
Masterarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)
der Studienrichtung Rohstoffgewinnung und Tunnelbau
Schwerpunktfach Geotechnik und Tunnelbau

eingereicht am
Lehrstuhl für Subsurface Engineering
an der Montanuniversität Leoben



Thomas Stoxreiter, BSc
Leoben, im August 2015

Thema

**Durchführung und numerische
Simulation des Keilspalttests an
Gesteinsproben**

Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angeführten Quellen verwendet und die wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Datum

Thomas Stoxreiter, BSc

Danksagung

Mein Dank gilt dem Lehrstuhl für Subsurface Engineering für die kompetente Betreuung. Besonders möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler bedanken.

Ich möchte mich bei Dipl.-Ing. Paul Gehwolf für die anregenden und fruchtbaren Diskussionen zur numerischen Simulation bedanken.

Ein weiterer Dank gilt dem Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde für die gute Zusammenarbeit, insbesondere Dipl.-Ing. Robert Emler und Dipl.-Ing. Dr. mont. Dietmar Gruber.

Ich möchte mich bei der Sandvik Mining and Construction G.m.b.H. für die Unterstützung und für die Bereitstellung von Probenmaterial bedanken.

Bei meiner gesamten Familie und besonders bei meinen Eltern Monika und Norbert und meinen Großeltern Marianne und Johann möchte ich mich herzlich dafür bedanken, dass sie mich stets auf jede erdenkliche Weise unterstützt haben und mir auf diese Weise das Studium erst ermöglichten.

Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Carolin, die mir das ganze Studium hindurch zur Seite gestanden ist und mir in schwierigen Situationen den nötigen Rückhalt gegeben hat.

Der österreichischen Bundesregierung (insbesondere dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und dem Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft) vertreten durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), und den Ländern Steiermark und Tirol, vertreten durch die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH (SFG) sowie die Standortagentur Tirol, wird für die Förderung im Rahmen des COMET Förderprogramms herzlich gedankt.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden die bruchmechanischen Parameter an Granit- und Sandsteinproben mit Hilfe des Keilspalttests nach E. Tschegg bestimmt. Allgemein stellt der Keilspalttest eines der gebräuchlichsten Verfahren zur bruchmechanischen Charakterisierung von heterogenen Werkstoffen unter Modus I Belastung dar. Die Bestimmung der spezifischen Bruchenergie und der nominellen Kerbzugfestigkeit erfolgt unmittelbar aus dem Versuch, die direkte Zugfestigkeit wird invers ermittelt. Die experimentellen Ergebnisse werden mit dem FEM-Programmpaket ABAQUS numerisch nachgebildet und für die Materialien Granit und Sandstein repräsentative Materialparametersätze generiert. Die experimentellen und numerischen Resultate werden mit den Ergebnissen von direkten Zugversuchen und Brazilian-Tests verglichen und verifiziert.

Abstract

The purpose of this paper is the determination of the fracture mechanical characteristic values of granite and sandstone samples using the wedge splitting test according to E. Tschegg. The wedge splitting test is one of the most common techniques used for the determination of the fracture mechanical characterization of heterogeneous materials under crack mode I. The specific fracture energy and the nominal notch tensile strength will be calculated directly from the testing and the tensile strength has to be ascertained inversely. The results gained from the experiments will be implemented in ABAQUS, a finite element analysis software. Further, the results will be used for the creation of a set of representative material parameters for granite and sandstone. For reasons of verification, the numerical and experimental results will be compared with the results of direct tensile tests and Brazilian tests.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG | 1 |
| 2 | BRUCHMECHANIK | 2 |
| 2.1 | URSACHEN UND ERSCHEINUNGSFORMEN DES BRUCHS | 2 |
| 2.1.1 | <i>Mikroskopische Aspekte</i> | <i>2</i> |
| 2.1.2 | <i>Makroskopische Aspekte</i> | <i>3</i> |
| 2.2 | LINEARE BRUCHMECHANIK | 4 |
| 2.3 | KONTINUUMS-SCHÄDIGUNGSMECHANIK..... | 5 |
| 2.3.1 | <i>Spröde Schädigung.....</i> | <i>6</i> |
| 3 | KEILSPALTTEST | 7 |
| 3.1 | VERSUCHSAUFBAU, DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG | 7 |
| 3.1.1 | <i>Auswerteverfahren am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde</i> | <i>10</i> |
| 3.2 | ERGEBNISSE..... | 11 |
| 3.3 | NUMERISCHE SIMULATION..... | 16 |
| 3.3.1 | <i>Implizite und explizite Modellierung</i> | <i>16</i> |
| 3.3.2 | <i>Ergebnisse der numerischen Simulation</i> | <i>23</i> |
| 4 | GEOTECHNISCHE STANDARDVERSUCHE | 33 |
| 4.1 | DIREKTER ZUGVERSUCH | 33 |
| 4.1.1 | <i>Numerisches Modell implizit.....</i> | <i>33</i> |
| 4.1.2 | <i>Ergebnisse implizit</i> | <i>34</i> |
| 4.1.3 | <i>Numerisches Modell explizit.....</i> | <i>36</i> |
| 4.1.4 | <i>Ergebnisse explizit.....</i> | <i>36</i> |
| 4.2 | BRAZILIAN-TEST..... | 39 |
| 4.2.1 | <i>Numerisches Modell implizit.....</i> | <i>40</i> |
| 4.2.2 | <i>Ergebnisse implizit</i> | <i>40</i> |
| 4.2.3 | <i>Numerisches Modell explizit.....</i> | <i>41</i> |
| 4.2.4 | <i>Ergebnisse explizit.....</i> | <i>42</i> |
| 4.3 | EINAXIALER DRUCKVERSUCH..... | 43 |
| 4.3.1 | <i>Numerisches Modell.....</i> | <i>43</i> |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3.2 | <i>Ergebnisse einaxialer Druckversuch</i> | 44 |
| 5 | RESULTATE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN | 46 |
| 6 | TUTORIAL | 48 |
| 6.1 | AUFBAU ALLGEMEIN | 48 |
| 6.2 | EXPLIZITES MODELL | 61 |
| 6.3 | IMPLIZITES MODELL | 101 |
| | LITERATURVERZEICHNIS | 113 |
| | TABELLENVERZEICHNIS | 115 |
| | ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 116 |
| | ANHANG A | 118 |

