

Kapitel 38: Falltest-Simulation 10 Tonnen Fels fällt auf Auto-Dach

Es sollen die Verformungen und Spannungen mit dem FEM-System MEANS V13 (www.femcad.de) simuliert werden wenn ein 10 t Fels auf ein Auto-Dach fällt.

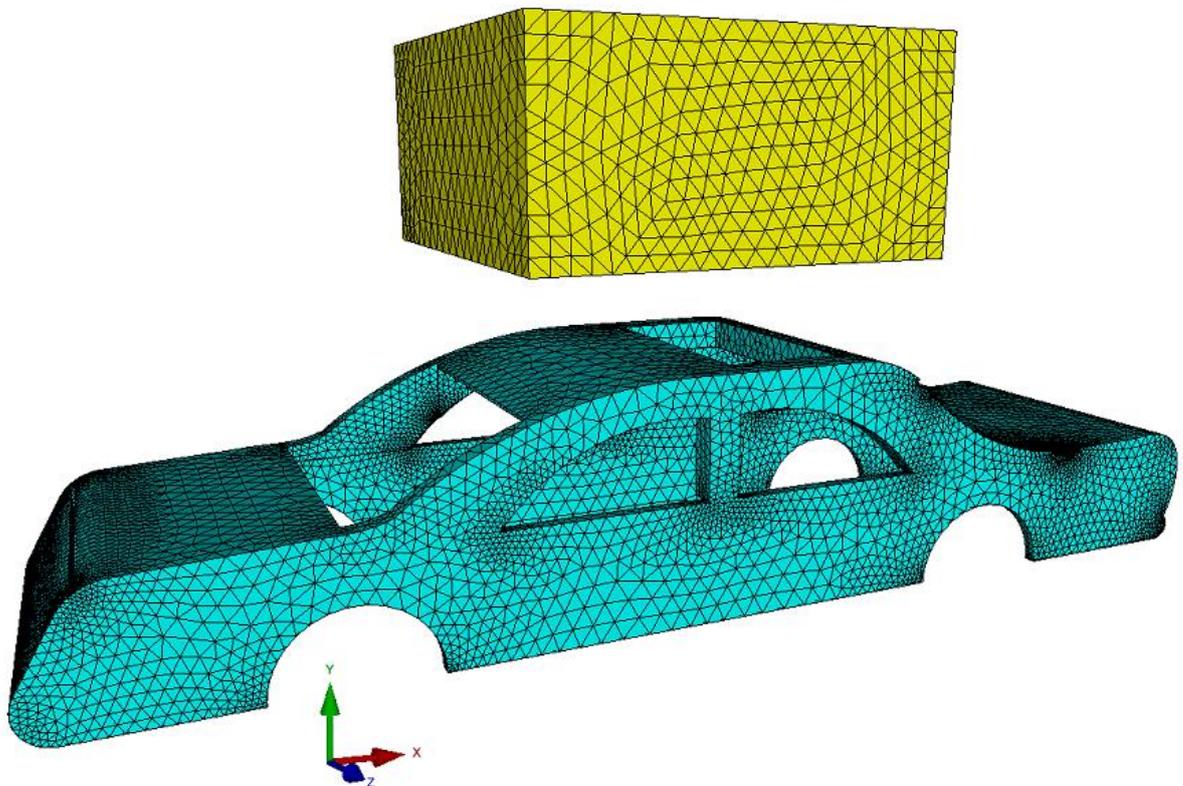
Die Autokarosserie besteht aus leichtem Aluminium das heute in fast allen Elektro-Autos wegen des zusätzlichen Batterie-Gewichtes von 100 kg zum Einsatz kommt.

Nachteile sind aber die höheren plastischen Verformungen und die geringere Streckgrenze.

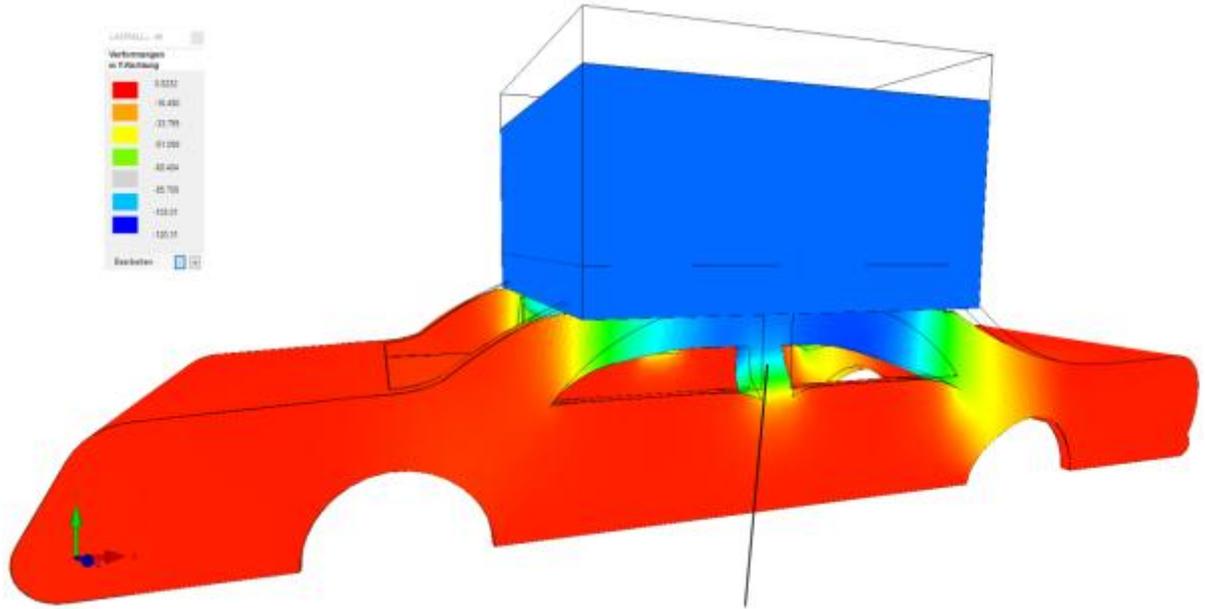
Wie gross sind:

- Aufprallkraft
- Aufprallgeschwindigkeit
- Fallhöhe des Felsens
- Fallzeit des Felsens

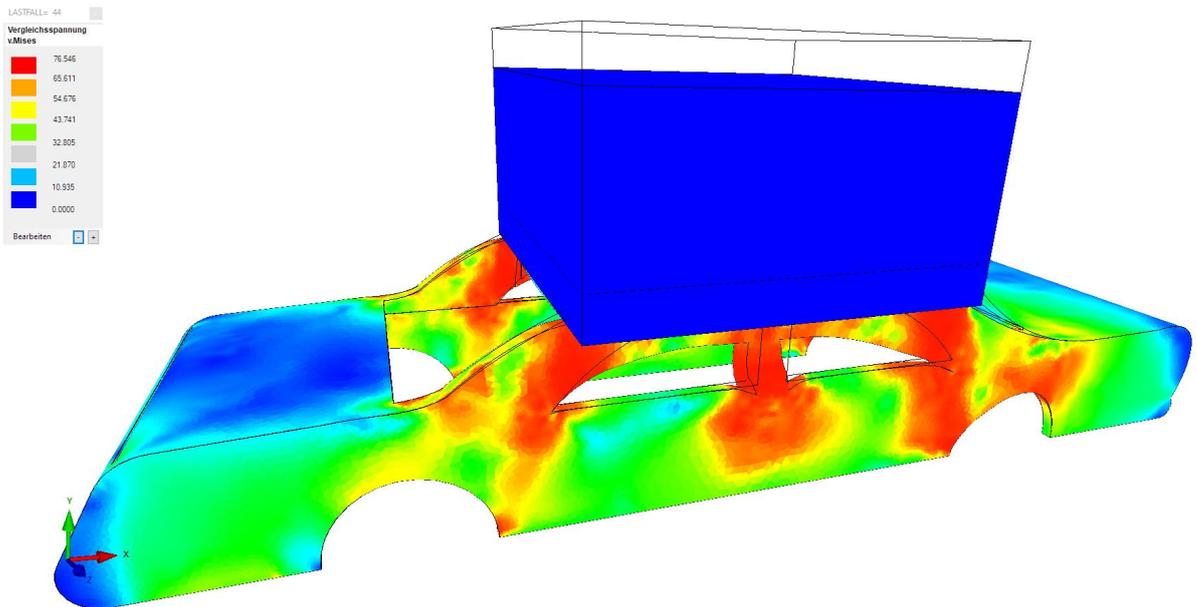
wenn sich die A-Säule um -90 mm verformt hat?



