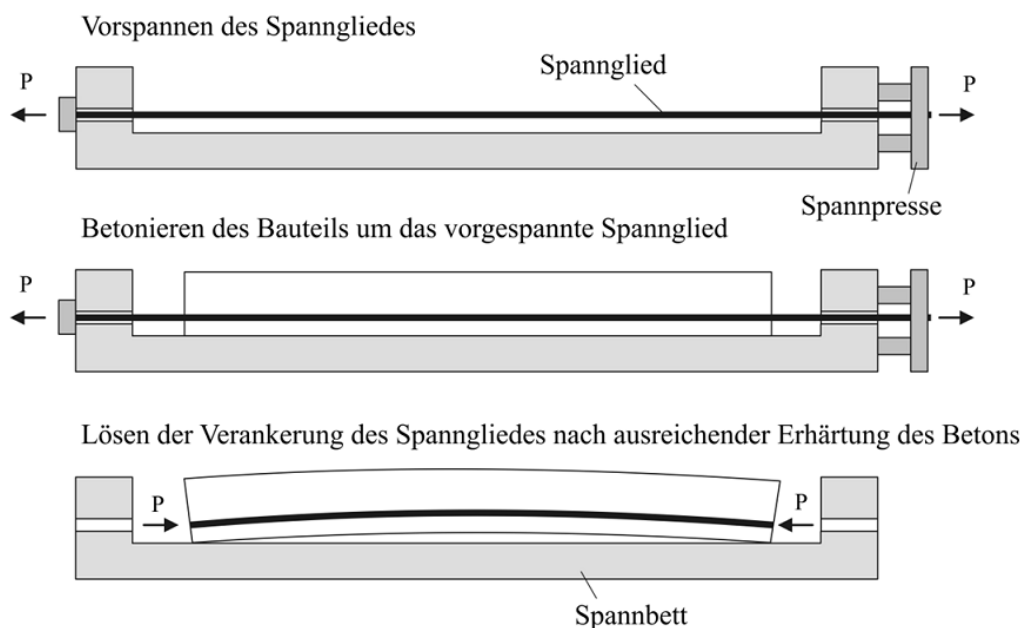
Bei der grafischen Darstellung des Querschnitts werden vorgedehnte Bewehrungspunkte mit einem kleinen, grünen Quadrat gekennzeichnet, Vorkrümmungen mit kleinen Strichen in die entsprechende Richtung. Polygone mit Vordehnung / Vorkrümmung erhalten eine grüne Umrandung sowie eine ebenfalls grüne Schraffur in der jeweiligen Richtung der Verkrümmung.



Hinweise zur Modellierung von Spannstahlbewehrung

Bei der Definition der Spannstahlbewehrung wird eine Vordehnung bspw. von $\varepsilon_p = 5,0 \text{ mm/m}$ eingegeben. Nach der Querschnittsberechnung ohne externe Belastung verringert sich die Dehnung um das Maß der Betonstauchung. Je nach Lage im Querschnitt ergeben sich damit verbleibende Spannstahldehnungen von bspw. $4,7 \text{ mm/m}$. Die Differenz, hier also $5,0 - 4,7 = 0,3 \text{ mm/m}$ ist das Maß, um das der Beton gestaucht wurde. Diese Modelliert entspricht damit exakt der **Vorspannung im Spannbett**. Der Spannstahl wird in einem ersten Schritt im Spannbett eingebaut und vorgespannt, anschließend wird der Beton spannungsfrei eingebaut. Nach dem Erhärten des Betons wird der Spannstahl vom Spannbett getrennt und der Beton wird zusammengedrückt. Dabei verringert sich die ursprüngliche Dehnung des Spannstahls um das Maß der Druckdehnung des Betons.

Vorspannung im Spannbettverfahren



Hinweis für Vorspannung mit nachträglichem Verbund:

Bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund wird durch den Tragwerksplaner eine aufzubringende Vorspannung definiert. Diese Vorspannung wird durch eine Spannpresse auf der Baustelle direkt aufgebracht und der Beton beim Anspannen gleichzeitig gedrückt. Damit entspricht die auf der Baustelle aufgebrachte Vorspannung bereits dem Wert, der sich für den im Gleichgewicht befindlichen Querschnitt ergibt.

In INCA2 muss daher eine Vorspannung definiert werden, die der gewünschten Vorspannung zuzüglich der Betondruckstauchung entspricht. Bei einfachen Querschnitten kann dies grundlegend vorher händisch berechnet werden. Es ist jedoch auch möglich, die Vorspannung iterativ anzupassen, so dass sich nach der Berechnung des Dehnungszustands der gewünschte Wert der Vorspannung ergibt.

Vorspannung für einen Einfeldträger

Für die Bemessung eines vorgespannten Einfeldträgers mit parabelförmigem Spanngliedverlauf ermitteln Sie die Schnittgrößen aus Eigengewicht und Verkehr mit den jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerten. Die aus den Umlenkkraften des Spanngliedes resultierenden Schnittgrößen brauchen nicht ermittelt werden, da die daraus resultierenden Spannungen bereits in der INCA2-Berechnung mit Vorspannung enthalten sind.

Anschließend führen Sie die Querschnittsberechnung mit INCA2 durch und modellieren den Querschnitt mit den Bemessungswerten der Baustoffeigenschaften für den Beton, den Betonstahl und den Spannstahl. Der Spannstahl wird entsprechend vorgedehnt. Die äußeren Schnittgrößen aus Eigengewicht + Verkehr werden aufgebracht und für die verschiedenen Zustände die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt.

Sollen Nachweise im Gebrauchszustand geführt werden, sind beim Beton die „Mittelwerte der Baustoffeigenschaften“ zu wählen, wobei für die vordefinierten Baustoffkennwerte die Zugfestigkeit zu Null zu setzen ist (Berechnung im Riss). Hiermit können dann Nachweise der Dekompression, Rissbreitennachweise oder Nachweise zur Spannungsbegrenzung geführt werden.

2.10 Ausgabe der Querschnitts- und Eingabedaten

Alle Ausgabemöglichkeiten finden Sie im Menü **Datei**, Unterpunkt **Ausgabe**.

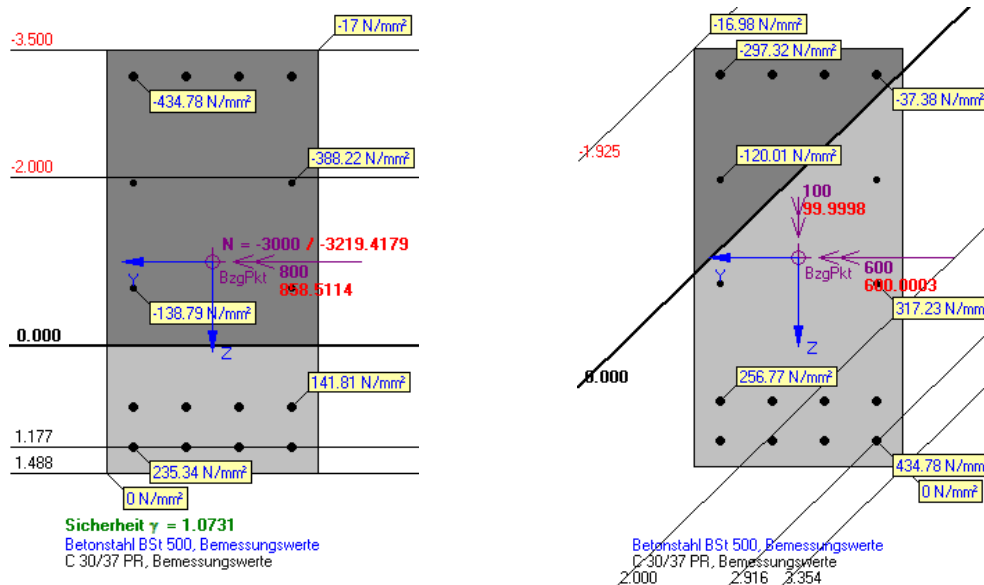
2.10.1 Querschnitt Drucken

Mit diesem Unterpunkt **Querschnitt Drucken** können Sie sich den Querschnitt auf einem Drucker ausgeben lassen (Shortcut **Strg+P**). Sie haben die Möglichkeit, das Druckbild zu beeinflussen, indem Sie Papierformat, Größe und Positionierung einstellen können.

Der Querschnitt wird an die von Ihnen gewählte Größe angepasst. Rasterpunkte sowie die Kreuze an den Polygonpunkten werden nicht gedruckt. Ergänzend können nach einer durchgeführten Berechnung die numerischen Ergebnisse beim Drucken mit ausgegeben werden.

2.10.2 Grafik in Zwischenablage

Die Querschnittsgrafik wird als Pixel-Datei in die Zwischenablage kopiert und kann dann in Word etc. eingefügt werden (Shortcut **Strg+C**). Für ein optimales Ergebnis der Grafik in einer Statik hat es sich bewährt, die Darstellung des Querschnittes etwas zu verkleinern und in der linken unteren Ecke anzuordnen, wo auch die benutzten Querschnitte ausgegeben werden. Wird ein Sicherheitsnachweis durchgeführt, so wird der Faktor bis zum Erreichen des Grenzzustandes unten links mit ausgegeben.



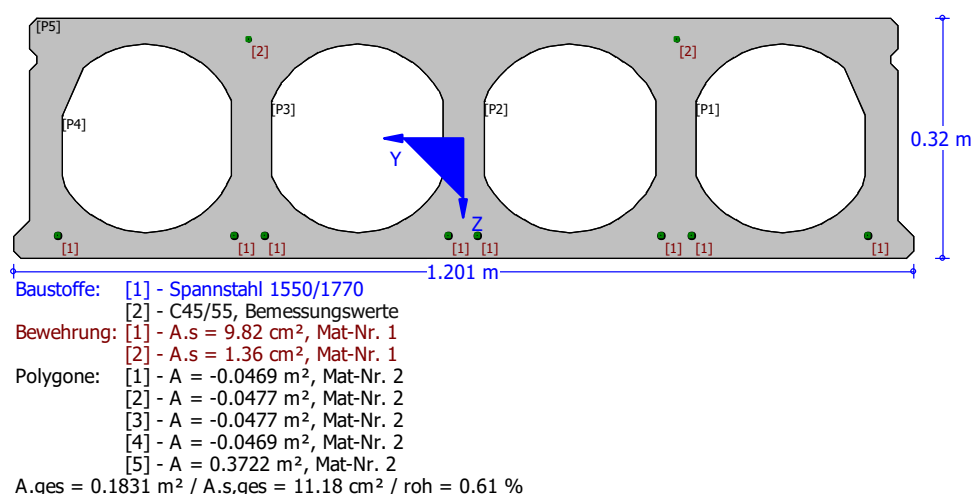
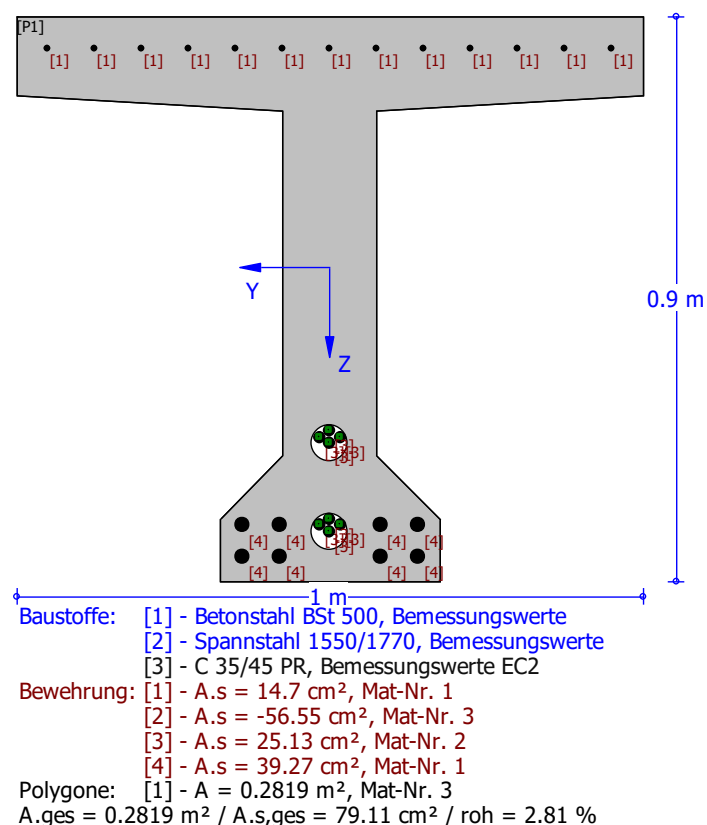
2.10.3 Grafik als BMP speichern

Die Querschnittsgrafik wird als Pixel-Datei im Bitmap-Format (BMP) gespeichert.

2.10.4 Eingabedaten Grafik in Zwischenablage

Für die schnelle Dokumentation in statischen Berechnungen kann die folgende Ausgabe hilfreich sein, bei der der Querschnitt mit Abmessungen, den Baustoffen sowie den Bewehrungsmengen und Bewehrungsgruppen in einer Grafik ausgegeben wird. Die Grafik wird über den Shortcut **Strg+D** als Metafile (Vektorgrafik) in die Zwischenablage exportiert.

In der Grafik werden die verschiedenen Polygone mit [P...] beschriftet sowie die Bewehrungspunkte mit der Nummer der Bewehrungsgruppe. Mit den Maßketten werden die Außenkanten vermaßt. Die Flächen der Polygone und die Flächensumme Bewehrungsgruppe werden angegeben. Negative Werte sind Flächen, die als Aussparung definiert wurden.



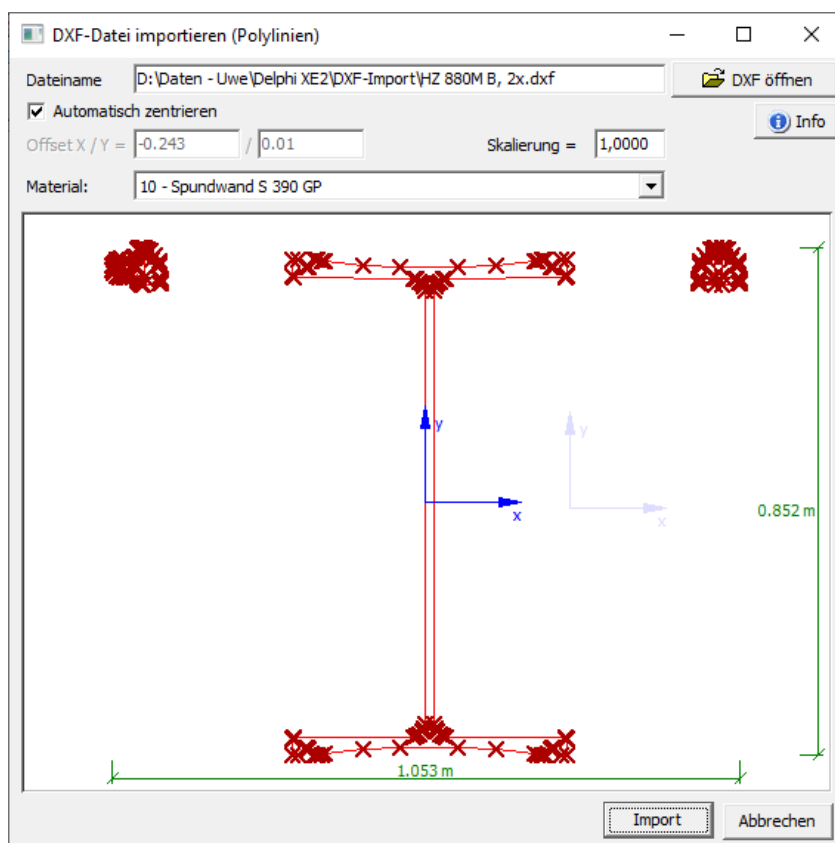
2.10.5 Eingabedaten (numerisch + Grafik)

Mit diesem Unterpunkt werden alle Eingabedaten (Punkte, Polygone, Baustoffe etc.) als Text aufbereitet und in einem extra Fenster ausgegeben. In dem Fenster kann der Text anschließend gedruckt werden.

Weiterhin wird die Grafik des Querschnitts in einem extra Fenster als Vektorgrafik ausgegeben. Die Grafik entspricht der Ausgabe aus dem vorherigen Kapitel 2.10.4.

2.11 Import DXF-Datei

Über den Menüpunkt *DATEI* => *IMPORT DXF* können DXF-Dateien eingelesen werden. Importiert werden ausschließlich Polylinien, die später in INCA2 als Polygone 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. Mit dem Befehl PEDIT können Sie in AutoCAD einzelne Linien zu einer Polylinie verbinden. Zwischen den verschiedenen DXF-Versionen gibt es geringe Unterschiede, die von INCA2 nicht berücksichtigt werden. Prüfen Sie daher nach dem Einlesen der Datei, ob alle Elemente korrekt übernommen wurden.

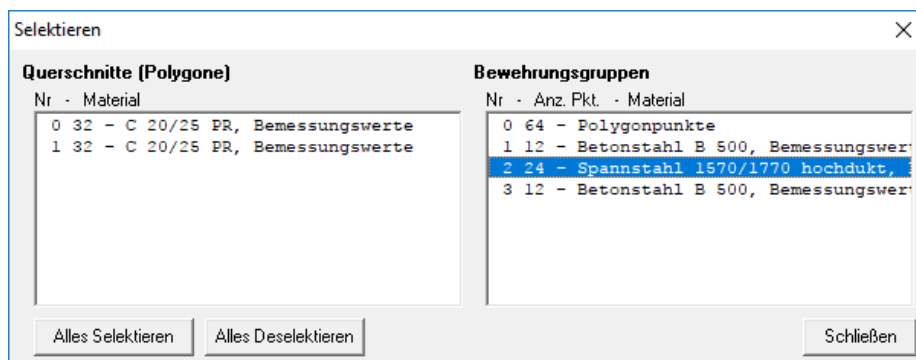
3 Bearbeiten

3.1 Selektieren

Die Auswahl erfolgt mit der Maus durch einfaches Anklicken des Punktes oder des Polygons. Das Ziehen eines Fensters ist ebenso möglich, wobei alle vollständig innerhalb des Fensters liegenden Elemente rot markiert werden. Durch Drücken der Strg-Taste ist, wie bei Windows-Programmen üblich, eine Mehrfachselektion möglich. Ein Demarkieren mit der Strg-Taste ist ebenso verfügbar.

Haben Sie Elemente markiert, so sind die Funktionen Schieben, Spiegeln und Rotieren sowie Eigenschaften verfügbar. Sind keine Elemente markiert, so ist nur die Funktion Schieben einzelner Elemente aktivierbar.

Im Menü Bearbeiten, Selektieren steht ein Hilfsmittel zum Selektieren ganzer Bewehrungsgruppen oder einzelner Polygone zur Verfügung. Dies ist hilfreich, um einen Überblick über die einzelnen Gruppen zu erhalten, andererseits lässt sich auf diese Weise z.B. recht schnell der Bewehrungsdurchmesser einer gesamten Gruppe verändern.



3.2 Zoomfunktionen

In der Buttonleiste stehen folgende Zoom-Funktionen zur Verfügung:



1. **Ansicht verschieben** - Der aktuelle Ausschnitt der Zeichnung wird verschoben
2. **Zoom Alles** - Die Zeichnung wird formatfüllend (fensterfüllend) und zentriert dargestellt.
3. **Zoom in** - Der aktuelle Ausschnitt wird um den Faktor 1,25 vergrößert dargestellt.
4. **Zoom out** - Der aktuelle Ausschnitt wird um den Faktor 0,8 verkleinert dargestellt.
5. **Zoomfenster** - Mit der Maus kann ein beliebiges Fenster gezogen werden, dessen Inhalt formatfüllend ausgegeben wird.

Die dargestellte **Ansicht verschieben** können Sie auch durch Klicken des Scrollrades der Maus, Verschieben der Ansicht und loslassen der Maustaste.

Die Funktionen **Zoom in** und **Zoom out** können ebenso über das Drehen des Scrollrades der Maus erfolgen.

3.3 Schieben, Spiegeln, Rotieren

Sind keine Elemente markiert, steht die Funktion **Einzelne Elemente Verschieben** zur Verfügung. Mit ihr ist es insbesondere im interaktiven Modus möglich, Bewehrungsstäbe oder Polygonpunkte per „Drag and Drop“ schnell zu verschieben (Element anklicken, geklickt halten und verschieben, am Bestimmungsort Maustaste loslassen). Das Verschieben des Kraftangriffspunktes ist ebenso möglich, falls bei der Lastfalleingabe ein beliebiger Bezugspunkt gewählt wurde.



Einzelne Elemente Verschieben

Nach Selektion von Elementen stehen folgende Funktionen zur Verfügung:



Die Buttons haben folgende Bedeutung (von links nach rechts)

1. Verschieben
2. Spiegeln
3. Rotieren

Selektieren Sie in einem ersten Schritt Punkte und/oder Polygone und wählen Sie dann die gewünschte Aktion über den entsprechenden Button oder über das Menü **Bearbeiten**.

Bei Wahl über das Menü **Bearbeiten** oder bei Doppelklick auf den zugehörigen Button erscheint ein Fenster, in dem Sie per Tastatureingabe die Aktion durchführen können. Falls Sie neue Punkte / Polygone erzeugen möchten, wählen Sie die Option **Kopieren**. Beim Schieben können Sie zusätzlich die **Anzahl der Kopien** eingeben. Der Drehwinkel wird im mathematisch positiven Sinn (Gegen-Uhrzeigersinn) benutzt.

Möchten Sie lieber die Maus benutzen, klicken Sie in der Eingabemaske den entsprechenden Button an (z.B. **Schieben mit der Maus**), das Fenster verschwindet und der Mauszeiger verändert sich entsprechend Ihrer Auswahl. Klicken Sie einen Startpunkt in der Grafik an, halten Sie die Maustaste gedrückt und lassen Sie sie am Zielpunkt los. In der unteren Statuszeile des Hauptfensters werden als Hilfe die absoluten und relativen Koordinaten angezeigt.

Ein Klick auf die rechte Maustaste lässt Sie zur Eingabemaske zurückkehren und die Funktion abbrechen.

Bei der Benutzung der Maus wird die neue Lage der Punkte ständig auf dem Bildschirm ausgegeben.

3.4 Löschen

Markieren Sie die zu löschenden Punkte und Polygone. Dann drücken Sie die **Entf**-Taste oder wählen im Menü **Bearbeiten** den Punkt **Löschen**.

Im Menü **Extras**, Unterpunkt **Einstellungen**, Karteikartenreiter **Bearbeiten** können Sie festlegen, ob vor dem Löschen eine Bestätigung eingeholt werden soll. Außerdem können Sie hier festlegen, ob beim Löschen eines Polygons auch die zugehörigen Punkte entfernt werden sollen.

3.5 Eigenschaften



Mit diesem Punkt können Sie sich die Eigenschaften von Punkten und Polygonen anzeigen lassen und diese auch verändern. Markieren Sie dazu die gewünschten Elemente und wählen dann im Menü **Bearbeiten** den Unterpunkt **Eigenschaften** (oder Button **Eigenschaften** oder **Alt + Enter**).

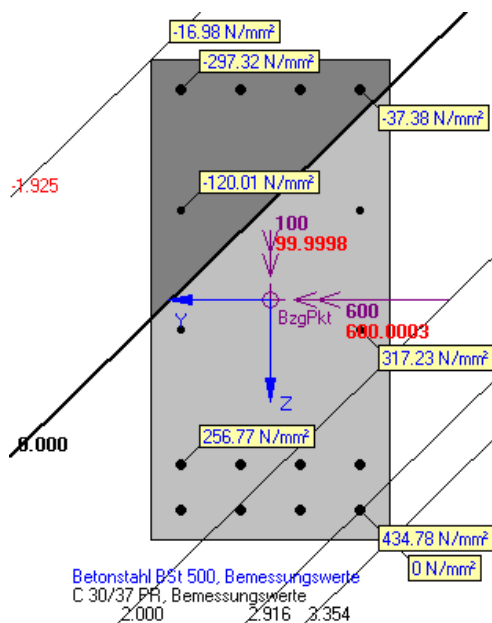
Haben Sie mehrere Punkte bzw. Polygone markiert, so werden nur die gemeinsamen Eigenschaften angezeigt, die anderen Felder bleiben frei, können aber verändert werden. (z.B. wenn alle Punkte aus dem gleichen Baustoff bestehen oder wenn sie gleiche Koordinaten besitzen.)

4 Ergebnisse

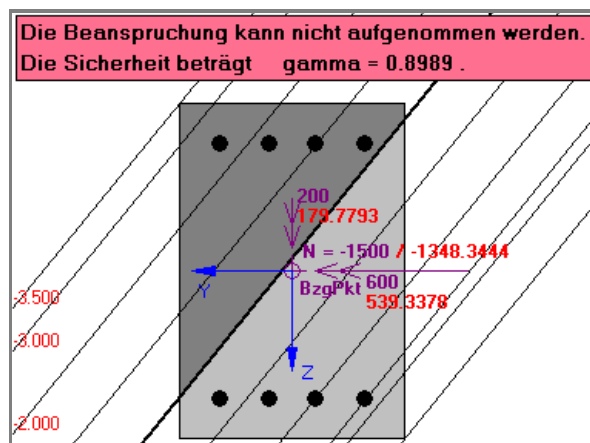
4.1 Dehnungszustand (interaktiv)

Nach Eingabe eines Querschnitts sowie einer Einwirkung können Sie sich die Dehnungsverteilung über den Querschnitt mit Wahl dieses Menüpunktes berechnen und anzeigen lassen (Shortcut **F9**).

Die Druckzone des Querschnittes wird dunkelgrau ausgefüllt, die Zugzone hellgrau. Im vorgewählten Abstand (Menü Extras, Unterpunkt Einstellungen, Ergebnisse) werden die Dehnungslinien ausgegeben. Die am stärksten beanspruchten Fasern für Beton und Bewehrung werden zusätzlich mit einer Dehnungslinie gekennzeichnet. Optional können die Spannungen in den verschiedenen Querschnitten ausgegeben werden. Im Angriffspunkt der Kräfte wird die in diesem Lastfall wirkende Belastung dargestellt.



Falls diese Belastung zu groß ist, erscheinen hier die maximal aufnehmbaren Schnittgrößen. In diesem Fall wird der Sicherheitsnachweis durchgeführt, der entsprechende Sicherheitsfaktor steht oben links im roten Feld.



Der zweite Unterpunkt **Dehnung** – Alle Lastfälle (Shortcut **Strg+F9**) ist vor allem für die tägliche Arbeit im Ingenieurbüro gedacht. Zum Beispiel bei Ermüdungsnachweisen oder allgemein bei Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit müssen häufig Spannungen für verschiedene Lastfälle ermittelt werden. Mit diesem Menüpunkt werden für alle Lastfälle die Dehnungszustände ermittelt und die detaillierten numerischen Ergebnisse in einem extra Fenster ausgegeben. Für den derzeit aktuellsten Lastfall wird die Grafik mit Dehnungszustand ausgegeben.

Insbesondere der dritte Unterpunkt **Dehnung - Interaktiv** bietet sowohl für das Entwerfen und Konstruieren als auch zum Vorführen und Erläutern in einer Vorlesung große Vorteile. Haben Sie diesen Punkt gewählt, wird bei jeder Änderung des Querschnitts die Dehnungsverteilung automatisch neu berechnet. Sie können so z.B. die Lage der Bewehrung ändern und sehen sofort die Wirkung auf den Querschnitt und ggfs. die aufnehmbare Belastung.

Durch nochmaliges Anwählen des Unterpunktes **Dehnung - Interaktiv** wird dieser Modus wieder ausgeschaltet.

Treten bei der Berechnung Fehler auf, wird die Ergebnisausgabe abgebrochen und falls möglich die Fehlerart erläutert. Ursache kann einerseits die Nichtkonvergenz der Iteration sein, die sich allerdings nur schwer durch den Nutzer beheben lässt. Häufigster Grund ist jedoch ein Fehler in der Definition der Baustoffeigenschaften, die in so einem Fall noch einmal überprüft werden sollten.

War der interaktive Modus der Dehnungsberechnung aktiviert, wird dieser bei Fehlern meistens ausgeschaltet.

4.2 Ausgabe der Ergebnisse

Im Menü **Datei**, Unterpunkt **Drucken Grafik** können Sie den Querschnitt auf dem Drucker ausgeben lassen. Beim Drucken haben Sie die Möglichkeit, durch das Setzen des entsprechenden Häkchens die (kurzen) numerischen Ergebnisse zusammen mit der Grafik auf einer Seite zu drucken.

Die Numerischen Ergebnisse (als Zusammenfassung) werden im Menü **Ergebnisse**, Unterpunkt **Numerische Ergebnisse** aufgerufen (Shortcut N). Die Ergebnisse werden in einem Fenster rechts oben dargestellt, welches sich bei weiteren Berechnungen jeweils aktualisiert und immer im Vordergrund bleibt. In diesem neuen Fenster können Sie im Menüpunkt **Anzeige** den Umfang der Ergebnisdokumentation einstellen (Auswahl: **Spannungen** / **Legende** / **Baustoffkennwerte**).

Beispiel für numerische Ergebnisse für Berechnung Dehnungszustand:

Dehnungszustand für gegebene Schnittgrößen

N	:	-1000.0000	M.y	:	300.0000	M.z	:	50.0000	Eingabewerte
N	=	-1000.0004	M.y	=	300.0000	M.z	=	50.0000	aus Iteration
Schnittgrößen wurden auf den Punkt (0.0000/ 0.0000) bezogen.									
alpha.0	=	118.2716	y.0	=	-0.0490	z.0	=	0.0264	
eps.0	=	-0.0680	deps/dy	=	-1.3873	deps/dz	=	2.5796	
eps.2b	=	-1.1193	eps.1b	=	0.9834	eps.1s	=	0.7057	

In der ersten Ergebnis-Zeile mit den Schnittgrößen stehen die eingegebenen Schnittgrößen. In der zweiten Zeile stehen die sich aus der Iteration und Spannungsintegration ergebenden Schnittgrößen. Diese können aufgrund der Abbruchgenauigkeit bei der Iteration in geringem Umfang von den eingegebenen Schnittgrößen abweichen.

Erläuterungen zu den einzelnen Werten finden Sie weiter unten beim Stichwort **Legende**.

Falls im Menü **Anzeige**, Unterpunkt **Spannungen** ausgewählt wurde, werden die maximalen und minimalen Spannungen ausgegeben, jeweils getrennt für alle Polygone und für alle Bewehrungsgruppen.

Spannungen im Querschnitt in [N/mm²]:

```
Polygon 1 Sigma.Max = 0.0000 Sigma.Min = -15.9877 (C 35/45 PR, Bemessungswerte)
Bew-Gr. 1 Sigma.Max = 141.1343 Sigma.Min = -168.3287 (Betonstahl B 500, Bemessungswerte)
```

Falls im Menü **Anzeige**, Unterpunkt **Baustoffkennwerte** ausgewählt wurde, werden die Baustoffkennwerte z.B. für die Dokumentation in einer Statik mit ausgegeben.

```
Betonstahl B 500, Bemessungswerte, Stahl, Parabel-Rechteck
E = 200000 N/mm2
Druck: Sigma.y = -434.78 N/mm2 / Eps.y = -2.174 mm/m / Exp = 1
Zug: Sigma.y = 434.78 N/mm2 / Eps.y = 2.174 mm/m / Exp = 1

C 35/45 PR, Bemessungswerte, Beton, Parabel-Rechteck
E = 19833.3 N/mm2
Druck: Sigma.y = -19.83 N/mm2 / Eps.y = -2 mm/m / Exp = 2
Zug: Sigma.y = 0 N/mm2 / Eps.y = 0 mm/m / Exp = 2
```

Falls im Menü **Anzeige**, Unterpunkt **Legende** ausgewählt, werden am Ende der numerischen Ergebnisse nachfolgende Erläuterungen zu den verschiedenen Bezeichnungen gegeben:

Legende der numerischen Ergebnisse:

```
-----
alpha.0 = Winkel der Verkrümmungsrichtung
y.0 / z.0 = Schnittpunkte der Dehnungsnulllinie mit den Koordinatenachsen
eps.0 = Dehnung im Koordinatenursprung
deps/dy, deps/dz = Verkrümmung in y- und in z-Richtung
eps.2b = Betondehnung auf der Druckseite
eps.1b = Betondehnung auf der Zugseite
eps.1s = Stahldehnung auf der Zugseite
-----
```

Ausführliche numerische Ergebnisse erhalten Sie im Menü **Ergebnisse**, Unterpunkt **Num. Erg. detailliert** (Numerische Ergebnisse detailliert). Hier werden die Ergebnisse z.B. für jeden Punkt mit Dehnung und Spannung in einem extra Fenster ausgegeben.

Beispiel für numerische Ergebnisse für Sicherheitsnachweis:

```
Sicherheitsnachweis und zugehöriger Dehnungszustand
Sicherheitsfaktor bis zum Erreichen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit
gamma = 2.2053

N : -1000.0000 M.y : 300.0000 M.z : 50.0000 Eingabewerte
N = -2205.3230 M.y = 661.5969 M.z = 110.2661 aus Berechnung
Schnittgrößen wurden auf den Punkt ( 0.0000/ 0.0000) bezogen.

alpha.0 = 124.3206 y.0 = -0.0639 z.0 = 0.0436

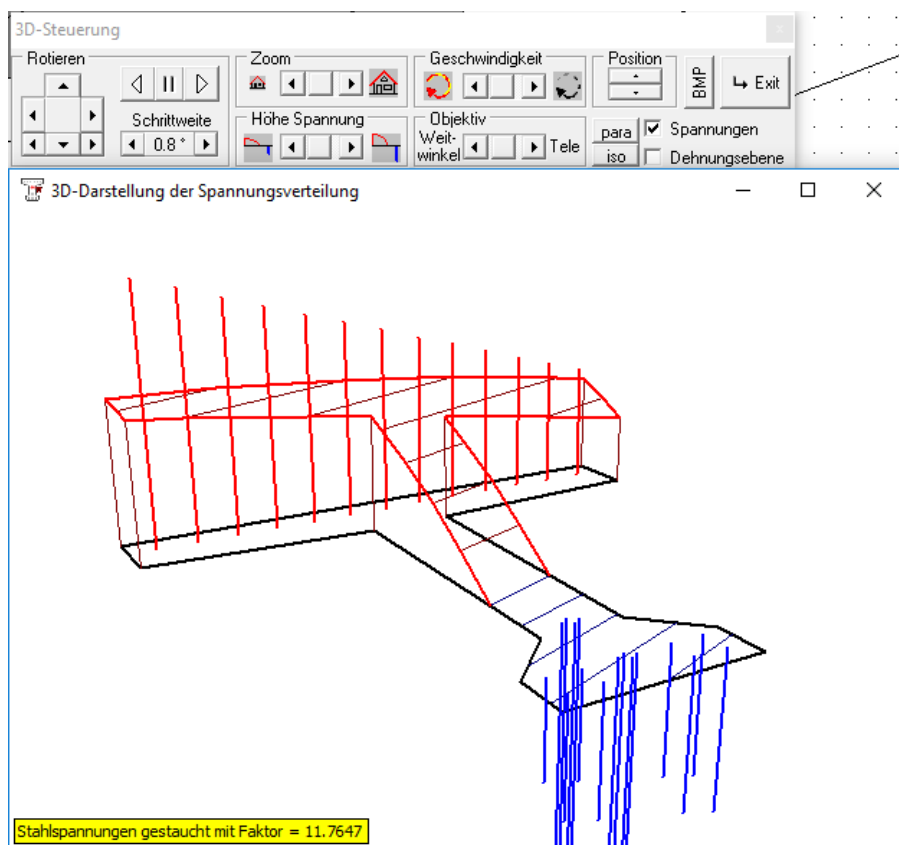
usw.
```

Vom Benutzer wurden die Schnittgrößen $N_x = -1000 \text{ kN}$ / $M_y = 300 \text{ kNm}$ / $M_z = 50 \text{ kNm}$ eingegeben. Diese Beanspruchung kann um den Faktor $\gamma = 2,2053$ gesteigert werden, bis an mindestens einer Querschnittsfaser die eingestellte Grenzdehnung erreicht ist, was dem Grenzzustand des Querschnittes entspricht. Die Einwirkung beträgt im Grenzzustand der Querschnittstragfähigkeit in diesem Fall $N_x = -2205,3 \text{ kN}$ / $M_y = 661,6 \text{ kNm}$ / $M_z = 110,3 \text{ kNm}$.

Die Ergebnisse können mit dem letzten Unterpunkt des Menüs Ergebnisse gelöscht werden, die Grafik wird wieder neu aufgebaut.

4.3 Spannungsverteilung und Dehnungsebene als 3D-Animation

Nach erfolgreicher Berechnung des Dehnungszustandes ist eine Animation der Spannungsverteilung möglich. Mit Aufruf dieses Unterpunktes öffnen sich zwei weitere Fenster, ein Steuerungspanel sowie ein Ansichtsfenster zur Ausgabe der 3D-Grafik.



In diesem Fenster befinden sich Buttons zur Steuerung der Rotation um die z-Achse, außerdem kann das Objekt zum Betrachter hin gekippt sowie zur Seite geneigt werden. Mit dem Richtungskreuz auf der linken Seite kann das 3D-Objekt in 3°-Einzelschritten gedreht werden.

Weiterhin ist die Höhe der Spannungsfläche einstellbar, der Zoomfaktor des gesamten Objektes ist in bestimmten Grenzen ebenfalls wählbar. Mit **Position** kann das Objekt in vertikaler Richtung verschoben werden, um es optimal auf das Fenster einpassen zu können. Außerdem ist mit dem Punkt **Objektiv** das Aussehen der Grafik beeinflussbar. Mit **Tele** erhalten Sie eine Parallelprojektion, mit **Weitwinkel** wird das Objekt in Zentralperspektive (isometrisch) dargestellt.

Weiterhin können Sie über die Buttons "**para**" und "**iso**" zwei Ansichten wählen. Im ersten Fall erhalten Sie einen Blick genau von der Seite (90° zur Dehnungslinie), außerdem wird das Objektiv auf Tele gestellt, was mit einer Parallelperspektive vergleichbar ist. Mit dem Button "**iso**" wechseln sie in die isometrische Ausgangsposition.

Mit dem Button **BMP** haben Sie die Möglichkeit, die aktuelle Grafik der Spannungsverteilung als Bilddatei im BMP-Format zu exportieren. Mit Exit verlassen Sie die Animation.

Zusätzlich zum Steuerungsfenster können Sie in der Grafik durch Klicken und Ziehen mit der Maus nach rechts/links sowie oben/unten die Grafik drehen und kippen.

Die vorherige Darstellung zeigt die Spannungsverteilung eines vorgespannten Plattenbalkens unter zweiachsiger Biegung. In rot wird der Druckbereich gezeichnet, in blau die Zugspannungen.

Die Qualität der Darstellung der Spannungsfläche im Beton hängt insbesondere im Parabelbereich des Sigma-Epsilon-Diagramms von der Anzahl und vom Abstand der Dehnungslinien ab (Menü **Extras**, Unterpunkt **Einstellungen**, Karteikartenreiter **Ergebnisse**). Je feiner die Unterteilung durch Dehnungslinien ist, desto besser kann z.B. beim Beton der parabelförmige Teil dargestellt werden. Ein Zuviel an Dehnungslinien ergibt jedoch einen hohen Rechenaufwand (langsamere Animation), außerdem wird die Spannungsverteilung dadurch leicht unübersichtlich.

Die Stahlspannungen werden meistens mit einem Faktor E_s / E_c (Verhältnis der E-Moduln) gestaucht ausgegeben. Diese Maßnahme erlaubt eine bessere Darstellung der interessierenden Betondruckspannungen. Im Grafikfenster wird dieser Stauchungsfaktor am unteren linken Rand ausgegeben.

4.4 Querschnittswerte

In diesem Fenster werden die aktuellen Querschnittswerte wie Fläche, Schwerpunkt und Flächenmoment 2. Grades ausgegeben. Letzteres wird zusätzlich ins Hauptachsensystem transformiert sowie der Winkel ausgegeben.

Die Berechnungsart können Sie wie folgt wählen.

1. **Querschnittswerte nur für die Polygone,**
Bewehrung und E-Modul werden nicht berücksichtigt
2. **Querschnittswerte nur für Polygone mit Berücksichtigung des E-Moduls,**
Bewehrung wird nicht berücksichtigt
3. **Ideelle Querschnittswerte (Bruttofläche),**
Berücksichtigung der Bewehrung und Polygone mit ihrem jeweiligen E-Modul, Aussparungen im Beton hinter der Bewehrung werden nicht berücksichtigt, die Querschnittswerte werden auf den E-Modul eines vom Nutzer zu wählenden Baustoffs bezogen.
4. **Ideelle Querschnittswerte (Nettofläche),**
Berücksichtigung der Bewehrung und Polygone mit ihrem jeweiligen E-Modul, Aussparungen im Beton hinter der Bewehrung werden berücksichtigt, die Querschnittswerte werden auf den E-Modul eines vom Nutzer zu wählenden Baustoffs bezogen.

Zusätzlich werden die linear-elastischen Steifigkeitswerte (EA und EI) ausgegeben. Weiterhin befindet sich ein Button **Copy** in diesem Fenster, mit dem die geometrischen Querschnittswerte in die Zwischenablage kopiert werden. Anschließend können diese z.B. in Word eingefügt werden.