1 Einleitung und Problemstellung

Für viele Bereiche der Geotechnik, wie Tunnelbau, Bergbau, Spezialtiefbau etc. ist die numerische Modellierung der jeweiligen Problemstellungen heute unverzichtbar. Entscheidend für eine erfolgreiche Anwendung ist, dass die Reaktion von Boden, Fels und den verwendeten Baustoffen auf auftretende Belastungen möglichst realitätsnah nachgebildet werden kann.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem mechanischen Verhalten von Fels unter Zugbelastung und der numerischen Simulation. Grundlage für eine aussagekräftige Berechnung ist ein geeignetes Materialgesetz, wobei eine große Herausforderung in der korrekten Ermittlung der Eingabeparameter besteht. Für die durchgeführten Berechnungen dient die Auswertung mehrerer verschiedener Versuche als Grundlage zur Erhebung der benötigten Daten. Dabei werden neben gängigen Labortests, wie dem direkten Zugversuch und dem Brazilian-Test, die Ergebnisse des in der Feuerfestindustrie bekannten Keilspalttests nach E. Tschegg verwendet. Dieser stellt ein zur Bestimmung der mechanischen Kenngrößen unter Zugbelastung geeignetes Prüfverfahren dar. [1] Die für den Druckbereich notwendigen Parameter und der Elastizitätsmodul werden aus einaxialen Druckversuchen ermittelt und ebenso mit Hilfe der Numerik verifiziert.

2 Bruchmechanik

„Unter Bruch versteht man die vollständige oder teilweise Trennung eines ursprünglich ganzen Körpers“. [2] Da für einen Ingenieur vor allem die Betrachtungsweise aus makroskopischer Sicht interessant ist, empfiehlt sich die Verwendung der Kontinuumsmechanik als Werkzeug. Die Vorhersage des Verhaltens, durch das Erstellen von Bruchkriterien und Konzepten, ist damit möglich. [2]

2.1 Ursachen und Erscheinungsformen des Bruchs

2.1.1 Mikroskopische Aspekte

Bei der Trennung eines ursprünglich ganzen Körpers in zwei oder mehrere Teile werden die Bindungen zwischen den Bausteinen des Materials gelöst, was auf mikroskopischer Ebene z.B. den Bindungen von Atomen, Ionen etc. entspricht. Beim Lösen einer solchen Bindung, dem Trennen der Elemente, wird von der Bindungskraft eine negative materialspezifische Arbeit geleistet. Dieser Vorgang äußert sich beispielsweise in der Änderung der Gittergeometrie in unmittelbarer Umgebung der neugeschaffenen Oberfläche eines idealen Kristalls. Unter Vernachlässigung dissipativer Vorgänge und bei makroskopischer Betrachtung des Materials als Kontinuum kann die Arbeit der Bindungskräfte als Oberflächenenergie definiert werden. Die Oberflächenenergie ist die gespeicherte Energie an der Oberfläche und steht in Beziehung mit der theoretischen Festigkeit eines Materials. [2]

Polykristalline Materialien (wie z.B. Fels) bestehen aus Kristallen, die entlang der Korngrenzen miteinander verbunden sind. Die Eigenschaften der Korngrenzen und die Eigenschaften der Körner selbst können voneinander abweichen. Zusätzlich zu den Unregelmäßigkeiten im Materialaufbau an sich existieren in einem realen Material von Beginn an verschiedene Defekte. Die sogenannten Versetzungen spielen hinsichtlich des mechanischen Verhaltens eine große Rolle. Bei den Versetzungen handelt es sich um eine Gitterstörung. Das Aufbringen einer Schubspannung führt letztlich zu einer Verschiebung der Versetzung, was ein „Abgleiten“ der Gitterebene zur Folge hat und zur Bildung einer neuen Oberfläche führen kann. Dieser mikroskopische Mechanismus ist die Ursache für makroskopisch plastisches Materialverhalten. Versetzungen können im Allgemeinen nicht unbeschränkt wandern, sondern stauen sich eher an Hindernissen, wie Einschlüssen oder Korngrenzen, auf. Makroskopisch zeigt sich der Versetzungsstau als Verfestigung. [2]

Im zunächst rissfreien Material führen beim Deformationsprozess in polykristallinem Material verschiedene Mechanismen zur Bildung von Mikrorissen. Der Versetzungsstau bewirkt eine hohe Spannungskonzentration und führt zum Spaltriss. Wenn ein solcher Riss mehrere Körner durchläuft ändert sich die Orientierung der Trennfläche entsprechend den lokalen Vorzugsrichtungen der Kristalle. Diese Art von Bruch wird als transkristalliner Bruch bezeichnet. [2]

Interkristalline Brüche entstehen durch Separation bei hinreichend schwachen Bindungen entlang der Korngrenzen, siehe Abbildung 2-1. Beide Brucharten verlaufen makroskopisch spröd. [2]

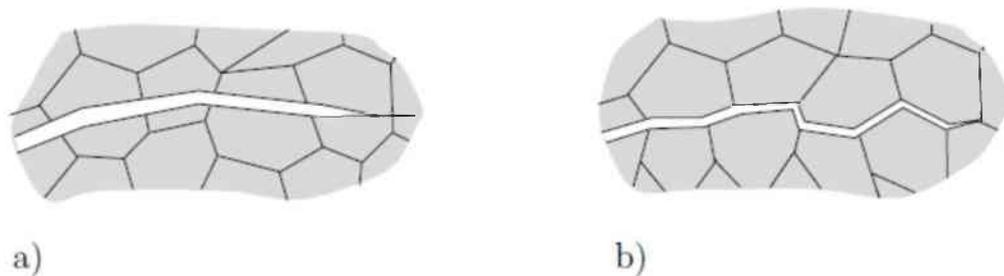


Abb. 2-1: a) transkristalliner Riss; b) interkristalliner Riss [2]

2.1.2 Makroskopische Aspekte

Bei makroskopischer Betrachtung gilt das Material grundsätzlich als rissbehaftet und wird als Kontinuum behandelt. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um einen tatsächlich vorhandenen makroskopischen Riss gegebener geometrischer Konfiguration, oder um hypothetische und möglicherweise sehr kleine Risse handelt. Letztere spielen in der Nachbildung von nicht sichtbaren, jedoch im realen Material vorhandenen, Defekten oder Mikrorissen eine Rolle. Die Thematik der Rissentstehung in einem anfangs ungeschädigten Material fällt in das Gebiet der Kontinuums-Schädigungsmechanik, siehe Unterpunkt 2.3 [2]