FEM-Modell Auto und FEM-Modell Fels für eine nichtlineare Kontakt-Analyse



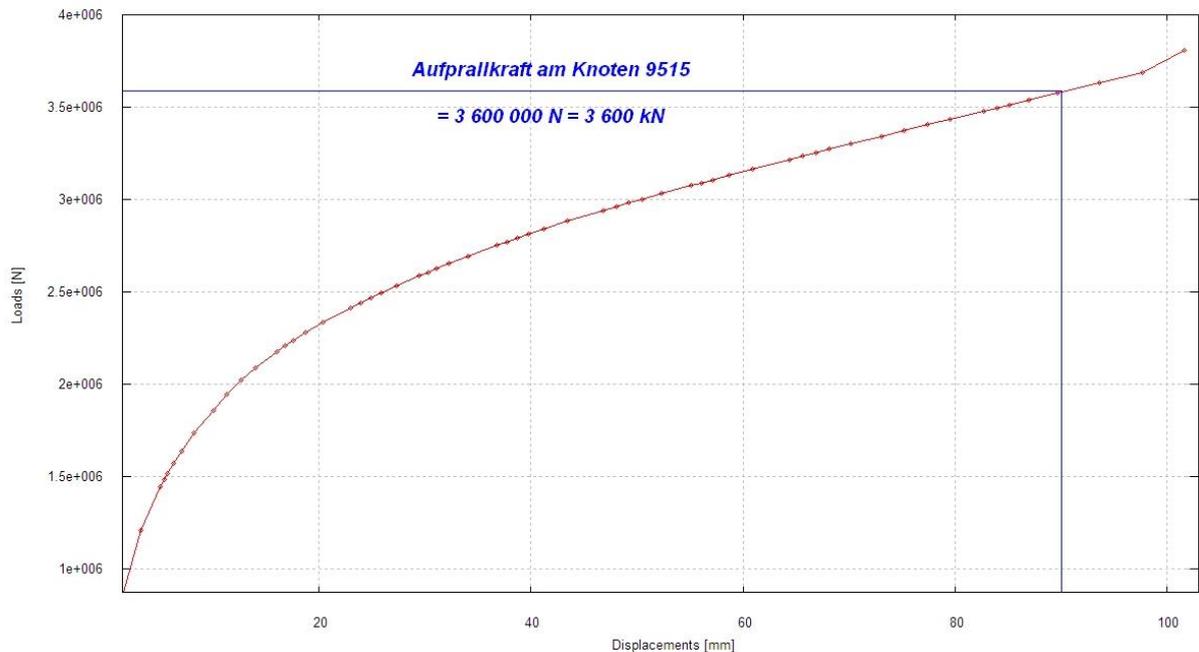
Y-Verformung von -90 mm im Bereich der A-Säule



v. Mises-Spannungsverteilung von 76 N/mm² im Bereich der A-Säule

Berechnung der Aufprallkraft

Die Aufprallkraft kann aus dem Last-Verformungs-Diagramm bei einer Verformung in Y-Richtung von -90 mm am Knoten 9515 abgelesen werden.



Die Aufprallkraft des Felsens beträgt 3 600 000 N bzw. 3600 kN

Berechnung der Aufprallgeschwindigkeit

Zuerst wird die Masse des Felsens mit dem E-Modul von 19 000 N/mm² und Dichte von 2000 kg/m³ über eine Gravitationsbelastung berechnet. Nach der Berechnung kann die Summe der Auflagerkräfte in Y-Richtung mit 12 188 N abgelesen werden, daraus ergibt sich eine Fels-Masse von 1 219 kg.

Mit der Aufprallkraft, der Masse und der Verformung von -90 mm kann die Aufprallgeschwindigkeit über die Bremsweg-Formel berechnet werden:

$$F = \frac{m v^2}{2 * S}$$

F = Aufprallkraft

m = Fels-Masse

S = die bei einem Aufprall zurückgelegte Strecke

v = Durchschnitts-Geschwindigkeit von Fels und Auto

Diese wird nach v aufgelöst:

$$v = \sqrt{\frac{F * 2 * S}{m}} = \sqrt{\frac{3600 \text{ kN} * 2 * 0.09 \text{ m}}{1219 \text{ kg}}}$$

$$= 23 \text{ m/s} = 82 \text{ km/h}$$

Die Aufprallgeschwindigkeit des Felsens ist aber wegen des stehenden Autos doppelt so gross:

$$v = (v_{\text{Auto}} + v_{\text{Fels}}) / 2$$

$$v_{\text{Fels}} = v * 2 = 23 \text{ m/s} * 2 = 46 \text{ m/s}$$

Die Aufprallgeschwindigkeit des Felsens beträgt somit 46 m/s bzw. 166 km/h.

Berechnung der Fallhöhe und der Fallzeit

Mit der Geschwindigkeit des Felsens kann über die Formel des freien Falles die Fallhöhe und Fallzeit berechnet werden:

$$v = \sqrt{2 * g * H}$$

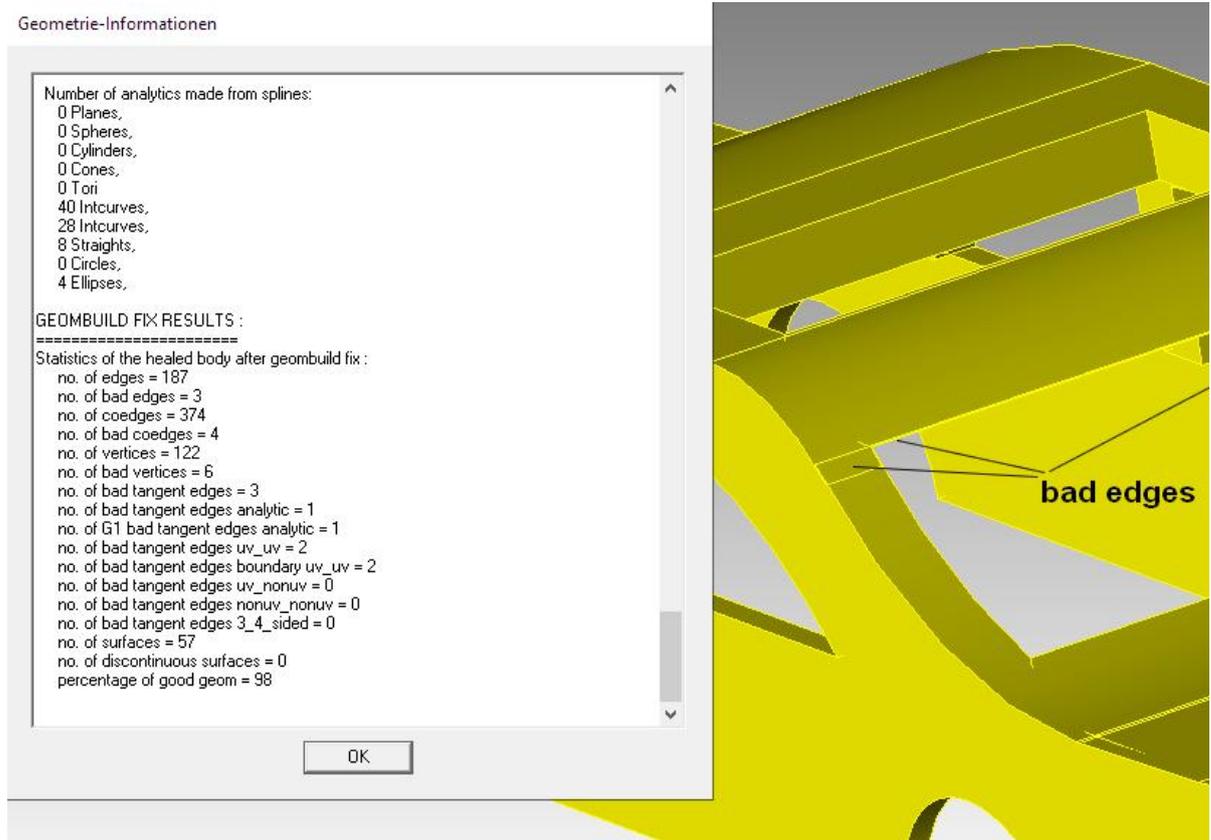
$$H = \frac{v^2}{2 * g} = \frac{46 \text{ m/s} * 46 \text{ m/s}}{2 * 9.81 \text{ m/s}^2} = 105 \text{ m}$$

$$t = \sqrt{\frac{2 * H}{g}} = \sqrt{\frac{2 * 105 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2}} = 4.6 \text{ s}$$

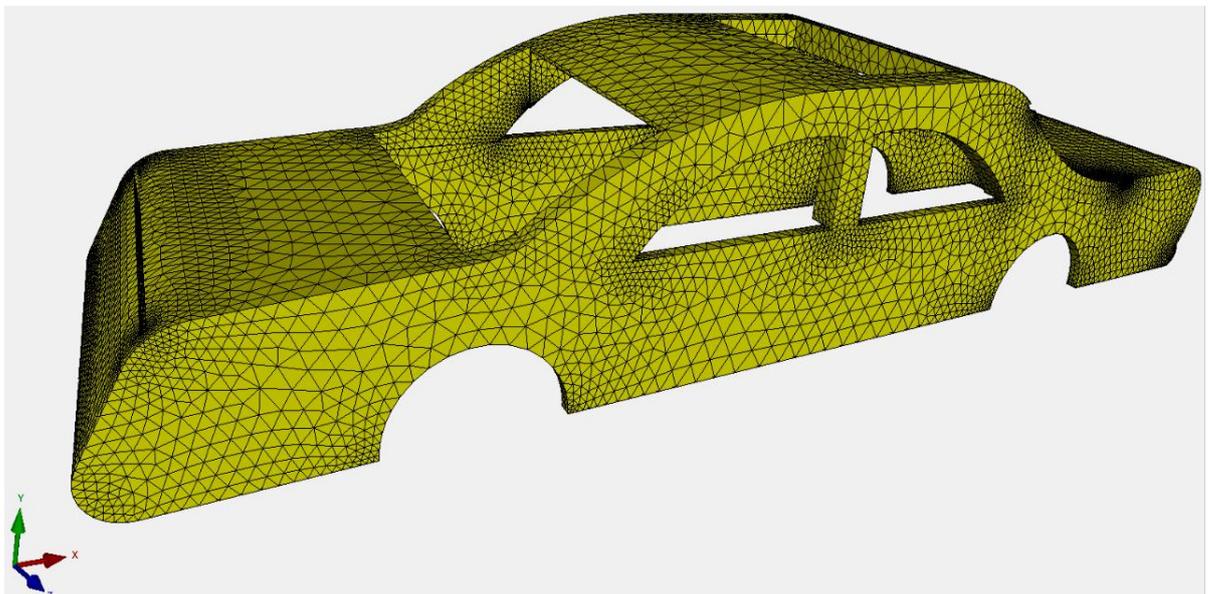
Die Fallhöhe des Felsens beträgt 105 m bei einer Fallzeit von 4.6 s.