4.5 Spannungserresultierende

Mit diesem Punkt haben Sie die Möglichkeit, aus einem vorgegebenen Dehnungszustand die resultierenden Schnittgrößen zu berechnen (**Shortcut R**).

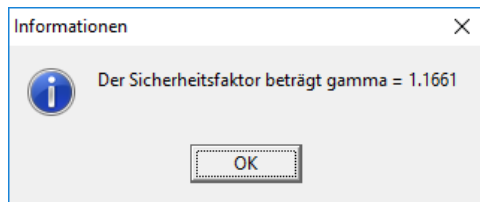
Der Dehnungszustand kann auf 3 verschiedene Arten vorgegeben werden:

1. Eingabe der Dehnung auf der Druck- und auf der Zugseite. Auf der Zugseite wahlweise auf die äußerste Betonfaser oder die äußerste Stahlfaser bezogen. Zusätzlich muss der Winkel der Dehnungsnulllinie eingegeben werden.
2. Eingabe einer Dehnungsebene mit den drei Parametern ϵ_0 (Dehnung im Koordinatenursprung), k_y und k_z (Verkrümmung in y- und in z-Richtung)
3. Eingabe der DKZ (Dehnungskennziffer). Mit diesem Wert (0 bis 33) werden alle möglichen Grenzdehnungszustände eindeutig beschrieben. Der Querschnitt befindet sich demzufolge im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Wie bei Punkt 1 muss auch hier noch der Winkel der Dehnungsnulllinie eingegeben werden.

Als Ergebnis erhält man die resultierenden Schnittgrößen N_x / M_y / M_z , die sich aus der Spannungintegration ergeben.

4.6 Sicherheitsnachweis

Beim Sicherheitsnachweis werden die Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit berechnet, die sich aus den gegebenen Schnittgrößen durch Multiplikation mit dem zu ermittelnden Sicherheitsfaktor γ ergeben (**Shortcut S**).



Der Sicherheitsfaktor wird in einem Hinweisfenster ausgegeben, alle weiteren Ergebnisse sind bei den numerischen Ergebnisse nachzulesen. Ist die Ausgabe der Zwischenergebnisse (Menü **Extras**, Unterpunkt **Einstellungen**, Karteikartenreiter **Ergebnisse**, **Iterationsverlauf**) aktiviert, kann dort die zugehörige DKZ (Dehnungskennziffer) ausgelesen werden.

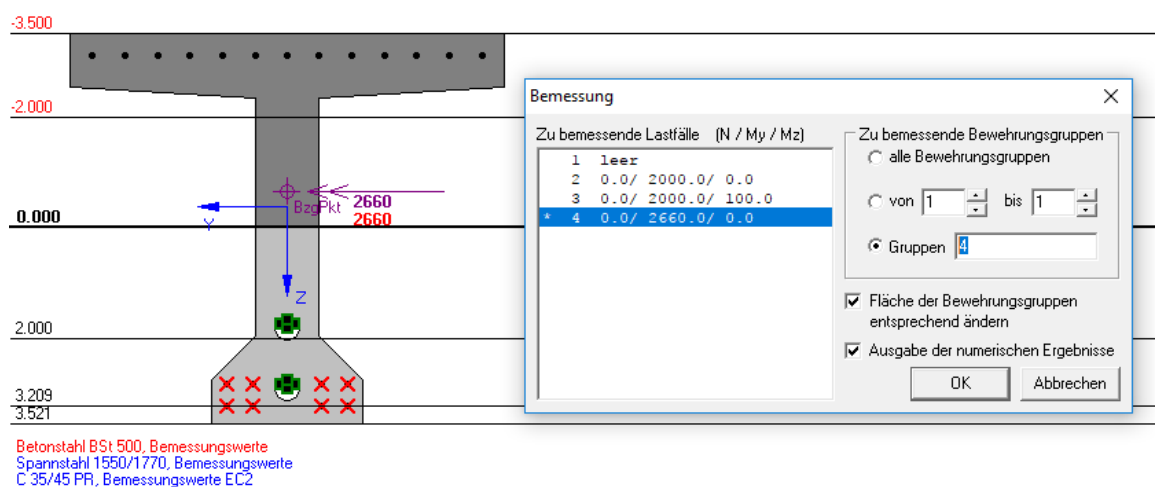
Wurden die Schnittgrößen bereits als Bemessungswerte (Design-Werte) eingegeben, so ist der hier ermittelte Faktor die zusätzliche Sicherheit zwischen der Design-Einwirkung und der Design-Tragfähigkeit des Querschnitts.

Sicherheitsnachweis – Alle Lastfälle

Mit diesem Menüpunkt wird für alle definierten Lastfälle der Sicherheitsnachweis durchgeführt und die numerischen Ergebnisse in Kurzform ausgegeben.

4.7 Bemessung

In diesem Punkt wird der Querschnitt für eine gegebene Schnittgrößenkombination bemessen (**Shortcut B**).

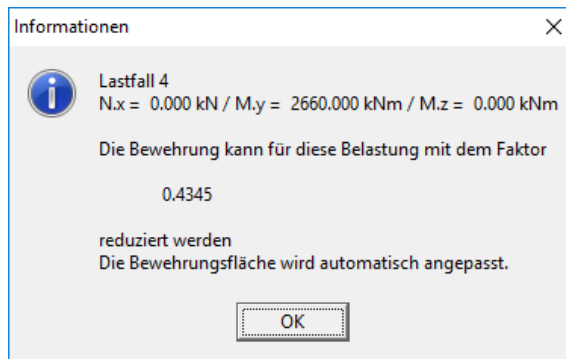


Die Bewehrungsmenge der angegebenen Bewehrungsgruppen wird dabei so lange variiert, bis ein Sicherheitsfaktor von $\gamma = 1,0$ erreicht wird. Wählen Sie hierzu aus, für welchen Lastfall (oder mehrere Lastfälle) die Bemessung durchgeführt werden soll. Außerdem ist die Bewehrungsgruppe zu wählen,

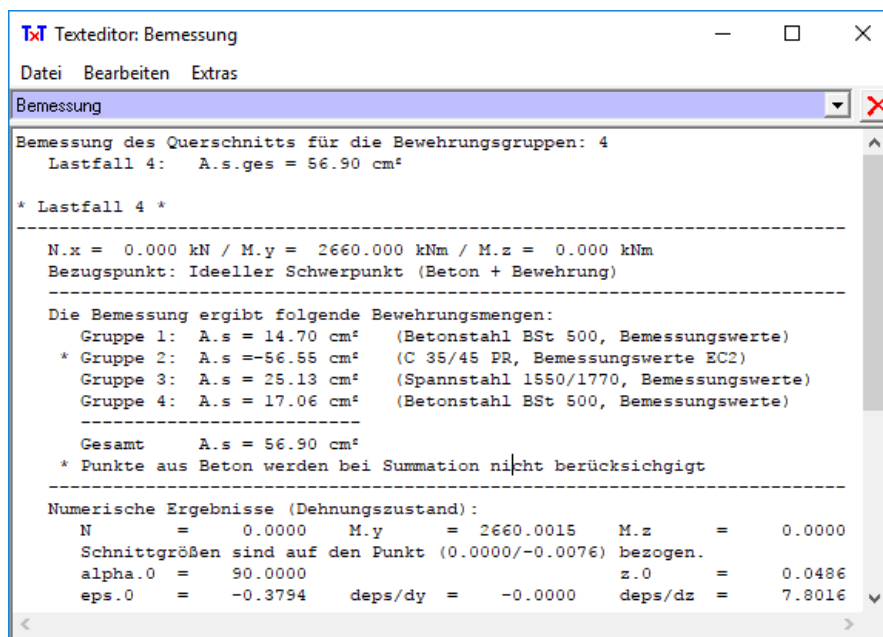
die für die Bemessung angepasst werden soll. Im gezeigten Beispiel ist dies die Gruppe 4 (schlaffer Betonstahl B500 auf der Unterseite des Querschnitts).

Für die Bemessung wird der Wertebereich auf das minimale und das maximale Bewehrungsverhältnis beschränkt, welches im Menüpunkt **Eingabe**, Unterpunkt **Grenzdehnungen/Parameter** eingegeben wurde. Falls die Sicherheit von $\gamma = 1,0$ selbst beim maximalen Bewehrungsverhältnis nicht gegeben ist, wird mit dieser maximalen Bewehrungsmenge der Sicherheitsnachweis durchgeführt. Ist andererseits selbst die minimale Bewehrungsmenge ausreichend, wird auch hier mit der minimalen Bewehrung der Sicherheitsnachweise geführt und γ ausgegeben.

Bei erfolgreicher Berechnung erhalten Sie folgende Ausgaben:



Numerische Ergebnisse:



Anmerkung:

Bei vorgespannten Querschnitten kann es passieren, dass die automatische Bemessungsroutine für vorgespannte Bewehrungsgruppen nicht korrekt arbeitet. Zu Beginn wird überprüft, inwieweit die Tragfähigkeit mit dem minimalen und maximalen Bewehrungsverhältnis erfüllt ist. Im Fall einer sehr hohen Spannbewehrung kann diese dazu führen, dass der Querschnitt allein durch die hohe Vorspannung nicht tragfähig ist, so dass das Programm zu dem Schluss kommt, dass eine Bemessung nicht möglich ist.

In einem derartigen Fall muss die Spannbewehrung „per Hand“ solange vergrößert werden, bis die Tragfähigkeit gegeben ist. Abgesehen davon wird in den meisten Fällen die Spannbewehrung entsprechend den Anforderungen im Gebrauchzustand gewählt (überdrückter Querschnitt) und gegebenenfalls zusätzlich schlaaffe Bewehrung für den Grenzzustand der Tragfähigkeit eingelegt.

4.8 Interaktionsdiagramm $N / M_y / M_z$

Mit diesem Menüpunkt wird für alle Hauptverkrümmungsrichtungen im Winkelabstand von 10° die M/N -Linie berechnet. Zusammengenommen ergeben diese Linien einen 3-dimensionalen Körper, der die aufnehmbaren Schnittgrößen des Querschnitts als Interaktion zwischen N_x , M_y und M_z wiedergibt.

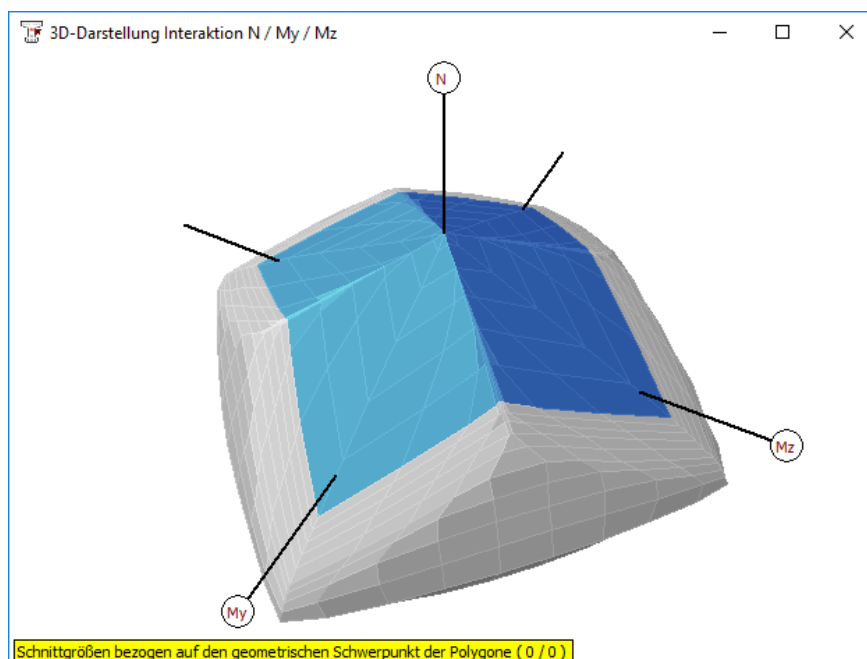
Ebenso wie bei der 3D-Spannungsverteilung öffnet sich ein Fenster zur grafischen Ausgabe sowie ein Fenster zur Steuerung der Rotation, welches über nahezu identische Funktionen zur Ablaufsteuerung verfügt.



Zusätzlich befindet sich hier ein „Lichtschalter“, mit dem die Schattierung der Oberfläche an und ausgeschaltet werden kann. Diese Schattierung verstärkt den 3-dimensionalen Effekt, ist jedoch aufwändiger in der Berechnung bei der Rotation (und damit etwas langsamer).

Zusätzlich zum Steuerungsfenster können Sie in der Grafik durch Klicken und Ziehen mit der Maus nach rechts/links sowie oben/unten die Grafik drehen und kippen

$N / M_y / M_z$ - Diagramm für einen doppelsymmetrischen Stützenquerschnitt:



Der blaue Bereich stellt die Resultanten zu den Dehnungskennziffern (DKZ) 33 bis 16 dar (Zugbruchbereich), der rote Bereich die Resultanten zu den Dehnungskennzahlen 6 bis 0 (näherungsweise überdrückter Querschnitt).

In früheren Versionen von INCA2 bzw. MasQueW wurde die Unterteilung der Dehnungskennziffern (DKZ) 0 bis 6 für den Bereich „Zentrisch gedrückt“ bis „Dekompression“ (Randdehnung auf der einen Seite $\varepsilon = 0$) benutzt. In der vorliegenden Version von INCA2 musste die Definition der DKZ zur Anpassung an Verbundquerschnitte mit außen liegender Stahlfaser jedoch überarbeitet werden, so dass eine eindeutige Zuordnung in diesem Bereich nicht mehr möglich ist, weshalb der Abschnitt DKZ von 0 bis 6 nur noch näherungsweise den Bereich des vollständig überdrückten Querschnitts darstellt.

Für genauere Informationen zu der alten Definition der Dehnungskennziffer zur Beschreibung des Grenzzustands der Tragfähigkeit lesen Sie bitte Heft 415 DAFStb "Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft (Programm MasQue)" von Busjaeger, Quast (1990). Im Institut für Massivbau (3-07) der TUHH ist ein Heft gleichen Inhalts gegen Erstattung der Selbstkosten erhältlich.

Abstände optimiert:

Für diesen Punkt werden die jeweiligen M/N-Linien mit einer optimierten Verteilung der gerechneten Punkte ermittelt. Wegen der hohen Grenzdehnungen in der neuen Normungsgeneration insbesondere beim Stahl ändern sich die Ergebnisse teilweise bereits bei $DKZ = 20$ bis 33 nicht mehr. Gleiches gilt evtl. auch für den Bereich $DKZ = 0$ bis 1 . Diese Bereiche werden daher aus der Berechnung rausgenommen, um dafür mehr Zwischenpunkte im interessierenden Mittel-Bereich zu berechnen. Vorteil ist, dass der 3D-Körper mit mehr gerechneten Oberflächenpunkten und damit exakter in der Form dargestellt wird. Von Nachteil ist jedoch, dass die farbliche Zuordnung (Zugbruch- und Druckbruchbereich) nicht mehr stimmt.

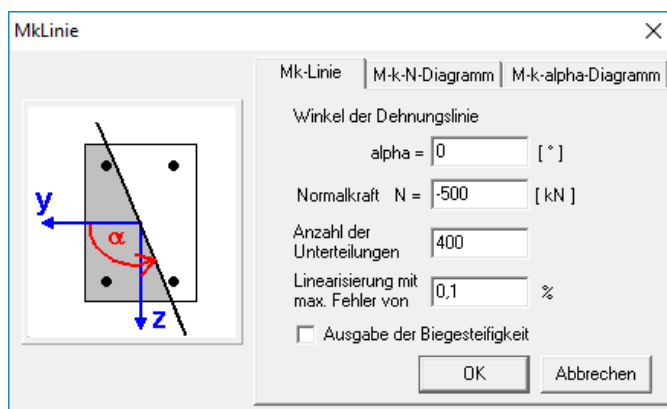
Abstände wie DKZ:

Hiermit erfolgt die Berechnung entsprechend der Dehnungskennziffern, mit dem Nachteil, dass bei hohen Grenzdehnungen für Stahl der 3D-Körper mit nur wenigen Punkten und damit weniger exakt in der Form dargestellt wird. Andererseits grenzen die farblich markierten Flächen (rot und blau) in etwa den Zugbruch- und den Druckbruchbereich ein.

4.9 M/k-Linie

Mit diesem Menüpunkt wird die Moment-Verkrümmungslinie des Querschnitts berechnet (**Shortcut M**). Als Eingangswerte dienen der Winkel der Dehnungsnulllinie sowie die konstant einwirkende Normalkraft. Weiterhin muss die Anzahl der Unterteilungen eingegeben werden. Da die Knickpunkte der M/k-Linie (z.B. Aufreißen des Querschnittes oder Fließen der Bewehrung) nicht separat erfasst werden, wird eine vergleichsweise hohe Unterteilung benötigt, um diese Knickpunkte mit guter Genauigkeit zu erfassen. Eine Anzahl von 400 Unterteilungen hat sich hierbei bewährt.

Wird die M/k-Linie in weiteren Berechnungen benutzt, empfiehlt sich eine Verringerung der Anzahl der Punkte. Hierzu werden aufeinander folgende Wertepaare auf Abweichungen gegenüber einer abschnittswisen Linearisierung geprüft. Punkte mit geringer Abweichung entfallen dann. Geben Sie dafür in der letzten Textbox den maximalen Fehler in Prozent an. Eine Genauigkeit von 0,1 % bis 2 % hat sich hierbei bewährt.



Die Ergebnisse werden einmal in grafischer Form in einem extra Fenster ausgegeben (Metafile, Vektorgrafik), ebenso wie die numerischen Ergebnisse, die in einem extra Fenster mit allen wichtigen zugehörigen Größen tabellarisch dargestellt werden. In dieser Tabelle werden folgende Größen ausgegeben:

- eps0 Dehnung des Querschnitts im Koordinatenursprung
- k.ges Gesamtverkrümmung = $(k_y^2 + k_z^2)^{0,5}$
- N, My, Mz Schnittgrößen
- M.ges Gesamtmoment = $(M_y^2 + M_z^2)^{0,5}$ wobei das Vorzeichen entsprechend der Orientierung des Gesamt-Momentenvektors bestimmt wird
- alphaM Winkel des Gesamt-Momentenvektors
- Anz.Sp. Anzahl der Spannungsintegrationen zur Bestimmung des Punktes auf der M/k-Linie. Das Vorzeichen gibt an, ob der Startwert der Iteration größer oder kleiner als der Endwert ist.

Bei der Ermittlung der M/k-Linie wird zuerst der Grenzzustand (maximale positive und maximale negative Verkrümmung) ermittelt. Im Weiteren wird der Bereich zwischen den Grenzkrümmungen in gleiche Abschnitte eingeteilt und zu jedem Verkrümmungswert das zugehörige Biegemoment bestimmt. Mit dieser vorerst einfachen Vorgehensweise werden leider nicht die charakteristischen

Punkte der M/k-Linie erfasst, die z.B. durch das Aufreißen oder durch das Fließen der Bewehrung entstehen. Bisher können diese Knicke in der M/k-Linie nur durch eine möglichst feine Unterteilung sichtbar gemacht werden.

Am Ende der numerischen Ausgabe der Mk-Linie wird die linearisierte Linie für das Programm ABaS (Anschauliche Balkenstatik, nichtlineare Berechnungen von 1D-Stabtragwerken, Download unter www.tu-harburg.de/mb) sowie für Excel ausgegeben. Je nach Genauigkeitsanforderung werden unwichtige Werte der Linien nicht angezeigt. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass ABaS maximal 50 Wertepaare der Mk-Linie für eine nichtlineare Verformungsberechnung verarbeiten kann. Achten Sie bei der Berechnung mit ABaS bitte auch darauf, dass die Mk-Linie keine fallenden Bereiche aufweist (negative tangentielle Biegesteifigkeit). Mit der herkömmlichen Balkenstatik lassen sich derartige Probleme nicht lösen, da zu einem Biegemoment zwei verschiedene Verkrümmungen auftreten, die Zuordnung ist damit nicht mehr eindeutig.

Mit den Karteikartenreitern 2 und 3 stehen weitere Möglichkeiten der Berechnung von Mk-Linien zur Verfügung. Das M-k-N-Diagramm mit 2D- oder 3D-Ausgabe kann hilfreich sein, um den Einfluss der Normalkraft auf das maximale Biegemoment oder die erreichbaren Verkrümmungen genauer studieren zu können. Das M-k-alpha-Diagramm zeigt den Zusammenhang bei schiefer Biegung, wenn sich die Hauptkrümmungsrichtung im gewählten Intervall verändert.

An dieser Stelle sei auch noch mal darauf hingewiesen, dass bei der Berechnung der Mk-Linie mit den beiden ersten Optionen die Hauptkrümmungsrichtung alpha konstant bleibt. Damit wird die Richtung des resultierenden Momentenvektors nur in bestimmten Fällen konstant sein und den gleichen Winkel wie die Hauptkrümmung haben (z.B. $\alpha = 0^\circ$ bei einfachsymmetrischen Querschnitten, $\alpha = 0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$ bei doppelsymmetrischen Querschnitten).

Als Anekdote zu den Mk-Linien noch eine Aussage von Prof. Quast:

Viele fragen sich, warum heißt es „Verkrümmung“ und nicht einfach nur „Krümmung“?

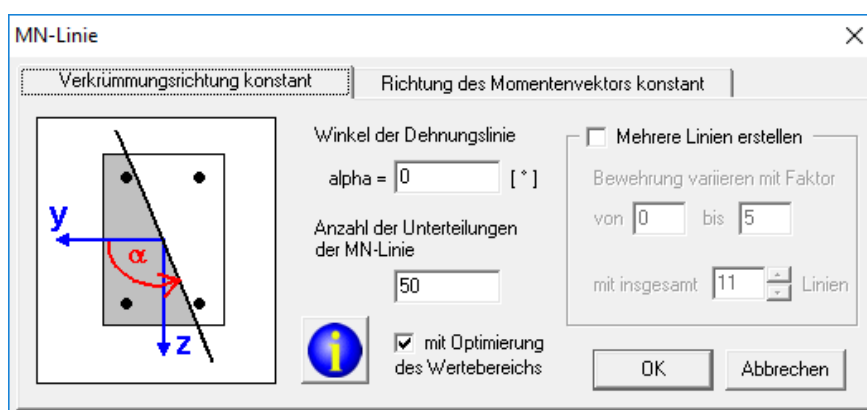
Ganz einfach, es heißt ja schließlich auch Verschiebung und nicht Schiebung ;-)

4.10 M/N-Linie

Mit diesem Menüpunkt wird die Moment-Normalkraft-Linie berechnet. Der Querschnitt befindet sich jeweils im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Einziger Eingangswert ist der Winkel der Dehnungsnulllinie bzw. des Momentenvektors, zusätzlich ist die Anzahl der Unterteilungen zu wählen.

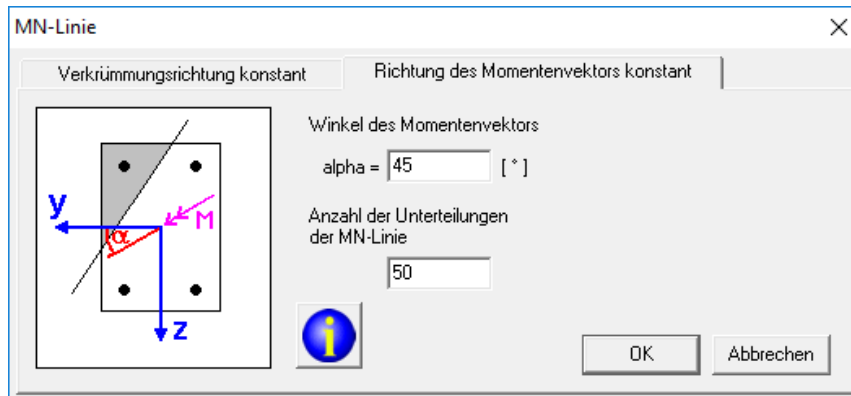
Bei der ersten Möglichkeit wird die MN-Linie für eine konstante Verkrümmungsrichtung berechnet. Bei unsymmetrischen Querschnitten bzw. einem gewählten Winkel der Verkrümmungsrichtung ungleich Null wird damit der Momentenvektor je nach Dehnungszustand einen sich verändernden Winkel besitzen. Diese M/N-Linie stellt deshalb im Allgemeinen keinen senkrechten Schnitt durch die Kraftgrößenwiebel ($N_x/M_y/M_z$ -Interaktionsdiagramm) dar. Nur in Sonderfällen (bei einachsiger Biegung und symmetrischen Querschnitten) sind die Winkel der Dehnungslinien und der Winkel des Momentenvektors gleich.

Zur Ermittlung dieser MN-Linie wird der Bereich der Dehnungskennziffer (DKZ = 0 bis 33) in die gewählte Anzahl unterteilt und die jeweils zugehörigen Grenzzustände des Querschnitts berechnet. Charakteristische Punkte wie das Aufreißen des Querschnitts, Fließen der Zug- oder Druckbewehrung werden nicht gesondert erfasst.



Weiterhin besteht in diesem Punkt die Möglichkeit, in einem Rechengang Scharen von MN-Linie zu erzeugen. Wählen Sie dazu die Option **Mehrere Linien erstellen** und setzen die weiteren Werte ein. Sinnvoll ist dieses Feature, um z.B. M/N-Bemessungsdiagramme für Sonderquerschnitte zu erstellen, die von der Literatur nicht abgedeckt werden. Es ist damit aber auch möglich, für andere Bewehrungsstäbe (z.B. andere Festigkeiten) allgemeine Interaktionsdiagramme zu erstellen (Siehe Beispiel [8.8 Interaktionsdiagramme \$N_x / M_y\$](#)).

Als zweite Möglichkeit wird die MN-Linie für einen konstanten Winkel des Momentenvektors berechnet. Analog zur ersten Möglichkeit weist damit jetzt der Winkel der Hauptkrümmung bzw. der Dehnungsnulllinie einen sich verändernden Winkel auf.



Da in diesem Fall der Momentenvektor einen konstanten Winkel aufweist, stellt diese Linie einen senkrechten Schnitt durch die Kraftgrößenzweifel ($N_x/M_y/M_z$ -Interaktionsdiagramm) dar.

Bei beiden Möglichkeiten erhält man über den **Info-Button** eine kurze Hilfestellung zur Art der Berechnung.

Die Ergebnisse werden einmal in grafischer Form in einem extra Fenster ausgegeben (Metafile, Vektorgrafik), ebenso wie die numerischen Ergebnisse, die in einem extra Fenster mit allen wichtigen zugehörigen Größen tabellarisch dargestellt werden. In dieser Tabelle werden folgende Größen ausgegeben:

- Dehnungsebene mit ε_0 , k_y und k_z
- Schnittgrößen N_x , M_y , M_z
- Gesamtmoment M_{ges}
- Winkel des Gesamtmoments α_M
- Dehnungskennziffer DKZ

Hinweis:

Durch die in der neuen Normung hochgesetzte Grenzdehnung für Stahl (nach DIN 1045-1 neu bzw. EC2: $\varepsilon_{su} = 25 \text{ mm/m}$) ergeben sich teilweise bereits für die Dehnungskennziffern 20 bis 33 keine Unterschiede mehr in den Ergebnissen, da der Beton gerissen und die Bewehrung bereits vollständig im plastischen Bereich ist. Aus diesem Grund wird vor der Berechnung geprüft, in welchem Bereich der DKZ sich die resultierenden Schnittgrößen nicht mehr ändern. In der anschließenden Rechnung kann dann der relevante Bereich mit mehr gerechneten Punkten dargestellt werden.

4.11 M_y / M_z -Linie

Mit diesem Menüpunkt wird die M_y - M_z -Linie berechnet, die praktisch einen horizontalen Schnitt durch das $N_x/M_y/M_z$ -Interaktionsdiagramm darstellt. Der Querschnitt befindet sich jeweils im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Einziger Eingangswert ist die Normalkraft, zusätzlich ist die Anzahl der Unterteilungen zu wählen.

Die Ergebnisse werden einmal in grafischer Form in einem extra Fenster ausgegeben (Metafile, Vektorgrafik), ebenso wie die numerischen Ergebnisse, die in einem extra Fenster mit allen wichtigen zugehörigen Größen tabellarisch dargestellt werden. In dieser Tabelle werden folgende Größen ausgegeben:

- Dehnungsebene mit e_0 , k_y und k_z
- Schnittgrößen N_x , M_y , M_z
- Dehnungskennziffer DKZ
- Winkel der Gesamtverkrümmung
- Anzahl der erforderlichen Spannungsintegrationen bei der Iteration

Liegt die vorgegebene Normalkraft über der Tragfähigkeit des Querschnitts, wird ein entsprechender Hinweis mit der Angabe der maximalen Zug- und Druck-Normalkraft ausgegeben.

4.12 Ergebnisse löschen

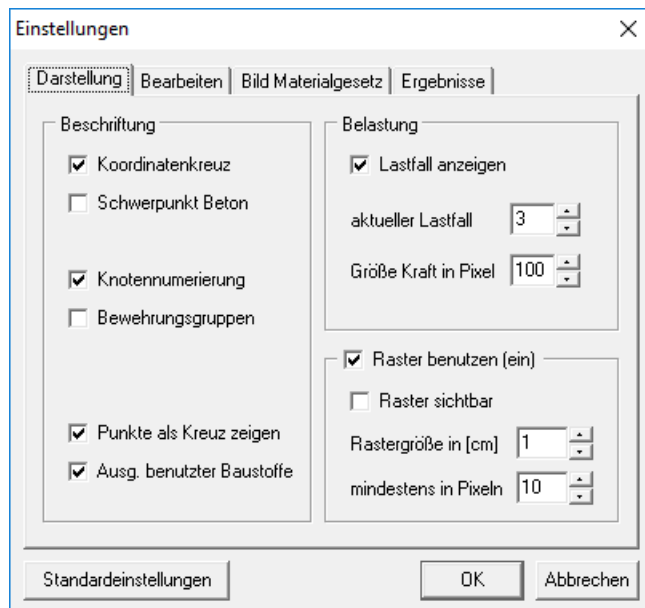
Mit diesem Menüpunkt werden die Ergebnisse der Dehnungsberechnung gelöscht sowie das Fenster für die Numerischen Ergebnisse geschlossen (**Shortcut Strg+L**). Die Extra-Fenster für die Ausgabe der M/k -Linien etc. werden davon nicht betroffen.

5 Menü Extras

5.1 Einstellungen

Bei Wahl dieses Menüpunktes (Menü **Extras**, Unterpunkt **Einstellungen**) erscheint ein Fenster mit mehreren Karteikarten, in denen Sie folgende Punkte einstellen können:

5.1.1 Darstellung



1. Koordinatenkreuz – Darstellung an / aus
2. Schwerpunkt Beton – Darstellung an / aus
3. Knotennummerierung – neben jedem Knoten rechts unten, beginnend bei 0
4. Bewehrungsgruppen – Nummer der Bewehrungsgruppe neben jedem Bewehrungsstab links unten, beginnend bei 1
5. Punkt als Kreuz zeigen – Darstellung an / aus
6. Ausgabe benutzter Baustoffe – Die aktuell im Querschnitt benutzten Baustoffe werden unten links im Fenster ausgegeben. Wird ein Querschnittselement markiert (z.B. Bewehrungsstab), so wird auch der zugehörige Baustoff unten links in Rot dargestellt.
7. Lastfall anzeigen – Darstellung an / aus
8. Größe Kraft in Pixel – Länge des Momentenvektors in der grafischen Darstellung
9. Raster benutzen – es kann ein Raster berücksichtigt werden, so dass beim Arbeiten mit der Maus (z.B. Erzeugen von Punkten, Verschieben etc.) immer auf „volle“ Zahlenwerte gerundet wird.
10. Raster sichtbar – Darstellung an / aus
11. Rastergröße – Einstellung der Rastergröße in [cm] und in [Bildschirmpixel]

Das Raster dient als Hilfestellung bei der Eingabe von Punkten oder z.B. beim Verschieben. Punkte, die Sie mit der Maus zeichnen, werden dann mit den Koordinaten der Rasterpunkte erzeugt.

Raster benutzen ein:

Beim Zeichnen mit der Maus werden die Rasterpunkte als Koordinaten benutzt

Raster benutzen aus:

Die Pixel-Koordinaten der Maus werden ohne Rundung in Real-Koordinaten des Systems umgerechnet. In der Anzeige unten links werden zwar nur drei Nachkommastellen angezeigt, die so erzeugten Koordinaten werden jedoch nicht auf 3 Stellen gerundet, sondern ungerundet benutzt.

Rastergröße in [cm]

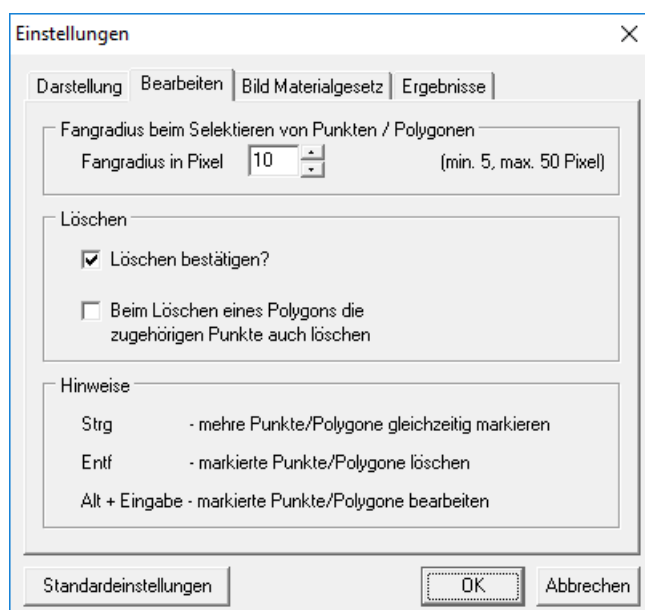
Wollen Sie ein System erstellen, das in jeweils gleichem Abstand einen Querschnittspunkt aufweist, benutzen Sie diese Einstellung. Allerdings wird als kleinster Pixel-Abstand des Rasters immer 5 Pixel gesetzt, da ansonsten die Erkennbarkeit stark leidet.

Mindestgröße in Pixeln

Das Programm versucht zuerst, die von Ihnen gewählten Rastergröße (in cm) darzustellen. Ist dies wegen des aktuellen Vergrößerungsfaktors nicht möglich, werden die Koordinaten bei Zehner-Vielfachen von 1, 2 oder 5 erzeugt. Bei gewähltem Mindestabstand von 10 Pixeln kann der wirkliche Abstand der Rasterpunkte deshalb zwischen 10 und ca. 24 Pixel schwanken.

Das engste Raster ist mit mindestens 5 Pixeln vorgegeben, da bei einem kleineren Abstand ein gutes und schnelles Zeichnen mit der Maus nicht mehr sinnvoll ist.

5.1.2 Bearbeiten

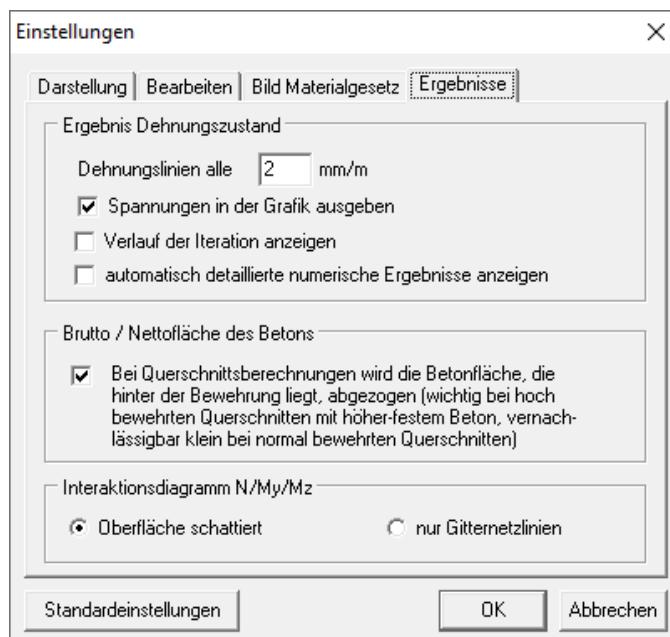


1. Fangradius – Legt fest, in welchem Abstand (in Pixeln) ein Punkt oder ein Polygon noch markiert (selektiert) werden soll.
2. Löschen bestätigen – vor dem Löschen von Punkten oder Polygonen erfolgt eine Sicherheitsabfrage
3. Beim Löschen eines Polygons können die zugehörigen Punkte ebenfalls gelöscht werden. Beachten Sie, dass die zu löschenden Punkte nicht auch Bestandteil eines anderen Polygons sind.

5.1.3 Bild Materialgesetz

Hier können Farben, Linienstärke und Fenstergröße (Auflösung) für die Darstellung der Materialgesetze eingestellt werden. Diese Werte werden auch für die Darstellung der M/k-Linie, M/N-Linie und My/Mz-Linie benutzt.

5.1.4 Ergebnisse



Dehnungslinien:

Hier wählen Sie, ob und in welchem Abstand bei der Ergebnisausgabe die Dehnungslinien angezeigt werden. Unabhängig davon werden immer die Dehnungsnulllinie sowie die am stärksten beanspruchte Beton- und Bewehrungsfaser mit einer Dehnungslinie gekennzeichnet.

Bei Ergebnissen mit großen Dehnungen (z.B. im Grenzzustand der Tragfähigkeit) und gleichzeitig sehr kleinen Abständen der Dehnungslinien (z.B. 0,1 mm/m) können so viele Dehnungslinien dargestellt werden, dass die Grafik nicht mehr korrekt dargestellt wird. In diesem Fall ist der Abstand der Dehnungslinien zu erhöhen.

Für die Qualität der animierten 3D-Darstellung der Spannungsverteilung über den Querschnitt ist diese Einstellung ebenfalls wichtig, da von ihr die Qualität der 3D-Spannungsfläche abhängt. Je feiner die Unterteilung durch Dehnungslinien ist, desto besser kann z.B. beim Beton der parabelförmige Teil dargestellt werden. Ein Zuviel an Dehnungslinien ergibt jedoch einen hohen Rechenaufwand (langsamere Animation), außerdem wird die Spannungsverteilung dadurch leicht unübersichtlich.

Spannungen in der Grafik ausgeben

Nach einer Berechnung werden von jedem Polygon und von jeder Bewehrungsgruppe die Punkte mit der maximalen und mit der minimalen Spannung beschriftet.

Verlauf der Iteration:

Bei Problemen mit der Dehnungsberechnung (Nichtkonvergenz beim Dehnungszustand, Sicherheitsnachweis) kann hier eingestellt werden, ob die Zwischenergebnisse während der Iteration ausgegeben werden sollen. So erhält man einen groben Überblick, wo das Problem der Nichtkonvergenz evtl. liegen könnte.

Numerische Ergebnisse

In diesem Fall werden die detaillierten numerischen Ergebnisse automatisch nach einer durchgeführten Berechnung ausgegeben.

Brutto/Nettofläche des Betons

Unterhalb eines definierten Bewehrungspunktes befindet sich im Normalfall noch der Beton. An dieser Stelle kann gewählt werden, ob dieser Betonanteil berücksichtigt oder abgezogen werden soll. Um ein Rechenergebnis per Handrechnung zu überprüfen, kann es sinnvoll sein, mit der Brutto-Betonfläche zu rechnen (keine Aussparung). Insbesondere für höher bewehrte Querschnitte mit hochfestem Beton sollten die Aussparungen für die Bewehrung jedoch nicht mehr vernachlässigt und eine Rechnung mit der Nettobetonfläche durchgeführt werden. Bei hochbewehrten Stützen kann die Tragfähigkeit ansonsten schnell um 10% und mehr überschätzt werden.

In der detaillierten Ausgabe der numerischen Ergebnisse werden die Bewehrungspunkte markiert, für die eine Aussparung definiert wurde.

Interaktionsdiagramm:

Hier kann die Darstellung des 3D-Interaktionsdiagramms eingestellt werden. Im ersten Fall werden eigene Routinen des Programms genutzt. Bei Wahl von OpenGL werden entweder die Betriebssystemroutinen oder die Routinen der Grafikkarte zur Darstellung genutzt.

5.2 Messen

Wählen Sie diesen Menüpunkt, um den Abstand zwischen zwei Punkten oder den Winkel mit drei Punkten zu bestimmen. Nach Wahl einer dieser Funktionen ändert sich der Mauscursor. Mit der rechten Maustaste kann abgebrochen werden.

Shortcuts	Strg + A	Abstand messen
	Strg + W	Winkel messen

5.3 Beton-Nettofläche

Wie zuvor bereits erklärt, befindet sich im Normalfall unterhalb eines definierten Bewehrungspunktes noch der Beton. Im Menü **Extras** => Unterpunkt **Einstellungen** => Karteikartenreiter **Ergebnisse** kann gewählt werden, ob dieser Betonanteil berücksichtigt oder abgezogen werden soll. Diese Berücksichtigung erfolgt jedoch erst intern während der Rechnung und ist damit für den Benutzer nur in der Ausgabe der detaillierten Ergebnisse sichtbar (dort werden die Bewehrungsstäbe, bei denen eine Aussparung im Beton berücksichtigt wurde, mit einem Sternchen * markiert).

