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

Es sollen die Verformungen und Spannungen mit dem FEM-System MEANS V13 (<u>www.femcad.de</u>) 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-Richung 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 Aupfrallkraft, 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:

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:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{2 \cdot g}} = \frac{46 \text{ m/s} \cdot 46 \text{ m/s}}{2 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2} = 105 \text{ m}$$
$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot H}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 105 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2}} = 4.6 \text{ s}$$

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 <u>www.grabcad.com</u> 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 Nullpunktsverschiebung durch Knoten 3 mit Menü "Koordinaten-Faktor" im Knoten-Modus aus und speichern das FEM-Netz unter "Fels.FEM" ab.

		a contraction of the second			
			1223		×
		- Carlos			0.0
		Flächen	Knoten	Linien	
\sim		Anzahi B	Eckknoter	1 = 4053	3
				-	_
		Kante	n		~
	Kaardinatan Faktan	von:	1		
		bis:	204		1
a da ser a ser	Faktor setzen :				
		1	Knoten an	zeigen	
		Kno	tenbereic	h erzeug	gen
	() addieren () ersetzen	Knot	enbereich	n erzeuge	en
	Achsen vertauschen		Flächenk	noten	
	O X-Werte mit Y-Werte vertauschen	Flä	ichen-Ran	ndknoten	1
	X-Werte mit Z-Werte vertauschen	Knol	tenbereic	h lôsche	n
	O Y-Werte mit Z-Werte vertauschen	Kno	tenbereic	h lösche	n
	Koordinaten mit Faktor verändem	Knu	otenberei	ch änder	m
		K	pordinater	n-Faktor	
	🗹 X-Koordinaten 🗹 Y-Koordinaten 🗹 Z-Koordinaten	Knoten:	3	E	DIT
	🔲 nur die angezeigten Knoten im Knotenmodus verwenden	X.	0		
9.0 B	von Knotenpunkt:	Y:	0		f.
		Z.	0		=
	bis Knotenpunkt: 4053	_	1.5		
	Koordinaterifaktor:	Kno	iten nume	rieren	
—		Eler	nente nun	nerieren	
/	Nullounktsverschiebung durch Knotenpunkt:	Eler	mentgrupp	en nume	erieren
/			tweete ser	reigen	N
1	Koordinaten mit Faktor verändem		weite ditz	loigen	
Knoten 3 in den		Kn	oten-Size	editieren	:
Nullpunkt verschieben					-
	Verformunden mit Faktor addieren			_	

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

..... X ----EG= 2 Flächen Knoten Linien EG= 1 ON 🖸 Anzahl Eckknoten = 45123 EG= 2 ON 🗹 Elementgruppen ~ von: 2 ON N 2 bis: Knoten anzeiger 🗹 ON Knotenb Knotenbereich erzeuge EG=6 M ON Flächenknoten Flächen-Randknoten Für neue Farbe auf Farbrah oon kiir ch lõ Knot als Drahtgitter sichtbar Knotenbereich löschen bereich and Refresh Hidden-Line Koordinaten-Faktor Gruppen 1 - 7 EDIT Knoten: 1 Neue Elementgruppen erzeugen X: 593.724 19.7565 Y: Z: -372.311 - v

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:

	💀 Koordinaten-Faktor — 🗆 🗙
	Faktor setzen :
	multiplizieren O dividieren
	O addieren O ersetzen
	Achsen vertauschen
A NO STATE AND A REPORT OF A REPORT OF	O X-Werte mit Y-Werte vertauschen
	O X-Werte mit Z-Werte vertauschen
	O Y-Werte mit Z-Werte vertauschen
	Koordinaten mit Faktor verändem
	X-Koordinaten Y-Koordinaten Z-Koordinaten
	🗹 nur die angezeigten Knoten im Knotenmodus verwenden
	von Knotenpunkt: 1
	bis Knotenpunkt: 45123
	Koordinatenfaktor: -410
	Nullpunktsverschiebung durch Knotenpunkt: 1
	Koordinaten mit Faktor verändem

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

		Х	1000
en	ten		
	1		
		1	

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 Elementgruppen 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.