FEM-Modell Auto

Das FEM-Modell Auto wird aus einer STEP-Datei von www.grabcad.com mit dem 3D-Netzgenerator NETGEN generiert. Vorher müssen allerdings „6 bad edges“ also 6 unverbundene Kanten mit dem Repair-Tool Transmagic optimiert werden.

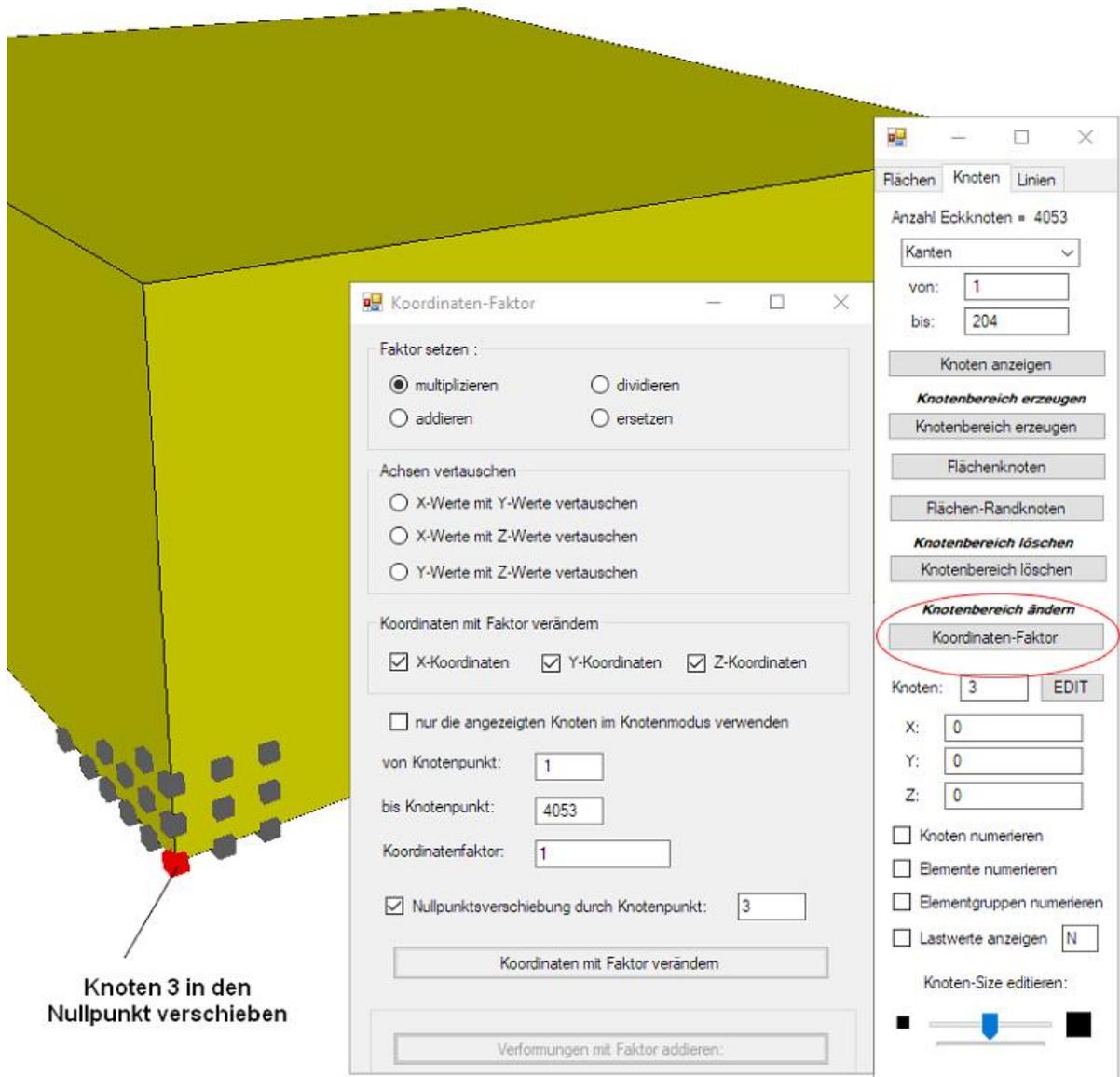


Nach der Netzgenerierung erhält man ein FEM-Modell aus 197 248 Tetraedern und 41 070 Knotenpunkten. Speichern Sie das FEM-Modell unter „Auto.FEM“ ab.



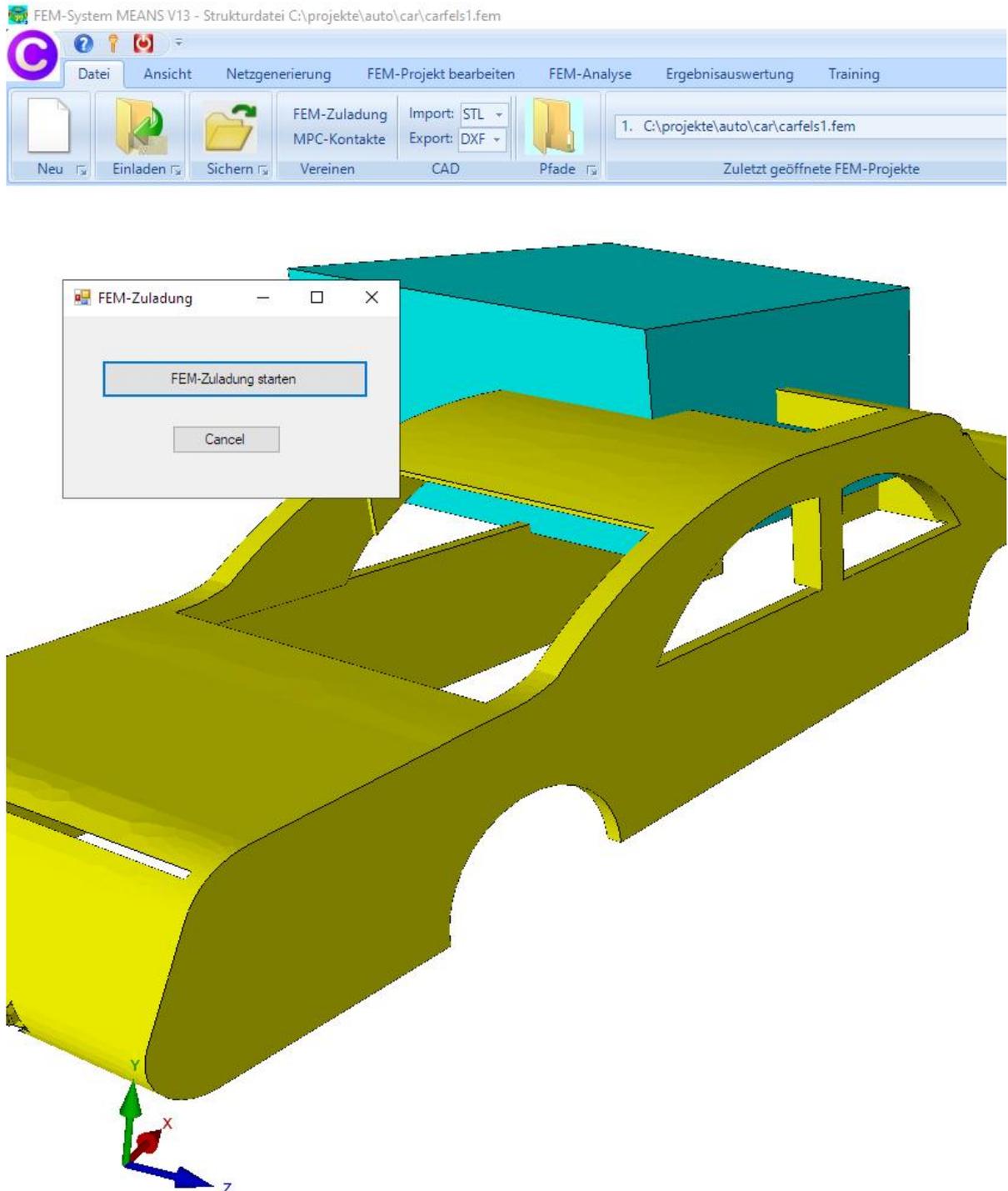
FEM-Modell Fels

Erzeugen Sie ein CAD-Würfel mit den Maßen 1000 mm x 500 mm x 1000 mm und erzeugen ein FEM-Modell aus 19 136 Tetraedern und 4 053 Knotenpunkten. Führen Sie eine Nullpunktverschiebung durch Knoten 3 mit Menü „Koordinaten-Faktor“ im Knoten-Modus aus und speichern das FEM-Netz unter „Fels.FEM“ ab.



