

Erweiterte Querschnitte

Modellierung komplexer Querschnitte in SectionPro

Anwendung auf den Stützquerschnitt eines vorgespannten Brückenhohlkastens

BridgeKernel · 2026

Einführung

Übliche Balken-, Stützen- und Wandquerschnitte werden im Allgemeinen durch eine einzige Kontur und eine gleichmäßige Bewehrung beschrieben. Reale Tragwerke kombinieren jedoch häufig mehrere Materialien, Hohlräume, getrennte Bewehrungslagen, Spannglieder oder eingebettete Stahlbauteile. Ihre Analyse erfordert eine Darstellung, in der sowohl die Geometrie als auch das Stoffgesetz jeder Komponente erhalten bleiben.

Die erweiterten Querschnitte von SectionPro erfüllen diese Anforderung. Ein erweiterter Querschnitt setzt sich aus geometrischen Bereichen, passiver Bewehrung, Spannstahl, Stahlprofilen und dünnen Blechen zusammen. Jeder Komponente wird das für die Analysen verwendete Stoffgesetz zugewiesen. Dieselbe Beschreibung dient anschließend zur Berechnung der Querschnittswerte, zur Spannungs- und Dehnungsprüfung unter vorgegebenen Schnittgrößen, zur Berechnung der Rissbreite und zur Ermittlung der Interaktionsbereiche.

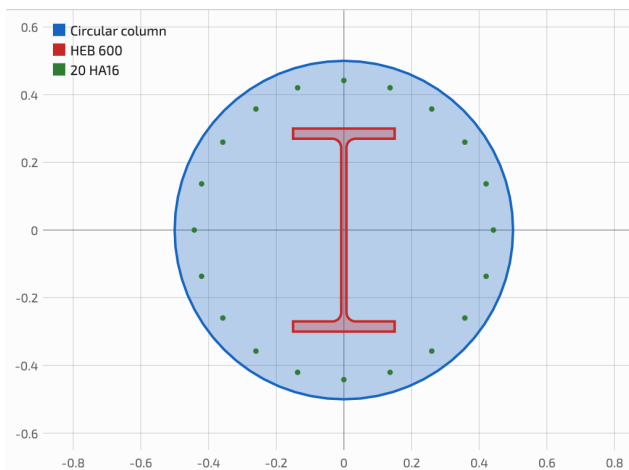
Der Artikel stellt zunächst das Datenmodell eines erweiterten Querschnitts vor. Anschließend dient ein maßgebender Stützquerschnitt eines vorgespannten Brückenhohlkastens als Beispiel. Diese Geometrie vereint einen großen Hohlraum, auf mehrere Flächen verteilte Bewehrung und Spanngliedgruppen in einem einzigen Modell.

Definieren eines erweiterten Querschnitts

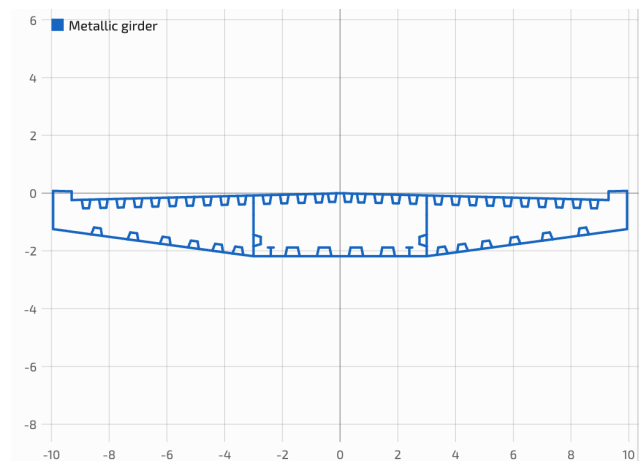
Ein erweiterter Querschnitt kombiniert mehrere Gruppen mechanischer Objekte. Der Rechenkern behält deren Lage im Querschnittskoordinatensystem bei und bewertet ihren Beitrag anhand des jeweils zugewiesenen Stoffgesetzes.

