



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Finn-Luca Gubatz

Vergleich unterschiedlicher, in LS-DYNA gängiger Erosionsverfahren anhand eines Simulationsmodells eines einfachen Prägevorgangs

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Finn-Luca Gubatz

**Vergleich unterschiedlicher, in LS-DYNA
gängiger Erosionsverfahren anhand
eines Simulationsmodells eines
einfachen Prägevorgangs**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau – Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
KONSCHA SIMULATION GmbH
Lerchenstraße 28a
22767 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Georgi Kolarov
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Alexander Haas

Abgabedatum: 21.10.2022

Zusammenfassung

Finn-Luca Gubatz

Thema der Bachelorthesis

Vergleich unterschiedlicher, in LS-DYNA gängiger Erosionsverfahren anhand eines Simulationsmodells eines einfachen Prägevorgangs

Stichworte

Erosion, LS-DYNA, Untersuchung, Prägevorgang, numerische Berechnung

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Erosionskriterien aus LS-DYNA anhand eines Simulationsmodells eines einfachen Prägevorgangs untersucht. Das Ziel der Untersuchung ist das bessere Verständnis der Erosionskriterien, sodass das Materialverhalten des durch einen Keil verformten Blockes realistisch simuliert werden kann. Dazu werden zu jedem untersuchten Erosionskriterium die Vor- und Nachteile sowie der Anwendungsbereich angegeben. Das reale Materialversagen wird auf Grundlage der Theorie angenommen. Das Ergebnis der Berechnung bildet, durch die Kombination der Erosionskriterien SIGP1 und MNPRES, das angenommene Materialversagen ab.

Finn-Luca Gubatz

Title of the paper

Comparison of different, in LS-DYNA currently used erosion methods with the help of a simulation model of a simple stamping procedure

Keywords

Erosion, LS-DYNA, analysis, stamping procedure, numerical calculation

Abstract

Inside this report the erosion criteria from LS-DYNA are analysed with the help of a simulation model of a simple stamping procedure. The improved understanding of the erosion criteria is one goal of this analysis. The opportunity to simulate a realistic material behaviour of the deformed part is the other goal. In addition to that the pros and cons and the area of application of the erosion criteria are stated. The assumed material behaviour is based on the theory. The solution of the numerical calculation with the combination of the erosion criteria SIGP1 and MNPRES fulfils the assumed material behaviour.

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Serhiy Kuzmin von der Firma KONSCHA Simulation GmbH für seine Hilfe und Unterstützung beim Umgang mit der Software LS-DYNA bedanken. Ebenso möchte ich mich herzlich bei Herrn Alexander Haas und Frau Anneke Morgenthal von der Firma KONSCHA Simulation GmbH für deren Hilfe und Unterstützung bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit bedanken.

Für die Beantwortung von weiteren Fragen bezüglich der Nutzung von LS-DYNA möchte ich mich herzlich bei dem Support von CADFEM in Person von Herrn Andre Stühmeyer bedanken.

Zudem danke ich Herrn Stefan Gubatz, der diese Arbeit Korrektur gelesen hat.

Ein weiterer, großer Dank gilt meinen Eltern, die mir die Chance ermöglicht haben, dieses Studium in Vollzeit ausüben und erfolgreich abschließen zu können.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Freundin für Ihre Unterstützung bedanken.

Aufgabenstellung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist der Vergleich der aktuell gängigen Erosionsverfahren mittels eines Simulationsmodells in LS-DYNA. Dabei sollen die aktuell in LS-DYNA gängigen Erosionsverfahren mit Hilfe eines Simulationsmodells eines einfachen Prägevorgangs, bei dem durch einen Meißel eine Kerbe in die Werkstoffgeometrie gedrückt wird, untersucht und die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen, in LS-DYNA gängigen Erosionsverfahren herausgestellt werden. Ergänzend dazu soll eine Netzstudie dieses Simulationsmodells durchgeführt werden. Wenn möglich, sollen für die unterschiedlichen, in LS-DYNA gängigen Erosionsverfahren Anwendungsbereiche definiert bzw. angegeben werden. Wenn es zeitlich realisierbar ist, soll durch eine kurze Literaturrecherche nach weiteren, noch nicht in LS-DYNA integrierten Erosionsverfahren gesucht werden, welche, sofern es welche gibt, in Bezug zu den bereits vorhandenen Erosionsverfahren gesetzt werden sollen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Danksagung	IV
Aufgabenstellung.....	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis	X
Symbolverzeichnis.....	XII
1. Einführung in das Thema der Bachelorarbeit.....	1
1.1 Motivation der Bachelorarbeit	1
1.2 Grundlegende Kenntnisse der Werkstoffkunde.....	2
1.2.1 Grundlagen der Werkstoffkunde	2
1.2.2 Plastizitätstheorie	3
1.2.3 Werkstoffversagen.....	4
1.3 Grundlegende Kenntnisse zur Bruchmechanik	5
1.3.1 Bruchmodi	5
1.3.2 Linear-elastische Bruchmechanik	5
1.3.3 Fließbruchmechanik	6
1.4 Ergänzende Kenntnisse zur Kontinuumsmechanik	7
1.4.1 Fließbedingungen auf Grundlage der Kontinuumsmechanik.....	7
1.4.2 Grundlage der Kontinuumsmechanik mit Bezug zu den Erosionskriterien	8
1.5 Grundlegende Kenntnisse der numerischen Mathematik.....	10
1.5.1 Grundlagen FEM	10
1.5.2 Explizite zeitabhängige Integration	12
1.5.3 Implizite zeitabhängige Integration.....	13
1.5.4 Kurzer Vergleich der zeitabhängigen Integrationsverfahren.....	13
1.5.5 Zeitschrittsteuerung	14
1.5.6 Courant-Bedingung der expliziten Integrationsmethode.....	14
1.5.7 Methoden zur Reduzierung der Rechenzeit beim expliziten Integrationsverfahren	15
1.6 In LS-DYNA integrierte Verfahren zur Darstellung von Materialversagen	16
1.6.1 Versagensmodelle	16
1.6.2 Schadensmodelle	16
1.6.3 Überblick über die Verfahren zur Darstellung von Materialversagen.....	17
2. Aufbau des Simulationsmodells in LS-DYNA ohne Erosion	18
2.1 Erstellung der Geometrie und Import nach LS-PrePost	18
2.1.1 Erstellung der Geometrie und des Netzes in ANSYS.....	19
2.1.2 Geometrieimport in LS-PrePost	19
2.2 Section ID Einstellungen und Hourglass-Problem.....	20
2.2.1 Auswahl der Elementformulierung	20
2.2.2 Hourglass-Problem und Hourglass-Steuerung.....	22
2.3 Implementierung des realen Materialverhaltens in LS-DYNA.....	24
2.3.1 Materialverhalten des Keils.....	24
2.3.2 Materialverhalten des Blockes	24
2.4 Erstellung der Randbedingungen	27
2.4.1 Lagerung des Blockes	27
2.4.2 Lagerung und Bewegung des Keils	28
2.5 Kontaktdefinitionen	29

2.5.1 Segmenterstellung und Kontaktauswahl	29
2.5.2 Verwendung der Kontaktparameter	29
2.6 Abschließende Einstellungen.....	31
2.7 Fehler und deren Folgen	33
3. Erweiterung des Simulationsmodells mit Erosion und Untersuchung der Erosionskriterien.....	34
3.1 Verfügbare Ressourcen für die Berechnungen	34
3.2 Ergänzung der Erosion in das bekannte Simulationsmodell.....	34
3.3 Auswahl der zu untersuchenden Erosionskriterien	36
3.4 Untersuchung der ausgewählten Erosionskriterien	38
3.4.1 Vernetzung des Blockes	38
3.4.2 Untersuchung von MXPRES.....	39
3.4.3 Untersuchung von MNEPS	39
3.4.4 Untersuchung von EFFEPS.....	39
3.4.5 Untersuchung von VOLEPS	40
3.4.6 Untersuchung von NUMFIP	40
3.4.7 Untersuchung von MNPRES	40
3.4.8 Untersuchung von SIGP1	41
3.4.9 Untersuchung von SIGVM	41
3.4.10 Untersuchung von MXEPS	41
3.4.11 Untersuchung von EPSSH.....	42
3.5 Untersuchung von mehreren Erosionskriterien gleichzeitig.....	43
3.5.1 Untersuchung von FAILTM und MNPRES	43
3.5.2 Untersuchung von SIGVM und MNPRES	44
3.5.3 Untersuchung von SIGP1 und MNPRES	45
3.6 Vorbereitung der Netzstudie	46
4. Analyse und Interpretation der Ergebnisse des Simulationsmodells mit Erosion	47
4.1 Analyse und Interpretation der ausgewählten Erosionskriterien	48
4.1.1 Analyse und Interpretation von MXPRES	49
4.1.2 Analyse und Interpretation von MNEPS.....	50
4.1.3 Analyse und Interpretation von EFFEPS.....	52
4.1.4 Analyse und Interpretation von VOLEPS	53
4.1.5 Analyse und Interpretation von NUMFIP	55
4.1.6 Analyse und Interpretation von MNPRES	56
4.1.7 Analyse und Interpretation von SIGP1	57
4.1.8 Analyse und Interpretation von SIGVM	59
4.1.9 Analyse und Interpretation von MXEPS	60
4.1.10 Analyse und Interpretation von EPSSH	62
4.2 Analyse und Interpretation der Modelle mit mehreren Erosionskriterien.....	64
4.2.1 Analyse und Interpretation von FAILTM und MNPRES	64
4.2.2 Analyse und Interpretation von SIGVM und MNPRES	65
4.2.3 Analyse und Interpretation von SIGP1 und MNPRES	66
4.3 Analyse und Interpretation der Netzstudie	67
4.4 Literaturrecherche	71
5. Zusammenfassung der Bachelorarbeit und Ausblick	72
5.1 Zusammenfassung der Bachelorarbeit	72
5.2 Ausblick.....	73
Literaturverzeichnis	74
Anhang A	A-1
Zu 3.5.1 FAILTM und MNPRES	A-1

Zu 3.5.2 SIGVM und MNPRES	A-2
Zu 3.5.3 SIGP1 und MNPRES	A-4
Zu 3.6 Netzstudie	A-5

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bruchmodus 1 (Links), 2 (Mitte) und 3 (Rechts) von S.131 aus [17]	5
Abbildung 2: Netz mit 9 Knoten zur Darstellung einer Platte [15].....	10
Abbildung 3: Durch Kraft verformtes Netz	10
Abbildung 4: Kennzeichnung eines Elementes (in grün) innerhalb des Netzes.....	11
Abbildung 5: Vollintegriertes und reduziert integriertes Hexaeder-Element	11
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Schritte eines Berechnungsdurchlaufes der expliziten Zeitintegration	12
Abbildung 7: Bild der verwendeten Vernetzung mit Koordinatensystem aus LS-PrePost	18
Abbildung 8: Balkendiagramm mit den Rechenzeiten für ELFORM 1 mit Hourglass-Steuerung 6 und ELFORM 2.....	21
Abbildung 9: Nichtphysikalische Verformungen der Elemente aufgrund des Hourglass-Problems	22
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Verformung beim Hourglass-Problem	22
Abbildung 11: Innere Energien des Modelles und Hourglass-Energien in Abhängigkeit der Simulationszeit	23
Abbildung 12: Varianten des plastischen Materialverhaltens in MAT 024	25
Abbildung 13: Knoten-Set (in Gelb) des Blockes, das in z-Richtung gelagert wird.....	27
Abbildung 14: Beispielhaftes Verschiebungsdiagramm des Keils	28
Abbildung 15: Kurven der Kontaktkräfte abhängig vom Reibungskoeffizienten	30
Abbildung 16: Kontaktkraftverlauf mit und ohne viskose Dämpfung	30
Abbildung 17: Kurze Bilderstrecke des berechneten Simulationsmodelles	32
Abbildung 18: Einstellmöglichkeiten von MAT_ADD_EROSION in LS-PrePost.....	35
Abbildung 19: Alle in LS-DYNA vorhandenen Erosionskriterien	36
Abbildung 20: Links das grob vernetzte Modell (1584 Knoten) und rechts das feiner vernetzte Modell (7096 Knoten)	38
Abbildung 21: Sehr fein vernetztes Modell (15815 Knoten)	46
Abbildung 22: Der verformte Block (ohne Erosion) von Vorne, von der Seite (schräg) und von Oben	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorteile der jeweiligen zeitabhängigen Integrationsverfahren.....	13
Tabelle 2: Überblick über die Versagens- und Schadensmodelle	17
Tabelle 3: Vergleich der Kontaktkräfte und der inneren Energie des Blockes sowie Angabe der prozentualen Abweichung	21
Tabelle 4: Verwendetes Einheitensystem in LS-PrePost	24
Tabelle 5: Materialkennwerte des allgemeinen Stahls	24
Tabelle 6: Materialkennwerte von EN AW - Al Mg3 von S.175 aus [7].....	25
Tabelle 7: Ausstattung der verwendeten Computer	34
Tabelle 8: Die verwendeten Werte von FAILTM und MNPRES pro Simulationsmodell....	43
Tabelle 9: Die verwendeten Werte von SIGVM und MNPRES pro Simulationsmodell.....	44
Tabelle 10: Die verwendeten Werte von SIGP1 und MNPRES pro Simulationsmodell....	45
Tabelle 11: Die verwendeten Werte von SIGP1 und MNPRES bei sehr feiner Vernetzung	46
Tabelle 12: Ergebnisse von MXPRES	49
Tabelle 13: Vor- und Nachteile von MXPRES.....	50
Tabelle 14: Ergebnisse von MNEPS	50
Tabelle 15: Vor- und Nachteile von MNEPS	51
Tabelle 16: Ergebnisse von EFFEPS	52
Tabelle 17: Vor- und Nachteile von EFFEPS.....	53
Tabelle 18: Ergebnisse von VOLEPS	53
Tabelle 19: Vor- und Nachteile von VOLEPS	54
Tabelle 20: Ergebnisse von NUMFIP	55
Tabelle 21: Vor- und Nachteile von NUMFIP	55
Tabelle 22: Ergebnisse von MNPRES	56
Tabelle 23: Vor- und Nachteile von MNPRES	57
Tabelle 24: Ergebnisse von SIGP1.....	57
Tabelle 25: Vor- und Nachteile von SIGP1	58
Tabelle 26: Ergebnisse von SIGVM.....	59
Tabelle 27: Vor- und Nachteile von SIGVM	60

Tabelle 28: Ergebnisse von MXEPS.....	60
Tabelle 29: Vor- und Nachteile von MXEPS	61
Tabelle 30: Ergebnisse von EPSSH	62
Tabelle 31: Vor- und Nachteile von EPSSH	63
Tabelle 32: Ergebnisse von FAILTM und MNPRES.....	64
Tabelle 33: Vor- und Nachteile von FAILTM und MNPRES	64
Tabelle 34: Ergebnisse von SIGVM und MNPRES.....	65
Tabelle 35: Vor- und Nachteile von SIGVM und MNPRES	65
Tabelle 36: Ergebnisse von SIGP1 und MNPRES.....	66
Tabelle 37: Vor- und Nachteile von SIGP1 und MNPRES	66
Tabelle 38: Netzstudie des seitlichen Risses.....	67
Tabelle 39: Netzstudie der Risse um die Keilkanten.....	68

Symbolverzeichnis

Griechische Buchstaben:

α	Courant-Zahl
ε_{ij}^{dev}	deviatorischer Dehnungstensor
ε_{eff}	effektive Dehnung
$\dot{\varepsilon}_V^{(pl)}$	plastischen Vergleichsdehnrate
$\varepsilon_V^{(pl)}$	plastische Vergleichsdehnung
μ	Reibungskoeffizient
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
σ_F	Fließspannung
σ_h	hydrostatische Spannung
σ_m	mittlere Normalspannung
$\sigma_{Vergleich}$	Vergleichsspannung
σ_{11}	größte Hauptspannung
σ_{22}	mittlere Hauptspannung
σ_{33}	kleinste Hauptspannung
σ_{23}	Schubspannung in 2-3
σ_{13}	Schubspannung in 1-3
σ_{12}	Schubspannung in 1-2
τ_{max}	maximale Schubspannung
τ_F	Fließschubspannung

Lateinische Buchstaben

a^n	Knotenbeschleunigung
A	Bruchdehnung
$A_{e_{max}}$	größte Seitenfläche des Elementes
c	Schallgeschwindigkeit des Elementes
DC	Faktor der relativen Geschwindigkeit
E	E-Modul
ET	Tangentenmodul
F^n	Elementspannungen pro Knoten

F_D	dynamischer Reibungsparameter
F_S	statischer Reibungsparameter
H	Verfestigungskoeffizient
H^n	Faktor der Hourglass-Steuerung
k_F	kritischer Wert, ab dem das Material zu fließen beginnt
L	Länge des Stab-Elementes
L_e	charakteristische Länge des Elementes
M	diagonale Massenmatrix
n	Zeitpunkt
p	Druck
p^n	Beitrag der externen Quellen pro Knoten
Q	Volumenviskosität
$R_{p0,2}$	Dehngrenze
R_m	Zugfestigkeit
\mathbf{S}	Spannungsdeviator
\mathbf{T}	Spannungstensor
Δt^n	Zeitschritt
Δt_e	kritischer Zeitschritt
u^{n+1}	Knotenverschiebung
$v^{n+\frac{1}{2}}$	Knotengeschwindigkeit
v_{rel}	relative Geschwindigkeit
v_e	Elementvolumen

1. Einführung in das Thema der Bachelorarbeit

In diesem Kapitel wird dargelegt, woher die grundlegende Idee dieser Bachelorarbeit stammt und welche Grundkenntnisse für einen leichteren Einstieg in die Thematik und zum besseren Verständnis der Software und der Problematik notwendig sind. Ebenfalls wird auf die bei dieser Problemstellung passenden, aktuellen Möglichkeiten von LS-DYNA, der verwendeten Software, eingegangen.

1.1 Motivation der Bachelorarbeit

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Untersuchung und der Vergleich der aktuell in LS-DYNA gängigen Erosionsverfahren, damit die jeweiligen Vor- und Nachteile herausgestellt werden können.

Die Idee zu dieser Bachelorarbeit ist auf ein Kundenprojekt der Firma KONSCHA Simulation GmbH zurückzuführen. In diesem Projekt wurden zwei Aluminium-Profile, die ineinandergesteckt werden, mit Hilfe eines Stempels lokal plastisch verformt, sodass die beiden Profile kraftschlüssig verbunden sind.

Die Herausforderung für den Kunden und der Grund für die Simulation war die limitierte Stempelkraft und die ungünstige Verformungsgeometrie. Mittels einer Simulation sollte die Stempelgeometrie optimiert werden.

Um das Materialverhalten realistisch nachbilden zu können, wurde die Software LS-DYNA verwendet, da dort mehrere Funktionen zur Versagens- und Schadensmodellierung zur Verfügung stehen. Es wurde die Funktion Erosion zur Modellierung des Materialversagens ausgewählt, da bei dieser Funktion weniger Parameter als bei anderen Schadensmodellierungen aus Versuchen ermittelt werden müssen. Das Versagensmodell kann somit schneller kalibriert werden und ist folglich schneller einsatzbereit.

Beim Einsatz der Erosionsmodelle fehlte der Effekt, dass das Material unter Druckbelastung nicht reißt (oder numerisch erodiert), sondern fließt. Als Fragestellung hat sich daher ergeben, ob in LS-Dyna Erosionsmodelle vorhanden sind, die das reale Verhalten des Materials besser beschreiben. Ein weiteres Problem ist die sehr lange Rechenzeit bei dieser Berechnung. Deshalb soll durch eine genauere Untersuchung der Erosionsverfahren ein besseres Verständnis für die Funktion Erosion entstehen, sodass das Materialverhalten realistischer beschrieben und ggf. die Rechenzeit optimiert werden kann.

1.2 Grundlegende Kenntnisse der Werkstoffkunde

In Kapitel 1.2 werden die benötigten Grundlagen der Werkstoffkunde und darüber hinaus wichtige Kenntnisse kurz zusammengefasst, sodass die daraus resultierende Mathematik, Numerik und das zu erwartende Werkstoffverhalten besser nachvollzogen werden kann.

1.2.1 Grundlagen der Werkstoffkunde

Der in dem Simulationsmodell verwendete Keil besteht aus Stahl und der zu verformende Block besteht aus Aluminium. Da der Fokus auf der Verformung des Aluminium-Blockes liegen soll, wird der Stahl-Keil vereinfachend als starr angenommen. Die entsprechenden Kennwerte der Materialien werden in Kapitel 2 genannt.

Mikroskopischer Aufbau von Metallen:

Aluminium-Atome gehen, wie alle Metalle, eine metallische Bindung ein und die Elektronen auf der äußersten Schale (die Valenzelektronen) bilden ein gemeinsames Elektronengas. Um eine besonders günstige Ausbreitung der Elektronen zu ermöglichen, bilden die Atomkerne dreidimensionale Kristallstrukturen bzw. Gitterstrukturen. Beim Abkühlen der Metallschmelze bilden sich abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit mehrere Kristallisationskeime, sodass mehrere Bereiche mit der jeweiligen Gitterstruktur entstehen, die sogenannten Körner. Die Korngröße liegt im μm -Bereich. Da jeder Korn in sich eine Richtungsabhängigkeit besitzt, entsteht durch die vielen, willkürlich angeordneten Körner makroskopisch ein isotropes Material. Isotrop bedeutet, dass alle Materialeigenschaften richtungsunabhängig sind. Das Materialverhalten des Aluminium-Blockes in dem Simulationsmodell wird ebenfalls als isotrop angenommen.

Gitterfehler und elastische und plastische Verformungen:

Ein Material, das nur aus einem Korn besteht und keinerlei Gitterfehler besitzt, kann bei entsprechender Belastung erst elastisch und dann idealplastisch verformt werden. Plastische Verformung bedeutet, dass in der Theorie zwei Gitterebenen so weit gegeneinander verschoben werden, sodass jedes Atom der einen Ebene ein neues Partneratom der anderen Ebene besitzt. Bei der elastischen Verformung wechseln die Atome nicht den Partner und kehren nach der Auslenkung wieder in die Ursprungsposition zurück. Bei der idealplastischen Verformung bleibt die Energie, die für die plastische Verformung notwendig ist, gleich und erhöht sich bei fortschreitender plastischer Verformung nicht. In der Realität hat jedes Material Gitterfehler und eine idealplastische Verformung kann nicht stattfinden. Gitterfehler sind unter anderem die aufeinandertreffenden Grenzflächen der unterschiedlichen Körner, die sogenannten Korngrenzen. Weitere Gitterfehler können innerhalb eines Kornes auftreten. Wenn einzelne Gitterplätze unbesetzt sind (Leerstellen) oder durch Fremdatome besetzt werden, kommt es zu einer Verzerrung des Kristallgitters innerhalb eines Kornes. Diese Gitterfehler erschweren die Verformung. Versetzungen sind eindimensionale Gitterfehler, die, im Gegensatz zu den anderen Gitterfehlern, die Verformung des „perfekten“ (gitterfehlerfreien) Materials erleichtern. Denn bei der Materialverformung wandern die Versetzungen innerhalb der Gitterstruktur. Sobald die Versetzungen auf andere Gitterfehler treffen, können diese sich nicht mehr bewegen und stauen sich. Dadurch kommt es wiederum zu einer Verfestigung des Materials und die Verformung wird erschwert. Dementsprechend steigt die Energie, die für die plastische Verformung notwendig ist, mit fortschreitender plastischer Verformung an, bis es zum Materialversagen kommt. Dieses Materialverhalten kann man gut im Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Metallen wiederfinden. Bis zum Erreichen der Dehngrenze $R_{p0,2}$ liegt für Aluminium linear-elastisches Materialverhalten vor. In diesem Bereich hängen die Dehnungen und die Spannungen über das E-Modul voneinander ab. Beim Überschreiten der Dehngrenze $R_{p0,2}$ liegt plastisches Materialverhalten vor.

In LS-DYNA gibt es die Möglichkeit, das plastische Verhalten des Werkstoffes anzugeben. Nähere Informationen zu der Angabe des plastischen Materialverhaltens in LS-DYNA gibt es in Kapitel 2.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen aus den Kapiteln 1-3 der Quelle [17].

1.2.2 Plastizitätstheorie

In diesem Abschnitt wird auf die Plastizitätstheorie eingegangen, damit besser nachvollzogen werden kann, wie plastisches Verhalten in LS-DYNA integriert und beschrieben wird.

Es gibt mathematische Hypothesen, die die Materialkennwerte aus dem Zugversuch auch für mehrachsige Beanspruchungen nutzbar machen, sofern isotropes Materialverhalten vorliegt. Durch die sogenannten Fließbedingungen wird mathematisch bestimmt, ob der wirkende Spannungszustand zu plastischen Verformungen führt. Bei isotropen Materialien kann mit Hilfe der Hauptspannungen, welche man mit der kritischen Spannung vergleicht, bestimmt werden, ob plastische Verformung auftritt oder nicht. Die kritische Spannung entspricht meistens der Dehngrenze $R_{p0,2}$ aus dem Zugversuch. Bei Metallen gibt es zwei wichtige Fließbedingungen. Zum einen die Schubspannungshypothese nach Tresca und zum anderen die Gestaltänderungsenergiehypothese nach von Mises. Genauere Informationen zur Mathematik und Mechanik dieser Bedingungen werden in Kapitel 1.4.1 gegeben.

Die Art und Weise, wie sich das Material plastisch verhält, wird in den Fließgesetzen näher beschrieben. Verallgemeinert gesagt, hängt der aktuelle Zustand der plastischen Verformungen von der Verformungsgeschichte ab. Die aus der Fließbedingung resultierende Fließfläche muss stetig differenzierbar sein, damit daraus ein Fließgesetz entwickelt werden kann. Somit gilt dies nur für die Fließflächenfunktion nach von Mises und nicht für die nach Tresca.

Wenn die Verfestigung des Materials berücksichtigt werden soll, dann wird die Fließbedingung nach von Mises um zusätzliche Terme erweitert. Diese Terme hängen von der plastischen Vergleichsdehnrate $\dot{\varepsilon}_V^{(pl)}$ ab, durch die, unabhängig von der Verformungsrichtung, die Verfestigung zunimmt. Je nach Art der Verfestigung unterscheiden sich die zusätzlichen Terme. Die isotrope Verfestigung ist eine Art, nach der bspw. Metalle verfestigen können. Das lineare Verfestigungsgesetz ist ein sehr einfaches isotropes Verfestigungsgesetz, das zum Beispiel bei dem Material 024 in LS-DYNA angewendet wird. Die kritische Spannung, kurz Fließspannung, σ_F (1.1) steigt mit zunehmender Verfestigung wie folgt:

$$\sigma_F = R_{p0,2} + H \cdot \varepsilon_V^{(pl)} \quad (1.1)$$

H ist der Verfestigungskoeffizient und kann mit dem Wert gleichgesetzt werden, welchen man bei Material 024 für ETAN einträgt. Dieser gibt, genauso wie H , die Steigung der Verfestigungsgerade an. Die plastische Vergleichsdehnung $\varepsilon_V^{(pl)}$ lässt sich durch Integration der plastischen Vergleichsdehnrate $\dot{\varepsilon}_V^{(pl)}$ bestimmen. Wenn noch keine plastische Verformung stattgefunden hat, fällt die plastische Vergleichsdehnung $\varepsilon_V^{(pl)}$ weg und die Fließspannung σ_F entspricht der Dehngrenze $R_{p0,2}$ aus dem Zugversuch.

Eine weitere Art neben der isotropen Verfestigung ist die kinematische Verfestigung. Diese kann in LS-DYNA bspw. in Material 003 verwendet werden. Der wesentliche Unterschied zur isotropen Verfestigung ist die Richtungsabhängigkeit der Verfestigung. Innerhalb des Simulationsmodells dieser Bachelorarbeit wird ausschließlich Material 024 und somit die isotrope Verfestigung benutzt.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen aus dem Kapitel 3.3 der Quelle [17].

1.2.3 Werkstoffversagen

Da bei einer ausreichend starken Materialverformung auch bei Druckbeanspruchung das Material durch Bruch versagen kann, wird an dieser Stelle kurz auf das Versagen des Materials durch mechanische Brüche eingegangen.

Zu den mechanischen Brüchen zählen Gewaltbrüche, sowie Schwing- oder Ermüdungsbrüche. Relevant für das zu untersuchende Simulationsmodell sind die Gewaltbrüche, die aufgrund von vorwiegend monotoner sowie mäßig schnell ansteigender Belastung hervorgerufen werden. Gewaltbrüche treten als Gleitbrüche, als Spaltbrüche oder als eine Mischform der beiden Brucharten auf.

Bei Gleitbrüchen findet eine plastische Verformung durch das Abgleiten des Materials in Richtung der Ebenen mit maximaler Schubspannung (45° zur Zugrichtung) statt, weshalb diese Bruchart nur bei duktilen Werkstoffen, wie zum Beispiel Aluminium, auftritt. Durch das Herauslösen von Partikeln (Ausscheidungen von Fremdatomen) aus dem Material oder durch Partikelbruch entstehen kleine Risse bzw. Hohlräume im Material. Das Herauslösen oder Brechen von Partikeln tritt bei einer großen plastischen Deformation oder bei sehr hohen Spannungen auf. Die daraus entstandenen Hohlräume wachsen bei weiterer Belastung zu sogenannten Waben zusammen. Beim Fortschreiten des Risses entlang der maximalen Schubspannung entfernt sich dieser immer weiter von dem Bereich der maximalen Belastung. Die daraus resultierende Abnahme der Spannungen und die geringere Anzahl an Vorschädigungen (weitere Hohlräume) sorgt dafür, dass es für den Riss sinnvoller ist, die Richtung um 90° hin zur maximalen Belastung zu ändern. Es bildet sich ein Riss, der im Zickzack im Bereich der maximalen Belastung wächst.

Bei Spaltbrüchen tritt der Riss ohne große Verformungen senkrecht zur größten Zugspannung auf. Dieses Verhalten ist im Normalfall bei Materialien mit einer geringen Duktilität üblich. Wenn Aluminium durch Druckspannungen plastisch verformt und verfestigt wird, kann die Duktilität abnehmen und ein duktiler Spaltbruch ist möglich. Wenn der mehrachsige Spannungszustand zuerst die Fließgrenze erreicht, dann fließt der Werkstoff und verfestigt sich weiter. Wenn der mehrachsige Spannungszustand dagegen zuerst die Spaltbruchgrenze erreicht, dann versagt das Material durch Spaltbruch. Beim Spaltbruch bildet sich meistens lokal ein Anriss durch das Lösen von Atombindungen oder aufgrund von mikrostrukturellen Schwachstellen wie bspw. Korngrenzen. Die Betrachtung der Spannungen um die Risspitze wird in Kapitel 1.3 genauer behandelt.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen aus dem Kapitel 3.5 der Quelle [17].

1.3 Grundlegende Kenntnisse zur Bruchmechanik

Dieses Kapitel beschreibt lediglich die Bruchmechanik bei einer monoton steigenden oder statischen Belastung, so wie sie auch in dem verwendeten Simulationsmodell auftritt. Die zur Beschreibung verwendeten Methoden entstammen der Kontinuumsmechanik.

1.3.1 Bruchmodi

Die Bruchmodi sind von der Lage des Spannungsfeldes zum Riss abhängig. Es gibt drei charakteristische Belastungsfälle, für die jeweils ein Bruchmodus existiert:

Modus 1: Die größte Normalspannung (größte Hauptspannung) wirkt senkrecht zur Rissfläche, wodurch bei Zugbelastung der Riss geöffnet wird, wie in Abbildung 1 links zu sehen ist. Druckbelastung ist hier unkritisch. Der Bruchmodus 1 tritt im Vergleich zu Modus 2 und 3 bei den geringsten Lasten auf.

Modus 2: Durch die in der Rissebene, parallel zur Rissausbreitungsrichtung, auftretende Schubspannung, kommt es zu einem Abgleiten der Rissflanken aufeinander, wie in Abbildung 1 Mitte zu sehen ist. Dieses Abgleiten ist reibungsbehaftet, weshalb mehr Energie für den Rissfortschritt als bei Modus 1 aufgebracht werden muss.

Modus 3: Dieser verhält sich wie der Modus 2, nur dass die Schubspannung in der Rissebene, senkrecht zur Rissausbreitungsrichtung, auftritt, wie in Abbildung 1 rechts zu sehen ist.

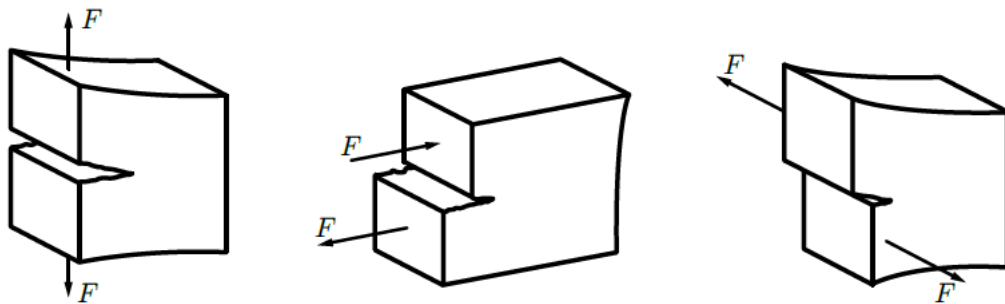


Abbildung 1: Bruchmodus 1 (Links), 2 (Mitte) und 3 (Rechts) von S.131 aus [17]

Dadurch, dass der Rissfortschritt im Modus 1 den energetisch besten Zustand hat, kommt es in homogenen Werkstoffen bei einem homogenen Spannungsfeld dazu, dass sich ein Riss, der sich anfänglich nach Modus 2 oder 3 ausgebreitet hat, sich mit der Zeit immer mehr nach Modus 1 ausbreitet. Folglich wird sich im Weiteren auf den Bruchmodus 1 beschränkt, der von der größten Hauptspannung abhängt. Aus Kapitel 1.2.3 ist bereits bekannt, dass sich ein Riss durch Gleitbruch, Spaltbruch oder eine Mischform fortsetzen kann.

1.3.2 Linear-elastische Bruchmechanik

Die Theorie der linear-elastischen Bruchmechanik beschreibt mathematisch das Spannungsfeld um die Risspitze und geht auf die dort auftretenden Energiebeträge ein. Wie zuvor bereits erwähnt, wird lediglich der Bruchmodus 1 betrachtet.

Die linear-elastische Bruchmechanik kann zum einen bei spröden Werkstoffen verwendet werden. Unter der Voraussetzung, dass die plastische Zone auf ein kleines Gebiet um die Risspitze konzentriert ist, kann diese Theorie ebenfalls bei duktilen Werkstoffen verwendet werden. Für das Nahfeld der Risspitze können Näherungsgleichungen aufgestellt werden, die die lokalen Spannungen (Spannungsfeld) berechnen, welche von der Entfernung zur Risspitze, der Geometrie des Risses, der Risslänge sowie der von außen wirkenden Spannung abhängen. Die Last, bei der der Riss mit der gegebenen Geometrie und Länge

fortschreitet, wird kritische Spannung genannt. Die damit zusammenhängende Bruchzähigkeit ist ein Werkstoffkennwert.

Mit Hilfe der relevanten Energiebeträge kann festgelegt werden, wann sich der Riss weiter ausbreitet. Als Bedingung ergibt sich, dass die geleistete äußere Arbeit der Änderung der elastischen Energie und der Oberflächenenergie entsprechen muss. Wenn zudem an der Risspitze plastische Deformation auftritt, muss die von außen aufgebrachte Arbeit sowohl neue Oberflächen erschaffen können, als auch für plastischen Deformation ausreichen.

Rissbehaftete Bauteile mit einer bekannten Risslänge müssen gegen plastische Verformung, Spaltbruch und zusätzlich gegen die Rissausbreitung ausgelegt werden. Bei duktilen Materialien kann man eine kritische Risslänge berechnen, ab der das Material eher durch Rissfortschritt, als durch Fließen versagt. Je nachdem, ob man das Material des Aluminium-Blockes als rissbehaftet oder rissfrei ansieht, muss man den Block ebenfalls gegen Rissausbreitung auslegen oder nicht. Wenn nicht explizit erwähnt, wird der Aluminium-Block als rissfrei angenommen.

1.3.3 Fließbruchmechanik

Wenn die plastische Zone vor der Risspitze im Vergleich zu den Proben- oder Rissabmessungen nicht ausreichend klein ist, kann die linear-elastische Bruchmechanik nicht verwendet werden und es werden die Methoden der Fließbruchmechanik eingesetzt. Der plastische Bereich muss dennoch maßgeblich durch das umgebende, elastische Spannungsfeld bestimmt sein.

In der Fließbruchmechanik gibt es zwei Methoden. Auf die Betrachtung des J-Integrals wird hier verzichtet und nur die Methode der Risspitzenöffnung kurz betrachtet. Bei dieser Methode wird angenommen, dass der Riss fortschreitet, wenn die Öffnung der Risspitze den kritischen Wert erreicht. Die Öffnung der Risspitze ist der Abstand der nahezu parallelen Rissflanken nahe der Risspitze zueinander.

Die in Kapitel 1.3 verwendeten Informationen stammen aus dem Kapitel 5 der Quelle [17].

1.4 Ergänzende Kenntnisse zur Kontinuumsmechanik

In diesem Kapitel werden Grundkenntnisse der Kontinuumsmechanik aufgeführt, die zu einem besseren Verständnis der Plastizität und einzelner Erosionskriterien aus LS-DYNA führen sollen.

1.4.1 Fließbedingungen auf Grundlage der Kontinuumsmechanik

In Kapitel 1.2.2 Plastizitätstheorie wurde bereits erläutert, wozu die Fließbedingungen gebraucht werden. Da in dem Simulationsmodell mit einem isotropen Material gearbeitet wird, muss die verwendete Fließbedingung richtungsunabhängig sein. Die zwei wichtigsten Bedingungen, die dieser Anforderung entsprechen, sind zum einen die Schubspannungshypothese nach Tresca und zum anderen die Gestaltänderungsenergiehypothese nach von Mises. Bei beiden handelt es sich um kontinuumsmechanische Näherungsformeln.