FEM-Modelle zusammenfügen

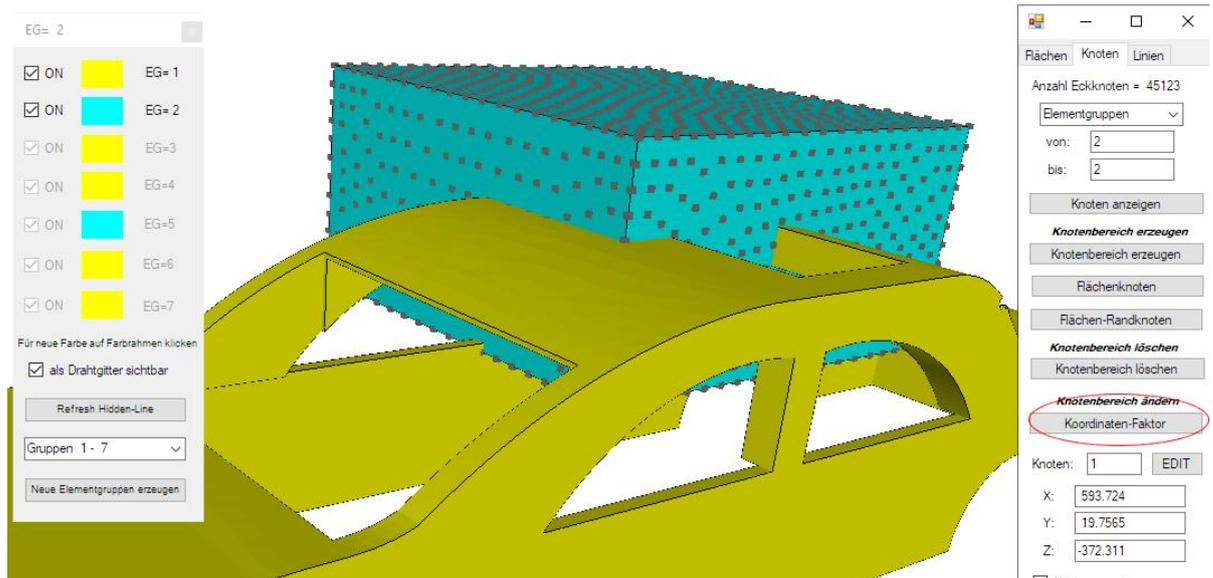
Zuerst wird das FEM-Modell **Auto.FEM** normal eingeladen, dannach wählen Sie Register „Datei“ und Menü „FEM-Zuladung“ um das zweite FEM-Modell **Fels.FEM** hinzuzufügen.



Man erhält ein FEM-Modell aus 216 384 TET4-Elementen, 45 123 Knotenpunkten und 2 Elementgruppen.

Koordinaten-Verschiebungen des Felsens

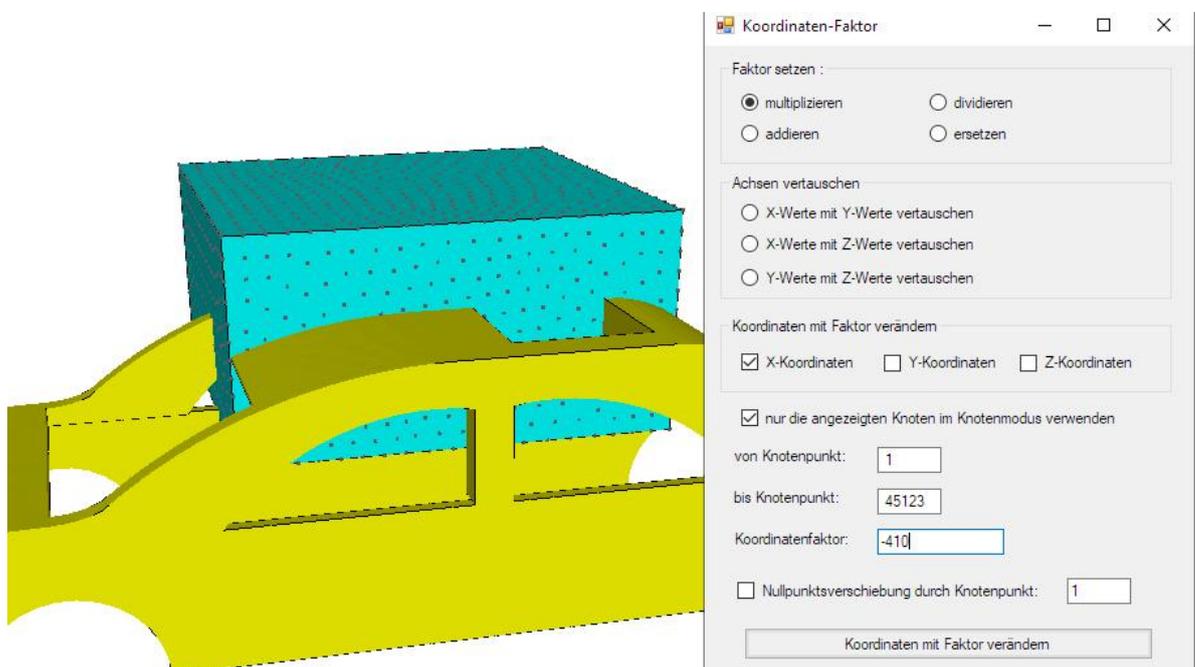
Im Knoten-Modus alle Knotenpunkte der Elementgruppe 2 anzeigen



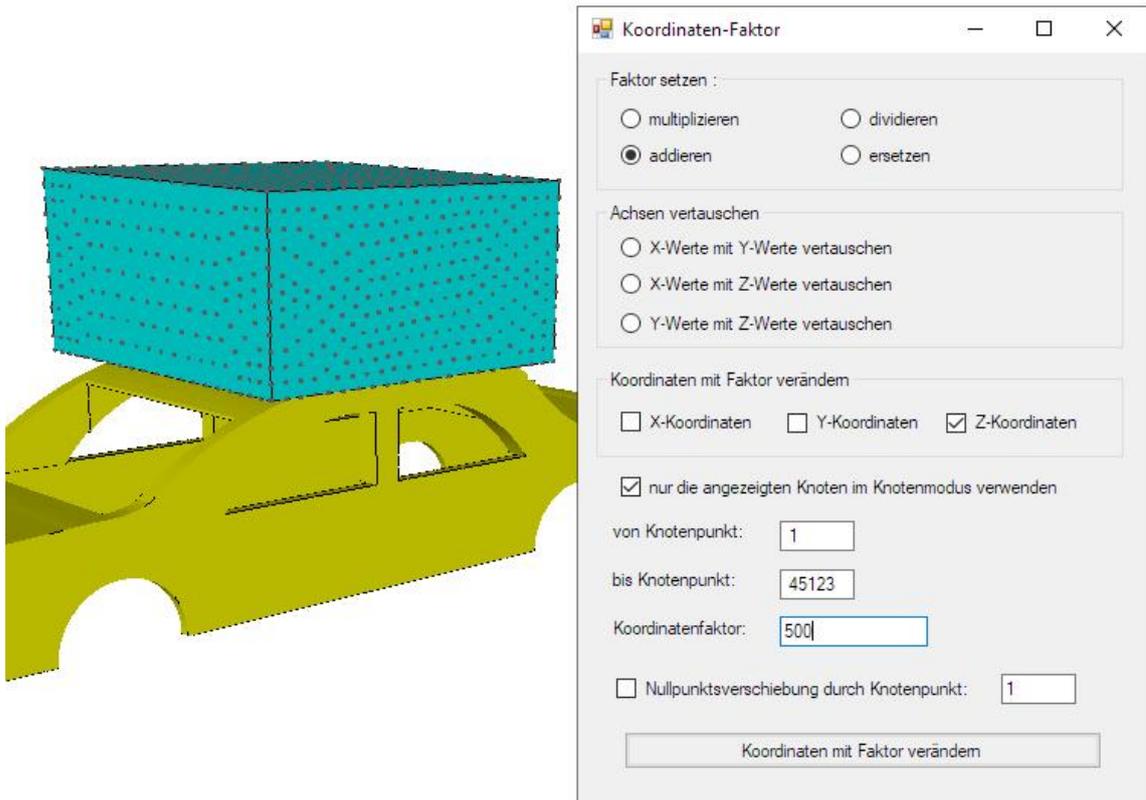
und mit „Koordinaten-Faktor“ den Felsen in 3 Koordinaten-Verschiebungen mit folgendes Abständen zu versetzen:

- 410 mm in X-Richtung
- 315 mm in Y-Richtung
- 500 mm in Z-Richtung

Erste Koordinaten-Verschiebung der Elementgruppe 2 um - 410 mm in X-Richtung:



Dritte Koordinaten-Verschiebung der Elementgruppe 2 um 500 mm in Z-Richtung:



Materialdaten

Mit Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und Menü „Materialdaten“ geben Sie folgende Materialdaten ein:

Elementgruppe 1: Auto-Karosserie

Werkstoff: Aluminium
E-Modul: 71 000 MPa
Poisson-Zahl = 0.34
Dichte = 2 700 kg/m³

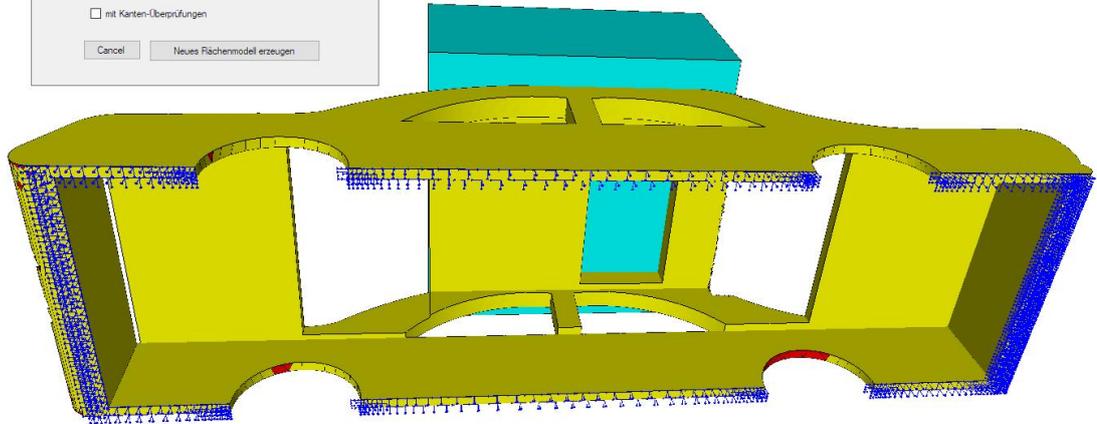
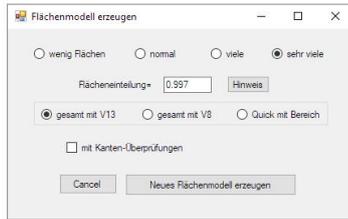
Streckgrenze = 70 MPa -> hier muß die nichtlineare Spannungs-Dehnungskurve für Alu 999 bei der FEM-Analyse „Material-Nichtlinear“ ausgewählt werden

