

Interaktionskurven

SectionPro Tutorial: klassische 2D-Interaktionsdiagramme
mit Nachweis von Lastkombinationen

BridgeKernel · 2026

Einleitung

Das Interaktionskurven-Modul berechnet klassische 2D-Interaktionsdiagramme für Stahlbetonquerschnitte. Durch Festhalten einer Komponente (N , M_z oder M_y) berechnet SectionPro die Widerstandsgrenze in der verbleibenden Zwei-Komponenten-Ebene. Lastkombinationen werden auf die Grafik gestreut: Lasten innerhalb der Kurve erscheinen grün (sicher), Lasten außerhalb rot (überschritten). Dies ermöglicht eine direkte visuelle Kontrolle ohne Ausnutzungsgrade.

Zwei Modi stehen zur Verfügung. Im Modus mit festgehaltener Komponente wird eine Komponente auf einen bestimmten Wert gesetzt (z. B. $N = 0$) und die Kurve in der verbleibenden Ebene gezeichnet. Der festgehaltene Wert muss innerhalb des Widerstandsbereichs liegen, andernfalls existiert keine Kurve.

Im Hüllkurvenmodus zeichnet SectionPro zwei Kurven: eine für den Maximalwert und eine für den Minimalwert der festgehaltenen Komponente über alle Lastkombinationen. So lassen sich mehrere Lastfälle in einer einzigen Abbildung überprüfen. Die Festhalte-Werte aller Lasten müssen innerhalb des Widerstandsbereichs liegen. In diesem Modus wird eine dritte Farbe verwendet:

- **Grün:** innerhalb beider Kurven, sicher bei beiden Extremwerten.
- **Rot:** außerhalb beider Kurven, überschritten bei beiden Extremwerten.
- **Grau:** zwischen den beiden Kurven, unbestimmt. Eine genauere Prüfung ist erforderlich, durch Festhalten der Komponente am tatsächlichen Lastwert, über die 3D-Interaktionsfläche oder den internen Gleichgewichtslöser.

Berechnete Ergebnisse

Interaktionskurve

Festgehaltene Komponente (N , M_z oder M_y)
Geschlossene 2D-Widerstandsgrenze
Hüllkurvenmodus (Min/Max)

Visuelle Überprüfung

Lastpunkte auf der Grafik gestreut
Grün (sicher) / Rot (überschritten) / Grau (unbestimmt)

Exporte

PDF: 2D-Kurve + gestreute Lasten
XLS: Kurvenkoordinaten
TXT: tabellarische Ergebnisse (Spalten)

Achteckiger Querschnitt (Eurocode 2)

Eingangsdaten

Geometrie, Bewehrung und Materialgesetze des Querschnitts sind identisch mit denen der Artikel #4-6:

Beton

- Achteckiger Querschnitt
- $b_1 = 2.00$ m, $b_2 = 0.50$ m
- $h_1 = 1.00$ m, $h_2 = 0.60$ m

Bewehrung

- 48 Stäbe, gleichmäßiger Abstand 150 mm
- Durchmesser $\varphi = 32$ mm, Betondeckung 50 mm

Materialgesetze (EC2)

- Beton C30/37: $f_{ck} = 30$ MPa
- Stahl B500B: $f_{yk} = 500$ MPa

The screenshot shows a 'Data' window for an 'Octagonal solid section'. Under 'Concrete', the parameters are: Width b1 (m) = 2, Width b2 (m) = 0.5, Height h1 (m) = 1, and Height h2 (m) = 0.6. Under 'Reinforcement', the mode is 'uniform spacing', with Bar spacing (mm) = 150, Bar diameter (mm) = 32, Concrete cover (mm) = 50, and Layers (1 or 2) = 1. A 'Submit' button and an 'Infos' button are visible. Below the form is a diagram of the octagonal cross-section with reinforcement bars.

Abbildung 1: Achteckiger Querschnitt.

Interaktionskurven

Die erste Kurve zeigt die zweiaxiale Biegetragfähigkeit bei $N = 0$ unter dem Gebrauchszustand (SLS-C), die zweite die klassische Normalkraft-Biegeinteraktion bei $M_y = 0$ unter dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS-F).