Bei der Schubspannungshypothese entscheidet die größte im Material vorkommende Schubspannung über den Fließbeginn. Die maximale Schubspannung ergibt sich nach Gleichung (1.2).

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2} \quad (1.2)$$

Dabei ist σ_{11} in diesem Fall die größte Hauptspannung und σ_{33} die kleinste Hauptspannung in einem dreiachsigen Spannungszustand. Sobald τ_{max} den kritischen Wert τ_F erreicht, ist die Bedingung erfüllt und das Material beginnt zu fließen. Mit Hilfe der Materialkennwerte aus dem Zugversuch kann der kritische Wert bestimmt werden. Dazu wird die größte Hauptspannung gleich der ermittelten Dehngrenze aus dem Zugversuch gesetzt und die kleinste Hauptspannung fällt, aufgrund des einachsigen Spannungszustands, weg. Dementsprechend ergibt sich:

$$\tau_F = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2} = \frac{R_{p0,2} - 0}{2} = \frac{R_{p0,2}}{2} \quad (1.3)$$

Die aus der Fließbedingung resultierende Fließfläche hat Ecken, die nicht stetig differenzierbar sind, sodass die Schubspannungshypothese in der Finiten Elemente Methode nicht als Fließbedingung verwendet werden kann.

Trotzdem ist die Schubspannungshypothese in LS-DYNA integriert und kann nach der Berechnung bei der Auswertung der Spannungen im Bauteil ausgewählt werden. Zudem kann aus der Schubspannungshypothese die Funktion des Erosionskriteriums EPSSH abgeleitet werden, welches bei Erreichen der kritischen Schubdehnung auslöst.

Die Fließfläche, die aus der Fließbedingung der Gestaltänderungsenergiehypothese resultiert, ist dagegen stetig und wird in LS-DYNA bspw. bei dem Material 024 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY verwendet. Exakt dieses Material wird im Simulationsmodell für den Aluminium-Block benutzt.

Die von-Misessche Fließbedingung (1.4) für ein System, das nicht im Hauptachsensystem arbeitet, d.h., die Hauptspannungen treten nicht in Richtung der Achsen des Koordinatensystems auf, lautet:

$$\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2] + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{12}^2} = k_F \quad (1.4)$$

Wenn man die Fließbedingung auf den einachsigen Zugversuch anwendet, kann man den kritischen Wert, ab dem das Material zu fließen beginnt, aus den Materialkennwerten ermitteln. Da beim Zugversuch die Schubspannungen wegfallen, da hier im Hauptachsensystem gearbeitet wird, und nur die erste Hauptspannung σ_{11} den Wert der Dehngrenze $R_{p0,2}$ erreicht, während die beiden anderen Hauptspannungen wegfallen, ergibt sich der kritische Wert wie nachfolgend beschrieben:

$$\sqrt{\frac{1}{6}[(R_{p0,2} - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (R_{p0,2} - 0)^2] + 0 + 0 + 0} = \sqrt{\frac{R_{p0,2}^2}{3}} = k_F \quad (1.5)$$

Somit kann die Fließbedingung alternativ wie folgt geschrieben werden, die als Vergleichsspannung nach von-Mises (1.6) bekannt ist:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2] + 3(\sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{12}^2)} = R_{p0,2} \quad (1.6)$$

Die Vergleichsspannung nach von-Mises (die Gestaltänderungsenergiehypothese) kann in LS-DYNA ebenso wie die Schubspannungshypothese zur Auswertung der Spannungen im berechneten Bauteil verwendet werden. Dazu kommt die bereits erwähnte Verwendung als Fließbedingung für das Material 024.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen und Formeln stammen aus dem Kapitel 3.3 der Quelle [17].

1.4.2 Grundlage der Kontinuumsmechanik mit Bezug zu den Erosionskriterien

In Kapitel 3 und vor allem in Kapitel 4 dieser Bachelorarbeit wird auf die Untersuchung einiger Erosionskriterien in LS-DYNA eingegangen. Die Ergebnisse der Untersuchung sollen analysiert und interpretiert werden. Um ein paar dieser Erosionskriterien besser verstehen zu können, wird in diesem Abschnitt auf die dafür notwendigen Grundlagen der Kontinuumsmechanik eingegangen.

Der Spannungstensor \mathbf{T} ist ein Tensor 2. Ordnung und kann folglich als 3x3-Matrix dargestellt werden, wodurch der dreiaxige Spannungszustand abgebildet werden kann.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Das Erosionskriterium SIGP1 bezieht sich auf die größte der drei Hauptspannungen σ_{11} , σ_{22} und σ_{33} .

Bei einem hydrostatischen Spannungszustand sind alle drei Hauptspannungen gleichgroß und es existieren keine Schubspannungen. Die hydrostatische Spannung σ_h (1.7) entspricht der mittleren Normalspannung σ_m des Spannungstensors.

$$\sigma_h = \sigma_m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (1.7)$$

Der hydrostatische Spannungszustand sieht dann wie folgt aus:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix}$$

Hydrostatische Spannungen verursachen keine Gestaltänderungen, d.h., dass ein Würfel weiterhin die Form eines Würfels hat. Hydrostatische Spannungen können nur das Volumen ändern, indem der Würfel bspw. größer oder kleiner wird, aber trotzdem noch die Form eines Würfels beibehält. Alternativ kann man auch von Druck reden. Der Druck (1.8) ist gleich der negativen hydrostatischen Spannung, da der Würfel per Definition bei positiven Druck komprimiert und bei einer positiven Spannung dagegen auseinandergezogen werden würde.

$$p = -\sigma_h \quad (1.8)$$

Dies ist bei den Erosionskriterien MXPRES und MNPRES zu beachten. Ebenfalls kann mit Hilfe des Quotienten aus hydrostatischer Spannung durch Vergleichsspannung der Spannungszustand, d.h., ob Zug oder Druck vorliegt, ermittelt werden, was bei der Verwendung von GISSMO geschieht.

Die Volumenänderung des Würfels ist rein elastisch und führt zu keinen plastischen Verformungen, da davon ausgegangen wird, dass plastische Verformungen nur durch Scherungen stattfinden, die durch Schubspannungen hervorgerufen werden.

Wenn man den hydrostatischen Anteil vom Spannungstensor abzieht, erhält man den Spannungsdeviator \mathbf{S} .

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_h & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} - \sigma_h & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} - \sigma_h \end{bmatrix}$$

Der Spannungsdeviator enthält den Schubspannungszustand und ist für die Gestaltänderung des Würfels und somit auch für die plastische Verformung verantwortlich. Bei isotropen Materialien kann die Hypothese von Huber - von Mises - Hencky, die ausschließlich auf der Einbeziehung der 2. Invarianten des Spannungsdeviators basiert, für die Bestimmung der Vergleichsspannung (1.9) verwendet werden.

$$\sigma_{Vergleich} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} \mathbf{S}} \quad (1.9)$$

Diese Vergleichsspannung wird bei dem Erosionskriterium SIGVM verwendet, das somit nur von der plastischen Verformung abhängt.

Die Gleichung für das Erosionskriterium EFFEPS (1.10), der effektiven Dehnung, ähnelt der Gleichung für die Vergleichsspannung und ist nur vom deviatorischen Dehnungstensor abhängig.

$$\varepsilon_{eff} = \sum_{ij} \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^{dev} \varepsilon_{ij}^{dev}} \quad (1.10)$$

Die Gleichung (1.10) stammt von S.2-60 aus der Quelle [11].

Die in diesem Abschnitt verwendeten Informationen und Formeln stammen zum einen aus dem Kapitel 3.3, S.87 der Quelle [17], aus den Kapiteln 4.3 und 8.2, S.271 der Quelle [1] und von der Seite 2-53 der Quelle [11].

1.5 Grundlegende Kenntnisse der numerischen Mathematik

Da es sich bei LS-DYNA um ein Computerprogramm handelt, welches bspw. mit der Finiten Elemente Methode numerisch die Verformungen, Dehnungen und Spannungen eines Bauteils ermittelt, ist es hilfreich zu verstehen, welche numerischen Berechnungen und Verfahren verwendet werden. Deshalb soll innerhalb des Kapitels 1.5 das grundlegende Wissen vermittelt werden, das für das grobe Verständnis des Simulationsmodelles notwendig ist.

1.5.1 Grundlagen FEM

Die Finite-Elemente-Methode, kurz FEM, ist ein Verfahren zur näherungsweise Bestimmung der Dehnungen und Spannungen eines Bauteils. Die reale Bauteilgeometrie wird durch eine Vielzahl an Knoten abgebildet, welche durch Formfunktionen mit den anderen, umliegenden Knoten verbunden sind. Als Beispiel nehme man eine Platte, die durch 9 Knoten dargestellt wird (siehe Abbildung 2).

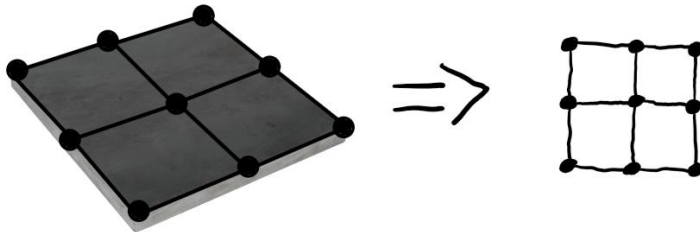


Abbildung 2: Netz mit 9 Knoten zur Darstellung einer Platte [15]

Die Knoten stellen die reale Geometrie nach und sind durch Formfunktionen (Verbindungslinien zwischen zwei Knoten) mit den Nachbarknoten verbunden. Die Knoten und die Formfunktionen bilden in der oberen Abbildung ein zweidimensionales Netz, vergleichbar mit einem Fischernetz.

Wenn jetzt die untere Seite der Platte eingespannt wird (unteren drei Knoten können sich nicht bewegen) und auf die obere, linke Ecke eine Kraft nach unten wirkt, dann verformt sich das Netz, bzw. die reale Geometrie (Abbildung 3). Anhand der Knotenverschiebungen können die Dehnungen und Spannungen bestimmt werden. Die Materialeigenschaften, wie bspw. die Masse oder die Steifigkeit, werden in Matrizen, die je nach Anzahl der Freiheitsgrade unterschiedlich groß sind, festgehalten und bei der numerischen Berechnung verwendet.

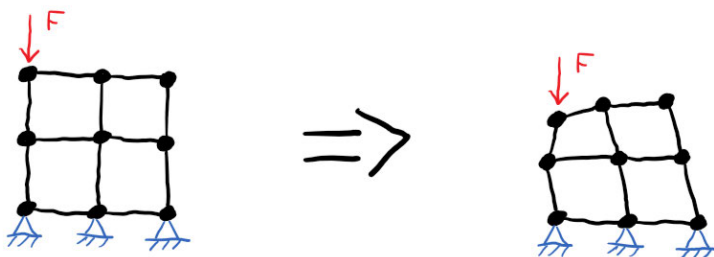


Abbildung 3: Durch Kraft verformtes Netz

Aus mehreren Knoten können Elemente gebildet werden, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Der Dehnungs- bzw. Spannungszustand kann dann pro Element angegeben werden. Die Formfunktionen, die die Dehnung bzw. Spannung zwischen den Knoten näherungsweise angeben, können generell beliebiger Ordnung sein. In LS-DYNA werden nur lineare Formfunktionen (1.Ordnung) verwendet.

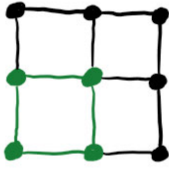


Abbildung 4: Kennzeichnung eines Elementes (in grün) innerhalb des Netzes

Die Bildung eines dreidimensionalen Netzes funktioniert genauso wie beim zweidimensionalen Netz beschrieben. Bei einem zweidimensionalen Netz bilden sich folglich zweidimensionale Elemente, die Schalenelemente (diese Elemente bekommen zusätzlich die Dicke als einen skalaren Parameter dazu). Bei den Schalenelementen hat jeder Knoten 6 Freiheitsgrade (kurz FHG), 3 translatorische FHG und 3 rotatorische FHG. Im Raum existieren Volumenelemente, die unterschiedliche Geometrien haben können. Bei den Volumenelementen hat jeder Knoten nur die 3 translatorischen FHG. Für die Modellierung des dreidimensionalen Aluminium-Blockes werden ausschließlich Hexaeder-Elemente verwendet.

Damit man die Ergebnisse der numerischen Berechnung besser bewerten kann, sollte man sich bewusst sein, dass sich die Spannungswerte durch Integration der Dehnungswerte ergeben, welche wiederum durch Integration der Knotenverschiebungen erhalten werden. Demzufolge sollte man nach der Berechnung zuerst die Knotenverschiebungen kontrollieren und verifizieren.

Die aus den Knotenverschiebungen des Elementes durch Integration erhaltenen Ergebnisgrößen sind genaugenommen nur in den Integrationspunkten des Elementes gültig. Die Ergebnisse werden anschließend auf die Knoten des Elementes interpoliert. Das vollintegrierte Hexaeder-Element besitzt acht Integrationspunkte, wenn die verwendeten Formfunktionen, so wie in LS-DYNA, linear sind. Das vollintegrierte Element ist links in Abbildung 5 zu sehen. Das reduziert integrierte Hexaeder-Element hat nur einen Integrationspunkt, wie rechts in Abbildung 5 zu sehen ist.

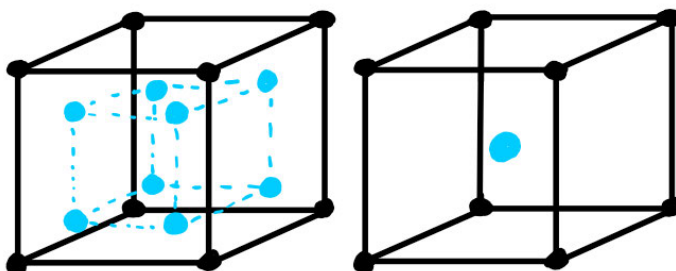


Abbildung 5: Vollintegriertes und reduziert integriertes Hexaeder-Element

Zusätzlich ist es wichtig zu wissen, dass bei dynamischen Anwendungen die Knotenverschiebungen durch eine zweifache, zeitliche Integration der Knotenbeschleunigungen bestimmt werden, da diese durch die gegebenen Größen berechnet werden können. Für die zeitabhängige Integration gibt es zwei numerische Verfahren, die angewendet werden können und in den nächsten drei Abschnitten näher beschrieben werden.

1.5.2 Explizite zeitabhängige Integration

Die Bewegungsgleichung bei einem linearen Problem führt zu der linearen, gewöhnlichen Differenzialgleichung (kurz DGL), die man gut analytisch lösen kann. Sobald das zu untersuchende Problem nichtlinear ist, ist auch die gewöhnliche DGL nichtlinear und nur noch numerisch zu lösen. LS-DYNA verwendet standartmäßig die explizite zeitabhängige Integration in Form der zentralen Differenzenmethode. Auf diese wird im Folgenden kurz eingegangen.

Die halb-diskrete Bewegungsgleichung (1.11) der zentralen Differenzenmethode zum Zeitpunkt n aus Kapitel 24.2 der Quelle [13] lautet:

$$Ma^n = P^n - F^n + H^n \quad (1.11)$$

Diese kann nach der Knotenbeschleunigung a^n (1.12) umgestellt werden:

$$a^n = M^{-1}(P^n - F^n + H^n) \quad (1.12)$$

M ist die diagonale Massenmatrix, P^n ist der Beitrag der externen Quellen pro Knoten, wie z.B. Körperkräfte oder Kontaktkräfte, F^n beinhaltet die Elementspannungen pro Knoten und H^n ist von der Hourglass-Steuerung abhängig.

Von der Knotenbeschleunigung zum Zeitpunkt n kann mit Hilfe der zentralen Differenzenformel auf die Knotengeschwindigkeit zum Zeitpunkt $n + \frac{1}{2}$ (1.13) geschlossen werden:

$$v^{n+\frac{1}{2}} = v^{n-\frac{1}{2}} + a^n \Delta t^n \quad (1.13)$$

Und von der Knotengeschwindigkeit zum Zeitpunkt $n + \frac{1}{2}$ kann mit Hilfe der zentralen Differenzenformel auf die Knotenverschiebung zum Zeitpunkt $n + 1$ (1.14) geschlossen werden:

$$u^{n+1} = u^n + v^{n+\frac{1}{2}} \Delta t^{n+\frac{1}{2}} \quad (1.14)$$

Aus den Knotenverschiebungen resultieren die Dehnungen und aus denen die Spannungen zum Zeitpunkt $n + 1$. Ab dann geht der Vorgang wieder von vorne los und berechnet die Knotenbeschleunigung zum Zeitpunkt $n + 1$. Zur besseren Übersicht wird der Berechnungsdurchlauf in der Abbildung 6 schematisch dargestellt.

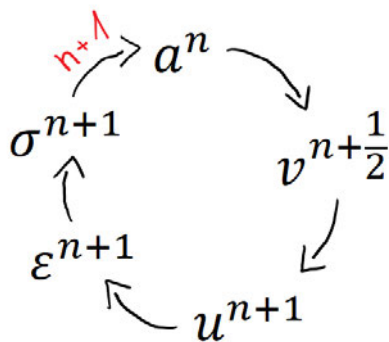


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Schritte eines Berechnungsdurchlaufes der expliziten Zeitintegration

Der Zeitschritt innerhalb der zentralen Differenzenmethode ist variabel und hängt von der Größe des kleinsten Elementes ab. Demnach verändert sich der Zeitschritt unter Umständen, wenn Elemente verformt werden. Dies ist notwendig, da zu jedem Zeitpunkt die Courant-Bedingung eingehalten werden muss, da ansonsten die Stabilität des numerischen Verfahrens nicht mehr gewährleistet werden kann. Auf die Berechnung des kritischen Zeitschrittes wird in Kapitel 1.5.5 eingegangen und die Courant-Bedingung wird in Kapitel 1.5.6 genauer betrachtet. Möglichkeiten, um den Zeitschritt zu vergrößern und somit die Rechenzeit zu minimieren werden in Kapitel 1.5.7 genannt.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen und Formeln stammen aus den Kapiteln 24.1 und 24.2 der Quelle [13].

1.5.3 Implizite zeitabhängige Integration

Alternativ zur expliziten zeitabhängigen Integration kann für das Lösen von nichtlinearen gewöhnlichen DGL auch die implizite zeitabhängigen Integration in LS-DYNA verwendet werden. Dazu muss man das Simulationsmodell abändern. Innerhalb dieser Bachelorarbeit wird ausschließlich die explizite zeitabhängige Integration benutzt, weshalb das implizite Verfahren nur grob dargestellt wird. Vielmehr ist für den Anwender wichtig, wann die implizite Integration Vorteile gegenüber der expliziten Integration mit sich bringt und wann nicht. Dies wird in Kapitel 1.5.4 behandelt.

Bei der impliziten Zeitintegration werden die Knotenverschiebungen durch eine iterative Prozedur erhalten. Die Robustheit und die Genauigkeit des numerischen Verfahrens ist abhängig von der Größe des Zeitschrittes. Die Lösung jedes Schrittes erfordert Iterationsschritte, um das Gleichgewicht im gewünschten Toleranzbereich zu erreichen. Dazu wird ein numerischen Solver benötigt, um damit die Steifigkeitsmatrix ein oder mehrere Male pro Lastschritt zu invertieren. Diese Operation kostet besonders bei großen Modellen Zeit. Die Vorteile und weitere Nachteile der impliziten Zeitintegration gegenüber der expliziten Zeitintegration werden im nächsten Kapitel aufgelistet.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen aus dem Kapitel 6.3 der Quelle [4].

1.5.4 Kurzer Vergleich der zeitabhängigen Integrationsverfahren

In Tabelle 1 werden die jeweiligen Vorteile der expliziten und impliziten zeitabhängigen Integration aufgelistet und gegenübergestellt.

Tabelle 1: Vorteile der jeweiligen zeitabhängigen Integrationsverfahren

Explizite Zeitintegration	Implizite Zeitintegration
<ul style="list-style-type: none"> • Nichtlinearitäten der Geometrie, Materialnichtlinearitäten und Kontakte beeinflussen den Integrationsalgorithmus nur geringfügig. • Ist sehr robust und führt nur selten zu Fehlern im num. Algorithmus • Geringere Rechenkosten pro Zeitschritt, da keine nichtlinearen Gleichungssysteme iterativ gelöst werden müssen. • Vorhersagbare Rechenzeit pro Zeitschritt, da keine iterative Rechnung konvergieren muss. • Hohe Genauigkeit der Ergebnisse aufgrund kleiner Zeitschritte. <p>→ Anwendung: Bei Problemen, die sowieso einen kleinen Zeitschritt erfordern (z.B. Crash-Simulation oder Wellenausbreitungsprobleme)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Der Zeitschritt kann mehrere Zehnerpotenzen größer sein, da es keine charakteristische Grenze bei der Zeitschrittgröße gibt, die von der Elementgröße abhängt und die Stabilität direkt beeinflusst. <p>→ Anwendung: Bei Modellen, die ein sehr feines Netz erfordern, wie z.B. in der Strukturmechanik.</p>

Wie man sehen kann, ist je nach Anwendungsgebiet die explizite oder die implizite Zeitintegration sinnvoller, um die nötige Genauigkeit zu erreichen und dabei die Rechenzeit so kurz wie möglich zu halten. Es gibt auch Problemstellungen, in denen man innerhalb der Simulation in einem bestimmten Zeitfenster zwischen der expliziten und der impliziten Zeitintegration wechselt.

Die in diesem Abschnitt verwendeten Informationen stammen zum einen aus dem Kapitel 37 der Quelle [14] und aus den Kapiteln 6.2 und 6.3 der Quelle [4].

1.5.5 Zeitschrittsteuerung

Am Beispiel des Stab-Elementes, das nur axiale Kräfte und keine Querkräfte übertragen kann, wird erklärt, wie der kritische Zeitschritt Δt_e berechnet wird. Dazu werden die Formeln aus Kapitel 22 der Quelle [13] betrachtet. Der kritische Zeitschritt des Stab-Elementes (1.15) ergibt sich wie folgt:

$$\Delta t_e = \frac{L}{c} \quad (1.15)$$

L ist die Länge des Stab-Elementes. Die Schallgeschwindigkeit c (1.16) des Stab-Elementes wird wie folgt berechnet:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.16)$$

Diese ist abhängig vom E-Modul E und der Dichte ρ des verwendeten Materials. Wenn man die beiden Formeln genauer betrachtet, kann man sehen, was für Auswirkungen Änderungen der einzelnen Parameter für den kritischen Zeitschritt Δt_e bedeuten. Durch die gleichen Änderungen lassen sich dieselben Auswirkungen beim Solid-Element erzielen, auch wenn die Formeln dort etwas komplizierter sind.

Bei Solid-Elementen sind die Formeln zur Bestimmung des kritischen Zeitschrittes Δt_e ähnlich der des Stabes, nur das aufgrund der Dreidimensionalität, die damit verbundenen physikalischen Materialeigenschaften berücksichtigt werden müssen. In der Formel (1.17) sieht man, dass Δt_e neben L_e und c ebenfalls von Q , der Volumenviskosität abhängt.

$$\Delta t_e = \frac{L_e}{\left\{ \left[Q + (Q^2 + c^2)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}} \quad (1.17)$$

L_e ist die charakteristische Länge des Elementes und wird nach Formel (1.18) berechnet, wobei v_e das Elementvolumen und $A_{e_{max}}$ die größte Seitenfläche ist.

$$L_e = \frac{v_e}{A_{e_{max}}} \quad (1.18)$$

Die Schallgeschwindigkeit c des Solid-Elementes wird für elastische Materialien mit einem konstanten Kompressionsmodul durch die Formel (1.19) bestimmt.

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (1.19)$$

Diese hängt von dem E-Modul E , der Querkontraktionszahl ν und der Dichte ρ des verwendeten Materials ab.

Es lässt sich abschließend zusammenfassen, dass der kritische Zeitschritt Δt_e sowohl von den Materialparametern als auch von der Geometrie des Elementes abhängig ist.

1.5.6 Courant-Bedingung der expliziten Integrationsmethode

Wie in Kapitel 1.5.2 bereits erwähnt, muss die Courant-Bedingung eingehalten werden, damit das numerische Verfahren nicht instabil wird. Dazu wird der Formel des kritischen Zeitschrittes ein Faktor hinzugefügt, die sogenannte Courant-Zahl α . Zur besseren Veranschaulichung wird die Courant-Zahl α der Formel des kritischen Zeitschrittes des Stab-Elementes hinzugefügt. So lautet die Courant-Bedingung des Stab-Elementes (1.20):

$$\Delta t_e = \frac{L}{c} \cdot \alpha \text{ bzw. } \alpha = \frac{c \cdot \Delta t_e}{L} < 1 \quad (1.20)$$

Analog lässt sich die Formel der Courant-Bedingung des Solid-Elementes aufstellen. Die Bedingungen sind bei allen Elementarten gleich:

Die Courant-Zahl α muss immer kleiner 1 sein, damit die Berechnung stabil verläuft.

Das ergibt Sinn, da eine Courant-Zahl α größer als 1 dazu führt, dass der kritische Zeitschritt größer wird, als er durch die Material- und Geometrieparameter werden würde. Der zu große Zeitschritt könnte dann zu Instabilitäten der Berechnung führen, da numerische Fehler bei größeren Teilschritten ebenfalls größer werden. Eine Courant-Zahl α gleich 1 verändert den Zeitschritt nicht. Um die Stabilität der Berechnung mit einer hinreichend hohen Sicherheit zu gewährleisten, muss die Courant-Zahl α kleiner als 1 sein. In LS-DYNA wird ein Bereich von 0,67 bis 0,9 als Wert der Courant-Zahl α vorgeschlagen. Die Courant-Zahl α sollte nicht zu klein gewählt werden, da dies zu sehr kleinen Teilschritten und somit zu einer sehr hohen Rechenzeit führt.

In LS-DYNA kann über CONTROL_TIMESTEP die Courant-Zahl manuell angegeben werden. Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen aus dem Kapitel 6.2 der Quelle [4].

1.5.7 Methoden zur Reduzierung der Rechenzeit beim expliziten Integrationsverfahren

Bei dem expliziten Integrationsverfahren kommt es aufgrund feinerer Vernetzungen sehr schnell zu sehr hohen Rechenzeiten. Je nach Anwendungsfall gibt es Methoden zur Reduzierung der Rechenzeit, ohne die Ergebnisse spürbar zu beeinflussen. An dieser Stelle wird zum einen auf die Methode der Massenskalierung und zum anderen auf die Methode des Subcyclings eingegangen.

Massenskalierung:

Bei Anwendungsfällen, die nahezu statischer Natur sind und wo die Massenträgheit keine Rolle spielt, kann der kritische Zeitschritt durch Erhöhung der Dichte des Materials vergrößert werden. Durch die Erhöhung der Dichte wird die Schallgeschwindigkeit kleiner, wodurch sich der kritische Zeitschritt vergrößert. Dies kann an den Formeln (1.15) und (1.16) aus Kapitel 1.5.5 nachvollzogen werden. Die Masse entspricht dann nicht mehr der tatsächlichen physikalischen Masse, sondern wird zu einem nichtphysikalischen Parameter. Üblich sind Erhöhungen der Dichte um das 10-, 100- oder 1000-fache.

Da sich der Keil in dem Simulationsmodell dieser Bachelorarbeit sehr langsam bewegt, spielt die Massenträgheit keine Rolle, sodass Massenskalierung problemlos angewendet werden kann.

Subcycling:

Bei einer Vernetzung, in der es Bereiche mit kleinen Elementen und Bereiche mit größeren Elementen gibt, kann durch Subcycling die Rechenzeit verringert werden. Da die Größe des kritischen Zeitschrittes von dem kleinsten Element des Modells abhängt, ist die Idee beim Subcycling folgende: Die Elemente sollen aufgrund ihrer Zeitschrittgröße in Gruppe sortiert werden, bei denen alle Zeitschrittgrößen ein ganzzahliges Vielfaches der kleinsten Zeitschrittgröße innerhalb dieser Gruppe sind. Dazu wird in LS-DYNA erst allen Knoten und darauf aufbauend allen Elementen ein Zeitschritt zugeordnet, sodass die Elemente Gruppen zugeordnet werden können. Anschließend kann den Elementen, deren kritischer Zeitschritt ein ganzzahliges Vielfaches des kleinsten Zeitschrittes ist, eine Courant-Zahl zugeordnet werden. Diese ergibt, multipliziert mit dem kleinsten Zeitschritt, den elementspezifischen kritischen Zeitschritt, der größer ist und deshalb Rechenzeit spart.

Um weniger mögliche Fehlerquellen innerhalb des Simulationsmodelles zu haben, wird in dieser Bachelorarbeit auf die Methode des Subcyclings verzichtet.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen aus dem Kapitel 24.4 der Quelle [13].

1.6 In LS-DYNA integrierte Verfahren zur Darstellung von Materialversagen

Es gibt zwei unterschiedliche Modellarten, mit denen Materialversagen vorhergesagt werden kann. Zum einen die Versagensmodelle (failure models) und zum anderen die Schadensmodelle (damage models). Die Wahl des in der Simulation verwendeten Modells hängt von dem Anwendungsfall und der gewünschten Genauigkeit ab. Im Folgenden werden beide Modellarten beschrieben und anschließend für einen besseren Überblick nochmals zusammengefasst. Die in Kapitel 1.6 genannten Informationen stammen aus der Quelle [2].

1.6.1 Versagensmodelle

Die Versagensmodelle sind einfacher und können schneller kalibriert und genutzt werden als die Schadensmodelle. Die dafür benötigten Parameter müssen aus Versuchen ermittelt werden. Die Materialsteifigkeit und -beanspruchbarkeit ändert sich durch das Versagensmodell nicht.

Versagensmodelle können durch die Auswahl der entsprechenden Materialmodelle (MAT) oder durch Erweiterung der Materialeigenschaften (MAT_ADD) in LS-DYNA verwendet werden. Eine Kombination von Versagensmodellen ist insofern möglich, dass man ein Materialmodell mit Materialeigenschaften erweitern kann. Man kann keine zwei Materialmodelle kombinieren.

Beispielsweise kann das Material MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY verwendet werden, um ein elasto-plastisches Material nachzubilden, sowie es für den Aluminium-Block aus dem Simulationsmodell genutzt wird. Das plastische Verformen eines Werkstoffes ist ebenfalls eine Art Versagen. In diesem Fall basieren die Materialeigenschaften auf der Fließbedingung nach von Mises und das Material verdichtet isotrop, wie bereits in den Kapiteln 1.2.2 und 1.4.1 beschrieben. Es gibt noch weitere Materialmodelle, die zu den Versagensmodellen gehören und in Kapitel 1.6.3 kurz aufgelistet werden.

Um die Eigenschaften eines Materials zu erweitern, wird MAT_ADD verwendet. MAT_ADD_EROSION ist ein Versagensmodell, das einem existierenden Material Versagenskriterien hinzufügt oder die vorhandenen erweitert. Auf die Versagens- bzw. Erosionskriterien wird in Kapitel 3 genauer eingegangen, bevor einige der Erosionskriterien innerhalb dieser Bachelorarbeit genauer untersucht werden.

1.6.2 Schadensmodelle

Die Schadensmodelle sind komplexer und genauer als die Versagensmodelle, brauchen aber auch mehr Zeit, um kalibriert zu werden, da mehrere Parameter aus Versuchen bestimmt werden müssen. Die Materialsteifigkeit und -beanspruchbarkeit wird im Schadensfall beeinflusst.

Schadensmodelle können durch die Auswahl der entsprechenden Materialmodelle (MAT) oder durch Erweiterung der Materialeigenschaften (MAT_ADD) in LS-DYNA verwendet werden. Die verschiedenen Schadensmodelle werden in Kapitel 1.6.3 kurz aufgelistet.

Auf zwei Schadensmodelle wird hier kurz eingegangen, da diese vor allem alternativ zur EROSION verwendet werden können und von LS-DYNA für die Schadenssimulation empfohlen werden.

GISSMO:

GISSMO ist ein verallgemeinertes Modell, welches schrittweise berechnet wird und abhängig vom Spannungszustand ist, der angibt, ob Zug oder Druck vorliegt. Es werden eine Instabilitätskurve und eine Versagenskurve berechnet. Wenn die Instabilitätskurve überschritten wird, fängt der Schaden an und sobald die Versagenskurve erreicht wird, tritt Versagen auf.

DIEM:

DIEM ist ein Schadensbeginn- und Schadensfortschrittsmodell. Es gibt verschiedene Schadensbeginn-Kriterien, die, je nach Auftreten der jeweiligen Belastung, dafür sorgen, dass die jeweilige Schadenseinleitungsvariable aufsummiert wird. Sobald diese den Wert 1 erreicht, beginnt die Aufsummierung der Schadensvariable. Ab diesem Zeitpunkt ist die Spannung mit dem Schaden gekoppelt, sodass das Material entfestigt werden kann. Wenn die Schadensvariable den Wert 1 erreicht, dann tritt Versagen auf.

1.6.3 Überblick über die Verfahren zur Darstellung von Materialversagen

In Tabelle 2 wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Versagens- und Schadensmodelle in LS-DYNA gegeben. Das Löschen eines Elementes findet im Allgemeinen nach dem Erreichen des Versagenskriteriums statt. Bei den Schadensmodellen tritt vorher noch Schaden auf, während bei den Versagensmodellen ohne vorherigen Schaden die Elemente gelöscht werden.

Tabelle 2: Überblick über die Versagens- und Schadensmodelle

Versagensmodelle	Schadensmodelle
<ul style="list-style-type: none"> - MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY - MAT_JOHNSON_COOK - MAT_WTM_STM 	<ul style="list-style-type: none"> - Lemaitre-based models (MAT_DAMAGE) - Gurson-based models (MAT_GURSON) - MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE
<ul style="list-style-type: none"> - MAT_ADD_EROSION 	<ul style="list-style-type: none"> - MAT_ADD_DAMAGE_GISSMO - MAT_ADD_DAMAGE_DIEM

Von den in dieser Tabelle exemplarisch aufgelisteten MAT-Modellen gibt es meist noch modifizierte oder erweiterte Varianten.

Anhand von verschiedenen Experimenten werden unterschiedliche Spannungszustände untersucht. An den Ergebnissen, die auf S.17 der Quelle [2] gezeigt werden, kann man sehen, dass das GISSMO Modell das reale Versagen numerisch am genauesten für einen großen Bereich an Spannungszuständen beschreibt. Das GISSMO Modell ist komplex, weshalb mehrere Tests gebraucht werden, um das Modell kalibrieren und nutzen zu können. Je nach Problemstellung hat der Anwender zu entscheiden, ob die Verwendung von GISSMO möglich und nötig ist.

Aufbauend auf den Grundlagen aus Kapitel 1 wird in Kapitel 2 der Aufbau des Simulationsmodelles in LS-DYNA ohne Erosion beschrieben. An den entsprechenden Stellen wird durch Verweise auf Kapitel 1 die getroffene Entscheidung begründet.

2. Aufbau des Simulationsmodells in LS-DYNA ohne Erosion

Bevor die Erosionskriterien untersucht werden, muss ein funktionierendes Simulationsmodell vorliegen. Zum einen kann dadurch die Anzahl an Modellfehlern minimiert werden, die die Ergebnisse der Untersuchung beeinflussen oder gar unbrauchbar machen würden. Zum anderen können Versagenskennwerte für Erosionskriterien durch die Auswertung der berechneten Modelle ohne Erosion bestimmt werden, sofern keine Materialkennwerte für das entsprechende Erosionskriterium sinnvoll nutzbar sind. Aus diesem Grund wird im Folgenden beschrieben, wie man das Simulationsmodell in LS-DYNA aufbaut und worauf man dabei achten sollte. Dabei wurde dieses Kapitel, zur besseren Nachvollziehbarkeit, wie eine Anleitung zur Erstellung eines Simulationsmodelles geschrieben.

2.1 Erstellung der Geometrie und Import nach LS-PrePost

Wie in der Aufgabenstellung angegeben, soll ein Simulationsmodell eines einfachen Prägevorgangs, indem ein Keil teilweise in einen Block hineinfährt, erstellt werden. Der Keil bewegt sich senkrecht in y-Richtung in den Block hinein, sodass das Blockmaterial elastisch und plastisch verformt wird. Das Ziel ist, dass das Materialverhalten des Blockes realistisch simuliert werden kann. In Kapitel 2.1 wird kurz beschrieben, wie die Geometrie erstellt wurde und was bei der Vernetzung zu beachten ist. Anschließend wird gezeigt, wie man die Vernetzung nach LS-PrePost importiert. Die importierte Vernetzung mit dem verwendeten Koordinatensystem ist in Abbildung 7 zu sehen.

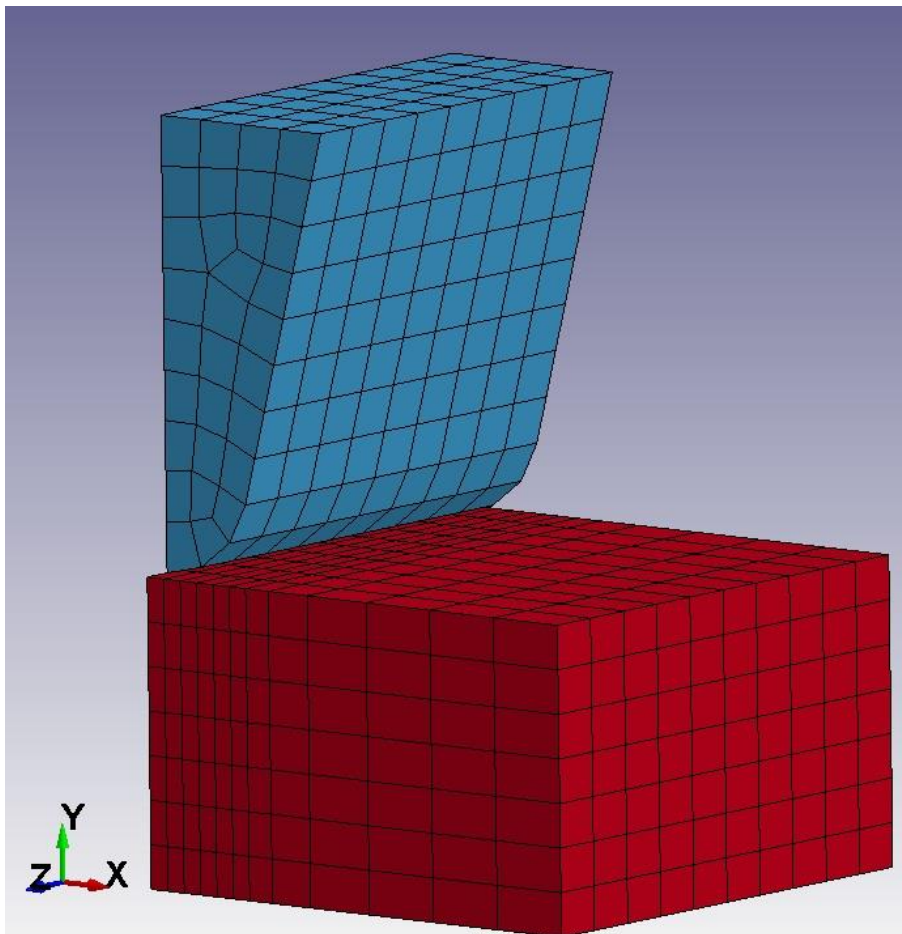


Abbildung 7: Bild der verwendeten Vernetzung mit Koordinatensystem aus LS-PrePost

In blau ist der Keil und in rot ist der Block, als ein Part, dargestellt.