Der Bruchvorgang steht immer in Verbindung mit einem Risswachstum. Bei unveränderter Rissgröße handelt es sich um einen stationären Riss. Als Folge einer bestimmten kritischen Belastung bzw. Deformation beginnt die Rissinitiierung, das bedeutet der Riss breitet sich aus und wird instationär. Das Risswachstum gilt als stabil, wenn nur durch eine Erhöhung der äußeren Belastung der Riss vergrößert werden kann. Im Gegensatz dazu erfolgt bei instabilem Risswachstum ab einem bestimmten Punkt die Rissausbreitung spontan, ohne Erhöhung der äußeren Last. Ob die Rissausbreitung stabil oder instabil erfolgt hängt neben den Materialeigenschaften auch stark von der Probengeometrie und der Art der Belastung ab. [2]

Wenn die Rissausbreitung zum Stillstand gekommen ist, oder die vollständige Trennung des Körpers in zwei oder mehrere Teile erfolgte, ist der Bruchvorgang beendet. Das Gesamtereignis „Bruch“ wird in verschiedene Arten unterteilt. Ein duktiler Bruch liegt bei vorhergehenden oder begleitenden großen plastischen Deformationen vor. Das Auftreten von makroskopisch kleinen inelastischen Deformationen charakterisiert einen Spröbruch. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Orientierung der Bruchfläche, wobei die Art des Bruchverhaltens stark von diversen Faktoren, wie beispielsweise dem Spannungszustand, abhängt. [2]

2.2 Lineare Bruchmechanik

Ein Riss bedeutet aus makroskopischer, kontinuumsmechanischer Sicht einen Schnitt in einem Körper. Die gegenüberliegenden Berandungen werden Rissoberflächen genannt und sind meist belastungsfrei. Das Ende des Risses heißt Rissfront - siehe dazu die graphische Darstellung in Abbildung 2-2. [2]

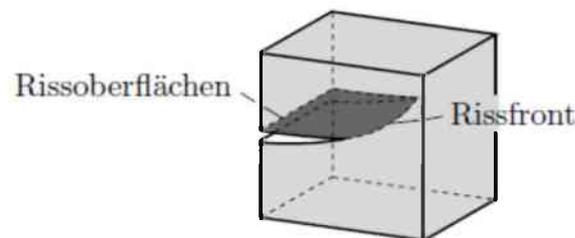


Abb. 2-2: Bezeichnungen [2]

Im Hinblick auf die Deformation eines Risses existieren drei verschiedene Rissöffnungsarten, dargestellt in Abbildung 2-3. Modus I kann durch eine zur x , z -Ebene symmetrische Rissöffnung charakterisiert werden. Modus II kennzeichnet eine antisymmetrische Separation der Rissoberflächen durch Relativverschiebung normal zur Rissfront, also in x -Richtung. Beim Modus III tritt infolge einer Relativverschiebung tangential zur Rissfront eine Separation auf.

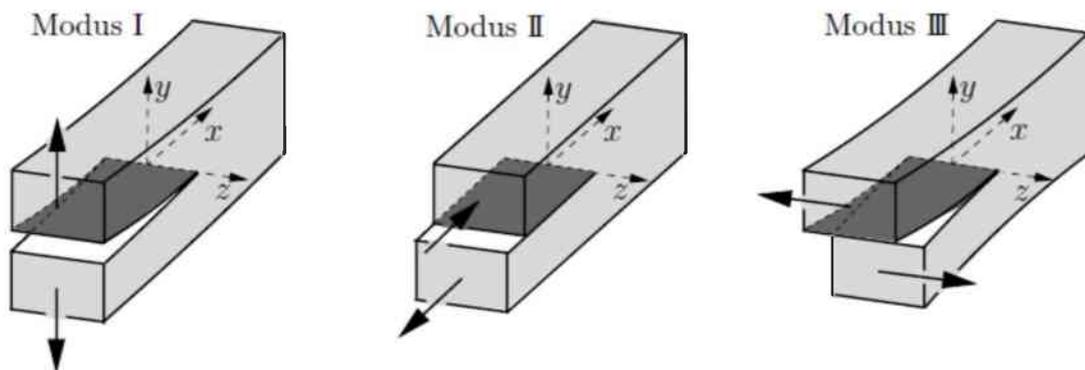


Abb. 2-3: Rissöffnungsarten [2]

Die sogenannte Prozesszone ist ein wichtiger Aspekt der kontinuumsmechanischen Beschreibung des Bruchvorgangs. Damit ist die Region in der Umgebung der Rissfront gemeint, in welcher komplizierte mikroskopische Prozesse zur Bindungslösung stattfinden. Da diese Prozesse mittels der Kontinuumsmechanik nicht hinreichend genau beschrieben werden können, muss für eine Anwendung der Kontinuumsmechanik auf den gesamten rissbehafteten Körper eine vereinfachende Annahme getroffen werden. Die Annahme beruht darauf, dass die Ausdehnung der Prozesszone im Vergleich zu den makroskopischen Abmessungen der Probe vernachlässigbar klein ist. Allerdings kann die Prozesszone bei Beton oder granularen Materialien große Ausmaße annehmen, bis hin zum gesamten Probekörper. [2]

Die lineare Bruchmechanik betrachtet das gesamte Gebiet des rissbehafteten Körpers als linear-elastisch. Inelastische Vorgänge in oder um die Prozesszone müssen aus makroskopischer Sicht vernachlässigbar sein. Daher eignet sich die lineare Bruchmechanik primär zur Beschreibung des Sprödbruchs. Für Problemstellungen außerhalb des Anwendungsbereichs der linearen Bruchmechanik stehen diverse Alternativen zur Verfügung, beispielshalber die elastisch-plastische Bruchmechanik, die Kriechbruchmechanik mit zeitabhängigem Verhalten oder die Kontinuums-Schädigungsmechanik. [2]