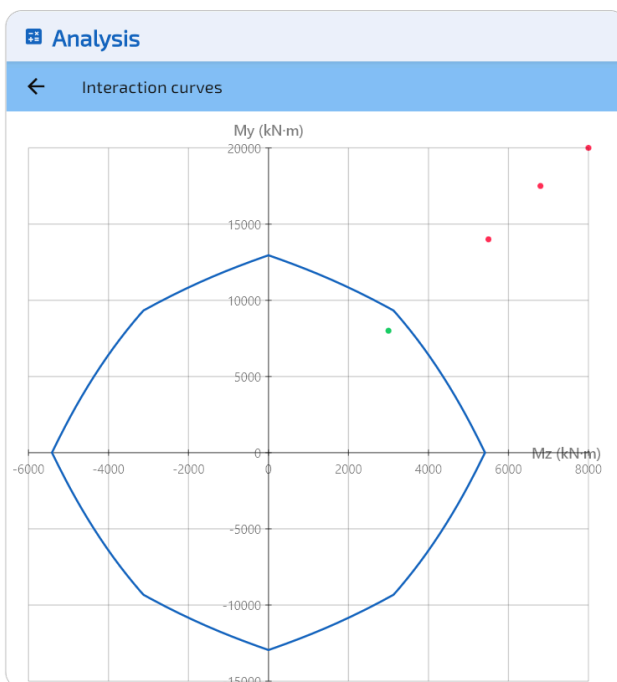


Abbildung 2: Gebrauchszustand (charakteristisch): M_z - M_y bei $N = 0$.

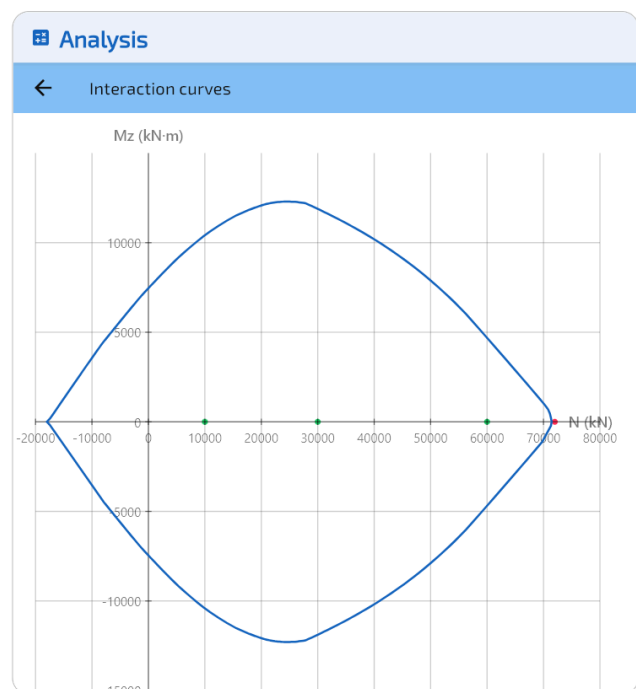


Abbildung 3: Tragfähigkeit (fundamental): N - M_z bei $M_y = 0$.

Die 30 Lastkombinationen sind dieselben wie im Abstands-Artikel (15 ULS-F, 15 SLS-C). Alle grünen Lasten hatten $\eta < 1$ in der 3D-Analyse, alle roten Lasten hatten $\eta > 1$: die 2D-Kurven sind vollständig konsistent mit den 3D-Abstandsergebnissen.

Hüllkurvenmodus

Der Hüllkurvenmodus setzt voraus, dass alle Festhalte-Werte innerhalb des Widerstandsbereichs liegen. Einige der ursprünglichen 30 Lasten überschreiten die Querschnittstragfähigkeit: Last #4 bei ULS-F hat $N = 72000$ kN, die Normalkrafttragfähigkeit beträgt etwa 70700 kN. Diese Lasten sind im Hüllkurvenmodus nicht verwendbar; daher wird ein reduzierter Lastsatz eingesetzt.

Die Abbildungen zeigen die Hüllkurve für den Gebrauchszustand (N als festgehaltene Komponente, M_z - M_y -Ebene) und den Grenzzustand der Tragfähigkeit (M_y als festgehaltene Komponente, N - M_z -Ebene). Jede Hüllkurve besteht aus zwei Kurven: beim Minimal- und beim Maximalwert der festgehaltenen Komponente.