2.1.1 Erstellung der Geometrie und des Netzes in ANSYS

In ANSYS SpaceClaim wird der Block durch eine rechteckige Fläche, die zu einem Quader extrudiert wird, erstellt. Der Quader hat eine Höhe von 3 mm, ist 5 mm breit und 10 mm lang. Der Keil wird auf dieselbe Weise erstellt, nur dass eine dreieckige Fläche extrudiert wird. Der Keil hat eine Breite von 4,4 mm und ist mittig über dem Quader angeordnet, sodass jeweils 0,3 mm Abstand vom Keil zum Quaderrand bestehen. Die Symmetrieebene des Keils liegt in der Symmetrieebene des Blockes, sodass beide Körper aufgrund der Symmetrie halbiert werden können, um im Endeffekt weniger Knoten und Elemente berechnen zu müssen. Dadurch wird ebenso die Länge des Quaders halbiert. Da das Modell in LS-DYNA explizit berechnet wird, wie in Kapitel 1.5.2 erklärt, wird durch eine Reduzierung der Knotenanzahl die Rechenzeit signifikant verringert. Dementsprechend wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit bei allen Simulationen nur das Halbmodell verwendet.

Die Keilspitze wird abgerundet, da bei einem spitz zulaufenden Keil schnell Kontaktprobleme entstehen können, die durch numerische Probleme aufgrund der spitzen Kante auftreten. Der Radius der Rundung beträgt 1 mm. Der Block wird in zwei Parts aufgeteilt und die aneinander liegenden Flächen der Blockparts werden durch die Funktion „Share“ aus SpaceClaim verbunden. Folglich wird das Netz dieser beiden Parts an dieser Stelle ebenso verbunden, sodass eine gemeinsame Vernetzung des Blockes vorliegt. Dadurch, dass der Block aufgeteilt wurde, kann der Part, in den der Keil hineinfährt, feiner vernetzt werden als der andere Blockpart. Auf diese Art und Weise wird die Knoten- und Elementanzahl weiter reduziert. Der Keil liegt direkt auf der Blockoberfläche auf, sodass der Block verformt wird, sobald sich der Keil in negative y-Richtung bewegt. Somit wird keine Rechenzeit für die Bewegung des Keils ohne Kontakt zum Block verschwendet.

Die fertige Geometrie wird anschließend im ANSYS Mechanical vernetzt. Da der Keil nicht näher betrachtet wird, muss dieser nur so fein vernetzt werden, dass die Rundung der Spitze hinreichend genau vernetzt ist, damit der Kontakt gut funktioniert. Es ist währenddessen darauf zu achten, dass keine stark verformten oder keine sehr kleinen Elemente im Netz des Keils vorliegen. Wie in Kapitel 1.5.5 beschrieben, entstehen so sehr kleine Zeitschritte, die die Rechenzeit unnötig verlängern. Die beiden Parts des Blockes werden nur mit Hexaeder-Elementen vernetzt, was über die Funktion „Multizone“ eingestellt wird. Demzufolge entsteht ein gleichmäßiges Netz, das keine ungewollt schmalen Elemente enthält. Die Größe der Elemente kann durch die Funktion „Sizing“ angepasst werden. Für die Netzstudie wurden auf diesem Wege mehrere Modelle erstellt, die unterschiedlich fein vernetzte Blöcke beinhalten.

2.1.2 Geometrieimport in LS-PrePost

Das fertig vernetzte Modell wird als eine -.k-Datei abgespeichert, die von dem Pre- und Postprozessor LS-PrePost, von LS-DYNA, eingelesen werden kann. Die Vernetzung der Geometrie wird durch einlesen der -.k-Datei nach LS-PrePost importiert.

Da der Block aus zwei Parts besteht, erkennt LS-PrePost zusammen mit dem Keil drei Parts. Dies entspricht nicht der Realität und wurde nur für die Erstellung des Netzes benötigt. Es gibt die Möglichkeit, aus zwei Parts einen Part zu machen. Dafür muss man ein bestehendes LS-PrePost Modell mit zwei Parts öffnen und die Elemente der darin enthaltenen Parts löschen. Die Part IDs der gelöschten Elemente bleiben erhalten. Anschließend muss die Geometrie mit drei Parts importiert werden, sodass laut LS-PrePost nun fünf Parts existieren. Nachfolgend können die Elemente des importierten Keils der Part ID des Keils zugeordnet werden, dessen Elemente zuvor gelöscht wurden. Ebenso können die Elemente der beiden importierten Blockteile der Part ID des Blockes zugeordnet werden, dessen Elemente zuvor gelöscht wurden. Somit werden alle Elemente der beiden Blockteile als ein Part identifiziert. Abschließend können die drei leeren Part IDs gelöscht werden. Ab dann kann mit der Eingabe der Modelleigenschaften begonnen werden, was das Thema der nachfolgenden Kapitel ist.

2.2 Section ID Einstellungen und Hourglass-Problem

In dem Modell liegen zwei Part IDs, Keil und Block, vor, denen Elemente zugeordnet sind. Die zugeordneten Elemente erhalten die Eigenschaften, welche mit der entsprechenden Part ID verknüpft werden. Jede Part ID muss mit einer Section ID und einer Material ID verknüpft sein. In diesem Abschnitt wird genauer auf die Einstellmöglichkeiten der Section ID und die daraus resultierenden Folgen eingegangen.

2.2.1 Auswahl der Elementformulierung

In der Section ID muss zuerst ausgewählt werden, was für eine Elementart vorliegt. In dem Simulationsmodell liegen ausschließlich Solid-Elemente vor. Für die Solid-Elemente muss eine Elementformulierung (ELFORM) ausgewählt werden, die von der Art des Solid-Elementes abhängt. Für die im Simulationsmodell verwendeten Hexaeder-Elemente gibt es fünf unterschiedliche Elementformulierungen, die mit den Nummern -2, -1, 1, 2 und 3 angegeben werden. Im Zuge dieser Bachelorarbeit werden lediglich die Elementformulierungen 1 und 2 beachtet.

ELFORM 1:

Bei der Elementformulierung 1 wird die Anzahl der Integrationspunkte des Solid-Elementes reduziert, sodass nur ein Integrationspunkt existiert (wie in Abbildung 5 in Kapitel 1 dargestellt wird). Dadurch ist die Berechnung mit dieser Elementformulierung wesentlich schneller als bei Verwendung eines vollintegrierten Elementes. Trotzdem ist das Ergebnis mit der ELFORM 1 hinreichend genau. Bei großen Verformungen ist diese Elementformulierung sogar stabiler als die der vollintegrierten Elemente. Durch die reduzierte Anzahl an Integrationspunkten tritt das Hourglass-Problem auf, weshalb eine Hourglass-Steuerung verwendet werden muss. Sowohl das Hourglass-Problem als auch die -Steuerung werden in Kapitel 2.2.2 kurz beschrieben.

ELFORM 2:

Bei der Elementformulierung 2 ist das Solid-Element vollintegriert, was bedeutet, dass acht Integrationspunkte existieren. Dementsprechend kann kein Hourglass-Problem auftreten. Aufgrund der höheren Anzahl an Integrationspunkten ist der Rechenaufwand größer und die Berechnung dauert länger. Bei großen Verformungen ist diese Elementformulierung instabiler als ELFORM 1.

Um zu entscheiden, welche Elementformulierung in dem Simulationsmodell verwendet wird, wurde dasselbe Simulationsmodell einmal mit ELFORM 1 und der Hourglass-Steuerung 6 und einmal mit ELFORM 2 berechnet. Anschließend wurde das Netz des Blockes verfeinert und mit beiden Einstellungen nochmal berechnet. Der Vergleich der Rechenzeiten der unterschiedlichen Elementformulierungen ist in Abbildung 8 auf der nächsten Seite zu sehen.

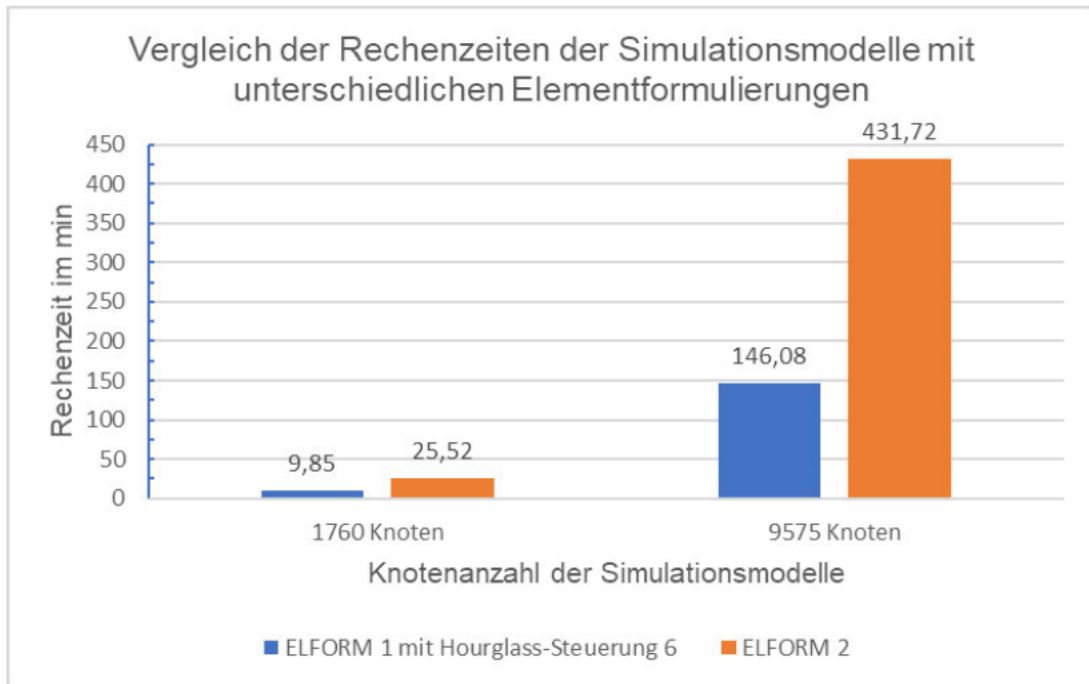


Abbildung 8: Balkendiagramm mit den Rechenzeiten für ELFORM 1 mit Hourglass-Steuerung 6 und ELFORM 2

Weshalb die Hourglass-Steuerung 6 verwendet wurde, wird in Kapitel 2.2.2 begründet. Durch das Balkendiagramm wird deutlich, dass die Berechnung mit der Elementformulierung 1 und der Hourglass-Steuerung 6 wesentlich schneller ist als die Berechnung mit der vollintegrierten Elementformulierung. Dieser Effekt verstärkt sich noch weiter bei der Verfeinerung des Netzes. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Elementformulierungen, wie die innere Energie des Blockes oder die Kontaktkräfte, unterscheiden sich nur geringfügig, wie in Tabelle 3 zu sehen ist.

Tabelle 3: Vergleich der Kontaktkräfte und der inneren Energie des Blockes sowie Angabe der prozentualen Abweichung

	Netz (Knotenanzahl)	ELFORM 1 mit Hourglass-Steuerung 6	ELFORM 2	Abweichung der Ergebnisse voneinander
Kontaktkräfte in y-Richtung	Grob (1760)	0,587 kN	0,530 kN	10,8%
	Fein (9575)	0,569 kN	0,553 kN	2,9%
Innere Energie des Blockes	Grob (1760)	0,0787 J	0,0789 J	0,3%
	Fein (9575)	0,0787 J	0,0793 J	0,8%

Die größere prozentuale Abweichung der Kontaktkräfte bei dem grob vernetzten Simulationsmodell resultiert aus der schlechten Vernetzung. Bei einer besseren Vernetzung des Modelles, kann die Abweichung der Kontaktkräfte toleriert werden. Infolgedessen wird für das Simulationsmodell die Elementformulierung 1 verwendet.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen aus der Quelle [6].

2.2.2 Hourglass-Problem und Hourglass-Steuerung

Das Hourglass-Problem tritt nur bei reduziert integrierten Elementformulierungen auf, wie zum Beispiel der ELFORM 1 der Solid-Elemente. Unter dem Hourglass-Problem versteht man eine nichtphysikalische Verformung der Elemente, wie es in Abbildung 9 zu erkennen ist. So eine Verformung des Blockes würde es in der Realität nicht geben. Die Abbildung stammt aus einer frühen Version des Simulationsmodelles.

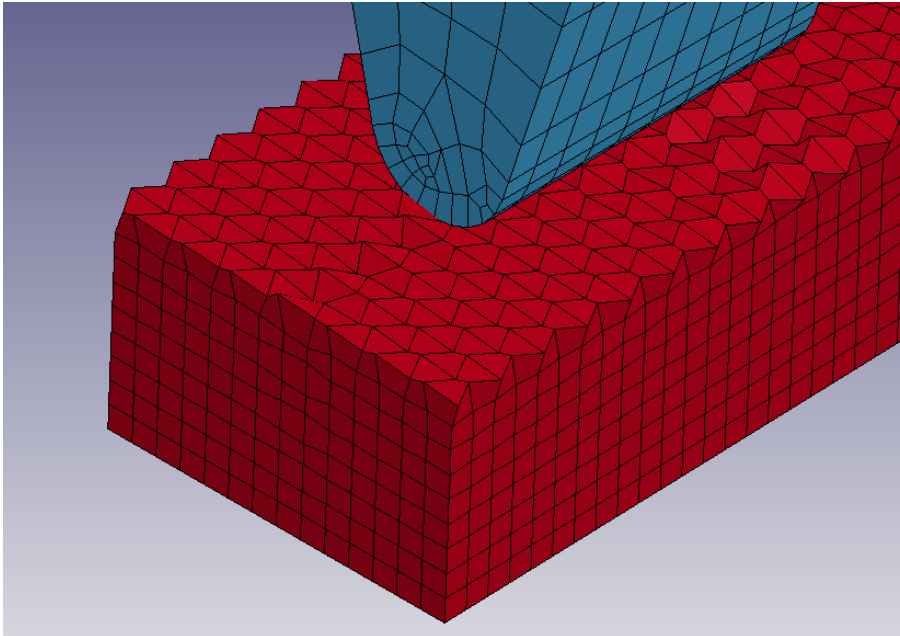


Abbildung 9: Nichtphysikalische Verformungen der Elemente aufgrund des Hourglass-Problems

Diese Verformung erzeugt keine Elementspannungen und nutzt die Freiheitsgrade des reduzierten Elementes aus, bei deren Nutzung der eine Integrationspunkt keine Änderung der Energie des Elementes registrieren kann. Das kann mit Hilfe einer schematischen Darstellung (Abbildung 10) einer zweidimensionalen Verformung besser veranschaulicht werden.

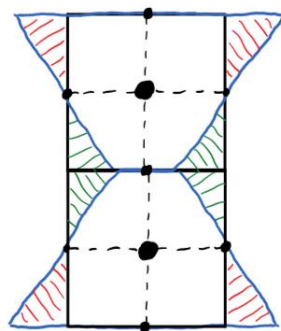


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Verformung beim Hourglass-Problem

Die Teilflächen des verformten Elementes (blau), die die unverformte Elementfläche überragen (rot schraffiert), sind genauso groß wie die Teilflächen, die sich zwischen dem verformten und dem unverformten Element bilden (grün schraffiert). Die Gesamtfläche des Elementes ist somit unverändert. Zudem wird keine Energieänderung wahrgenommen, da sich die Mittelpunkte der Elementseiten trotz Verformung nicht bewegt haben.

Durch die Hourglass-Steuerung kann das Hourglass-Problem stark verringert werden. In LS-PrePost muss dazu zum einen die Hourglass-Energie gemessen werden, was unter CONTROL_ENERGY eingeschaltet werden muss und zum anderen muss unter

CONTROL_HOURLASS die Hourglass-Steuerung ausgewählt werden, die verwendet werden soll. In dieser Bachelorarbeit werden nur die Hourglass-Steuerungen 5 und 6 beachtet.

Die Hourglass-Steuerungen 5 ist für Anwendungsfälle mit niedrigen Geschwindigkeiten vorgesehen, so wie es in dem Simulationsmodell dieser Bachelorarbeit der Fall ist. Dazukommend nutzt die Hourglass-Steuerungen 5 eine exakte Volumenintegration, was bei verzerrten Elementen besser ist.

Die Hourglass-Steuerungen 6 benutzt unter anderem die elastischen Materialeigenschaften des Elementes für die Erstellung einer Hourglass-Steifigkeit, damit sich das Element wie ein vollintegriertes Element verhält. Laut Quelle [6] wird die Hourglass-Steuerung 6 für die meisten Situationen empfohlen.

Für weiterführende Informationen zu den verschiedenen Hourglass-Steuerungen schauen Sie bitte in den bereits angegebenen Quellen oder der Fachliteratur nach.

Um zu überprüfen, ob die Hourglass-Steuerung 6 besser ist als die Hourglass-Steuerung 5, wird dasselbe Modell nur mit unterschiedlicher Hourglass-Steuerung berechnet. Es werden die Rechenzeiten und die beiden Verhältnisse von Hourglass-Energie zu innerer Energie verglichen. In Abbildung 11 ist ein Diagramm zu sehen, das die inneren Energien des Modelles und die Hourglass-Energien der beiden Steuerungen darstellt. Die Rechenzeiten der beiden Modelle unterscheiden sich nicht und fallen folglich als Auswahlkriterien weg.

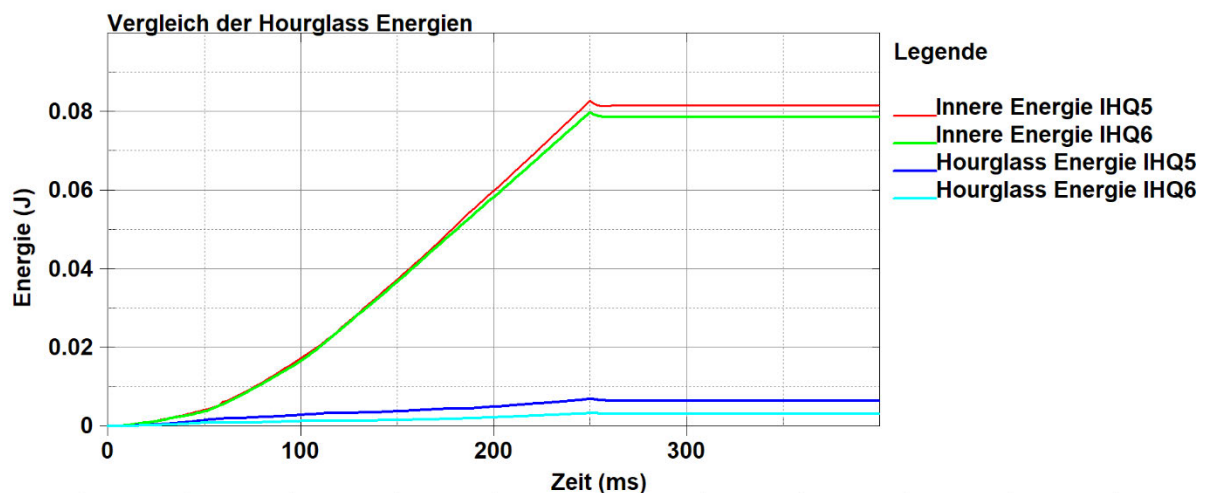


Abbildung 11: Innere Energien des Modelles und Hourglass-Energien in Abhängigkeit der Simulationszeit

Aus Quelle [10] stammt die Faustregel, dass die Hourglass-Energie kleiner als 10% der inneren Energie sein muss. Diese Regel gilt sowohl für das ganze System (glstat) als auch für jeden einzelnen Part (matsum). In dem Simulationsmodell der Bachelorarbeit kann nur der Block eine Hourglass-Energie besitzen, da der Keil sich nicht verformt und somit keine Hourglass-Energie besitzen kann. Folglich sind die Werte für den Block identisch mit den Werten für das gesamte System.

Bei der Hourglass-Steuerung 6 ist die Hourglass-Energie kleiner als 5% der inneren Energie. Bei der Hourglass-Steuerung 5 ist die Hourglass-Energie größer als 5% der inneren Energie, wie aus Abbildung 11 abgeschätzt werden kann. Deswegen wird in dem Simulationsmodell dieser Bachelorarbeit die Hourglass-Steuerung 6 verwendet, wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen aus den Quellen [6] und [10].

2.3 Implementierung des realen Materialverhaltens in LS-DYNA

Nachdem die Section ID im vorhergehenden Kapitel ausgefüllt wurde, wird an dieser Stelle die Material ID jeweils für den Keil und den Block erstellt. Zuerst wird in der Material ID des Keils das Materialverhalten ausgewählt und anschließend werden die Materialkennwerte eingegeben. Ebenso wird die Material ID des Blockes definiert, wobei hierbei nochmal genauer auf das plastische Verhalten eingegangen wird.

2.3.1 Materialverhalten des Keils

Der Keil soll aus Stahl bestehen und sich während der Simulation nicht verformen. Da der Block aus Aluminium besteht und somit wesentlich weicher als der Stahl-Keil ist, kann der Keil vereinfachend als starr angenommen werden. Dadurch liegt der Fokus des Simulationsmodelles nur auf der Verformung des Blockes, dessen Materialverhalten mit Hilfe der Erosionskriterien realistisch dargestellt werden soll.

In LS-PrePost muss zuerst das gewünschte Materialverhalten (MAT) ausgewählt werden. Da der Keil starr sein soll, wird das Materialverhalten RIGID, MAT 020, ausgewählt. Anschließend müssen die für Stahl entsprechenden Kennwerte eingegeben werden.

Dabei ist auf das Einheitensystem zu achten, welches man benutzt. In LS-PrePost werden keine Einheiten angezeigt, weshalb man anhand der verwendeten Einheiten bei der Geometrieerstellung und mit Hilfe einer Einheitentabelle die restlichen Einheiten selbst bestimmen muss. Da die Geometrie in mm erstellt wurde, ergibt sich laut Quelle [16] das verwendete Einheitensystem, welches in Tabelle 4 dargestellt wird.

Tabelle 4: Verwendetes Einheitensystem in LS-PrePost

	Masse	Länge	Zeit	Kraft	Spannung	Energie
Einheit	kg	mm	ms	kN	GPa	J (kN*mm)

Die notwendigen Materialkennwerte des verwendeten Stahls (Tabelle 5) lauten dann entsprechend des Einheitensystems:

Tabelle 5: Materialkennwerte des allgemeinen Stahls

	Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl
Wert	7,85e-6 kg/mm	207 GPa	0,3

Diese werden in RIGID eingegeben. Um die Rechenzeit weiter zu reduzieren, wird in diesem Simulationsmodell Massenskalierung, wie in Kapitel 1.5.7 beschrieben, angewendet. Dazu wird der Wert der Dichte um den Faktor 100 vergrößert. Dies wird ebenfalls bei der Eingabe der Materialkennwerte des Blockes beachtet, um den es in Kapitel 2.3.2 geht.

2.3.2 Materialverhalten des Blockes

Wie bereits in Kapitel 1.2.1 angesprochen, besteht der Block aus Aluminium. Der Aluminium-Block wird als isotrop angenommen und soll sich unter Belastung erst elastisch und anschließend plastisch verformen, sowie es in der Realität üblich ist. In Kapitel 1.2.1 wurde das physikalische Werkstoffverhalten beschrieben, welches zum Teil durch die Plastizitätstheorie aus Kapitel 1.2.2 mathematisch umgesetzt werden kann. Für den Aluminium-Block wird eine isotrope Verfestigung angenommen, die ebenfalls in Kapitel 1.2.2 erklärt wird. Das Materialverhalten PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, MAT 024, erfüllt die zuvor genannten Anforderungen an das Werkstoffverhalten. In Kapitel 1.6.1 wurden die Eigenschaften von MAT 024 bereits erwähnt.

Dementsprechend wird in LS-PrePost in der Material ID des Blockes das Materialverhalten `PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY` ausgewählt. Anschließend müssen die Materialkennwerte des verwendeten Aluminiums eingegeben werden. Für den Block wird EN AW - Al Mg3, eine Aluminium-Knetlegierung für Karosserieteile, verwendet, deren Materialkennwerte in Tabelle 6 entsprechend des Einheitensystems aufgeführt werden.

Tabelle 6: Materialkennwerte von EN AW - Al Mg3 von S.175 aus [7]

	Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl	Dehngrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
Wert	2,70e-6 kg/mm	70 GPa	0,3	0,09 GPa	0,19 GPa	16 %

Die Materialauswahl basiert nicht auf dem ehemaligen Kundenprojekt der Firma KONSCHA. Das Material wurde aufgrund der Kennwerte, die als sinnvoll für diesen Anwendungszweck angesehen wurden, ausgewählt. Die Werte der Zugfestigkeit und der Dehngrenze wurden innerhalb des in der Quelle [7] angegebenen Bereiches nahe der unteren Grenze festgelegt. Die Dichte, das E-Modul und die Querkontraktionszahl können direkt in MAT 024 eingegeben werden. Der Wert der Dichte wird hier ebenfalls um den Faktor 100 vergrößert, damit aufgrund der Massenskalierung die Rechenzeit weiter reduziert wird.

Die anderen Materialkennwerte müssen je nach Art des plastischen Verhaltens eingegeben werden. In MAT 024 gibt es drei Möglichkeiten, das plastische Verhalten zu definieren, die im Folgenden einzeln beschrieben werden. Man unterscheidet zwischen dem Materialverhalten linear-elastisch-ideal-plastisch, linear-elastisch-linear-plastisch und linear-elastisch-nichtlinear-plastisch, die in Abbildung 12 grafisch dargestellt werden.

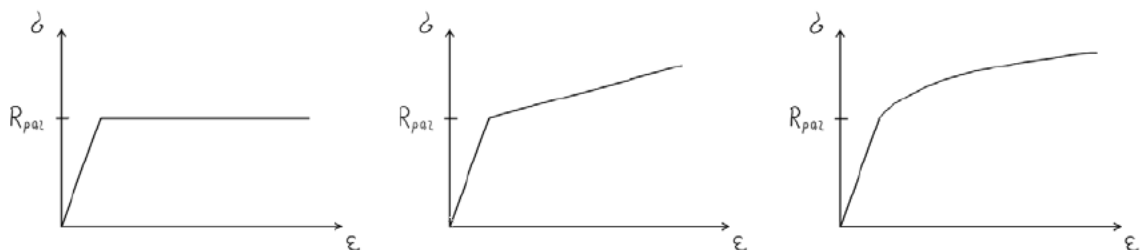


Abbildung 12: Varianten des plastischen Materialverhaltens in MAT 024

Linear-elastisch-ideal-plastisches Materialverhalten:

Die plastische Verformung tritt auf, wenn die Fließbedingung die Dehngrenze erreicht. Bei ideal-plastischem Verhalten verfestigt sich das Material nicht, sodass die Dehngrenze konstant bleibt, wie links in Abbildung 12 zu sehen ist. In LS-PrePost muss in diesem Fall in MAT 024 nur der Wert der Dehngrenze bei SIGY eingetragen werden.

Linear-elastisch-linear-plastisches Materialverhalten:

Die plastische Verformung tritt auf, wenn die Fließbedingung die Dehngrenze erreicht. Bei linear-plastischem Verhalten verfestigt sich das Material linear, sodass die Dehngrenze bei weiterer Verformung linear ansteigt, wie mittig in Abbildung 12 zu sehen ist. Dazu muss die Steigung der Geraden, der Verfestigungskoeffizient H aus Gleichung (1.1), berechnet werden. Der Verfestigungskoeffizient ist gleich dem Tangentenmodul ET , das nach Gleichung (2.1) näherungsweise berechnet werden kann. A ist die Bruchdehnung.

$$ET = \frac{R_m - R_{p0,2}}{A - \frac{R_{p0,2}}{E}} \quad (2.1)$$

Unter der Verwendung der Materialkennwerte aus Tabelle 6 ergibt sich folgender Wert für ET :

$$ET = \frac{0,19 \text{ GPa} - 0,09 \text{ GPa}}{0,16 - \frac{0,09 \text{ GPa}}{70 \text{ GPa}}} = 0,63 \text{ GPa} \quad (2.2)$$

In LS-PrePost muss in diesem Fall in MAT 024 der Wert der Dehngrenze bei SIGY und der Wert des Tangentenmodules bei ETAN eingetragen werden.

Linear-elastisch-nichtlinear-plastisches Materialverhalten:

Die plastische Verformung tritt auf, wenn die Fließbedingung die Dehngrenze erreicht. Bei nichtlinear-plastischem Verhalten verfestigt sich das Material nichtlinear. Das bedeutet, dass die Dehngrenze bei weiterer Verformung nach einer materialspezifischen Kurve ansteigt, welche aus Versuchen ermittelt werden muss. Dies ist rechts in Abbildung 12 zu sehen. In LS-PrePost muss in diesem Fall weder bei SIGY noch bei ETAN ein Wert eingetragen werden. Stattdessen muss bei LCSS eine neue Kurve erstellt werden, die das materialspezifische Verhalten nachbildet. Wenn ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm des verwendeten Materials vorliegt, muss darauf geachtet werden, dass die wahren Spannungen und die wahren Dehnungen abgebildet werden.

Der Grund für diese Einschränkung ist der Kurvenverlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms mit technischer Spannung und technischer Dehnung, bei dem die Kurve zum Ende hin wieder abfällt, da sich der Spannungsquerschnitt zum Ende hin verkleinert, wodurch der letzte Teil der Messung verfälscht wird.

Die Messpunkte des vorliegenden Diagramms können in LS-PrePost hochgeladen werden. Dabei muss kontrolliert werden, dass der erste Messpunkt einen Dehnungswert von null hat und dass die Steigung zwischen dem vorletzten und dem letzten Punkt positiv, sprich steigend, ist, da diese Steigung vom Programm extrapoliert wird. Auf diese Art und Weise wird das Material bei fortschreitender Dehnung weiter verfestigt. Wenn eine negative Steigung vorliegt, dann tritt dasselbe Verhalten wie bei dem Diagramm mit technischer Spannung und technischer Dehnung auf. Dort wird das Material wieder entfestigt, was physikalisch falsch ist.

Da für das verwendete Material keine Messdaten zur Verfügung stehen, wird in dem Simulationsmodell der Bachelorarbeit ein linear-elastisch-linear-plastisches Materialverhalten verwendet, um die physikalische Verfestigung des Materials nachzubilden. Folglich ist die Material ID des Blockes vollständig definiert, ebenso wie die Material ID des Keils. Infolgedessen sind die beiden Part IDs mit der Section ID und der jeweils passenden Material ID verknüpft, sodass die Randbedingungen des Simulationsmodells im nächsten Kapitel erstellt werden können.

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen über MAT 024 stammen zum Teil aus der Quelle [3].

2.4 Erstellung der Randbedingungen

In Kapitel 2.4 wird zuerst der Block gelagert und anschließend die Bewegung und die Lagerung des Keils beschrieben.

2.4.1 Lagerung des Blockes

Der Block soll mit Hilfe von SPC-Sets gelagert werden, wofür Knoten-Sets definiert werden müssen. Die Knoten der Knoten-Sets können unter CreEnt -> Set Data -> *SET_NODE manuell ausgewählt und in einem Set abgespeichert werden. Der Block soll in alle drei translatorischen Richtungen gelagert werden, wobei die Symmetrie des Halbmodelles in x-Richtung beachtet werden muss. Die Symmetrie wird dadurch beachtet, dass alle Knoten des Blockes, die in der Symmetrieebene liegen, in x-Richtung gelagert werden. Aus diesen Knoten besteht das erste Knoten-Set des Blockes. Ein weiteres Knoten-Set besteht aus allen Knoten der Blockunterseite, mit Ausnahme der Knoten, die in der Symmetrieebene liegen. Dieses Knoten-Set wird in y-Richtung gelagert. Die Knoten, die in z-Richtung gelagert werden sollen, befinden sich im dritten Knoten-Set, das in Abbildung 13 zu sehen ist.

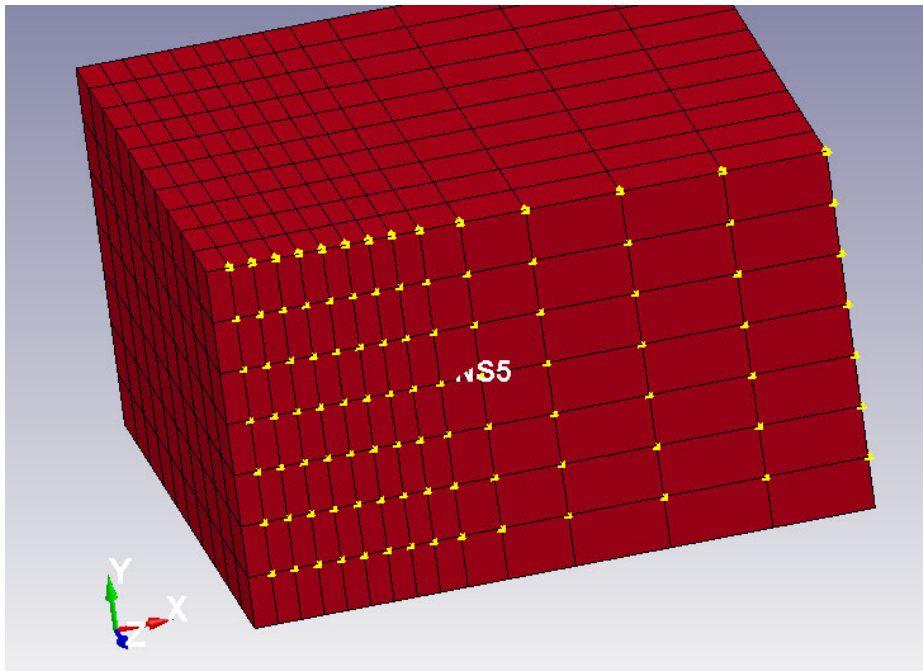


Abbildung 13: Knoten-Set (in Gelb) des Blockes, das in z-Richtung gelagert wird

Es ist zu erkennen, dass die unterste Reihe und die Reihe am linken Rand nicht ausgewählt wurden. Dies ist wichtig, da ein Knoten nur die Eigenschaften eines SPC-Sets besitzen kann. Wenn ein Knoten Teil von zwei SPC-Sets wäre, dann würde dieser Knoten laut Quelle [18] nur die Eigenschaften des SPC-Sets besitzen, das als letztes auf diesen Knoten angewendet wurde. Die Eigenschaften des Knotens werden demnach überschrieben.

Nachdem die drei Knoten-Sets definiert und keine Knoten mehrfach ausgewählt wurden, kann jedes dieser Knoten-Sets bei der Erstellung der SPC-Sets verwendet werden. Die SPC-Sets findet man unter dem Keyword „BOUNDARY“. Bei jedem SPC-Set wird zuerst das zu lagernde Knoten-Set ausgewählt und anschließend angegeben, welche der drei translatorischen und welche der drei rotatorischen Freiheitsgrade gesperrt werden sollen. Je nach Knoten-Set wird einmal die x-Richtung, einmal die y-Richtung und einmal die z-Richtung gesperrt. Somit ist der Block in alle drei Richtungen gelagert. Dadurch, dass jeweils nur eine Fläche des Blockes in eine Richtung gelagert wird, können keine Zwangsspannungen innerhalb des Blockes aufgrund der Lagerung entstehen.

2.4.2 Lagerung und Bewegung des Keils

Da der Keil die Materialeigenschaft RIGID besitzt, kann und darf dieser Part nur über die Material ID gelagert werden. Beim Öffnen der Material ID des Keils kommen wir zu MAT 020 (RIGID), wo bereits die Dichte, das E-Modul und die Querkontraktionszahl von Stahl eingegeben wurden. In der zweiten Zeile muss CMO auf 1 gestellt werden, sodass die Lagerung im Koordinatensystem des Simulationsmodelles stattfindet. Des Weiteren muss CON1 auf 6 gestellt werden, damit der Keil in x- und z-Richtung gelagert wird. Durch die Lagerung in x-Richtung wird zudem die Symmetrie des Keils beachtet. CON2 muss auf 7 gestellt werden, damit die Rotation um alle drei Achsen gesperrt ist. Folglich sind fünf von sechs Freiheitsgraden des Keils gesperrt.

Wenn der Keil stattdessen, wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben, mit SPC-Sets gelagert werden würde, wäre der Keil überbestimmt und es könnten Probleme auftreten. Bei MAT 020 wird der Mittelpunkt der Geometrie gelagert, auf den sich dann alle Knoten der Geometrie beziehen. Wenn zusätzlich auf die Knoten weitere Bedingungen durch die SPC-Sets aufgebracht werden, ergibt sich die zuvor erwähnte Überbestimmtheit. Diese Informationen stammen aus der Quelle [18].