Mit dem hier vorgestellten Menüpunkt **Extras** => **Beton-Nettofläche** können die Aussparungen in der INCA2-Datei direkt erzeugt werden, indem an der Stelle der Bewehrungspunkte weitere Punkte mit einer negativen Fläche und der Materialeigenschaft des darunter liegenden Betonpolygons erzeugt werden. Dieser Menüpunkt sollte aber nur zur Überprüfung der genauen Ergebnisse dienen, da sich die Bewehrung des INCA2-Querschnitts anschließend etwas schwieriger händeln lässt. Schließlich liegen jeweils zwei Punkte übereinander, so dass das Selektieren relativ schwierig fällt. Auch bei der Bemessung können sich leichter Fehler durch den Benutzer ergeben, da sowohl die Bewehrungsgruppe als auch die Gruppe mit den zugehörigen Aussparungen angegeben werden muss.

5.4 Übersicht Shortcuts

Im Programm implementierte Shortcuts:

- Strg + Maustaste mehrere Punkte gleichzeitig markieren
- Entf markierte Punkte / Polygone löschen
- Alt + Enter Eigenschaften, markierte Punkte / Polygone bearbeiten
- F7 Eingabefenster für Einwirkungen öffnen
- F9 Dehnungszustand berechnen
- Strg + F9 Dehnungszustand für alle Lastfälle berechnen

- Strg + N Datei Neu
- Strg + O Datei Öffnen
- Strg + S Datei Speichern
- Strg + P Grafik Drucken (Print)
- Strg + D Eingabedaten Grafik in Zwischenablage
- Strg + L Ergebnisse Löschen
- Strg + E Fenster Einstellungen öffnen

- Strg + A Abstand messen
- Strg + W Winkel messen

- B Bemessung durchführen
- N Ausgabe der numerischen Ergebnisse
- M Berechnung der Mk-Linien
- S Sicherheitsnachweis

6 Modellierung der Baustoffe

6.1 Linear-Elastisch

Beschreibung:

- linear-elastisch, Hooke'sches Gesetz voll gültig

Anwendung:

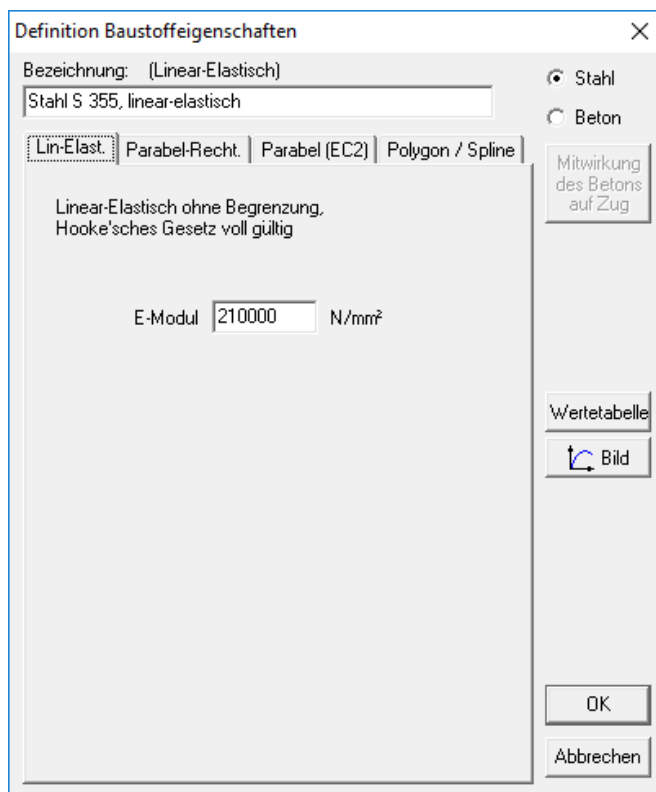
- linear-elastische Rechnungen, z.B. Stahl im elastischen Zustand, ohne Limitierung

Vorteil:

- schnelle Berechnung des Dehnungszustandes ohne Iteration

Nachteil:

- nur für einfache Rechnungen ohne Material-Nichtlinearitäten

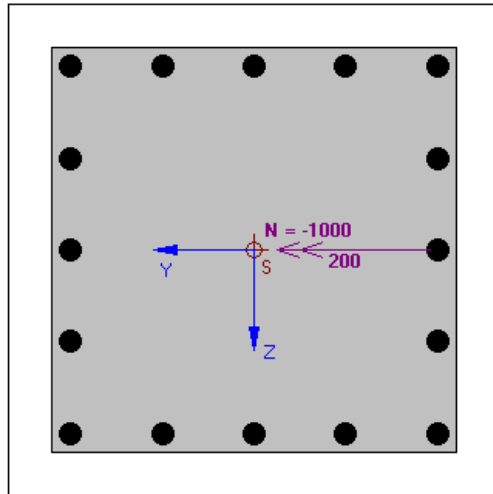


Einziger Eingabewert für dieses Materialgesetz ist der E-Modul.

Pseudobaustoff:

Für einige Zwecke kann es sinnvoll sein, ein Pseudo-Material für z.B. Umrandungen o. ä. zu erstellen, welches die Rechnung nicht beeinflusst. Im folgenden Bild ist ein Stützenquerschnitt abgebildet, dessen Betondeckung bis zur Bügelbewehrung beim Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht berücksichtigt wird. Die österreichische Normung sieht einen derartigen Sicherheitsaspekt bei hochbewehrten Stützen vor, da sich in Versuchen gezeigt hat, dass die Betondeckung bei einigen Stützen kurz vor Erreichen der maximalen Belastung abgeplatzt ist. Um in diesem Fall die Umrandung zwecks

besserem Verständnis darzustellen, kann ein Pseudomaterial mit dem E-Modul $E = 0$ definiert werden. Damit diese Eingabe vom Programm nicht zurückgewiesen wird, muss der Name des Materials den Begriff „PSEUDO“ enthalten.

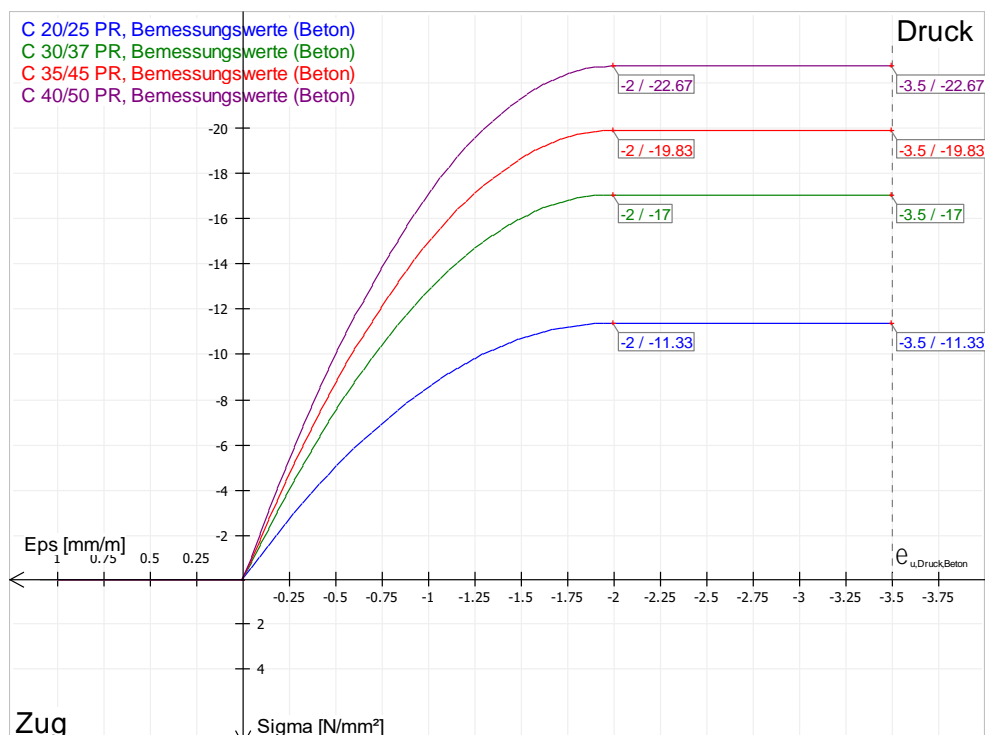


C 40/50 - B 50
BSt 550
Pseudobaustoff für Umrandung

6.2 Parabel-Rechteck

Beschreibung:

- besteht aus einer Parabel im ersten Teil und einem linearen zweiten Abschnitt
- unterschiedliches Verhalten im Druck- und im Zugbereich
- Mitwirkung des Betons in der gerissenen Betonzugzone nach Quast und Espion möglich



Anwendung:

- nichtlineare Berechnungen vor allem für Querschnittsnachweise (Tragfähigkeit im ULS) mit den Spannungsdehnungslinien nach EC2, für Beton und für Stahl / Bewehrung
- Verformungsberechnungen (Momenten-Verkrümmungs-Linie) mit entsprechend angepassten Eingangswerten

Vorteil:

- einfache Definition der üblichen rechnerischen Spannungs-Dehnungslinien
- Anpassung der Völligkeit der Parabel über den Exponenten k
- Anpassung der Steigung im zweiten linearen Abschnitt (z.B. für den Verfestigungsbereich von Betonstahl)

Nachteil:

- Anpassung der Spannungsdehnungslinie an Messwerte aus Experiment nicht immer exakt möglich

Definition Baustoffeigenschaften

Bezeichnung: (Parebel-Rechteck)

C 35/45 PR, Bemessungswerte

Lin-Elast. Parebel-Recht. Parebel [EC2] Polygon / Spline

Vereinfachte Parabel nach DIN 1045 (neu), zweiter Abschnitt waagrecht oder linear veränderlich

Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone nach QUAST

☒ Vereinfachte Definition

	Druck	Zug
Spannung bei Erreichen der Fließgrenze in N/mm²	-19.8333	0
Dehnung bei Erreichen der Fließgrenze in mm/m	-2	0
Exponent k (bestimmt die Völligkeit der Parabel)	2	2
E-Modul im KS-Ursprung in [N/mm²]	19833	nicht def.
Spannung Sigma.2	-19.8333	0
Dehnung eps.2	-7	5
E-Modul im 2. Abschnitt in [N/mm²]	0	0

Wertetabelle

Bild

OK

Abbrechen

Mit diesem Materialgesetz haben Sie die Möglichkeit, für die Druck- und für die Zugseite einen eigenen Verlauf anzugeben. Der E-Modul, der bei Änderung der Eingabewerte jeweils neu berechnet wird, sollte allerdings im Zug- und im Druckbereich am Koordinatenursprung gleich sein.

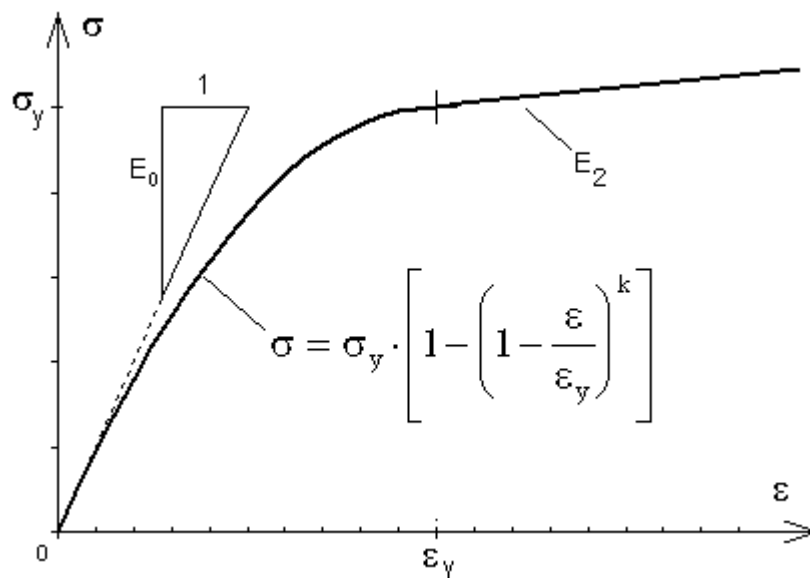
Der Check-Button **Vereinfachte Definition** erleichtert die Eingabe, wenn der zweite Abschnitt des Materialgesetzes genau waagrecht verläuft und der E-Modul im Koordinaten-Ursprung auf Zug- und Druckseite den gleichen Wert besitzt. Wie im obigen Screenshot zu sehen, entfallen damit die Eingabe-

bewerte für den zweiten Abschnitt. Außerdem muss für die Zugseite nur die Zugdehnung ε_y eingegeben werden, die zugehörige Spannung wird vom Programm berechnet.

Oben rechts wählen Sie die Baustoffart (Beton oder Stahl). Beim Beton mit Zugfestigkeit geben Sie bitte weitere Parameter für die Mitwirkung des Betons in der gerissenen Betonzugzone ein (Button *Mitwirkung des Betons auf Zug*).

Der Vorteil dieser Materialdefinition liegt in der einfachen Anpassungsfähigkeit der Parabel, die durch den Parameter k (Exponent) in weiten Bereichen variiert werden kann.

Das übliche Parabel-Rechteckdiagramm wurde im Programm INCA2 erweitert, indem der zweite Teil nicht wie üblich konstant, sondern linear verläuft. Damit ist zum Beispiel eine einfache Anpassung an die im plastischen Bereich leicht ansteigende Kennlinie des Betonstahls möglich.



Der Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung im Parabel-Teil wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\sigma = \sigma_y \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \right)^k \right]$$

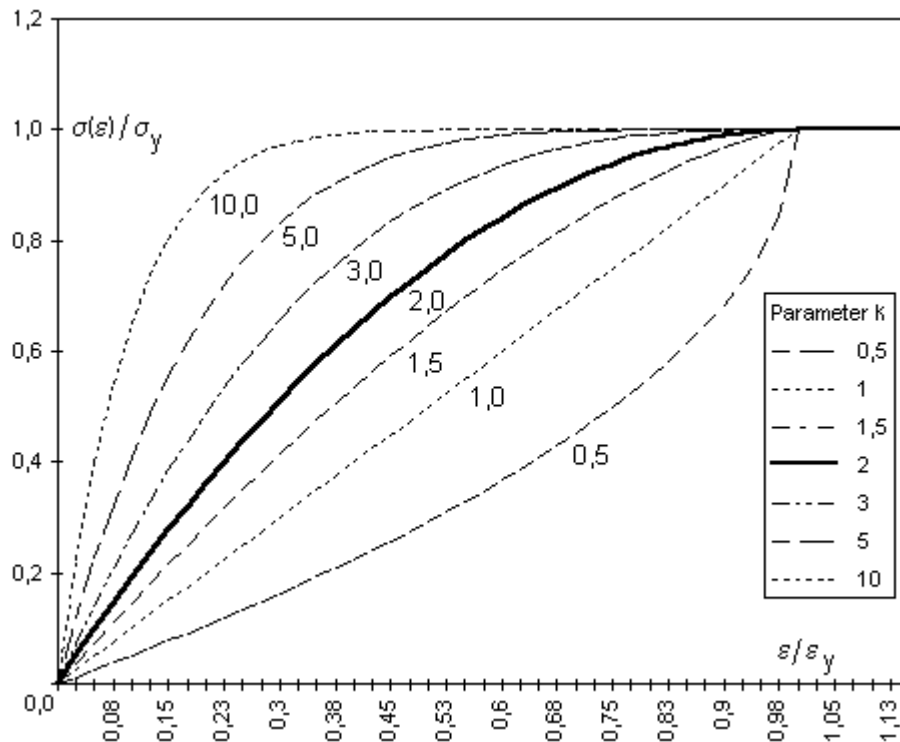
mit σ_y = Fließspannung

ε_y = Fließdehnung

Verlauf des Parabel-Rechteck-Diagramms für verschiedene Parameter k

mit $k = 0,5 \quad 1,0 \quad 1,5 \quad 2,0 \quad 3,0 \quad 5,0 \quad 10,0$

(Spannung bzw. Dehnung jeweils normiert)



Durch Ableiten der oben genannten Formel nach Epsilon erhält man als Steigung der Funktion den E-Modul:

$$(E \cdot \epsilon)' = (\sigma)'$$

$$E = \sigma_y \cdot k \cdot \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_y}\right)^{k-1} \cdot \frac{1}{\epsilon_y}$$

Die Anfangssteigung bei $\epsilon = 0$ ergibt sich damit zu

$$E_0 = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} \cdot k$$

Umgestellt erhält man damit auch den Parameter k zu vorgegebenem E_0 .

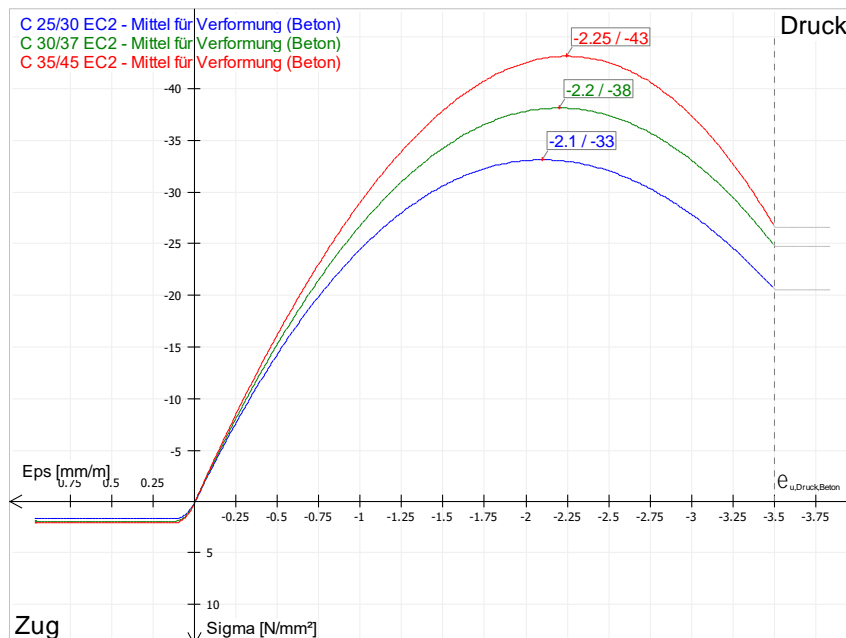
Lesen Sie dazu bitte auch Heft 415 DAfStb, Seite 11 – 21.

Wichtig für Verformungsberechnungen von Stahlbetonquerschnitten (z.B. mit dem Programm Stab2D-NL) ist die Mitwirkung des Betons in der gerissenen Betonzugzone. Lesen Sie diesen Punkt bitte ebenfalls sorgfältig.

6.3 Parabel (EC2)

Beschreibung:

- Druckbereich: Parabel-ähnliche, gebrochen-rationale Funktion gemäß EC2
- Zugbereich: Parabel-Rechteck-Diagramm (mit waagrechtem zweiten Abschnitt)
- Mitwirkung des Betons auf Zug in der gerissenen Betonzugzone nach Quast und Espion



Anwendung:

- **nichtlineare Verformungsberechnungen** sowie nichtlineare / plastische Schnittgrößenermittlung, z.B. mit Stab2D-NL, Berechnung für den Beton mit der versteifenden Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone durch Ansatz einer rechnerischen Betonzugspannung
- **Spannungsermittlung, insbesondere im Gebrauchszustand** z.B. für Spannungsnachweis Beton, Nachweis der Rissbreite, Ermüdung oder ähnliches.

Die versteifende Mitwirkung des Betons ist in diesem Fall auf Zug zu Null zu setzen ($f_{ct} = 0$), so dass die Spannungsermittlung im Riss erfolgt!

Vorteil:

- einfache Definition der Spannungs-Dehnungs-Linie für Verformungsberechnungen

Nachteil:

- Definitionsbereich beachten (Grenzdehnungen!), da die Funktion eine weitere Nullstelle sowie eine Unendlichkeitsstelle (Asymptote) besitzt. Wird die Grenzdehnung für Beton auf der Druckseite zu hoch definiert, so kann es passieren, dass trotz negativer Dehnung eine positive Spannung ermittelt wird. Dieser Umstand wird jedoch in INCA2 vor jeder Berechnung geprüft und gegebenenfalls darauf hingewiesen.
- Anpassung der Spannungsdehnungslinie (Messwerte aus Experiment) nicht immer exakt möglich

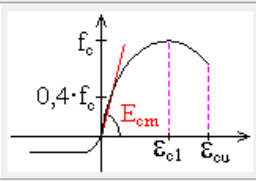
Definition Baustoffeigenschaften

Bezeichnung: (Parabel nach EC2)
C 35/45 EC2 - Mittel für Verformung

Lin-Elast. | Parabel-Recht. | **Parabel (EC2)** | Polygon / Spline

Parabel nach EC2 bzw. DIN 1045 (neu) zur nicht-linearen Schnittgrößen-ermittlung

Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone nach QUAST



Druck

E-Modul E.c: 32528.19 N/mm²

Tangentenmodul im Ursprung $E_{cm} = 1,1 * E.c =$ 35781.01 N/mm²

Spannung f.c: -43 N/mm²

Dehnung eps.c1: -2.25 mm/m

Zug (Parabel-Rechteck-Diagramm)

Spannung bei Erreichen der Fließgrenze in N/mm²: 2.0476

Dehnung bei Erreichen der Fließgrenze in mm/m: 0.1071

Exponent k (bestimmt die Völligkeit der Parabel): 1.8723

für Verformungsrechnung (M-k-Linie), f.ct > 0

Mitwirkung des Betons auf Zug

Wertetabelle

Bild

OK

Abbrechen

Die drei Parameter für die Druckseite können dem EC2 entnommen werden. Bei Eingabe des E-Moduls ist zu beachten, dass die interne Modellierung in INCA2 derzeit noch mit dem Faktor 1,1 für die gebrochen-rationale Funktion erfolgt. Die aktuelle Ausgabe des EC2 berücksichtigt jedoch einen Faktor von 1,05. Dementsprechend ist der E-Modul anzupassen, was in den vordefinierten Baustoffen bereits erfolgt ist. Siehe hierzu auch die dem Programm beiliegende Excel-Datei.

Die Zugseite zur Modellierung der versteifenden Mitwirkung der Betonzugzone nach QUAST wird als Parabel-Rechteck-Diagramm mit einem waagerechten zweiten Ast definiert.

Oben rechts wählen Sie die Baustoffart (Beton oder Stahl). Beim Beton mit Zugfestigkeit geben Sie bitte weitere Parameter für die Mitwirkung des Betons in der gerissenen Betonzugzone ein (Button **Mitwirkung des Betons auf Zug**). Beachten Sie bitte dringend die dortigen Erläuterungen!

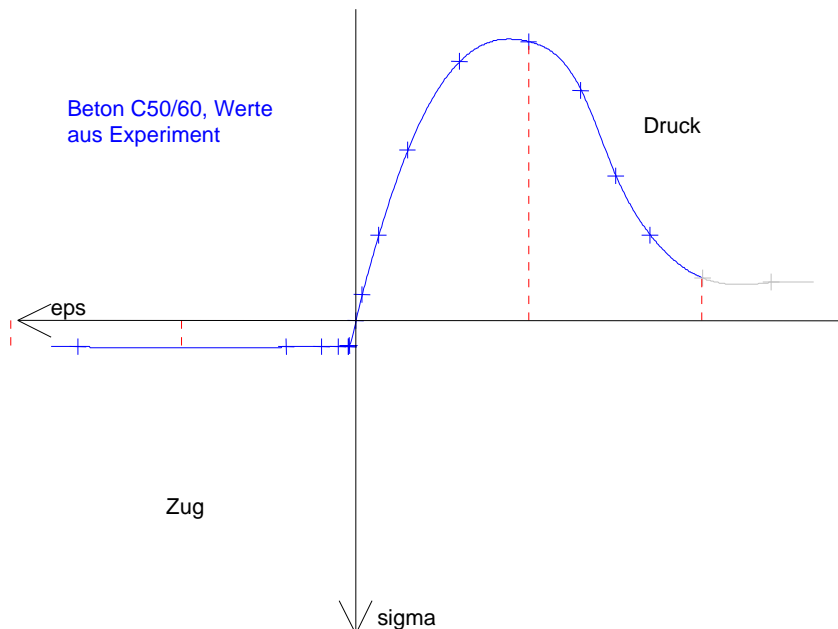
Im Fensterbereich für die Eingabewerte der Druckseite finden Sie einen **Info-Button**, über den Sie weitere Informationen zum Materialgesetz erhalten. Hier wird auch die Druckfehlerberichtigung der DIN 1045-1 sowie der Übergang zum aktuellen EC2 kurz erläutert.

Mit dem zweiten **Info-Button** erhalten sie eine Kurz-Information zur versteifenden Mitwirkung des Betons auf Zug und Anhaltspunkte für sinnvolle Eingabewerte. In Blau wird weiter unten im Fenster eine Hilfestellung ausgegeben. Ist eine Zugfestigkeit definiert ($f_{ct} > 0$) dann sollte dieser Baustoff vorzugsweise für Verformungsrechnungen benutzt werden (z.B. über Mk-Linien oder mittels Stab2D-NL). Ist keine Zugfestigkeit definiert ($f_{ct} = 0$), dann wird die Rechnung direkt im Riss durchgeführt, so dass hiermit exakt die maximale Spannung und Dehnung ermittelt werden kann, z.B. für Nachweise der Ermüdungsfestigkeit oder der Rissbreite.

6.4 Polygon / Spline

Beschreibung:

- Polygon / Spline mit beliebigen Messwerten aus einem Experiment
- Mitwirkung des Betons auf Zug in der gerissenen Betonzugzone nach Quast und Espion



Anwendung:

- Nachrechnung von Experimenten (Verformung, Traglast)

Vorteile:

- exakte Anpassung der Spannungsdehnungslinie an experimentelle Daten

Nachteile:

- aufwändig in der Eingabe durch viele Messwerte (max. 100)
- bei sehr vielen Messwerten geringfügig langsamer in der Berechnung

In diesem Fenster haben Sie die Möglichkeit, maximal 100 Wertepaare (ε / σ) einzugeben. Die Reihenfolge der Wertepaare bei der Eingabe ist egal, da diese im Anschluss der Größe nach geordnet werden.

Die Wertepaare beschreiben einen Polygonzug, durch den zum Ausgleich ein **Spline** gelegt werden kann. Die Spline-Interpolation erfolgt wie üblich mit den Randbedingungen, dass die Verkrümmung (2. Ableitung) an den Enden rechts und links gleich Null ist.

Definition Baustoffeigenschaften

Bezeichnung: (Polygon/Spline)
 Bewehrung d = 10 mm, Experiment

☒ Lin-Elast.
 ☐ Parabel-Recht.
 ☐ Parabel (EC2)
 ☒ Polygon / Spline

☒ Spline-Interpolation durch die Punkte

	Epsilon	Sigma
2	-37.5	-575
3	-27	-570
4	-20.7	-565
5	-12.4	-555
6	-8.5	-545
7	-6.7	-535
8	-5.6	-525
9	-4.05	-500
10	-3.2	-475
11	-2.69	-450
12	-2.35	-425
13	-2.125	-400
14	-1.95	-375
15	-1.79	-350
16	-1.52	-300
17	-0.75	-150
18	0	0

Dehnungen in [mm/m]
 Spannungen in [N/mm²]

Mitwirkung des Betons auf Zug

Über die Buttons „**Einfügen**“ und „**Kopieren**“ können Werte von Excel eingefügt werden oder in die Windows-Zwischenablage kopiert werden. So ist es sehr einfach möglich, z.B. für die Heißbemessung im Stahlbau oder auch Stahlbetonbau in Excel je nach Temperatur die Spannungs-Dehnungs-Linie zu ermitteln und diese mit ein paar Mausklicks nach INCA2 zu kopieren.

6.5 Baustoff Beton – Materialkennwerte

Da immer wieder Fehler bei der Modellierung der Betoneigenschaften gemacht werden, hier ein paar erläuternde Worte, wie die Definition nach Eurocode 2 (EC2) verläuft.

6.5.1 Bemessungswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Diese Baustoffkennwerte werden für die Bemessung eines Stahlbetonquerschnitts im Grenzzustand der Tragfähigkeit benutzt. Damit wird die untere Grenze der Festigkeit des Betons abgedeckt, die man auch unter den schlechtesten Bedingungen (ungünstige Mischung, mäßige Verarbeitung etc.) mindestens noch erwarten kann.

Zur Ermittlung dieser Rechenfestigkeit nach EC2 wird die charakteristische Festigkeit f_{ck} (5%-Fraktile) durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_c = 1,5$ dividiert und mit dem Dauerfestigkeitsbeiwert $\alpha_{cc} = 0,85$ multipliziert (α_{cc} gemäß Nationalem Anhang, landesspezifisch, für Deutschland $\alpha_{cc} = 0,85$).

Für Fertigteilwerke mit werkmäßiger Herstellung und besonderer Überwachung der Betonherstellung kann ein reduzierter Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_c = 1,35$ berücksichtigt werden.

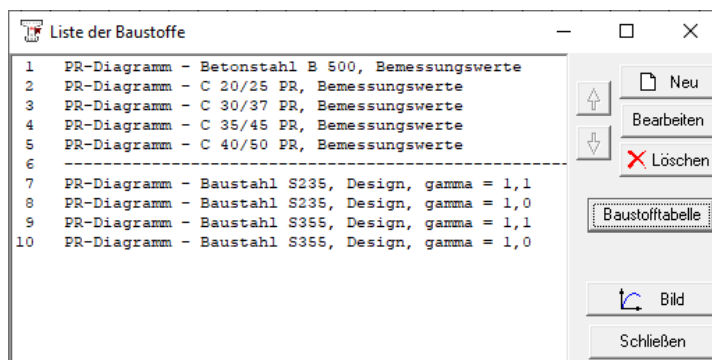
Die Zugfestigkeit des Betons wird bei den Bemessungswerten nicht berücksichtigt, da der Nachweis im schwächsten Querschnittsteil, d.h. im Riss durchgeführt wird, wo nur die Betondruckzone und die Bewehrung zur Aufnahme der Beanspruchung wirkt.

Beispiel: Der Rechenwert der Betonfestigkeit ergibt sich für einen C 30/37 damit zu:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \alpha = \frac{30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,5} \cdot 0,85 = 17,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Da beim Beton nur die maximale Spannung / Festigkeit mit einem Teilsicherheitsbeiwert abgemindert wird, die zugehörige Dehnung jedoch gleich bleibt, muss sich konsequenterweise auch der rechnerische E-Modul des Betons verkleinern. Bei dem genannten C30/37 besitzt der E-Modul für die Bemessungswert deshalb den Wert $E_c = 17.000 \text{ N/mm}^2$.

In INCA2 sowie in Stab2D-NL sind die Bemessungswerte für die Betonsorten C12/15 bis C100/115 vordefiniert und in der Datei **baustoffe.inc** abgespeichert. Baustoffe aus dieser Datei können über den Button **Baustofftabelle** in den aktuellen Datensatz übernommen werden.



Mögliche Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte für Beton:1. Fertigteile

Für Fertigteile mit werksmäßiger ständiger Überwachung (Teile mit zu geringer Festigkeit müssen aussortiert werden!).

$$\gamma_c = 1,35$$

2. Außergewöhnliche Belastung

Bei einer außergewöhnlichen Belastungssituation darf für den normalen Stahlbeton mit einem kleineren Teilsicherheitsbeiwert gerechnet werden:

$$\gamma_c = 1,3$$

3. Veränderung von γ_c bei steigender Betonfestigkeit (alte DIN1045-1) – inzwischen nicht mehr gültig!

In der inzwischen nicht mehr gültigen DIN 1045-1, Ausgabe 2001 (und Folgeausgaben, gültig bis 2012), wurde für Betone oberhalb C 50/60 ein ansteigender Teilsicherheitsbeiwert definiert.

$$\gamma_c = \frac{1,5}{1,1 - \frac{f_{ck}}{500}} \geq 1,5$$

Beispiel:	C55/67	$\gamma_c = 1,515$
	C100/115	$\gamma_c = 1,667$

4. Unbewehrte Bauteile (DIN 1045-1)

$\gamma_c = 1,8$	Für ständige/veränderliche Lasten
$\gamma_c = 1,55$	Für außergewöhnliche Lasten

5. Sonderbauwerke des Wasserbaus

Gemäß DIN 19702 „Standicherheit von Massivbauwerken im Wasserbau“ dürfen in Abhängigkeit der Bemessungssituation (BS-P / BS-T / BS-A) jeweils angepasste Teilsicherheitsbeiwerte für den Beton und für die Bewehrung genutzt werden.

Alle vorgenannten Änderungen (z.B. γ_c für Fertigteile, Rechnung nach alten oder anderen Normungen) müssen vom Nutzer selber vorgenommen werden. Insbesondere können trotz der europäischen Harmonisierung der Normung Abweichungen auftreten, da im Nationalen Anhang gegebenenfalls andere Beiwerte definiert sind (z.B. α_{cc}). Auch bei zukünftigen Anpassungen der Normungen sind die Baustoffkennwerte jeweils mit dem aktuellen Stand der Normung zu vergleichen und ggfs. anzupassen. Die standardmäßig in der Datei [Baustoffe.inc](#) aufgeführten Baustoffe sollten deshalb immer auf Aktualität und Richtigkeit überprüft werden!

6.5.2 Mittelwerte der Baustoffeigenschaften

Die Mittelwerte der Baustoffeigenschaften werden für folgende **Anwendungsfälle** benutzt:

1. Verformungsberechnungen und Schnittgrößenermittlungen am Gesamtsystem, mit Berücksichtigung der versteifenden Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone
z.B. mit dem Programm Stab2D-NL für ebene Rahmensysteme
2. Ermittlung der Spannungen, im Riss mit $f_{ct} = 0$,
z.B. für Ermüdungsberechnungen, Rissbreitennachweise, Nachweis von Spannungen im Gebrauchszustand

Anwendungsfall 1 – Verformungsberechnungen und Schnittgrößenermittlungen

Für eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnungen und Schnittgrößenermittlung von Stahlbetontragwerken ist die Ermittlung einer realistischen, beanspruchungsabhängigen Steifigkeit von hoher Wichtigkeit. Hierfür werden die Mittelwerte der Baustoffe genutzt, die das mittlere Baustoffverhalten abbilden.

Üblich beanspruchte Stahlbetonbauteile sind gerissen und befinden sich im Zustand II, so dass eine realitätsnahe Modellierung der gerissenen Betonzugzone erforderlich ist. Dem Beton wird für Anwendungsfall 1 in der Zugzone eine gewisse versteifende Mitwirkung zugewiesen, da der Beton zwischen zwei Rissen immer noch ungerissen ist, sich im Zustand I befindet und damit der Balken an dieser Stelle eine höhere Steifigkeit besitzt als im Riss daneben. Bei der Berechnung mit Betonzugfestigkeit wird die Methode nach QUAST und ESPION der „verschmierten Risse“ benutzt, bei der eine mittlere Betonzugspannung angesetzt wird und damit die Risse sowie die dazwischen liegenden ungerissenen Bereiche „gemittelt“ werden. Als guter Erfahrungswert hat sich jeweils 1/20 bis 1/30 der Druckspannung sowie 1/20 bis 1/30 der Dehnung im Scheitel der Parabel herausgestellt. Nähere Erläuterungen zum Mitwirkungsgesetz finden Sie unter Punkt **6.7 Mitwirkung des Betons in der gerissenen Betonzugzone**.

Die mit INCA2 ausgelieferte Baustoff-Datei enthält die Mittelwerte aller gängigen Betonsorten nach EC2. Die Zugspannung $f_{ct,cal}$ bzw. die Zugdehnung $\varepsilon_{ct,cal}$ sind brauchbare Erfahrungswerte der Autoren, die aber im Einzelfall recht stark schwanken können. Eine schlechte Nachbehandlung, frühe Austrocknung des Betons, Frosteinwirkung auf den jungen Beton oder ähnliche Einflüsse können die versteifende Mitwirkung der Betonzugzone deutlich reduzieren. Auch das Mitwirkungsgesetz des Betons (Abnahme bei größeren Dehnungen) sollte vom Benutzer im Bedarfsfall angepasst werden.

Anwendungsfall 1a – Allgemeine Verformungsberechnungen und Schnittgrößenermittlungen

Unter diesem Anwendungsfall werden alle Balkensysteme oder mäßig schlanken Rahmentragwerke zusammengefasst, die keinen wesentlichen Einfluss aus Theorie 2. Ordnung aufweisen. In diesem Falls sind die normalen Mittelwerte der Baustoffeigenschaften zu verwenden, die in der Datei **baustoffe.inc** vordefiniert sind.

Anwendungsfall 1b – Stützenbemessung (Theorie 2. Ordnung)

Wenn für eine Stütze oder schlanke Rahmensysteme die Schnittgrößen bestimmt werden, hängt das Ergebnis bei großer Schlankheit sehr stark von der Verformung des Systems ab. Es handelt sich damit um ein verformungsbeeinflusstes Problem. Ein schlechter Beton mit geringem E-Modul bedingt eine große Verformung und damit eine Steigerung der Beanspruchung. Da Stützen relativ kleine Bauteile sind, kann es ohne weiteres vorkommen, dass das gesamte Bauteil aus einer Marge schlechten Betons hergestellt wird. Da in diesem Fall die Festigkeit und die Steifigkeit an der unteren Grenze des Schwankungsbereiches sind und diese Werte eine sicherheitsrelevante Eingangsgröße darstellen, sind die Werte mit γ_c abzumindern. Die Rechenfestigkeit des Betons für die Verformungsberechnung ist dann wie folgt anzusetzen:

$$\text{Festigkeit} \quad f_c = f_{cm} / \gamma_c$$

$$\text{E-Modul} \quad E_c = E_{cm} / \gamma_{cE}$$

mit f_{cm} = Mittelwert der Betondruckfestigkeit

$$\gamma_c = \gamma_{cE} = 1,5 \quad \text{für Deutschland, siehe jeweils Nationaler Anhang zum EC2}$$

Beispiel: Der Rechenwert der Betondruckfestigkeit ergibt sich für einen C 30/37 damit zu:

$$\frac{f_{cm}}{\gamma_c} = \frac{38 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,5} = 25,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

mit $f_{cm} = 30 + 8 = 38 \text{ N/mm}^2$

Eine Zugfestigkeit wird berücksichtigt, da die versteifende Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen auch bei einem „schlechten“ Beton immer noch gegeben ist. Auch hier kann der Erfahrungswert von jeweils 1/20 bis 1/30 der Werte der Druckfestigkeit angenommen werden.

Wichtig bei einer derartigen Berechnung ist es allerdings, dass der Bemessungswiderstand des Querschnitts nicht überschritten wird. Da die Mk-Linie mit einer Rechenfestigkeit $f_{cd, \text{Stütze}} = f_{cm} / 1,5$ (mit f_{cm} und ohne Dauerfestigkeitsbeiwert $\alpha_{cc} = 0,85$) ermittelt wurde, wird das maximale Biegemoment der Mk-Linie über dem Biegemoment M_{Rd} der Querschnittstragfähigkeit liegen. Aus diesem Grund muss nach der Verformungs- und Schnittgrößenberechnung ein Sicherheitsnachweis mit $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / 1,5$ erfolgen, dass der Querschnitt die ermittelten Beanspruchungen auch aufnehmen kann.

Wie man sieht, hat man es hier mit 2 unterschiedlichen Baustoffeigenschaften zu tun, zwischen denen man je nach Berechnungsgang hin und her wechseln muss. Ein entsprechendes Beispiel mit möglichen Vereinfachungen ist in den Beispielen in den nachfolgenden Kapiteln ebenfalls enthalten.

Siehe hierzu auch EC2-1-1, Abschnitt 5.8.6:

5.8 Berechnung von Bauteilen unter Normalkraft nach Theorie II. Ordnung

...

5.8.6 Allgemeines Verfahren

(1)P Das allgemeine Verfahren basiert auf einer nichtlinearen Schnittgrößenermittlung, die die geometrische Nichtlinearität nach Theorie II. Ordnung beinhaltet. Es gelten die allgemeinen Regeln für nichtlineare Verfahren nach 5.7.

(2)P Für die Schnittgrößenermittlung müssen geeignete Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Stahl verwendet werden. Kriechauswirkungen sind zu berücksichtigen.

(3) $\overline{\text{AC}}$ Die in 3.1.5, Gleichung (3.14) und 3.2.7 (Bild 3.8) $\overline{\text{AC}}$ dargestellten Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Stahl dürfen verwendet werden. Mit auf Grundlage von Bemessungswerten ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagrammen darf der Bemessungswert der Tragfähigkeit direkt ermittelt werden. In Gleichung (3.14) und im k -Wert werden dabei f_{cm} durch den Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} und E_{cm} durch

$$\overline{\text{AC}} E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{CE} \overline{\text{AC}} \quad (5.20)$$

ersetzt.

ANMERKUNG Der landesspezifische Wert γ_{CE} darf einem Nationalen Anhang entnommen werden. Der empfohlene Wert ist 1,2.

NDP zu 5.8.6 (3)

Dabei ist $\gamma_{CE} = 1,5$

Die Formänderungen dürfen auf der Grundlage von Bemessungswerten, die auf den Mittelwerten der Baustoffkennwerte beruhen (z. B. f_{cm}/γ_C , E_{cm}/γ_{CE}) ermittelt werden. Für die Ermittlung der Grenztragfähigkeit im kritischen Querschnitt sind jedoch die Bemessungswerte der Baustofffestigkeiten anzusetzen.

Für die Aussteifungskriterien nach 5.8.3.3 gilt $\gamma_{CE} = 1,2$.

(4) Fehlen genauere Berechnungsmodelle, darf das Kriechen berücksichtigt werden, indem alle Dehnungswerte des Betons in der Spannungs-Dehnungs-Linie gemäß 5.8.6 (3) mit einem Faktor $(1 + \varphi_{ef})$ multipliziert werden. Dabei ist φ_{ef} die effektive Kriechzahl gemäß 5.8.4.