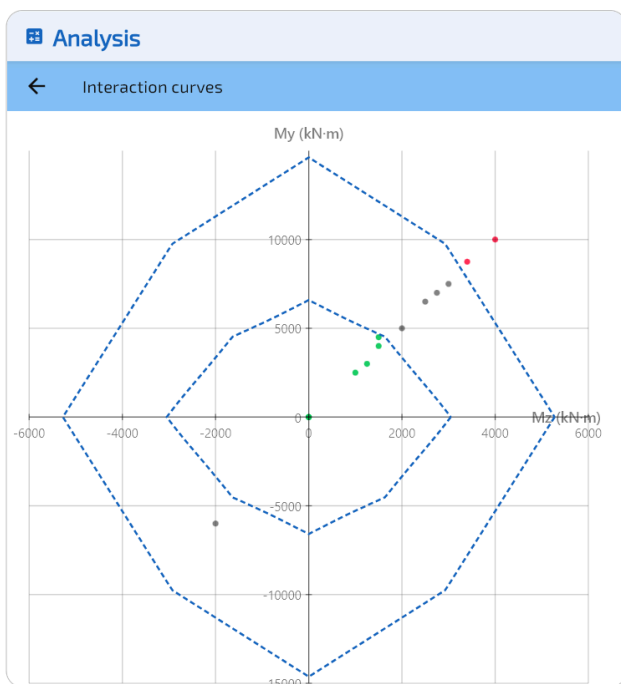


Abbildung 4: Gebrauchszustand: Hüllkurve auf N .

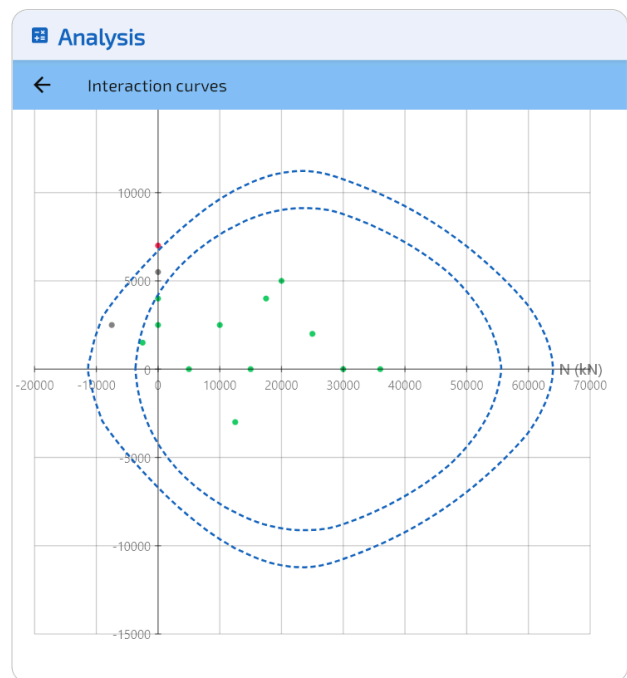


Abbildung 5: Tragfähigkeit: Hüllkurve auf M_y .

Die grünen Marker liegen innerhalb beider Grenzkurven und sind bei beiden Extremwerten der festgehaltenen Komponente als sicher nachgewiesen. Die roten Marker liegen außerhalb beider Kurven und überschreiten die Tragfähigkeit bei beiden Extremwerten. Die grauen Marker liegen zwischen den Kurven: bei einem Extremwert sicher, beim anderen nicht. Ihr Status ist mehrdeutig; der Ingenieur prüft sie einzeln im Modus mit festgehaltener Komponente, über die 3D-Interaktionsfläche oder den internen Gleichgewichtslöser.

Elliptischer Querschnitt (ACI 318)

Eingangsdaten

Beton

- Elliptischer Querschnitt
- Breite = 3.00 m, Höhe = 2.00 m

Bewehrung

- 40 Stäbe entlang des Umfangs
- Durchmesser $\varphi = 40$ mm, Betondeckung 50 mm

Materialgesetze (ACI 318)

- Beton: $f'_c = 30$ MPa
- Stahl: $f_y = 500$ MPa

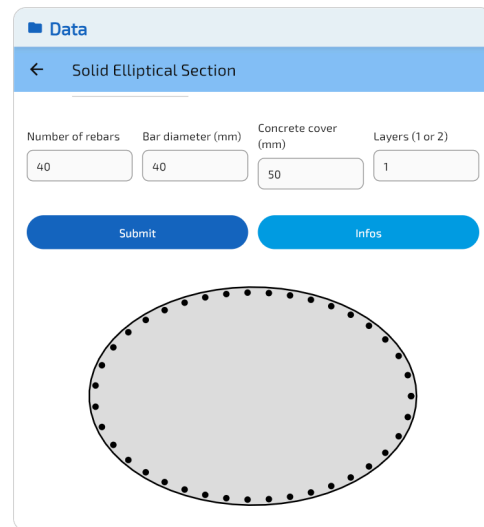


Abbildung 6: Elliptischer Querschnitt.