Die translatorische Bewegung in y-Richtung wurde nicht gesperrt, da sich der Keil in dieser Richtung in den Block hineinbewegen soll. Die Bewegung, die der Keil vollführen soll, wird unter PRESCRIBED_MOTION_RIGID eingegeben. Diese Eingabemöglichkeit findet man unter dem Keyword „BOUNDARY“. In PRESCRIBED_MOTION_RIGID wird mit DOF der Freiheitsgrad ausgewählt, indem die Bewegung stattfinden soll. Für eine Bewegung in y-Richtung muss DOF gleich 2 sein. Mit VAD gleich 2 wird angegeben, dass die Bewegung als Verschiebung vorgeschrieben wird. Auf diese Weise kann immer die exakte Position des Keils in Abhängigkeit von der Simulationszeit bestimmt werden. Unter LCID wird eine neue Kurve definiert, die die Verschiebung des Keils in Abhängigkeit von der Simulationszeit angibt. Es reicht, wenn die Verschiebung des Keils zu drei Zeitpunkten angegeben wird: Startpunkt, Zeitpunkt der größten Eindringtiefe und Endpunkt. In Abbildung 14 werden drei Beispielwerte und das daraus resultierende Verschiebungsdiagramm, das in LS-PrePost geplottet wurde, dargestellt.

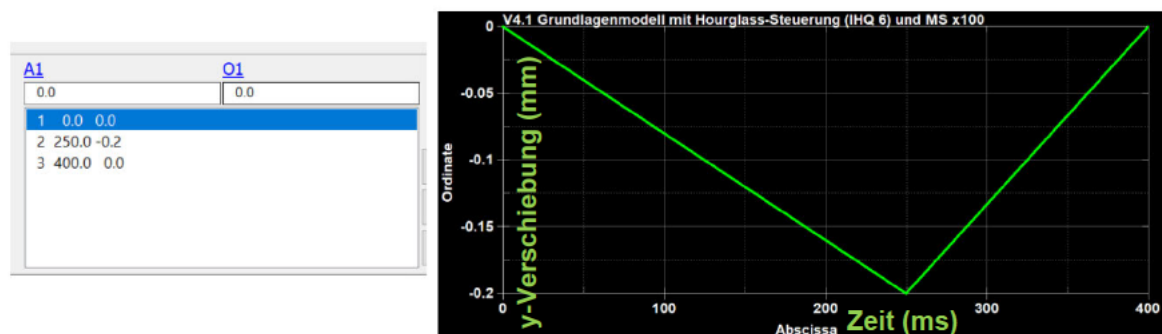


Abbildung 14: Beispielhaftes Verschiebungsdiagramm des Keils

Die Eindringtiefe kann geringfügig variiert werden. Währenddessen muss auf die damit zusammenhängende Simulationszeit geachtet werden, damit die Geschwindigkeit, mit der sich der Keil bewegt, nicht zu groß wird. Bei zu großen Geschwindigkeiten funktioniert die Massenskalierung nicht mehr und andere Simulationsprobleme können auftreten. Außerdem darf nicht vergessen werden, dass der Keil wieder ein Stück zurückfahren muss, sodass nur die plastische Verformung des Blockes bleibt.

In der Bilderstrecke aus Kapitel 2.6 wird die Bewegung des Keils, der in den Block eindringt, abgebildet. Bevor der Keil den Block verformen kann, muss ein Kontakt zwischen den beiden Parts erstellt werden. Dies wird im nächsten Kapitel erklärt.

2.5 Kontaktdefinitionen

An dieser Stelle wird der Kontakt zwischen dem Keil und dem Block erstellt und die verwendeten Kontaktparameter werden begründet.

2.5.1 Segmenterstellung und Kontaktauswahl

Der Schritt der Segmenterstellung kann, wenn der Kontakt über die Parts definiert werden soll, übersprungen werden. Zur Vollständigkeit wird die Segmenterstellung hier dennoch kurz beschrieben. Unter CreEnt -> Set Data -> *SET_SEGM können die Elementflächen ausgewählt werden, die ein Segment Set ergeben sollen. Für den Kontakt muss zum einen die Blockoberseite als ein Segment Set und zum anderen die Außenseite des Keils, die die abgerundete Spitze enthält, als ein weiteres Segment Set erstellt werden.

Der Kontakt des Simulationsmodelles ist abhängig davon, ob mit Erosion gerechnet wird oder ohne. In Kapitel 3 wird die Kontaktauswahl für das Modell mit Erosion beschrieben. Für das Modell ohne Erosion wird vereinfachend der Kontakt AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE verwendet. Bei einem Kontakt muss immer ein Master und ein Slave ausgewählt werden. Laut Quelle [18] wird immer die Kontaktseite, die feiner vernetzt ist, als Slave ausgewählt. Somit ist in dem Simulationsmodell dieser Bachelorarbeit immer der Block der Slave des Kontaktes. Dies gilt auch bei dem Modell mit Erosion. Unter SSTYP und MSTYP kann ausgewählt werden, ob die zuvor erstellten Segment Sets oder zum Beispiel die Parts als Ganzes zur Kontaktdefinition verwendet werden sollen. Laut Quelle [18] soll dadurch kein Unterschied entstehen. Innerhalb dieser Bachelorarbeit werden die Parts zur Kontakterstellung verwendet, da auf diese Weise bisher keine Probleme aufgetaucht sind. Der aufgetauchte Fehler bei der Verwendung der Segment Sets wird in Kapitel 2.7 kurz beschrieben. Die weiteren Kontaktparameter, die einen realistischeren Kontakt erzeugen, werden im nachfolgenden Kapitel behandelt.

2.5.2 Verwendung der Kontaktparameter

In dem Simulationsmodell werden die Kontaktparameter für den Reibungskoeffizienten und die viskose Dämpfung verwendet. Außerdem wird die Kontaktmethode des AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE Kontaktes geändert. Die verwendeten Werte und der Grund der Nutzung dieser Parameter werden im Folgenden einzeln erläutert.

Reibungskoeffizient:

Der Reibungskoeffizient des Kontaktes kann in LS-DYNA durch die Gleichung (2.3) berechnet werden.

$$\mu = F_D + (F_S - F_D) \cdot e^{-DC \cdot |v_{rel}|} \quad (2.3)$$

Diese Gleichung entstammt der Quelle [5] und ist von den drei Parametern F_D , F_S und DC sowie der relativen Geschwindigkeit abhängig. Vereinfachend soll in dem Simulationsmodell dieser Bachelorarbeit der Reibungskoeffizient unabhängig von der relativen Geschwindigkeit sein. Dazu wird DC gleich null gesetzt, sodass der Exponent der e-Funktion wegfällt und die e-Funktion den Wert eins annimmt.

$$\mu = F_D + (F_S - F_D) \cdot e^{0 \cdot |v_{rel}|} = F_D + F_S - F_D = F_S \quad (2.4)$$

Der Parameter F_D hebt sich auf und muss demnach nicht angegeben werden. Daraus folgt, dass der Parameter F_S gleich dem Reibungskoeffizienten μ ist. Aus diesem Grund muss nur der Wert F_S im Kontakt angegeben werden.

In dieser Bachelorarbeit wird vereinfachend der Wert 0,1 für F_S angenommen, der in etwa dem Wert der Gleitreibungszahl von Stahl auf Stahl entspricht. Anhand einer kleinen Parameterstudie, in der der Wert von F_S variiert wird, kann gezeigt werden, dass der veränderte Reibungskoeffizient keine großen Auswirkungen auf das Ergebnis der Simulation

hat. In Abbildung 15 sind die Kontaktkräfte zwischen Keil und Block für die verschiedenen Reibungskoeffizienten dargestellt.

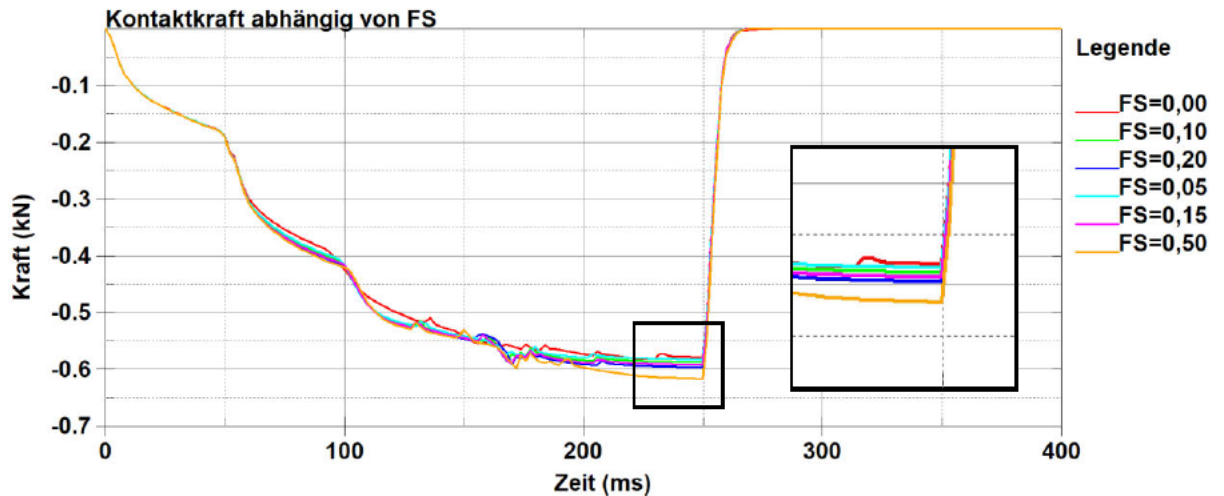


Abbildung 15: Kurven der Kontaktkräfte abhängig vom Reibungskoeffizienten

Es ist zu erkennen, dass die Kontaktkräfte etwas größer werden, sobald der Reibungskoeffizient größer wird. Die Form der Kurven verändert sich nur geringfügig. Wenn nötig, könnte der reale Reibungskoeffizient für die verwendeten Materialien experimentell ermittelt werden. Innerhalb dieser Bachelorarbeit wird weiterhin der Wert 0,1 für F_S verwendet.

Viskose Dämpfung:

Die viskose Dämpfung wird in Kontakten verwendet, damit sich diese weniger sprunghaft verhalten. Dieses Verhalten kann gut an der Kontaktkraft erkannt werden. Dazu wird in Abbildung 16 dem Verlauf der Kontaktkraft mit einer viskosen Dämpfung von 10% der Kontaktkraftverlauf ohne viskose Dämpfung gegenübergestellt.

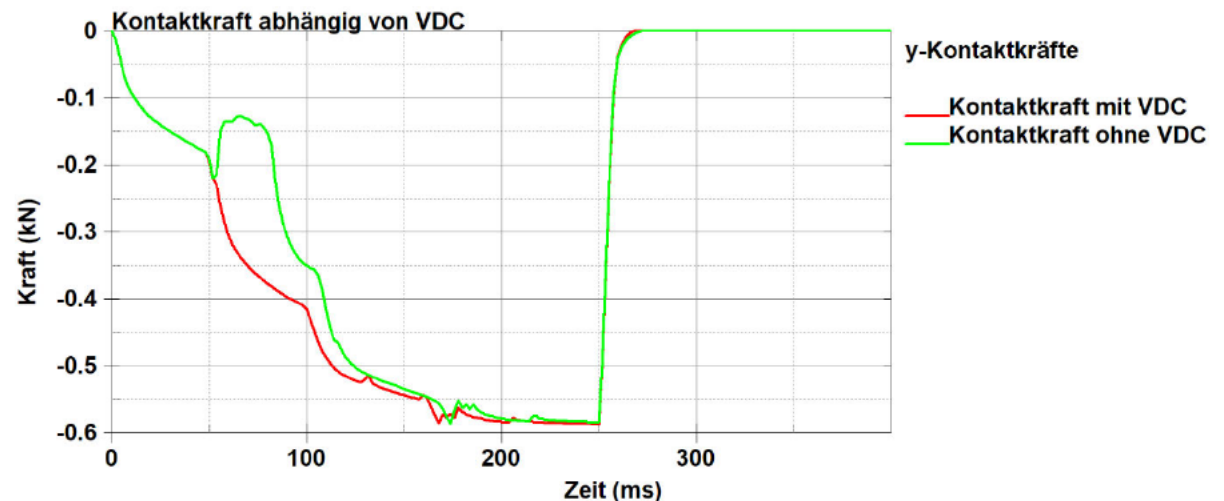


Abbildung 16: Kontaktkraftverlauf mit und ohne viskose Dämpfung

Die Sprunghaftigkeit des Kontaktes basiert auf der verwendeten Kontaktmethode, der Penalty-Methode. Bei der Penalty-Methode findet erst eine Durchdringung der Kontaktflächen statt, die durch „plötzliches“ Einfügen von Federelementen wieder rückgängig gemacht wird. Das „plötzliche“ Einfügen der Federn und das damit verbundene Zurückstellen der Durchdringung erzeugt sprunghafte Kräfte. Der Wert von 10% für die viskose Dämpfung wurde von Quelle [9] empfohlen und wird in dem Simulationsmodell dieser Bachelorarbeit verwendet.

Änderung der Kontaktmethode:

Durch das Häkchen bei A kann die Kontaktmethode des AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE Kontaktes geändert werden. Dazu muss bei SOFT die entsprechende Zahl ausgewählt werden. Laut Quelle [9] ist der Algorithmus der Pinball-Segment-Methode robuster als der Algorithmus der Penalty-Methode, weshalb die Pinball-Segment-Methode in dieser Bachelorarbeit verwendet wird. Dazu muss bei SOFT der Wert 2 ausgewählt werden. Die weiteren Einstellmöglichkeiten können so gelassen werden, wie sie standartmäßig sind. Die Funktionsweise der Pinball-Segment-Methode ähnelt der bereits beschriebenen Funktionsweise der Penalty-Methode.

Die letzten, weniger umfangreichen Einstellungen des Simulationsmodelles werden in Kapitel 2.6 beschrieben.

2.6 Abschließende Einstellungen

In diesem Kapitel werden die abschließenden Einstellungen des Simulationsmodelles erläutert. Anschließend wird durch eine Bilderstrecke das Ergebnis der Berechnung des fertiggestellten Simulationsmodelles veranschaulicht.

Nachdem die Section ID, die Material IDs, die Randbedingungen und der Kontakt definiert wurden, muss der Simulation gesagt werden, wann die Berechnung abgeschlossen ist. Dazu muss unter CONTROL die Option TERMINATION ausgewählt werden. Dort kann unter ENDTIM die Simulationszeit angegeben werden, bei der die Berechnung beendet wird. Da der Keil sich bis zur Simulationszeit 400 bewegt, wurde bei ENDTIM ebenfalls 400 eingetragen. Bei einer Veränderung der Bewegung des Keils kann es dazu kommen, dass sich dieser länger oder kürzer bewegt. Infolgedessen muss ENDTIM angepasst werden. Grundsätzlich kann ENDTIM einen beliebigen Wert annehmen, sodass die Berechnung, wenn gewünscht, auch während der Keilbewegung beendet werden kann.

Mit CONTROL_TIMESTEP kann die aus Kapitel 1.5.6 bekannte Courant-Zahl unter TSSFAC manuell eingetragen werden. Standartmäßig verwendet LS-PrePost die Courant-Zahl 0,9, die den nach Kapitel 1.5.5 berechneten kritischen Zeitschritt des Simulationsmodelles verkleinert. Diese Option kann benutzt werden, wenn der kritische Zeitschritt des Modelles für den entsprechenden Anwendungsfall noch zu groß ist, wodurch numerische Fehler entstehen.

Damit die gewünschten Ergebnisse der Berechnung von LS-PrePost ausgegeben werden, müssen diese unter DATABASE ausgewählt werden. Aus dem Simulationsmodell dieser Bachelorarbeit werden folgende Ergebnisse ausgegeben:

- Der BINARY_D3PLOT stellt die Simulation visuell dar. Unter NPLTC kann die gewünschte Anzahl an Bildern eingegeben werden.
- In EXTENT_BINARY muss unter STRFLG der Wert eins stehen, damit der Dehnungstensor ausgegeben wird.
- In ASCII_option müssen BNDOUT, GLSTAT, MATSUM, NCFORC, NODFOR, RCFORC, RWFORC, SPCFORC und SWFORC ausgewählt werden, damit alle Kräfte und alle Energien ausgegeben werden. (Einige dieser Kräfte spielen in dem Simulationsmodell der Bachelorarbeit keine Rolle. Grundsätzlich ist es nicht verkehrt, mehrere Optionen auszuwählen, die man ggf. brauchen könnte. Denn wenn nicht ausgewählte Optionen gebraucht werden, muss die komplette Simulation neu berechnet werden, damit diese Optionen ausgegeben werden.)

Das fertig erstellte Simulationsmodell kann abgespeichert und geschlossen werden. Die abgespeicherte Datei wird mit LS-Run geöffnet und berechnet. Die ausgegebenen Ergebnisse können wieder mit LS-PrePost geöffnet werden.

Die Bilder der Bilderstrecke in Abbildung 17 kommen aus der D3PLOT-Datei des berechneten Simulationsmodelles und sollen den simulierten Prägevorgang veranschaulichen. In der oberen Reihe wird das Simulationsmodell zu Beginn, zum Zeitpunkt der größten Eindringung des Keils in den Block und zum Ende der Berechnung gezeigt. In der Reihe darunter wird zu denselben drei Zeitpunkten farblich dargestellt, wo Zug (dunkelblau) oder Druck (hellgrün und gelb) im Block auftritt. Die Farbskala ist bei allen drei Zeitpunkten identisch.

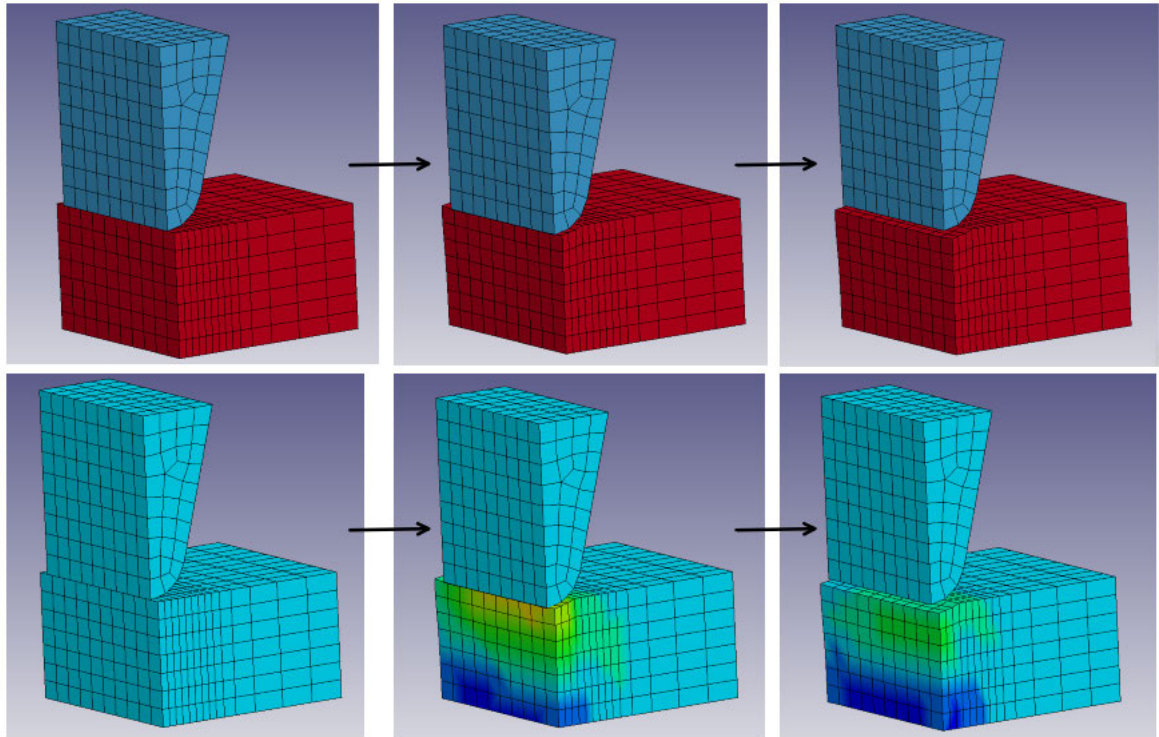


Abbildung 17: Kurze Bilderstrecke des berechneten Simulationsmodelles

Im nächsten Kapitel wird kurz auf weitere Fehler bei der Simulationsmodellerstellung eingegangen.

2.7 Fehler und deren Folgen

In den vorhergehenden Kapiteln wurden bereits einige Hinweise gegeben und Verbesserungen durchgeführt, die aus gemachten Fehlern resultierten. Zum Teil wurde auf den gemachten Fehler, an der entsprechenden Stelle, eingegangen oder auf dieses Kapitel verwiesen. In diesem Abschnitt werden folgende Fehler kurz behandelt: Der Kontaktfehler bei der Verwendung der Segment Sets, die falsche Lagerung des Keils und die Einheitenfehler beim Materialverhalten.

Bei der Verwendung der Segment Sets zur Kontaktdefinition hat die innere Energie des Blockes einen Sprung gemacht, der physikalisch nicht zu erklären war. Diese Problem ist nur bei dem feiner vernetzten Block aufgetreten. Bei der Verwendung der Parts zur Kontaktdefinition des feiner vernetzten Blockes ist die innere Energie des Blockes stetig angestiegen. Auf diese Weise wurde das Problem behoben.

Der Grund, weshalb der RIGID Keil nicht durch SPCs gelagert werden darf, wurde in Kapitel 2.4.2 ausführlich beschrieben. Dieser Fehler hatte in diesem Fall keine sichtbaren Folgen, da weder die innere Energie des Blockes noch die Kontaktkräfte zwischen Block und Keil ein auffälliges Verhalten gezeigt haben. Ebenfalls hat sich der Block wie erwartet verformt. Infolgedessen haben alle berechneten Simulationsmodelle ohne Erosion diesen Fehler. Die Ergebnisse der Verformung und der Kontaktkräfte aus LS-DYNA stimmen mit den Ergebnissen des Vergleichsmodelles aus ANSYS, das mit der impliziten Zeitintegration berechnet wurde, überein. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass der Lagerungsfehler in diesem Fall keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte.

Der einzige Hinweis, durch den dieser Fehler entdeckt wurde, war das leichte Wackeln des Keils beim Hochfahren. Bei der Erstellung der Simulationsmodelle mit Erosion wurde der Keil vorschriftsmäßig gelagert, sodass dieser Fehler keine Auswirkungen auf die Untersuchung der Erosionskriterien hat.

Bei der erstmaligen Verwendung des linear-elastisch-linear-plastischen Materialverhaltens wurde der Wert für das Tangentenmodul ET in MPa berechnet und unter ETAN eingetragen. Folglich war das Materialverhalten falsch und der Kontakt hat nicht richtig funktioniert. Die Simulationsergebnisse sind somit unbrauchbar. Wenn der Wert des Tangentenmoduls ET in GPa unter ETAN eingegeben wird, dann funktioniert das Simulationsmodell einwandfrei. Dadurch das in LS-PrePost keine Einheiten stehen, können Einheitenfehler schnell passieren.

Wie bei der Lagerung des Keils gesehen, können manchmal unbemerkt Fehler im numerischen Modell entstehen, die weder zum Abbruch der Berechnung noch zu auffälligen Verformungen des Materials oder zu nichtphysikalischen Kurvenverläufen führen. Deshalb sollte die numerische Berechnung, wenn möglich, durch reale Experimente, analytische Berechnungen oder durch alternative, unabhängige Methoden verifiziert werden. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde das Simulationsmodell aus LS-DYNA durch ein Vergleichsmodell aus ANSYS verifiziert.

In Kapitel 3 wird das leicht veränderte Simulationsmodell für die Untersuchung der Erosionskriterien beschrieben und im Anschluss daran werden die in LS-DYNA gängigen Erosionskriterien vorgestellt.

3. Erweiterung des Simulationsmodells mit Erosion und Untersuchung der Erosionskriterien

Nachdem in Kapitel 2 das Simulationsmodell ohne Erosion aufgebaut und erklärt wurde, wird in diesem Kapitel gezeigt, welche Einstellungen man bei Verwendung von Erosion ändern muss und wie man die Erosionskriterien ergänzt. Zudem wird kurz auf die verfügbaren Ressourcen eingegangen, die für die Berechnung genutzt werden konnten. Anschließend wird das Vorgehen zur Untersuchung der Erosionskriterien beschrieben.

3.1 Verfügbare Ressourcen für die Berechnungen

Die für diese Bachelorarbeit benötigten Berechnungen der Simulationsmodelle wurden in den Rechnerräumen der HAW Hamburg am Berliner Tor 21 durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Öffnungszeiten der Rechnerräume mussten die Rechenzeiten der Simulationsmodelle ebenfalls begrenzt werden. Infolgedessen konnte das Netz des Blockes nicht beliebig weit verfeinert werden.

Für die Berechnung der Simulationsmodelle mit Erosion wurden Computer verwendet, die, wie in Tabelle 7 gezeigt, ausgestattet sind.

Tabelle 7: Ausstattung der verwendeten Computer

	Prozessor	RAM	Systemtyp	Windows-Version	LS-DYNA-Version
Kennwerte	i9-9900K mit 3,6 GHz	32 GB	64-Bit	10 21H2	2018

Bei der Verwendung von neueren LS-DYNA-Versionen kann es zu Abweichungen der Einstellmöglichkeiten in LS-PrePost kommen.

3.2 Ergänzung der Erosion in das bekannte Simulationsmodell

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Einstellungen in dem bereits bekannten Simulationsmodell unverändert bleiben können und welche geändert werden müssen. Außerdem wird erklärt, auf welche Art und Weise die Erosion in das Simulationsmodell integriert werden kann.

Die ausgewählte Elementformulierung und die Hourglass-Steuerung (Kapitel 2.2) sowie die festgelegten Materialeigenschaften des Keils und des Blockes (Kapitel 2.3) bleiben gleich. Die Erosion (ADD_EROSION) muss unter dem Keyword MAT ausgewählt werden. Damit die zusätzlichen Versagenseigenschaften dem bereits definierten Material des Blockes zugeordnet werden können, muss in den Einstellmöglichkeiten von MAT_ADD_EROSION die Material ID (MID) des Blockes eingetragen werden. Anschließend können bei den unterschiedlichen Erosionsverfahren bzw. Erosionskriterien Werte angegeben werden, bei denen die Elemente gelöscht werden würden. In Abbildung 18 auf der nächsten Seite ist ein Screenshot der Einstellmöglichkeiten von MAT_ADD_EROSION aus LS-PrePost zu sehen.

*MAT_ADD_EROSION_(TITLE) (000) (0)

TITLE

1	<u>MID</u> <input type="checkbox"/>	<u>EXCL</u>	<u>MXPRES</u>	<u>MNEPS</u>	<u>EFFEPS</u>	<u>VOLEPS</u>	<u>NUMFIP</u>	<u>NCS</u>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
2	<u>MNPRES</u>	<u>SIGP1</u>	<u>SIGVM</u>	<u>MXEPS</u> <input type="checkbox"/>	<u>EPSSH</u>	<u>SIGTH</u>	<u>IMPULSE</u>	<u>FAILTM</u>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<u>IDAM</u>	<u>DMGTYP</u>	<u>LCSDG</u> <input type="checkbox"/>	<u>ECRIT</u> <input type="checkbox"/>	<u>DMGEXP</u>	<u>DCRIT</u>	<u>FADEXP</u> <input type="checkbox"/>	<u>LCREGD</u> <input type="checkbox"/>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	1.0	<input type="text"/>	1.0	<input type="text"/>
4	<u>LCFLD</u> <input type="checkbox"/>	<u>EPSTHIN</u>	<u>ENGCRIT</u>	<u>RADCRT</u>				
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.0	0.0	0.0			

Abbildung 18: Einstellmöglichkeiten von MAT_ADD_EROSION in LS-PrePost

Das Feld, in das die Material ID des Blockes eingetragen werden muss, ist grün umrandet. Die rot umrandeten Felder sind die Erosionsverfahren, die innerhalb dieser Bachelorarbeit untersucht werden. In Kapitel 3.3 wird begründet, weshalb nur diese Erosionsverfahren bei der Untersuchung berücksichtigt werden.

Die Lagerung des Keils und des Blockes wird ebenso wie die Bewegung des Keils (Kapitel 2.4) nicht verändert. Die Eindringtiefe des Keils und die Simulationszeit können von den Werten des Simulationsmodelles ohne Erosion abweichen. Für alle Simulationsmodelle mit Erosion wird in dieser Bachelorarbeit eine maximale Eindringtiefe von 0,3 mm bei 300 ms und eine Gesamtsimulationszeit von 400 ms verwendet.

Der bestehende Kontakt aus Kapitel 2.5 muss gelöscht werden. Für die Verwendung von Erosion muss ein Kontakt eingesetzt werden, der die Kontaktflächen aktualisiert, nachdem Elemente gelöscht wurden. Analog zum Kontakt AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE wird für das Modell mit Erosion der Kontakt ERODING_SURFACE_TO_SURFACE benutzt. Bei diesem Kontakt wird, genauso wie in Kapitel 2.5 beschrieben, der Block als Slave und der Keil als Master ausgewählt. Zur Kontakterstellung werden die Parts genutzt. Die Kontaktparameterwerte für den Reibungskoeffizienten und die viskose Dämpfung entsprechen den aus Kapitel 2.5.2 bekannten Werten. Durch das Häkchen bei A wird die Kontaktmethode, sowie in Kapitel 2.5.2, zur Pinball-Segment-Methode geändert. Laut Quelle [18] ist es empfehlenswert, für ISYM, EROSOP und IADJ den Wert eins einzugeben. Durch Accept werden die Einstellungen des neuen Kontaktes gespeichert. Da der zuvor bestehende Kontakt bereits gelöscht wurde, liegt wieder nur ein Kontakt vor.

Je nachdem, ob die Simulationszeit geändert wurde, muss in CONTROL_TERMINATION der Wert für ENDTIM angepasst werden. Ansonsten können alle Einstellungen aus Kapitel 2.6 beibehalten werden.

Das fertige Simulationsmodell kann gespeichert, geschlossen und mit Hilfe von LS-Run berechnet werden.

3.3 Auswahl der zu untersuchenden Erosionskriterien

In LS-DYNA existieren mehrere Erosionsverfahren bzw. Erosionskriterien, die zur Darstellung von Materialversagen genutzt werden können. An dieser Stelle wird ein kurzer Überblick über alle vorhandenen Erosionskriterien gegeben und anschließend erläutert, welche der Kriterien untersucht werden und welche nicht.

Alle in LS-DYNA vorhandenen Erosionskriterien werden in Abbildung 19 dargestellt. Die Abbildung stammt von S.2-71 aus der Quelle [12] und enthält ein Erosionskriterium, welches in der LS-DYNA-Version von 2018 noch nicht implementiert wurde. Folglich ist dieses Kriterium, das in der Abbildung 19 rot umrandet ist, innerhalb dieser Bachelorarbeit nicht nutzbar.

Card 1. This card is required.

MID	EXCL	MXPRES	MNEPS	EFFEPS	VOLEPS	NUMFIP	NCS
-----	------	--------	-------	--------	--------	--------	-----

Card 2. This card is required.

MNPRES	SIGP1	SIGVM	MXEPS	EPSSH	SIGTH	IMPULSE	FAILTM
--------	-------	-------	-------	-------	-------	---------	--------

Card 3. This card is optional.

IDAM							LCREGD
------	--	--	--	--	--	--	--------

Card 4. This card is optional.

LCFLD	NSFF	EPSTHIN	ENGCRT	RADCRT	LCEPS12	LCEPS13	LCEPSMX
-------	------	---------	--------	--------	---------	---------	---------

Card 5. This card is optional.

DTEFLT	VOLFRAC	MXTMP	DTMIN				
--------	---------	-------	-------	--	--	--	--

Abbildung 19: Alle in LS-DYNA vorhandenen Erosionskriterien

Die drei in grün umrandeten Felder sind keine Erosionskriterien, sondern werden zur Einstellung von MAT_ADD_EROSION benötigt. Wie im vorhergehenden Kapitel erklärt, wird unter MID das Material eingetragen, das mit den Erosionskriterien erweitert werden soll. Unter EXCL steht standartmäßig der Wert null. Alle Erosionskriterien, die denselben Wert wie EXCL haben oder freigelassen werden, werden in der Berechnung nicht verwendet. Wenn beim Wert null ein Kriterium Elemente löschen soll, dann muss unter EXCL ein beliebiger anderer Wert stehen. Unter NCS wird die Anzahl der Kriterien angegeben, die gleichzeitig erfüllt sein müssen, damit ein Element gelöscht wird. Der eingetragene Wert kann bzw. sollte nicht größer sein als die Anzahl der benutzten Kriterien.

Die zehn bereits in Abbildung 18 markierten Erosionskriterien werden innerhalb dieser Bachelorarbeit untersucht. Zu diesen zehn Kriterien gehören: MXPRES, MNEPS, EFFEPS, VOLEPS, NUMFIP, MNPRES, SIGP1, SIGVM, MXEPS und EPSSH. All diese Versagenseigenschaften können bei Solid-Elementen benutzt werden und sind bei unterschiedlichen Belastungsfällen einsetzbar. Wie jedes einzelne, der zu untersuchenden Erosionskriterien, funktioniert, wird in Kapitel 3.4 beschrieben. Nachfolgend wird begründet, weshalb die anderen Kriterien innerhalb dieser Bachelorarbeit nicht untersucht werden.

SIGTH und IMPULSE:

Diese beiden Variablen stammen aus dem Tuler-Butcher Kriterium, welches bei stoßartiger Belastung verwendet wird. Da in dem Simulationsmodell dieser Bachelorarbeit keine stoßartige Belastung auftritt, werden SIGTH und IMPULSE nicht untersucht.

FAILTM:

Bei diesem Kriterium entspricht der eingegebene Wert der Simulationszeit, zu der alle Elemente des ausgewählten Materials gelöscht werden. In Bezug auf das vorhandene

Simulationsmodell würde das bedeuten, dass alle Elemente des Blockes gelöscht würden, sobald die eingegebene Simulationszeit erreicht wird. Das Löschen der Elemente ist in diesem Fall unabhängig von der Belastung und hilft nicht bei der besseren Darstellung des Materialverhaltens. Dementsprechend wird FAILTM nicht einzeln untersucht.

IDAM:

Über dieses Kriterium kann eingestellt werden, ob zusätzlich zur Erosion noch die Schadensmodelle GISSMO oder DIEM benutzt werden sollen. Da in dieser Bachelorarbeit speziell die Erosionsverfahren untersucht werden sollen, wird auf die Schadensmodelle verzichtet.

LCREGD:

Dies ist eine weitere Einstellmöglichkeit von MAT_ADD_EROSION, bei der Regulierungsfaktoren, die von der Elementgröße abhängen und die anderen Erosionskriterien beeinflussen, definiert werden können. Um das Simulationsmodell einfacher zu halten und die Anzahl an Fehlerquellen zu minimieren, wird diese Einstellmöglichkeit nicht verwendet.

LCFLD, NSFF, EPSTHIN, ENGCRIT, RADCRIT, LCEPS12; LCEPS13 und LCEPSMX:

Diese acht Erosionskriterien können nur bei Shell-Elementen genutzt werden. Da der Block aus Solid-Elementen besteht, können diese Kriterien nicht untersucht werden.

DTEFLT:

Bei dieser Einstellmöglichkeit wird die Periodendauer für einen Tiefpassfilter angegeben, der auf die effektive Dehnungsgeschwindigkeit angewendet wird, wenn der Wert von MXEPS negativ ist. Um das Simulationsmodell einfacher zu halten und die Anzahl an Fehlerquellen zu minimieren, wird diese Einstellmöglichkeit nicht verwendet.

MXTMP:

Da die Temperatur innerhalb des Simulationsmodelles konstant bleibt, ist dieses Erosionskriterium irrelevant und wird nicht weiter untersucht.

DTMIN:

Dieses Kriterium löscht Elemente, wenn deren kritischer Zeitschritt kleiner ist als der hier eingegebene minimale Zeitschritt. DTMIN wird nicht untersucht, da dies ein rein numerisches Erosionskriterium ist und nur wenig mit den physikalischen Materialeigenschaften zusammenhängt.

3.4 Untersuchung der ausgewählten Erosionskriterien

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, wie die zehn ausgewählten Erosionskriterien funktionieren und welche Vernetzung des Blockes bei der Untersuchung verwendet wird. Ebenfalls werden die eingetragenen Werte genannt und deren Auswahl begründet. Alle genutzten Materialkennwerte des Aluminium-Blockes stammen aus der Tabelle 6 des Kapitels 2.3.2.

3.4.1 Vernetzung des Blockes

Jedes zu untersuchende Erosionsverfahren wird einzeln mit einem grob vernetzten Block und mit einem etwas feiner vernetzten Block berechnet. Die eingegebenen Werte der Erosionskriterien sind bei beiden Simulationsmodellen gleich. Dadurch kann zum einen gesehen werden, ob die Erosionskriterien von der Vernetzung beeinflusst werden und zum anderen sind die Ergebnisse bei einer feineren Vernetzung etwas genauer und ggf. aussagekräftiger. In Abbildung 20 wird das grob vernetzte Modell dem Modell mit der feineren Vernetzung des Blockes gegenübergestellt.