- Ein geometrischer Bereich oder GeoDomain wird durch eine Außenkontur definiert und kann mehrere Hohlräume enthalten. Ein Querschnitt kann mehrere Bereiche umfassen, denen jeweils ein eigenes Stoffgesetz zugeordnet ist.
- Die passive Bewehrung ist in unabhängigen Lagen organisiert. Jeder Stab besitzt eine Lage, einen Durchmesser und ein Stahlgesetz, sodass unterschiedliche Bewehrungslagen, Flächen und Stahlsorten abgebildet werden können.

- Der Spannstahl wird in Spanngliedgruppen zusammengefasst, die durch Lage, Fläche, Verbundparameter und Ausgangszustand definiert sind.
- Stahlprofile können aus der integrierten Bibliothek mit 535 Profilen aus elf europäischen Familien gewählt werden: IPE, HEA, HEB, HEM, UNP, UPE, UAP, LNP sowie quadratische, rechteckige und runde Hohlprofile. Sie werden entweder als GeoDomain mit Integration über die tatsächliche Fläche einschließlich gekrümmter Übergänge und Abrundungen oder als Zusammensetzung aus TSP-Elementen dargestellt.
- Ein TSP-Element beschreibt die gerade oder gekrümmte Mittellinie eines Blechs und dessen Dicke. Sein Beitrag wird durch Linienintegration ermittelt; dabei wird eine über die Dicke konstante Spannung angenommen. Diese Darstellung eignet sich für dünne Bleche, Stahlprofile und mehrzellige Hohlkästen.
- Stoffgesetze werden den Komponenten direkt zugeordnet. Sie können aus den normbasierten Modellen von SectionPro oder aus einer vom Benutzer für die untersuchten Grenzzustände definierten allgemeinen Spannungs-Dehnungs-Beziehung stammen.



Verbundstütze: Beton, HEB-Profil und passive Bewehrung.

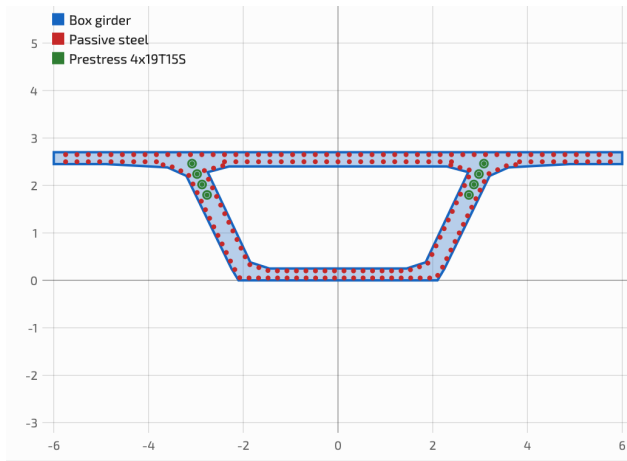


Stahlhohlkasten: 267 TSP-Elemente und 51 Bredt-Zellen.

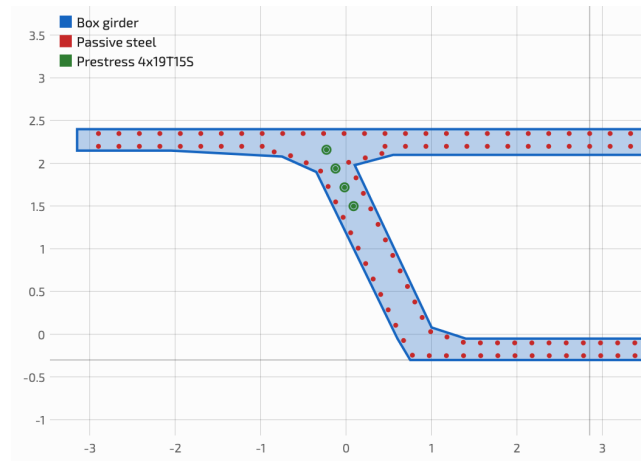
Abbildung 1: Beispiele für erweiterte Querschnitte in SectionPro.

Beispiel: Brückenhohlkasten

Untersucht wird ein maßgebender Stützquerschnitt eines einzelligen Hohlkastens. Er ist 12,00 m breit und 2,70 m hoch. Fahrbahnplatte, geneigte Stege, Vouten und Bodenplatte bilden einen einzigen Betonbereich. Die mittlere Zelle wird als innerer Hohlraum definiert.



(a) Gesamtansicht des Querschnitts.



(b) Detail der oberen linken Voute.