Interaktionskurven

Die erste Kurve zeigt die zweiachsigale Biegetragfähigkeit bei $N = 0$ unter dem Gebrauchszustand, die zweite die Normalkraft-Biegeinteraktion bei $M_y = 0$ unter dem Grenzzustand der Tragfähigkeit. Der Whitney-Druckblock und die φ -Faktoren werden nativ angewendet.

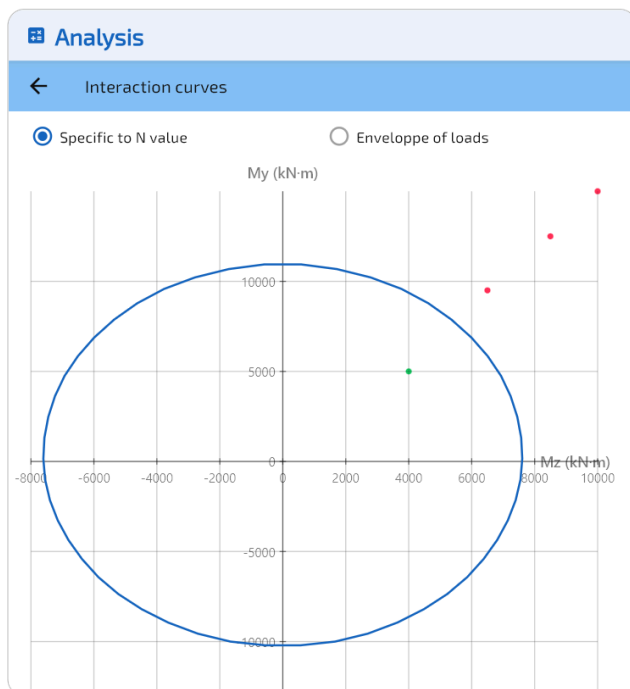


Abbildung 7: Gebrauchszustand: M_z - M_y bei $N = 0$.

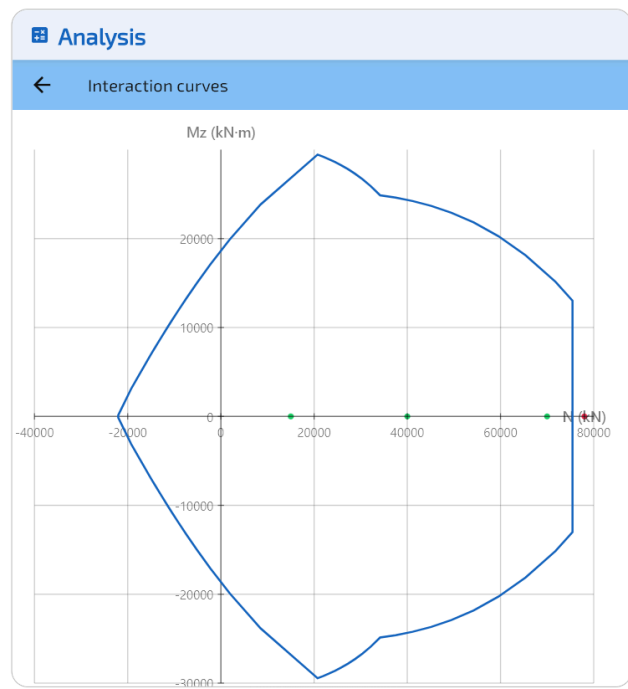


Abbildung 8: Tragfähigkeit: N - M_z bei $M_y = 0$ (Whitney).

Die Bemessungskurve (rechts) zeigt die Auswirkungen der Whitney-Formulierung nach ACI 318. Die maximale Druckkraft ist auf $\varphi P_{n,max}$ begrenzt: die flache vertikale Grenze, an der die Kurve abrupt endet ($\varphi_c \times 0.80$ für umschnürte Stützen). Die Übergangszone zwischen zugkontrollierten ($\varphi = 0.90$) und druckkontrollierten ($\varphi = 0.65$) Bereichen ist als Krümmungsänderung am Balancepunkt

erkennbar. Die Gebrauchszustandskurve (links) verwendet linear-elastische Gesetze ohne Abminderungsfaktoren und zeigt die für zweiachsigale Biegung typische glatte, symmetrische Form.