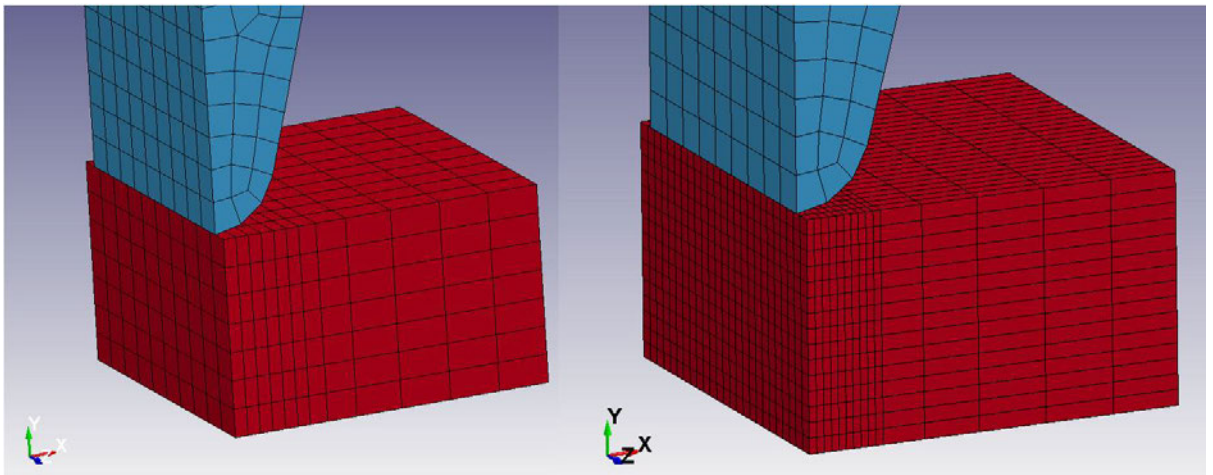


Abbildung 20: Links das grob vernetzte Modell (1584 Knoten) und rechts das feiner vernetzte Modell (7096 Knoten)

Die Vernetzung des Blockes ist nicht noch feiner, da dadurch die Rechenzeit deutlich ansteigen würde und die Ergebnisse nicht zwangsläufig aussagekräftiger werden. Für die Netzstudie in Kapitel 3.6 wird der Block noch feiner vernetzt. Generell müssen immer die Rechenzeit und die Genauigkeit des Modelles gegeneinander abgewogen werden. In den folgenden Unterkapiteln auf den nächsten Seiten werden die zehn Erosionskriterien näher beschrieben, die bei beiden Simulationsmodellen ausprobiert werden.

3.4.2 Untersuchung von MXPRES

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei MXPRES wird der Wert des maximalen hydrostatischen Druckes eingetragen, bei dem das Element gelöscht werden soll. Wie der hydrostatische Druck definiert wird, wurde bereits in Kapitel 1.4.2 erklärt.

Eingegebener Wert: 0,09 GPa

Begründung des eingegebenen Wertes:

Wenn Elemente auf Druck beansprucht werden, dann ist der hydrostatische Druck positiv. Da es in realen Bauteilen keinen hydrostatischen Druck gibt, den man durch Versuche bestimmen könnte, liegen keine entsprechenden Materialkennwerte vor. Deshalb wurde die Dehngrenze des Aluminiums als Wert verwendet, da dieser Wert in beiden Modellen ohne Erosion überschritten wird. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit MXPRES analysiert und interpretiert.

3.4.3 Untersuchung von MNEPS

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei MNEPS wird der Wert der minimalen Hauptdehnung eingetragen, bei der das Element gelöscht werden soll.

Eingegebener Wert: -0,16

Begründung des eingegebenen Wertes:

Wenn Elemente auf Druck beansprucht werden, dann ist die minimale Hauptdehnung negativ. Als Materialkennwert liegt nur die Bruchdehnung aus dem Zugversuch vor. Das verwendete Aluminium des Blockes ist duktil, weshalb die negative Bruchdehnung trotzdem als Wert benutzt werden kann. In beiden Modellen ohne Erosion wird dieser Wert unterschritten. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit MNEPS analysiert und interpretiert.

3.4.4 Untersuchung von EFFEPS

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei EFFEPS wird der Wert der effektiven Dehnung eingetragen, bei der das Element gelöscht werden soll. Die effektive Dehnung ist eine Art plastische Vergleichsdehnung, die in Kapitel 1.4.2 bereits kurz beschrieben wurde.

Eingegebener Wert: 0,16

Begründung des eingegebenen Wertes:

Die Vergleichsdehnung eines Elementes entsteht durch eine beliebige Belastung. Als Materialkennwert liegt nur die Bruchdehnung aus dem Zugversuch vor, die als Wert verwendet werden kann, da das Aluminium des Blockes duktil ist. In beiden Modellen ohne Erosion wird dieser Wert überschritten. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit EFFEPS analysiert und interpretiert.

3.4.5 Untersuchung von VOLEPS

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei VOLEPS wird der Wert der Volumendehnung eingetragen, bei der das Element gelöscht werden soll. Die Volumendehnung ergibt sich aus der Addition der drei Hauptdehnungen.

Eingegebener Wert: 0,02

Begründung des eingegebenen Wertes:

Die Volumendehnung ist positiv, wenn das Volumen des Elementes durch Zug zunimmt. Andersherum ist die Volumendehnung durch Druck negativ. Um auf Zug belastete Elemente zu löschen, wurde ein positiver Wert verwendet, der deutlich kleiner als die Bruchdehnung ist. Da in diesem Fall nicht auf die beiden Modelle ohne Erosion geachtet wurde, wird dieser Wert von beiden Modellen nicht überschritten. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit VOLEPS analysiert und interpretiert.

3.4.6 Untersuchung von NUMFIP

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei NUMFIP wird die Anzahl der Integrationspunkte eines Elementes angegeben, die versagen müssen, damit das Element gelöscht wird.

Eingegebener Wert: 1

Begründung des eingegebenen Wertes:

Da bei allen Simulationsmodellen dieser Bachelorarbeit die Elementformulierung 1 verwendet wird, liegen nur reduziert integrierte Elemente vor. Die reduziert integrierten Elemente haben nur einen Integrationspunkt, der versagen kann. Daraus folgt der eingegebene Wert. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit NUMFIP analysiert und interpretiert.

3.4.7 Untersuchung von MNPRES

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei MNPRES wird der Wert des minimalen hydrostatischen Druckes eingetragen, bei dem das Element gelöscht werden soll. Wie der hydrostatische Druck definiert wird, wurde bereits in Kapitel 1.4.2 erklärt.

Eingegebener Wert: -0,09 GPa

Begründung des eingegebenen Wertes:

Wenn Elemente auf Zug beansprucht werden, dann ist der hydrostatische Druck negativ. Da es in realen Bauteilen keinen hydrostatischen Druck gibt, den man durch Versuche bestimmen könnte, liegen keine entsprechenden Materialkennwerte vor. Deshalb wurde die negative Dehngrenze des Aluminiums als Wert verwendet, da dieser Wert im feiner vernetzten Modell ohne Erosion unterschritten wird. Im grob vernetzten Modell ohne Erosion wird dieser Wert dagegen nicht unterschritten. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit MNPRES analysiert und interpretiert.

3.4.8 Untersuchung von SIGP1

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei SIGP1 wird der Wert der maximalen Hauptspannung eingetragen, bei der das Element gelöscht werden soll.

Eingegebener Wert: 0,19 GPa

Begründung des eingegebenen Wertes:

Wenn Elemente auf Zug beansprucht werden, dann ist die maximale Hauptspannung positiv. Der eingegebene Wert entspricht der Zugfestigkeit des verwendeten Aluminiums. Dieser Wert wird nur bei dem fein vernetzten Modell ohne Erosion überschritten und nicht bei dem grob vernetzten Modell ohne Erosion. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit SIGP1 analysiert und interpretiert.

3.4.9 Untersuchung von SIGVM

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei SIGVM wird der Wert der Vergleichsspannung eingetragen, bei der das Element gelöscht werden soll. In Kapitel 1.4.2 wurde bereits kurz erläutert, woher die verwendete Formel kommt und dass diese nur von der plastischen Verformung abhängt.

Eingegebener Wert: 0,19 GPa

Begründung des eingegebenen Wertes:

Die Vergleichsspannung eines Elementes entsteht durch eine beliebige Belastung. Bei duktilen Materialien kann laut Quelle [8] vereinfachend gesagt werden, dass die Zugfestigkeit gleich der Druckfestigkeit ist. Deswegen kann die Zugfestigkeit des Aluminiums verwendet werden. Bei beiden Modellen ohne Erosion wird dieser Wert überschritten. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit SIGVM analysiert und interpretiert.

3.4.10 Untersuchung von MXEPS

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei MXEPS wird der Wert der maximalen Hauptdehnung eingetragen, bei der das Element gelöscht werden soll.

Eingegebener Wert: 0,16

Begründung des eingegebenen Wertes:

Wenn Elemente auf Zug beansprucht werden, dann ist die maximale Hauptdehnung positiv. Als Materialkennwert liegt die Bruchdehnung aus dem Zugversuch vor, die als Wert benutzt werden kann. Bei beiden Modellen ohne Erosion wird dieser Wert überschritten. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit MXEPS analysiert und interpretiert.

3.4.11 Untersuchung von EPSSH

Funktion des Erosionskriteriums:

Bei EPSSH wird der Wert der maximalen Schubdehnung eingetragen, bei der das Element gelöscht werden soll. Die maximale Schubdehnung wird durch die Hauptdehnungen, ähnlich wie die maximale Schubspannung in Kapitel 1.4.1, bestimmt.

Eingegebener Wert: 0,08

Begründung des eingegebenen Wertes:

Die maximale Schubdehnung entsteht aus der Hälfte der Differenz von maximaler und minimaler Hauptdehnung. Die Bruchdehnung wurde mit Hilfe des einachsigen Zugversuches ermittelt und entspricht der maximalen Hauptdehnung. Die minimale Hauptdehnung in dem Zugversuch ist näherungsweise null. Folglich ist der eingegebene Wert gleich der Hälfte der Bruchdehnung. Bei beiden Modellen ohne Erosion wird dieser Wert überschritten. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit EPSSH analysiert und interpretiert.

3.5 Untersuchung von mehreren Erosionskriterien gleichzeitig

Zur besseren Beschreibung des Materialverhaltens ist die gleichzeitige Verwendung mehrerer Erosionskriterien sinnvoll. Im Folgenden werden drei Kombinationen von Erosionskriterien genannt und deren Auswahl begründet. Da jeweils zwei Kriterien gleichzeitig erfüllt werden sollen, muss unter NCS die Zahl zwei eingetragen werden. Für die Untersuchung der Kombinationen werden wieder die Simulationsmodelle mit der feineren Blockvernetzung und der groben Blockvernetzung verwendet, die bereits für die Untersuchung der einzelnen Erosionskriterien in Kapitel 3.4 benutzt wurden. Pro Simulationsmodell werden die für die Berechnung genutzten Werte angegeben und erklärt.

3.5.1 Untersuchung von FAILTM und MNPRES

Grund der Kombination:

In Kapitel 3.3 wurde bereits erwähnt, dass nur die Verwendung von FAILTM als Erosionskriterium nicht sinnvoll ist. In Kombination mit weiteren Erosionskriterien, wie zum Beispiel MNPRES, gibt FAILTM den Zeitpunkt vor, ab dem die Elemente gelöscht werden können. In diesem Fall sollen Elemente erst gelöscht werden können, sobald sich der Keil vom Block wegbewegt und dadurch die elastische Verformung zurück geht. Durch die Verwendung von MNPRES werden ab diesem Zeitpunkt die Elemente gelöscht, die auf Zug beansprucht werden und dabei den vorgegebenen Wert überschreiten.

Durch den Rückgang der elastischen Verformung des Blockes entstehen Zugspannungen im Block, die zu Rissen führen könnten. Ziel ist die Darstellung dieser Risse im Block.

Verwendete Werte pro Simulationsmodell:

In Tabelle 8 sind die verwendeten Werte der Erosionskriterien für das jeweilige Simulationsmodell eingetragen.

Tabelle 8: Die verwendeten Werte von FAILTM und MNPRES pro Simulationsmodell

Erosionskriterium	Grobe Blockvernetzung	Feine Blockvernetzung
FAILTM-Wert	301 ms	301 ms
MNPRES-Wert	-0,05 GPa	-0,06 GPa

Bei 300 ms erreicht der Keil die maximale Eindringtiefe und bewegt sich von da an wieder in seine Ausgangsposition zurück. Dementsprechend wurde für FAILTM bei beiden Modellen der Wert 301 ms eingetragen.

Der jeweilige MNPRES-Wert wurden mit Hilfe des jeweiligen Simulationsmodelles ohne Erosion festgelegt, sodass nur die am stärksten auf Zug belasteten Elemente gelöscht werden. Dabei ist zu erwähnen, dass mit Hilfe des hydrostatischen Druckes lediglich herausgefunden werden kann, ob ein Element auf Zug oder Druck beansprucht wird. Die Größe des hydrostatischen Druckes kann nur schlecht mit den bekannten Materialkennwerten gleichgesetzt werden, so dass das Materialversagen nur bedingt vorhergesagt werden kann. Somit dient diese Kombination der Erosionskriterien nur als ein Lehrbeispiel und hat keine sinnvolle Anwendung bei der Beschreibung des Materialverhaltens.

Die Bilder der Modelle ohne Erosion für die Bestimmung der MNPRES-Werte können im Anhang A dieser Arbeit gefunden werden.

In Kapitel 4.2 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit FAILTM und MNPRES analysiert, interpretiert und bewertet.

3.5.2 Untersuchung von SIGVM und MNPRES

Grund der Kombination:

Wie in der vorhergehenden Kombination bereits beschrieben, kann mit Hilfe des hydrostatischen Druckes herausgefunden werden, ob ein Element auf Zug oder Druck belastet wird. Ein auf Zug belastetes Element hat einen negativen hydrostatischen Druck. Infolgedessen kann mit MNPRES jedes Element herausgesucht werden, das auf Zug beansprucht wird. Die auf Zug beanspruchten Elemente sollen nur dann gelöscht werden, wenn die Vergleichsspannung dieser Elemente den vorgegebenen Wert überschreitet. Ziel ist die Darstellung der Rissbildung im Material aufgrund von Zugspannungen.

Verwendete Werte pro Simulationsmodell:

In Tabelle 9 sind die verwendeten Werte der Erosionskriterien für das jeweilige Simulationsmodell eingetragen.

Tabelle 9: Die verwendeten Werte von SIGVM und MNPRES pro Simulationsmodell

Erosionskriterium	Grobe Blockvernetzung	Feine Blockvernetzung
SIGVM-Wert	0,13 GPa	0,19 GPa
MNPRES-Wert	-0,03 GPa	-0,03 GPa

Der MNPRES-Wert ist bei beiden Modellen gleich und dient lediglich zur Bestimmung der auf Zug belasteten Elemente. Damit nicht zu viele Elemente gelöscht werden können, wird der Wert von MNPRES auf -0,03 GPa festgelegt. Bei Werten näher an der null könnten möglicherweise so viele Elemente gelöscht werden, dass keine Aussage über die Rissbildung im Material getroffen werden kann.

Der jeweilige SIGVM-Wert wurde mit Hilfe des jeweiligen Modelles ohne Erosion bestimmt. Bei der gegebenen Verformung und der groben Blockvernetzung wird die Zugfestigkeit des Materials nicht erreicht. Um das wahrscheinliche Materialversagen bei der auftretenden Vergleichsspannung abbilden zu können, wurde der SIGVM-Wert auf 0,13 GPa reduziert. Bei der feinen Blockvernetzung wird der Wert der Zugfestigkeit überschritten, sodass der SIGVM-Wert gleich der Zugfestigkeit des Materials sein kann.

Die Bilder der Modelle ohne Erosion für die Bestimmung der SIGVM-Werte und der MNPRES-Werte können im Anhang A dieser Arbeit gefunden werden.

In Kapitel 4.2 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit SIGVM und MNPRES analysiert, interpretiert und bewertet.

3.5.3 Untersuchung von SIGP1 und MNPRES

Grund der Kombination:

Mit Hilfe von MNPRES sollen die auf Zug belasteten Elemente herausgesucht werden. Diese Elemente sollen nur dann gelöscht werden, wenn deren maximale Hauptspannung den durch SIGP1 vorgegebenen Wert überschreitet.

Ziel ist die Darstellung der Rissbildung im Material aufgrund von Zugspannungen.

Verwendete Werte pro Simulationsmodell:

In Tabelle 10 sind die verwendeten Werte der Erosionskriterien für das jeweilige Simulationsmodell eingetragen.

Tabelle 10: Die verwendeten Werte von SIGP1 und MNPRES pro Simulationsmodell

Erosionskriterium	Grobe Blockvernetzung	Feine Blockvernetzung
SIGP1-Wert	0,12 GPa	0,14 GPa
MNPRES-Wert	-0,03 GPa	-0,03 GPa

Der MNPRES-Wert ist bei beiden Modellen gleich und dient lediglich zur Bestimmung der auf Zug belasteten Elemente. Damit nicht zu viele Elemente gelöscht werden können, wird der Wert von MNPRES auf -0,03 GPa festgelegt. Bei Werten näher an der null könnten möglicherweise so viele Elemente gelöscht werden, dass keine Aussage über die Rissbildung im Material getroffen werden kann.

Bei einer Eindringtiefe des Keils von 0,3 mm wird bei beiden Modellen ohne Erosion die Zugfestigkeit des Materials nicht überschritten. Damit die Rissbildung dennoch abgebildet werden kann, wurde der jeweilige SIGP1-Wert an die jeweils auftretenden Hauptspannungen der Modelle ohne Erosion angepasst.

Die Bilder der Modelle ohne Erosion für die Bestimmung der SIGP1-Werte und der MNPRES-Werte können im Anhang A dieser Arbeit gefunden werden.

In Kapitel 4.2 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit SIGP1 und MNPRES analysiert, interpretiert und bewertet.

3.6 Vorbereitung der Netzstudie

Die Kombination von SIGP1 und MNPRES bildet das angenommene Materialverhalten am realistischsten nach. In Kapitel 4 wird das angenommene Materialverhalten kurz beschrieben und dementsprechend werden die Kombinationen der Erosionskriterien in Kapitel 4.2 bewertet.

In der Netzstudie wird zusätzlich zu den beiden bereits in Kapitel 3.5 berechneten Modellen ein drittes Simulationsmodell berechnet, dessen Block im Eindringbereich des Keils noch feiner vernetzt ist. Diese Vernetzung wird in Abbildung 21 dargestellt.

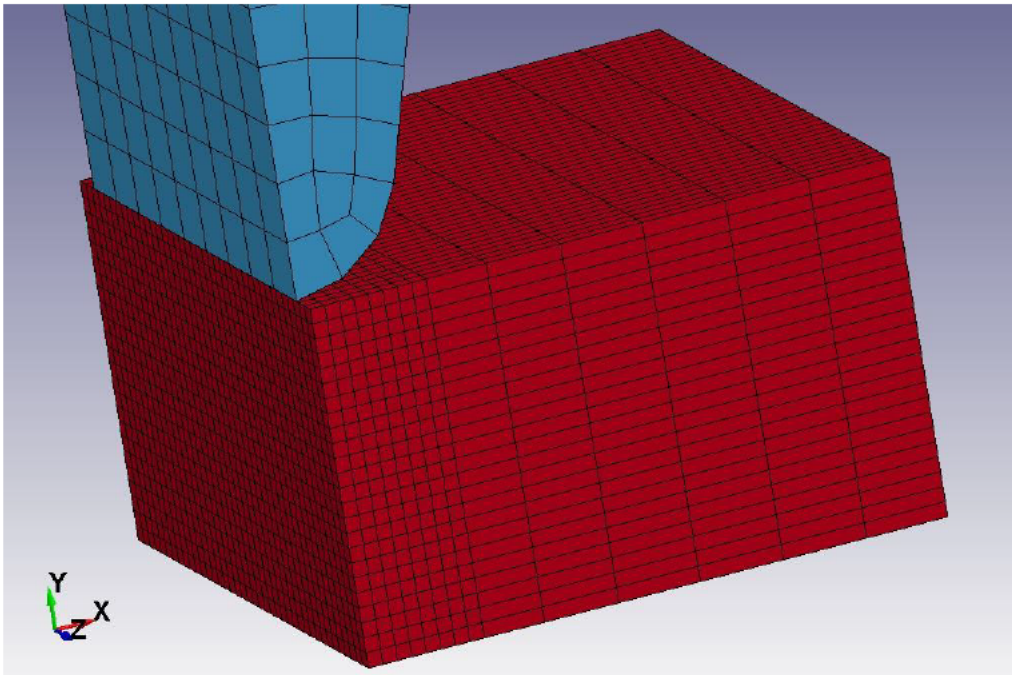


Abbildung 21: Sehr fein vernetztes Modell (15815 Knoten)

Wie bereits in Kapitel 3.1 erklärt, kann das Netz des Blockes nicht beliebig weit verfeinert werden, da die Rechenzeit innerhalb dieser Bachelorarbeit begrenzt ist. Demzufolge besteht die Netzstudie nur aus den drei unterschiedlichen Modellen. Die bei dem am feinsten vernetzten Modell verwendeten Werte von SIGP1 und MNPRES werden in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Die verwendeten Werte von SIGP1 und MNPRES bei sehr feiner Vernetzung

Erosionskriterium	Sehr feine Blockvernetzung
SIGP1-Wert	0,14 GPa
MNPRES-Wert	-0,06 GPa

Der MNPRES-Wert wurde mit Hilfe des Modelles ohne Erosion bestimmt. Bei einem kleineren MNPRES-Wert hätte die Gefahr bestanden, dass zu viele Elemente gelöscht hätten werden können. Wenn zu viele Elemente gelöscht werden würden, dann kann keine Aussage über die Rissbildung im Material getroffen werden. Folglich wurde der MNPRES-Wert auf -0,06 GPa erhöht.

Bei der Eindringtiefe des Keils von 0,3 mm wird der Wert der Zugfestigkeit des Materials nicht überschritten. Infolgedessen wurde der SIGP1-Wert mit Hilfe des Modelles ohne Erosion auf 0,14 GPa festgelegt, damit die Rissbildung abgebildet werden kann.

Die Bilder des sehr fein vernetzten Modelles ohne Erosion für die Bestimmung des SIGP1-Wertes und des MNPRES-Wertes können im Anhang A dieser Arbeit gefunden werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen der drei unterschiedlich fein vernetzten Modelle werden in Kapitel 4.3 miteinander verglichen, sowie analysiert und interpretiert.

4. Analyse und Interpretation der Ergebnisse des Simulationsmodells mit Erosion

Bei der Analyse und Interpretation der Ergebnisse muss beurteilt werden können, ob das vorliegende Resultat der Berechnung ein physikalisches Materialversagen widerspiegelt oder nicht. Dazu muss zuvor definiert werden, wie das vorliegenden Simulationsmodell physikalisch versagen würde. In Abbildung 22 wird der durch den Keil verformte Block mit Hilfe der drei Perspektiven von „Vorne“, von der „Seite (schräg)“ und von „Oben“ dargestellt.

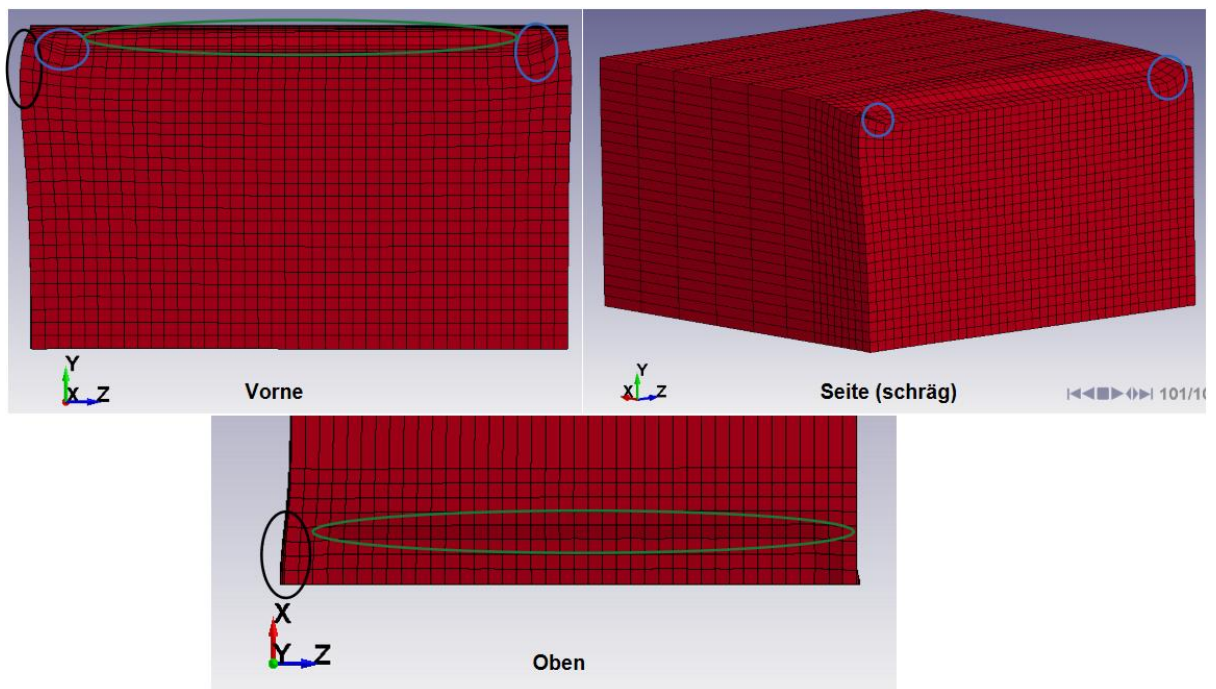


Abbildung 22: Der verformte Block (ohne Erosion) von Vorne, von der Seite (schräg) und von Oben

Anhand der Perspektiven von „Vorne“ und von „Oben“ kann gesehen werden, dass die rechte Seite des Blockes sich weniger verformt. Das liegt daran, dass die Knoten auf dieser Seite, mit Ausnahme der vordersten Reihe, in z-Richtung gelagert werden. Dadurch wird der Block auf der rechten Seite künstlich versteift. Dieses Verformungsverhalten würde in der Realität im Randbereich einer auf Druck belasteten Geometrie auftreten. In diesem Fall würde die linke Seite weiterhin außen liegen und auf der rechten Seite wäre noch weiteres Material, welches die Verformung, so wie in der Abbildung 22 zu sehen, behindern würde. Infolgedessen ist nur die stark verformte und auf Zug belastete linke Außenseite ein kritischer Bereich (schwarz eingekreist), der versagen könnte.

Des Weiteren wird der Block, durch die im Verhältnis zur Blockgröße großen Rundung des Keils, hauptsächlich zusammengedrückt, wie in den Perspektiven von „Vorne“ und von der „Seite (schräg)“ zu sehen ist. Dadurch entsteht zum einen die bereits behandelte Verformung der linken Blockseite und zum anderen entstehen an den seitlichen Kanten des Keils große, lokale Verformungen (blau eingekreist). Diese großen, lokalen Verformungen könnten ebenfalls zu einem Materialversagen führen.

Die Verformungen in dem großen, in grün eingekreisten, Bereich könnten ebenso als kritisch angesehen werden und zu Materialversagen führen.

Trotz der stumpfen Keilgeometrie wird der Block dennoch auch in x-Richtung auseinander gedrückt, sodass vor allem in der Symmetrieebene des Blockes Zugspannungen in x-Richtung auftreten. Die Symmetrieebene des Blockes ist die yz-Ebene, die in den Perspektiven von „Vorne“ und von der „Seite (schräg)“ zu sehen ist. Die Zugspannungen in x-Richtung können innerhalb der kritischen Bereiche ggf. das Materialversagen beeinflussen.

Direkt unter dem Keil bilden sich im Block Druckspannungen, die ebenfalls zu Materialversagen führen könnten. Da davon ausgegangen wird, dass das Material erst bei wesentlich höheren Druckspannungen als Zugspannungen versagt, tritt in dieser Bachelorarbeit kein Materialversagen aufgrund von Druckspannungen auf.

Wann theoretisch Materialversagen auftritt, wurde bereits in Kapitel 1.2.3 beschrieben. Was außerdem bei der Bruchmechanik beachtet werden muss, wurde in Kapitel 1.3 erklärt. In dem folgenden Absatz wird begründet, warum in den kritischen Bereichen Materialversagen auftreten kann.

Laut Kapitel 1.2.3 versagen duktile Materialien wie Aluminium durch Gleitbruch. Beim Gleitbruch bilden sich kleine Risse im Material, die durch große Verformungen und/oder durch sehr hohe Spannungen entstehen. Der kritische Bereich an der linken Seite des Blockes (schwarz eingekreist) und die kritischen Bereiche links und rechts in dem Keilabdruck (blau eingekreist) werden stark verformt und mit hohen Spannungen belastet. Dementsprechend wird der Block in diesen Bereichen zuerst versagen, wenn die Eindringtiefe des Keils groß genug ist. Der grün eingekreiste Bereich wird ebenfalls stark verformt, aber weniger stark belastet. Insofern wird in diesem Bereich das Materialversagen erst später auftreten.

Durch die Materialverfestigung könnte der Aluminium-Block theoretisch auch durch Spaltbruch versagen. Der Spaltbruch beginnt an den Schwachstellen des Materials und breitet sich dann schlagartig aus. Da in dem Simulationsmodell keine Schwachstellen im Block existieren, wird in dieser Bachelorarbeit das Versagen des Materials durch Spaltbruch nicht berücksichtigt.

Sobald Risse entstanden sind, breiten sich diese durch senkrecht zur Rissfläche wirkende Zugspannungen aus. Diese Art des Rissfortschrittes nach Bruchmodus 1 wurde bereits in Kapitel 1.3.1 beschrieben. Vor allem in den blauen und dem grünen Bereich herrschen komplizierte Spannungszustände, so dass sich der Riss, abhängig von der gebildeten Rissfläche, ausbreiten wird. Im schwarzen Bereich wirken hauptsächlich Zugspannungen in x-Richtung. Nach Bruchmodus 1 würde das bedeuten, dass die entstehende Rissfläche sehr wahrscheinlich in der yz-Ebene liegen wird. Da die plastische Zone nicht nur auf ein kleines Gebiet um die Risspitze konzentriert ist, kann die linear-elastische Bruchmechanik nicht angewendet werden. Folglich müsste mit der Fließbruchmechanik gearbeitet werden. Zur Vereinfachung des angenommenen Materialversagens wird die Fließbruchmechanik weggelassen.

Daraus folgt, dass das Materialversagen zusammenfassend von großen Verformungen und Spannungen abhängt und dass sich die entstehenden Risse nach Bruchmodus 1 ausbreiten.

Dennoch ist anzumerken, dass in der Praxis das theoretische Versagen sowie das numerische Versagen des Materials durch reale Werkstoffversuche überprüft und nachgewiesen werden muss.

In den folgenden Kapiteln wird das durch die Erosionskriterien erzeugte Materialversagen mit dem soeben beschriebenen Materialversagen verglichen. Besonders in den Kapiteln 4.2 und 4.3 kann dadurch die Kombination der Erosionskriterien bewertet werden.

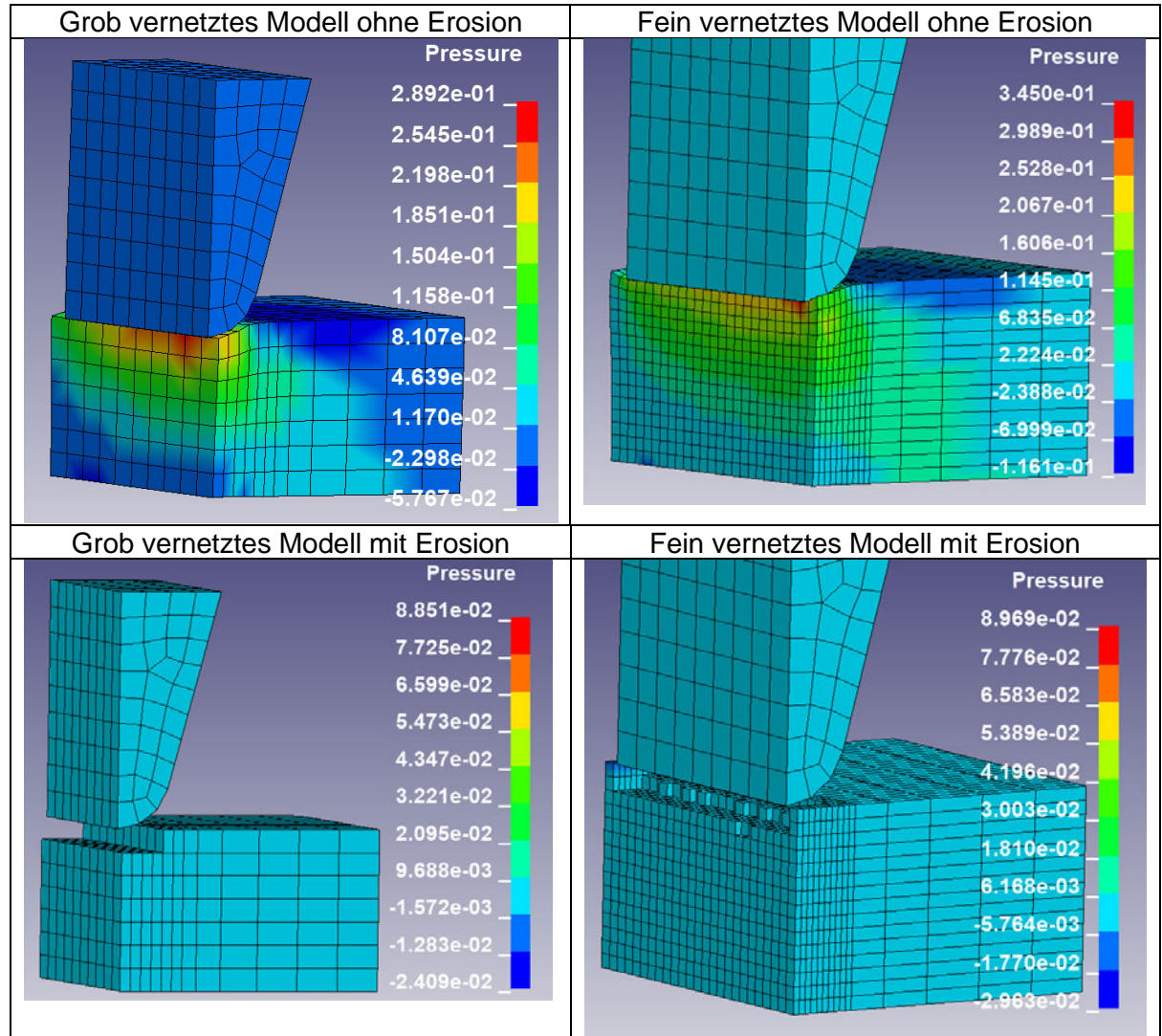
4.1 Analyse und Interpretation der ausgewählten Erosionskriterien

In diesem Kapitel werden auf den folgenden Seiten die Berechnungsergebnisse der zehn ausgewählten und untersuchten Erosionskriterien bildlich dargestellt und anschließend analysiert und interpretiert. Als Resultat der Analyse werden die Vor- und Nachteile des jeweiligen Erosionsverfahrens aufgelistet und, wenn möglich, ein Anwendungsbereich definiert.

4.1.1 Analyse und Interpretation von MXPRES

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn der hydrostatische Druck den Wert 0,09 GPa überschritten hat. In Tabelle 12 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse von MXPRES



Alle Elemente direkt unter dem Keil werden auf Druck belastet. Das kann in den Bildern des Modelles ohne Erosion gesehen werden. Diese Elemente werden in den Modellen mit Erosion gelöscht, was zu erwarten war. Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würden immer mehr Elemente gelöscht werden. Der eingegebene Maximalwert des Druckes kann von der Farbskala der Modelle mit Erosion abgelesen werden.

Bei der feineren Vernetzung wurden nicht alle Elemente in einer Reihe gelöscht. Physikalisch hätten alle oder keine Elemente einer Reihe gelöscht werden müssen, da alle auf die gleiche Art und Weise vom Keil belastet werden. Dementsprechend resultiert diese Darstellung aus numerischen Ungenauigkeiten, die bspw. durch die Berechnung des hydrostatischen Druckes je Element oder den verwendeten Kontakt entstehen können.

Mit Hilfe der Ergebnisse lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 13 auf der nächsten Seite werden diese aufgelistet.