(5) Die günstigen Auswirkungen der Mitwirkung des Betons auf Zug dürfen berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Diese Auswirkung ist günstig und darf zur Vereinfachung immer vernachlässigt werden.

NCI zu 5.8.6 (5)

ANMERKUNG Diese Auswirkung ist nur bei Einzeldruckgliedern immer günstig.

(6) Üblicherweise werden die Gleichgewichtsbedingungen und die Dehnungsverträglichkeit von mehreren Querschnitten erfüllt. Werden vereinfachend nur die kritischen Querschnitte untersucht, darf ein realistischer Verlauf der dazwischen liegenden Krümmungen angenommen werden (d. h. ähnlich dem Momentenverlauf nach Theorie I. Ordnung oder entsprechend einer anderen zweckmäßigen Vereinfachung).

E-Modul:

Gemäß EC2 ist der E-Modul nur von der Festigkeitsklasse des Betons abhängig. Durch je nach Region unterschiedlichen Zuschlag können jedoch erhebliche Schwankungen auftreten. Allgemein waren die Werte in der deutschen Normung eher an der oberen Grenze des Schwankungsbereichs angegeben. Verwiesen sei an dieser Stelle auf einen Artikel der Zeitschrift Beton [6/2003, S. 294 - 298], „Ringversuch zur Ermittlung des statischen Elastizitätsmodul von Beton“ von Brameshuber und Brockmann, Aachen.

Vorbildlich in dieser Hinsicht sind die Regelungen in der Schweiz, wo je nach Region andere Werte festgelegt wurden. Die Werte für den E-Modul können damit im Extremfall um 50 % schwanken !!!

In der deutschen Normung wurde der E-Modul über mehrere Normengenerationen immer wieder angepasst. In Bezug auf die im norddeutschen Raum verfügbaren Zuschlagstoffe sind die aktuellen Norm-Werte für den E-Modul nach Meinung des Verfassers etwas zu hoch.

Bei Forderung einer hohen Rechengenauigkeit sollten die Werte für den E-Modul daher experimentell bestimmt werden bzw. sind vom Beton-Lieferanten einzufordern. Insbesondere bei der Schnittgrößenbestimmung bei verformungsbeeinflussten Problemen (z.B. schlanke Talstützen bei Brücken) ist die korrekte Annahme der Baustoffparameter wichtig.

Anwendungsfall 2 - Ermittlung der Spannungen, im Riss mit $f_{ct} = 0$

Für Anwendungsfall 2 findet die Berechnung in INCA2 direkt im Riss statt. Hierzu können die vordefinierten Mittelwerte benutzt werden, jedoch muss die Betonzugfestigkeit manuell zu Null gesetzt werden. Die Anwendung erfolgt beispielsweise für Ermüdungsberechnungen, Rissbreitennachweise oder Nachweis von Spannungen im Gebrauchszustand.

Definition Baustoffeigenschaften

Bezeichnung: (Parabel nach EC2)
C 35/45 EC2 - Mittelwert, im Riss, fct=0

Lin-Elast. | Parabel-Recht. | **Parabel (EC2)** | Polygon / Spline

Parabel nach EC2 bzw. DIN 1045 (neu) zur nicht-linearen Schnittgrößen-ermittlung

Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone nach QUAST

Druck

E-Modul E_c 32528.19 N/mm²

Tangentenmodul im Ursprung $E_{cm} = 1,1 \cdot E_c =$ 35781.01 N/mm²

Spannung f_c -43 N/mm²

Dehnung ϵ_{c1} -2.25 mm/m

Zug (Parabel-Rechteck-Diagramm)

Spannung bei Erreichen der Fließgrenze in N/mm² 0

Dehnung bei Erreichen der Fließgrenze in mm/m 0

Exponent k (bestimmt die Völligkeit der Parabel) 0

Rechnung im Riss, Betonzugspannung = 0

Stahl ☐ Beton ☒

Mitwirkung des Betons auf Zug

Wertetabelle

Bild

OK

Abbrechen

6.6 Anwendung der Baustoffe in Stab2D-NL und INCA2

In Verbindung der Programme Stab2D-NL und INCA2 lassen sich einige Standard-Anwendungsfälle definieren, in denen die Baustoffkennwerte wie folgt anzuwenden sind:

1. Verformungsrechnung und Schnittgrößenermittlung an normalen Systemen

- Modellierung in Stab2D-NL:
 - Mittelwerte für Beton, inkl. versteifender Mitwirkung des Betons auf Zug
 - Mittelwerte für Bewehrung
- Kontrolle der Querschnittstragfähigkeit mit INCA2:
Nach der Schnittgrößenermittlung in Stab2D-NL sind mit INCA2 separat die Querschnitte mit den Bemessungswerten (Beton + Bewehrung) zu modellieren und die in Stab2D-NL ermittelten Schnittgrößen aufzubringen. Damit wird die Querschnittstragfähigkeit kontrolliert.

2. Verformungsrechnung und Schnittgrößenermittlung an schlanken Systemen (Stützen)

z.B. knickgefährdete Stützen, Tragglieder mit Druckkraft und Auswirkungen aus Th. 2. Ordnung

2.a Stützen mit genauer Modellierung („doppelte Buchführung“)

- Modellierung in Stab2D-NL:
 - Stützenwerte für Beton, inkl. versteifender Mitwirkung des Betons auf Zug
 - Bemessungswerte für Bewehrung
- Kontrolle der Querschnittstragfähigkeit mit den Bemessungswerten in INCA2, wie bei 1.

Dieses Verfahren wird häufig auch als „doppelte Buchführung“ bezeichnet, da für die Berechnung 2 verschiedene Baustoffkennwerte genutzt werden. Dieses Verfahren liefert im Allgemeinen die höchsten Tragfähigkeiten bei schlanken Systemen.

Unter bestimmten Voraussetzungen ist es möglich, die Betonkennwerte für die Verformungsberechnung höher zu wählen, z.B. bei der Herstellung von Stützen im Fertigteilwerk. Dies erfordert jedoch eine sehr enge Überprüfung der Beton-Druckfestigkeiten und des Beton-E-Moduls sowie eine entsprechende Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde.

2.b Stützen mit vereinfachter Modellierung

- Modellierung in Stab2D-NL:
 - Bemessungswerte für Beton
 - Bemessungswerte für Bewehrung
- Die Kontrolle der Querschnittstragfähigkeit in INCA2 entfällt, da bereits mit den Bemessungswerten der Baustoffeigenschaften gerechnet wurde.

Dieses Verfahren ist sehr konservativ und liefert daher die kleinsten Traglasten für die Stütze. Das Verfahren ist jedoch sehr einfach und wenig fehleranfällig.

2.c Stützen mit vereinfachter Modellierung, Ergänzung mit Tension Stiffening

- Modellierung in Stab2D-NL:
 - Bemessungswerte für Beton, ergänzt um versteifende Mitwirkung des Betons auf Zug
 - Bemessungswerte für Bewehrung
- Die Kontrolle der Querschnittstragfähigkeit in INCA2 kann meistens entfallen, da bereits mit den Bemessungswerten gerechnet wurde und im Grenzzustand der Querschnittstragfähigkeit bei Erreichen der Fließgrenze der Bewehrung die versteifende Mitwirkung des Betons auf Zug zu Null gesetzt wird.

Dieses Verfahren liefert etwas kleinere Tragfähigkeiten als Variante 2.a und etwas größere als bei 2.b. Der Nutzer muss jedoch die versteifende Mitwirkung des Betons auf Zug beim Beton selber modellieren. Es reicht üblicherweise die Definition einer Zugdehnung beim Beton von $\varepsilon = 0,1 \text{ mm/m}$.

Dieses Verfahren ist vergleichsweise einfach und schnell in der Modellierung, erfordert jedoch den sicheren Umgang mit der Zugversteifung beim Beton.

3. Verformungsrechnung und Schnittgrößenermittlung an Systemen mit Umlagerung

Das typische System hierfür ist der Zweifeldträger, bei dem mit zunehmender Belastung die Querschnittstragfähigkeit über dem mittleren Auflager (Stützmoment) erreicht wird, sich dort ein plastisches Gelenk ausbildet und die Belastung anschließend weiter gesteigert werden kann, bis auch im Feld die Querschnittstragfähigkeit erreicht wird.

Unabhängig von den nachfolgend erläuterten Baustoffkennwerten sollten in der Modellierung in Stab2D-NL alle die Umlagerung beeinflussenden Aspekte berücksichtigt werden, unter anderem:

- Momentenausrundung von Durchlaufträgern an Auflagerpunkten
- Lastausbreitung von Einzellasten bis zur Schwerachse, Aufbringung besser als Linienlast statt als Einzellast
- Modellierung Bewehrung: Zusätzlich noch den Anstieg im plastischen Bereich definieren, so dass auch nach Überschreiten der Fließgrenze die Spannung noch leicht ansteigen kann. Dadurch ist die Steifigkeit etwas größer, so dass die Berechnung mit Stab2D-NL deutlich stabiler verläuft.

3.a System mit vereinfachter Modellierung mit Bemessungswerten wie 2.b oder 2.c

Eine einfache Modellierung, um den Effekt der Schnittgrößenumlagerung an statisch unbestimmten Systemen zu erhalten, ist die Modellierung mit Bemessungswerten (Beton + Bewehrung) in Stab2D-NL, beim Beton ergänzt um die versteifende Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone. Für die Berechnung ist nur die Modellierung und Rechnung in Stab2D-NL erforderlich. Ein gesonderter Nachweis in INCA2 ist nicht erforderlich.

In dieser Modellierungsvariante wird die Verformung des Systems deutlich zu groß ermittelt, da für das gesamte System mit den „schlechten“ Bemessungswerten gerechnet wird. Diese Modellierung ist daher nicht dafür geeignet, das reale Verformungs- und Umlagerungsverhalten zu ermitteln.

3.b System mit angepassten Mittelwerten

Die grundlegende Idee für diese Variante ist, das System möglichst realitätsnah und daher mit den Mittelwerten abzubilden, so dass im Gebrauchszustand realistische Verformungen ermittelt werden können.

Wird an der maximal beanspruchten Stelle, z.B. Stützbereich bei einem Zweifeldträger, die Querschnittstragfähigkeit erreicht, soll das System an genau dieser Stelle weicher werden, um eine Umlagerung in noch nicht so hoch beanspruchte Bereiche zu ermöglichen. Dabei soll das Stützmoment jedoch nicht größer sein, als die Querschnittstragfähigkeit mit den Bemessungswerten. Um dies zu erreichen, müsste das System an der betreffenden Stelle eigentlich mit den Bemessungswerten modelliert werden, was jedoch der realitätsnahen Modellierung mit den Mittelwerten widerspricht.

Um diesen Widerspruch zu umgehen, werden in Stab2D-NL die Baustoffe wie folgt modelliert und angepasst:

- Beton
 - Modellierung mit den Mittelwerten
 - Anpassung der Betonspannung f_c von f_{cm} auf den Bemessungswert f_{cd}
 - E-Modul und versteifende Mitwirkung der Betons auf Zug bleiben unverändert
- Bewehrung
 - Bewehrung mit Bemessungswerten, jedoch zusätzlich noch den Anstieg im plastischen Bereich definieren

Mit dieser Modellierung wird erreicht, dass bei Beanspruchungen unterhalb der Querschnittstragfähigkeit in etwa die Mittelwerte der Baustoffeigenschaften benutzt werden. Wird die Querschnittstragfähigkeit erreicht, kommt die Bewehrung bei Überschreiten von f_{yd} ins Fließen, der Querschnitt wird weicher und ermöglicht so die Umlagerung in andere Bereiche des Systems.

Im Nachgang ist eine Kontrolle der Querschnittstragfähigkeit mit INCA2 (wie bei 1.) durchzuführen. Hierbei sind die Bemessungswerte zu verwenden, bei der plastische Bereich der Bewehrung ebenfalls mit einem Anstieg zu modellieren ist. Die Querschnittstragfähigkeit wird bei diesem Nachweis an den hoch beanspruchten Stellen meist geringfügig überschritten, was jedoch akzeptiert werden kann.

Beim Beton kann es vorteilhaft sein, statt der parabel-ähnlichen Funktion aus dem EC2 für die Schnittgrößenermittlung die Spannungs-Dehnungs-Linie mit Hilfe des Parabel-Rechteck-Gesetzes näherungsweise abzubilden. Vorteil ist, dass nach Erreichen der max. Spannung die σ - ϵ -Linie nicht abfällt und die Berechnung dadurch stabiler ist.

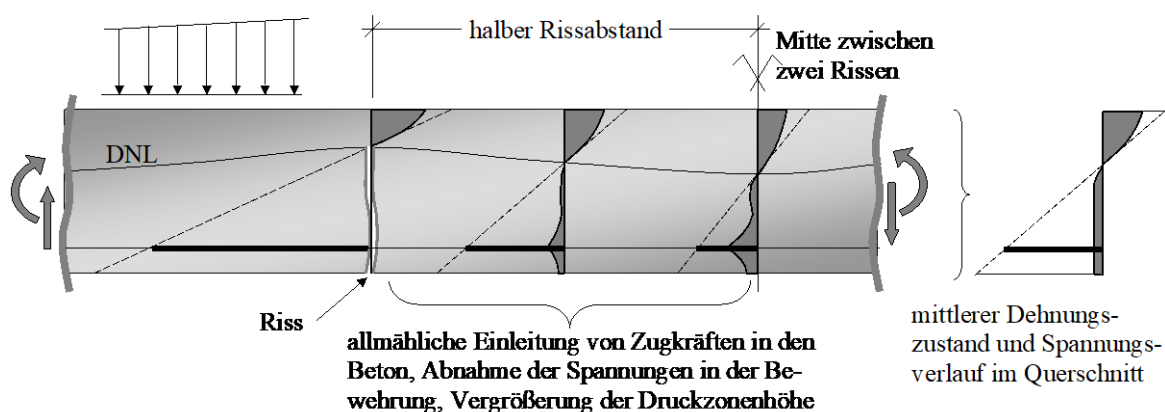
3. Nachrechnung von Experimenten

Hierfür sind die im Labor gemessenen Kennwerte der Baustoffe einzugeben. Falls diese nur in Teilen bekannt sind, sollten ausschließlich die Mittelwerte sowohl für die Verformungsrechnung als auch für die Querschnittstragfähigkeit genutzt werden. Streuungen der Kennwerte sind zu berücksichtigen, so dass mit oberen und unteren Kennwerten gerechnet werden sollte. Dies gilt insbesondere für die versteifende Mitwirkung der Betonzugzone, die erfahrungsgemäß stark schwanken kann.

6.7 Mitwirkung des Betons auf Zug in der gerissenen Betonzugzone

6.7.1 Spannungsverteilung in der gerissenen Zugzone

Die Spannungsverteilung in der gerissenen Betonzugzone ergibt sich näherungsweise gemäß der nachfolgenden Grafik. Genau im Riss wird die gesamte Zugkraft von der Bewehrung aufgenommen, die Druckkraft vom Beton. Neben dem Riss befindet sich ein ungerissener Bereich, der über die Bewehrung und die wirkende Verbundspannung zwischen Beton und Bewehrung wieder Zugspannungen erhält, die sich im Nahbereich um die Bewehrung herum konzentrieren. Je weiter man sich vom Riss entfernt, desto höher wird die wirkende Betonzugspannung sein. Bei steigender Beanspruchung wird die Zugspannung im Beton solange ansteigen, bis die Betonzugfestigkeit erreicht wird und sich an dieser Stelle ein neuer Riss ausbildet.



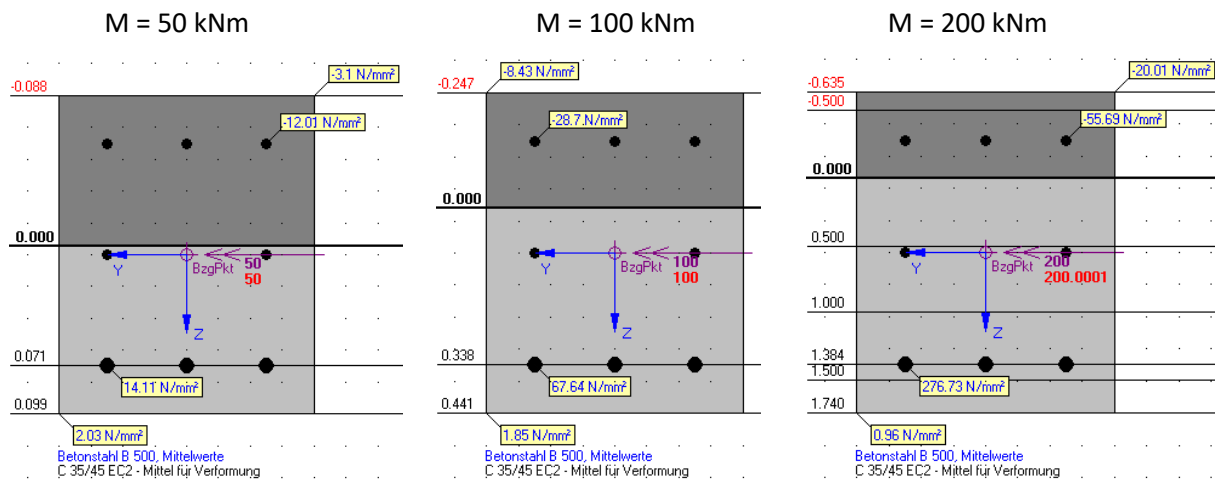
Der daraus resultierende und im Detail sehr veränderliche Spannungszustand auf der Zugseite wird für die Stabwerksberechnung zu einer in etwa konstanten Betonspannung vereinfacht, wie dies auf der rechten Seite in der Grafik dargestellt ist. Je nach Beanspruchung des Querschnitts ändert sich die reale Spannungsverteilung in der Zugzone, so dass auch die vereinfachte konstante Spannung anzupassen ist.

6.7.2 Modellierung in INCA2

Da die Berechnung einzelner, diskrete Risse in Balken nur den Rechenaufwand, nicht aber merklich die Genauigkeit erhöht, wird im Programm INCA2 die Methode der „verschmierten Risse“ angewandt. Dabei wird in der Betonzugzone eine Spannung angesetzt, die je nach Dehnung der Zugbewehrung angepasst wird. Damit ist es möglich, Verformungen von Stahlbetonbalken bzw. -platten mit akzeptabler Genauigkeit und mit einem vertretbaren Rechenaufwand zu ermitteln.

Diese Methode wurde unter anderem von QUAST (1977/80/81) vorgeschlagen sowie von ESPION (1985) um einen nichtlinearen Verlauf erweitert. Nachrechnungen von 39 Balkenversuchen ergaben für baupraktische Belange eine ausreichend gute Übereinstimmung. Näheres zu diesem und anderen Verfahren können Sie in einer Veröffentlichung von Quast/Busjaeger nachlesen. Ein Ausschnitt aus Heft 415 des DAfStb ist am Ende dieses Abschnittes enthalten. Dort finden Sie ebenfalls einige Aussagen zu Anwendungsgrenzen des Verfahrens.

Steigende Belastung für einen Balkenquerschnitt



$f_{c,Zugseite} = 2,03 \text{ N/mm}^2$

in etwa ungerissen

$1,85 \text{ N/mm}^2$

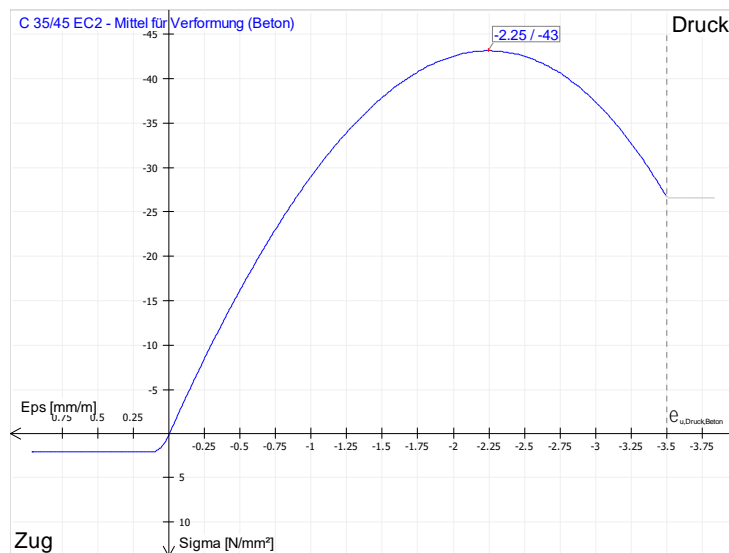
kurz nach dem Aufreißen

$0,96 \text{ N/mm}^2$

gerissen

Vorgehensweise bei der Berechnung

Auf der Zugseite wird für den Beton eine rechnerische Zugspannung $f_{ct,cal}$ als Parabel-Rechteck definiert. Am Koordinatenursprung weisen Der E-Modul auf der Zugseite und der E-Modul auf der Druckseite den gleich Wert auf.



Definition Baustoffeigenschaften

Bezeichnung: (Parabel nach EC2)

C 35/45 EC2 - Mittel für Verformung

Lin-Elast. | Parabel-Recht. | Parabel (EC2) | Polygon / Spline

Parabel nach EC2 bzw. DIN 1045 (neu) zur nicht-linearen Schnittgrößenermittlung

Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone nach QUAST

Druck

E-Modul E.c: 32528.19 N/mm²

Tangentenmodul im Ursprung $E_{c0m} = 1,1 \cdot E.c = 35781.01 \text{ N/mm}^2$

Spannung $f_{c.c}$: -43 N/mm²

Dehnung $\epsilon_{s.c1}$: -2.25 mm/m

Zug (Parabel-Rechteck-Diagramm)

Spannung bei Erreichen der Fließgrenze in N/mm²: 2.0476

Dehnung bei Erreichen der Fließgrenze in mm/m: 0.1071

Exponent k (bestimmt die Volligkeit der Parabel): 1.8723

für Verformungsrechnung (M-k-Linie), $f_{ct} > 0$

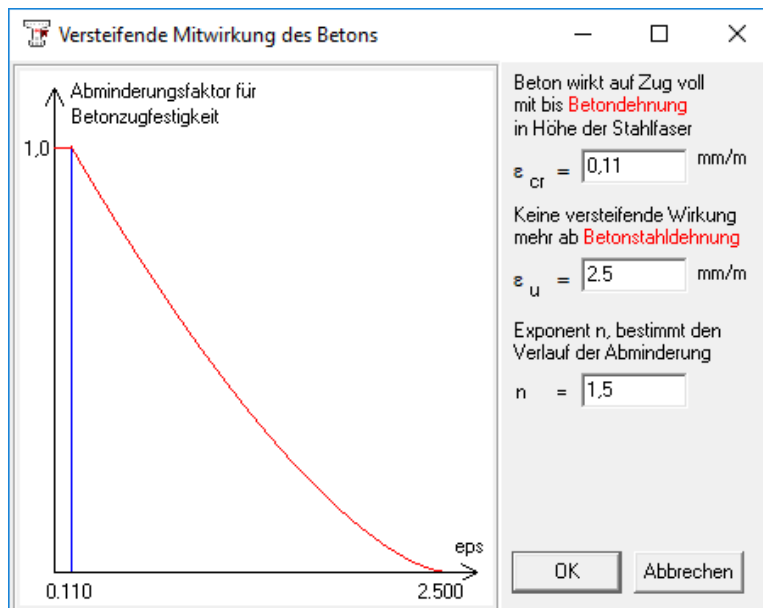
Wertetabelle

Bild

OK

Abbrechen

Die Zugspannung im Beton wird je nach Querschnittsbeanspruchung mit einem Faktor abgemindert, der sich aus dem Verlauf der folgenden Funktion ergibt:



Auf der x-Achse ist die Betondehnung ε aufgetragen. Diese Betondehnung wird in der Rechnung an der Stelle der am stärksten gezogenen Stahlfaser ermittelt.

- Zustand I: Bis zur Dehnung ε_{cr} (Crack = Rissbildung, Überschreiten der Zugfestigkeit) wirkt der Beton voll mit (komplett ungerissen).
- Zustand II: Wird diese Dehnung ε_{cr} überschritten, wird die Zugspannung in der gesamten Zugzone mit dem ermittelten Faktor abgemindert, d.h. das Parabel-Rechteck-Diagramm auf der Zugseite wird in Richtung der σ -Achse gestaucht. Auch der Bereich nahe der Dehnungsnulllinie mit Dehnungen kleiner als ε_{cr} wird mit diesem Faktor verkleinert.
- Zustand III: Wird die Fließdehnung des Stahls überschritten, wirkt der Beton im Allgemeinen nicht mehr oder nur noch geringfügig mit. Ein guter Wert für ε_u ist deshalb $\varepsilon_u = 2,5$ mm/m. Ist die Betondehnung an der betreffenden Stelle größer als der Wert von ε_u , wird die Zugspannung im Beton vollständig zu Null gesetzt.

Erfahrungswerte für die versteifende Mitwirkung der Betonzugzone $f_{ct,cal}$

Maßgebender Eingangswert ist der Rechenwert der Zugspannung $f_{ct,cal}$. Dieser Wert wurde durch Versuchsnachrechnungen so gewählt, dass sich eine möglichst gute Übereinstimmung für übliche Balken- und Stützensysteme ergibt. Aufgrund der gewählten mathematischen Modellierung der Zugversteifung entspricht der Wert $f_{ct,cal}$ nicht der üblichen mittleren Betonzugfestigkeit f_{ctm} , sondern beträgt in etwa $f_{ct,cal} = 60\% \cdot f_{ct,Mittel,EC2}$.

Definition Zugverhalten Beton (Materialgesetz)

$f_{ct,cal} = 1/20 \cdot f_{cm}$ bis $1/30 \cdot f_{cm}$ ähnliche Werte liefert der Ansatz $f_{ct,cal} = 60\% \cdot f_{ct,Mittel,EC2}$	Zugfestigkeit, Erfahrungswert
$\varepsilon_{cr} = 1/20 \cdot \varepsilon_{cu}$ bis $1/30 \cdot \varepsilon_{cu}$	Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit, Erfahrungswert
$n = 1,5 \dots 2,0$	Exponent für die Völligkeit der Parabel, sollte so gewählt werden, dass sich auf der Zug- und auf der Druckseite in etwa der gleiche E-Modul im Koordinatenursprung ergibt.

Definition Mitwirkungsgesetz

$\varepsilon_{cr} = 1/20 \cdot \varepsilon_{cu}$ bis $1/30 \cdot \varepsilon_{cu}$	Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit (wie zuvor beim Materialgesetz)
$\varepsilon_u = \varepsilon_{s,y}$	Die Wahl von ε_u als Fließgrenze mit z.B. $\varepsilon_{s,y} = 2,5$ mm/m für einen B500 ist eine rechentechnische Vereinfachung. Die reale Mitwirkung wird bei einer Dehnung zwischen 2,0 und 3,0 mm/m in etwa auf Null gefallen sein. Vereinfachend wird deshalb $\varepsilon_u = \varepsilon_{s,y}$ gesetzt. Bei höherfester Bewehrung sollte dieser Wert jedoch 3 mm/m nicht überschreiten bzw. nur bei entsprechend starker Erhöhung des Exponenten n.
$n = 1,0 \dots 3,0$	Exponent für die Völligkeit der Abminderungskurve, standardmäßig ist $n = 1,0$ vorgegeben. Es reicht jedoch schon eine geringe Vorschädigung aus (Temperaturbeanspruchung, Vorbelastung), um mit $n = 2,0$ bessere Ergebnisse zu erzielen. Bei größerem n wird die Mitwirkung der Zugzone schneller reduziert.

6.7.3 Anwendungsgrenzen

Das Verfahren wurde für die Berechnung von üblich bewehrten Stahlbetonquerschnitten unter Biegung mit und ohne Normalkraft entwickelt. Reine Zugstäbe lassen sich mit der Standard-Variante etwas schlechter modellieren und erfordern eine gewisse Anpassung in Bezug auf die Baustoffparameter.

Unterbewehrte Querschnitte oder Querschnitte ohne Zugbewehrung können ebenfalls nicht in der Standardmodellierung berechnet werden bzw. die Ergebnisse sind nicht zutreffend. Hier sollte eine Anpassung am Querschnitt selber erfolgen, indem die wirksame Betonzugzone um die Bewehrungsstäbe herum entsprechend reduziert wird.

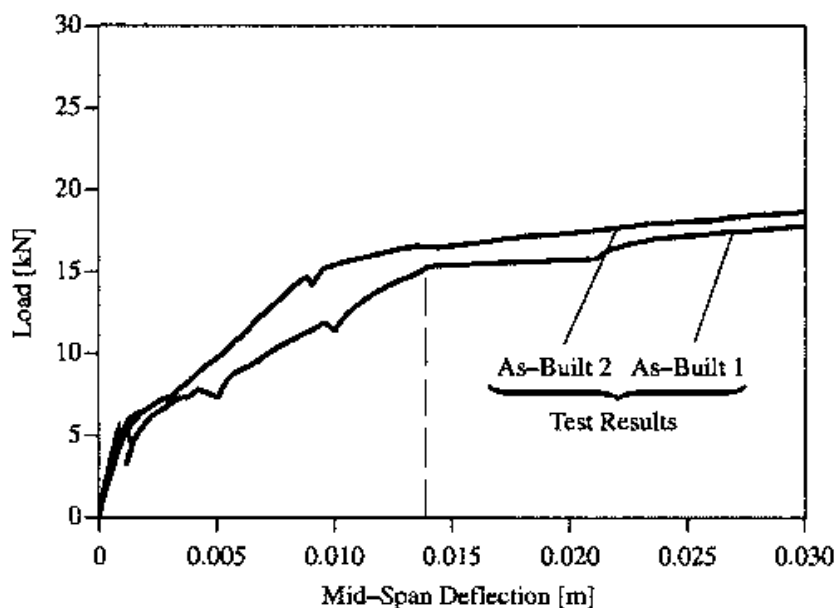
Weiterhin wird durch die Verwendung von $f_{ct,cal} = 1/20 \cdot f_c$ bis $1/30 \cdot f_c$ das Rissmoment M_{crack} leicht unterschätzt, der Balken reißt rechnerisch etwas zu früh auf. Damit wird die Verformung von Balken, die bis in etwa M_{crack} beansprucht werden, etwas zu groß ermittelt. Da jedoch bei einer weiteren Laststeigerung die rechnerischen Zugspannungen im Querschnitt nur langsam abgemindert werden, kann das Verhalten des Balkens kurz nach dem Reißen trotzdem recht gut bestimmt werden.

Fehlerhaft wäre es auf jeden Fall, für $f_{ct,cal}$ den aus der DIN oder dem EC2 entnommenen Mittelwert der Zugfestigkeit f_{ctm} anzusetzen! Durch die spezielle Formulierung des Mitwirkungsgesetzes nach Quast / Espion würde man damit die Steifigkeit des Betonquerschnitts deutlich überschätzen!

Weitere Anpassungen und Tendenzen

Werden zwei identische Balken getestet, so ergeben sich bereits hier Unterschiede in den Last-Verformungsdiagrammen, obwohl die Balken nominell identisch sind. Die Erfassung der wirklich vorhandenen Baustoffeigenschaften (Bedingungen auf der Baustelle!) ist damit eher ein Glücksfall. Sinnvoller ist es deshalb in jedem Fall, einmal mit möglichst „guten“ und einmal mit möglichst „schlechten“ Baustoffeigenschaften zu rechnen. Damit erhält man den Bereich, in dem die Verformungen zu erwarten sind.

Last-Verformungs-Kurven für 2 „identische“ Platten mit Drei-Punkt-Biegeversuch



Vor allem E-Modul und Zugfestigkeit können stark streuen und ergeben auch die größten Schwankungen bei den resultierenden Verformungen im Gebrauchszustand. Bereits Temperaturbeanspruchungen (z.B. geringe Temperaturen kurz nach dem Ausschalen) oder auch eine starke Austrocknung der Oberfläche durch unzureichende Nachbehandlung führen zu einer Vorschädigung und damit zu einer Abnahme der Zugfestigkeit und damit der versteifenden Mitwirkung.

Weiterhin sollte beachtet werden, dass bei Zunahme der Betondruckfestigkeit die Zugfestigkeit nicht in dem gleichen Maße, sondern eher unterproportional ansteigt. Bei höherfesten Betonen liefert eine Abschätzung mit z.B. $f_{ct,cal} = 1/25 \cdot f_{cm}$ oder $f_{ct,cal} = 1/30 \cdot f_{cm}$ evtl. bessere Ergebnisse. Anzumerken sei hier, dass die meisten von Quast gerechneten Balkenversuche normale bis geringe Betonfestigkeiten aufwiesen – zumindest aus heutiger Sicht von üblichen Betonfestigkeiten.

Die häufig zitierten Dehnkörperversuche, die zur Bestimmung der Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone benutzt werden, liefern im plastischen Bereich eine gewisse versteifende Mitwirkung. Rechnungen an Biegebalken zeigen jedoch, dass die Modellierung ohne Zugversteifung nach dem Fließen der Bewehrung eine ausreichend gute Näherung darstellt.

In der Summe sollte beachtet werden, dass mit dem in INCA2 benutzten Mitwirkungsgesetz nur Berechnungen von Balken und Stützen sinnvoll sind. Zugstäbe aus Beton können damit weniger gut erfasst werden, kommen in der Praxis aber auch eher selten vor.

Allgemein kann gesagt werden, dass die in INCA2 implementierte Methode der versteifenden Mitwirkung eine für baupraktische Berechnungen sinnvolle Vorgehensweise darstellt, da diese einerseits leicht zu benutzen ist, akzeptable Werte im Vergleich mit Experimenten liefert und für eine weitergehende Verformungsrechnung „schöne“ Moment-Verkrümmungs-Linien ohne Zacken und Sprünge liefert.

6.7.4 Verhalten bei Vordehnung des Betons oder der Bewehrung (z.B. Schwinden)

- | | |
|-----------------------|--|
| Beton vorgedehnt: | Aus der aktuellen Querschnittsdehnung und der Vordehnung des Betons wird die Materialdehnung des Betons zur Spannungsberechnung ermittelt. Überschreitet diese Beton-Material-Dehnung die Dehnung ϵ_{cr} , wird die Zugspannung mit dem entsprechenden Faktor abgemindert. Die Abminderung wird zu Null, wenn der Stahl an dieser Stelle die Dehnung ϵ_u erreicht bzw. überschreitet. |
| Bewehrung vorgedehnt: | Auch hier wird wie zuvor zuerst die Betondehnung an der Stelle der am stärksten gezogenen Bewehrungsfaser ermittelt. Bis ϵ_{cr} erfolgt keine Abminderung der Betonzugspannungen. Dann folgt der Bereich der Abminderung entsprechend der Kurve. Überschreitet dann die Stahl-Material-Dehnung (= Querschnittsdehnung + Vordehnung der Bewehrung) den Wert ϵ_u , wird die Abminderung zu Null. |

Am Beispiel eines Rechteckquerschnitts mit unten liegender Bewehrung und Schwinden des Betons mit $\epsilon_{sh} = 0,4 \text{ mm/m}$ lässt sich dieses Verhalten anschaulich demonstrieren. Die Schwinddehnung kann

einerseits als Zugvordehnung auf den Beton, andererseits aber auch als Druckvordehnung auf die Bewehrung aufgebracht werden. Beide Modellierungen liefern im Endeffekt das gleiche Ergebnis bei der Abminderung der Zugspannungen der Betonzugzone und damit gleiche Mk-Linien für eine Verformungsberechnung.

Die erste Möglichkeit (Zugvordehnung auf den Beton) hat den Vorteil, dass es einfach in der Handhabung in INCA2 ist und außerdem genau dort berücksichtigt wird, wo das Schwinden auch auftritt – nämlich beim Beton. Nachteilig ist jedoch die Darstellung der Dehnungsebene in der anschließenden grafischen Ausgabe. Die Größe der "Druckzone" mag ein wenig verwirren. Man muss jedoch bedenken, dass die Dehnungsebene jetzt nicht mehr in Bezug zum Beton, sondern in Bezug zu den nicht vorgedehnten Querschnittsteilen (hier Bewehrung) dargestellt wird.

Die zweite Möglichkeit ist das Aufbringen der Vordehnung auf alle Bewehrungsstäbe, jetzt jedoch als Druckvordehnung mit $\varepsilon = -0,4 \text{ mm/m}$. Die grafische Darstellung schaut etwas gewohnter aus, da man jetzt wirklich sieht, wie groß die Druck- und wie groß die Zugzone des Betons ist.

In den Beispieldateien

Schwinden_auf_Beton.inc

Schwinden_auf_Stahl.inc

sind diese unterschiedlichen Modellierungen durchgeführt. Genauere Informationen finden Sie im Kapitel **6.12 Schwinden und Kriechen**.

6.7.5 Anwendungsprobleme und Lösungen

Grundlegend werden Probleme mit dem Mitwirkungsgesetz für die Betonzugzone auftreten, wenn der Gültigkeitsbereich der Standardmodellierung verlassen wird. Mit Rückblick auf einen stetigen E-Mail-Verkehr mit verschiedenen Anwendern haben sich folgende Schwerpunkte ergeben:

#	Anwendungsproblem und Auswirkung	Lösung
1.	Für den Rechenwert der Zugfestigkeit $f_{ct,cal}$ wird der Mittelwert der Zugfestigkeit des Betons gemäß EC2 eingesetzt (f_{ct}). Die versteifende Mitwirkung wird dadurch zu hoch eingeschätzt.	Nutzung der vordefinierten Mittelwerte der Baustoffeigenschaften für die Standard-Betone. Bei selbst definierten Betonen ist ca. 1/20 bis 1/30 der Druckfestigkeit als Rechenwert der Zugfestigkeit zu benutzen. Ähnliche Werte liefert auch der Ansatz mit $f_{ct,cal} = 60\% \cdot f_{ct,Mittel,EC2}$.
2.	Gering bzw. unterbewehrte Querschnitte: Die Tragfähigkeit des ungerissenen Querschnittes (M_{crack}) ist höher als die Tragfähigkeit des gerissenen Querschnitts (M_{yield}). Die Mk-Linie weist in diesem Fall einen „Buckel“ gemäß nachfolgender Grafik auf.	Bei einem Kraft-gesteuerten Versuchsaufbau (z.B. 3-Punkt-Biegeversuch) würde der Balken nach der Erstrissbildung sofort komplett versagen. Da die meisten Versuche aber Weg-gesteuert sind, kann trotzdem eine Last-Verformungskurve ermittelt werden.

		<p>In INCA2 bzw. Stab2D-NL kann versucht werden, die Größe der Betonzugzone zu verkleinern, so dass das Rissmoment rechnerisch kleiner ermittelt wird. Ergänzend könnte auch die rechnerische Zugspannung $f_{ct,cal}$ reduziert werden.</p> <p>Für den Ingenieuralltag (abseits vom Labor) ist in so einem Fall die Mindestbewehrung zu prüfen, um ein Versagen ohne Vorankündigung zu vermeiden,</p>
3	<p>Modellierung Beton mit den Mittelwerten und Bewehrung mit den Bemessungswerten. Die Bewehrung fängt in diesem Fall bei einer Dehnung von $\varepsilon_y = 2,174 \text{ mm/m}$ an zu fließen. Im Mitwirkungsgesetz ist jedoch eine Fließdehnung von $\varepsilon_y = 2,5 \text{ mm/m}$ eingestellt. Dadurch ergibt sich wie bei Punkt [2] ein Buckel für die Mk-Linie, so dass diese nicht für weitere Berechnungen benutzt werden kann.</p>	<p>Einheitliche Nutzung der Baustoffkennwerte, also sowohl für Beton als auch für Bewehrung mit Mittelwerten (oder Bemessungswerte)</p>

6.7.6 Auszug aus Heft 415 des DAfStb, Beuth Verlag, Berlin, 1990

„2.2.1.2 Betonzugzone

Berechnungen im ungerissenen Zustand I werden näherungsweise auf der Grundlage der linearen Elastizitätstheorie geführt. Die auftretenden Betonzugspannungen können im Rahmen einer programmgesteuerten Berechnung durch Vorgabe einer linearen Spannungsdehnungslinie bis zum Erreichen der Biegezugfestigkeit des Betons auf einfache Weise berücksichtigt werden. Die Form der Spannungsdehnungsbeziehung für die Betonzugzone entspricht dann sinngemäß der Darstellung im Bild 2.3 für den Exponenten $n = 1$. Auf diese Weise kann beispielsweise ein Spannungsnachweis eines Querschnitts unter beschränkter Vorspannung im Gebrauchszustand geführt werden (vergleiche auch Beispiel 4 im Anhang 1, Kapitel 1.4.4).

Die versteifende Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen im Zustand II zu erfassen, wird mit unterschiedlichen Verfahren versucht. Hinsichtlich der Zweckmäßigkeit dieser Verfahren, sind zwei grundsätzlich verschiedene Einsatzgebiete zu unterscheiden:

- theoretische Studien in der Forschung und
- baupraktische Berechnungen.