Abbildung 2: SectionPro-Modell: Betonbereich, passive Bewehrung und Spanngliedgruppen.

Komponente	Material	Definition im Beispiel
GeoDomain 1	Beton C45/55	Kontur des Hohlkastens, eine Innenzelle, Bruttofläche 6,759 m ²
Passive Bewehrung	B500B	186 HA16-Stäbe im Abstand von 50 mm zu den Betonoberflächen
Vorspannung	Y1860	Acht Spannglieder 19T15S, vier entlang jedes Stegs, 2.850 mm ² je Spannglied und 100-mm-Hüllrohre

Der Querschnitt enthält 186 Bewehrungsstäbe und acht Spannglieder. Die vier Hüllrohre entlang jedes Stegs sind in Stegrichtung ausgerichtet und reichen bis in die obere Voute. Ihre Koordinaten werden per Skript erzeugt und anschließend in der Datei des erweiterten Querschnitts gespeichert. Dieselbe Datei wird für alle nachfolgend dargestellten Analysen verwendet.

Schnittgrößen und Vorspannung

Der gesamte Schnittgrößenvektor wird in die Wirkungen aus ständigen Einwirkungen G , veränderlichen Einwirkungen Q und Vorspannung P zerlegt: $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Für den untersuchten Querschnitt liefert das in unserer LFEM-Software erstellte Finite-Elemente-Tragwerksmodell die folgenden $G + Q$ -Schnittgrößenvektoren in MN und MN · m: $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{GZG}} = (0; -58,650; 0)$ und $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{GZT}} = (0; -92,650; 0)$.

In SectionPro wird die Vorspannung auf zwei Ebenen berücksichtigt. Ihre Wirkung auf das Tragwerk einschließlich des primären und eines möglichen sekundären Effekts muss in den aufgebrachten Schnittgrößenvektor eingehen. Aufgrund der Quersymmetrie von Querschnitt und Spanngliedführung entfällt hier das Moment um y ; somit gilt $\mathbf{S}_P = (N_P, M_{z,P}^{\text{primär}} + M_{z,P}^{\text{sekundär}}, 0)$.

Die wirksame Spanngliedspannung definiert den mit der Vorspannwirkung verbundenen Ausgangszustand. Im Tragwiderstandsnachweis verändert der Gleichgewichtsdehnungszustand anschließend die Spanngliedspannung: Eine Verlängerung bewirkt einen positiven Spannungszuwachs und erhöht den Widerstandsbeitrag, während eine Verkürzung zu einer Spannungsabnahme führt.

Im Beispiel beträgt die wirksame Spannung nach Verlusten 1116 MPa. Die zugehörige Einwirkung erzeugt eine Normalkraft von 25,445 MN. Im Stützquerschnitt liegen die Spannglieder oberhalb des

Schwerpunkts; daraus ergibt sich ein primäres Moment von $+8,994 \text{ MN} \cdot \text{m}$. Für diese Spanngliedführung liefert das Tragwerksmodell ein sekundäres Moment gleichen Vorzeichens von $+4,400 \text{ MN} \cdot \text{m}$. Das in den Querschnitt eingebrachte Vorspannmoment beträgt somit $+13,394 \text{ MN} \cdot \text{m}$.

Endgültiger Schnittgrößenvektor	$N \text{ [MN]}$	$M_z \text{ [MN} \cdot \text{m]}$	$M_y \text{ [MN} \cdot \text{m]}$
GZG	25,445	-45,256	0,000
GZT	25,445	-79,256	0,000

Ergebnisse zum vollständigen Modell

Mechanische Eigenschaften

SectionPro berechnet die Eigenschaften des Brutto-, Netto- und ideellen Querschnitts. In diesem Beispiel werden beim Nettoquerschnitt nur die Spannhüllrohre abgezogen; die passive Bewehrung bleibt erhalten. Im ideellen Querschnitt wird für Bewehrungs- und Spannstahl der Wert $n = 5$ angesetzt.

Querschnitt	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$y_G \text{ [m]}$	$I_{zz} \text{ [m}^4\text{]}$	$I_{yy} \text{ [m}^4\text{]}$
Brutto	6,7590	1,7765	6,4096	55,5258
Netto	6,6962	1,7732	6,3979	54,9883
Ideell	6,9598	1,7777	6,5809	57,1632

Die Torsions- und Schubeigenschaften des Bruttoquerschnitts sind nachfolgend zusammengestellt.