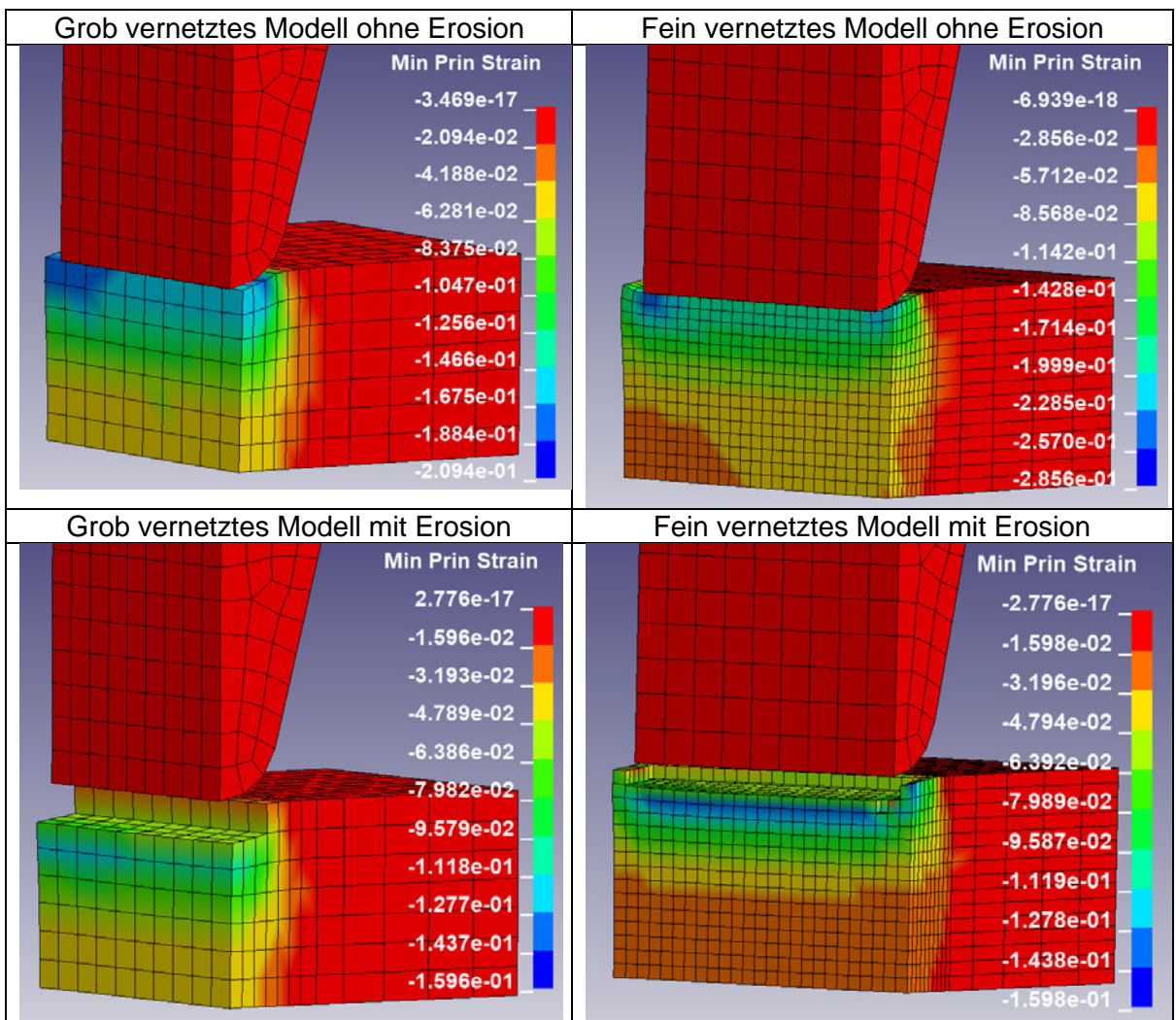
Tabelle 13: Vor- und Nachteile von MXPRES

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> Auf Druck belastete Elemente lassen sich herausuchen 	<ul style="list-style-type: none"> Es kann kein Materialversagen abgebildet werden, da keine entsprechenden Materialkennwerte existieren Die Berechnung des hydrostatischen Druckes ist numerisch ungenau
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens: <ul style="list-style-type: none"> Kann in Kombination mit weiteren Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass nur auf Druck belastete Elemente gelöscht werden können 	

4.1.2 Analyse und Interpretation von MNEPS

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn die minimale Hauptdehnung den Wert $-0,16$ unterschritten hat. In Tabelle 14 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse von MNEPS



Bei auf Druck belasteten Elementen ist die minimale Hauptdehnung negativ, wie in den Modellen ohne Erosion zu sehen ist. Da der vorgegebene Wert unterschritten wird, werden

diese Elemente in den Modellen mit Erosion gelöscht. Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würden immer mehr Elemente gelöscht werden. Der eingegebene Minimalwert der Dehnung kann von der Farbskala der Modelle mit Erosion abgelesen werden. Im Vergleich zu dem Ergebnis von MXPRES bei feiner Vernetzung sind bei dem Ergebnis von MNEPS weniger einzelne Elemente gelöscht bzw. nicht gelöscht worden. Dieses Verhalten könnte an der höheren numerischen Genauigkeit des Kriteriums, also der Dehnungen, liegen.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 15 werden diese aufgelistet.

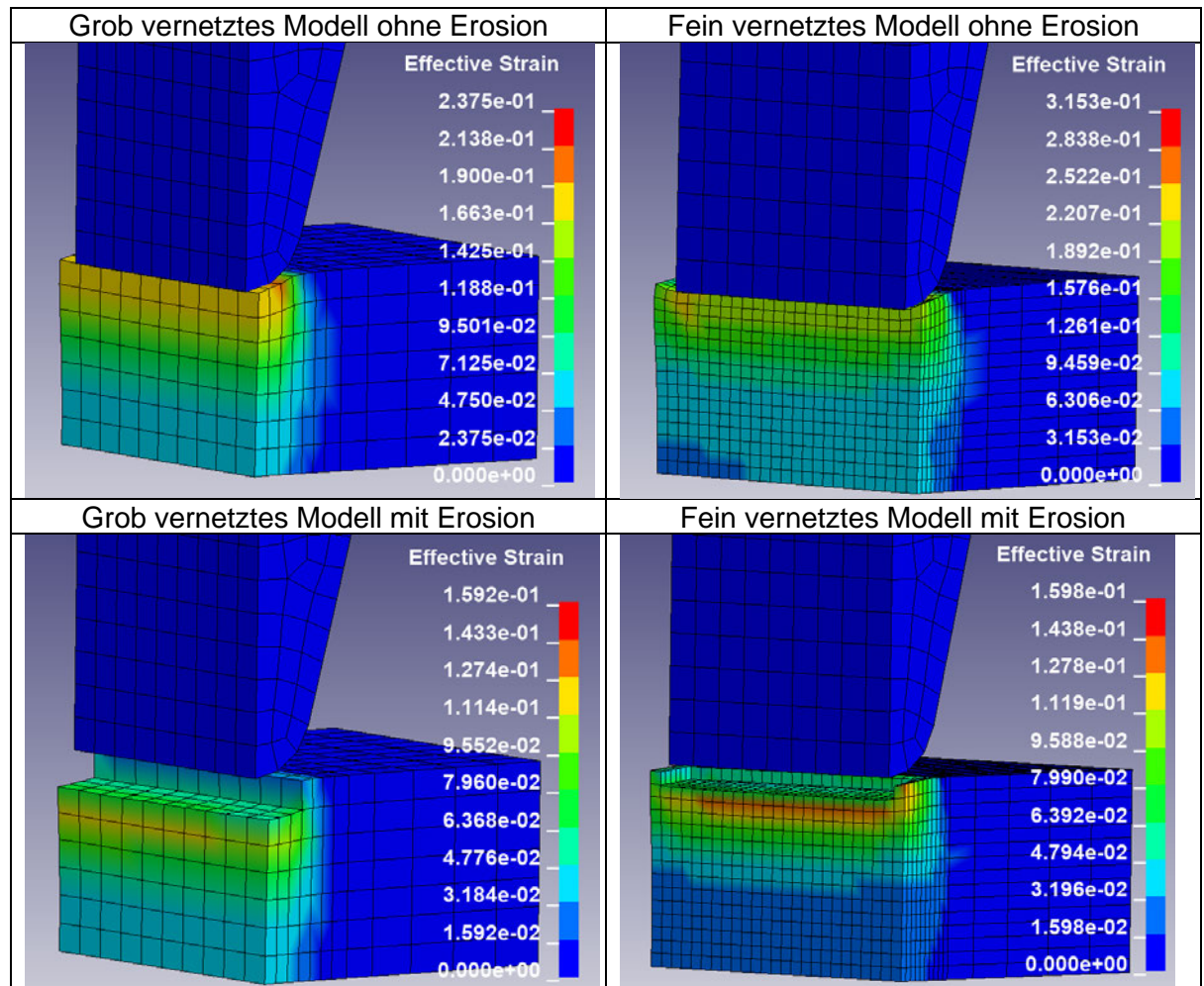
Tabelle 15: Vor- und Nachteile von MNEPS

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzung der minimalen Dehnung des Elementes 	<ul style="list-style-type: none"> • Gibt keine Auskunft über den generellen Zustand (Zug/Druck) des Elementes • Ob die minimale Dehnung aufgrund von Schub oder Druck auftritt, kann nicht unterschieden werden
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens: <ul style="list-style-type: none"> • Kann in Kombination mit anderen Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass Elemente, die auf Druck oder Schub belastet werden, gelöscht werden 	

4.1.3 Analyse und Interpretation von EFFEPS

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn die Vergleichsdehnung den Wert 0,16 überschritten hat. In Tabelle 16 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 16: Ergebnisse von EFFEPS



Die Vergleichsdehnung ergibt sich aus den plastischen Verformungen und ist unabhängig von der Belastungsrichtung. Ähnlich wie die Vergleichsspannung gibt die Vergleichsdehnung an, welche Bereiche stärker und welche Bereiche weniger stark verformt werden. Die größte Verformung im Block findet unterhalb des Keils statt, wie in den Ergebnissen der Modelle ohne Erosion gesehen werden kann. Da der vorgegebene Wert des Kriteriums überschritten wird, werden die Elemente unterhalb des Keil gelöscht, wie in den Modellen mit Erosion zu sehen ist. Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würden immer mehr Elemente gelöscht werden. Der Maximalwert des Kriteriums kann von der Farbskala der Modelle mit Erosion abgelesen werden.

Das Ergebnis des feiner vernetzten Modelles mit Erosion ähnelt sehr dem Ergebnis des feiner vernetzten Modelles mit MNEPS. Da beide Kriterien mit Dehnungen arbeiten, ist die numerische Genauigkeit ähnlich.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 17 auf der nächsten Seite werden diese aufgelistet.

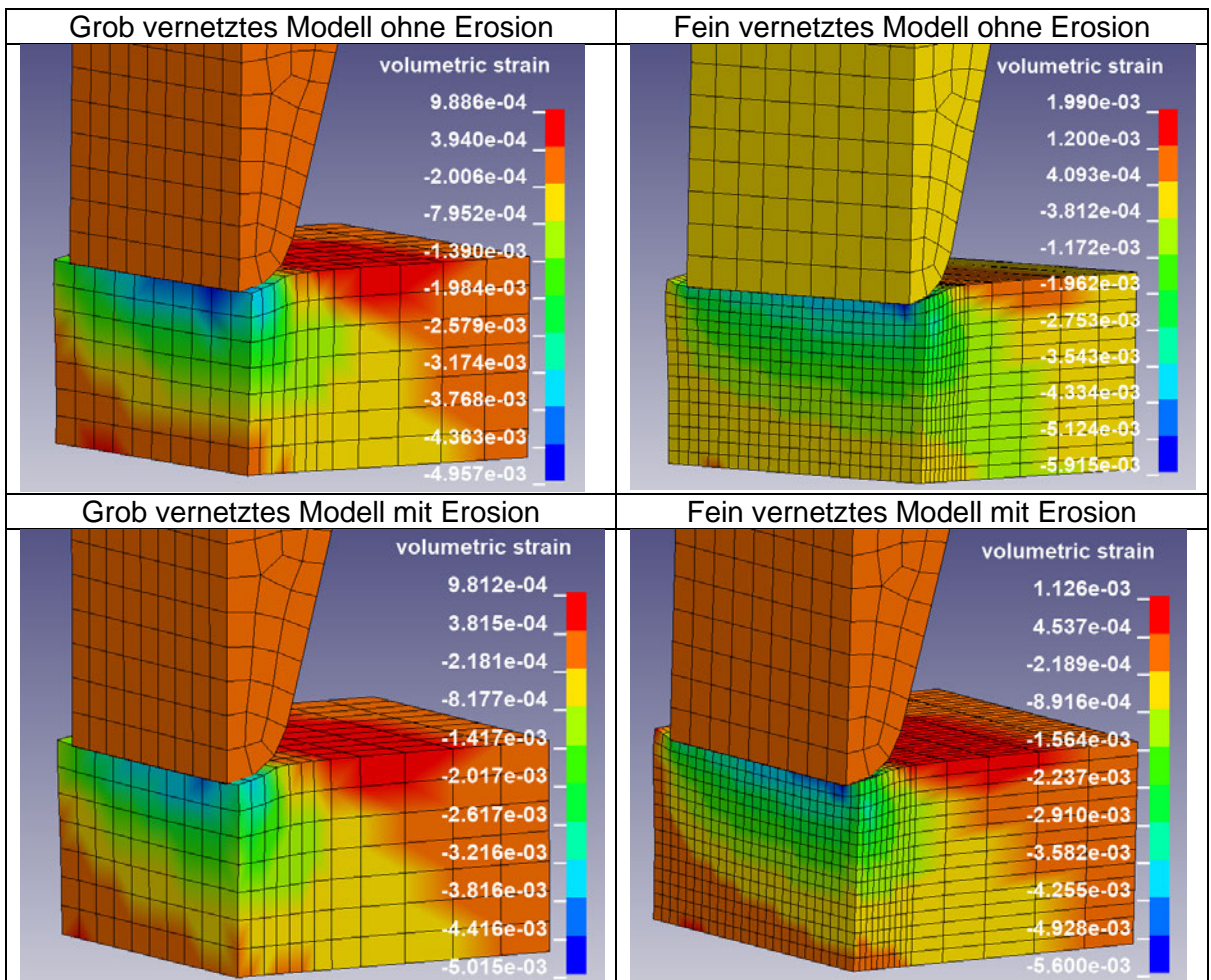
Tabelle 17: Vor- und Nachteile von EFFEPS

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> Stark verformte Elemente lassen sich unabhängig von der Belastungsart herausuchen 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Unterscheidung zwischen Zug, Druck und Schub möglich
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens: <ul style="list-style-type: none"> Kann in Kombination mit weiteren Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass, unabhängig von der Art der Belastung, nur stark verformte Elemente gelöscht werden können 	

4.1.4 Analyse und Interpretation von VOLEPS

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn die Volumendehnung den Wert 0,02 überschritten hat. In Tabelle 18 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 18: Ergebnisse von VOLEPS



Die Volumendehnung ergibt sich aus der Addition der drei Hauptdehnungen. Wenn die Volumendehnung positiv ist, dann wird das Element auf Zug belastet und das Elementvolumen nimmt zu. Infolgedessen ist der Wert der Volumendehnung unterhalb des Keils negativ, da dort die Elemente auf Druck belastet werden, wie bei allen vier Modellen zu sehen ist. Der eingegebene Maximalwert von 0,02 wird in den Modellen ohne Erosion nicht erreicht. In den Modellen mit Erosion wird dieser Wert dementsprechend auch nicht erreicht

und keine Elemente werden gelöscht. Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann ist davon auszugehen, dass die Volumendehnung weiter ansteigt, sodass Elemente gelöscht werden würden.

Beim Vergleich der Farbskalen der grob vernetzten Modelle und beim Vergleich der Farbskalen der fein vernetzten Modelle fällt auf, dass die Werte der Modelle mit Erosion etwas von den Werten der Modelle ohne Erosion abweichen. Diese Abweichung ist sehr wahrscheinlich auf den geänderten Kontakt zurückzuführen.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 19 werden diese aufgelistet.

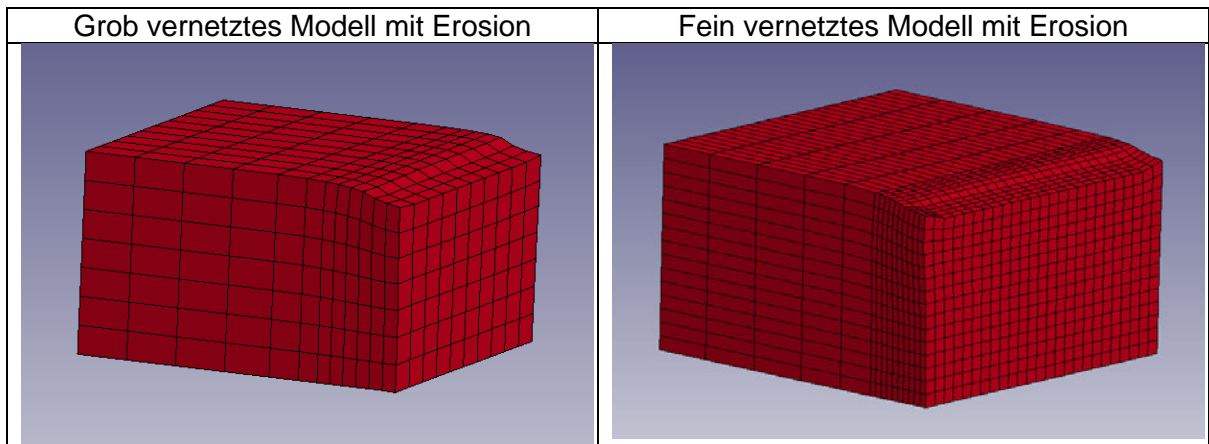
Tabelle 19: Vor- und Nachteile von VOLEPS

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • Auf Zug belastete Elemente lassen sich über die Volumenänderung herausuchen 	<ul style="list-style-type: none"> • Es kann kein Materialversagen abgebildet werden, da den Werten des Kriteriums kein Materialkennwert sinnvoll zugeordnet werden kann • Bildet keine Schubbelastungen ab, da bei reinem Schub dieser Wert gleich null ist
<p>Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kann in Kombination mit weiteren Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass nur auf Zug belastete Elemente gelöscht werden können 	

4.1.5 Analyse und Interpretation von NUMFIP

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn der eine Integrationspunkt des Elementes versagt hat. In Tabelle 20 werden die Ergebnisse der zwei berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 20: Ergebnisse von NUMFIP



Sowohl bei dem grob vernetzten Modell als auch bei dem fein vernetzten Modell wurden keine Elemente gelöscht. Das liegt daran, dass bei beiden Modellen keine Elemente so stark verzerrt wurden, so dass der Integrationspunkt versagt hätte. Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würde die Möglichkeit bestehen, dass stark verzerrte Elemente gelöscht werden könnten.

Trotz der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 21 werden diese aufgelistet.

Tabelle 21: Vor- und Nachteile von NUMFIP

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • Kann zur Kontrolle der Elemente während der Verformung eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Zeitpunkt, ab dem Elemente gelöscht werden, kann nicht vorhergesagt werden • Ist ein rein numerisches Kriterium, das mit dem Materialverhalten nur wenig zu tun hat
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens: <ul style="list-style-type: none"> • Bei Geometrien, die besonders stark verformt werden, können die verformten Elemente mit Hilfe dieses Kriteriums überprüft werden 	

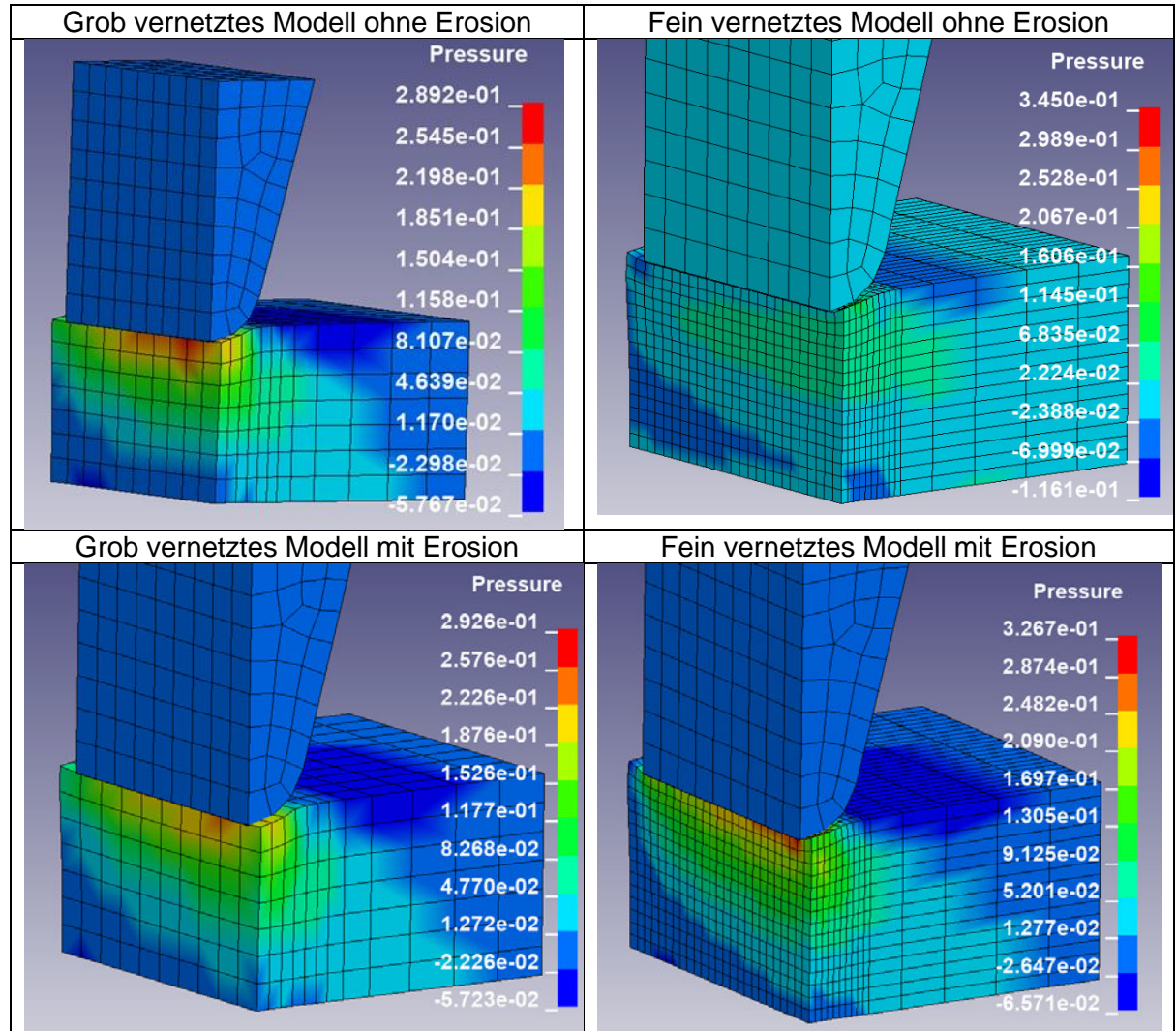
Anmerkung zum Erosionskriterium NUMFIP:

Laut dem User Manual von LS-DYNA aus dem Jahr 2018, das zu der in dieser Bachelorarbeit verwendeten LS-DYNA Version gehört, kann NUMFIP uneingeschränkt verwendet werden. Dagegen wird in dem User Manual von 2021 erwähnt, dass NUMFIP nicht bei MAT 024 verwendet werden kann. Stattdessen muss für MAT 024 das Kriterium VOLFRAC genutzt werden, da die Anzahl der versagten Integrationspunkte keine zuverlässige Aussage liefert. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse der Berechnungen mit NUMFIP innerhalb dieser Bachelorarbeit ebenfalls unzuverlässig sind.

4.1.6 Analyse und Interpretation von MNPRES

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn der hydrostatische Druck den Wert $-0,09$ GPa unterschritten hat. In Tabelle 22 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 22: Ergebnisse von MNPRES



Die auf Zug belasteten Elemente sind hauptsächlich an der Blockoberseite, was in den Bildern der Modelle mit und ohne Erosion zu sehen ist. Die Bilder zeigen den Zeitpunkt, an dem der kleinste Wert der Farbskala auftritt. Obwohl im fein vernetzten Modell ohne Erosion der Minimalwert unterschritten wird, werden im Modell mit Erosion keine Elemente gelöscht. Das liegt daran, dass in dem fein vernetzten Modell mit Erosion der Minimalwert nicht unterschritten wird, wie in dem dazugehörigen Bild an der Farbskala abgelesen werden kann. Die unterschiedlichen Werte der Modelle mit und ohne Erosion resultieren sehr wahrscheinlich aus der Änderung des Kontaktes.

Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würden die entsprechenden Elemente stärker auf Zug belastet und folglich gelöscht werden.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 23 auf der nächsten Seite werden diese aufgelistet.

Tabelle 23: Vor- und Nachteile von MNPRES

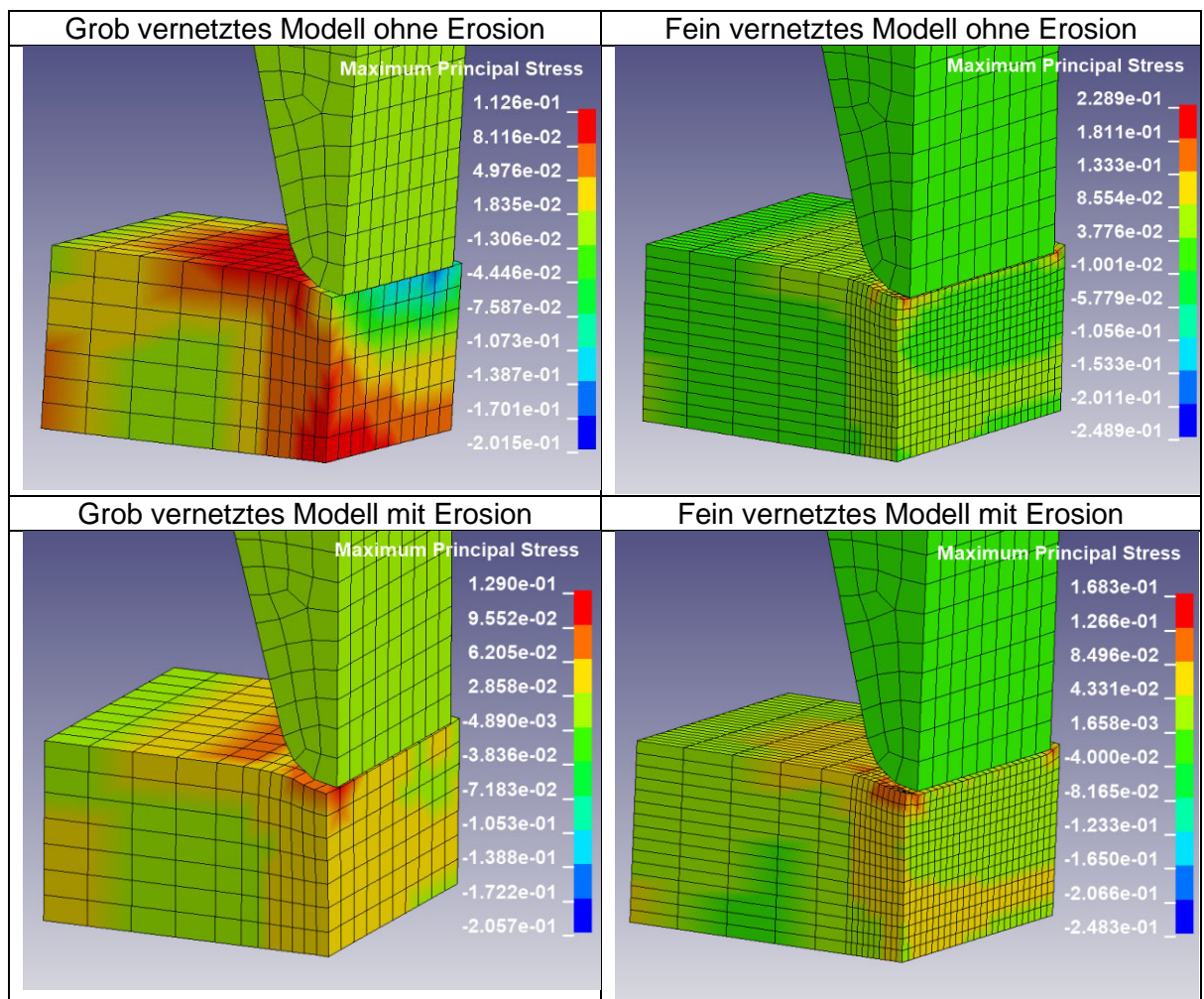
Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> Auf Zug belastete Elemente lassen sich herausuchen 	<ul style="list-style-type: none"> Es kann kein Materialversagen abgebildet werden, da keine entsprechenden Materialkennwerte existieren Die Berechnung des hydrostatischen Druckes ist numerisch ungenau
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens: <ul style="list-style-type: none"> Kann in Kombination mit weiteren Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass nur auf Zug belastete Elemente gelöscht werden können 	

In Kapitel 4.2 wird MNPRES in Kombination mit anderen Erosionskriterien verwendet.

4.1.7 Analyse und Interpretation von SIGP1

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn die maximale Hauptspannung den Wert 0,19 GPa überschritten hat. In Tabelle 24 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 24: Ergebnisse von SIGP1



Die maximale Hauptspannung ist positiv, wenn Elemente mindestens teilweise auf Zug belastet werden. Die Bilder zeigen den Zeitpunkt, an dem der größte, auf der Farbskala angezeigte Wert auftritt. Die größten Hauptspannungen treten rund um die linke Kante des Keils auf. Obwohl im fein vernetzten Modell ohne Erosion der Maximalwert überschritten wird, werden im Modell mit Erosion keine Elemente gelöscht. Das liegt daran, dass in dem fein vernetzten Modell mit Erosion der Maximalwert nicht überschritten wird, wie in dem dazugehörigen Bild an der Farbskala abgelesen werden kann. Die unterschiedlichen Werte der Modelle mit und ohne Erosion resultieren sehr wahrscheinlich aus der Änderung des Kontaktes.

Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würde der Maximalwert des Kriteriums überschritten und Elemente würden gelöscht werden.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 25 werden diese aufgelistet.

Tabelle 25: Vor- und Nachteile von SIGP1

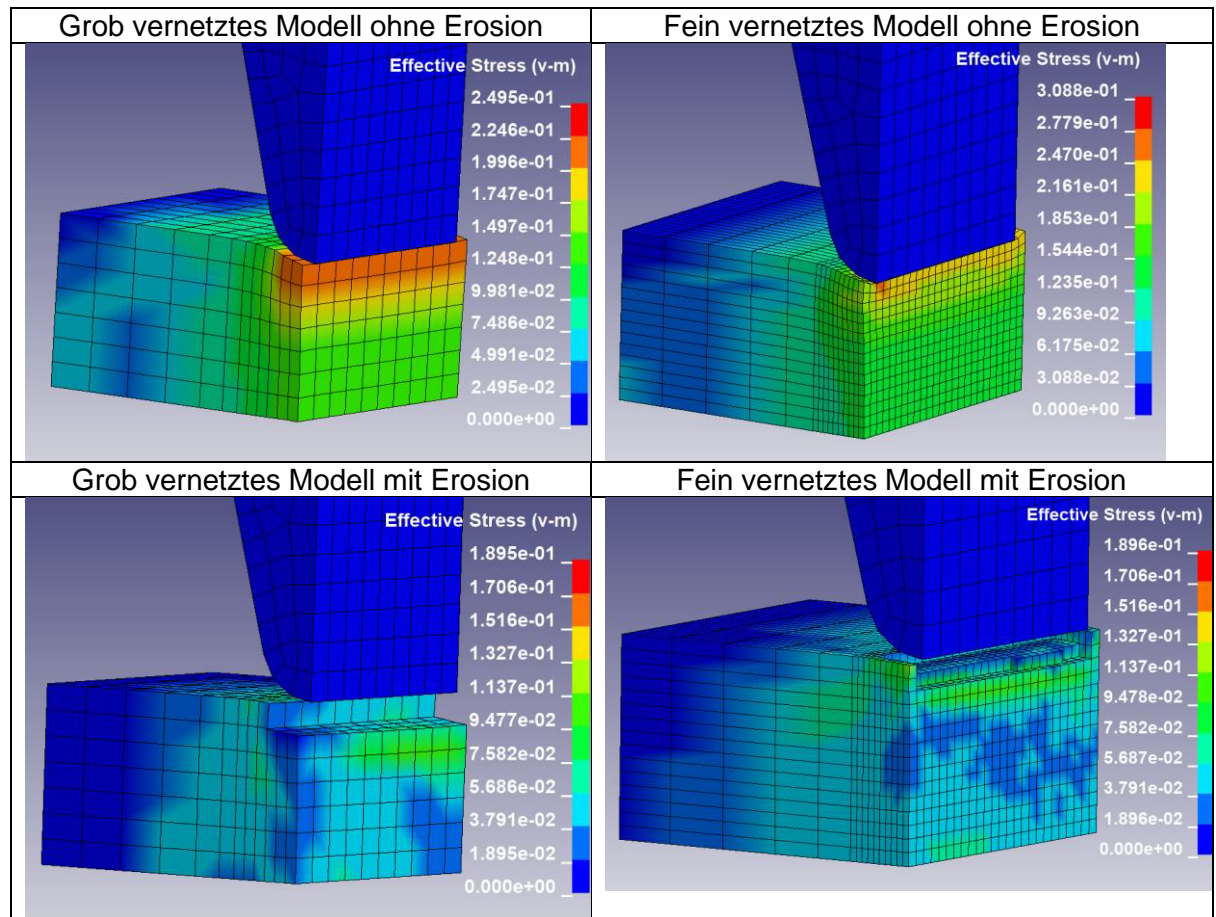
Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • Die maximale Hauptspannung der Elemente kann begrenzt werden • Das Materialversagen kann durch Materialkennwerte abgebildet werden (z.B. durch die Zugfestigkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Richtung der maximalen Hauptspannung ist nicht erkennbar und wechselt je nach Belastung • Die positive maximale Hauptspannung ist kein Beweis dafür, dass das Element insgesamt auf Zug belastet wird
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens: <ul style="list-style-type: none"> • Kann in Kombination mit anderen Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass Elemente, die auf Zug belastet werden, gelöscht werden 	

In Kapitel 4.2 wird SIGP1 in Kombination mit MNPRES verwendet.

4.1.8 Analyse und Interpretation von SIGVM

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn die Vergleichsspannung den Wert 0,19 GPa überschritten hat. In Tabelle 26 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 26: Ergebnisse von SIGVM



Die Vergleichsspannung ist unabhängig von der Art der Belastung und gibt die Bereiche an, die am stärksten beansprucht werden. Anhand der Bilder der Modelle ohne Erosion wird deutlich, dass der Bereich unterhalb des Keils am stärksten belastet wird. Da der vorgegebene Wert des Kriteriums in diesem Bereich überschritten wird, werden die Elemente unterhalb des Keil gelöscht, wie in den Modellen mit Erosion zu sehen ist. Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würden immer mehr Elemente gelöscht werden. Der Maximalwert des Kriteriums kann von der Farbskala der Modelle mit Erosion abgelesen werden.

Bei dem Ergebnis des feiner vernetzten Modelles mit Erosion sind wieder nicht alle Elemente einer Reihe gelöscht worden, so wie es bereits in Kapitel 4.1.1 bei MXPRES der Fall war. Physikalisch hätten alle oder keine Elemente einer Reihe gelöscht werden müssen, da alle auf die gleiche Art und Weise vom Keil belastet werden. Bei dem Ergebnis des feiner vernetzten Modelles mit EFFEPS aus Kapitel 4.1.3 tritt dieses Verhalten nicht auf. Der Grund für das Auftreten bei SIGVM könnte die geringere numerische Genauigkeit des Kriteriums, also der Spannungen, sein.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 27 auf der nächsten Seite werden diese aufgelistet.

Tabelle 27: Vor- und Nachteile von SIGVM

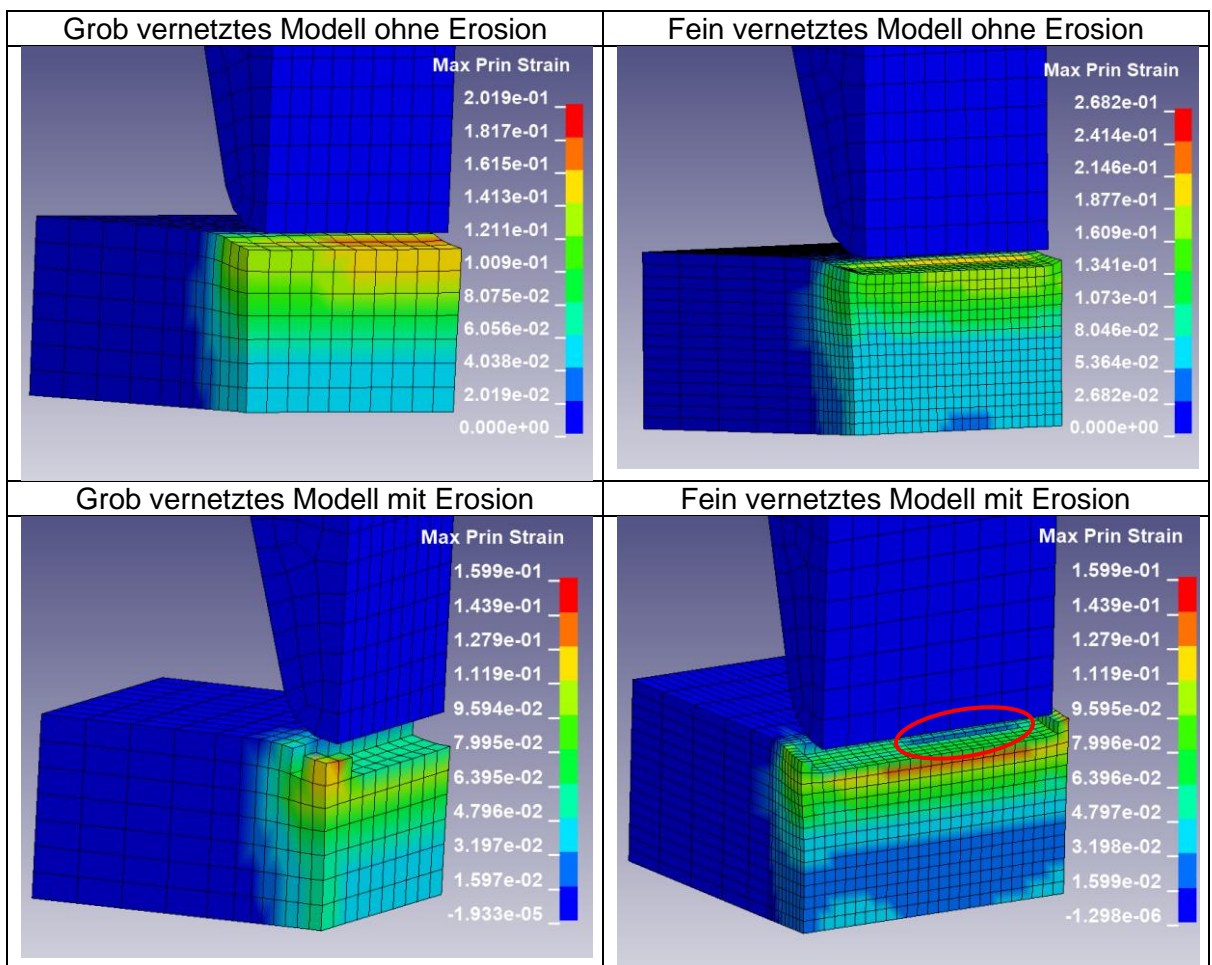
Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • Das Materialversagen kann durch Materialkennwerte abgebildet werden (z.B. durch die Zugfestigkeit) • Stark belastete Elemente lassen sich unabhängig von der Belastungsart herausuchen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Unterscheidung zwischen Zug, Druck und Schub möglich • Die Berechnung der Vergleichsspannung ist numerisch ungenau
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens:	
<ul style="list-style-type: none"> • Kann in Kombination mit anderen Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass Elemente, die stark belastet werden, gelöscht werden 	

In Kapitel 4.2 wird SIGVM in Kombination mit MNPRES verwendet.