Für Forschungszwecke kommen im Allgemeinen die auf der Grundlage der Finiten-Element-Methode basierenden aufwändigen Verfahren zum Einsatz. Sie ermöglichen Einblicke in die grundlegenden mechanischen Zusammenhänge, sind jedoch wegen des hohen Aufwandes bei Systemabbildung und Berechnung für baupraktische Belange von untergeordneter Bedeutung. So kann beispielsweise das Verbundverhalten im Rahmen einer Finiten-Element-Berechnung durch eine Kopplung von Stahl- und Betonelementen mittels geeigneter Verbundelemente mehr oder weniger gut erfasst werden. Durch eine Mikroelementierung kann auch das Verhalten an diskreten Querschnittsteilen untersucht werden, wobei die einschränkenden Voraussetzungen der technischen Balkenbiegelehre (Ebenbleiben der Querschnitte) aufgehoben werden. Einen Überblick über Finite-Element-Methoden zur Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen geben Eibl und Ivanyi (1976).

...

Im Rahmen einiger Durchbiegungsberechnungen einfacher Stahlbetonplatten mit Hilfe der Finiten-Element-Methode untersuchen Gilbert und Warner (1978) die Verwendbarkeit von drei unterschiedlichen Spannungsdehnungsbeziehungen für den Beton in der Zugzone. Darüber hinaus werden diese Berechnungen auch mit einer modifizierten Spannungsdehnungslinie des Bewehrungsstahls durchgeführt, wobei ein in Abhängigkeit von der Rissdehnung abschnittsweise veränderlicher E-Modul berücksichtigt wird. Die Autoren äußern die Vermutung, dass sich in Fällen, in denen sich die Bewehrungsmenge unterscheiden, mit dem letztgenannten Näherungsverfahren voraussichtlich bessere Übereinstimmungen mit den tatsächlichen Verhältnissen ergeben würden.

Quast (1977/80/81) erweitert das übliche Parabel-Rechteckdiagramm nach DIN 1045 (1988) zu der in Bild 2.4 dargestellten allgemeinen Spannungsdehnungslinie für Beton und rechnet mit dieser im Zug- und Druckbereich definierten Linie die Moment-Krümmungs-Beziehungen von insgesamt 39 Balkenversuchen nach, wobei sich eine für praktische Belange ausreichende Übereinstimmung mit den Versuchen ergibt. Espion (1985) übernimmt diese Definition der Spannungsdehnungslinie für den Beton, berücksichtigt jedoch eine nichtlineare Abnahme des nach Gleichung (2.3) veränderlichen Mittelwertes der Betonzugspannungen in einem auf der Grundlage der Finiten-Element-Methode entwickelten Rechenprogramm. Der Ansatz einer quadratischen Abminderung des Mittelwertes der Betonzugspannungen ergibt für die von ihm nachgerechneten Versuche (reine Zugversuche sowie Balken-, Stützen- und Rahmenversuche) häufig eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen.

Eine andere Möglichkeit, die versteifende Mitwirkung des Betons in der Zugzone durch Definition einer geeigneten Spannungsdehnungslinie des Betons zu erfassen, beschreibt Schwennicke (1983). Grzeschkowitz (1988) übernimmt diesen Ansatz zur Nachrechnung von Versuchen an Druckstützen mit Rechteckquerschnitt. Die verwendete σ - ϵ -Beziehung der Betonzugzone zeigt einen linearen Anstieg bis zum Erreichen der Betonbiegezugfestigkeit und einen anschließend abfallenden, nichtlinearen Verlauf bis zu einer Dehnung, an der die Mitwirkung des Betons auf Zug endet. Zur Bestimmung des Exponenten der Parabelfunktion für den abfallenden Ast werden die mittlere Betonbiegezugfestigkeit, die Verbundspannung, der Ursprungsmodul des Betons, der E-Modul des Betonstahls, der Bewehrungsgrad der Betonzugzone, der Stabdurchmesser der Bewehrung sowie die Grenzdehnung

für die Mitwirkung des Betons auf Zug benötigt. Die von Grzeschkowitz durchgeführten Versuchsnachrechnungen zeigen gute Übereinstimmungen hinsichtlich des Verformungsverhaltens, aber weniger gute Übereinstimmung in Bezug auf die Traglast. Eine Anwendung des beschriebenen Algorithmus erscheint aufgrund des Umfangs nur sinnvoll für Versuchsnachrechnungen oder für Studien zum Trag- und Verformungsverhalten.

Die Formänderung eines Stahlbetonbauteils hängt von einer Vielzahl von Einflussparametern ab, die vielen Zufälligkeiten unterworfen sind. Für praktische Tragwerksberechnung im Massivbau reicht es jedoch in der Regel aus, das mittlere Krümmungsverhalten eines Bauteils zu kennen, um die Verformung berechnen zu können. Die in Bild 2.4 dargestellte Spannungsdehnungslinie für Beton, die das übliche Parabel-Rechteckdiagramm als Sonderfall enthält, kann als Grundlage allgemeiner Rechenverfahren verwendet werden, mit denen Formänderungen nicht nur im Grenzzustand der Tragfähigkeit, sondern auch unter Gebrauchslast sowie für alle Zwischenzustände ermittelt werden können.

/Bild 2.4 Spannungsdehnungsbeziehung/

Entsprechend der Darstellung in Bild 2.4 wird für den Zugbereich ein dem Druckbereich affiner Verlauf der σ - ε -Linie vorausgesetzt. Die Linie im Zugbereich wird hierbei allein durch den Parameter ε_{bz} festgelegt, so dass durch entsprechende Wahl dieses Dehnungswertes jeder beliebige Rechenwert der Betonbiegezugfestigkeit β_{bz} vorgegeben werden kann. Ein brauchbarer Wert ist $\varepsilon_{bz} = 0,1 \text{ mm/m}$. Betonzugspannungen werden nicht berücksichtigt, wenn $\varepsilon_{bz} = 0 \text{ mm/m}$ gesetzt wird. Mit hinreichend großem ε_{bz} kann unbegrenzt ungerissener Zustand I zugrundegelegt werden. Bei gleichzeitiger Wahl des Exponenten $n = 1$ wird dann wie nach der linearen Elastizitätstheorie gerechnet. Dies wird im Anhang 1, Kapitel 1.4.4 im Beispiel 4 verdeutlicht.

Die Betonzugspannungen sind in der Zugzone zwischen den Rissen nicht konstant, sondern wachsen infolge der Verbundwirkung und der Ausmittigkeit der Druckzonenkraft vom Wert Null im Riss auf einen Größtwert in der Mitte zwischen zwei Rissen, der durch die Biegezugfestigkeit β_{bz} begrenzt wird, an. Unmittelbar nach Eintreten des Risszustandes kann der Mittelwert der Betonzugspannungen vereinfacht gleich der Hälfte der Biegezugfestigkeit angenommen werden, wobei der rechnerische Größtwert der Biegezugkraft nicht größer als die im Riss durch die Bewehrung aufnehmbare Zugkraft werden sollte.

Mit zunehmender Dehnung in der Zugzone wird der Verbund zwischen Bewehrung und Beton gestört, so dass der Mittelwert der Betonzugspannungen abnimmt. Dies ist ebenfalls bei anwachsender Zugzonenhöhe der Fall, insbesondere bei unregelmäßiger Durchsetzung der Zugzone mit Bewehrung. Unter der Annahme, dass der Mittelwert der Zugspannungen vom rechnerischen Größtwert β_{bz} entsprechend Gleichung (2.2) linear auf Null abfällt, wenn die Festigkeit in der Bewehrung bei Erreichen der Streckgrenze ε_{ss} in der maßgebenden Bewehrungsfaser ausgenutzt wird, ergibt sich der veränderliche Mittelwert der Zugspannungen β_{bz} nach Gleichung (2.3). Diese Gleichung gilt für Dehnungen der charakteristischen Faser (2) in der Zugzone, die durch die Dehnungswerte ε_{bz} und ε_{ss} begrenzt werden.“

6.8 Grenzdehnungen, Hinweise zu verschiedenen Normungen

Über die Grenzdehnungen wird der Grenzzustand des Querschnittes vorgegeben:

Folgende Arten der Dehnungen werden benutzt. Die Werte sind nur als Beispiel zu verstehen und können vom Nutzer jederzeit entsprechend der benutzten Norm (DIN 1045, EC 2 etc.) verändert werden.

eps.Druck.B	=	-3.5000 mm/m	(max. Druckstauchung bei Biegung)
eps.Druck.zentr.B	=	-2.0000 mm/m	(max. Druckstauchung bei zentrischem Druck)
eps.Zug.B	=	100.0000 mm/m	(max. Zugdehnung für Beton)
eps.Druck.S	=	-5.0000 mm/m	(max. Druckstauchung für Stahl)
eps.Zug.S	=	25.0000 mm/m	(max. Zugdehnung für Stahl)

Wirklich wichtig für den Grenzzustand sind eps.Druck.B, eps.Druck.zentr.B und eps.Zug.S. Daraus lässt sich im Normalfall ohne Probleme jeder Grenzzustand eines Querschnitts bestimmen. In Ausnahmefällen werden jedoch die zusätzlichen Dehnungen eps.Druck.S und eps.Zug.B benötigt. Eps.Druck.S ist zum Beispiel dann maßgebend, wenn ein Querschnitt nur aus Stahl berechnet werden soll oder bei einem Verbundträger das maximale Stützmoment (Stahlprofil liegt auf der Unterseite) ermittelt wird. Eps.Zug.B wiederum ist wichtig, falls es nur einen Bewehrungspunkt gibt, der genau auf der Polygonkante liegt.

Druckdehnung Beton, Zugdehnung Bewehrung, jeweils für die Bemessungswerte

DIN 1045 (88) - alte Ausgabe von 1988

Es wird einheitlich für alle Betone (B 10 bis B 55) mit folgenden Werten gerechnet:

eps.Druck.B	=	-3,5 mm/m
eps.Druck.zentr.B	=	-2,0 mm/m
eps.Zug.S	=	5,0 mm/m

EC2

Es wird einheitlich für die Betone C 12/15 bis C 50/60 mit folgenden Werten gerechnet:

eps.Druck.B	=	-3,5 mm/m
eps.Druck.zentr.B	=	-2,0 mm/m
eps.Zug.S	=	25,0 mm/m

Für die Betone ab C 55/67 sind folgende Grenzdehnungen zu benutzen, jeweils in [mm/m]:

C 55/67	$\epsilon_u = -3,1$	$\epsilon_{zentr} = -2,2$
C 60/75	$\epsilon_u = -2,9$	$\epsilon_{zentr} = -2,3$
C 70/85	$\epsilon_u = -2,7$	$\epsilon_{zentr} = -2,4$
C 80/95	$\epsilon_u = -2,6$	$\epsilon_{zentr} = -2,5$
C 90/105	$\epsilon_u = -2,6$	$\epsilon_{zentr} = -2,6$
C 100/115	$\epsilon_u = -2,6$	$\epsilon_{zentr} = -2,6$

Bei Verformungsrechnungen mit den Mittelwerten oder den charakteristischen Werten (bei Stützen) der Baustoffeigenschaften muss die Grenzdehnung der jeweiligen Betone korrekt eingetragen werden. Die Baustoffkennwerte sind in der in INCA2 implementierten Baustofftabelle bereits enthalten, die zugehörigen Dehnungen finden Sie in der dem Programm beigelegten Excel-Tabelle [Baustofftabelle.xls](#).

Beachten Sie bitte auch weiterhin, dass der Sicherheitsbeiwert nach der alten Normung DIN 1045 (Ausgabe 1988) vom Dehnungszustand abhängt. Weitere Erläuterungen finden Sie im nachfolgenden Kapitel.

6.9 Stahlbeton nach DIN 1045, Ausgabe 1988 (alte Normung)

Um dem unterschiedlichen Verhalten des Stahlbetons im Druckbruch- und im Zugbruchbereich zu entsprechen, wurde in der DIN 1045 (88) ein veränderlicher Teilsicherheitsbeiwert eingeführt. Führt die äußere Beanspruchung zu einem spröden Versagen der Betondruckzone, so wird eine höhere Sicherheit gefordert, als bei einem duktilen Versagen der Bewehrung (mit Vorankündigung).

Der Sicherheitsbeiwert berücksichtigt damit auch die unterschiedlichen Streuungen der Parameter der Baustoffe Beton und Bewehrung.

6.9.1 Baustoffe nach DIN 1045, Ausgabe 1988

Beton

In der folgenden Tabelle sind zu den Beton-Festigkeitsklassen die Rechenwerte für die Betonfestigkeit angegeben. Diese sind mit den Dehnungen $\varepsilon_c = - 2,0 \text{ mm/m}$ und $\varepsilon_u = - 3,5 \text{ mm/m}$ sowie einem Exponenten von $n = 2$ zu benutzen. Diese Werte sind in der Baustofftabelle von INCA2 bereits implementiert.

Betonklasse	Rechenfestigkeit β_R
B 5	3,5 N/mm ²
B 10	7,0 N/mm ²
B 15	10,5 N/mm ²
B25	17,5 N/mm ²
B 35	23,0 N/mm ²
B 45	27,0 N/mm ²
B 55	30,0 N/mm ²

Betonstahl BSt 500

Die Rechenfestigkeit beträgt $f_{yd} = 500 \text{ N/mm}^2$. Die zugehörige Dehnung beträgt $\varepsilon_y = 2,38095 \text{ mm/m}$, der E-Modul beträgt demzufolge $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$. Nach dem Fließen wird mit einem ideal plastischen Verhalten gerechnet, die Grenzdehnung beträgt $\varepsilon_u = 5,0 \text{ mm/m}$.

6.9.2 Sicherheitskonzept nach DIN 1045, Ausgabe 1988

Es gibt einen globalen, veränderlichen Sicherheitsbeiwert. Ergibt die Beanspruchung ein duktilen Bauteilversagen (Bewehrung fließt) beträgt der Sicherheitsbeiwert $\gamma = 1,75$. Bei einem spröden Versagen (Betondruckbruch) wird $\gamma = 2,1$ gesetzt. Zwischen diesen Zuständen wird in einem Übergangsbereich linear interpoliert. Damit wird erreicht, dass den größeren Streuungen des Betons und dem Versagensmechanismus Spröbruch (keine Vorankündigung) eine ausreichend große Sicherheit gegenüber steht.

Das Problem für die Berechnung in INCA2 ist damit der sich verändernde Sicherheitsbeiwert. Die Berücksichtigung müsste programmintern entsprechend des Dehnungszustandes erfolgen. Da INCA2 jedoch nicht für eine spezielle Norm und ihre Besonderheiten entwickelt worden ist, wurde auf diese automatische Berücksichtigung verzichtet. Vielmehr war es Ziel des Autors, nach jeder beliebigen Normung jedes Materialverhalten abbilden zu können.

6.9.3 Berechnung nach DIN 1045 (88)

Methode 1 - Sicherheitsnachweis

Der Querschnitt wird mit den gezeigten Baustoffeigenschaften modelliert, die Schnittgrößen als charakteristische Lasten aufgebracht. Der normale Sicherheitsnachweis wird durchgeführt. Der sich ergebende Sicherheitsindex γ muss je nach Dehnungszustand größer gleich 1,75 bzw. 2,1 sein. Man kontrolliere daher im berechneten Grenzzustand der Tragfähigkeit die Dehnung der am meisten gezogenen Stahlfaser ε_{s2} . Folgende Zustände werden unterschieden:

Dehnung ε_{s2}	benötigter Sicherheitsfaktor
$\varepsilon_{s2} > 3,0 \text{ mm/m}$	$\gamma = 1,75$
$3,0 \text{ mm/m} < \varepsilon_{s2} < 0,0 \text{ mm/m}$	$\gamma = 1,75 + \frac{(3,0 - \varepsilon_{s2}) \cdot 0,35}{3,0}$
$\varepsilon_{s2} < 0,0 \text{ mm/m}$ (komplett überdrückt)	$\gamma = 2,10$

Ist die Sicherheit nicht ausreichend, muss am Querschnitt nachgebessert werden (Bewehrung, Abmessungen).

Methode 2 - Bemessung

Im Unterschied zu Methode 1 werden hier die Schnittgrößen gleich mit einem Sicherheitsfaktor von z.B. $\gamma = 1,75$ aufgebracht. Die Bemessung wird durchgeführt und die Dehnung ε_{s2} kontrolliert. Bei einem größeren benötigten Sicherheitsfaktor müssen die Schnittgrößen entsprechend erhöht und die Bemessung wiederholt werden.

6.9.4 Vergleichsrechnungen mit Interaktions-Diagrammen (z.B. aus Schneider-Bautabellen, 12. Ausgabe)

In diesen Tabellen ist der Sicherheitsfaktor bereits mit eingearbeitet und wird nicht extern berücksichtigt. Man geht also mit den charakteristischen Belastungen (N_x und M_y bzw. n und m_y) in die Diagramme und kann gleich die benötigte Bewehrung auslesen.

Vergleichsrechnung Beispiel:

Querschnittswerte:

Kreisquerschnitt $\varnothing = 1,10 \text{ m}$

$d_1 = 0,11 \text{ m}$ $d_1 / d = 0,10$

$A_c = \pi \cdot r^2 = 0,95 \text{ m}^2$

Baustoffe:

Beton B 25, $\beta_R = 17,5 \text{ N/mm}^2$

BSt 500

Charakt. Beanspruchung:

$M = 1828,75 \text{ kNm}$

$N = -2493,75 \text{ kN}$

Bezogene Werte für die Beanspruchung:

$$m = \frac{M}{A_b \cdot d \cdot \beta_R} = \frac{1,82875}{0,95 \cdot 1,10 \cdot 17,5} = 0,1$$

$$n = \frac{N}{A_b \cdot \beta_R} = \frac{-2,49375}{0,95 \cdot 17,5} = -0,15$$

Mit diesen Werten kann man aus dem Bemessungsdiagramm für Kreisquerschnitte (Schneider Bautabellen, Seite 6.81, Ausgabe 12) folgende Werte auslesen:

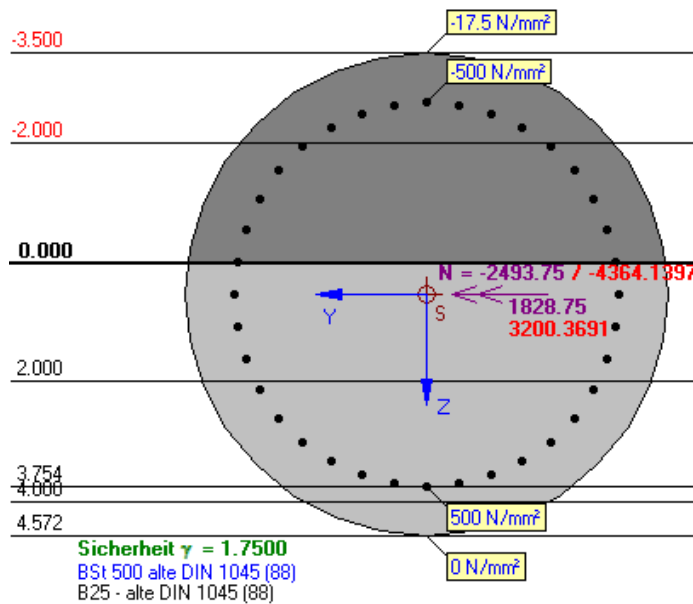
Geometrisches Bewehrungsverhältnis: $\omega = 0,39$

Dehnungszustand $\varepsilon_{\text{Beton}} = -3,5 \text{ mm/m}$ und $\varepsilon_{\text{Stahl}} = 4,0 \text{ mm/m}$

Bewehrungsmenge $A_{s,\text{tot}} = \omega \cdot \frac{A_c}{\beta_s / \beta_R} = 0,39 \cdot \frac{0,95}{28,6} = 0,01296 \text{ m}^2 = 129,6 \text{ cm}^2$

Aus dem Dehnungszustand folgt, dass es sich um ein duktiles Bauteilversagen handelt, infolgedessen der Sicherheitsbeiwert $\gamma = 1,75$ beträgt.

Eine Bemessung mit dem Programm INCA2 liefert bei einem Sicherheitsbeiwert von $\gamma = 1,75$ eine Bewehrungsmenge von $A_{s,tot} = 128,24 \text{ cm}^2$. Auch die Dehnungen in den genannten charakteristischen Fasern stimmen sehr gut überein ($\varepsilon_{\text{Beton}} = -3,5 \text{ mm/m}$ und $\varepsilon_{\text{Stahl}} = 3,822 \text{ mm/m}$). Die Differenzen sind auf Ableseungenauigkeiten zurückzuführen.



6.10 Umrechnung DIN 1045 (Ausgabe 88) und aktueller EC2

Grundsätzlich werden in beiden Normen die Würfel- bzw. Zylinderdruckfestigkeiten zu Grunde gelegt. Auf Grund der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und Prüfkörperabmessungen erreichen die Druckfestigkeiten nach neuer Norm jedoch geringere Werte als in der alten Normung. Außerdem gibt es weitere kleinere Unterschiede in der statistischen Auswertung der Prüfreihen.

In Deutschland werden derzeit vor allem 150 mm-Würfel als Prüfkörper benutzt, deren gemessene Festigkeit dem zweiten Wert YY in der Bezeichnung C XX/YY nach neuer Normung entspricht. Ausführliche Informationen zu dieser Umstellung finden Sie im Betonkalender, Ausgabe 96, Teil 1.

alte Normung, am Beispiel eines B 25:

$$\begin{aligned}\beta_{WN} &= 25 \text{ N/mm}^2 && \text{Nennfestigkeit (Mindestfestigkeit nach 28 Tagen, 5%-Fraktile)} \\ \beta_{WS} &= 30 \text{ N/mm}^2 && \text{Serienfestigkeit (minimaler Mittelwert, darf nicht unterschritten werden)}\end{aligned}$$

Die Prüfung der Druckfestigkeit wird am Würfel mit 20 cm Kantenlänge durchgeführt. Die Lagerung erfolgt 7 Tage unter Wasser, dann an der Luft bei 15 - 22°C (siehe DIN 1045 und 1048). Für verschiedene Prüfkörperabmessungen existieren Umrechnungsfaktoren (aus Betonkalender 1996, S.45):

$$\begin{aligned}\beta_{W,200} &= 0,95 \cdot \beta_{W,150} \\ \beta_{W,200} &= 1,25 \cdot \beta_{Zyl,150/300} && \text{für Beton B 5 / 15} \\ \beta_{W,200} &= 1,18 \cdot \beta_{Zyl,150/300} && \text{für Beton B 25 / 35 / 34 / 55}\end{aligned}$$

neue Normung (EC2), am Beispiel eines C 20/25

$$\begin{aligned}f_{ck} &= 20 \text{ N/mm}^2 && \text{charakteristische Festigkeit des Zylinders (\varnothing 15 cm, h = 30 cm)} \\ f_{ckW} &= 25 \text{ N/mm}^2 && \text{Festigkeit des Würfels (15 x 15 cm)} \\ f_{cm} &= 28 \text{ N/mm}^2 && \text{Mittelwert der Festigkeit}\end{aligned}$$

Die Prüfung der Druckfestigkeit wird unter anderem am Würfel mit 15 cm Kantenlänge durchgeführt. Die Lagerung erfolgt 28 Tage unter Wasser (siehe ENV 206 nach ISO 4012-1978). Damit ergeben sich kleinere Druckfestigkeiten als nach alter DIN 1045:

$$\beta_{c(ISO)} = 0,92 \cdot \beta_{WN (150 \text{ mm})} \quad (\text{nur für Würfel } 150 \times 150 \text{ !})$$

Umrechnung zwischen den Normen

$$f_{\text{cube}, 200 \text{ mm}} = \frac{0,92}{0,95} \cdot \beta_{WN, 200 \text{ mm}} = 0,97 \cdot \beta_{WN, 200 \text{ mm}}$$

Beispiel

$$f_{\text{cube}} = 0,97 \cdot 25 = 24,25 \text{ N/mm}^2$$

Ein B 25 nach alter Normung entspricht damit in etwa einem C 20/25 nach neuer Normung.

Damit lässt sich in etwa folgende Tabelle angeben:

Beton nach alter Normung	Umrechnung $0,97 \cdot \beta_{WN}$	entspricht in etwa einem Beton nach neuer Normung
B 10	9,7	nicht vorhanden
B 15	14,55	C 12/15
B 25	24,25	C 20/25
B 35	33,94	~ C 30/37
B 45	43,65	C 35/45
B 55	53,35	C 45/55

6.11 Baustoffe aus der DIN 1045 vor 1972

Beim Bauen im Bestand kann es vorkommen, auch mit Baustoffen aus dieser Zeit zu rechnen. Durch die bekannten Unzulänglichkeiten der damaligen Norm, die schließlich zu den verbesserten Ausgaben in neuerer Zeit führten, wird jedoch empfohlen, äquivalente Baustoffkennwerte nach neuer Norm anzunehmen. Die Nachrechnung bestehender Bauwerke sollte deshalb komplett entsprechend der neuen Norm durchgeführt werden.

Baustoffbezeichnungen nach der Norm von vor 1972 und ihre Zuordnung in der neuen Norm

DIN 1045 vor 1972		EC 2
Bn 50	$f_{cm} = 50 \text{ kp/cm}^2$	nicht vorhanden
Bn 80	$f_{cm} = 80 \text{ kp/cm}^2$	nicht vorhanden
Bn 120	$f_{cm} = 120 \text{ kp/cm}^2$	nicht vorhanden
Bn 160	$f_{cm} = 160 \text{ kp/cm}^2$	nicht vorhanden
Bn 225	$f_{cm} = 225 \text{ kp/cm}^2$	≈ C 12/15
Bn 300	$f_{cm} = 300 \text{ kp/cm}^2$	≈ C 20/25
Bn 450	$f_{cm} = 450 \text{ kp/cm}^2$	≈ C 30/37

In der Ausgabe der DIN 1045 vor 1972 war die Betongüte durch die mittlere 28-Tage-Druckfestigkeit von 3 20-cm-Würfeln gekennzeichnet, die 7 Tage feucht und 21 Tage an Raumluft bei 15 bis 22°C gelagert wurden. Einzelwerte durften die Nennfestigkeit der Betongüte um höchstens 15% unterschreiten. Auf Grund der neueren Erkenntnis der Statistik wurde jedoch ein Bezug der Betongüte auf die Mittelwerte der Baustoffeigenschaften für die Bausicherheit nicht mehr als ausreichend angesehen. Da ein eventueller Bruch eines Bauteils stets von der schwächsten Stelle im Bereich hoher Beanspruchungen ausgeht, wurde gefordert, der Bemessung eine Mindestdruckfestigkeit zu Grunde zu legen, die an fast allen Stellen des Bauteils erreicht oder überschritten wird.

Damit lässt sich eine Umrechnung zwischen dieser alten Norm und der heutigen Norm näherungsweise wie folgt angeben:

alte Bezeichnung Bn 300 => Mittelwert $f_{cm} = 300 \text{ kp/cm}^2 = 30 \text{ N/mm}^2$

charakt. Würfeldruckfestigkeit nach neuer Norm

$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ N/mm}^2 = 30 - 8 = 22 \text{ N/mm}^2$ (Würfeldruckfestigkeit)

neuer Beton in etwa C 20/25 mit $f_{ck,cube} = 25 \text{ N/mm}^2$

Zu bedenken ist bei solch alten Bauwerken jedoch, dass sowohl Nacherhärtungen, aber auch Betonschädigungen im Laufe der Zeit eingetreten sein können. Die Entnahme und der Test von Kernbohrungen wären also wünschenswert, um eine genaue Einstufung entsprechend der neuen Norm zu erreichen. Von der Verwendung eines Schmidt-Hammers wird eher abgeraten, da die Betonoberflächen alter Bauwerke häufig eine sehr viel höhere Festigkeit aufweisen als der Kernbeton, der für die Tragfähigkeit maßgebend sein kann.

Weiterhin zu bedenken ist, dass der Beton vor 40 oder 50 Jahren noch nicht mit der Gleichmäßigkeit hergestellt werden konnte wie heute und dass die Güteüberwachung auf der Baustelle ebenfalls noch nicht so streng geregelt war. Überraschungen sowohl in positiver als auch in negativer Hinsicht sind also möglich.

6.12 Schwinden und Kriechen

Schwinden und Kriechen werden in INCA2 genau an der Stelle berücksichtigt, an der diese Effekte auch stattfinden. Beide Effekte werden im Normalfall immer gleichzeitig auftreten. Für ein besseres Verständnis werden Schwinden und Kriechen im folgenden getrennt behandelt.

6.12.1 Schwinden des Betons

Das Schwinden äußert sich in der Realität in einer relativen Verkürzung des Betons in Bezug auf die Bewehrung. Daher besteht die Möglichkeit, entweder auf den Beton eine Zugvordehnung (positiv) oder aber auf den Stahl eine Druckvordehnung aufzubringen. Im folgenden Beispiel schwindet der Beton um $\varepsilon_{sc} = 0,3 \text{ mm/m}$, ansonsten ist keine weitere äußere Belastung vorhanden, so dass der Einfluss des Schwindens sehr gut zu erkennen ist.

Querschnittskennwerte:

Beton C30/37 Mittelwerte

BSt 500, Mittelwerte

$$b / h / d_1 = 40 / 40 / 5 \text{ cm}$$

5 Ø 25 mm, $A_{s,tot} = 24,54 \text{ cm}^2$

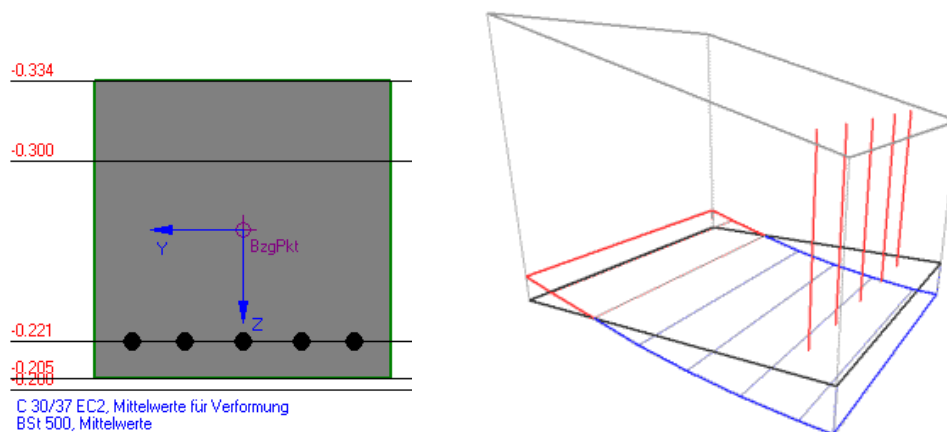
INCA2-Dateien

Schwinden auf Beton.inc

Schwinden auf Stahl.inc

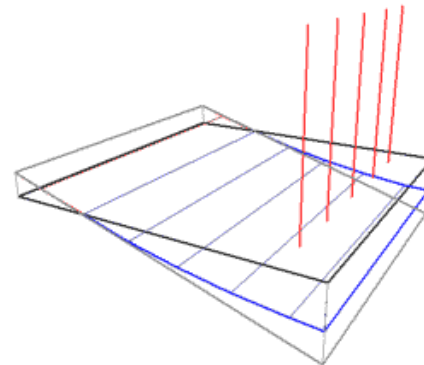
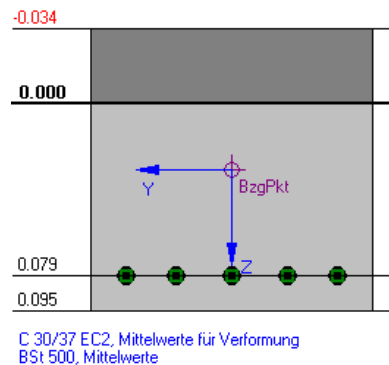
Variante 1 – Schwinddehnung auf den Beton

Erfährt der Beton eine Zugvordehnung, wird der Beton mit ε_v gedanklich gezogen und dann mit der Bewehrung fest verbunden. Im Beton ist jetzt eine Zugkraft, so dass sich der Beton gerne zurückverformen möchte, durch die Bewehrung jedoch daran gehindert wird. Die Bewehrung wird dadurch gedrückt, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Betonzugkraft und Stahldruckkraft einstellt.



Variante 2 – Schwinddehnung auf den Bewehrung

Die zweite Möglichkeit, auf den Stahl eine Druckvordehnung aufzubringen, funktioniert nach dem gleichen Schema. Der Stahl wird um ε_v zusammengestaucht und dann mit dem Beton verbunden. Jetzt herrscht im Stahl eine Druckkraft. Die Bewehrung möchte sich gerne zurück verformen, wird allerdings vom Beton daran gehindert. Auch hier stellt sich anschließend wieder ein Gleichgewicht der inneren Kräfte ein.



blau = Zugspannungen

rot = Druckspannungen

grau = Dehnungsebene

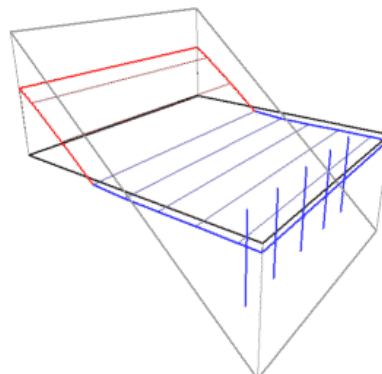
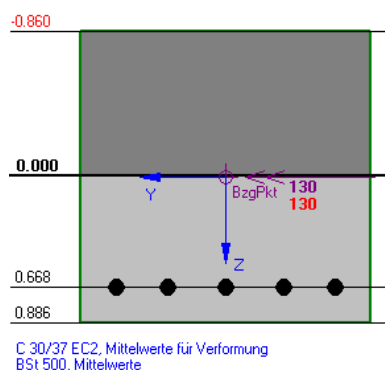
schwarz = Polygon

Die sich ergebenden Spannungsverteilungen sind für beide Vorgehensweisen gleich. Die Dehnungsebene bzw. der Bezugspunkt der Dehnungsebene ist jedoch unterschiedlich, da die Dehnungsebene grundsätzlich auf nicht vorgedehnte oder vorgekrümmte Querschnittsteile bezogen wird. In Modellierungsvariante 1 ist dies also der Stahl. Dieser wird vom Beton zusammengedrückt, so dass die Dehnungsverteilung auf den ersten Blick aussieht, als ob der Querschnitt komplett überdrückt wird. Man sieht damit allerdings folgerichtig, dass das Bauteil im Schwerpunkt 0,2710 mm/m kürzer wird. In Variante 2 wird die Dehnungsebene auf den Beton bezogen, womit man sofort sieht, wo sich im Beton Druck- und Zugspannungen befinden.

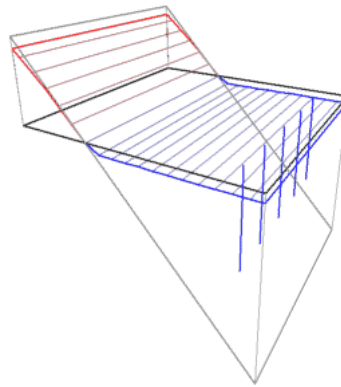
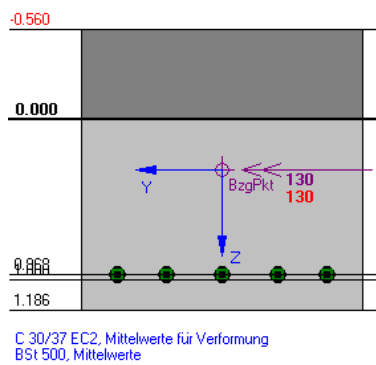
Die Umrechnung zwischen den beiden Varianten erfolgt einfach durch die Addition der Schwindvordehnung von $\varepsilon_{cs} = 0,3 \text{ mm/m}$.

Im Weiteren wird der Querschnitt mit einem Biegemoment von $M_y = 130 \text{ kNm}$ belastet. Auch hier sind wieder beide Varianten der Modellierung aufgeführt.

Schwindvordehnung auf den Beton, Bezugspunkt der Dehnungsebene ist die Bewehrung:

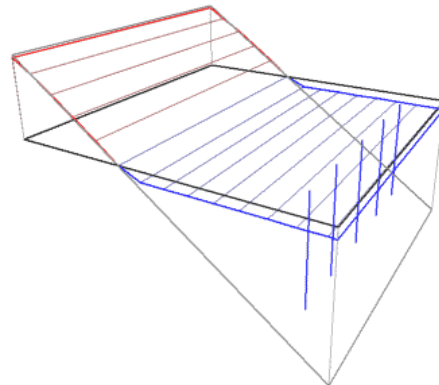
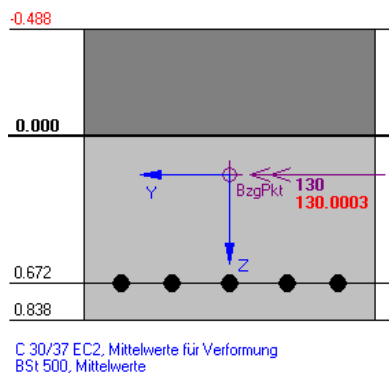


Schwindvordehnung auf die Bewehrung aufgebracht, Bezugspunkt der Dehnungsebene ist der Beton.



Vergleich: ohne Schwinden

Wie man sieht sind die Randdehnungen und damit die Verkrümmungen kleiner als bei den Querschnitten mit Berücksichtigung des Schwindens. Bei genauen Verformungsberechnungen sollten derartige Effekte also berücksichtigt werden!



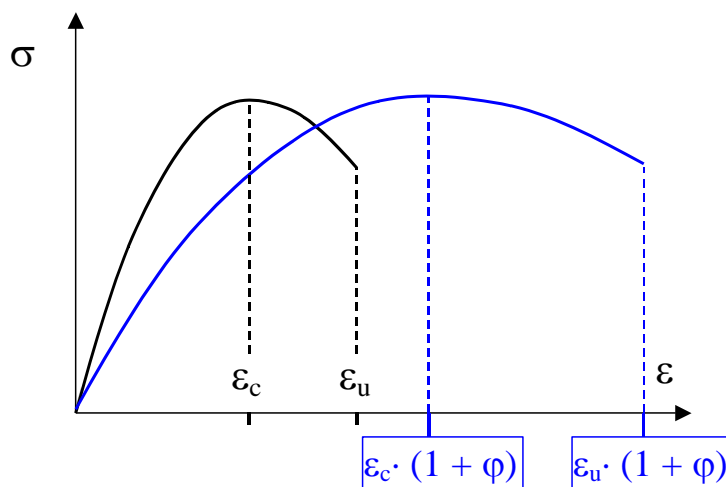
Da in diesem Beispiel mit den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften gerechnet wurde, wird die versteifende Mitwirkung des Betons auf Zug mit einer fiktiven Spannungsdehnungslinie auf der Zugseite berücksichtigt. Je nach Stahldehnung wird die Betonspannung auf der Zugseite abgemindert. Trotz der unterschiedlichen Dehnungsebenen wird der Abminderungsfaktor jeweils gleich zu 0,6836 bestimmt.

6.12.2 Kriechen des Betons

„Das Kriechen des Betons entspricht einer Zunahme der Verformungen im Laufe der Zeit, hervorgerufen durch ständig einwirkende Beanspruchungen bei gleichbleibenden Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen. Im Rahmen baupraktischer Berechnungen können Kriechverformungen für Beanspruchungen unter Gebrauchslasten durch einen abgeminderten Elastizitätsmodul hinreichend genau erfasst werden. Diese Abminderung des E-Moduls ist rechentechnisch mit geringem Aufwand durch Strecken der Spannungs-Dehnungs-Linie mit dem Faktor $(1 + \varphi)$ möglich. Entsprechende Vorschläge für ein derartiges Verfahren, das für den Bereich niedriger Spannungen im Gebrauchszustand eine lineare Beziehung zwischen Kriechverformungen und Spannungen annimmt, enthält beispielsweise die CEB/FIB-Mustervorschrift (1987). Die Annahme einer linearen Beziehung erlaubt es, Kriechverformungen aus verschiedenen Spannungsanteilen zu überlagern.“

[aus dem Heft 415 des DAfStB, Quast, Busjaeger, 1990.]

Sollen die Auswirkungen des Kriechens auf einen Querschnitt untersucht werden, so sind die Spannungs-Dehnungs-Linien für den benutzten Beton abzuändern. Alle Dehnungen sind mit dem Faktor $(1 + \varphi)$ zu multiplizieren. Auch die Grenzdehnungen (Betondruckseite) müssen entsprechend geändert werden.



Die Werte für den Kriechbeiwert φ lassen sich den Normen (z.B. EC2, DIN 1045-1) entnehmen bzw. mit dort abgedruckten Algorithmen genauer berechnen.

Anmerkungen:

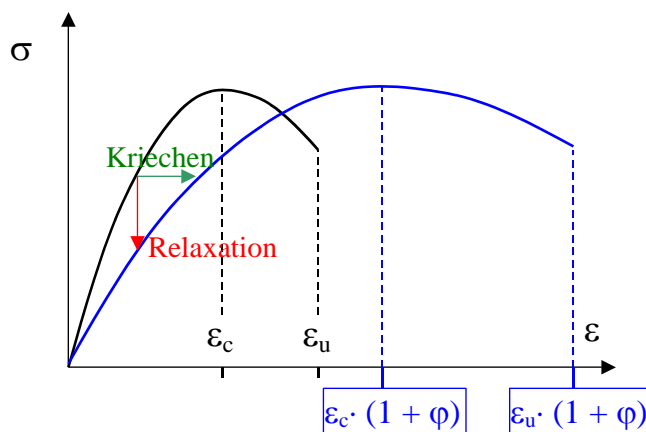
Die gezeigte Formulierung setzt voraus, dass die kriecherzeugende Spannung während des gesamten Zeitraums konstant bleibt (grüner Pfeil im nachfolgenden Bild). Durch die Umlagerung von Betondruckkräften auf die Druckbewehrung wird die Betonspannung bei gleichbleibendem Biegemoment jedoch abnehmen, so dass der gezeigte Zusammenhang die Kriechverformungen geringfügig überschätzen wird.