Knotenbereich erzeugen Bitte mit der Maus ein Rechteck aufspannen oder einzelner Knote Anzahl Knotenbereich = 768 N Knotenbereich aus Knotenbereich erzeugen He	- C X	Roordin von X: von Y:	420 -278.779	× bis X: 620 bis Y: 815
Selection Rechteck aufspannen Knoten picken Knoten Rächenmodell Knotenbereich sichem Knotenbereich einladen Knotenbereich einladen Cancel	oordinatenbereich rzeugen	von Z:	-500 Knotenbereic	bis Z: 500

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

Datei Ansicht Ne	tzgenerierung FEM	A-Projekt bearbeiten 1. Randbe	FEM-Analyse	Ergebnisauswertung	Training	/ 6. Bel
Belastungen 🗹 Belastungen dars	tellen Randbeding	ungen 🛄 Randbed	ingungen darstellen	Elementgruppen	Materialdaten	Editor
			Knoten-Modus	aktiviert		a
🚽 Flächenlast erzeugen	. – [X				1
Aktueller Lastfall: 2	• •					
Anzahl Lastwerte: 1272	Neu					//
Wert der Flächenlast: .01	O N/mm² €	oder in N)			
Wert Belastung in N: 1000	Info		-	3097 m	S.Suinines	
Freiheitsgrad: O X-Richtung	 Z-Richtung senkrecht zur 	- Täche				
Selektion:	0				l	
O Flächenmodus	O Rechteck aufspann	ien 🖊				拍車
🔿 einzelne Knoten anklicken	Ille angezeigten Kr	oten	a second			[]]## [[]
O Koordinatenbereich definieren	🔘 alle angezeigten Su	rfaces				the last
						- A
Flächenlast-Wert (N/mm ⁻) aus Bela	stung (N) FL-Farbe:	-				
		_				
Cancel Editor	Belastung erze	ugen				
	Delestres lis					1

Lastfall 3 mit Slave-Kontaktfläche erzeugen

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

🚪 Flächenlast erzeugen	– 🗆 ×	VNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNN
Aktueller Lastfall: 3	- +	
Anzahl Lastwerte: 800	Neu	
Wert der Flächenlast: .01	○ N/mm²	
Wert Belastung in N: 0.01	Info	
Freiheitsgrad: O X-Richtung	O Z-Richtung	
O Y-Richtung Selektion:	 senkrecht zur Fläche 	
Flächenmodus	Rechteck aufspannen	
🔘 einzelne Knoten anklicken	🔘 alle angezeigten Knoten	
O Koordinatenbereich definieren	O alle angezeigten Surfaces	
Flächenlast-Wert (N/mm²) aus Bel	astung (N) FL-Farbe:	AAR
	11. 	TTTT & A & A A A A A A A A A A A A A A A
Cancel Editor	Belastung erzeugen	
	Belastung löschen	

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 Zeitschritte" 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-Anayse einschalten.

Material Law.				
O Linear Elastic				
Nonlinear with Hardenin	g Isotrop			
O Nonlinear with Hardenin	g Kinematic			
O Nonlinear with Hardenin	g Combined			
Select a Stress-Strain-Cu	urve from the Databa	se	Edit	
Plot Stress-Strain-Curve	Plot S	Stress-Displa	cement-Curv	e
Anzahl Inkremente:	200			
Anzahl Inkremente: Anfangszeit: Schrittzeit:	200 0.3 1			
Anzahl Inkremente: Anfangszeit: Schrittzeit: Mindestzeit:	200 0.3 1 0.1E-7			
Anzahl Inkremente: Anfangszeit: Schrittzeit: Mindestzeit: Maximalzeit:	200 0.3 1 0.1E-7 1		Default	
Anzahl Inkremente: Anfangszeit: Schrittzeit: Mindestzeit: Maximalzeit: ☑ mit Kontakt-Analyse	200 0.3 1 0.1E-7 1		Default	
Anzahl Inkremente: Anfangszeit: Schrittzeit: Mindestzeit: Maximalzeit: ☑ mit Kontakt-Analyse Belastung: Lastfa	200 0.3 1 0.1E-7 1 1		Default	
Anzahl Inkremente: Anfangszeit: Schrittzeit: Mindestzeit: Maximalzeit: ☑ mit Kontakt-Analyse Belastung: Lastfa MASTER-Surface: Lastfa	200 0.3 1 0.1E-7 1 1 all: 1 2		Default	
Anzahl Inkremente: Anfangszeit: Schrittzeit: Mindestzeit: Maximalzeit: Imit Kontakt-Analyse Belastung: Lastfa MASTER-Surface: Lastfa	200 0.3 1 0.1E-7 1 1 all: 1 all: 2 all: 3		Default	