2.3 Kontinuums-Schädigungsmechanik

Die in einem realen Material im Ausgangszustand meist schon vorhandenen Defekte, wie Mikrorisse oder Poren, können sich bei einem Deformationsvorgang vergrößern und verbinden. Zusätzlich entstehen durch Spannungskonzentrationen an z.B. Einschlüssen oder Korngrenzen weitere Materialtrennungen, was zu neuen Mikrodefekten führt. Durch diese Vorgänge ändern sich die makroskopischen Eigenschaften des Materials und die Festigkeit wird deutlich reduziert. Dieser Prozess der Strukturänderung des Materials, welcher in Verbindung mit dem Entstehen, dem Wachsen und dem Verbinden von Mikrodefekten steht, wird Schädigung genannt. Im Endstadium resultiert die Schädigung in der vollständigen Auflösung der Bindungen und der Bildung eines makroskopischen Risses. [2]

Unterschieden wird die Materialschädigung, nach den dominierenden makroskopischen Phänomenen, in spröde Schädigung, duktile Schädigung, Kriechschädigung und Ermüdungs-Schädigung. Beispiele für Materialien mit spröder Schädigung sind Keramiken, Geomaterialien und Beton, wobei in diesen Materialien die Bildung und das Wachstum von Mikrorissen vorherrschen. Im Gegensatz dazu finden die duktile Schädigung und die Kriechschädigung vorwiegend in Metallen statt. Die Ermüdungs-Schädigung ist durch Spannungskonzentrationen charakterisiert, an denen durch mikroplastische Wechselwirkung Mikrorisse entstehen, sich in weiterer Folge ausbreiten und schließlich vereinigen. [2]

Bei der Beschreibung des makroskopischen Verhaltens eines geschädigten Materials im Rahmen der Kontinuumsmechanik werden die auftretenden Makrospannungen und Makroverzerrungen als Mittelwerte über ein repräsentatives Volumenelement betrachtet, in welchem die Schädigung passiert. Unter einem repräsentativen Volumenelement (kurz RVE) versteht man einen Volumenbereich auf Mikroebene, welcher repräsentativ für das gesamte Material ist. Über einen Homogenisierungsprozess weist dieser wiederum dem gesamten Material Makroeigenschaften zu. Zur Beschreibung der Schädigung ist eine sogenannte Schädigungsvariable inklusive Evolutionsgesetz notwendig. Eine geeignete Schädigungstheorie kann als Bindeglied zwischen klassischer Kontinuumsmechanik und Bruchmechanik gesehen werden. [2]

2.3.1 Spröde Schädigung

Die Ausbreitung und Neubildung von Mikrorissen ist der dominierende Mechanismus bei der spröden Schädigung. Die Risse orientieren sich meist an der durch die Hauptachsen des Spannungstensors vorgegebenen Richtung. Im Falle einer Zugbelastung bilden sich die Risse in erster Linie senkrecht zur größten Zugspannung. Bei zunehmender Belastung über einen Grenzwert hinaus vergrößern und vermehren sich die Risse, dadurch sinkt die Steifigkeit bzw. der Elastizitätsmodul in der entsprechenden Zugrichtung. Das geschädigte Material verhält sich aufgrund der zunehmenden Schädigung makroskopisch nichtlinear, obwohl das ungeschädigte Matrixmaterial linear elastisch ist (siehe Abbildung 2-4). Im Laufe des weiteren Deformationsvorganges wird das Material makroskopisch instabil und es kommt zur Lokalisierung der Schädigung. Als Folge entwickelt sich die Schädigung im gesamten Gebiet nicht mehr gleichmäßig, nur noch ein Riss dominiert und wächst alleine weiter. [2]

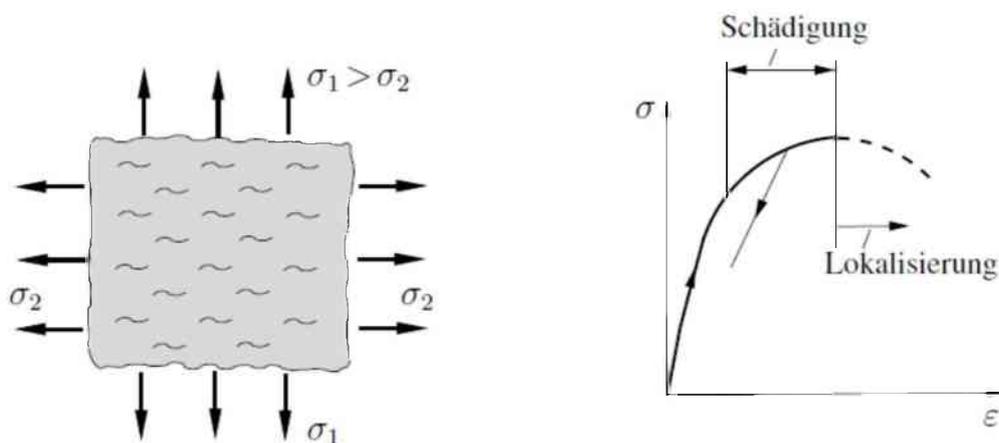


Abb. 2-4: Spröde Schädigung bei Zugbelastung [2]

Bei Druckbelastung können oft Risse in Richtung der größten Druckspannung festgestellt werden, welche mit zunehmender Belastung wachsen. Die Ursache dieser Risse sind verschiedene, zu lokalen Zugspannungsfeldern führende, Mechanismen. Aufgrund des Schädigungswachstums verhält sich das Material makroskopisch nichtlinear. Eine weitere Deformation resultiert in der Materialinstabilität und der Lokalisierung der Schädigung. Dabei kommt es oft zur Ausbildung von Scherbändern. Diese bilden sich durch die Verbindung und das Wachstum von Scherrissen unter einem bestimmten Winkel zur Drucklast. [2]

Ein Schwachpunkt der Kontinuums-Schädigungsmechanik besteht in der möglichen Abhängigkeit der numerischen Lösung von der zugrundeliegenden Diskretisierung bzw. dem Finite-Elemente-Netz. Zusätzlich führt die zunehmende Schädigung zur Instabilität im makroskopischen Materialverhalten und damit zur Lokalisierung der Deformation und Schädigung. Durch die Lokalisierung werden die Voraussetzungen an ein repräsentatives Volumenelement verletzt, wodurch in weiterer Folge die Schädigungsvariablen ihre physikalische Bedeutung verlieren.