Schwieriger zu modellieren ist die Relaxation (roter Pfeil im nachfolgenden Bild), das heißt, der Abbau von Betonspannungen bei gleichbleibenden Verformungen bzw. Dehnungen. Dazu zählt zum

Beispiel der Abbau von Zwangskräften bei der Stützensenkung eines Durchlaufträgers. Da die Streckung der Spannungsdehnungslinie nur in horizontaler Richtung um den Faktor $(1 + \varphi)$ erfolgt, ist das Verhältnis senkrecht dazu nur bei einer linear-elastisch definierten Spannungs-Dehnungs-Linie ebenfalls $(1 + \varphi)$. Würde man eine Rechnung in Zeitschritten durchführen (entsprechend mit Inkrementen $\Delta\varphi$), ergäbe sich für die Relaxation der Zusammenhang

$$\sigma_{\text{Relax}} = \sigma \cdot e^{(-\varphi)}.$$

Mit der hier gezeigten Methode (Streckung mit $(1 + \varphi)$) werden die Spannungen und damit auch die Schnittgrößen überschätzt.



Die größte Unsicherheit besteht jedoch im Allgemeinen darin, einen korrekten Kriechbeiwert φ zu ermitteln. Da der wirkliche Wert ohne weiteres um 50% und mehr nach oben oder unten vom rechnerisch ermittelten Wert abweichen kann, ist eine genauere Rechnung meist nicht erforderlich und sinnvoll.

Weiterhin ist zu beachten, dass das angenommene lineare Kriechen nur bis ca. 45% der Betonfestigkeit vorhanden ist, bei höheren Spannungen vergrößert sich der Kriecheinfluss erheblich um einen nichtlinearen Anteil.

7 Rechenalgorithmen

7.1 Spannungsintegration

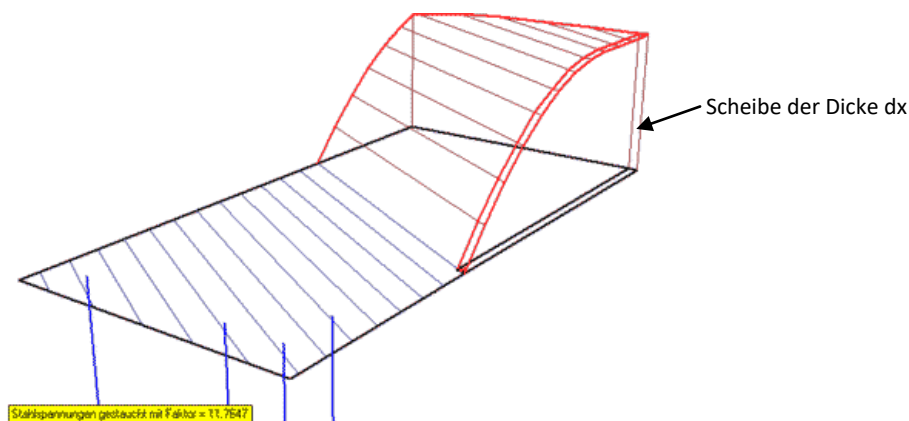
Eingangswerte bei der Spannungsintegration sind die Werte für die Dehnungsebene ε_0 , k_y , und k_z . Damit können während der Rechnung an jeder beliebigen Stelle des Querschnittes die aktuelle Dehnung und damit die zugehörige Spannung bestimmt werden.

Bewehrungsflächen / einzelne Punkte:

An der Koordinate (y / z) wird die aktuelle Dehnung (inklusive Vordehnung) bestimmt. Mit diesem Wert kann die zugehörige Spannung aus dem Materialgesetz sowie anschließend die Kraft berechnet werden.

Polygone

Um die resultierende Normalkraft sowie deren Angriffspunkt zu bestimmen, muss anschaulich das Volumen des Spannungskörpers bestimmt werden. Im folgenden Bild ist dieser rot markiert (Druckbereich Beton).



Wie das Bild zeigt, kann der Körper in Scheiben der Dicke dx geteilt werden. Ist der Verlauf der Spannungen sowie die Länge dieses Körpers bekannt, kann damit sein Volumen bestimmt werden:

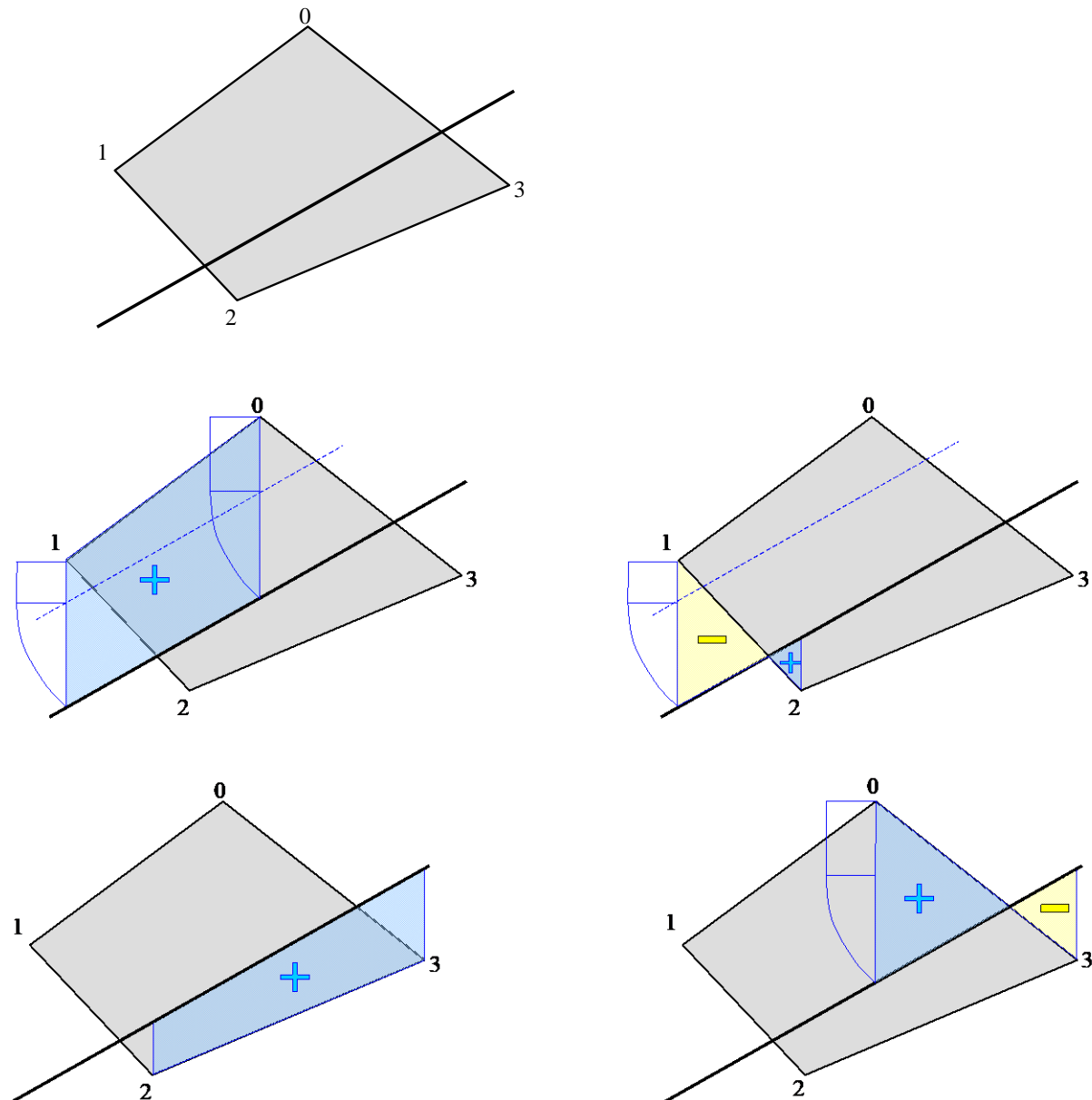
$$V = \text{Fläche} \cdot dx$$

Da die Funktionen, die den Verlauf der Spannungen beschreiben, bekannt sind und einfachen mathematischen Funktionen folgen, kann die Fläche A im Normalfall auf analytischem Wege (analytische Integration) bestimmt werden.

Anschließend müssen diese Volumina der Dicke dx alle aufsummiert werden, was analytisch nicht mehr ganz so einfach möglich ist. Aus diesem Grund kommt hier die numerische Integration zum Zuge, die je nach Grad der Grundfunktion mehr oder minder genau ist.

Grundsätzlich wird mit der Gauss-Legendre-Integration gearbeitet, die den Vorteil der geringeren Anzahl von Stützstellen im Vergleich zur Newton-Cotes-Integration hat. Beim linear-elastischen Materialgesetz werden in Querrichtung nur zwei Stützpunkte benötigt, beim Parabel-Rechteck-Diagramm bereits 3 oder mehr (je nach Exponent).

Bei einem Polygon wird nun jeder Randabschnitt betrachtet (im unten stehenden Beispiel 0-1, 1-2, 2-3, 3-0) und das Volumen bis zu einer Bezugsgeraden aufintegriert. Diese Bezugsgerade kann die y- oder die z-Achse oder auch die Dehnungsnulllinie sein. Eine Rotation in eine spezielle Richtung (z.B. immer orthogonal zur DNL) ist nicht erforderlich.



Falls nötig erfolgt eine Unterteilung des Randes in mehrere Segmente. Vor allem an Unstetigkeitsstellen wie die Dehnungsnulllinie oder an Stellen mit einem Wechsel vom Parabel zum Rechteckteil ist dies sinnvoll. Das Vorzeichen der einzelnen Flächen ergibt sich mathematisch „von selbst“ durch die Lage der Punkte in Relation zur Bezugslinie. Bei Umfahungsrichtung links herum ergibt sich ein positives Volumen, falls das Polygon rechts herum umfahren wird, ergibt sich ein negatives Volumen (z.B. für Aussparungen).

Während der Volumenintegration muss ebenfalls der Schwerpunkt der einzelnen Teile bestimmt werden. Auch hier ergibt die anschließende Integration in Querrichtung den resultierenden Schwerpunkt des Spannungsvolumens.

7.2 Iterationsverfahren

Auf Grund der nichtlinearen Spannungsdehnungslinien lässt sich im Normalfall der Dehnungszustand zu einer gegebenen Schnittgrößenkombination nur mittels Iteration bestimmen. Da die Spannungsintegration sehr zeitaufwändig ist, werden hohe Ansprüche an das Iterationsverfahren gestellt, das auch bei schlechten Startwerten schnell und sicher konvergieren sollte.

Eine gute Wahl im Falle einer stetig differenzierbaren und streng monoton steigenden Funktion ist das Newton-Verfahren, welches beim Sicherheitsnachweis und zur Bestimmung des Dehnungszustands zum Einsatz kommt.

Vorgehensweise Dehnungszustand:

Zur Berechnung des Dehnungszustandes muss die Dehnungsebene

$$\varepsilon(y,z) = \varepsilon_0 + k_y \cdot y + k_z \cdot z$$

so variiert werden, dass sich bei der Spannungsintegration über den gesamten Querschnitt die gewünschten Schnittgrößen $N_x / M_y / M_z$ ergeben. Es handelt sich damit um ein dreiparametrisches Iterations-Problem $(N_x / M_y / M_z) = \text{Funktion}(\varepsilon_0, k_y, k_z)$.

Für die Berechnung des Dehnungszustands wird als Startwert meistens das Ergebnis einer linearen Rechnung benutzt. Ergibt diese Iteration keinen konvergenten Zustand, so wird mit einem gedämpften Newtonverfahren mit gleichen Startwerten weiter gerechnet, bei dem die Schrittweite anfangs sehr stark, später weniger stark reduziert wird. Führt auch diese Vorgehensweise zu keinem Ergebnis, wird der Sicherheitsnachweis durchgeführt. Ergibt sich eine Sicherheit von $\eta > 1,0$ wird das Ergebnis des Sicherheitsnachweises als neuer Startwert für die Dehnungsiteration benutzt, wieder einmal ungedämpft, anschließend gedämpft.

Die Iteration selber erfolgt mit dem Newtonverfahren. Dazu werden die Ableitungen bzw. Gradienten der Funktion $(N_x / M_y / M_z) = \text{Fkt}(\varepsilon_0, k_y, k_z)$ in die einzelnen Richtungen benötigt. Dazu wird der aktuelle Dehnungszustand $(\varepsilon_0, k_y, k_z)$ mit jeweils $\Delta\varepsilon_0, \Delta k_y, \Delta k_z$ geändert und die resultierenden Werte für $(N_x / M_y / M_z)$ bestimmt. Damit lässt sich die Jakobi-Matrix aufstellen und die Verbesserung des Iterationswertes bestimmen.

Iterationsverfahren für Bemessung, M/k-Linie und M_y/M_z -Linie:

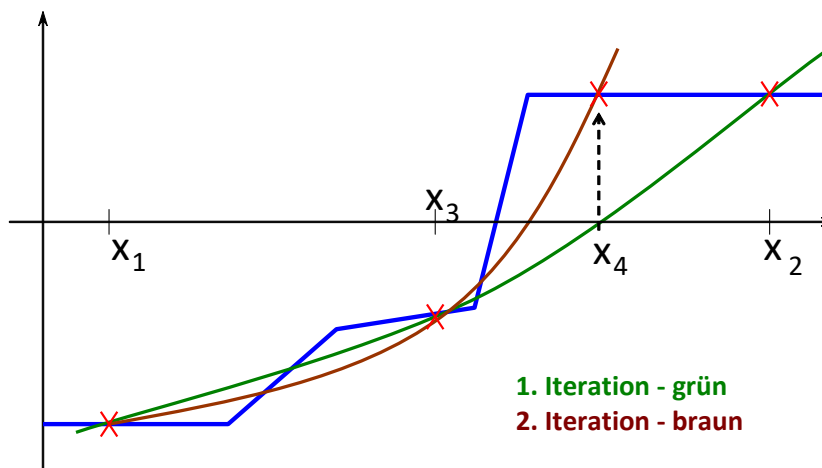
Bei diesen Berechnungen muss nur ein Wert variiert werden, um von der Zielfunktion die Nullstelle zu finden. Im Falle der Bemessung ist der Eingangswert der Faktor für die Bewehrung, im Ergebnis muss der Sicherheitsnachweis einen Sicherheitsfaktor von $\gamma = 1,0$ liefern. Im Falle der M/k-Linie oder der M_y / M_z -Linie ist der Eingangswert die Dehnung ε_0 im Koordinatenursprung, als Ergebnis muss die Normalkraft N_x einem vorgegebenen Wert entsprechen.

Bei dieser einparametrischen Nullstellensuche kommt ein Verfahren mit 3 Stützstellen zum Einsatz, durch die eine Ausgleichsparabel gelegt und deren Nullstelle als neuer Näherungswert bestimmt wird. Dieses Verfahren hat den Vorteil der sehr schnellen und vor allem sicheren Konvergenz auch bei extrem schlechten Startwerten. Waagerechte Verläufe im Funktionsverlauf des Parameters ε_0 , wie sie bei der Berechnung der M/k-Linie oder M_y / M_z -Linie auftreten können, sind unproblematisch.

Das Newtonverfahren würde in so einem Fall versagen. Nachteilig ist jedoch, dass ein Startwert auf der positiven, ein Startwert auf der negativen Seite bekannt sein muss.

Schema der Iteration:

1. Startwert x_1 und x_2 wählen und Funktionswerte berechnen,
Bedingung: $fkt(x_1) < 0$
 $fkt(x_2) > 0$
2. bei $x_3 = \frac{1}{2} \cdot (x_1 + x_2)$ den nächsten Wert wählen und $fkt(x_3)$ berechnen
3. Parabel durch diese drei Punkte legen und Nullstelle berechnen $\Rightarrow x_4$
4. $fkt(x_4)$ berechnen, ergibt neuen Punkt für die Parabel, weiter bei Punkt 2



Der hier gezeigte Verlauf der Kurve ist zwar ein Extrembeispiel, zeigt jedoch sehr anschaulich die Stabilität und Schnelligkeit des Algorithmus. Insbesondere das Newton-Verfahren würde hier auf Grund der waagerechten Abschnitte versagen. Diese horizontalen Bereiche ergeben sich z.B. auf Grund der elastisch-plastischen Definition der Materialgesetze. Wird die Bewehrung im plastischen Zustand noch weiter gedehnt, ergeben sich keine Unterschiede in der Spannung, so dass die Normalkraft konstant bleibt.

7.3 Grenzdehnungen / Dehnungskennziffern (DKZ)

7.3.1 Grenzdehnungen

Über die Grenzdehnungen wird der Grenzzustand des Querschnittes vorgegeben. Folgende Arten der Dehnungen werden benutzt. Die Werte sind nur als Beispiel zu verstehen und können vom Nutzer jederzeit entsprechend der benutzten Norm (DIN 1045, EC 2 etc.) verändert werden.

eps.Druck.B	=	-3.5000 mm/m	(max. Druckstauchung bei Biegung)
eps.Druck.zentr.B	=	-2.0000 mm/m	(max. Druckstauchung bei zentrischem Druck)
eps.Zug.B	=	100.0000 mm/m	(max. Zugdehnung für Beton)
eps.Druck.S	=	-5.0000 mm/m	(max. Druckstauchung für Stahl)
eps.Zug.S	=	25.0000 mm/m	(max. Zugdehnung für Stahl)

Wesentlich für den Grenzzustand sind eigentlich nur eps.Druck.B, eps.Druck.zentr.B und eps.Zug.S. Daraus lässt sich im Normalfall ohne Probleme jeder Grenzzustand eines Querschnitts bestimmen. In Ausnahmefällen werden jedoch die zusätzlichen Dehnungen eps.Druck.S und eps.Zug.B benötigt. Eps.Druck.S ist zum Beispiel dann maßgebend, wenn ein Querschnitt nur aus Stahl berechnet werden soll oder bei einem Verbundträger das maximale Stützenmoment (Stahlprofil liegt auf der Unterseite) ermittelt wird. Eps.Zug.B wiederum ist wichtig, falls es nur einen Bewehrungspunkt gibt, der genau auf der Polygonkante liegt (z.B. angeklebte Bewehrung).

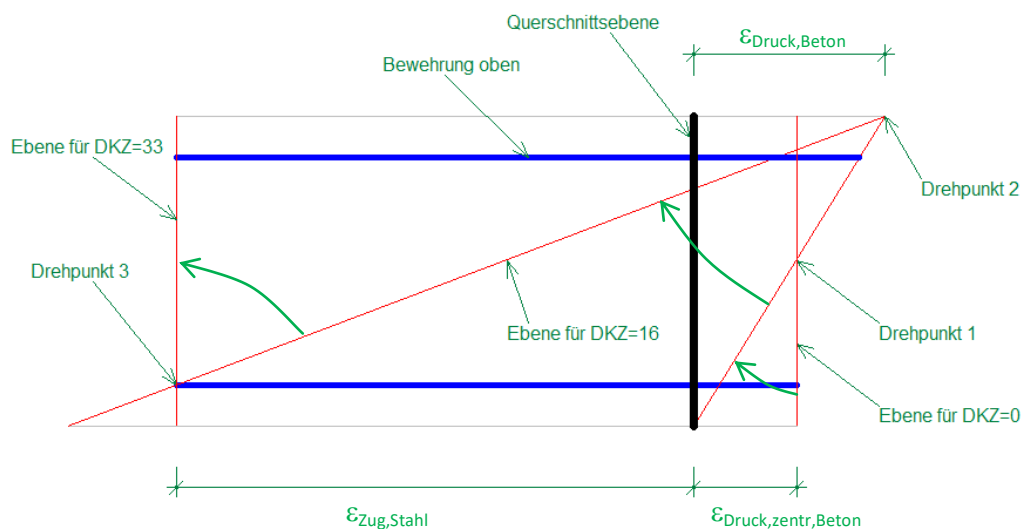
Durch die Wahl einer bestimmten Grenzdehnung können aber auch Untersuchungen im Gebrauchszustand durchgeführt werden. So ist es beispielsweise interessant, für welches Biegemoment die Spannung im Stahl einen bestimmten Wert besitzt, um z.B. einen vereinfachten Rissbreitennachweis zu führen.

Für die Bemessung eines Stahlbetonquerschnitts werden die Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften genutzt. Nach der aktuellen Normung (EC2) liegt die Grenzdehnung für die Betone C12/15 bis C 50/60 bei eps.Druck.B = -3,5 mm/m. Die höherfesten Betone C55/67 bis C 100/115 besitzen für die Bemessung eine kleinere Grenzdehnung, die bei Verwendung eines derartigen Betons in das entsprechende Feld eingetragen werden muss! Auch bei Verformungsrechnungen mit den Mittelwerten oder den charakteristischen Werten (bei Stützen) der Baustoffeigenschaften muss die Grenzdehnung der jeweiligen Betone korrekt eingetragen werden. Die Baustoffkennwerte mit den zugehörigen Dehnungen finden Sie in der dem Programm beigelegten Excel-Tabelle Baustofftabelle.xls.

7.3.2 DKZ - Dehnungskennziffer

Die Dehnungskennziffer ist ein künstlich eingeführter Wert, um einige Berechnungen (z.B. Sicherheitsnachweis) etwas einfacher durchführen zu können. Der Bereich der DKZ läuft von 0 bis 33, wobei DKZ = 0 zentrischen Druck und DKZ = 33 zentrischen Zug mit jeweils der maximal zugelassenen Dehnung abbildet. Jede DKZ ist genau einem Grenzdehnungszustand zugeordnet, wobei auch alle Zwischenwerte wie z.B. DKZ = 2,7854 möglich sind. Folgende Dehnungsebenen werden durchlaufen:

1. Zentrisch gedrückt, DKZ = 0 (zentrisch gedrückter Betonquerschnitt)
2. Drehung der Dehnungsebene um Drehpunkt 1, bis auf der Oberseite die Grenzdehnung $\epsilon_{\text{Druck,Beton}}$ erreicht ist und auf der Unterseite gerade $\epsilon = 0$
3. Drehung der Dehnungsebene um den Drehpunkt 2, bis auf der Unterseite in der Lage der unteren Bewehrung die Dehnung $\epsilon_{\text{Zug,Stahl}}$ erreicht ist, entspricht DKZ = 16
4. Drehung der Dehnungsebene um Drehpunkt 3, bis auch auf der Oberseite die Dehnung $\epsilon_{\text{Zug,Stahl}}$ erreicht ist, entspricht DKZ = 33



Anwendung Sicherheitsnachweis:

Beim Sicherheitsnachweis für die Schnittgrößenkombination $N_x / M_y / M_z$ wird ein Faktor gesucht, mit dem alle drei Werte zu multiplizieren sind, um den Grenzzustand zu erreichen. Die Winkel zwischen M_y und M_z sowie N mit der Ebene M_y / M_z bleiben gleich und sind damit die zu bestimmenden Zielwerte bei der Iteration. Eingangswerte (bzw. veränderliche Größen) sind die Hauptkrümmungsrichtung und die DKZ, die immer einen Grenzdehnungszustand ergibt.

In der Summe ist dieser Wert damit für den durchschnittlichen Anwender eher uninteressant. Für die Programmierung bzw. um einen etwas tieferen Einblick in die Rechnung oder evtl. Konvergenzschwierigkeiten zu erhalten, ist es ein wichtiger Programmpunkt in INCA2.

Weitere Informationen stehen auch im Heft von Busjaeger und Quast (1990), die die Rechenroutinen für das Programm MasQue (ein Vorläufer von INCA2) detailliert beschreiben.

8 Beispiele

In den folgenden Beispielen werden sowohl die Bedienung des Programms INCA2 erläutert als auch Methoden und Möglichkeiten zur Modellierung von INCA2-Querschnitten vorgestellt.

Die Option Aussparungen für die Bewehrungsstäbe wurde erst etwas später in das Programm INCA2 aufgenommen. Die im Folgenden gezeigten Beispiele wurden noch ohne diese Option gerechnet, so dass sich geringfügige Unterschiede in den Ergebnissen ergeben werden. Deaktivieren Sie gegebenenfalls diesen Punkt im Menü Extras => Einstellungen => Ergebnisse, so dass die gerechneten Ergebnisse mit den hier vorgestellten Beispielen übereinstimmen.

8.1 Einfacher Rechteckquerschnitt

8.2 Spannbetonträger

8.3 Nachträglich ergänzter Querschnitt

8.4 Verbundträger

Berechnungen mit den Programmen INCA2 und ABaS

8.5 Verformungsrechnung Einfeldträger

8.6 Berechnung einer Stütze

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

8.7 Interaktionsdiagramme

8.1 Beispiel 1 – Einfacher Rechteckquerschnitt

Starten Sie INCA2 bzw. wählen Sie im Menü Datei den Unterpunkt Neu, um einen leeren Datensatz zu erhalten. Standardmäßig sind bereits die Baustoffkennwerte für C20/25, C30/37, C40/50 sowie Betonstahl B 500 jeweils als Bemessungswerte vorhanden.

Um den rechteckigen Betonquerschnitt zu erstellen, wählen Sie im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Rechteck**. In dem erscheinenden Fenster geben Sie bitte die Eckkoordinaten des Rechtecks ein (diagonal gegenüber liegend). Die Angaben erfolgen in Metern, als Trennzeichen für die Nachkommastellen wird sowohl ein Punkt als auch ein Komma akzeptiert.

Ecke 1:	y = -0,20	z = -0,30
Ecke 2:	y = +0,20	z = +0,30

Wählen Sie weiterhin als Material den **Beton C30/37 PR, Bemessungswerte**. Wenn die Option **Querschnitt** angeklickt ist, können Sie mit OK bestätigen.

Zum Erzeugen der Bewehrungsstäbe wählen Sie im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Punkt**. In dem erscheinenden Fenster wählen Sie die Option **Bewehrungspunkt** und in der dann aktivierten Auswahlbox Baustoff den Betonstahl B 500. Der Durchmesser wird vorerst zu 10 mm festgelegt.

Erzeugen Sie anschließend vier Bewehrungspunkte, indem Sie die y/z-Koordinaten eintragen und mit dem Button **Anwenden** bestätigen. Achten Sie bitte darauf, den Button **Anwenden** jeweils nur einmal zu drücken, da ansonsten zwei übereinander liegende Bewehrungsstäbe erzeugt werden können.

Punkt 1	y = +0,15	z = +0,25
Punkt 2	y = +0,05	z = +0,25
Punkt 3	y = - 0,05	z = +0,25
Punkt 4	y = - 0,15	z = +0,25

Anschließend wählen Sie den Button **Abbrechen**, um das Fenster zu schließen.

Im Weiteren wird eine Belastung auf den Querschnitt aufgebracht. Wählen Sie dazu im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Einwirkungen** und geben den Wert für das Biegemoment M_y ein:

$$M_y = 450 \text{ kNm}$$

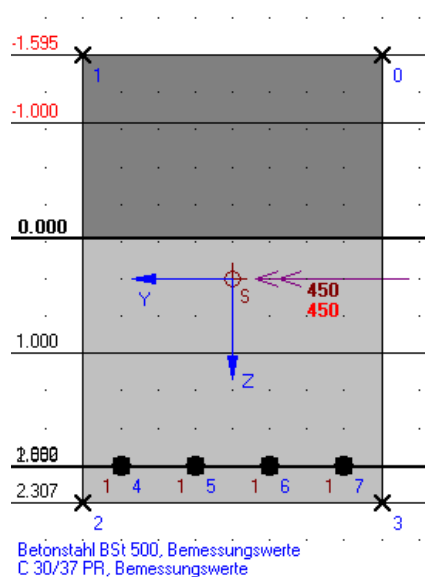
Kontrollieren Sie jetzt bitte noch, ob die Grenzdehnungen korrekt eingestellt sind. Wählen Sie dazu im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Grenzdehnungen** und klicken dort auf den Button **EC2**, anschließend auf **OK**. Wichtig ist, dass die max. Druckdehnung für den Beton bei -3,5 mm/m und die max. Zugdehnung der Bewehrung (Stahl) bei 25,0 mm/m liegen.

Durch Wahl des Menüpunktes **Ergebnisse**, Unterpunkt **Dehnungszustand** können Sie die Dehnungsberechnung für diesen Querschnitt durchführen. Wegen der sehr klein gewählten Bewehrung kann das Biegemoment von $M_y = 450 \text{ kNm}$ nicht aufgenommen werden. Das derzeit aufnehmbare Biegemoment beträgt $M_y = 73,44 \text{ kNm}$.

Um dem Querschnitt eine ausreichende Tragfähigkeit zu verleihen, wird die Bewehrung erhöht. Wählen Sie dazu im Menü **Ergebnisse** den Unterpunkt **Bemessung** und dann im sich öffnenden Fenster die erste Option **Alle Bewehrungsgruppen**. Nach dem Klick auf den **OK**-Button erscheint eine Message-Box, dass die Bewehrung um den Faktor 6,8778 erhöht werden muss, um die Beanspruchung aufnehmen zu können.

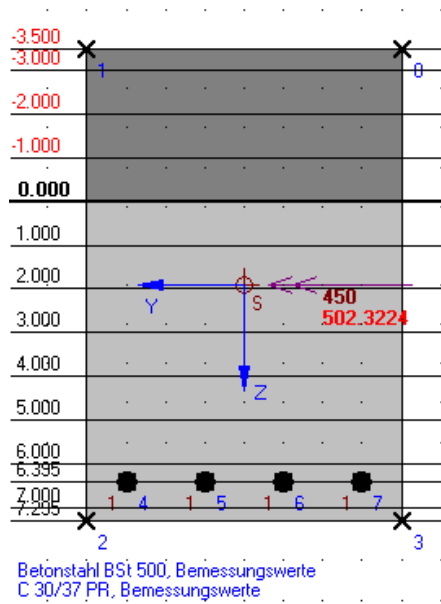
Die Bewehrung wird automatisch angepasst und die Dehnungsberechnung durchgeführt. Die Obere Kante des Querschnittes besitzt eine Dehnung von $-3,5 \text{ mm/m}$ und ist damit maximal gestaucht.

Markieren Sie im Weiteren alle vier Bewehrungsstäbe auf der Unterseite des Querschnitts. Klicken Sie diese dazu der Reihe nach mit der Maus an und halten dabei die **Strg**-Taste gedrückt. Wählen Sie anschließend im Menü **Bearbeiten** den Unterpunkt **Eigenschaften**. Die Bewehrungsstäbe haben aktuell einen Durchmesser von 26,2 mm. Erhöhen Sie diesen auf 28 mm und bestätigen mit **OK**. Bei einer erneuten Dehnungsberechnung ist zu erkennen, dass der Querschnitt nicht mehr so stark beansprucht wird, die max. Druckdehnung beträgt $-1,595 \text{ mm/m}$. Im folgenden Bild ist dieser Dehnungszustand dargestellt. Der obere, dunkel schraffierte Bereich stellt die Druckzone dar, die roten Zahlenwerte am linken Rand sind die zugehörigen Druckdehnungen. Die blauen Zahlen rechts unten neben den Punkten sind die Knotennummern, die braun dargestellten Zahlen links unten neben den Bewehrungsstäben kennzeichnen die Bewehrungsgruppe. Weiterhin werden in der linken unteren Ecke die benutzten Baustoffe ausgegeben.



Überprüfen Sie jetzt, wie weit die Beanspruchung gesteigert werden kann, indem Sie im Menü **Ergebnisse** den Punkt **Sicherheitsnachweis** wählen. In der folgenden Message-Box erscheint die Meldung, dass die Belastung (hier M_y) um den Faktor 1,163 bis zum Erreichen der Tragfähigkeit gesteigert werden kann. Dies entspricht einem Biegemoment von $M_y = 502,3 \text{ kNm}$.

Der Biegemomentenvektor ist mit zwei Zahlenwerten beschriftet. Der obere Wert (braun dargestellt) ist die vom Nutzer eingegebene Beanspruchung. Der untere Wert (rot) ist das Ergebnis der aktuellen Rechnung, hier also die maximale Beanspruchung.

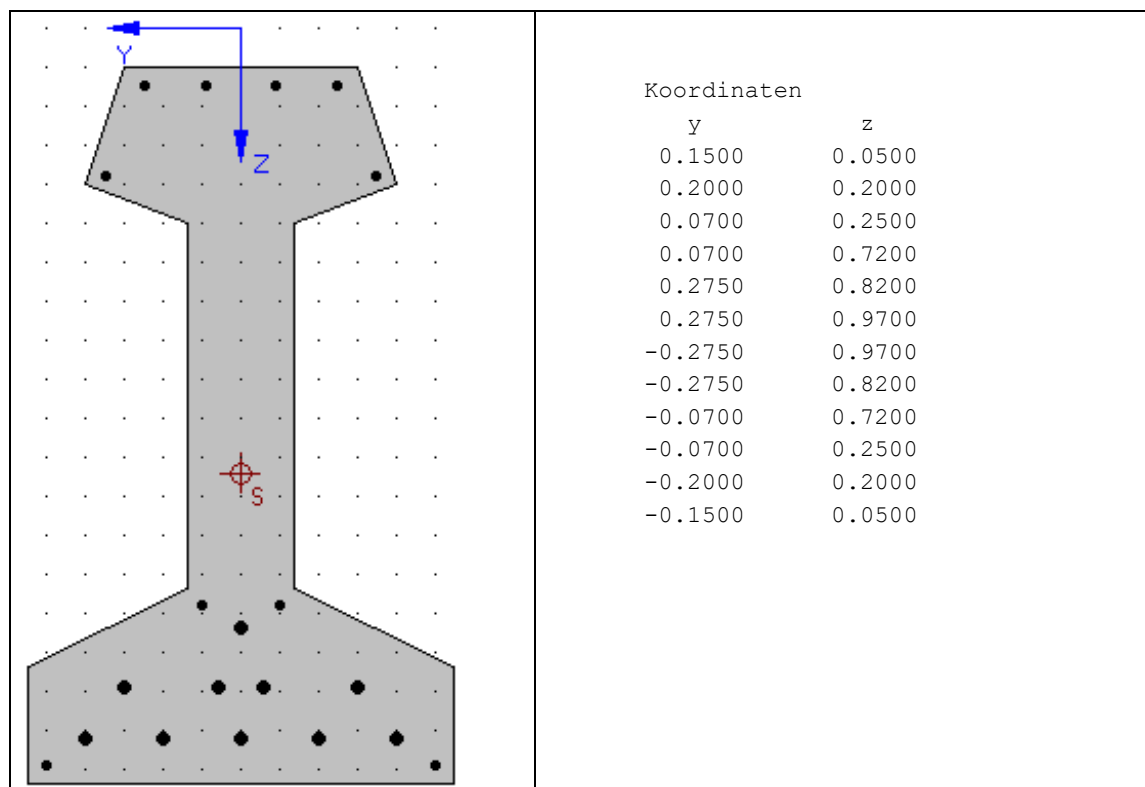


8.2 Beispiel 2 – Spannbetonträger

Starten Sie INCA2 bzw. wählen Sie im Menü Datei den Unterpunkt **Neu**, um einen leeren Datensatz zu erhalten. Standardmäßig sind bereits die Baustoffkennwerte für C20/25, C30/37, C40/50 sowie Betonstahl B 500 jeweils als Bemessungswerte vorhanden. Der in diesem Beispiel benötigte Spannstahl kann aus einer vordefinierten Baustofftabelle importiert werden. Wählen Sie dazu im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Baustoffe** und im sich öffnenden Fenster den Button **Baustofftabelle**. In einem ersten Teil der folgenden Tabelle sind die Baustoffe für die Zugbewehrung zusammengefasst. Markieren Sie den **Spannstahl 1550/1770, Bemessungswerte** und übernehmen diesen. Die Liste der Baustoffe kann anschließend geschlossen werden.

Der in diesem Beispiel benutzte Querschnitt stammt von einer Brücke nördlich von Hamburg und wurde bereits in den 60er Jahren gefertigt. Im Jahre 2002 musste wegen Unsicherheiten bei den Spanngliedern der Querschnitt genauer untersucht werden. Die im folgenden Beispiel benutzten Baustoffeigenschaften (sowie einige Abmessungen) sind jedoch vereinfacht worden.

Wählen Sie im Menü Eingabe den Unterpunkt Punkte als Liste, um den Betonquerschnitt zu erstellen. Benutzen Sie den Karteikartenreiter Freie Tabelle und kopieren folgende Wertepaare (y / z) in die Box:



Anschließend wählen Sie als Art der Punkte die Option **Neues Polygon**, als Baustoff den Beton **C40/50 PR, Bemessungswerte** und bestätigen mit **OK**.

Als zweites wird die schlaffe Bewehrung definiert. Wählen Sie dazu wie bereits zuvor im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Punkte als Liste**. Markieren Sie jetzt allerdings die **Option Bewehrungspunkt** und als Material den **Betonstahl B 500, Bemessungswerte**. Die Bewehrungsgruppe ist 1, den Durchmesser legen Sie auf 10 mm fest. Die Koordinaten (y / z) entnehmen Sie bitte folgender Liste:

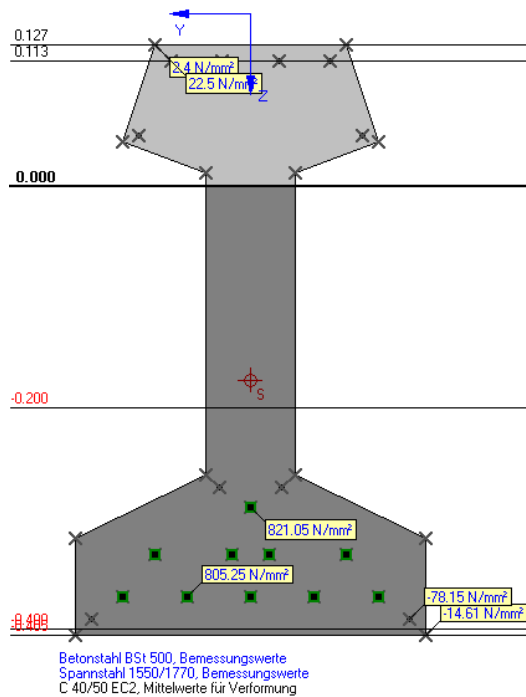
0.0500	0.7400
-0.0500	0.7400
0.2500	0.9450
-0.2500	0.9450
0.1250	0.0750
-0.1250	0.0750
0.0450	0.0750
-0.0450	0.0750
0.1750	0.1900
-0.1750	0.1900

Als drittes wird die vorgespannte Bewehrung definiert, die im Fertigteilwerk im Spannbett eingebaut wurde. Achten Sie jetzt bitte darauf, dass Sie eine **neue Bewehrungsgruppe 2** und als Baustoff den **Spannstahl 1550/1770** wählen. Der Durchmesser beträgt jetzt 16 mm. Weiterhin muss eine **Vordehnung** definiert werden durch Klick auf den Button **Vordehnung/Vorkrümmung**. Ein neues Fenster öffnet sich, in dem Sie die Vordehnung **eps.0 = 4,5 mm/m** eintragen und mit **OK** bestätigen. Die Koordinaten (y / z) entnehmen Sie bitte folgender Liste:

0.2000	0.9100
0.1000	0.9100
0.0000	0.9100
-0.1000	0.9100
-0.2000	0.9100
0.1500	0.8450
0.0300	0.8450
-0.0300	0.8450
-0.1500	0.8450
0.0000	0.7700

Wählen Sie jetzt im Menü **Ergebnisse** den Unterpunkt **Dehnungszustand**, um die Beanspruchungen im Fertigteilwerk nach dem Kappen der Spanngliedverankerung zu sehen. Die Druckzone befindet sich unten, auf der Oberseite ist der Querschnitt weit aufgerissen. Zu beachten ist jedoch, dass derzeit mit dem Bemessungswerten gerechnet wurde!

Wird der Querschnitt mit den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften gerechnet (also der vorhandene Zustand im Fertigteilwerk), dann wird der Querschnitt zwar auf der Oberseite auf Zug beansprucht, könnte jedoch noch knapp im ungerissenen Zustand verbleiben. Importieren Sie dazu im Menüpunkt **Eingabe**, Unterpunkt **Baustoffe**, Button **Baustofftabelle** den Beton **C40/50 EC2, Mittelwerte für Verformung**. Ändern Sie anschließend den Baustoff des Querschnitts (Polygon), indem Sie es (am Rand) markieren und im Menü **Bearbeiten**, Unterpunkt **Eigenschaften** den soeben importierten C40/50 Mittelwerte als aktuellen Baustoff setzen. Eine erneute Berechnung des Dehnungszustandes ergibt folgendes Bild:



Um mit Beispiel 3 (nachträglich ergänzter Querschnitt) fortzufahren, setzen Sie die Baustoffeigen-schaft des Polygons wieder auf den Beton C40/50 PR, Bemessungswerte zurück.

Hinweise zur Vorspannung im Spannbett:

Der hier modellierte Spannbetonträger wurde im Spannbett (im Fertigteilwerk) vorgespannt. Der Spannstahl wird in einem ersten Schritt im Spannbett eingebaut und vorgespannt, anschließend wird der Beton spannungsfrei eingebaut. Nach dem Erhärten des Betons wird der Spannstahl vom Spannbett getrennt und der Beton wird zusammengedrückt. Dabei verringert sich die ursprüngliche Dehnung des Spannstahls um das Maß der Druckdehnung des Betons.