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.

MEANS V13	×
Number of Loadcases = 45 FRD-File has Lines = 10722690	
ОК	

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

Ergebnisse einladen	
O Verformungen auswerten	Lastian. I v M Head an LoadCase
Knotenspannungen gemittelt	Auflagerkräfte auswerten
O Elementspannungen ungemittelt	O Knotenkräfte auswerten
Legende	
Raster-Genauigkeit:	Verformungsfaktor/Wertebereich
	Legende und Farben einstellen
1 3 4 8	Knotenwerte picken, suchen, sichem
	Schnitt-Surfaces mit Knotenbereich
Ergebnis-Komponente wählen	
v.Mises-Vergleichsspannung	g ~
Canad	Modell mit Emeknissuewertung

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.

MEANS V13	×
Summe Y-Kräfte = -2.39 N / Summe Y-Auflagerkräfte = 3800795 N	
ОК	

Last-Verformungs-Diagramm

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



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 =	45	Knoten für Verformungen =	9518	\sim	in Y	\sim
Ausgangslänge L0 =	50	Knoten für Spannungen =	9518	~	v.Mises	~

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

			Hesuit-Hile: C:\projekte\aut	vcarvcartels2.FHD	
LF Knoten 4 \$9518 5 9518 5 9518 6 9518 6 9518 6 9518 9	X-Verformung Y-Verformung 7.14150 41.443 7.73250 42.729 7.73251 44.656 8.00758 46.006 8.277355 47.511 8.954553 49.933 -8.54553 49.933 -9.54157 -51.051 -9.73382 -55.205 -9.33932 -55.313 -10.142 -57.423 -10.548 -59.625 -10.746 -60.718 -10.344 -61.802 -11.141 -62.081 -11.133 -53.954 -11.150 -65.017 -11.150 -65.017 -11.195 -65.029 -12.994 -92.924	Z-Verformung Dehnung-Verf./L -7.14169 -7.38260 -7.3831 -7.3831 -7.73831 -7.73831 -7.73831 -7.73831 -7.73831 -7.73831 -7.73831 -7.73831 -7.73832 -101457 -8.54565 -9.73382 -9.54167 -1141655 -9.39392 -16.345 -16.548 -10.558 -10.5588 -10.5588 -10.5588 -10.5588 -10.5588 -10.5588 -10.5588 -10.	Knoten Spannung 9518 76.429 9518 76.429 9518 76.429 9518 76.425 9518 76.425 9518 76.425 9518 76.425 9518 76.425 9518 76.426 9518 76.427 9518 76.428 9518 76.426 9518 76.426 9518 76.427 9518 76.428 9518 76.429 9518 76.421 9518 76.421 9518 76.421 9518 76.421 9518 76.419 9518 76.419 9518 76.409 9518 76.409 9518 76.400	Last FX Last FY 0.00 3134644 1 0.00 3136524 1 0.00 3205675 1 0.00 3265716 1 0.00 3245716 1 0.00 3244710 1 0.00 3447198 1 0.00 3447198 1 0.00 3452931 1 0.00 3452931 1 0.00 3455214 1 0.00 355101 1 0.00 3641102 1 0.00 3643102 1 0.00 3643102 1 0.00 3643102 1 0.00 363345 1 0.00 363345 1 0.00 374731 1 0.00 36304576 1 0.00 3630795 1	Last FZ 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.

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. Dannach 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.