Elementgruppe 2: Fels

Werkstoff: Naturhartgestein Granit
E-Modul: 100 000 MPa
Poisson-Zahl = 0.25
Dichte = 3100 kg/m³

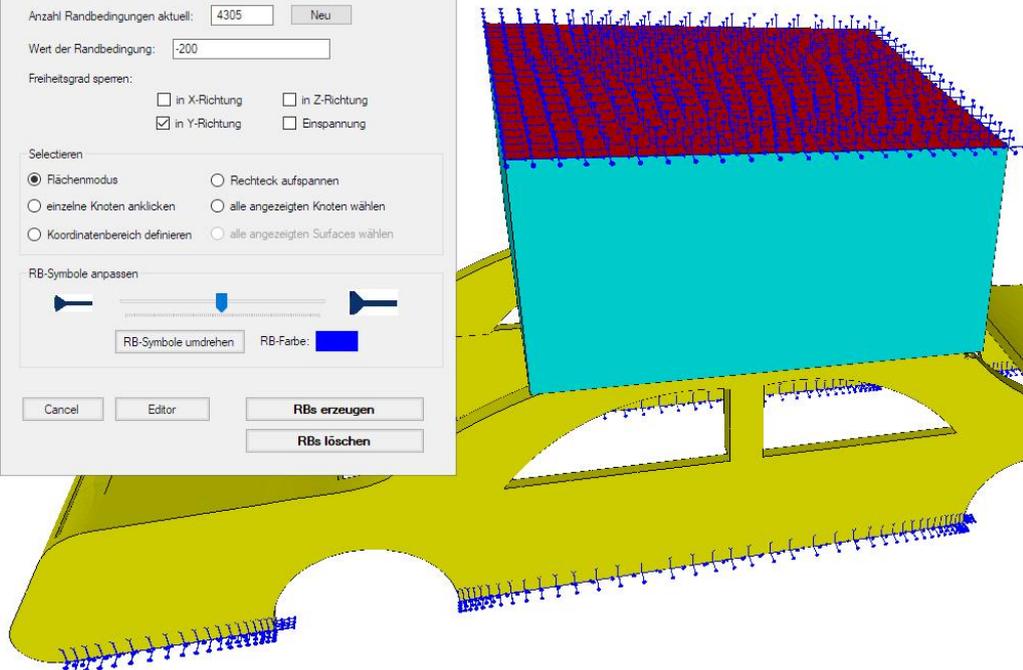
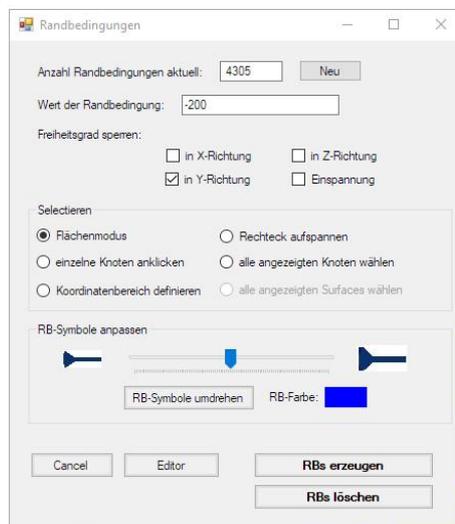
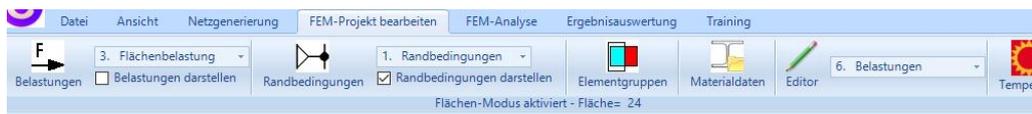
Randbedingungen erzeugen

Erzeugen Sie im Flächen-Modus ein feines Flächenmodell mit der Einstellung „sehr viele“ und spannen mit „FEM-Projekt bearbeiten“ und „Randbedingungen“ den Boden in X-, Y- und Z-Richtung fest ein.



Vorgeschriebene Randbedingungen erzeugen

Die Unter- und Oberfläche des Felsens wird in X- und Z-Richtung festgehalten und in Y-Richtung wird eine vorgeschriebene Verschiebung von „-200“ mm vorgegeben.



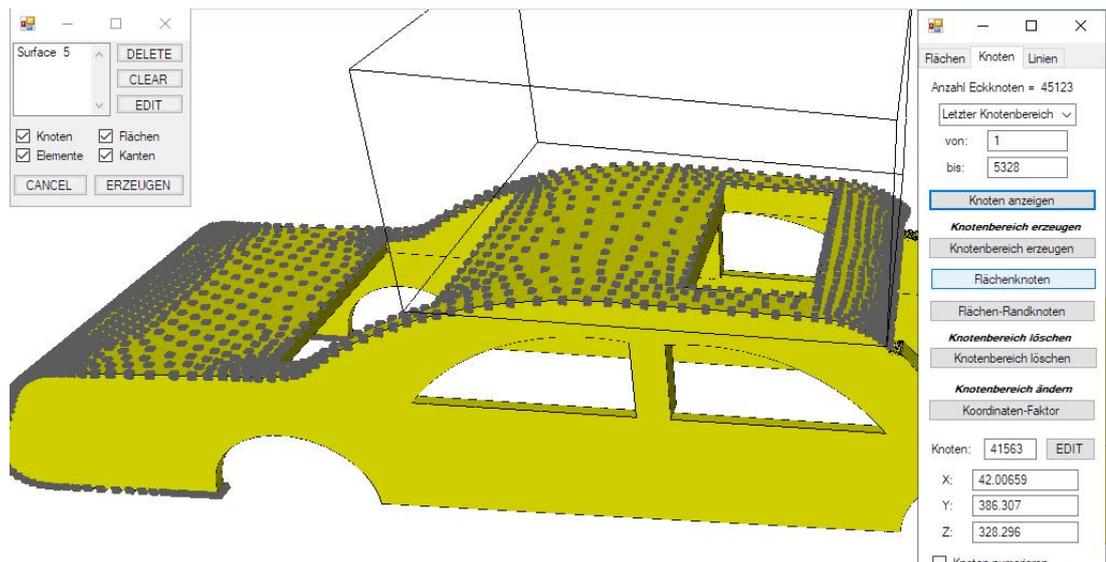
Lastfall 1 erzeugen

Erzeugen Sie eine beliebige aber sehr kleine Knotenlast da die äußere Belastung bereits durch die obigen vorgeschriebenen Randbedingungen vorgegeben ist.

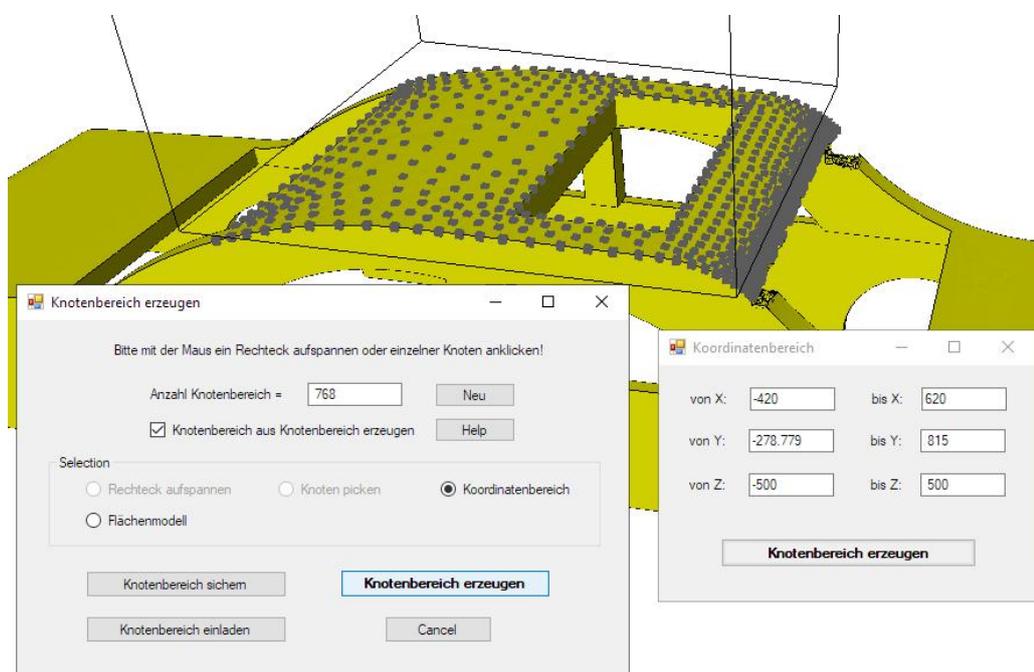
Lastfall 2 mit Master-Kontaktfläche erzeugen