Bei der Definition der Spannstahlbewehrung wurde eine Vordehnung von $\epsilon_p = 4,5 \text{ mm/m}$ eingegeben. Nach der Querschnittsberechnung ohne externe Belastung verringert sich die Dehnung um das Maß der Betonstauchung. Je nach Lage im Querschnitt ergeben sich damit verbleibende Spannstahldehnungen von 4,13 mm/m bis 4,21 mm/m.

Bewehrungsgruppe Nr. 2

Material: Spannstahl 1550/1770, Bemessungswerte (Stahl)

Vordehnung: $\epsilon_p = 4.5000 + y * 0.0000 + z * 0.0000$

Punkte (10 Stk.)	Koordinaten (Y / Z)	Fläche[cm²]	eps [mm/m]	Sigma[N/mm²]	Kraft [kN]
1 (22)	0.2000 / 0.9100	2.0106	4.1295	805.2532	161.9057 *
2 (23)	0.1000 / 0.9100	2.0106	4.1295	805.2532	161.9057 *
3 (24)	0.0000 / 0.9100	2.0106	4.1295	805.2532	161.9057 *
4 (25)	-0.1000 / 0.9100	2.0106	4.1295	805.2532	161.9057 *
5 (26)	-0.2000 / 0.9100	2.0106	4.1295	805.2532	161.9057 *
6 (27)	0.1500 / 0.8450	2.0106	4.1671	812.5851	163.3799 *
7 (28)	0.0300 / 0.8450	2.0106	4.1671	812.5851	163.3799 *
8 (29)	-0.0300 / 0.8450	2.0106	4.1671	812.5851	163.3799 *
9 (30)	-0.1500 / 0.8450	2.0106	4.1671	812.5851	163.3799 *
10 (31)	0.0000 / 0.7700	2.0106	4.2105	821.0451	165.0809 *

A.s,ges = 20.1062 cm²

F.s,ges = 1628.1292

F.Zug = 1628.129 kN / s.y = 0 m / s.z = 0.87 m

Die Rechenweise in INCA2 entspricht damit der Vorspannung im Spannbett, bei der der Spannstahl nach der Vorspannung mit dem noch spannungsfreien Beton verbunden wird und sich durch Stauchung des Betons ein Gleichgewicht zwischen Beton und Spannstahl einstellt.

Querschnitte mit nachträglichem Verbund sind daher mit angepasster Vorspannung zu modellieren.

Hinweis für Vorspannung mit nachträglichem Verbund:

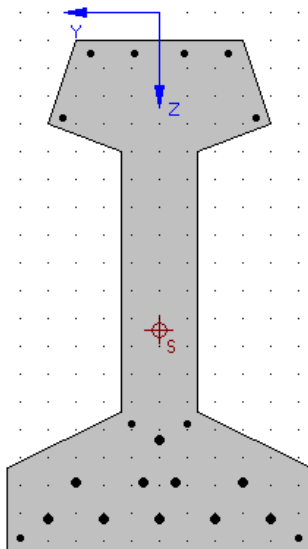
Bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund wird durch den Tragwerksplaner eine aufzubringende Vorspannung definiert. Diese Vorspannung wird durch eine Spannpressen auf der Baustelle aufgebracht und der Beton beim Anspannen gleichzeitig gedrückt. Damit entspricht die auf der Baustelle aufgebraachte Vorspannung bereits dem Wert, der sich für den im Gleichgewicht befindlichen Querschnitt ergibt.

In INCA2 muss daher eine Vorspannung definiert werden, die der gewünschten Vorspannung zuzüglich der Betondruckstauchung entspricht. Bei einfachen Querschnitten kann dies grundlegend vorher händisch berechnet werden. Es ist jedoch auch möglich, die Vorspannung iterativ anzupassen, so dass sich nach der Berechnung des Dehnungszustands der gewünschte Wert der Vorspannung ergibt.

8.3 Beispiel 3 – Nachträglich ergänzter Brückenquerschnitt

Dieses Beispiel baut auf den in Beispiel 2 generierten Querschnitt auf. Erstellen Sie den dort erläuterten vorgespannten Fertigteilträger und fahren dann an dieser Stelle fort.

Querschnitt aus Beispiel 2:



Der Träger wird zur Baustelle transportiert und mit einer Spannweite von 16 m als Einfeldträger eingebaut. Die Belastung infolge 1,0-fachen Eigengewichts beträgt

$$g = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,2488 \text{ m}^2 = 6,22 \text{ kN/m}$$

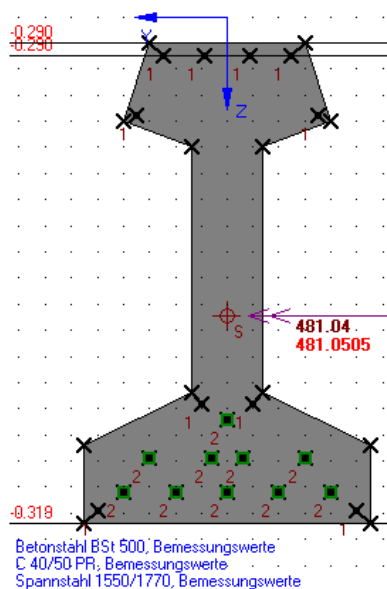
Die zusätzliche Betonierlast beträgt (Fläche des ergänzten Querschnitts $0,3525 \text{ m}^2$)

$$g = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,3525 \text{ m}^2 = 8,8125 \text{ kN/m}$$

Das resultierende Biegemoment ergibt sich damit zu

$$M = \frac{(g_1 + g_2) \cdot \lambda^2}{8} = 481,04 \text{ kNm}$$

Mit diesem Biegemoment wird der Fertigteilträger beim Betonieren ohne zusätzliche Unterstützung belastet. Der Frischbeton nimmt noch keine Spannungen auf. Für den Fertigteilträger ergibt sich folgender, komplett überdruckter Zustand in Feldmitte:



Schauen Sie sich dazu auch den **3D-Spannungszustand** im Menü **Ergebnisse** an. Lassen Sie sich weiterhin im Menüpunkt **Ergebnisse** die **Numerischen Ergebnisse** anzeigen. Die Berechnung ergab einen Dehnungszustand mit folgender Dehnungsebene:

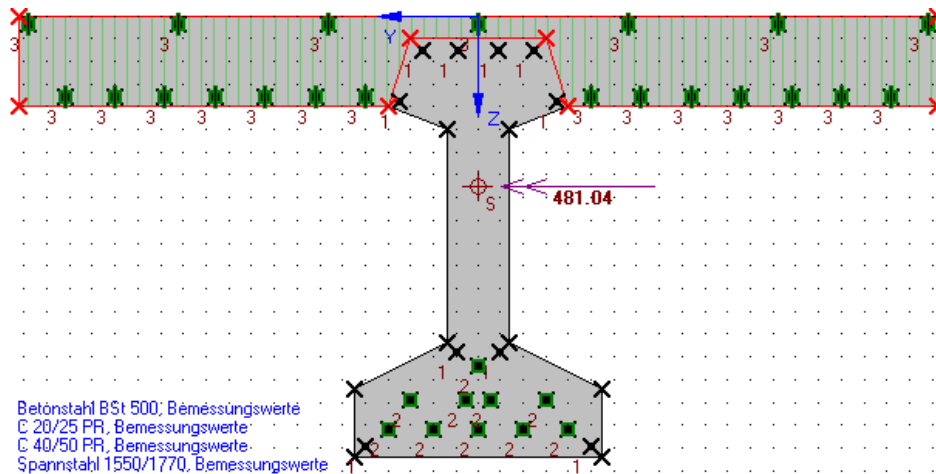
$$\text{eps.0} = -0.2879 \text{ mm/m} \quad \text{deps/dy} = 0 \quad \text{deps/dz} = -0.0315 \text{ mm/m}$$

Jetzt wird die nachträglich ergänzte Platte modelliert. Als Baustoff wurde auf der Baustelle ein C20/25 benutzt. Zum Erstellen der Platte erzeugen Sie in einem ersten Schritt die vier zusätzlichen Eckpunkte, ohne jedoch gleich das Polygon mit zu erzeugen. Wählen Sie dazu wiederum **Punkte als Liste** und dort die Option **Polygonpunkte**.

1.0125	0.0000
1.0125	0.2000
-1.0125	0.2000
-1.0125	0.0000

Anschließend müssen die Punkte zu einem Polygon verbunden werden. Wählen Sie dazu im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Polygon**. Nach Wahl des Baustoffs **C20/25 PR, Bemessungswerte** und Bestätigung des Buttons **Polygon mit Maus erzeugen**, klicken Sie der Reihe nach die Eckpunkte der nachträglich zu ergänzenden Fläche an. Mit dem Schließen des Polygons schaut der Querschnitt wie folgt aus (Punkte und Polygon hier rot markiert).

Ergänzter Querschnitt, hier bereits Darstellung mit Bewehrung und Vordehnung:



Bei der derzeitigen Modellierung wurde jedoch noch nicht berücksichtigt, dass die Platte erst später betoniert wurde, nämlich nachdem der Fertigteilträger bereits beansprucht wurde und eine Druckstauchung auf der Oberseite erfahren hat. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, muss auf den ergänzten Querschnittsteil noch eine **Vordehnung / Vorkrümmung** aufgebracht werden. Markieren Sie dazu das Polygon am Rand und lassen sich die **Eigenschaften** anzeigen. Wählen Sie Button **Vordehnung / Vorkrümmung** und geben dort die zuvor für die Betonierlast berechnete Dehnungsebene mit jeweils anderem Vorzeichen ein:

$$\text{eps}.0 = +0.2879 \text{ mm/m} \quad \text{deps/dy} = 0 \quad \text{deps/dz} = +0.0315 \text{ mm/m}$$

Wenn Sie jetzt die Berechnung des ergänzten Querschnitts mit $M_y = 481,04 \text{ kNm}$ erneut durchführen, so ergibt sich das gleiche Ergebnis wie in der vorherigen Rechnung des Fertigteilträgers (kleine Abweichungen in der 4. Nachkommastelle liegen an der Eingabe mit nur 4 signifikanten Ziffern). Insbesondere im 3D-Spannungszustand erkennt man, dass die nachträglich ergänzte Platte noch keine Spannungen hat.

Zusätzlich muss jetzt noch die Bewehrung der Platte modelliert werden. Wählen Sie dazu wieder den Menüpunkt **Punkte als Liste**, die Option **Bewehrungspunkte**, Bewehrungsgruppe 3, Durchmesser 14 mm und als Baustoff den Betonstahl BSt 500, Bemessungswerte. Als Vordehnung / Vorkrümmung geben Sie auch hier die zuvor genannte Dehnungsebene ein.

Punkte für die Bewehrung:

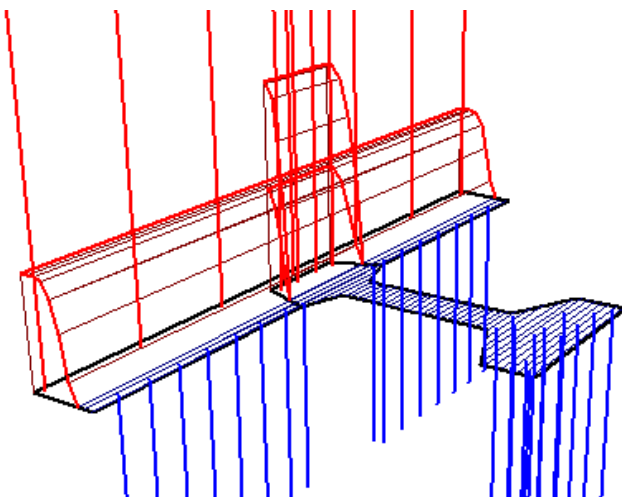
0.0000	0.0200
0.3300	0.0200
-0.3300	0.0200
0.6600	0.0200
-0.6600	0.0200
0.9900	0.0200
-0.9900	0.0200
0.2500	0.1800
-0.2500	0.1800
0.3600	0.1800
-0.3600	0.1800
0.4700	0.1800
-0.4700	0.1800
0.5800	0.1800
-0.5800	0.1800
0.6900	0.1800
-0.6900	0.1800
0.8000	0.1800
-0.8000	0.1800
0.9100	0.1800
-0.9100	0.1800

Nach kompletter Modellierung des nachträglich ergänzten Querschnitts überprüfen Sie dessen Richtigkeit, indem Sie den Dehnungszustand für $M_y = 481,04 \text{ kNm}$ berechnen lassen. Es dürfen sich immer noch keine Unterschiede zu den vorherigen Rechnungen ergeben.

Um jetzt das maximal vom Querschnitt aufnehmbare Biegemoment zu bestimmen, wählen Sie im Menü **Ergebnisse** den Unterpunkt **Sicherheitsnachweis**.

$$\max M_y = 2434,7 \text{ kNm}$$

Mit einem Blick auf den 3D-Spannungszustand lassen sich das Tragverhalten und die unterschiedlichen Spannungen im Querschnitt gut erfassen.



Beachten Sie, dass trotz der im Querschnittsbild angezeigten max. Druckstauchung von -3,5 mm/m der Betonrand nur mit -3,212 mm/m gestaucht wird. Schauen Sie sich dazu auch die detaillierten numerischen Ergebnisse an, die Sie ebenfalls im Menü **Ergebnisse** finden. Ein Auszug daraus ist im Folgenden dargestellt.

Polygon Nr. 2

```
-----
Material   : C 20/25 PR, Bemessungswerte (Beton)
Vordehnung: eps = 0.2879 + y * 0.0000 + z * 0.0315
Abminderungsfaktor für Betonzugzone = 0.0000
Punkte (8 Stk.) - Koordinaten (Y / Z)      eps [mm/m]      Sigma [N/mm²]
1  (32)      1.0125 / 0.0000      -3.2121      -11.3333
2  (33)      1.0125 / 0.2000       1.4716       0.0000
3  ( 1)      0.2000 / 0.2000       1.4716       0.0000
4  ( 0)      0.1500 / 0.0500      -2.0412      -11.3333
5  (11)     -0.1500 / 0.0500      -2.0412      -11.3333
6  (10)     -0.2000 / 0.2000       1.4716       0.0000
7  (34)     -1.0125 / 0.2000       1.4716       0.0000
8  (35)     -1.0125 / 0.0000      -3.2121      -11.3333
```

Der Beton könnte damit noch geringfügig starker gedrückt werden, was jedoch zu keiner merklichen Tragfähigkeitserhöhung führen wird.

Die hier gezeigten Berechnungen wurden ausschließlich mit den Bemessungswerten der Baustoffeigenschaften durchgeführt. Damit wird also nicht der wirkliche Zustand ermittelt, sondern ein im Normalfall nie auftretender Grenzzustand.

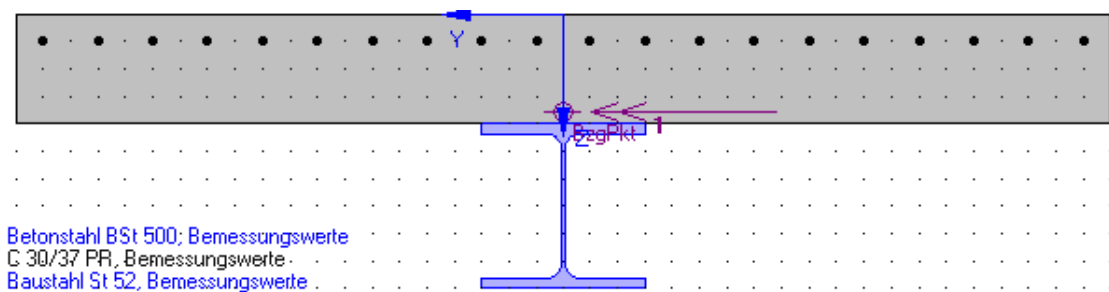
Um einen Einblick zu erhalten, wie groß die wirklichen, vorhandenen Spannungen sind, muss die Berechnung mit den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften (insbesondere für den Beton) durchgeführt werden. Damit lässt sich ermitteln, wie hoch die Beanspruchung der vorgedrückten Zugzone ist, ob und wie weit der Querschnitt aufreißt und natürlich auch, wie groß die späteren Druckbeanspruchungen in der Platte und Fertigteil sind. Weiterhin lässt sich abschätzen, von welcher Größenordnung die auftretenden Risse sind.

Durch Kriechen und unterschiedliches Schwindverhalten der Querschnittsteile werden sich im Laufe der Zeit Spannungen umlagern. In der Summe wird dadurch die Vorspannung abnehmen. Wie sich jedoch die Druckzone des Fertigteils oder die Platte in Bezug auf Verteilung und Größe der Druckspannungen verhalten, kann erst eine detaillierte Rechnung mit Schwinden und Kriechen zeigen.

8.4 Beispiel 4 – Verbundträger

Starten Sie INCA2 bzw. wählen Sie im Menü **Datei** den Unterpunkt **Neu**, um einen leeren Datensatz zu erhalten. Standardmäßig sind bereits die Baustoffkennwerte für C20/25, C30/37, C40/50 sowie Betonstahl B 500 jeweils als Bemessungswerte vorhanden. Der in diesem Beispiel benötigte Baustahl S355 kann aus einer vordefinierten Baustofftabelle importiert werden. Wählen Sie dazu im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Baustoffe** und im sich öffnenden Fenster den Button **Baustofftabelle**. In einem ersten Teil der folgenden Tabelle sind die Baustoffe für den Stahl zusammengefasst. Markieren Sie den Baustahl **S355, Bemessungswerte** und übernehmen diesen. Die Liste der Baustoffe kann anschließend geschlossen werden.

Folgender Verbundquerschnitt soll erzeugt werden:



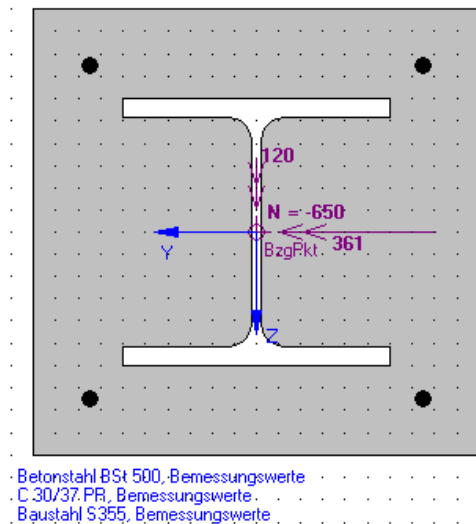
Erstellen Sie dazu als erstes die Betonplatte ($b / h = 2,0 / 0,2$ [m]) mit einem C30/37 Bemessungswerte. Achten Sie darauf, dass sich die Oberkante der Platte bei $z = 0$ befindet und die Eckpunkte bei $+ / - 1,0$ m.

Erzeugen Sie anschließend genau einen Bewehrungspunkt (B 500) bei $y = 0,95$ m / $z = 0,05$ m, Durchmesser 16 mm. Markieren Sie diesen anschließend und wählen im Menü **Bearbeiten** den Punkt **Schieben**. Als relative Verschiebung geben Sie $\Delta y = -0,10$ m / $\Delta z = 0,00$ m ein, markieren die Option **Kopieren** und wählen anschließend **19 Kopien**.

Als drittes wird ein HEB 300 an der Unterseite der Platte erzeugt. Wählen Sie dazu im Menü **Eingabe** den Unterpunkt **Komplette-Querschnitte**, Karteikartenreiter **I-Profile**. In dem sich öffnenden Fenster müssen Profiltyp und Abmessungen (HEB 300) definiert werden. Wählen Sie außerdem als Material den **Baustahl S 355**, Bemessungswerte und als Position des Schwerpunktes $y = 0,0$ m / $z = 0,35$ m.

Nach Eingabe der Belastung $M_y = 1,0$ kNm kann die maximale Tragfähigkeit mit dem Sicherheitsnachweis zu $M_y = 1446$ kNm bestimmt werden.

Als zweites Beispiel soll folgende Verbundstütze erstellt werden. Die äußeren Abmessungen betragen $b / h = 40 / 40$ cm, im Inneren wurde ein HEB 240 einbetoniert. Die Baustoffe sind wie zuvor C 30/37, B 500 und S355.



Erstellen Sie in einem ersten Schritt das Polygon (40 x 40 [cm]) für den Betonquerschnitt mit Schwerpunkt im Koordinatenursprung. Erzeugen Sie anschließend die 4 Bewehrungsstäbe in den Ecken mit jeweils 5 cm Randabstand und Durchmesser 16 mm.

Erzeugen Sie als nächstes das HEB 240-Profil (Baustahl S355). Der Schwerpunkt des Profils soll diesmal bei $y = 0 / z = 0$ positioniert werden. Das Profil kommt damit genau in der Mitte der Stütze zum Liegen.

Problematisch bei der bisherigen Modellierung und einer anschließenden Berechnung ist jedoch, dass an der Stelle des Profils vom Programm jetzt sowohl Beton als auch Stahl angenommen werden. Die Fläche des Betonpolygons wird bei der Berechnungen der Spannungen damit zu groß angenommen.

Aus diesem Grund muss an der Stelle des HEB 240-Profiles eine Aussparung im Beton von der gleichen Größe definiert werden. Öffnen Sie dazu noch ein zweites Mal das Fenster zum Erzeugen eines I-Profiles. Wählen Sie die gleiche Größe (HEB 240), diesmal als Baustoff jedoch den Beton des umgebenden Polygons (C 30/37) und außerdem die Option **Aussparung**.

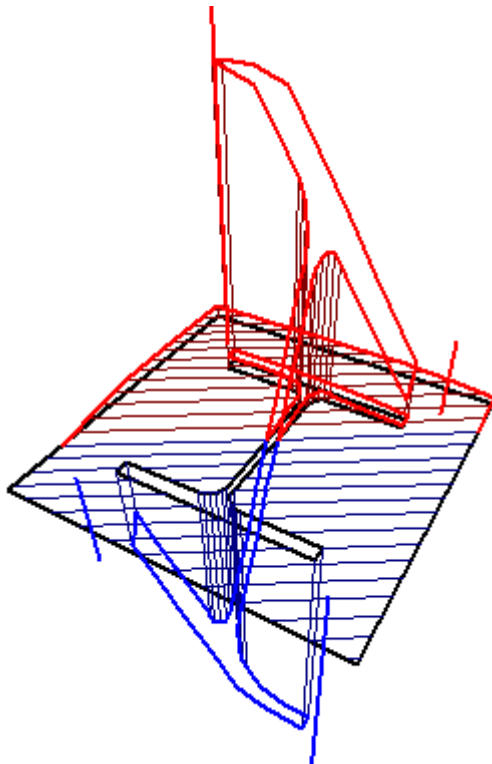
Damit wird erreicht, dass später während der Rechnung die Spannungen des Betons in diesem Bereich wieder subtrahiert werden und somit nicht „zu viel“ Fläche berücksichtigt wird.

Geben Sie anschließend folgende Belastung ein

$$N_x = -650 \text{ kN} \quad M_y = 361 \text{ kNm} \quad M_z = 120 \text{ kNm}$$

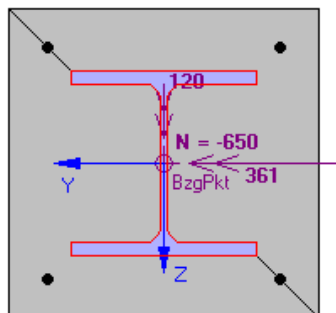
und lassen sich den Dehnungszustand berechnen.

Ein Blick auf den 3D-Spannungszustand lässt das Tragverhalten mit den unterschiedlichen Spannungen gut erkennen. Die Stahlspannungen werden in diesem Fall nicht gestaucht, so dass die Betondruckspannungen entsprechend klein dargestellt werden.



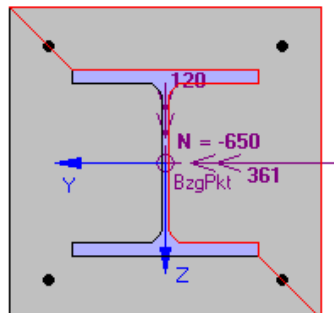
Eine alternative Modellierung ohne Aussparung und übereinander liegende Polygone ist:

Polygon Nr. 1



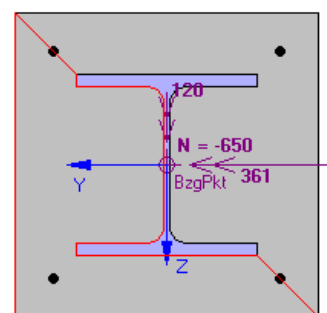
Betonstahl BSt 500, Bemessungswerte
C 30/37 PR, Bemessungswerte
Baustahl S355, Bemessungswerte

Nr. 2



Betonstahl BSt 500, Bemessungswerte
C 30/37 PR, Bemessungswerte
Baustahl S355, Bemessungswerte

Nr. 3



Betonstahl BSt 500, Bemessungswerte
C 30/37 PR, Bemessungswerte
Baustahl S355, Bemessungswerte

Modellierung:

1. HEB 240-Träger als Querschnitt mit S355 erstellen
2. Die 4 Eckpunkte der Betonstütze erstellen, jedoch noch kein Polygon erzeugen
3. Polygone 2 und 3 manuell mit der Maus erstellen durch Verbinden der Eckpunkte und der entsprechenden Punkte vom Stahlträger

8.5 Beispiel 5 - Nachträglich ergänzter Stützenquerschnitt

Für die Sanierung eines geschädigten Stützenquerschnittes oder die Verstärkung einer bestehenden Stütze kann nachfolgende Modellierung gewählt werden. Im ersten Schritt wird der Ausgangszustand vor der Schädigung der Stütze modelliert. Dabei werden die Originalabmessungen sowie die Designlasten der Einwirkungen berücksichtigt.

Definition kompletter Querschnitte

I-Profil Rechteck R1-R2-R4 Stütze Kreis Rechteck

Material Beton: C 20/25 PR, Bemessungswerte

Material Stahl: Betonstahl B 500, Bemessungswerte

Breite b = 0,3 [m] R2 R4

Höhe h = 0,3 [m]

$d_{1,2} = 0,06$ [m]

☐ Bewehrung verschmiert

$A_{s,tot} =$ [cm²]

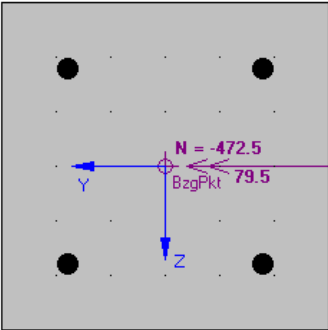
☒ Bewehrungsdurchmesser

☒ 20 [mm] Anzahl 4

OK Abbrechen

Einwirkungen, Design

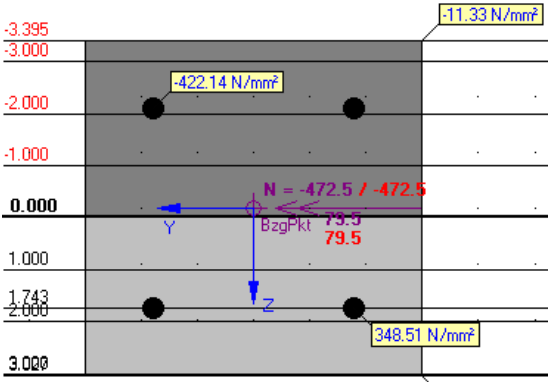
$$N_{Sd} = 1,35 \cdot 150 \text{ kN} + 1,5 \cdot 180 \text{ kN} = -472,5 \text{ kN}$$

$$M_{Sd} = 1,35 \cdot 20 \text{ kNm} + 1,5 \cdot 35 \text{ kNm} = 79,5 \text{ kNm}$$


Betonstahl B 500, Bemessungswerte
C 20/25 PR, Bemessungswerte

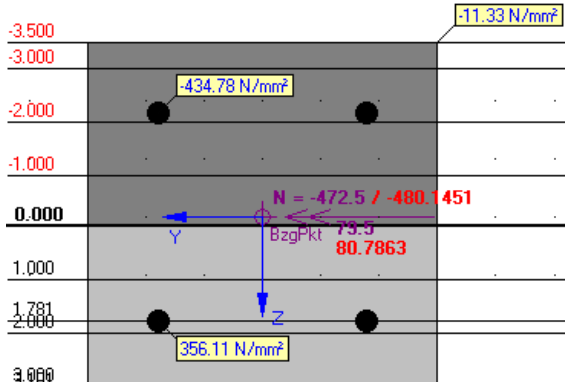
Der Querschnitt ist für diese Einwirkung fast vollständig ausgenutzt:

Dehnungszustand:



Betonstahl B 500, Bemessungswerte
C 20/25 PR, Bemessungswerte

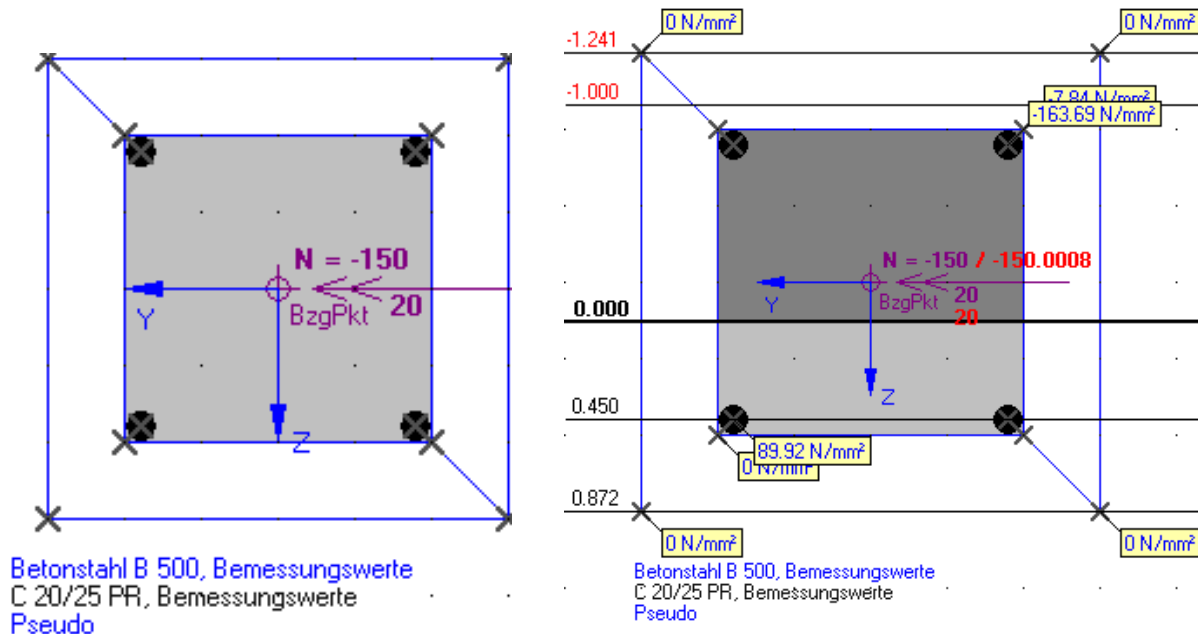
Sicherheitsnachweis:



Sicherheit $\gamma = 1.0162$
Betonstahl B 500, Bemessungswerte
C 20/25 PR, Bemessungswerte

In diesem Beispiel wird eine allseitige Schädigung des Betons unterstellt, bei der der Beton während der Sanierung bis in etwa zur Bügelbewehrung abgetragen wird. Hierzu ist der tragende Querschnitt zu reduzieren, exemplarisch im gewählten Beispiel um 5 cm allseitig. Zur Visualisierung des abgeplatzten Betons wird ein „Pseudo“-Material mit $E_c = 0$ definiert. Um mit diesen Polygonen in den nächsten Schritten weiter arbeiten zu können, wird die nachfolgende Modellierung mit 2 Einzelpolygonen gewählt.

Während der Sanierung wird für dieses Beispiel unterstellt, dass keine Verkehrslast wirkt. Als real vorhandene Einwirkung verbleibt nur das 1,0-fache Eigengewicht, im Beispiel gewählt mit $N_{sk} = 150$ kN und $M_{sk} = 20$ kNm, für das der nachfolgende Dehnungszustand resultiert.

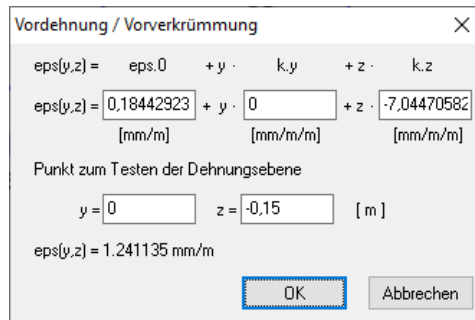
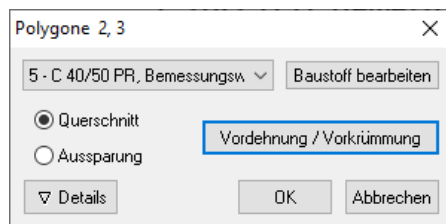


Den numerischen Ergebnissen kann für diese Einwirkung folgende Dehnungsebene entnommen werden mit:

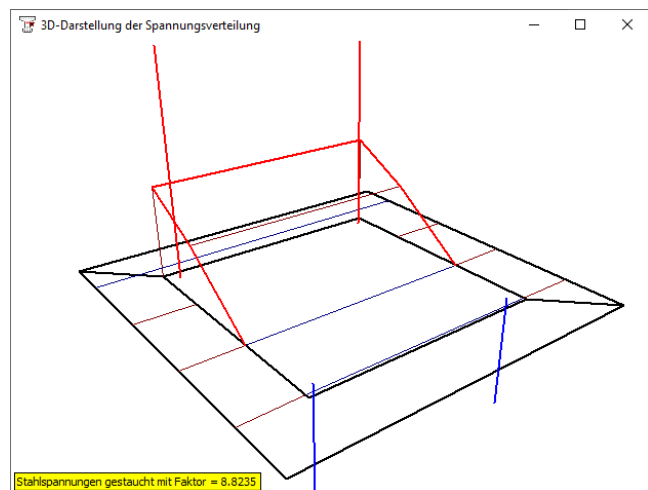
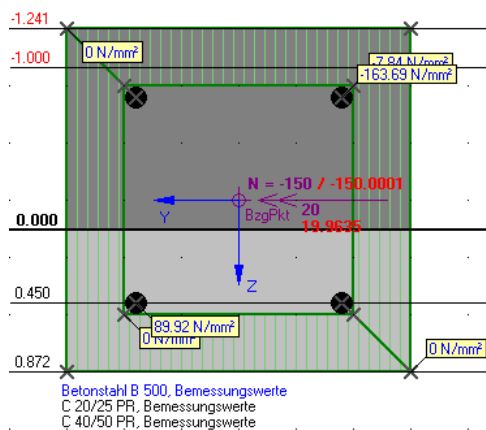
$$\epsilon(y,z) = -0.18442923 + y \cdot 0 + z \cdot 7.04470582$$

Im nächsten Schritt wird der reduzierte Stützenquerschnitt mit einer neuen Betonschicht in C40/45 ergänzt. Für die Ausführung ist in jedem Fall zu prüfen, ob eine ergänzende Verbügelung oder zusätzliche eingeklebte Bewehrung erforderlich ist, um den ergänzten Betonquerschnitt dauerhaft mit dem Altquerschnitt zu verbinden. Auf die ergänzten Polygone ist die zuvor ermittelte Dehnungsebene mit geändertem Vorzeichen als Vordehnung / Vorkrümmung aufzubringen.

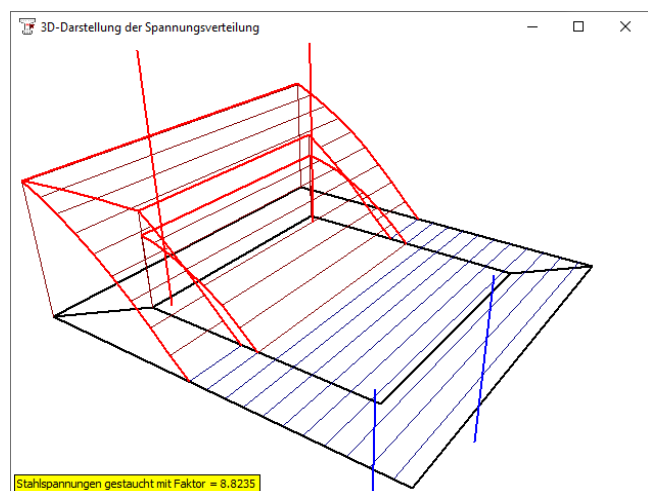
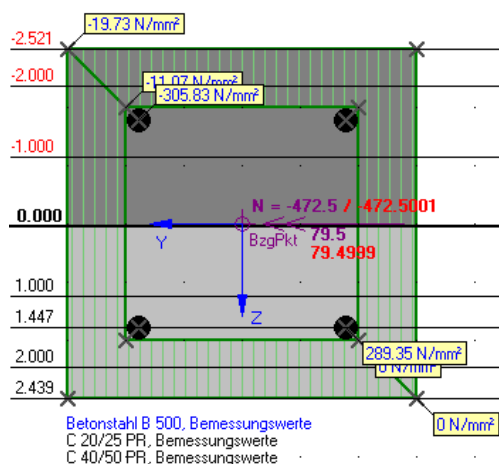
Eigenschaften der Polygone:



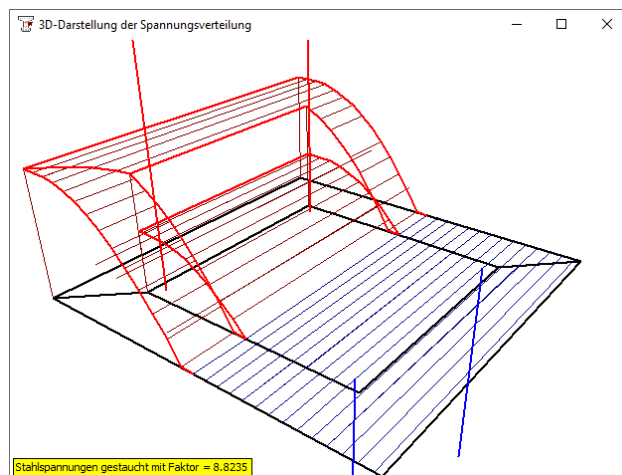
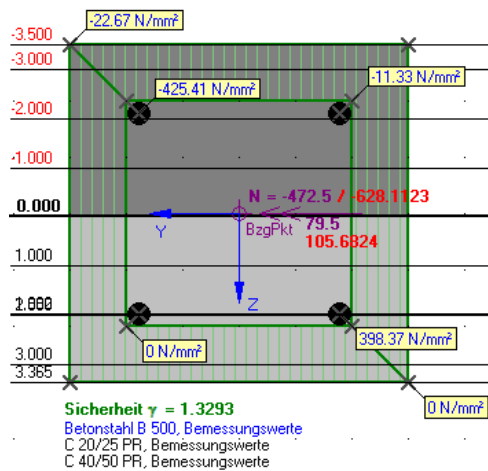
Für den Belastungszustand „1,0-faches Eigengewicht“ wird durch die Definition der Vordehnung / Vorkrümmung erreicht, dass der ergänzte Querschnitt (die beiden Polygone) für die charakteristische Einwirkung im Bauzustand spannungsfrei bleiben. Ein Vergleich der Spannungen vom Beton und von der Bewehrung des Altquerschnittes zeigt exakte Übereinstimmung.



Nach der Sanierung erfolgt die Wiederbelastung durch die Verkehrslast. Außerdem ist jetzt wieder für die Design-Schnittgrößen (N_{sd} / M_{sd}) eine ausreichende Querschnittstragfähigkeit nachzuweisen. In den Ergebnisdarstellungen sind die unterschiedlichen Spannungen in den verschiedenen Polygonen zu erkennen.



Durch die Wahl eines höherfesten Betons für die Ergänzung steigt im vorliegenden Beispiel die rechnerische Querschnittstragfähigkeit an.



Die Randdehnung des ergänzten Betons wird in der Grafik mit $\epsilon_{\text{Rand}} = -3,5 \text{ mm/m}$ ausgegeben. Die reale „spannungserzeugende“ Dehnung am Rand beträgt jedoch nur:

$$\epsilon_{\text{Rand}} = 3,5 \text{ mm/m} - 1,241 \text{ mm/m} = 2,259 \text{ mm/m}$$

Polygon Nr. 2

```

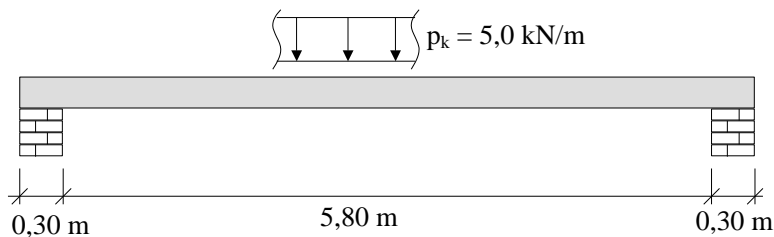
Material : C 40/50 PR, Bemessungswerte (Beton)
Vordehnung: eps = 0.1844 + y * 0.0000 + z * -7.0447
Rechnung im Riss zur Spannungsermittlung, f.ct = 0
Punkte (6 Stk.) - Koordinaten (Y / Z)      eps [mm/m]  Sigma[N/mm²]
1 ( 0)      0.1500 / 0.1500      2.4925      0.0000
2 ( 1)     -0.1500 / 0.1500      2.4925      0.0000
3 ( 9)     -0.1000 / 0.1000      1.7006      0.0000
4 ( 8)      0.1000 / 0.1000      1.7006      0.0000
5 (11)      0.1000 / -0.1000     -1.4670     -21.0566
6 ( 3)      0.1500 / -0.1500     -2.2589     -22.6667
  
```

Analog zur vorgenannten Ergänzung mit Beton kann auch eine Ergänzung mit einer zusätzlich eingelegten Bewehrung erfolgen. Hierzu sind neue Bewehrungsstäbe zu definieren, wobei eine neue „Bewehrungsgruppe“ zu erzeugen ist. Für diese neue Bewehrungsgruppe ist dann ebenfalls eine Vordehnung + Vorkrümmung zu definieren, damit diese Bewehrung beim Wirken von $1,0 \times$ Eigengewicht im Bauzustand noch spannungsfrei bleibt.