3 Keilspalttest

Der Keilspalttest wurde zur einfachen und schnellen Bestimmung von mechanischen und bruchmechanischen Kennwerten an spröden Werkstoffen, wie beispielsweise Keramiken, Fels oder zementgebundenen Werkstoffen, von E. Tschegg entwickelt. Allgemein stellt der Keilspalttest eines der gebräuchlichsten Verfahren zur bruchmechanischen Charakterisierung von heterogenen Werkstoffen unter Modus I Belastung dar. Die spezifische Bruchenergie und die nominelle Kerbzugfestigkeit können direkt aus dem Versuch bestimmt werden. Aufgrund seiner Eignung bei hohen Temperaturen spielt der Keilspalttest in der Feuerfestindustrie eine bedeutende Rolle. [1, 3, 4]

3.1 Versuchsaufbau, Durchführung und Auswertung

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, müssen die verwendeten Probekörper definierten Anforderungen genügen. Unter anderem darf die Probengröße keinen Einfluss auf die spezifische Bruchenergie haben (size effect). Zusätzlich wird eine stabile Rissausbreitung entlang einer vordefinierten Bruchebene zur Bestimmung der spezifischen Bruchenergie verlangt. Mit der in Abbildung 3-1 dargestellten Probengeometrie können diese Vorgaben erfüllt werden. Aufgrund der kompakten Gestalt der Probe kann ein hohes Verhältnis von Bruchfläche zu Probenvolumen erreicht werden. Dadurch ist die elastisch gespeicherte Energie in der Probe gering und bei entsprechend großen Proben kann der Einfluss der Probengröße auf die Messwerte minimiert werden. Um die in der Prüfmaschine elastisch gespeicherte Energie zu vermindern, erfolgt die Krafteinleitung über einen Keil, welcher zwischen zwei Rollen in die gekerbte Probe eingelegt wird. Die Rollen verringern den Einfluss der Reibung und die übersetzende Wirkung des Keils reduziert die erforderliche Maschinenkraft erheblich. Zwischen den Rollen und dem Probekörper sind noch zwei Lastübertragungselemente eingebaut. Der Aufbau ist in Abbildung 3-2 dargestellt. [1, 4, 5]

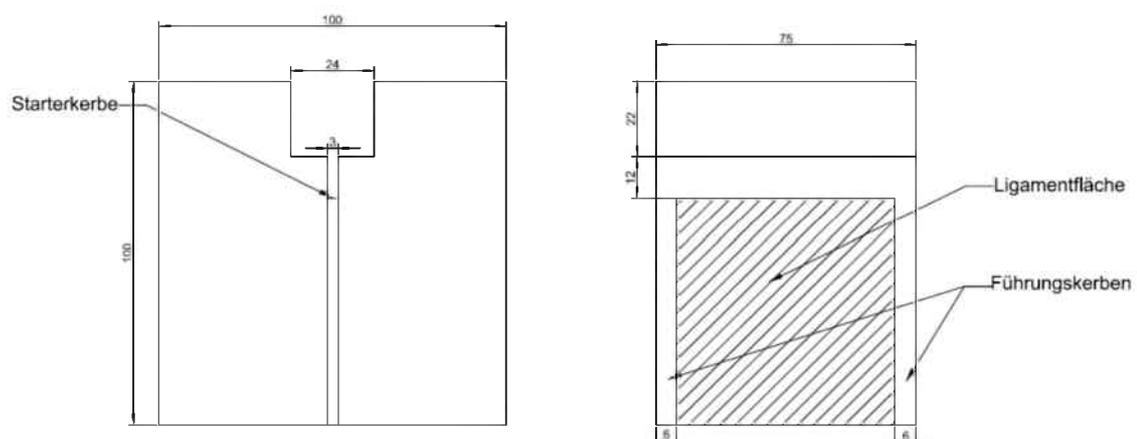


Abb. 3-1: Schematischer Probekörper mit Abmessungen

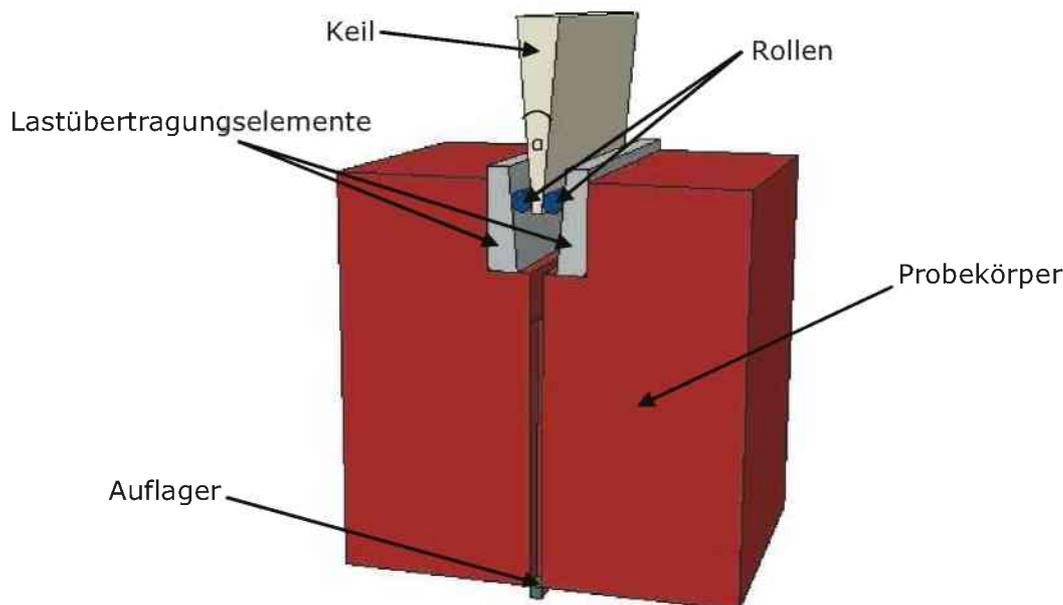


Abb. 3-2: Schematische Abbildung des Keilspalttest

Der Lastangriffspunkt wird über die Linienberührung des Keils mit den Rollen definiert. Der, für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche, verwendete Keilwinkel α beträgt 10° , wodurch ein hohes Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalkraft erreicht wird. Die Horizontalkraft F_h errechnet sich über den in Gleichung 3-1 formulierten Zusammenhang aus der Vertikalkraft F_v . [1, 5]

$$\text{Gl 3-1: } F_h = \frac{F_v}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad [1]$$