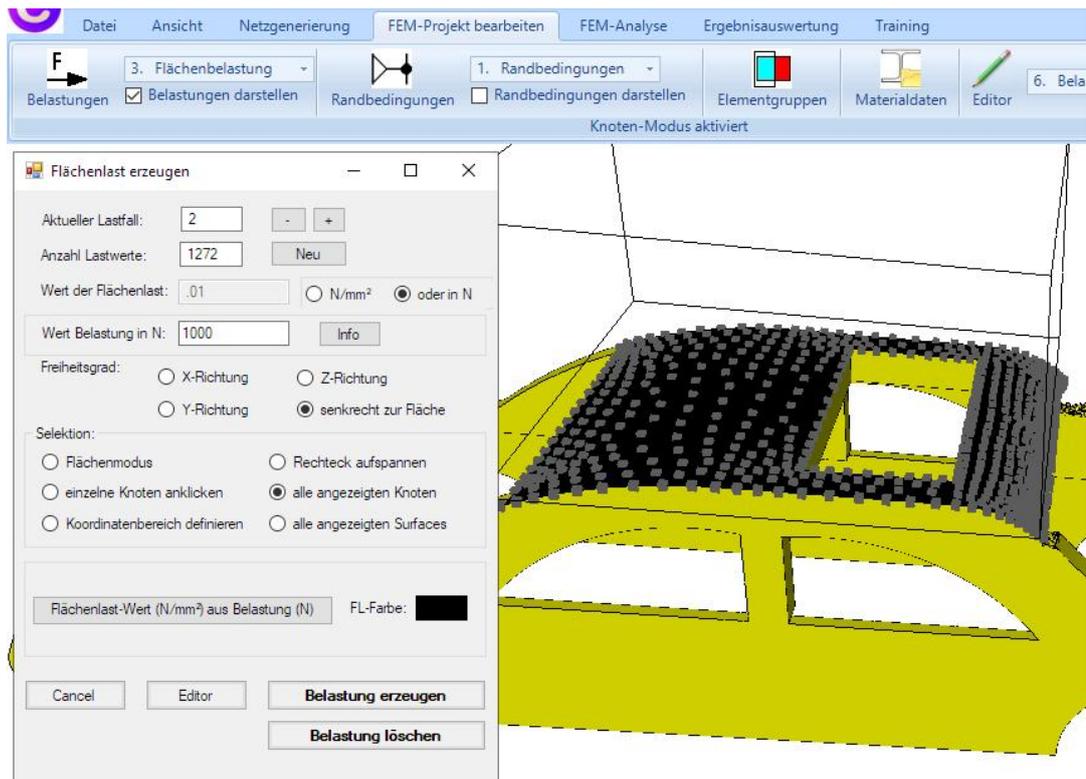
Erzeugen Sie die Master-Kontaktfläche indem Sie zuerst mit dem Icon die Elementgruppe 2 ausblenden und im Knoten-Modus die Flächenknoten der Fläche 5 anzeigen.



Dieser Knotenbereich nochmals mit „Knotenbereich erzeugen“ mit einem zweiten Knotenbereich von -420 mm bis 620 mm in X-Richtung reduzieren.

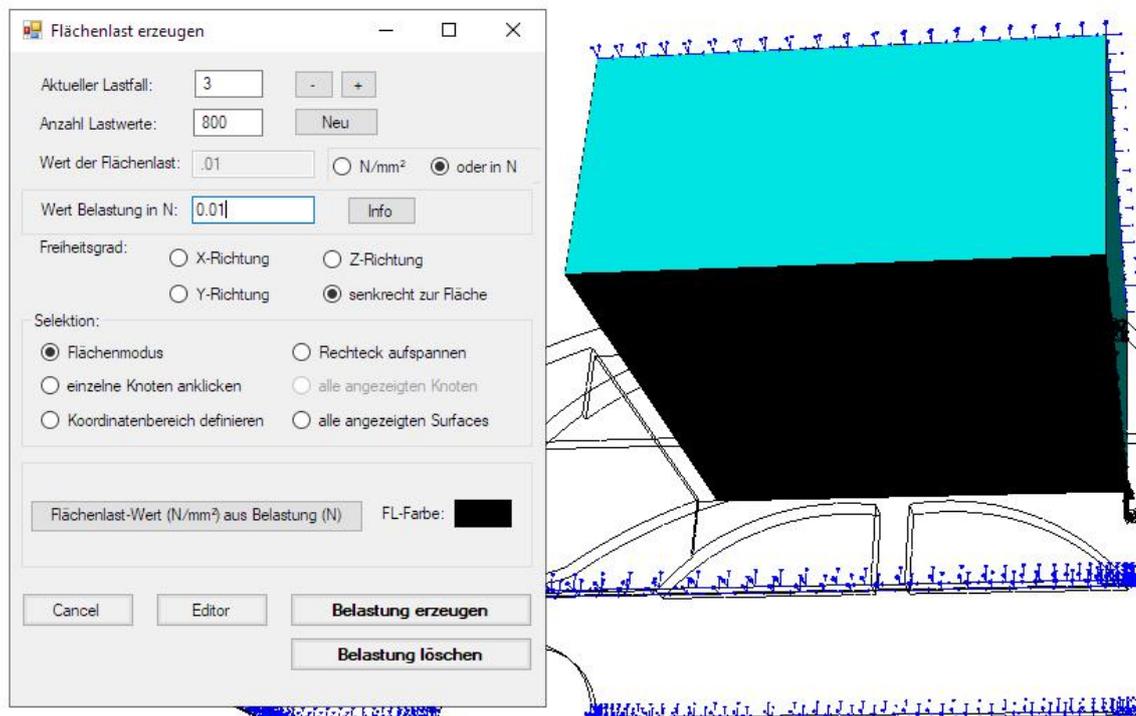


Zum Schluß wird eine Flächenlast mit Lastfall 2 und der Selektion „alle angezeigten Knoten“ ohne Lastwert erzeugt.



Lastfall 3 mit Slave-Kontaktfläche erzeugen

Erzeugen Sie die Slave-Kontaktfläche indem Sie Elementgruppe 2 wieder einblenden und Elementgruppe 1 ausblenden und eine Flächenlast mit Lastfall 3 und Selektion „Flächenmodus“ an der unteren Fläche des Felsens erzeugen.

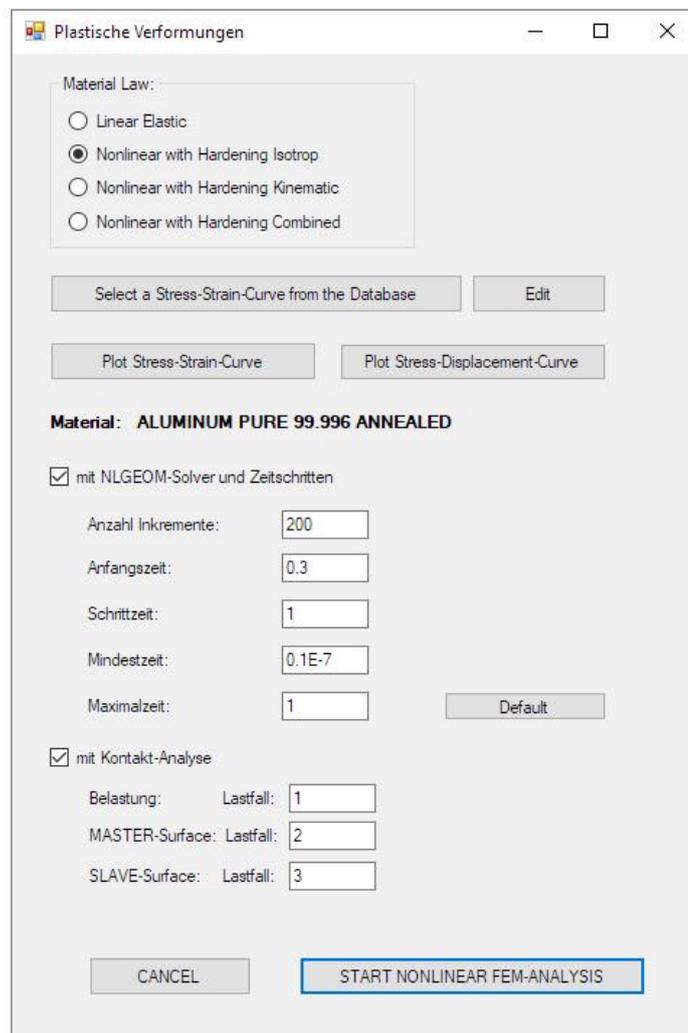


Nichtlineare Kontakt-Analyse

Die FEM-Baugruppe aus Auto-Karosserie und Felsen kann nun mit einer nichtlinearen Kontakt-Analyse berechnet werden. Wählen Sie Register „FEM-Analyse“ sowie Menü „Material-Nichtlinear“ aus und definieren



- mit Menü „Select a Stress-Curve from the Database“ die Spannungs-Dehnungskurve „ALUMINIUM PURE 99 996 ANNEALED“ auswählen.
- mit der Option „mit NLGEOM-Solver und Zeitschritten“ den Solver für große Verformungen einstellen und die Anzahl Inkremente, Anfangs-, Schritt-, Mindest- und Maximalzeit aus der Vorgabeneinstellung übernehmen.
- mit der Option „mit Kontakt-Analyse“ die Kontakt-Analyse einschalten.