$J \text{ [m}^4\text{]}$	$A_{sy} \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{sz} \text{ [m}^2\text{]}$	$y_T \text{ [m]}$	$\Gamma \text{ [m}^6\text{]}$
13,6059	1,5031	4,5502	1,3508	6,5277

Das unten gezeigte Feld entspricht den Scherspannungen, die durch ein Einheitsdrehmoment erzeugt werden.

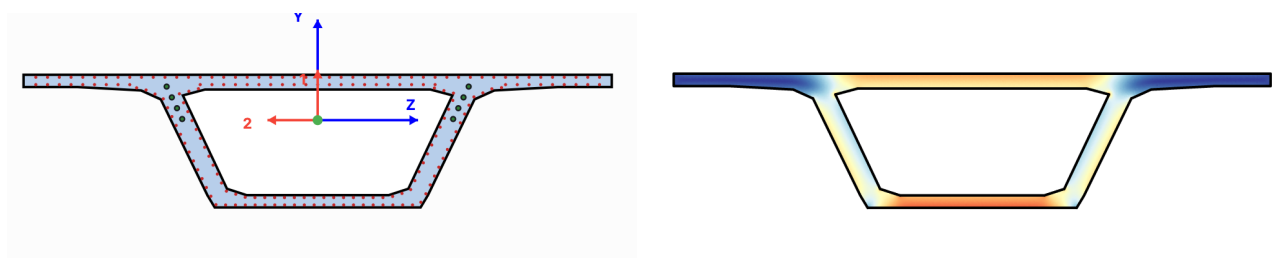


Abbildung 3: Schwerpunkt- und Hauptachsen (links) sowie Schubspannungsfeld infolge Einheitstorsion (rechts).

Gleichgewicht im GZG und GZT

Der Solver bestimmt den Dehnungszustand des Querschnitts, der die aufgetragenen Schnittgrößen ins Gleichgewicht bringt. Die Spannungen ergeben sich anschließend aus den jeweiligen Stoffgesetzen von Beton, Bewehrungsstahl und Spanngliedern. Dargestellt werden die Ergebnisse für die charakteristische Kombination im GZG und die Grundkombination im GZT.

Für die Spannglieder wird die Endspannung aus der Gesamtdehnung $\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$ ermittelt. Dabei ist ε_0 die zur wirksamen Spannung von 1116 MPa gehörende Dehnung, $\Delta\varepsilon_1$ beschreibt eine mögliche Dekompression des angrenzenden Betons und $\Delta\varepsilon_2$ die aus dem Querschnittsgleichgewicht ermittelte Dehnung. Im Beispiel ist der Dekompressionseffekt aktiviert.

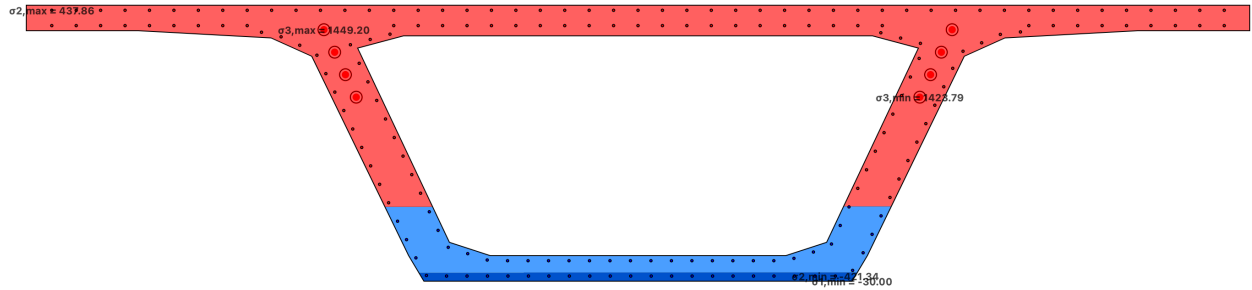


Abbildung 4: Normalspannungsfeld im GZT aus der nichtlinearen Prüfung des endgültigen Schnittgrößenvektors.