Als Auflage für die Probe dient ein stabförmiges Auflager. Somit ist die Trennung der Probe ohne Behinderung durch den Untergrund möglich. Die hauptsächliche Belastung erfolgt in horizontaler Richtung, wobei die Rissinitiierung in der dafür vorgesehenen Kerbe, der sogenannten Starterkerbe, erfolgt. Mit dem Fortschreiten der Prüfung entwickelt sich der Riss entlang der Führungskerben des Prüfkörpers. Die Prüfung verläuft weggeregelt mit einem konstanten Keilfortschritt von $0,5 \text{ mm/min}$. Im Zuge der Prüfung werden die Vertikalkraft F_v und der Traversenweg d_v gemessen und aufgezeichnet. Die Horizontalverschiebung δ_h wird mittels eines Videoextensometers gemessen. Bei einem Videoextensometer handelt es sich um eine berührungslose, kamerabasierte Dehnungs- und Verschiebungsmesseinrichtung. Die Kameras messen mit hoher Genauigkeit die Verschiebung des Schwarz-Weiß-Überganges, weshalb die in der Abbildung 3-3 dargestellten Papierstücke auf die Probe geklebt werden. Die Bestandteile zur Lastübertragung: Keil, Rollen und Gegenlager bestehen aus Korund. Als Abbruchkriterium für den Versuch gelten folgende drei Punkte: ein Traversenweg größer $4,0 \text{ mm}$ in Verbindung mit einer Vertikalkraft kleiner $40,0 \text{ N}$ und die Last muss kleiner sein als 15% der Maximallast. [1, 6]



Abb. 3-3: Realer Keilspaltversuch mit einer Sandsteinprobe

Nach dem Ende des Versuchs werden die oftmals noch lose verbundenen Hälften des Probekörpers getrennt und die Bruchfläche vermessen. Aus den Messergebnissen des Versuchs werden Last-Verschiebungsdiagramme erstellt. Einerseits wird die Vertikalkraft über den Traversenweg aufgetragen und andererseits wird die Horizontalkraft über die Horizontalverschiebung aufgetragen. Zur Auswertung des Keilspalttests wird die Kurve des horizontalen Last-Verschiebungsdiagramms verwendet. Durch die Integration der Kurve erfolgt die Bestimmung der Brucharbeit. Die Brucharbeit wird anschließend auf die einfache projizierte Bruchfläche A bezogen, womit sich die spezifische Bruchenergie G_f entsprechend Gleichung 3-2 ergibt. [1, 6]

$$\text{Gl 3-2: } G_f = \frac{1}{A} \times \int_0^{\delta_{h,max}} F_h \times d\delta_h \quad [1]$$

Allerdings wird die spezifische Bruchenergie bei der Auswertung des Keilspalttests oft unterschätzt, da es oftmals nicht möglich ist den Test bis zur vollständigen Trennung des Probekörpers durchzuführen. Dadurch endet die Last-Verschiebungskurve bevor die Verschiebungswerte einer vollständigen Entlastung erreicht werden können und die Fläche unter der Kurve ist dementsprechend kleiner. Ein weiterer Kennwert der aus dem Keilspalttest gewonnen werden kann ist die nominelle Kerbzugfestigkeit σ_{KZ} . Diese ergibt sich durch die Superposition von Zug- und Biegezugspannungen. Für die Berechnung der Kerbzugfestigkeit wird vereinfachend angenommen, dass die Spannungsverteilung in der Ligamentfläche zum Zeitpunkt der Maximallast $F_{h,max}$ linear ist, was jedoch nicht der Realität entspricht. Die Ligamentbreite b , die Ligamenthöhe h und y , der Normalabstand zwischen der Wirklinie der Horizontalkraft und dem Schwerpunkt der Ligamentfläche, gehen in die Berechnung ein. [1, 6]

$$\text{Gl 3-3: } \sigma_{KZ} = \frac{F_{h,max}}{b \times h} + \frac{6 \times F_{h,max} \times y}{b \times h^2} \quad [1]$$

Bei sehr geringer Sprödigkeit des Testmaterials besteht die Möglichkeit, dass der Traversenweg sehr groß wird und sich dadurch der Keil so weit nach unten bewegt, dass er direkt auf die Gesteinsprobe trifft, bevor die vollständige Trennung der Probe erfolgt. In diesem Fall muss der Versuch vorzeitig abgebrochen werden und die spezifische Bruchenergie für einen derartigen Fall wird mit G_f' bezeichnet. Wobei A die projizierte Bruchfläche bezeichnet und $\delta_{h,ult}$ die maximale horizontale Verschiebung zum Zeitpunkt des Abbruchs. Als Richtwert gilt, dass die Belastung unter 15 % der Maximallast abfallen muss bevor der Versuch abgebrochen wird. [7]

$$\text{Gl 3-4: } G_f' = \frac{1}{A} \times \int_0^{\delta_{h,ult}} F_h \times d\delta_h \quad [7]$$

3.1.1 Auswerteverfahren am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde

In Bereichen der Feuerfestindustrie wird der Keilspalttest dazu verwendet, unbekannte Materialparameter invers zu bestimmen. Dazu gehört neben dem Elastizitätsmodul E und der spezifischen Bruchenergie G_f auch die Zugfestigkeit f_t . Die Ermittlung dieser Parameter erfolgt meist nicht in eigenständigen Versuchen, stattdessen werden sie mit Hilfe eines numerischen Verfahrens in Verbindung mit den Methoden der Ausgleichsrechnung aus einem Keilspalttest rückgerechnet. Ein direktes Auslesen der Zugfestigkeit aus dem Keilspalttest ist aufgrund des Einflusses der Kerbe, der zusätzlichen Biegebeanspruchung und dem size effect nicht möglich. [7]