Hüllkurvenmodus

Derselbe reduzierte Lastsatz wird verwendet. Die Hüllkurve berechnet zwei Kurven bei den Minimal- und Maximalwerten der festgehaltenen Komponente: N für die M_z - M_y -Kontur (Gebrauchszustand) und M_y für die N - M_z -Kontur (Tragfähigkeit, Whitney). Dieselbe Drei-Farben-Klassifikation wird angewendet.

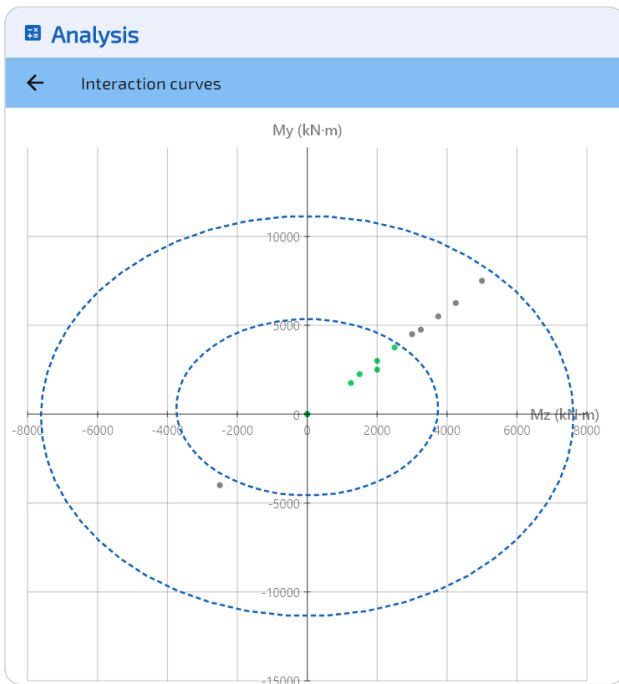


Abbildung 9: Gebrauchszustand: Hüllkurve auf N .

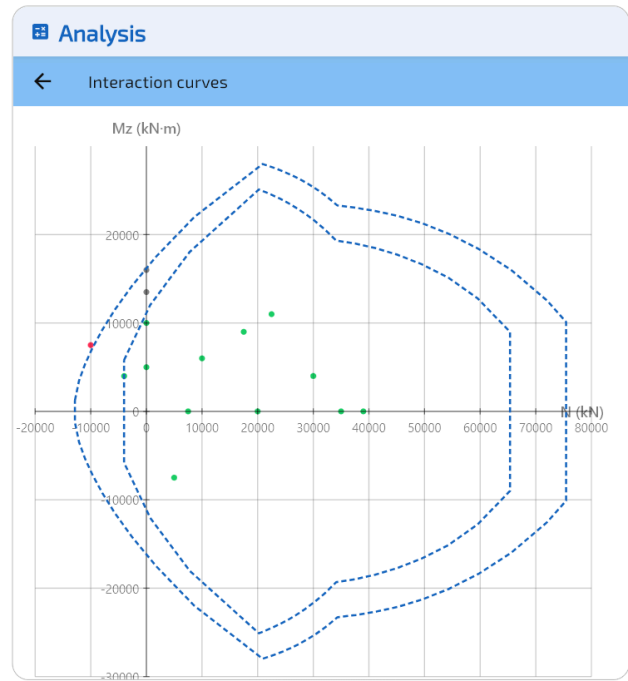


Abbildung 10: Tragfähigkeit: Hüllkurve auf M_y (Whitney).

Leistungs-Benchmark

Die Rechenzeit hängt von der gewählten Netzaufösung ab. Höhere Auflösungen erzeugen glattere Kurven auf Kosten längerer Laufzeit. Die Tabelle zeigt die Gesamtrechenzeit (Median aus 3 Durchläufen) für beide Querschnitte.

Netzaufösung	Achteckig EC2 (ms)	Elliptisch ACI (ms)
51 × 50	8.5	6.5
101 × 100	11.0	7.0
201 × 200	14.5	9.0

Alle Berechnungen bleiben selbst bei höchster Auflösung unter 15 ms, was die Interaktionskurven für den Ingenieur praktisch instantan macht.

Fazit

Die 2D-Interaktionskurven liefern die klassischen Ingenieurdiagramme, die die 3D-Fläche ergänzen:

- Auf der Kurve gestreute Lasten zeigen unmittelbar, welche sicher (grün) und welche die Tragfähigkeit überschreiten (rot), ohne numerische Ausnutzungsgrade zu berechnen.