8.6 Beispiel 6 – Verformungsberechnung eines Einfeldträgers

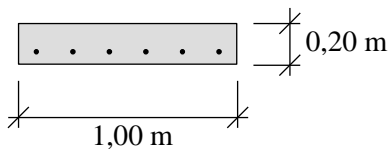
Im Folgenden soll, ausgehend von den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften, eine Verformungsberechnung an einem Einfeldträger durchgeführt werden.

8.6.1 System



Spannweite $L_{\text{eff}} = 0,1 + 5,80 + 0,1 = 6,00 \text{ m}$

Querschnitt



Betonstahl B 500

Beton C 30/37, $E_c \approx 32.000 \text{ N/mm}^2$

Randabstand Bewehrung $d_1 = 4 \text{ cm}$

Biegesteifigkeit $B = EI = 21333,3 \text{ kNm}^2$

8.6.2 Belastung

	Grenzzustand der Tragfähigkeit	Gebrauchstauglichkeit
Eigengewicht	$1,35 \cdot 0,2 \cdot 1,0 \cdot 25 = 6,75 \text{ kN/m}$	$0,2 \cdot 1,0 \cdot 25 = 5,0 \text{ kN/m}$
Verkehrslast	$1,5 \cdot 5,0 = 7,50 \text{ kN/m}$	$30\% \cdot 5,0 = 1,5 \text{ kN/m}$ (quasi ständig) $50\% \cdot 5,0 = 2,5 \text{ kN/m}$ (häufig) $70\% \cdot 5,0 = 3,5 \text{ kN/m}$ (selten)

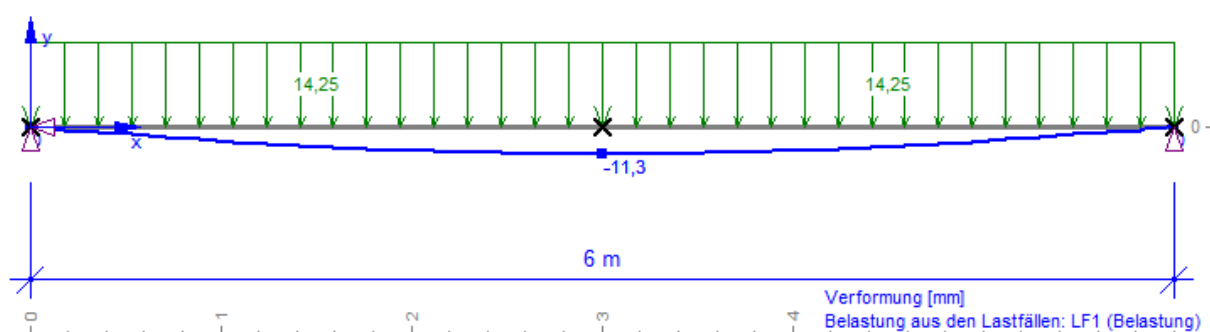
8.6.3 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Biegemoment $M = \frac{q \cdot \lambda^2}{8} = 64,125 \text{ kNm}$

Zur Ermittlung der Bewehrung werden die Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften benötigt. Modellieren Sie den Querschnitt mit den oben gegebenen Abmessungen. Bei der Wahl der Bewehrung geben Sie vorerst eine beliebige Fläche vor. Führen Sie anschließend die **Bemessung** durch (Menü **Ergebnisse**).

Bewehrung $\text{req } A_s = 10,05 \text{ cm}^2 / \text{m}$

Durchbiegung $w = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot \lambda^4}{EI} = 0,0113 \text{ m}$ (linear-elastisch)



8.6.4 Verformung im Gebrauchszustand

Die Modellierung des Systems erfolgt im Programm Stab2D-NL. Zur Berechnung der Verformungen im Gebrauchszustand müssen die Mittelwerte der Baustoffeigenschaften benutzt werden. Diese können aus der Baustofftabelle importiert werden.

Querschnitt Nr. 1 bearbeiten

Bezeichnung: R1 b/h = 1,00/0,20m, A_{s,tot} = 10,1 cm²

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

Querschnitt: Rechteck

Abmessungen Rechteck / Hohlkasten

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

Bezugspunkt: ☒ geometr. Schwerpunkt ☐ ideeller Schwerpunkt

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

Anordnung und Menge der Bewehrung

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

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

$A_{s,u} = 10,05$ [cm²] $A_{s,o} = 0$ [cm²] $A_{re+li} = 0$ [cm²]

Baustoffe für die Berechnung

Querschnitt: 2 - C 30/37 EC2 - Mittel für Verformung

Bewehrung: 1 - Betonstahl B 500, Mittelwerte

Grenzdehnungen, Bew.verhältnis...

Simulation des zeitabhängigen Verhaltens

Schwinddehnung in [mm/m]: $\epsilon_{ps,s} = 0$ [mm/m] (negativ)

Kriechen mit $\phi_{eff} = 0$ = quasi ständige Last x ϕ / aktuelle Last

Betonzugfestigkeit mit 100 % des Anfangswerts berücksichtigen

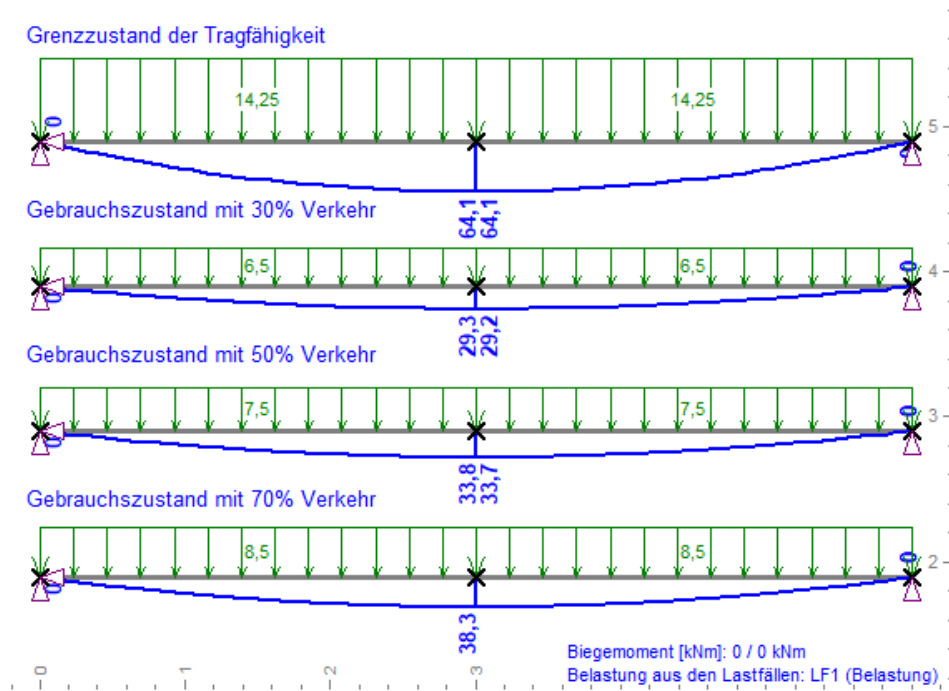
Wichte = 25 [kN/m³] g = 5 [kN/m]

OK Abbrechen

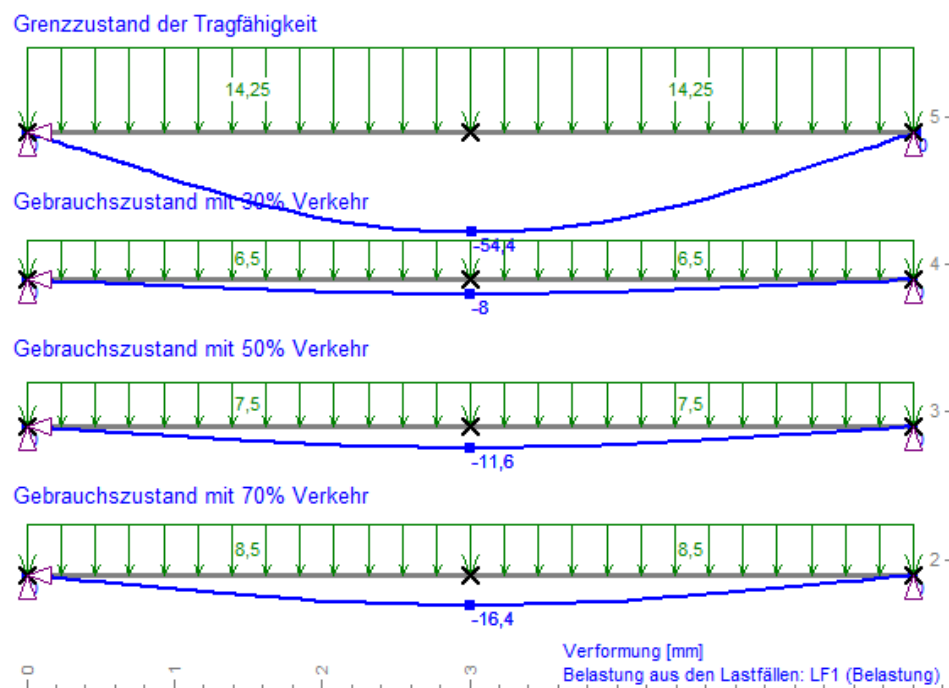
Rechts daneben: A_c = 0,200 m², A_{s,tot} = 10,1 cm², rho = 0,50 %

Die nichtlineare Berechnung liefert folgende Ergebnisse in grafischer Form.

Biegemoment:



Verformung, vertikal in [mm]



Verformung im Gebrauchszustand

30% Verkehrslast	$w = 8,0 \text{ mm}$
50 % Verkehrslast	$w = 11,6 \text{ mm}$
70% Verkehrslast	$w = 16,4 \text{ mm}$
Grenzzustand der Tragfähigkeit	$w = 54,4 \text{ mm}$

Zu beachten ist, dass sich diese Werte bei $t = 0$ ergeben. Unter Berücksichtigung von Schwinden und Kriechen werden die Verformungen weiter ansteigen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Bedingungen auf der Baustelle und die daraus resultierenden Baustoffeigenschaften nur schwer erfasst werden können. Die in diesem Beispiel berechneten Verformungen stellen damit nicht ein absolutes Maß dar, sondern zeigen nur den Bereich auf, in dem die Verformungen zu erwarten sind.

8.6.5 Verformung im Gebrauchszustand mit Schwinden und Kriechen

Gemäß den Formeln aus dem EC2 (Ausgabe 2000) wurden folgende Kriech- und Schwindwerte ermittelt. Als Luftfeuchte wurden 60% angenommen.

Schwinden $\varepsilon_s = -0,51 \text{ mm/m}$

Kriechen $\varphi = 2,27$

Anpassung des Querschnitts für quasiständige Lasten für $t = \infty$

Simulation des zeitabhängigen Verhaltens

Schwinddehnung in [mm/m] Info

$\varepsilon_{s,s} =$ [mm/m] (negativ!)

Kriechen mit $\varphi_{\text{eff}} =$ $= \frac{\text{quasi ständige Last}}{\text{aktuelle Last}} \times \varphi$

Betonzugfestigkeit mit % des Anfangswerts berücksichtigen

Programmintern (Rechenmodul von INCA2) wird das Schwinden des Betons als Vordehnung der Bewehrung modelliert. Das Kriechen wird programmintern berücksichtigt, indem die Spannungsdehnungslinien des Betons mit dem Faktor $(1 + \varphi)$ gestreckt werden. Die Werte für das Betonmaterialgesetz verändern sich damit wie folgt:

E-Modul $E = 31.344 / (1+2,27) = 9.585 \text{ N/mm}^2$

Dehnung $\varepsilon_{c1} = - 2,2 \cdot (1+2,27) = - 7,194 \text{ mm/m}$

Dehnung $\varepsilon_{cr} = 0,11 \cdot (1+2,27) = 0,3597 \text{ mm/m}$

Das Mitwirkungsgesetz für die Betonzugzone wird programmintern ebenfalls wie folgt angepasst:

Dehnung $\varepsilon_{cr} = 0,11 \cdot (1+2,27) = 0,3597 \text{ mm/m}$

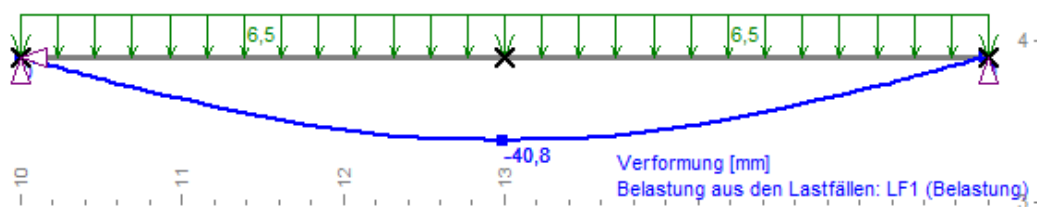
Analog sind die Grenzdehnungen vom Beton anzupassen:

$\varepsilon_{\text{Druck}} = - 3,2 \cdot (1+2,27) = 10,464 \text{ mm/m}$

$\varepsilon_{\text{Druck,z}} = -2,2 \cdot (1+2,27) = 7,194 \text{ mm/m}$

Ergänzend wird eine Reduktion der versteifenden Mitwirkung der Betonzugzone für $t = \infty$ auf 70% modelliert, was einen guten Erfahrungswert darstellt.

Mit diesen Änderungen wird der Zustand für die quasi-ständige Belastung berechnet. Für die anderen Lastsituationen (z.B. „selten“ oder Grenzzustand der Tragfähigkeit) müsste noch der Wert für φ_{eff} angepasst werden, da anteilig nur die quasi-ständigen Lasten kriecherzeugend wirken.

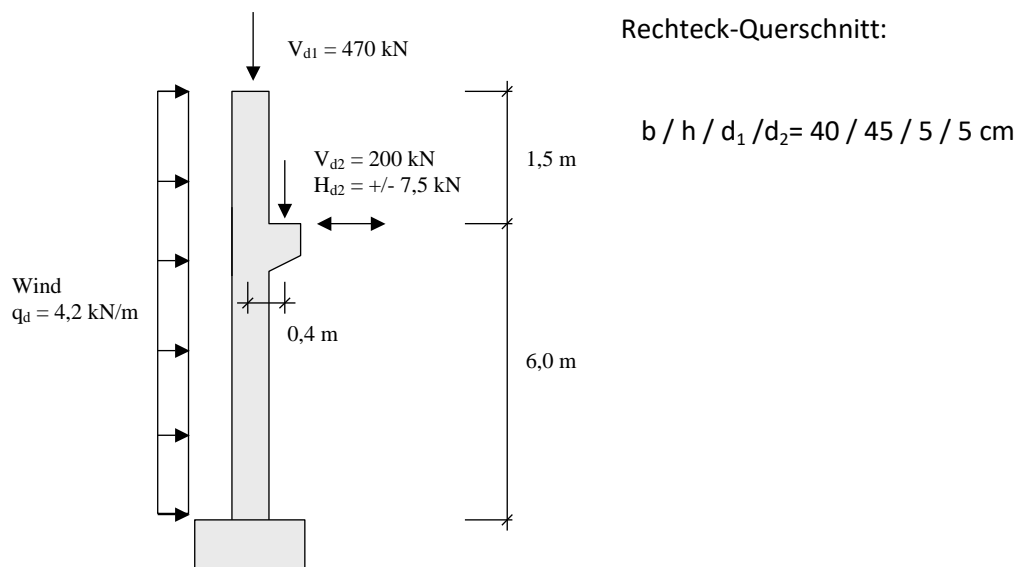


Weitere Information zur Modellierung von Kriechen und Schwinden finden Sie in Kapitel 6.12 Schwinden und Kriechen.

8.7 Nichtlineare Stützenrechnung mit INCA2 und ABaS

Am Beispiel einer Kragstütze (Fertigteilbau, Industriehalle) sollen verschiedene Rechengänge demonstriert werden.

ABaS (Anschauliche Balken-Statik) wurde ebenfalls im Arbeitsbereich Massivbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg entwickelt und kann kostenlos von der Homepage des Instituts (www.mb.tu-harburg.de) herunter geladen werden.



Grundsätzlich ist die Bemessung einer schlanken Stütze mittels einer nichtlinearen Rechnung immer iterativ, das heißt, zu einer gewählten Bewehrung kann der Tragsicherheitsnachweis erbracht werden oder nicht. Um diese Iteration in diesem Beispiel zu vereinfachen, wird vorab eine Rechnung mit dem vereinfachten Modellstützenverfahren durchgeführt. Damit kann eine Bewehrung ermittelt werden, die wiederum Ausgangswert für eine nichtlineare Rechnung mit INCA2 und ABaS ist.

Vereinfachend werden Kombinationsbeiwerte nicht berücksichtigt.

8.7.1 Handrechnung mit dem vereinfachten Modellstützenverfahren

Biegemoment nach Theorie I. Ordnung, inklusive ungewollter Ausmitte (Schiefstellung)

$$M_{d,1} = 4,2 \text{ kN/m} \cdot \frac{7,5^2}{2} + 7,5 \text{ kN} \cdot 6,0 \text{ m} + 200 \text{ kN} \cdot 0,4 \text{ m} + \frac{1}{200} \cdot (6,0 \text{ m} \cdot 200 \text{ kN} + 7,5 \text{ m} \cdot 470 \text{ kN})$$

$$= 266,75 \text{ kNm}$$

Ausmitte und Biegemoment nach Theorie II. Ordnung

$$L_0 = 2 \cdot L$$

$$\text{bei } x = 7,5 \text{ m} \quad e_2 = \frac{L_0^2}{2070 \cdot d} = \frac{(2 \cdot 7,5 \text{ m})^2}{2070 \cdot 0,40 \text{ m}} = 0,2717 \text{ m}$$

$$\text{bei } x = 6,0 \text{ m} \quad e_2 = \frac{(2 \cdot 6,0 \text{ m})^2}{2070 \cdot 0,40 \text{ m}} = 0,1739 \text{ m}$$

$$M_{d,2} = 0,2717 \text{ m} \cdot 470 \text{ kN} + 0,1739 \text{ m} \cdot 200 \text{ kN} = 127,70 + 34,78 = 162,48 \text{ kNm}$$

Berücksichtigung der Form des Momentenverlaufes:

Windbeanspruchung und Horizontalkraft (Bremskraft Kran) ergeben in etwa einen dreieckförmigen Biegemomentenverlauf. Das Biegemoment kann daher wie folgt abgemindert werden:

$$M_{d,2} = M \cdot \frac{10}{12} = 135,40 \text{ kNm}$$

Die Bemessungsschnittgrößen lauten damit

$$M_{sd} = 266,75 + 135,40 = 402,15 \text{ kNm}$$

$$N_{sd} = 470 \text{ kN} + 200 \text{ kN} = - 670 \text{ kN}$$

Eine Bemessung mit INCA2 liefert eine erforderliche Bewehrung von $A_{s,tot} = 37,66 \text{ cm}^2$

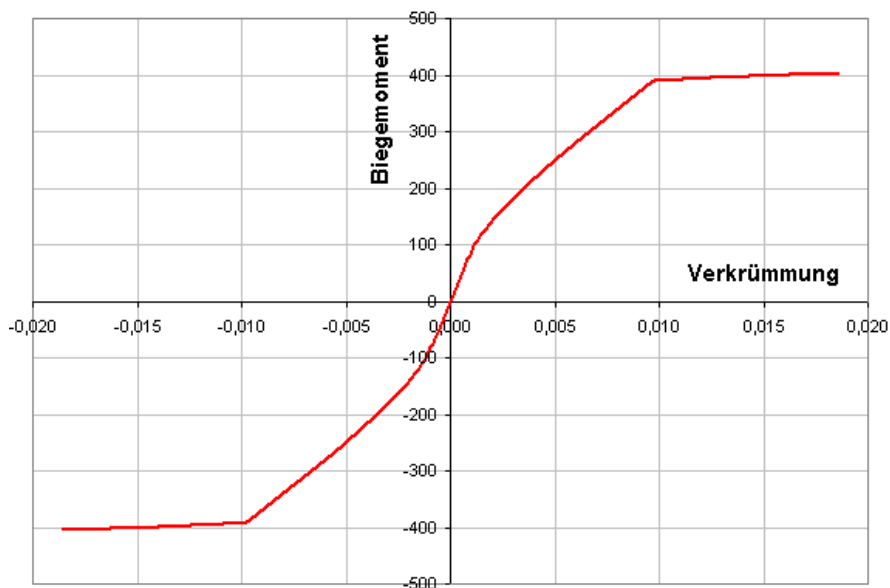
8.7.2 Nichtlineare Berechnung mit INCA2 und ABaS

Grundsätzlich werden auch hier die Verformungen ausgehend von den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften berechnet, um ein wirklichkeitsnahes Verhalten der Stütze zu erhalten. Da die sich daraus ergebenden Schnittgrößen jedoch in sehr starkem Maße von den Baustoffeigenschaften abhängen (schlechter Beton \Rightarrow mehr Verformung \Rightarrow größere Beanspruchung), werden für derartige Tragwerke bereits die Baustoffeigenschaften für die Schnittgrößenermittlung mit den Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt. Die Betonfestigkeit beträgt damit $f_c = f_{cm} / 1,5$, die Stahlfestigkeit $f_y = 500 / 1,15 = 435 \text{ N/mm}^2$.

Hintergrund dieser Vorgehensweise ist, dass beim neuen Sicherheitskonzept nach EC2 bzw. DIN 1045-1 immer die relevanten streuenden Größen mit einem Teilsicherheitsbeiwert beaufschlagt werden sollen.

Als Baustoff für die Bewehrung wird ein "B 500, Bemessungswerte" gewählt ($f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$), für den Beton wird "C30/37, Stützenbemessung) gewählt ($f_c = 38 / 1,5 = 25,333 \text{ N/mm}^2$). Von diesem Querschnitt wird die Mk-Linie für eine Normalkraft von $N = -670 \text{ kN}$ berechnet. Die Änderung der Normalkraft im Bereich von 6,0 m bis 7,5 m mit $N = -470 \text{ kN}$ wird vernachlässigt, da der Einfluss der Stützenspitze auf das Gesamtergebnis nur sehr gering ist.

M/k-Linie für $N_{sd} = -670 \text{ kN}$ und $A_{s,tot} = 37,66 \text{ cm}^2$



Mit dieser M/k-Linie wird im Folgenden eine nichtlineare Berechnung durchgeführt (hier mit dem Programm ABaS), was folgende Ergebnisse liefert.

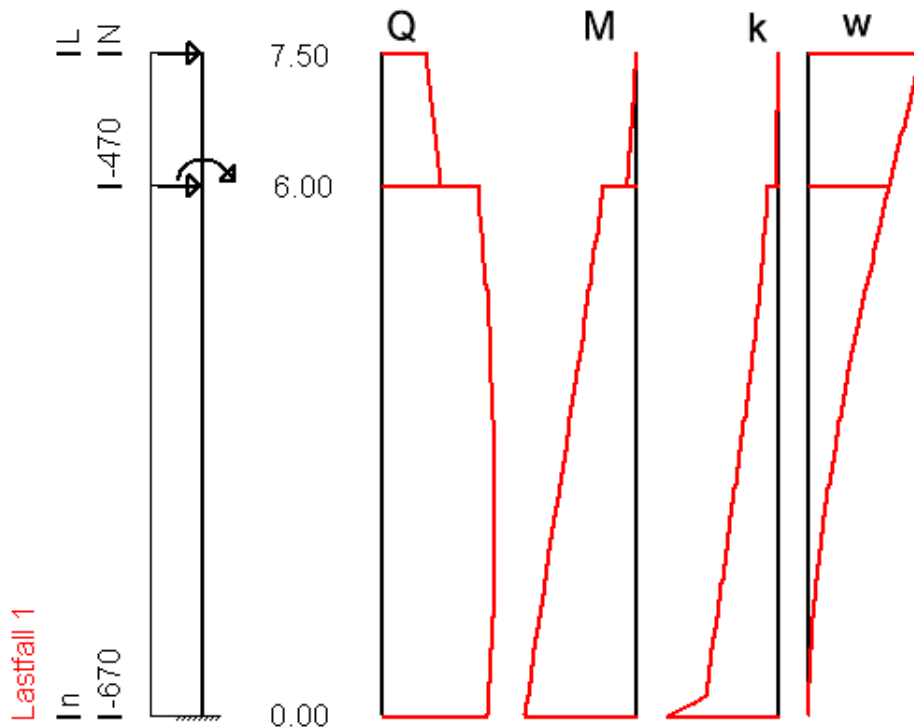
$$M_{sd} = -354,73 \text{ kNm}$$

$$N_{sd} = -670 \text{ kN}$$

$$e_{Kopf} = 0,1434 \text{ m}$$

Wie zu sehen ist, liegt das erreichte Biegemoment mit $M_{sd} = 354,73 \text{ kNm}$ unter dem maximal aufnehmbaren von $M_{Rd} = 402,15 \text{ kNm}$. Man kann in einer iterativen Berechnung die Bewehrung von $A_{s,tot} = 37,66 \text{ cm}^2$ auf $A_{s,tot} = 34,0 \text{ cm}^2$ reduzieren, das aufnehmbare Moment verringert sich dann auf $M_{Rd} = 374,3446 \text{ kNm}$. Eine ABaS-Rechnung mit einer Mk-Linie für den geänderten Querschnitt ergibt

ein einwirkendes Biegemoment von $M_{sd} = 372,58 \text{ kNm}$ an der Einspannung bei einer Kopfverformung von $w = 17,24 \text{ cm}$. Eine weitere Reduzierung der Bewehrung ist allerdings nicht mehr möglich, da der Querschnitt zu weit aufreißt (an der Einspannstelle bereits plastiziert, siehe Grafik), die Steifigkeit stark abnimmt und die Verformungen und damit die Einwirkungen schneller zunehmen als der Widerstand des Querschnitts bei größer werdenden Verkrümmungen.



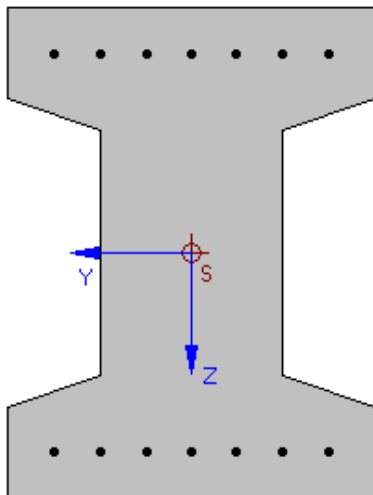
Die gezeigte Computer-Berechnung ist durch den iterativen Charakter sehr aufwändig, liefert jedoch im Rahmen der angenommenen Baustoffkennwerte die exakten Ergebnisse. Außerdem erkennt man erst durch die nichtlineare Berechnung den vorhandenen Momenten- und Verkrümmungsverlauf und kann entsprechend einen anderen Faktor für das Modellstützenverfahren wählen.

8.8 Interaktionsdiagramme N_x / M_y

Bei immer wiederkehrenden Berechnungen der Bewehrung für identische oder skalierte Querschnitte kann es sinnvoll sein, sich zur Vereinfachung der Arbeit ein M/N-Interaktionsdiagramm zu erstellen. Insbesondere kann ein derartiges Diagramm nötig sein, wenn es sich um einen nicht in der Literatur tabellierten Querschnittstyp handelt oder eine andere Bewehrung mit vom B 500 verschiedener Fließgrenze benutzt wird. Mit INCA2 haben Sie die Möglichkeit, sowohl ein dimensionsbehaftetes als auch ein dimensionsloses Interaktionsdiagramm zu erstellen.

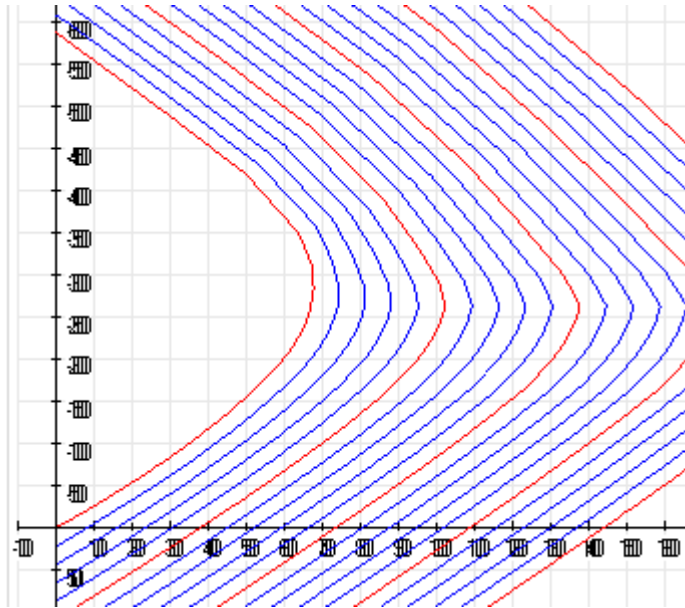
8.8.1 Dimensionsbehaftetes Interaktionsdiagramm

Für den im Folgenden gezeigten Querschnitt soll ein Interaktionsdiagramm erstellt werden. In den mitgelieferten Beispieldatensätzen finden Sie die INCA2-Datei Stütze-Doppel-T.inc. Die Bewehrungsfläche aller Bewehrungsstäbe wurde in der Summe zu $A_{s,tot} = 5,0 \text{ cm}^2$ gewählt.



Wählen Sie jetzt die Berechnung der M/N-Linie im Menü **Ergebnisse**. Markieren Sie im sich öffnenden Fenster den Punkt **Mehrere Linien erstellen**. Geben Sie weiterhin in die Textboxen ein, dass die Bewehrung mit dem Faktor 0 bis 20 variiert sowie insgesamt 21 Linien berechnet werden sollen.

Nach Klick auf den Button **OK** kann es je nach Rechenleistung des Computers einen kleinen Moment dauern, bis die numerischen und grafischen Ergebnisse ausgegeben werden. Mit den gezeigten Einstellungen erhalten Sie ein M/N-Diagramm, in dem sich die einzelnen Linien um die Bewehrungsmenge von 5 cm^2 unterscheiden. Die Linie ganz links wurde mit $A_s = 0 \text{ cm}^2$ gerechnet, die Linie auf der rechten Seite mit $A_s = 100 \text{ cm}^2$.



Zur besseren Erkennbarkeit wird jede fünfte Linie mit einer anderen Strichstärke und Farbe dargestellt. Linienfarben und Liniendicken können im Menü **Extras** => **Einstellungen** => **Bild Materialgesetz** mit den Linien 1 und 2 gewählt werden.

8.8.2 Dimensionsloses Interaktionsdiagramm

Dimensionslose Diagramme werden zur Bemessung ähnlicher Querschnitte eingesetzt. Betrachtet man die bezogenen Eingangswerte μ und ν genauer, so erkennt man, dass sich damit ein Querschnitt mit den Abmessungen $b = h = 1,0 \text{ m}$ ergibt, der die Betonfestigkeit $f_c = 1,0 \text{ MN/m}^2$ hat. Der auszulesende Wert ω stellt das mechanische Bewehrungsverhältnis dar, also das Verhältnis zwischen der max. aufnehmbaren Druckkraft der Bewehrung und des Betons.

Im Folgenden wird die Berechnung auf Grundlage der DIN 1045-1 durchgeführt (Datei Einheitsquerschnitt.inc).

Für den Bereich großer Normalkräfte ist zu berücksichtigen, dass abweichend von Tabelle 9 (DIN 1045-1) für mittig oder leicht außermittig gedrückte Querschnitte ohne Knickgefahr die max. Druckdehnung von $\varepsilon = -2,0 \text{ mm/m}$ auf $\varepsilon = -2,2 \text{ mm/m}$ hochgesetzt werden darf. Damit kann die Bewehrung auch in diesem Bereich vollständig ausgenutzt werden (nach Betonkalender 1/2002, S. 314, Punkt 4.1.5).

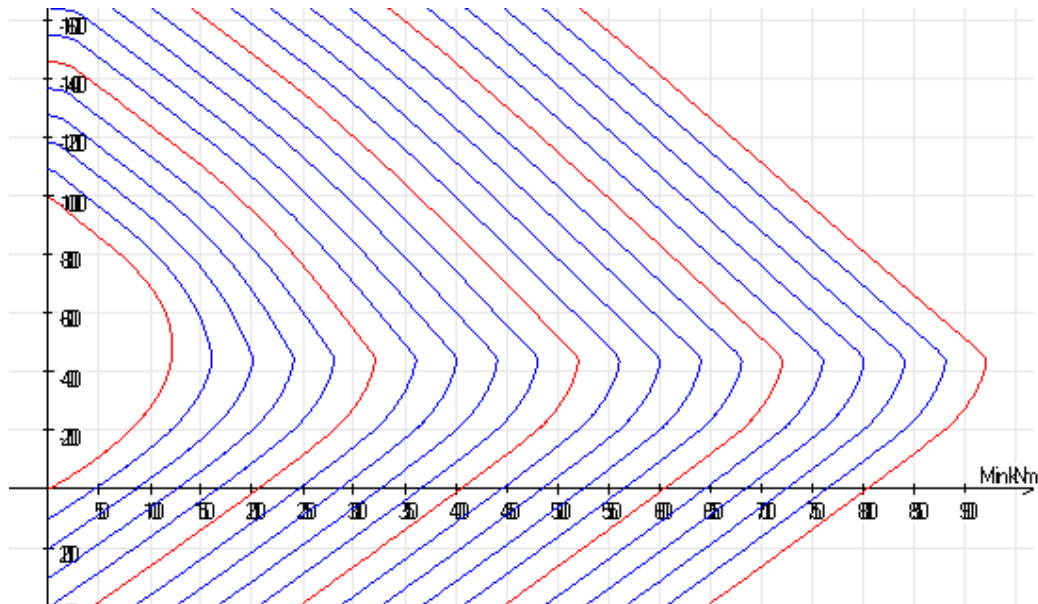
Als Bewehrung ist auf Grund der Definition des mechanischen Bewehrungsverhältnisses folgender Wert anzusetzen:

$$\begin{aligned} \text{für } \omega = 1,0 \text{ gilt:} \quad & F_c = F_s \\ & 1,0 \text{ MN/m}^2 = A_s \cdot 434,78 \text{ MN/m}^2 \\ & A_s = 23,000138 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Bei der Berechnung der MN-Linien sind mit dieser gewählten Bewehrung folgende Einstellungen vorzunehmen:

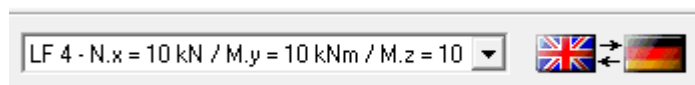
- Bewehrung variieren mit Faktor von 0,0 bis 2,0
- Anzahl der Linien: 21

Damit ergibt sich folgendes Diagramm:



9 Sprache

Für die Oberfläche von INCA2 kann zwischen Deutsch und Englisch mit dem Button in der oberen rechten Ecke gewechselt werden. Ergebnisse etc. werden dann ebenfalls in der entsprechenden Sprache ausgegeben.



Die vorliegende Hilfe-Datei ist auf Deutsch und auf Englisch verfügbar.

10Autoren

10.1 Entwicklung

Das Programm MasQue als Vorläufer von INCA2 für die Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft wurde ab 1987 an der Technischen Universität Hamburg-Harburg im Arbeitsbereich Massivbau (3-07) entwickelt. Die grundlegenden Berechnungsalgorithmen sind bereits Anfang der 70er Jahre von Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Quast entwickelt worden. Erweiterungen wurden von Dipl.-Ing. Dirk Busjaeger vorgenommen. Dr.-Ing. Marek Los passte das Programm MasQueW im Rahmen seiner Tätigkeit an der TUHH an die Windows-Oberfläche an.

Die Programmierung der interaktiven grafischen Benutzeroberfläche als Programm INCA2 erfolgte 1998/99 von Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer mit Delphi 4.0 [™] sowie Folgeversionen. Anfangs wurden noch der Rechenkern von MasQueW genutzt. Da jedoch eine ständige Weiterentwicklung bis zum heutigen Programmumfang erfolgte, war auch die Neuprogrammierung der Rechenalgorithmen ab 2000 nötig. Das betraf vor allem die neuen Materialgesetze, um das Verformungsverhalten besser abbilden zu können.

Übergeordnetes 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. INCA2 war hierfür ein wichtiger Baustein neben dem Stabwerksprogramm Stab2D-NL. 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 werden die Programme INCA2 und Stab2D-NL erfolgreich in Diplom- und Vertieferarbeiten in unterschiedlichen Fachbereichen eingesetzt (Massivbau, Stahlbau, Mauerwerksbau, Erforschung neuer Bauweisen). Seit 2003 sind die Programme 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.

Weitergehende Literatur zu den Berechnungsalgorithmen für das Programm MasQue (Vorläufer von INCA2) können Sie zum Selbstkostenpreis vom Institut für Massivbau der TUHH beziehen (Heft 415 DAfStb, Beuth Verlag, Berlin, 1990) – zumindest solange der Vorrat noch reicht.

Titel : Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft (Programm MasQue)

Autoren : Dipl.-Ing. Dirk Busjaeger, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Quast

Jahr: 1990

10.2 Vertriebsform des Programms / Lizenzierung

Das Programm INCA 2 ist Freeware, das heißt, sowohl im Rahmen einer nichtkommerziellen Nutzung an Hochschulen, durch Studierende oder Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen, aber auch in kommerziell arbeitenden Ingenieurbüros etc. darf es kopiert und weitergegeben werden. Eine Lizenzgebühr an den Autor ist nicht zu entrichten.

Insbesondere kommerzielle Nutzer sowie Hochschulen etc. werden jedoch gebeten, sich registrieren zu lassen. Das gibt mir einen Überblick wo und zu welchen Zwecken das Programm INCA2 eingesetzt wird und wo gegebenenfalls Bedarf für Anpassungen des Programmes besteht.

Für die Registrierung gehen Sie bitte auf folgende Homepage:

www.u-pfeiffer.de

und wählen dort den Unterpunkt INCA2 und dann Lizenzierung. Das dortige Formular füllen Sie bitte aus und übermitteln es per Knopfdruck. Nach kurzer Bearbeitungszeit wird Ihnen eine Lizenzierungsdatei per E-Mail zugeschickt, die Sie in das Programm-Verzeichnis von INCA2 kopieren (bzw. alte Datei ersetzen). In dieser Datei sind zwei Kopfzeilen gespeichert, die beim Ausdruck von INCA2 aus immer mit ausgegeben werden. Vergessen Sie deshalb nicht, im Formular im Internet in diesen Zeilen z.B. Name und Anschrift des Instituts oder Ing.-Büros einzutragen.

In unregelmäßigen Abständen werden Aktualisierungen des Programms INCA2 vorgenommen. Dabei werden Fehler beseitigt und/oder Anregungen der Benutzer eingearbeitet. Bei kleinen Änderungen wird die neue Version ohne weitere Ankündigung zum Download ins Internet gestellt. Bei größeren Änderungen erfolgt ein Info-Letter per E-Mail an die registrierten Nutzer.

Schauen Sie deshalb ab und zu auf oben genannter Homepage vorbei, um jeweils die aktuellste Version von INCA2 benutzen zu können. Die Lizenzierungsdatei bleibt auch für neue Programmversionen weiterhin gültig.

10.3 Haftungsausschluss

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.

In diesem Rahmen sei darauf hingewiesen, dass jede Computerrechnung vom verantwortungsbewussten Ingenieur überschlägig bzw. auf logische Art und Weise kontrolliert werden sollte!

Hinweise und Verbesserungsvorschläge sind jederzeit willkommen. Insbesondere interessiert, ob dieses Programm für Lehrzwecke geeignet ist und wie es zweckmäßigerweise eingesetzt werden kann.

Bei Fragen und Anregungen schreiben Sie bitte an:

Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer

e-mail: 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.

10.4 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, www.sellhorn-hamburg.de Leiter Tragwerksplanung, Prokurist Projekte insbesondere im Stahlwasserbau, Kaimauern national und international, fugenlose Bauwerke, Instandsetzung historischer Bauwerke, Brücken

Entwickelte Programme

seit 1993	Vektor-As - Mathematikprogramm für die gymnasiale Stufe zur Vektorrechnung (Programmiersprache Turbo Pascal 6.0, MS-DOS)
seit 1997	Truss2D-NL - 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	INCA2 - Programm zur interaktiven Berechnung von Massivbauquerschnitten unter zweiachsiger Biegung mit Normalkraft (Programmiersprache Delphi 4.0, ab Win 95)
seit 2001	Entwicklung von Stab2D-NL (Programmiersprache Delphi 4.0 und folgende, Nutzung ab Windows 95)

© Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer, 2001 - 2024

ehemals Institut für Massivbau, Technische Universität Hamburg-Harburg

letzte Änderung: 27.10.2024