Die Auswertung am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde erfolgt unter Verwendung des numerischen Programmes ABAQUS. Die gesonderte Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zuge der Auswertung ist dabei nicht nötig. Um bei der inversen Bestimmung der Materialparameter die Differenz zwischen den Resultaten der berechneten und der experimentellen Kurve zu minimieren wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate angewandt. Das zugehörige numerische Modell ist zweidimensional und symmetrisch aufgebaut. Die Krafteinleitung erfolgt über einen Keil und ein Lastübertragungselement mit vereinfachten Geometrien. Ein Großteil der Probengeometrie und die Lastübertragungseinheit werden mit linear-elastischem Materialverhalten modelliert. Der Bereich der Ligamentfläche, mit einer Breite von 1,5 mm, ist aus viereckigen, kohäsiven Elementen mit einem dehnungsabhängigen Entfestigungsverhalten (strain softening behavior) aufgebaut. Nach dem Aufbau des Modells und dem Festlegen des Entfestigungsverhaltens werden zunächst die Materialparameter abgeschätzt und die numerische Simulation wird gestartet. Als Ergebnis können die Last-Verschiebungsdiagramme ausgelesen werden. Die Last-Verschiebungskurven aus dem realen Versuch werden diskretisiert und anschließend die Differenz der beiden Kurvenverläufe berechnet. Wenn die Abweichung unter festgelegten Konvergenzkriterien liegt, ist die inverse Bestimmung abgeschlossen. Ansonsten wird mit Hilfe des sogenannten NL2SOL-Algorithmuses versucht die Differenz so weit zu verringern bis die Kriterien erfüllt sind. Das numerische Modell und das Flussdiagramm der Auswerteroutine sind in Abbildung 3-4 dargestellt. [7]

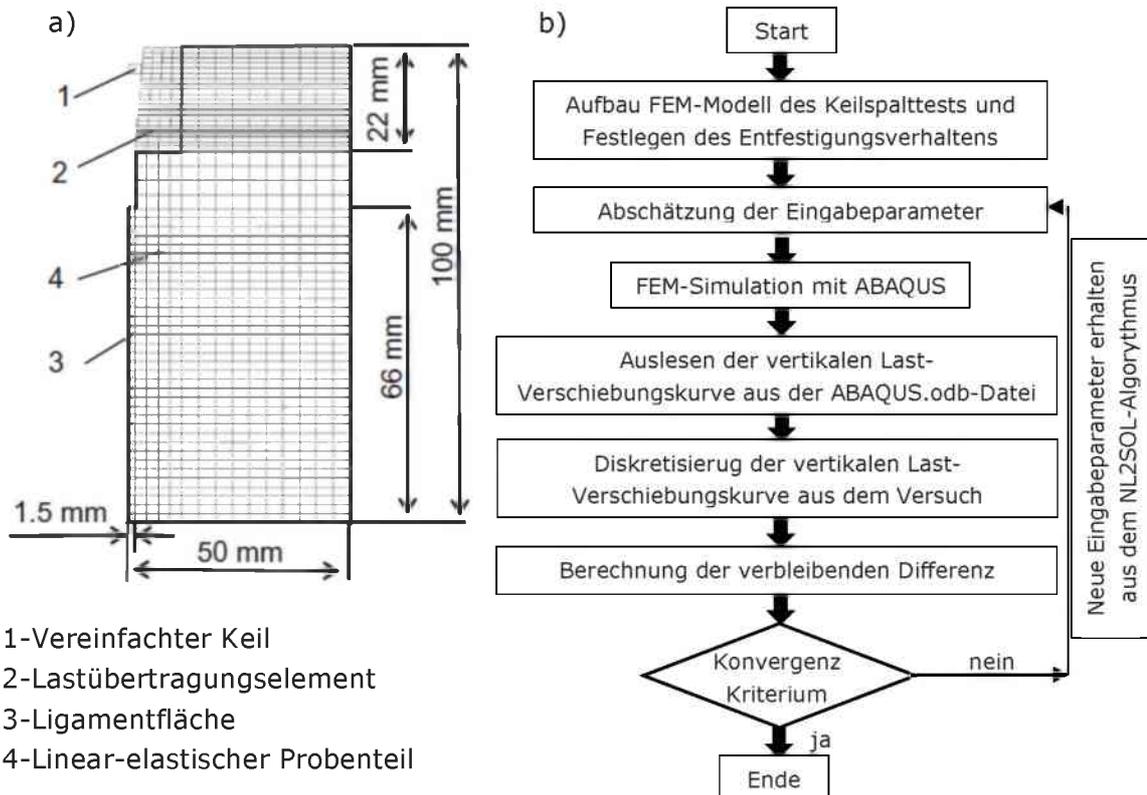


Abb. 3-4: a) Numerisches Modell b) Flussdiagramm der Auswerterroutine [7]

3.2 Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt zehn Keilspaltversuche durchgeführt; je fünf Versuche mit Proben aus Neuhauser-Granit und Imberg-Sandstein. Bei den Sandsteinproben wurden drei Proben normal zur Schichtung und zwei Proben in Richtung der Schichtung getestet. Imberg-Sandstein tritt meist als homogenes Material auf und die Schichtung deutet eventuell auf einen rein optischen Verwitterungseinfluss hin. Aufgrund des richtungslosen Gefüges des Granits war für diesen keine schichtungsspezifische Testung notwendig. In den Abbildungen 3-5 sind Beispiele für die verwendeten Gesteinsproben nach der Versuchsdurchführung dargestellt.

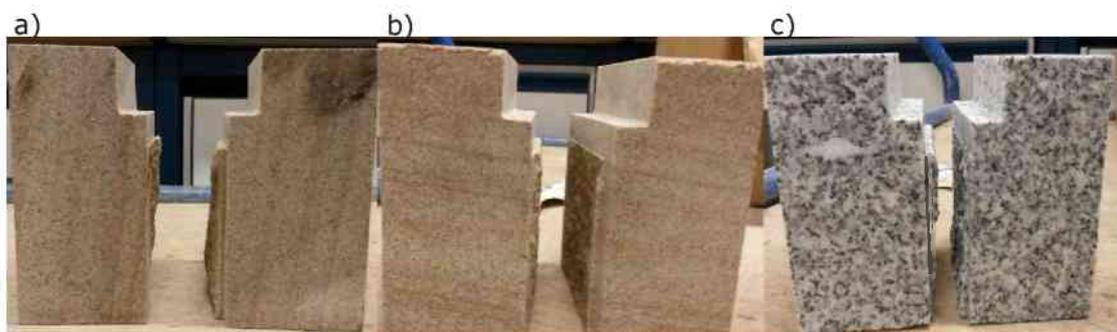


Abb. 3-5: a) Sandsteinprobe in Richtung der Schichtung b) Sandsteinprobe normal zur Schichtung c) Granitprobe

Wie aus den Abbildungen 3-5 erkennbar ist, erfolgt der Bruch innerhalb des vorgegebenen Bruchbereiches, was ein Zeichen für eine stabile Rissausbreitung ist. Ein zu den restlichen getesteten Proben abweichendes Verhalten zeigte die in Abbildung 3-6 dargestellte Probe. Die Rissausbreitung erfolgte außerhalb der Führungskerben und der Riss verlief weit in eine Probenhälfte hinein. Ein geringer Einfluss auf die Festigkeitskennwerte und die spezifische Bruchenergie war zu beobachten. Optisch konnten vor Versuchsbeginn keine Auffälligkeiten an dieser Probe erkannt werden.