Ergebnis	Einheit	Charakteristischer GZG	Grundkombination GZT
Beton			
Minimale Dehnung, $\varepsilon_{b, \min}$	‰	−0,531	−2,262
Minimale Spannung, $\sigma_{b, \min}$	MPa	−19,264	−30,000
Passive Stähle			
Minimale Dehnung, $\varepsilon_{s, \min}$	‰	−0,512	−2,107
Maximale Dehnung, $\varepsilon_{s, \max}$	‰	0,495	5,946
Minimale Spannung, $\sigma_{s, \min}$	MPa	−102,31	−421,34
Maximale Spannung, $\sigma_{s, \max}$	MPa	99,09	437,86
Vorspannung			
Minimale Dehnung, $\varepsilon_{p, \min}$	‰	0,166	3,297
Minimale Gesamtspannung, $\sigma_{p, \min}$	MPa	1148,32	1423,79
Minimaler Spannungszuwachs, $\Delta\sigma_{p, \min}$	MPa	32,32	307,79
Maximale Dehnung, $\varepsilon_{p, \max}$	‰	0,422	5,352
Maximale Gesamtspannung, $\sigma_{p, \max}$	MPa	1198,23	1449,20
Maximaler Spannungszuwachs, $\Delta\sigma_{p, \max}$	MPa	82,23	333,20
Auflösung			
Iterationen		4	6
Konvergenzrest		$1,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Konvergenz		Ja	Ja

In der Grundkombination des GZT erreicht der Beton der Bodenplatte örtlich sein plastisches Druckplateau, während sich in der Fahrbahnplatte und im oberen Bereich der Stege eine ausgeprägte Zugzone bildet. Die Spannglieder werden stark aktiviert; ihr Spannungszuwachs liegt zwischen 307,8 und 333,2 MPa.

In der charakteristischen Kombination des GZG sind die Spannungsnachweise erfüllt: Die maximale Betondruckspannung beträgt 19,264 MPa, die maximale Zugspannung der passiven Bewehrung 99,09 MPa und die maximale Gesamtspannung der Spannglieder 1198,23 MPa. Die Rissbreite $w_k = 0,174$ mm bleibt gering, obwohl sie hier für die charakteristische Kombination ausgewertet wird.

Interaktionsbereiche

Die erweiterte Geometrie und die Stoffgesetze dienen ebenfalls zur Berechnung der Widerstandsbe-
reiche. Die N - M_z -Kurve ist ein Schnitt durch den Bereich bei $M_y = 0$. Die N - M_z - M_y -Fläche erweitert
die Berechnung auf alle Biegerichtungen.

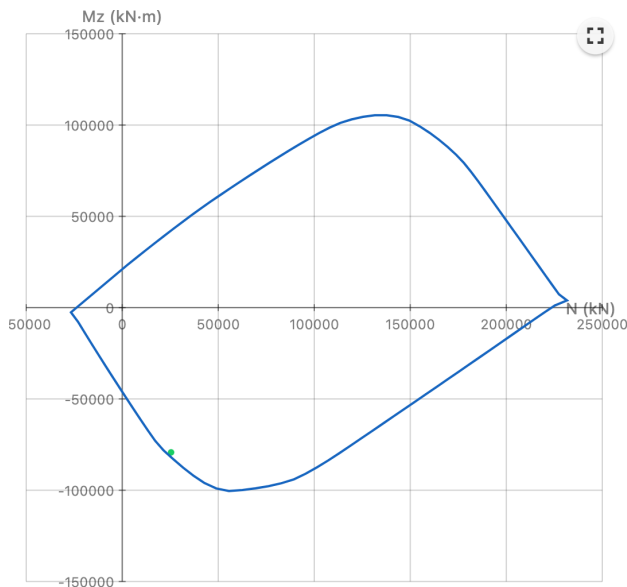


Abbildung 5: N - M_z -Interaktionskurve im GZT für $M_y = 0$ mit Lage des endgültigen Schnittgrößenvektors.