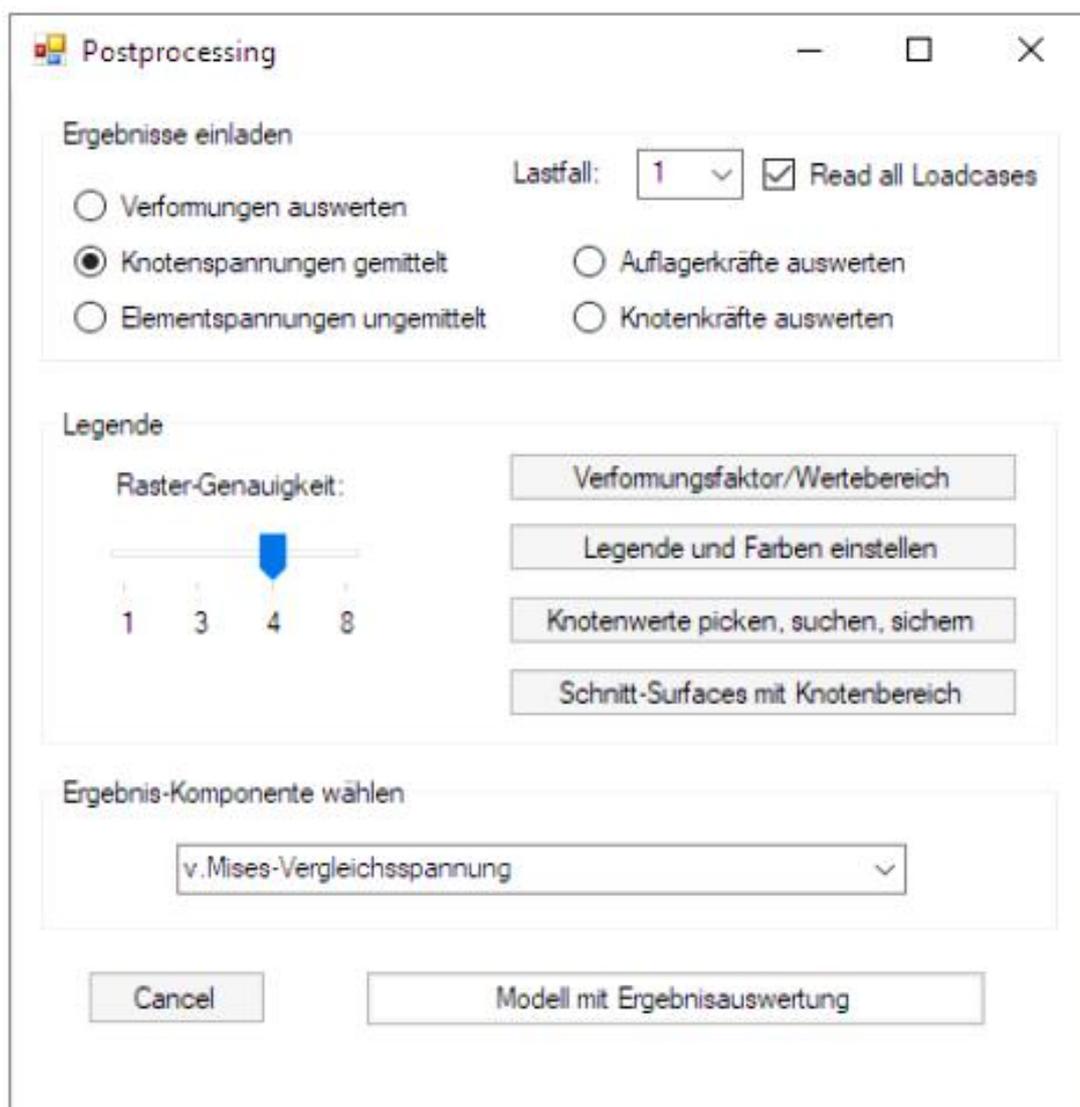
Ergebnisauswertung



Wählen Sie Register „Ergebnisauswertung“ und klicken auf das Icon um die Ergebnisse auszuwerten. Aktivieren Sie „Read all Loadcases“ um zuerst die Anzahl der Lastfälle aus der FRD-Datei zu bestimmen da der FEM-Solver oft gegen Ende mit der Fehlermeldung „too many cutbacks“ nur langsam konvergiert und die Berechnung abbricht.



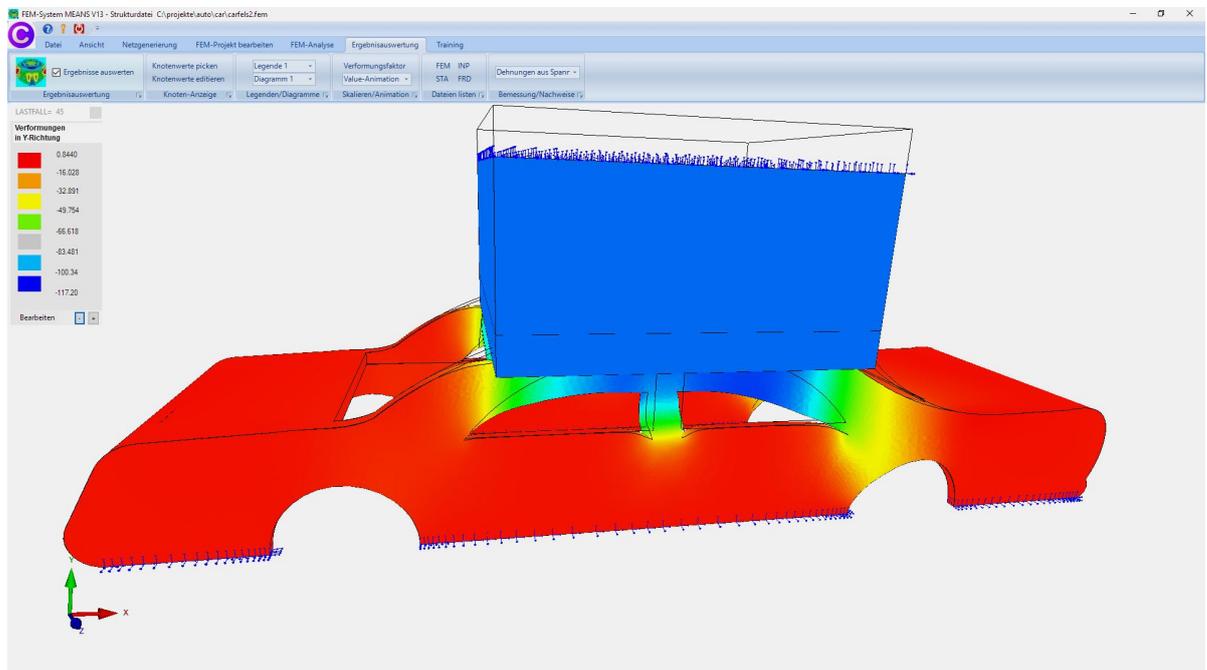
Wählen Sie Menü „Modell mit Ergebnisauswertung“ mit dem gewünschten Lastfall um die Spannungs- oder Verformungsverteilung darzustellen.



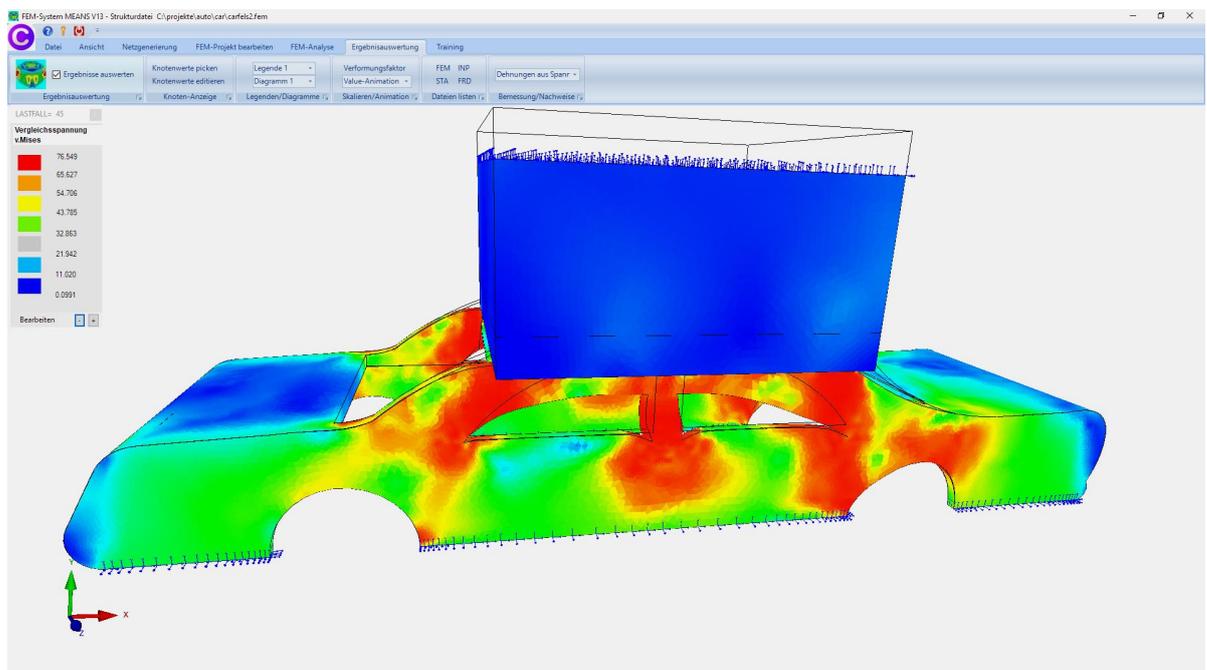
Spannungs- und Verformungsverteilung

Für den letzten Lastfall 45 ergeben sich folgende plastische Verformungen und gemittelte Knotenspannungen mit einer Spannungs-Dehnungs-Kurve für Aluminium:

Max. plastische Verformungen in Y-Richtung = -117.20 mm



Gemittelte v.Mises-Knotenspannungen = 76 MPa



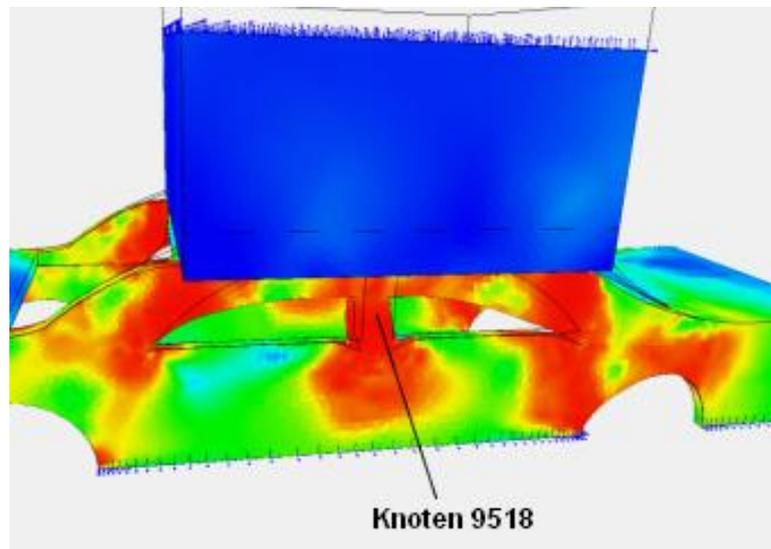
Summe der Aufprallkraft = 3 800 795 N = 3 800 kN = 380 Tonnen

Wählen Sie Register „Ergebnisauswertung“ und „Knotenwerte picken“ sowie „Summe der Auflagerkräfte“ um die Summe der Aufprallkraft anzuzeigen.

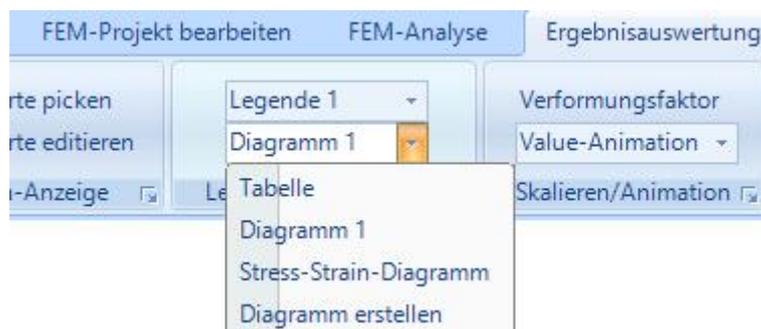


Last-Verformungs-Diagramm

Ergänzend kann aus dem Last-Verformungs-Diagramm die Aufprallkraft an der A-Säule am Knotenpunkt 9518 bestimmt werden.



Wählen Sie Register „Ergebnisauswertung“ und Menü „Stress-Strain-Diagramm“ um eine 11 spaltige Dialogbox aufzurufen.



Geben Sie den Knoten 9518 ein und wählen „Starten“ um für jeden Lastfall die Verformungen, Spannungen und Kräfte an diesem Knoten aufzulisten.

Anzahl Lastfälle = Knoten für Verformungen =

Ausgangslänge L0 = Knoten für Spannungen =

Nach einigen Minuten wählen Sie „Diagramm darstellen und auswählen mit“ sowie „Load-Displacement“ um das Last-Verformungs-Diagramm anzuzeigen.

Erstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms

Anzahl Lastfälle = Knoten für Verformungen = Absolute Werte FEM-File: C:\projekte\auto\car\carfels2.fem

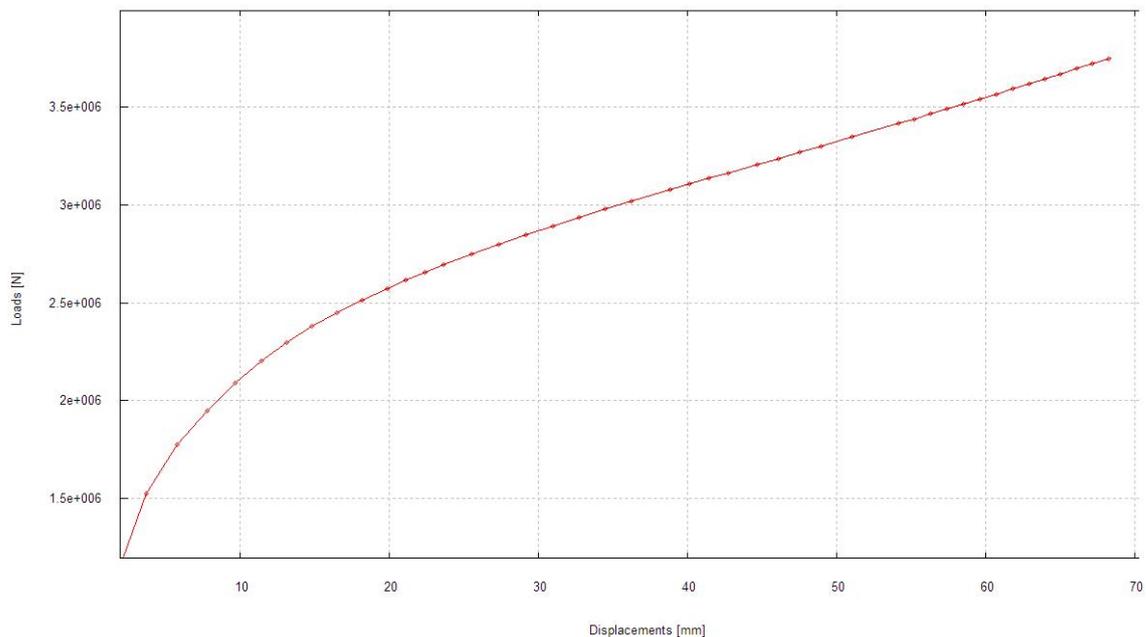
Ausgangslänge L0 = Knoten für Spannungen = Result-File: C:\projekte\auto\car\carfels2.FRD

LF	Knoten	X-Verformung	Y-Verformung	Z-Verformung	Dehnung=Verf./L0	Knoten	Spannung	Last FX	Last FY	Last FZ
24	9518	-7.14169	-41.443	-7.14169	0.9024081	9518	76.429	0.00	3134644	0.00
25	9518	-7.30260	-42.729	-7.30260	0.949726	9518	76.428	0.00	3162921	0.00
26	9518	-7.73831	-44.656	-7.73831	1.01657	9518	76.427	0.00	3205675	0.00
27	9518	-8.00758	-46.086	-8.00758	1.07428	9518	76.426	0.00	3236524	0.00
28	9518	-8.27735	-47.511	-8.27735	1.132298	9518	76.425	0.00	3267016	0.00
29	9518	-8.54553	-48.933	-8.54553	1.187618	9518	76.425	0.00	3298167	0.00
30	9518	-8.94877	-51.051	-8.94877	1.275942	9518	76.423	0.00	3344710	0.00
31	9518	-9.54167	-54.162	-9.54167	1.41665	9518	76.424	0.00	3414466	0.00
32	9518	-9.73382	-55.205	-9.73382	1.48061	9518	76.430	0.00	3437198	0.00
33	9518	-9.93932	-56.313	-9.93932	1.53972	9518	76.426	0.00	3462971	0.00
34	9518	-10.142	-57.423	-10.142	1.597876	9518	76.424	0.00	3489293	0.00
35	9518	-10.345	-58.529	-10.345	1.658342	9518	76.423	0.00	3515214	0.00
36	9518	-10.548	-59.625	-10.548	1.7245	9518	76.422	0.00	3540147	0.00
37	9518	-10.746	-60.718	-10.746	1.79029	9518	76.421	0.00	3565513	0.00
38	9518	-10.944	-61.802	-10.944	1.857784	9518	76.421	0.00	3591001	0.00
39	9518	-11.141	-62.881	-11.141	1.928915	9518	76.419	0.00	3616080	0.00
40	9518	-11.338	-63.954	-11.338	2.00384	9518	76.417	0.00	3641102	0.00
41	9518	-11.530	-65.017	-11.530	2.08088	9518	76.416	0.00	3666576	0.00
42	9518	-11.715	-66.082	-11.715	2.15886	9518	76.414	0.00	3693345	0.00
43	9518	-11.903	-67.150	-11.903	2.24002	9518	76.409	0.00	3719374	0.00
44	9518	-12.094	-68.213	-12.094	2.32438	9518	76.406	0.00	3744711	0.00
45	9518	-12.286	-69.297	-12.286	2.39638	9518	76.400	0.00	3800795	0.00

Fertig, die Diagramme können nun dargestellt werden!

Last-Verformungs-Diagramm

Bei einer plastischen Verformung von -70 mm ergibt sich am Knoten 9815 eine Aufprallkraft von ca. 350 Tonnen. Dies ist eine plausible Kraft wenn man sie mit der Presskraft einer Autopresse vergleicht die über 500 Tonnen groß sind.



Spannungs-Verformungs-Diagramm

Bis zur Aluminium-Streckgrenze von 75 MPa sind Spannungen und Verformungen elastisch. Danach beginnen die plastische Verformungen, d.h. die Verformungen werden größer aber die Spannungen verändern sich nur gering. Das Material fängt an zu Fließen und es kommt zu irreversiblen bleibenden Verformungen.