4.1.9 Analyse und Interpretation von MXEPS

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn die maximale Hauptdehnung den Wert 0,16 überschritten hat. In Tabelle 28 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 28: Ergebnisse von MXEPS



Bei zum Teil oder ganz auf Zug belasteten Elementen ist die maximale Hauptdehnung positiv, wie in den Modellen ohne Erosion zu sehen ist. Da der vorgegeben Wert überschritten wird,

werden diese Elemente in den Modellen mit Erosion gelöscht. Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würden immer mehr Elemente gelöscht werden. Der eingegebene Maximalwert der Dehnung kann von der Farbskala der Modelle mit Erosion abgelesen werden.

Die drei übergebliebenen Elemente bei dem grob vernetzten Modell haben eine etwas zu geringe maximale Hauptdehnung. Das liegt wahrscheinlich daran, dass diese Elemente nach außen ausweichen konnten, wodurch sich diese durch Druck verformten Elemente nicht nur in eine Richtung ausdehnen mussten. Dies ist auf der rechten Blockseite der Fall, da diese Seite gelagert ist und sich somit nicht nach außen ausweiten kann. Wahrscheinlich haben sich genau aus diesem Grund die rot eingekreisten Elemente bei dem fein vernetzten Modell nur in eine Richtung ausbreiten können, weshalb die maximale Hauptdehnung groß genug war, so dass die Elemente gelöscht wurden.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 29 werden diese aufgelistet.

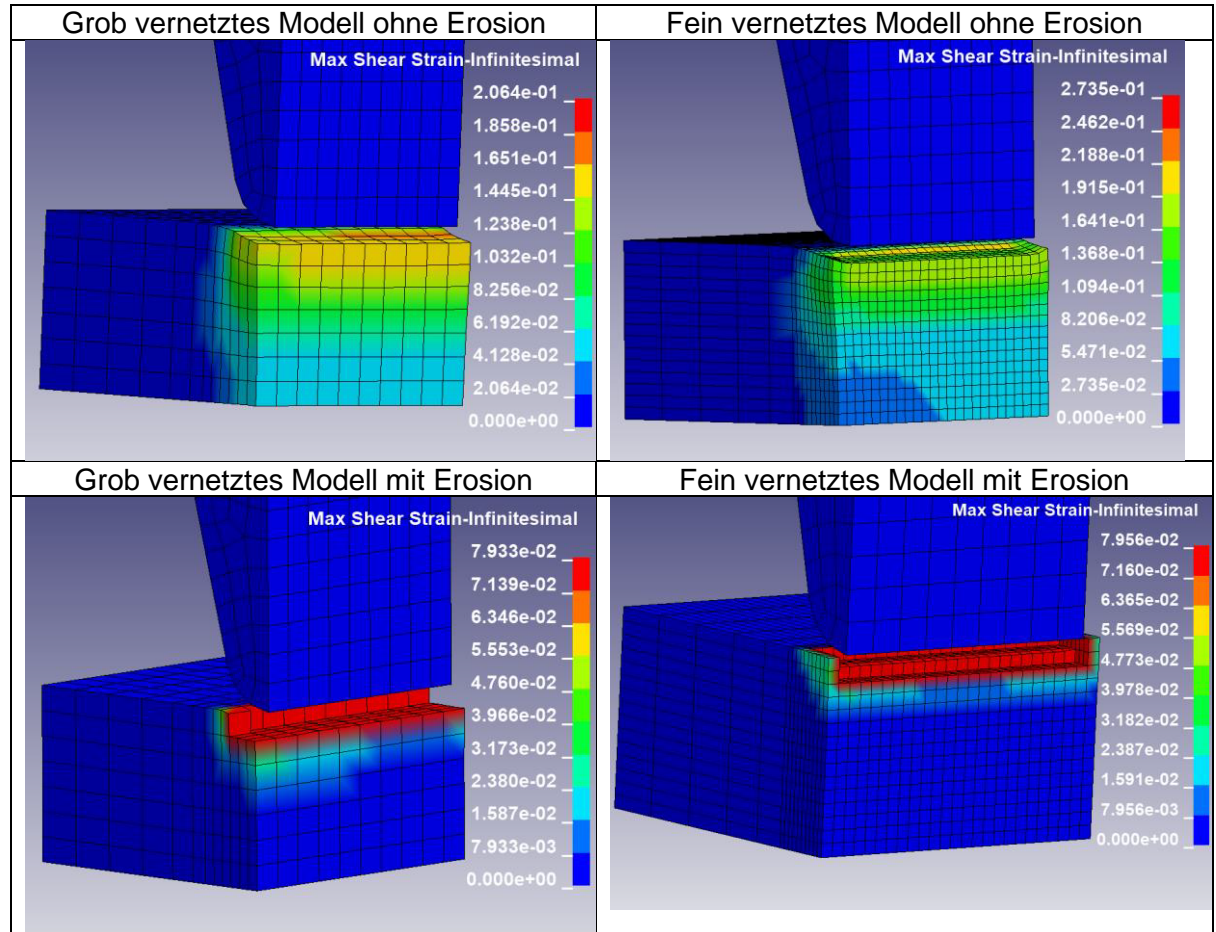
Tabelle 29: Vor- und Nachteile von MXEPS

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • Das Materialversagen kann durch Materialkennwerte abgebildet werden (z.B. durch die Bruchdehnung) • Begrenzung der maximalen Dehnung des Elementes 	<ul style="list-style-type: none"> • Gibt keine Auskunft über den generellen Zustand (Zug/Druck) des Elementes • Ob die maximale Dehnung aufgrund von Schub oder Zug auftritt, kann nicht unterschieden werden
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens: <ul style="list-style-type: none"> • Kann in Kombination mit anderen Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass Elemente, die auf Zug oder Schub belastet werden, gelöscht werden 	

4.1.10 Analyse und Interpretation von EPSSH

Die Elemente der Simulationsmodelle mit Erosion wurden gelöscht, wenn die maximale Schubdehnung den Wert 0,08 überschritten hat. In Tabelle 30 werden die Ergebnisse der vier berechneten Modelle bildlich gegenübergestellt.

Tabelle 30: Ergebnisse von EPSSH



Die maximale Schubdehnung ergibt sich aus der Hälfte der Differenz von maximaler zu minimaler Hauptdehnung. Alle Elemente, die durch den Keil auf Druck belastet werden und sich in der Folge in die anderen Richtungen ausweiten, werden auf Schub beansprucht. Dieses Verhalten kann anhand der Modelle ohne Erosion gut beobachtet werden. Da der vorgegebene Wert der maximalen Schubdehnung überschritten wird, werden die Elemente in den Modellen mit Erosion gelöscht, wie in den dazugehörigen Bildern zu sehen ist. Wenn der Keil noch weiter in den Block hineinfahren würde, dann würden immer mehr Elemente gelöscht werden. Der eingegebene Maximalwert der Dehnung kann von der Farbskala der Modelle mit Erosion abgelesen werden.

Das eine, übrig gebliebene, Element des grob vernetzten Modelles erreicht die maximale Schubdehnung nicht. Das könnte daran liegen, dass dieses Element nur zum Teil durch den Keil auf Druck belastet wird und sich zudem nach außen ausweiten kann. Dadurch wird, wie in Kapitel 4.1.9 bereits beschrieben, die maximale Hauptdehnung und folglich die maximale Schubdehnung kleiner. Bei dem fein vernetzten Modell wurden immer alle Elemente einer Reihe gelöscht, die durch den Keil belastet wurden.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche des Erosionskriteriums angeben. In der Tabelle 31 auf der nächsten Seite werden diese aufgelistet.

Tabelle 31: Vor- und Nachteile von EPSSH

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • Stark verformte Elemente lassen sich unabhängig von der Belastungsart herausuchen 	<ul style="list-style-type: none"> • Es lassen sich keine Aussagen über die minimale oder die maximale Hauptdehnung treffen
Anwendungsbereiche des Erosionsverfahrens: <ul style="list-style-type: none"> • Kann in Kombination mit weiteren Erosionskriterien dazu genutzt werden, dass, unabhängig von der Art der Belastung, nur stark verformte Elemente gelöscht werden können 	

Die Kombination von mehreren Erosionskriterien wird in Kapitel 4.2 kurz behandelt.

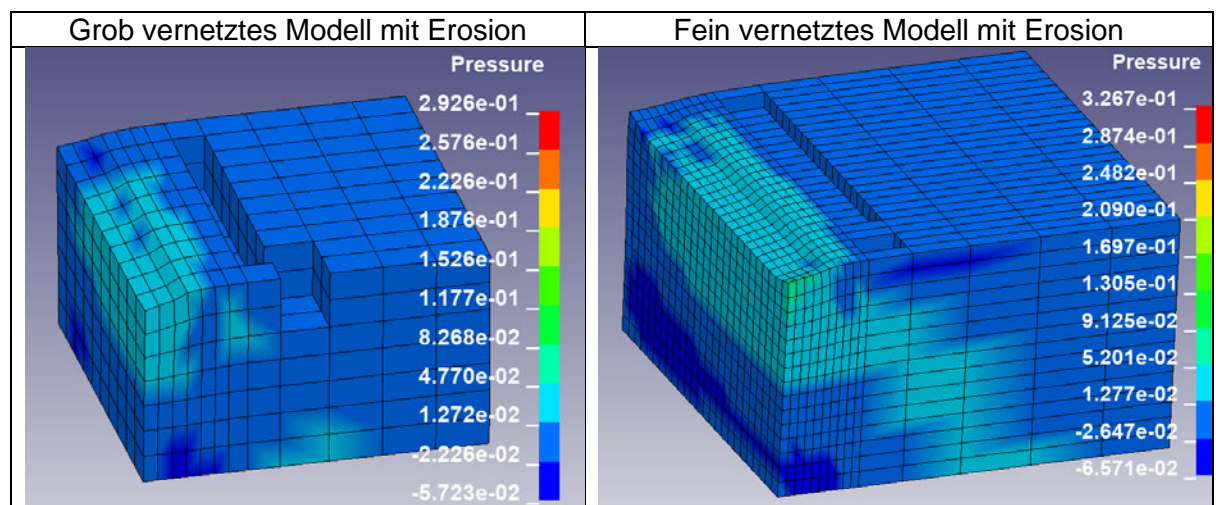
4.2 Analyse und Interpretation der Modelle mit mehreren Erosionskriterien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen der drei Simulationsmodelle mit jeweils zwei Erosionskriterien bildlich dargestellt und anschließend analysiert, interpretiert und bewertet. Als Resultat der Analyse werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Kombination aufgelistet und, wenn möglich, ein Anwendungsbereich definiert. Die am besten bewertete Kombination der Erosionsverfahren wird in der Netzstudie in Kapitel 4.3 verwendet.

4.2.1 Analyse und Interpretation von FAILTM und MNPRES

Die Ergebnisse der Berechnungen des groben und des fein vernetzten Modelles werden in Tabelle 32 abgebildet.

Tabelle 32: Ergebnisse von FAILTM und MNPRES



Nachdem der Keil wieder hochfährt, bilden bzw. verstärken sich aufgrund des Rückganges der elastischen Verformungen Zugspannungen im Block. Bei den vorgegebenen Werten von MNPRES bilden sich auf der Blockoberseite erste Risse. Das auf den Farbskalen kleinere Werte als die Minimalwerte angezeigt werden, liegt daran, dass diese Werte beim Runterfahren des Blockes entstanden sind. Zu diesem Zeitpunkt war die Erosion aufgrund von FAILTM noch nicht eingeschaltet.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche der Kombination der Erosionskriterien angeben. In der Tabelle 33 werden diese aufgelistet.

Tabelle 33: Vor- und Nachteile von FAILTM und MNPRES

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> FAILTM kann Erosion ab einem gewünschten Zeitpunkt aktivieren 	<ul style="list-style-type: none"> MNPRES kann kein Materialversagen abbilden, da keine entsprechenden Materialkennwerte existieren
Anwendungsbereiche der Erosionsverfahren:	
<ul style="list-style-type: none"> Diese Kombination der Erosionskriterien hat keinen sinnvollen Anwendungsbereich 	

Bewertung der Kombination:

Wie bereits in Kapitel 3.5.1 vorgegriffen, kann kein Materialkennwert das Versagen des Materials bei negativem hydrostatischen Druck hinreichend genau vorhersagen. Deshalb ist

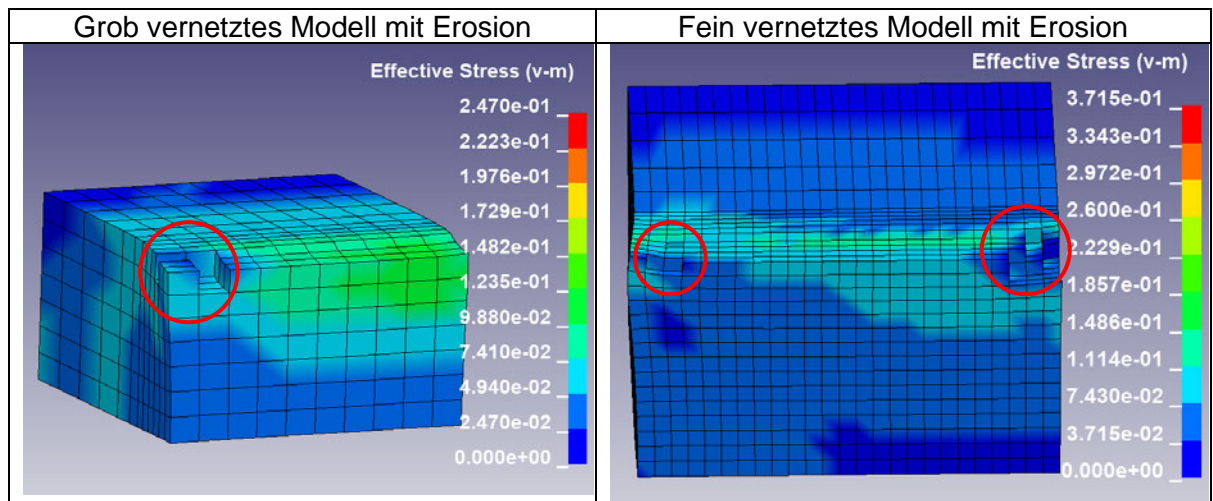
das Ergebnis dieser Kombination nicht aussagekräftig. Zudem wird das angenommene Materialversagen nicht abgebildet.

Mit FAILTM können andere Kombinationen erweitert werden, sodass diese erst ab einem vorgegebenen Zeitpunkt in Kraft treten.

4.2.2 Analyse und Interpretation von SIGVM und MNPRES

Die Ergebnisse der Berechnungen des groben und des fein vernetzten Modelles werden in Tabelle 34 abgebildet.

Tabelle 34: Ergebnisse von SIGVM und MNPRES



Die Ergebnisse beider Modelle werden erst nachdem der Keil wieder hochfährt, erreicht. Aufgrund des Rückganges der elastischen Verformung werden die Kanten des Keilabdruckes auf Zug belastet. Somit werden die Elemente der Kanten des Keilabdruckes gelöscht, die den vorgegeben Vergleichsspannungswert überschreiten, wie in den rot eingekreisten Bereichen der Modelle zu sehen ist. Weitere gelöschte Elemente gibt es nicht. Die Werte auf den Farbskalen überschreiten die Maximalwerte der Vergleichsspannung, weil nur auf Zug belastete Elemente gelöscht werden und die Vergleichsspannung unabhängig von der Art der Beanspruchung ist.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche der Kombination der Erosionskriterien angeben. In der Tabelle 35 werden diese aufgelistet.

Tabelle 35: Vor- und Nachteile von SIGVM und MNPRES

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • MNPRES sucht auf Zug belastete Elemente heraus • SIGVM löscht die Elemente, deren Wert den Maximalwert überschreitet 	<ul style="list-style-type: none"> • Beide Kriterien hängen nicht von der Belastungsrichtung ab • MNPRES-Wert muss an Modell angepasst werden
Anwendungsbereiche der Erosionsverfahren: <ul style="list-style-type: none"> • Bei allen Belastungsarten kann diese Kombination verwendet werden, um auf Zug belastete Elemente bei einem bestimmten Wert zu löschen 	

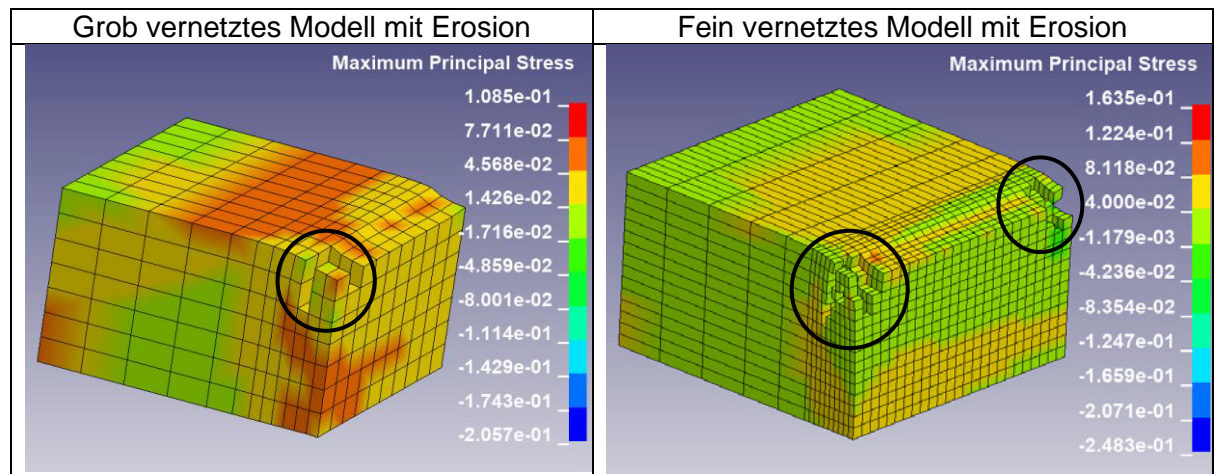
Bewertung der Kombination:

Das angenommene Materialversagen wird an den Kanten des Keilabdruckes abgebildet. Die Rissbildung an der linken Blockseite wird dagegen nicht abgebildet.

4.2.3 Analyse und Interpretation von SIGP1 und MNPRES

Die Ergebnisse der Berechnungen des groben und des fein vernetzten Modelles werden in Tabelle 36 abgebildet.

Tabelle 36: Ergebnisse von SIGP1 und MNPRES



Die endgültigen Ergebnisse beider Modelle werden erst nachdem der Keil wieder hochfährt, erreicht. Aufgrund des Rückganges der elastischen Verformung werden die Kanten des Keilabdruckes auf Zug belastet. Somit werden die Elemente der Kanten des Keilabdruckes gelöscht (schwarz eingekreist), wenn der Maximalwert der größten Hauptspannung überschritten wird. Zuvor, während der Keil noch runterfährt, tritt bei dem fein vernetzten Modell an der linken Seite des Blockes ein Riss auf, der ebenfalls innerhalb des größeren, schwarzen Kreises liegt. Weitere gelöschte Elemente gibt es nicht. Die Werte auf den Farbskalen überschreiten die Maximalwerte der größten Hauptspannung, weil nur auf Zug belastete Elemente gelöscht werden. Die maximale Hauptspannung kann auch bei Elementen mit Schubbelastung auftreten, die nicht auf Zug belastet werden.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsbereiche der Kombination der Erosionskriterien angeben. In der Tabelle 37 werden diese aufgelistet.

Tabelle 37: Vor- und Nachteile von SIGP1 und MNPRES

Vorteile des Erosionsverfahrens	Nachteile des Erosionsverfahrens
<ul style="list-style-type: none"> • MNPRES sucht auf Zug belastete Elemente heraus • SIGP1 löscht die Elemente, deren Wert den Maximalwert überschreitet 	<ul style="list-style-type: none"> • MNPRES-Wert muss an Modell angepasst werden • Die Richtung von SIGP1 kann sich aufgrund der Belastung ändern
Anwendungsbereiche der Erosionsverfahren: <ul style="list-style-type: none"> • Bei allen Belastungsarten kann diese Kombination verwendet werden, um auf Zug belastete Elemente bei einem bestimmten Wert zu löschen 	

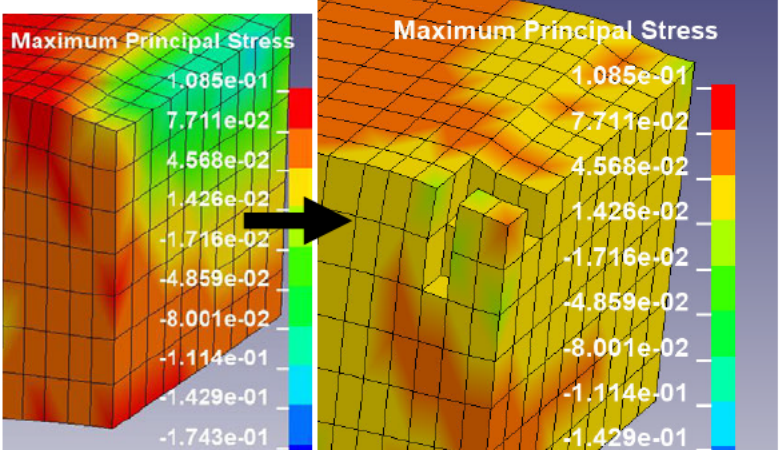
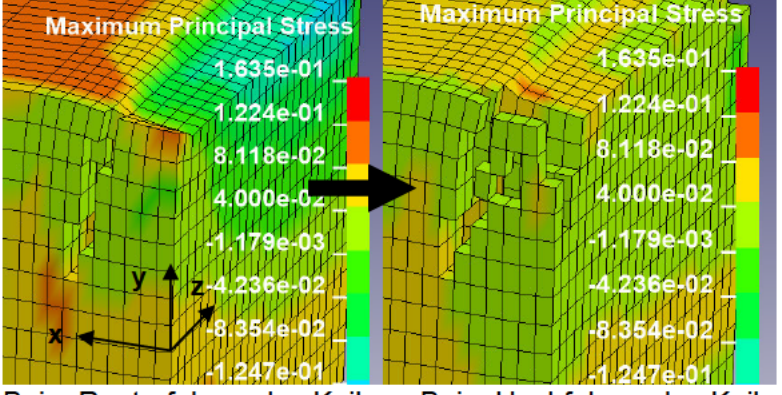
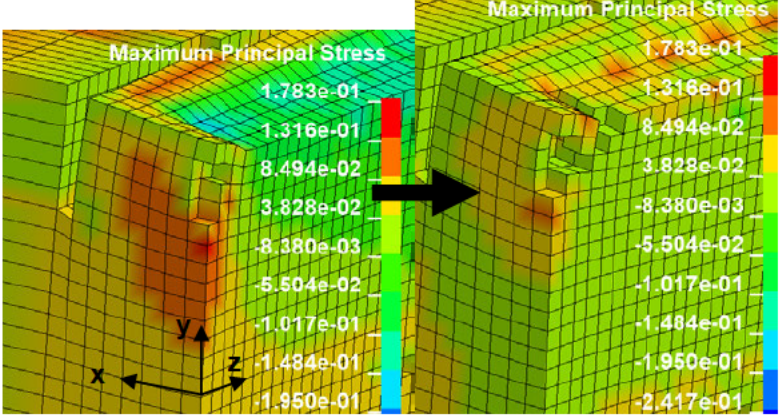
Bewertung der Kombination:

Das angenommene Materialversagen wird sowohl an den Kanten des Keilabdruckes als auch an der linken Seite des Blockes abgebildet. Demnach erzeugt die Kombination SIGP1 und MNPRES die besten Berechnungsergebnisse und wird folglich in Kapitel 4.3 mit Hilfe einer kleinen Netzstudie weiter untersucht.

4.3 Analyse und Interpretation der Netzstudie

In diesem Abschnitt wird die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Vernetzung des Blockes analysiert und interpretiert. Dazu werden die Berechnungsergebnisse der Simulationsmodelle mit SIGP1 und MNPRES in den folgenden Tabellen 38 und 39 bildlich dargestellt. In Tabelle 38 wird der erste kritische Bereich, die linke Blockseite, behandelt.

Tabelle 38: Netzstudie des seitlichen Risses

<p>Grobe Blockvernetzung (1584 Knoten)</p> <p>SIGP1-Wert: 0,12 GPa MNPRES-Wert: -0,03 GPa</p>	 <p>Maximum Principal Stress</p> <p>1.085e-01 7.711e-02 4.568e-02 1.426e-02 -1.716e-02 -4.859e-02 -8.001e-02 -1.114e-01 -1.429e-01 -1.743e-01</p> <p>Maximum Principal Stress</p> <p>1.085e-01 7.711e-02 4.568e-02 1.426e-02 -1.716e-02 -4.859e-02 -8.001e-02 -1.114e-01 -1.429e-01</p> <p>Beim Runterfahren des Keils -> Beim Hochfahren des Keils</p>
<p>Feine Blockvernetzung (7096 Knoten)</p> <p>SIGP1-Wert: 0,14 GPa MNPRES-Wert: -0,03 GPa</p>	 <p>Maximum Principal Stress</p> <p>1.635e-01 1.224e-01 8.118e-02 4.000e-02 -1.179e-03 -4.236e-02 -8.354e-02 -1.247e-01</p> <p>Maximum Principal Stress</p> <p>1.635e-01 1.224e-01 8.118e-02 4.000e-02 -1.179e-03 -4.236e-02 -8.354e-02 -1.247e-01</p> <p>Beim Runterfahren des Keils -> Beim Hochfahren des Keils</p>
<p>Sehr feine Blockvernetzung (15815 Knoten)</p> <p>SIGP1-Wert: 0,14 GPa MNPRES-Wert: -0,06 GPa</p>	 <p>Maximum Principal Stress</p> <p>1.783e-01 1.316e-01 8.494e-02 3.828e-02 -8.380e-03 -5.504e-02 -1.017e-01 -1.484e-01 -1.950e-01</p> <p>Maximum Principal Stress</p> <p>1.783e-01 1.316e-01 8.494e-02 3.828e-02 -8.380e-03 -5.504e-02 -1.017e-01 -1.484e-01 -1.950e-01 -2.417e-01</p> <p>Beim Runterfahren des Keils -> Beim Hochfahren des Keils</p>

Bei der groben Blockvernetzung tritt der seitliche Riss erst auf, nachdem der Keil hochgefahren und die elastische Verformung zurückgegangen ist. Das entspricht nicht dem angenommenen Materialversagen.

Bei der feinen Blockvernetzung tritt der seitliche Riss während der Verformung des Blockes durch den Keil auf, was dem angenommenen Materialversagen entspricht. Die Rissfläche liegt, wie zu Beginn von Kapitel 4 mit Hilfe des Bruchmodus 1 angenommen, senkrecht zur Blockseite in der yz-Ebene. Das bedeutet, dass diese Elemente aufgrund der maximalen Hauptspannungen in x-Richtung gelöscht wurden.

Bei der sehr feinen Blockvernetzung entstehen während der Verformung des Blockes durch den Keil zwei Risse. Der linke, größere Riss zieht sich in z-Richtung durch den gesamten Block und entspricht nicht dem angenommenen Materialversagen. Dieser Riss tritt an dem Übergang der feineren Vernetzung zur groben Vernetzung auf und entsteht, da sich die grob vernetzten Elemente nicht gut verformen lassen. Aus diesem Grund müssen sich die feiner vernetzten Elemente in diesem Bereich stärker verformen, als es in der Realität nötig wäre und werden dementsprechend gelöscht. Der rechte Riss entspricht dem angenommenen Materialversagen und die Rissfläche bildet sich, wie vorhergesagt, in der yz-Ebene. Das deutet darauf hin, dass diese Elemente aufgrund der maximalen Hauptspannungen in x-Richtung gelöscht wurden.

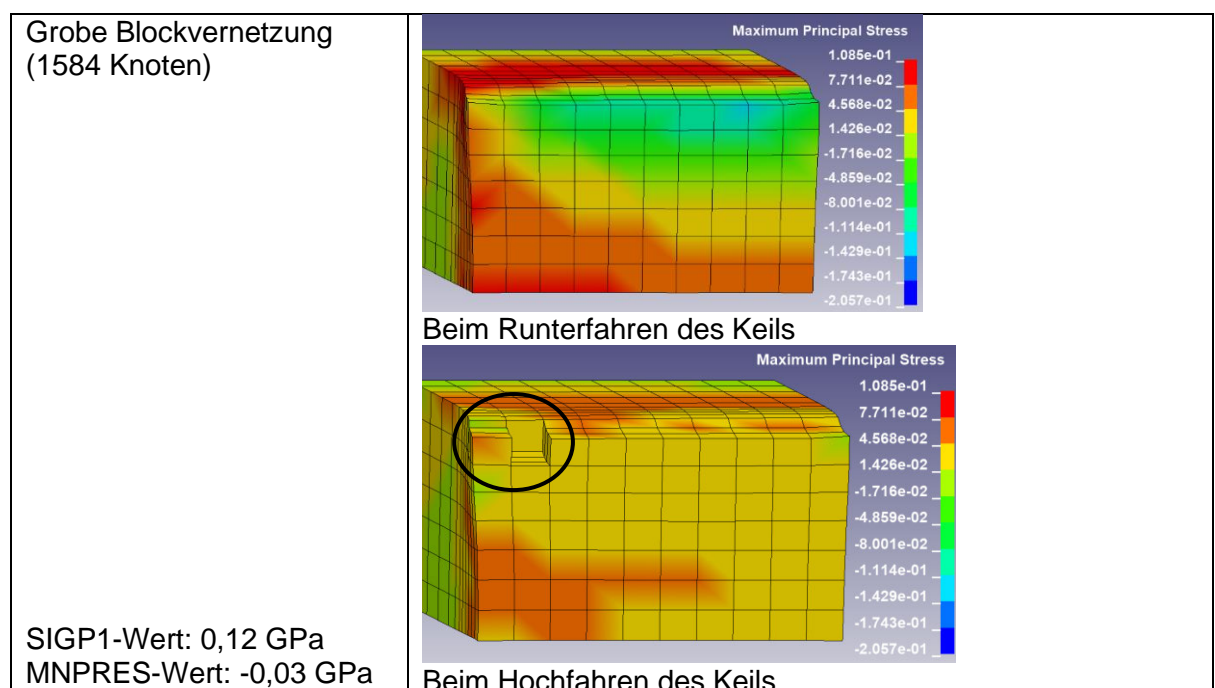
Bei dem Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlich vernetzten Modelle wird deutlich, dass das grob vernetzte Modell das vorhergesagte Materialversagen nicht abbilden kann und somit eine feinere Vernetzung nötig wird.

Die Ergebnisse des fein vernetzten und des sehr fein vernetzten Modelles bilden beide das angenommene Materialversagen ab, unterscheiden sich jedoch in der Lage der Risse. Der rechte Riss der sehr feinen Vernetzung entsteht an der Stelle, an der theoretisch die größte Verformung der linken Blockseite vorliegt, was für die sehr feine Vernetzung spricht. Gegen die sehr feine Vernetzung spricht der linke Riss, der so in der Realität nicht auftreten würde. Dieser Fehler ist, wie bereits erklärt, auf das Modell und nicht auf die sehr feine Vernetzung zurückzuführen. Bis auf die Lage des Risses entspricht das fein vernetzte Modell dem erwarteten Materialversagen.

In diesem Fall würde die feine Vernetzung des Blockes zur Beschreibung des Materialversagens ausreichen, wodurch weniger Rechenzeit aufgewendet werden muss. Die Ergebnisse des sehr fein vernetzten Blockes mit einem überarbeiteten Modell wären genauer, würden aber auch wesentlich mehr Rechenzeit benötigen.

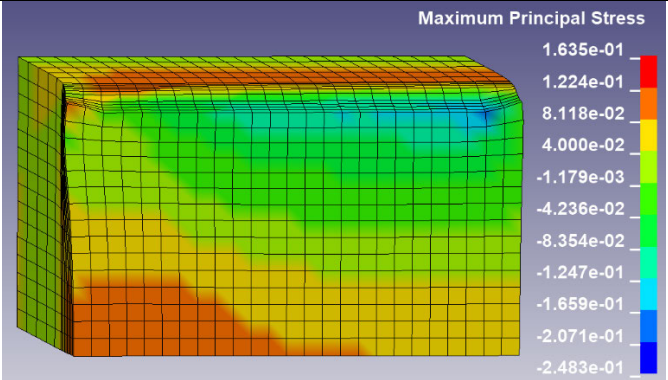
Der zweite kritische Bereich beinhaltet die Kanten des Keilabdruckes, um die es in Tabelle 39 geht.

Tabelle 39: Netzstudie der Risse um die Keilkanten

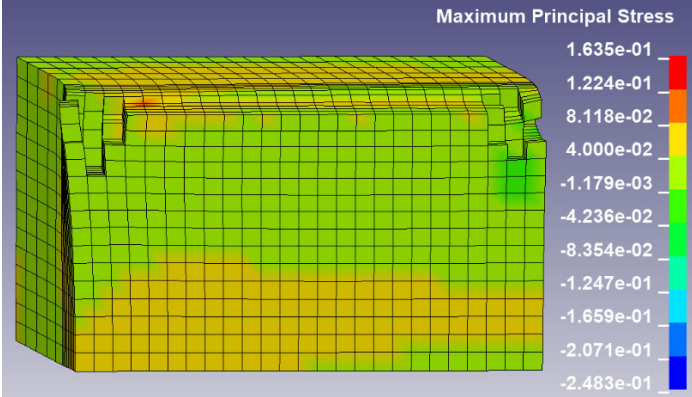


Feine Blockvernetzung
(7096 Knoten)

SIGP1-Wert: 0,14 GPa
MNPRES-Wert: -0,03 GPa



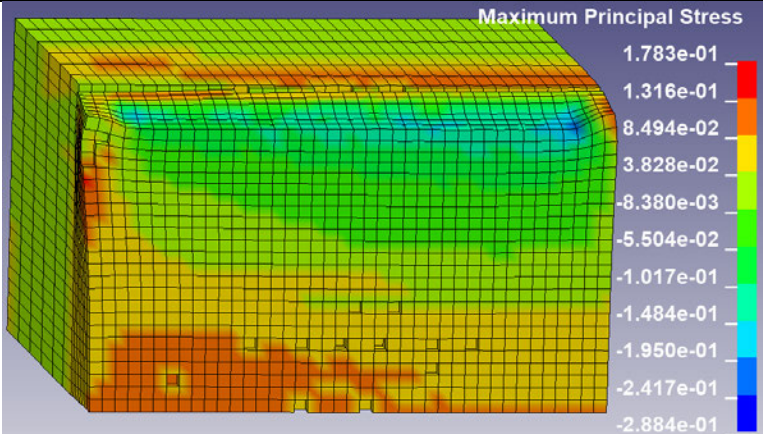
Beim Runterfahren des Keils



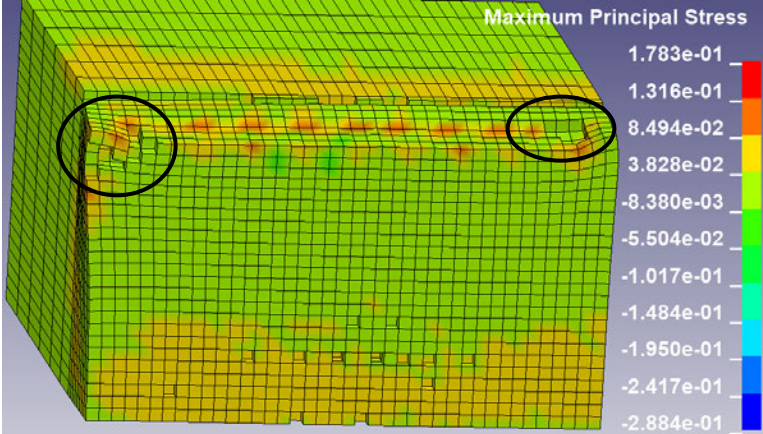
Beim Hochfahren des Keils

Sehr feine Blockvernetzung
(15815 Knoten)

SIGP1-Wert: 0,14 GPa
MNPRES-Wert: -0,06 GPa



Beim Runterfahren des Keils



Beim Hochfahren des Keils

Bei der groben Blockvernetzung tritt der Riss an der linken Kante (schwarz eingekreist) auf, nachdem der Keil hochgefahren und die elastische Verformung zurückgegangen ist. Das entspricht zum Teil dem angenommenen Materialversagen.

Bei der feinen Blockvernetzung treten die Risse an beiden Kanten ebenso erst auf, nachdem der Keil hochgefahren und die elastische Verformung zurückgegangen ist. Da sich an beiden Kanten Risse bilden, wird das vorhergesagte Materialversagen erfüllt.

Bei der sehr feinen Blockvernetzung entstehen an beiden Kanten Risse (schwarz eingekreiste Bereiche), nachdem der Keil hochgefahren und die elastische Verformung zurückgegangen ist. Das erwartete Materialversagen wird erfüllt.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlich vernetzten Modelle wird deutlich, dass das grob vernetzte Modell das vorhergesagte Materialversagen nicht vollständig abbilden kann und somit eine feinere Vernetzung nötig wird.

Die Ergebnisse des fein vernetzten und des sehr fein vernetzten Modelles bilden beide das angenommene Materialversagen ab, unterscheiden sich jedoch in der Darstellung der Risse. Bei der feinen Vernetzung werden mehrere Elemente gelöscht, wodurch die Rissausbreitung nur vage nachvollzogen werden kann. Bei der sehr feinen Vernetzung werden weniger Elemente gelöscht, wodurch die Rissausbreitung besser nachvollzogen werden kann. Zum einen kann die Anzahl der gelöschten Elemente von den vorgegebenen Werten der Erosionskriterien abhängen und zum anderen ist die Darstellung der Risse von der Größe der Elemente abhängig.

In diesem Fall wird das angenommene Materialversagen aufgrund der Elementgröße von dem sehr fein vernetzten Modell besser dargestellt. Gegebenenfalls könnte das Ergebnis des fein vernetzten Modelles durch leicht abgeänderte Werte der Erosionskriterien verbessert werden, sodass die sehr feine Vernetzung nicht verwendet werden muss. Dadurch könnte die benötigte Rechenzeit verringert werden.