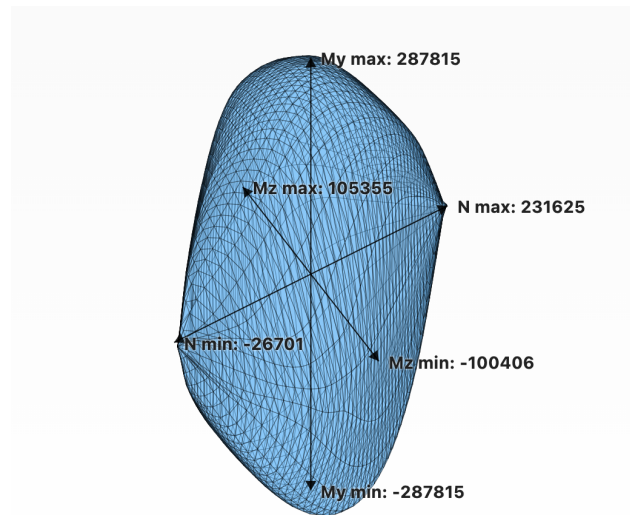


Abbildung 6: N - M_z - M_y -Interaktionsfläche im GZT.

Die folgende Tabelle gibt den Begrenzungsrahmen der Interaktionsfläche an, der durch die Mindest- und Höchstwerte jeder seiner drei Komponenten definiert wird.

Komponente	Minimum	Maximal
N	-26,70 MN	231,62 MN
M_z	-100,41 MN · m	105,35 MN · m
M_y	-287,82 MN · m	287,82 MN · m

Die positiven und negativen Tragfähigkeiten um M_y stimmen infolge der Quersymmetrie überein. Die unterschiedlichen positiven und negativen Tragfähigkeiten um M_z ergeben sich aus der unterschiedlichen Geometrie und Bewehrung von Fahrbahn- und Bodenplatte. Der endgültige Schnittgrößenvektor liegt unmittelbar an der Grenze des Widerstandsbereichs. Das Modul zur Bewertung des Abstands zwischen Beanspruchung und Bereich liefert $FS = 0,983$; der Wert liegt knapp unter eins und damit sehr nahe am Grenzwert.

Leistung

Die folgende Tabelle zeigt die Ausführungszeiten der Aufrufe des SectionPro-Rechenkerns für das Hohlkastenmodell. GUI und Ergebnisdarstellung sind in diesen Werten nicht enthalten.

Analyse	Berechnungszeit
Mechanische Eigenschaften	28,3 ms
Spannungs- und Dehnungszustand	0,73 ms
Berechnung der Rissöffnung	2,38 ms
N - M_z Interaktionskurve, 200 Punkte	1,11 ms
Interaktionsfläche N - M_z - M_y , Netz 50×50	208 ms

Diese Ergebnisse verdeutlichen eine der Stärken von SectionPro: Die weitreichende Optimierung des Rechenkerns hält die Berechnungszeiten selbst bei nichtlinearen Analysen und der Erzeugung

dreidimensionaler Widerstandsbereiche äußerst kurz. Nachweise und Varianten liefern daher nahezu unmittelbar ein Ergebnis, was direkt zu einer flüssigen Benutzererfahrung beiträgt.

Abschluss

Erweiterte Querschnitte vereinen in einem Modell mehrere geometrische Bereiche mit ihren Hohlräumen, Lagen passiver Bewehrung, Spanngliedgruppen, Stahlprofile und dünne Bleche. Jede Komponente behält ihr eigenes Stoffgesetz für die verschiedenen Grenzzustände.

Der untersuchte Hohlkasten veranschaulicht diese Darstellung. Sein Stützquerschnitt kombiniert einen Betonbereich mit Hohlraum, auf die Oberflächen verteilte Bewehrung und entlang der Stege geführte Spannglieder. Die Vorspannung geht mit ihrem primären und sekundären Effekt in den Schnittgrößenvektor ein. Der Widerstandsbeitrag der Spannglieder wird aus der Änderung ihrer Spannung unter Berücksichtigung des Ausgangszustands, einer möglichen Dekompression des angrenzenden Betons und des Gleichgewichtsdehnungszustands des Querschnitts ermittelt.

Im erweiterten Modus lässt sich damit praktisch jeder Querschnitt analysieren, unabhängig von der Komplexität seiner Geometrie und der Art der verwendeten Materialien. Diese Allgemeingültigkeit bleibt selbstverständlich an die Annahmen der Querschnittsanalyse gebunden, insbesondere dass ebene Querschnitte eben bleiben und verbundene Komponenten die Dehnungskompatibilität erfüllen. Dank des optimierten Rechenkerns behalten selbst diese detaillierten Modelle nahezu unmittelbare Antwortzeiten.