- Die Innen-/Außen-Klassifikation aus der 3D-Abstandsauswertung ist vollständig konsistent mit der 2D-Kurvenposition.
- Die 2D-Kurven für ACI 318 werden nativ mit dem Whitney-Block und den φ -Faktoren berechnet.
- Der Hüllkurvenmodus überprüft mehrere Lastfälle mit unterschiedlichen Festhalte-Werten in einer einzigen Abbildung mittels Drei-Farben-Klassifikation (grün/grau/rot).
- Kurven werden in Millisekunden erzeugt, auch bei hohen Netzauflösungen.

Das Interaktionskurven-Modul berechnet derzeit keinen numerischen Ausnutzungsgrad (η) je Last: dieser wird vom Abstands-Modul bereitgestellt (Artikel #5). Eine zukünftige Version kann beides kombinieren: die visuelle 2D-Kurve mit je Last annotierten η -Werten direkt im Diagramm.

Export

SectionPro exportiert die Interaktionskurven in den Formaten PDF, TXT und XLS. Der PDF-Bericht enthält die 2D-Kurve mit gestreuten Lastpunkten sowie eine zugehörige Ergebnistabelle.

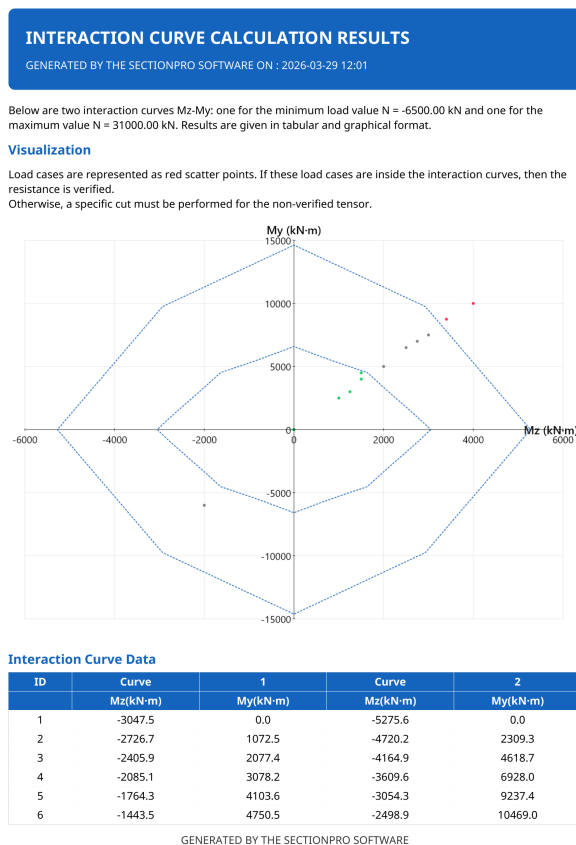


Abbildung 11: PDF-Export, Seite 1: Interaktionskurve mit Lasten.

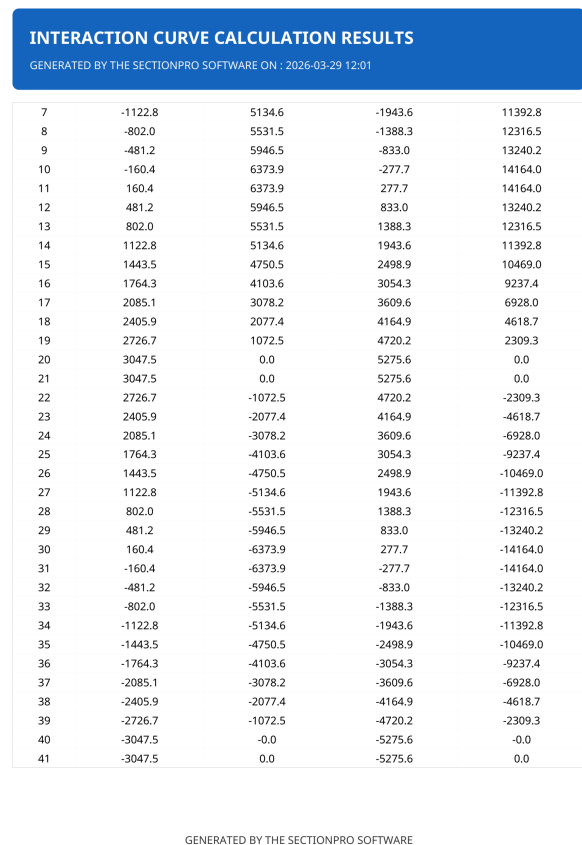


Abbildung 12: PDF-Export, Seite 2: Kurvenkoordinaten.