Die Netzstudie hat gezeigt, dass eine feinere Vernetzung notwendig ist, damit das theoretische Materialversagen abgebildet werden kann. Ebenfalls ist deutlich geworden, dass durch eine immer feiner werdende Vernetzung die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses zunimmt. Dabei ist aufgefallen, dass das feiner vernetzte Modell nicht zwangsläufig immer notwendig ist. Je nachdem, was für eine Art von Materialversagen untersucht wird, muss entschieden werden, wie genau das Ergebnis sein soll. Die Kehrseite der hohen Genauigkeit ist die damit einhergehende hohe Rechenzeit. Infolgedessen lässt sich nicht sagen, dass feiner vernetzte Modelle immer besser sind.

Der zuvor beschriebene Anwendungsbereich der Kombination von SIGP1 und MNPRES änderte sich durch die noch feinere Vernetzung nicht. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Werte der Erosionskriterien, insbesondere von MNPRES, an das verwendete Modell angepasst werden. Der Wert von SIGP1 kann gleich der Zugfestigkeit des verwendeten Materials sein, oder der mit einem Sicherheitsfaktor reduzierten Zugfestigkeit des Materials entsprechen.

In dieser Bachelorarbeit wurde der SIGP1-Wert so ausgewählt, dass das Materialversagen bei der gegebenen Eindringtiefe des Keils abgebildet werden kann. Das bedeutet, dass das verwendete Aluminium bei einer Eindringtiefe von 0,3 mm in der Realität nicht versagen würde.

4.4 Literaturrecherche

Aufgrund von Zeitmangel konnte keine weiterführende Literaturrecherche durchgeführt werden. Infolgedessen konnten keine weiteren, noch nicht in LS-DYNA integrierten, Erosionsverfahren gefunden werden.

Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, wurde beim Vergleichen der User Manuals von 2018 und 2021 festgestellt, dass sich die Erosionskriterien, bis auf eine ergänzende Funktion (VOLFRAC), nicht verändert haben. Daraus könnte abgeleitet werden, dass der Bedarf an neuen Erosionskriterien gering ist.

Diese Vermutung lässt sich dadurch begründen, dass durch unterschiedliche Kombinationen der vorhandenen Erosionskriterien viele Anwendungsbereiche abgedeckt werden können. Zudem können in LS-DYNA auch noch andere Schadens- und Versagensmodelle zur Abbildung des Materialversagens genutzt werden.

5. Zusammenfassung der Bachelorarbeit und Ausblick

5.1 Zusammenfassung der Bachelorarbeit

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist der Vergleich der aktuell in LS-DYNA gängigen Erosionsverfahren mit Hilfe eines Simulationsmodelles. Für die unterschiedlichen Erosionskriterien sollen Vor- und Nachteile angegeben und Anwendungsbereiche definiert werden. Durch die genauere Untersuchung der Kriterien soll ein besseres Verständnis für das Versagensmodell Erosion in LS-DYNA geschaffen werden, sodass das Materialverhalten des Blockes realistischer beschrieben werden kann. Ein weiteres Problem ist die sehr lange Rechenzeit der Berechnung, die ggf. reduziert werden soll. Damit diese Ziele erreicht werden können, wurde diese Bachelorarbeit wie folgt aufgebaut.

Das Kapitel 1 fasst das notwendige Wissen für die Erstellung des Simulationsmodelles und für die Benutzung der Erosionskriterien zusammen. Ebenfalls wird in Kapitel 1 das Wissen angegeben, mit dem das angenommene Materialversagen begründet wird.

Das Kapitel 2 erklärt, wie das Simulationsmodell aufgebaut wird, sodass die Ergebnisse der Berechnungen nicht durch irgendwelche Modellfehler beeinflusst werden.

Das Kapitel 3 begründet die Auswahl der zu untersuchenden Erosionskriterien und erläutert, wie die Untersuchung dieser Erosionskriterien abläuft. Dabei wird ebenso darauf eingegangen, weshalb die Erosionsverfahren kombiniert werden und weshalb die Netzstudie durchgeführt wird.

Das Kapitel 4 gibt das angenommene Materialversagen vor und vergleicht die Erosionsverfahren, indem Vor- und Nachteile sowie Anwendungsbereiche der Erosionskriterien bestimmt werden. Die Kombinationen der Erosionsverfahren werden bewertet und das Ergebnis der Netzstudie wird diskutiert.

Die Funktionsweise von jedem der zehn Erosionsverfahren wird durch deren Untersuchung verständlich und kann folglich bewertet und eingeschätzt werden. Die Bewertung und Einschätzung der Kriterien werden in Form der Vor- und Nachteile sowie der Anwendungsbereiche angegeben. Mit Hilfe des erarbeiteten Verständnisses der Erosionsverfahren kann das angenommene, realistische Materialverhalten des Blockes durch die Kombination von SIGP1 und MNPRES abgebildet werden. Das primäre Ziel dieser Bachelorarbeit wird somit erfüllt.

Die Rechenzeit der Simulationsmodelle kann nicht zwangsläufig reduziert werden. Aus der Netzstudie der Kombination von SIGP1 und MNPRES wird jedoch deutlich, dass die Vernetzung des Modelles nicht immer sehr fein sein muss, um gute Ergebnisse zu erzielen. Demnach kann die Rechenzeit reduziert bzw. optimiert werden, indem die Vernetzung nur so fein wie nötig ist.

5.2 Ausblick

Das verwendete Simulationsmodell kann noch weiter verbessert werden, um die Qualität der Ergebnisse noch weiter zu erhöhen. Im Folgenden werden zwei Verbesserungsansätze genannt, mit denen die in diesem Dokument beschriebene Arbeit fortgeführt werden kann.

Bei dem ersten Verbesserungsansatz werden die Keilgeometrie und die Lagerung des Blockes verbessert, mit denen die Erosionskriterien weiter untersucht werden können. Die Rundung des Keils muss kleiner werden, sodass der Keil spitzer ist. Dadurch wird der stark verformte Bereich kleiner, wodurch die Elemente des Blockes schneller abgesichert werden. Während der Keil in den Block hineinfährt, könnten sich durch die Abscherung der Elemente Risse bilden. Bei der Größe der Keilrundung muss ein Kompromiss gefunden werden, bei dem der verformte Bereich klein ist und ebenfalls der Kontakt problemlos funktioniert.

Die Lagerung der rechten Blockseite in z-Richtung führt dazu, dass diese Seite des Blockes steifer ist als die nicht gelagerte Seite. Auf diese Art und Weise wird die Spannungsverteilung im Block beeinflusst. Durch eine veränderte Auswahl der Knoten, die in z-Richtung gelagert werden, könnten die Eigenschaften des Blockmodelles verbessert werden. Bei der Auswahl der Knoten, die in z-Richtung gelagert werden, könnten z.B. die Knoten auf der Blockunterseite oder nur die Knoten der untersten Reihen der rechten Blockseite gelagert werden. Anhand der Berechnungsergebnisse müsste die optimale Lagerung herausgefunden werden.

Bei dem zweiten Verbesserungsansatz kann das Problem der hohen Rechenzeit möglicherweise durch die Verwendung der impliziten Zeitintegration, die in Kapitel 1.5.3 und 1.5.4 beschrieben wurde, verringert werden. Dazu müsste das Simulationsmodell angepasst und mit der impliziten Zeitintegration erweitert werden. Diese könnte bspw. in bestimmten Zeitfenstern der Simulation benutzt werden, sodass es einen Wechsel zwischen dem expliziten und dem impliziten Verfahren gibt.

Ebenfalls kann aufbauend auf dieser Bachelorarbeit eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt werden, die nach weiteren, noch nicht in LS-DYNA integrierten, Erosionsverfahren sucht. Dabei kann der Fokus der Recherche z.B. auf der Darstellung eines von Beginn an rissbehafteten Körpers liegen, der sich dementsprechend anders verhält und anders versagt.

Es gibt noch andere Verfahren in LS-DYNA, die bei Problemstellungen angewendet werden können, für die auch Erosion verwendet wird. Zum Beispiel kann SPH („Smoothed Particle Hydrodynamics“), eine netzfreie Methode, zur Berechnung von größeren Deformationen genutzt werden. Diese Verfahren gilt es in der Zukunft im Auge zu behalten, sodass abgewogen werden kann, wann deren Verwendung sinnvoller ist als die Verwendung von Erosion.

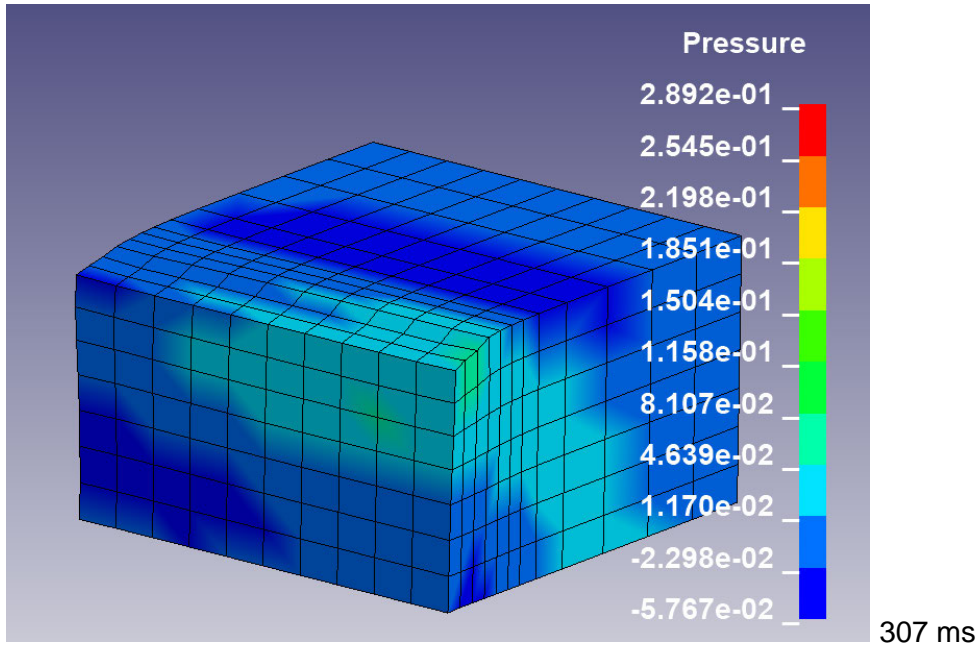
Literaturverzeichnis

- [1] Altenbach, H.: Kontinuumsmechanik. Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen. 3., überarbeitete Auflage, Springer Vieweg, Berlin u.a., 2015.
- [2] Andrade, F.: Short Overview of Failure and Damage Models in LS-DYNA. DYNAMore Express, 15.07.2022.
- [3] Andrade, F.; Erhart, T.: Good old *MAT_024. A review of LS-DYNA's most popular material model. DYNAMore GmbH, Stuttgart, 29.05.2020.
- [4] Belytschko, T. u.a.: Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. 2. Auflage, John Wiley & Sons, 2014.
- [5] Dong, S. u.a.: Friction in LS-DYNA: Experimental Characterization and Modeling Application. 14th International LS-DYNA Users Conference, 12. – 14.06.2016.
- [6] Erhart, T.: Review of Solid Element Formulations in LS-DYNA. LS-DYNA Forum, Stuttgart, 12.10.2011.
- [7] Gomeringer, R. u.a.: Tabellenbuch Metall. 47., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2017.
- [8] italpres: Die mechanischen Eigenschaften von Aluminium. „<https://www.italpres.de/aluminium-druckguss-nachrichten/mechanischen-eigenschaften-von-aluminium>“, Abruf am 19.10.2022 um 20:30 Uhr.
- [9] Kuzmin, S.; KONSCHA Simulation: Persönliche Auskunft. 01.08-21.10.2022.
- [10] Livermore Software Technology Corporation: Hourglass. 2012.
- [11] Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA. KEYWORD USER'S MANUAL. Volume 2, 2018 (R11).
- [12] Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA. KEYWORD USER'S MANUAL. Volume 2, 2021 (R13).
- [13] Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA. THEORY MANUAL. 2006.
- [14] Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA. THEORY MANUAL. 2018.
- [15] O. Verf.: Bild der Stahlplatte. „https://www.metallparadies.de/images/product_images/original_images/stahlblech-15-0.jpg“, Abruf am 24.09.2022 um 16:00 Uhr.
- [16] O. Verf.: Einheitentabelle zu LS-DYNA. „<https://www.dynasupport.com/howtos/general/consistent-units>“, Abruf am 29.09.2022 um 20:00 Uhr.
- [17] Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [18] Stühmeyer, A.; CADFEM Support: Persönliche Auskunft. 01.08-21.10.2022.

Anhang A

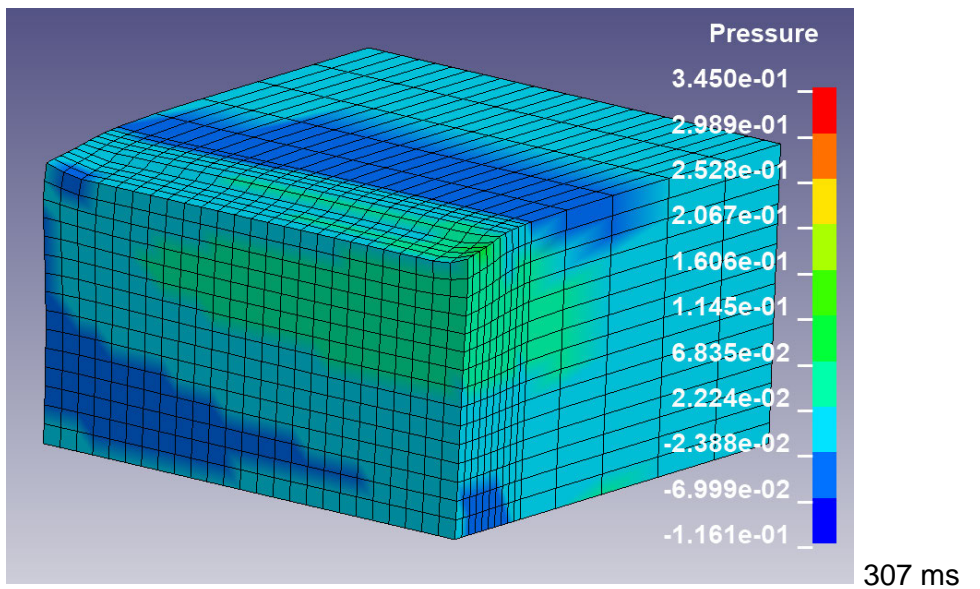
Zu 3.5.1 FAILTM und MNPRES

Bild grob vernetztes Modell ohne Erosion: Pressure (nach 300 ms)



Bei 307 ms ist die elastische Verformung wieder komplett zurückgegangen.

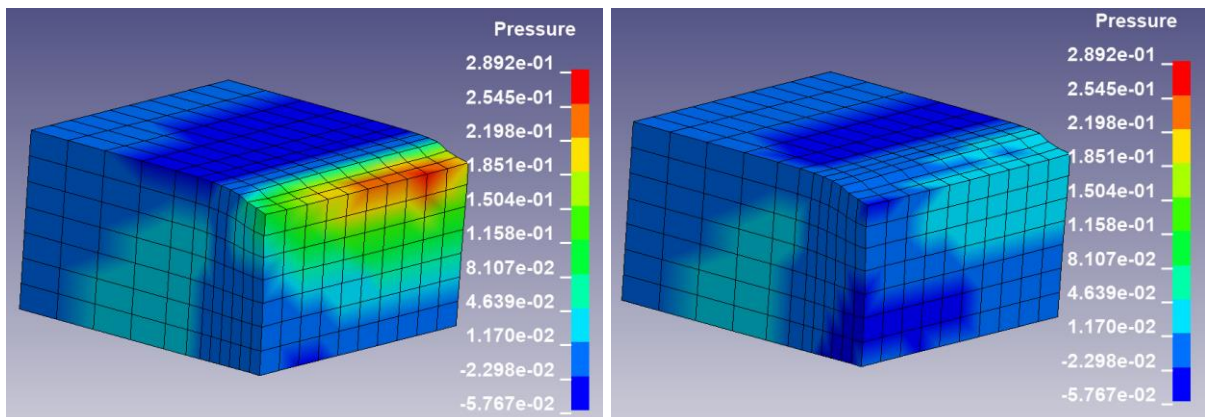
Bild fein vernetztes Modell ohne Erosion: Pressure (nach 300 ms)



Bei 307 ms ist die elastische Verformung wieder komplett zurückgegangen.

Zu 3.5.2 SIGVM und MNPRES

Bilder grob vernetztes Modell ohne Erosion: Pressure (zu zwei Zeitpunkten)



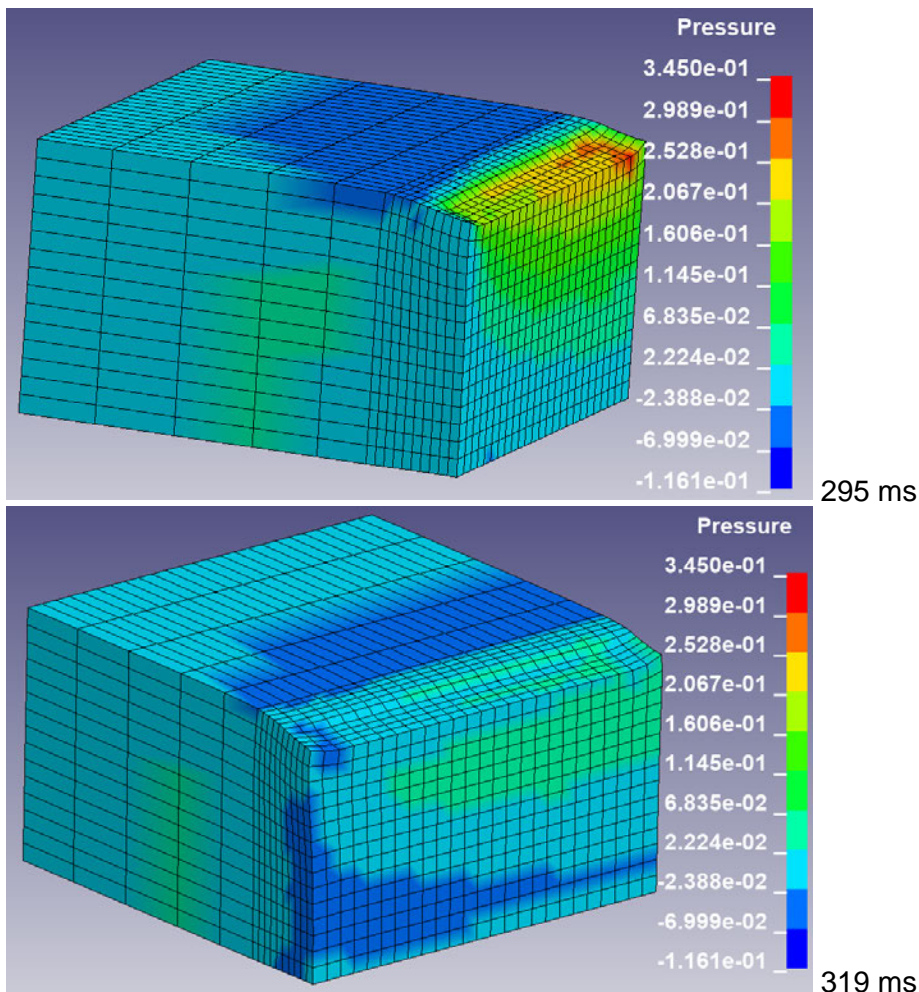
299 ms

319 ms

Diese Bilder der Pressure-Werte wurden auch für 3.5.3 verwendet.

Bei 319 ms ist die elastische Verformung wieder komplett zurückgegangen.

Bilder fein vernetztes Modell ohne Erosion: Pressure (zu zwei Zeitpunkten)



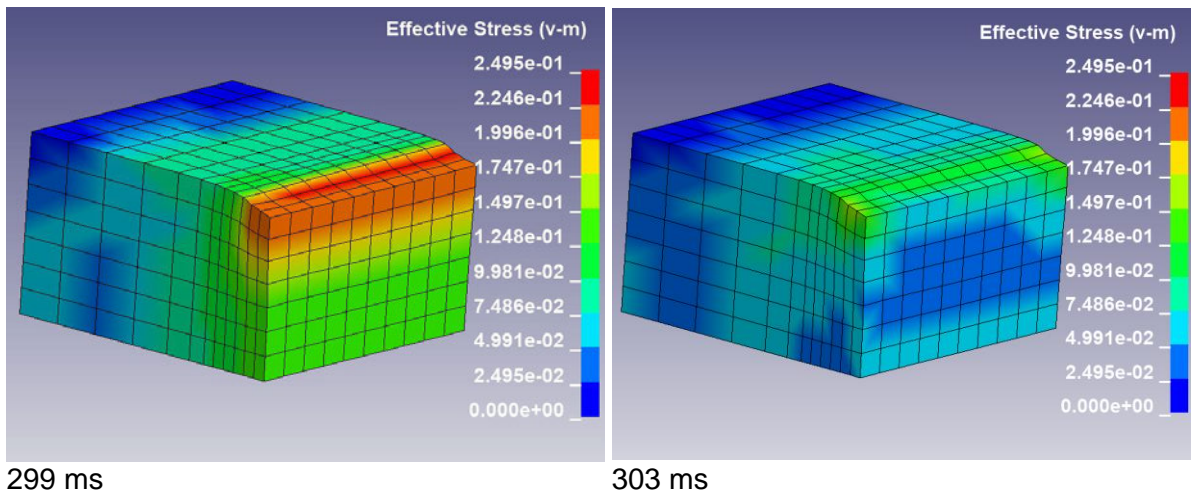
295 ms

319 ms

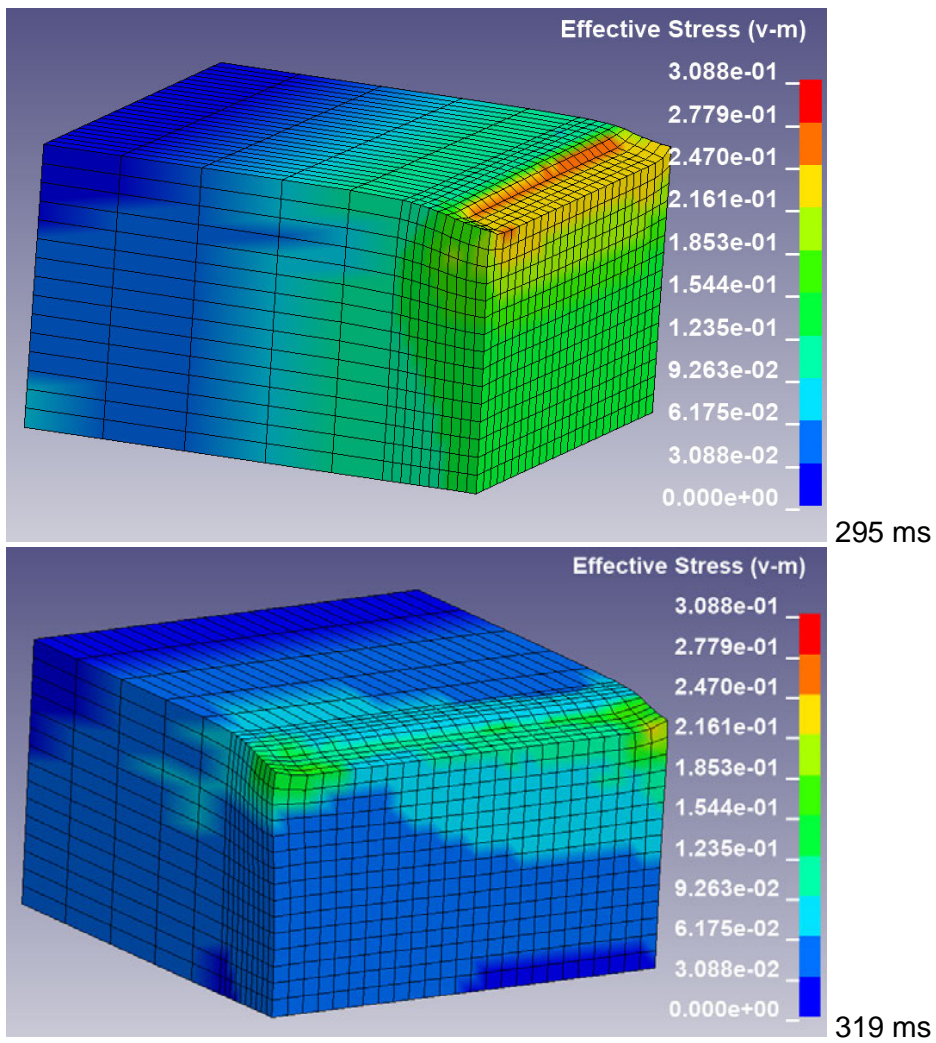
Diese Bilder der Pressure-Werte wurden auch für 3.5.3 verwendet.

Bei 319 ms ist die elastische Verformung wieder komplett zurückgegangen.

Bilder grob vernetztes Modell ohne Erosion: Von-Mises Spannung (zu zwei Zeitpunkten)

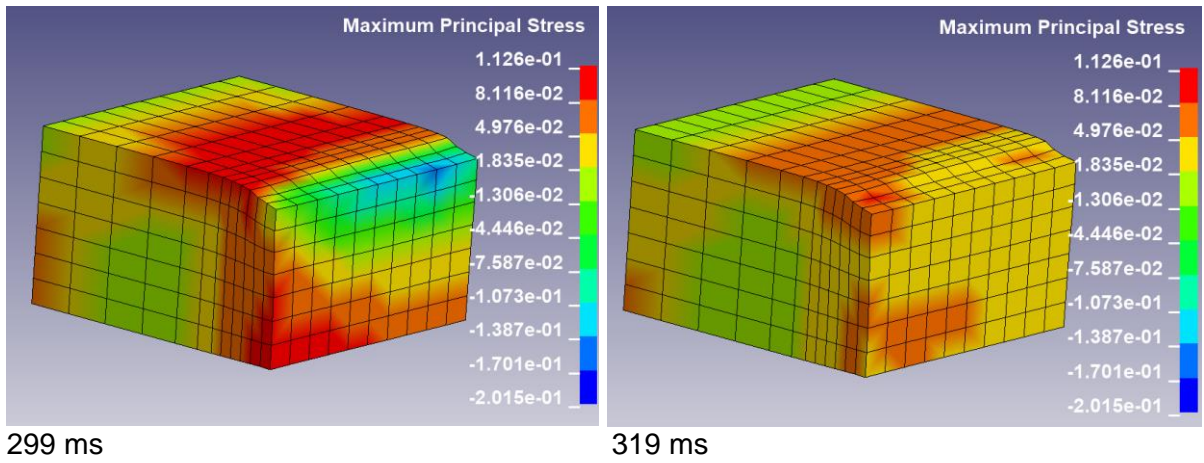


Bilder fein vernetztes Modell ohne Erosion: Von-Mises Spannung (zu zwei Zeitpunkten)

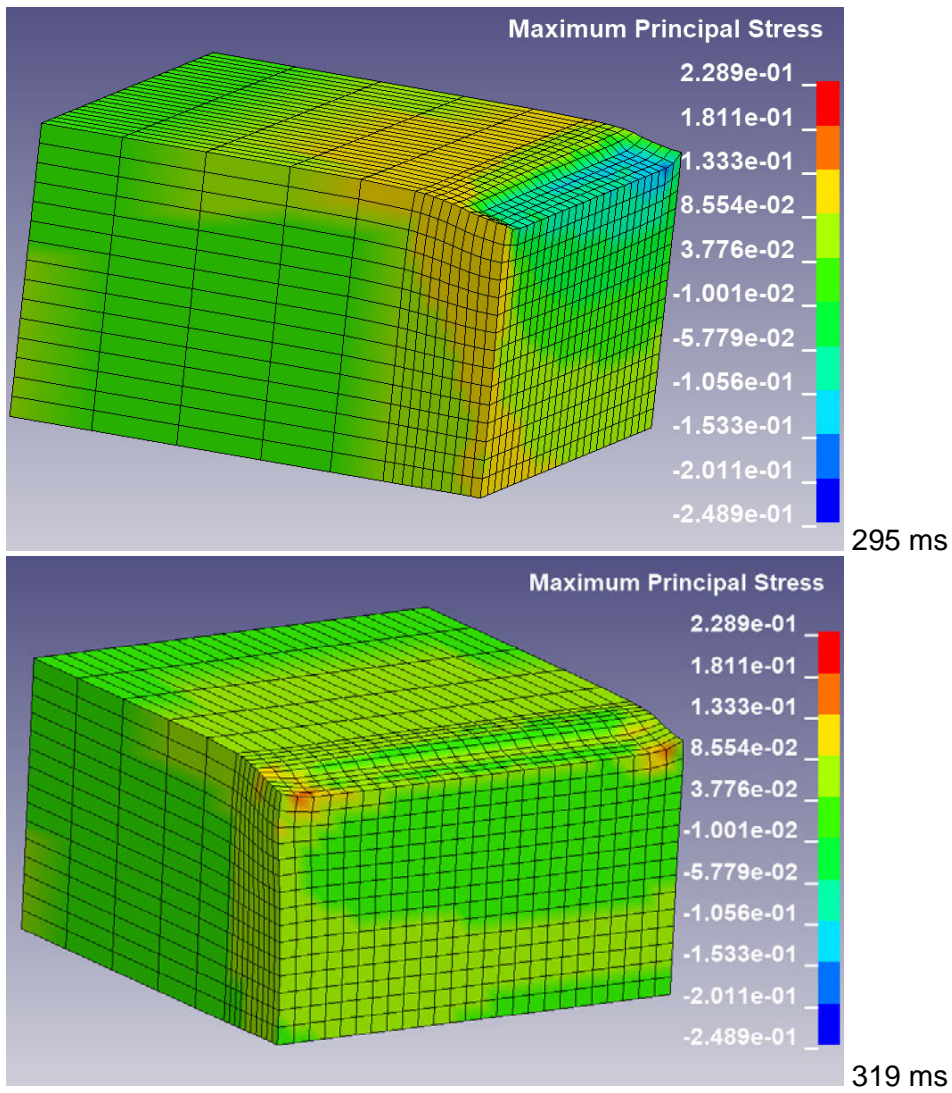


Zu 3.5.3 SIGP1 und MNPRES

Bilder grob vernetztes Modell ohne Erosion: max. Hauptspannung (zu zwei Zeitpunkten)

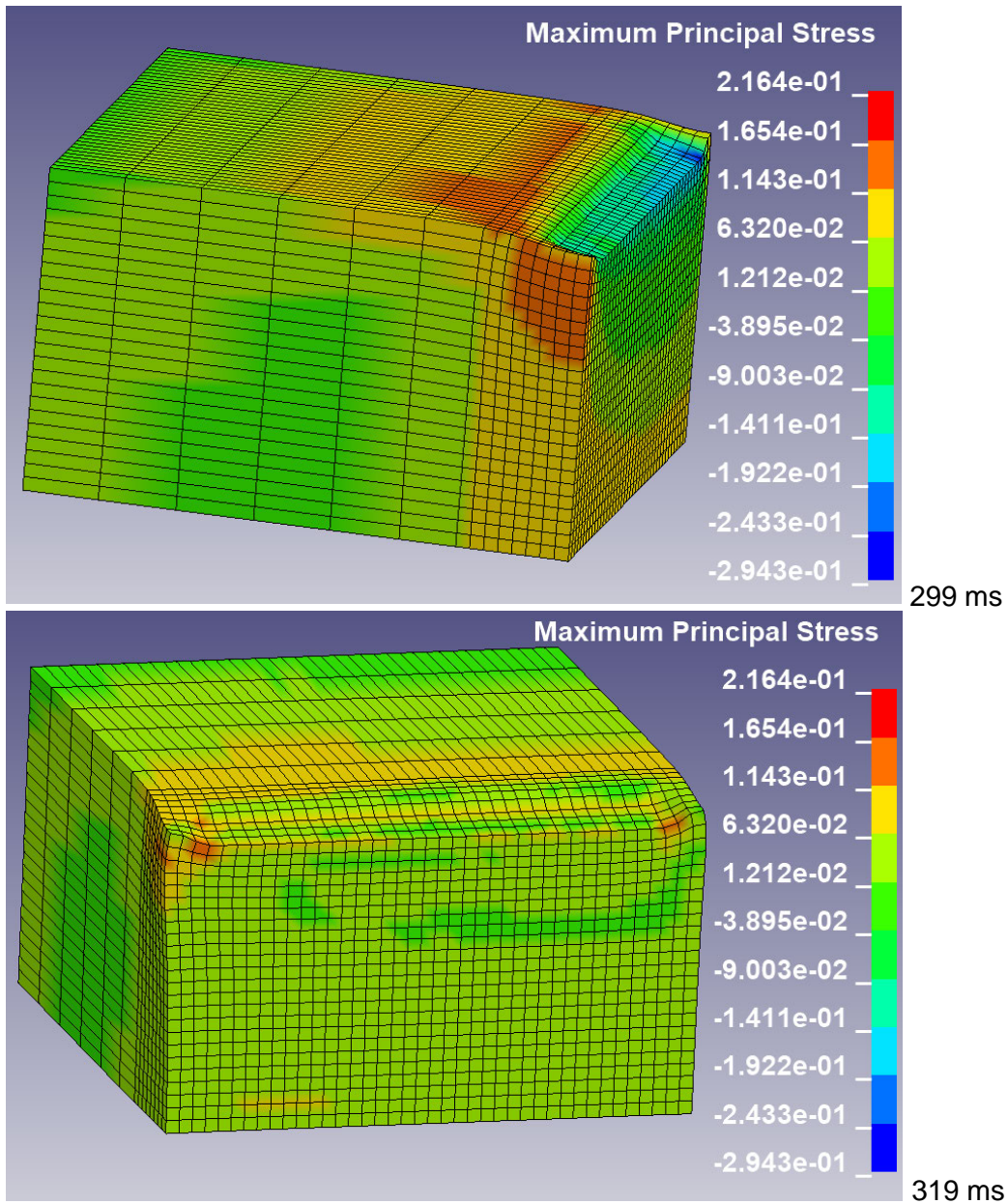


Bilder fein vernetztes Modell ohne Erosion: max. Hauptspannung (zu zwei Zeitpunkten)

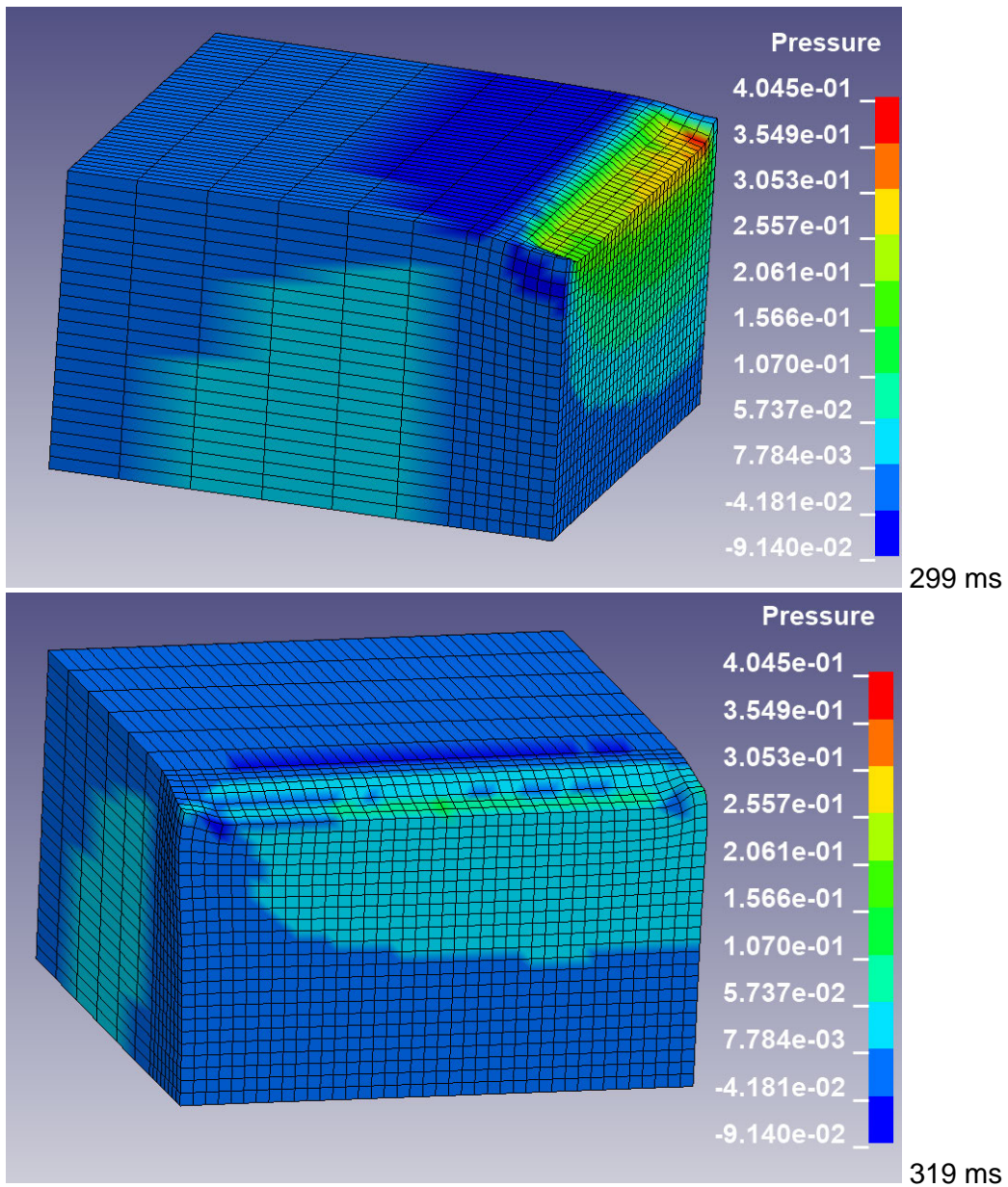


Zu 3.6 Netzstudie

Bilder sehr fein vernetztes Modell ohne Erosion: max. Hauptspannung (zu zwei Zeitpunkten)



Bilder sehr fein vernetztes Modell ohne Erosion: Pressure (zu zwei Zeitpunkten)



Bei 319 ms ist die elastische Verformung wieder komplett zurückgegangen.