Abb. 3-6: Granitprobe mit Riss außerhalb der Führungskerbe

In weiterer Folge sind die Ergebnisse der Keilspaltversuche in tabellarischer Form mit den zugehörigen Last-Verschiebungskurven dargestellt. Die Auswertung erfolgte durch den Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde und entsprechend dem in Kapitel 3.1.1 vorgestellten numerischen inversen Bestimmungsverfahren. Jedoch wurde für die Auswertung der Versuche der dynamische Elastizitätsmodul mittels Resonanz-Frequenz-Dämpfungsanalyse (RFDA) ermittelt und nicht im Rahmen der Auswertung selbst bestimmt. Bei der RFDA handelt es sich um ein zerstörungsfreies Testverfahren zur Messung der Resonanzfrequenz und deren Abklingverhalten nach kurzem mechanischen Impuls. [8]

Die Ergebnisse der dynamischen Elastizitätsmodul-Bestimmung sind in den nachfolgenden Tabellen in der Spalte mit der Bezeichnung E enthalten. Somit verbleibt noch die Zugfestigkeit f_t zur Bestimmung mittels inversem Verfahren. Ein Vergleich der rückgerechneten Werte mit an identem Probenmaterial durchgeführten direkten Zugversuchen und Brazilian-Tests folgt in diesem Abschnitt. Eine weitere rechnerisch ermittelte Materialeigenschaft ist die charakteristische Länge l_c , welche ein Maß für die Sprödigkeit darstellt. Je kleiner die charakteristische Länge ist desto spröder verhält sich die Probe. Die Berechnung erfolgt unter Verwendung des Elastizitätsmoduls E, der spezifischen Bruchenergie G_f und der Zugfestigkeit f_t entsprechend Gleichung 3-5.

$$\text{Gl 3-5: } l_c = G_f \cdot \frac{E}{f_t^2} \quad [1]$$

| Probe | $F_{v,max}$ [N] | $F_{h,max}$ [N] | σ_{KZ} [MPa] | G_f [N·m ⁻¹] | | G'_f [N·m ⁻¹] | | f_t [MPa] | | G_f^* [N·m ⁻¹] | | E [GPa] | l_k [mm] | | G_f^* / f_T [µm] | |
|------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|------|----------------|-------|---------------------------------|------|------------|---------------|------|-----------------------|-----|
| | | | | trav. | hor. | trav. | hor. | trav. | hor. | trav. | hor. | | trav. | hor. | | |
| Granit_1 | 895 | 5118 | 8,10 | 160 | 152 | 134 | 124 | 8,31 | 8,50 | 172 | 159 | | | | | |
| Granit_2 | 1079 | 6167 | 9,87 | 225 | 186 | 201 | 160 | 10,09 | 10,80 | 260 | 205 | | | | | |
| Granit_3 | 1052 | 6013 | 9,71 | 180 | 172 | 156 | 146 | 10,59 | 10,80 | 200 | 187 | | | | | |
| Granit_4 | 1076 | 6149 | 10,18 | 222 | 210 | 190 | 173 | 10,77 | 11,06 | 246 | 224 | | | | | |
| Granit_5 | 1196 | 6832 | 10,93 | 237 | 220 | 208 | 188 | 11,74 | 12,11 | 270 | 243 | | | | | |
| Mittelwert | 1060 | 6056 | 9,76 | 205 | 188 | 178 | 158 | 10,30 | 10,65 | 230 | 204 | 70,0 | 151 | 126 | 22 | 19 |
| mittlerer Fehler | 62 | 354 | 0,600 | 19 | 16 | 18 | 14 | 0,729 | 0,761 | 24 | 19 | 0,39 | 27 | 21 | 2,8 | 2,2 |

Tab. 3-1: Auswertung Keilspalttest Granit

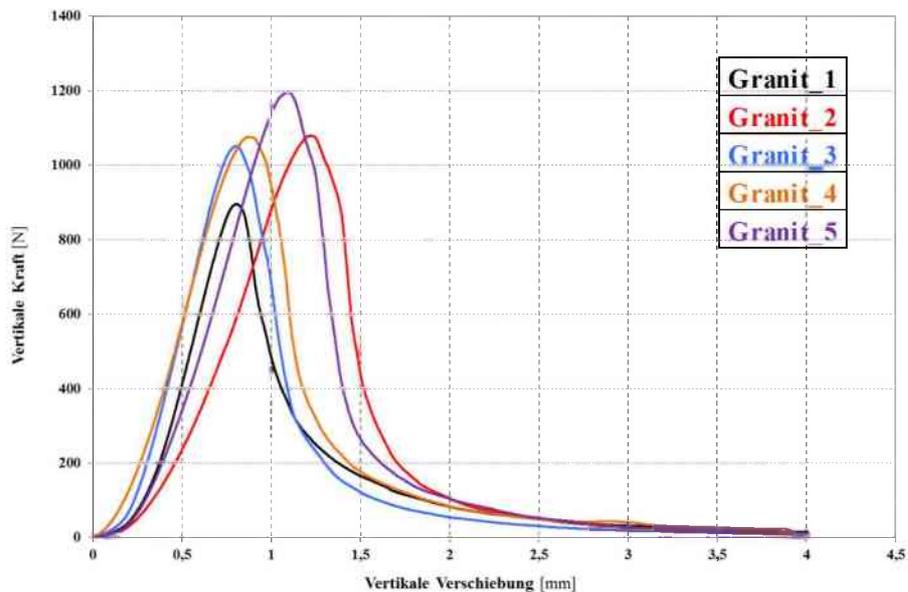


Abb. 3-7: Vertikales Last-Verschiebungsdiagramm Granit

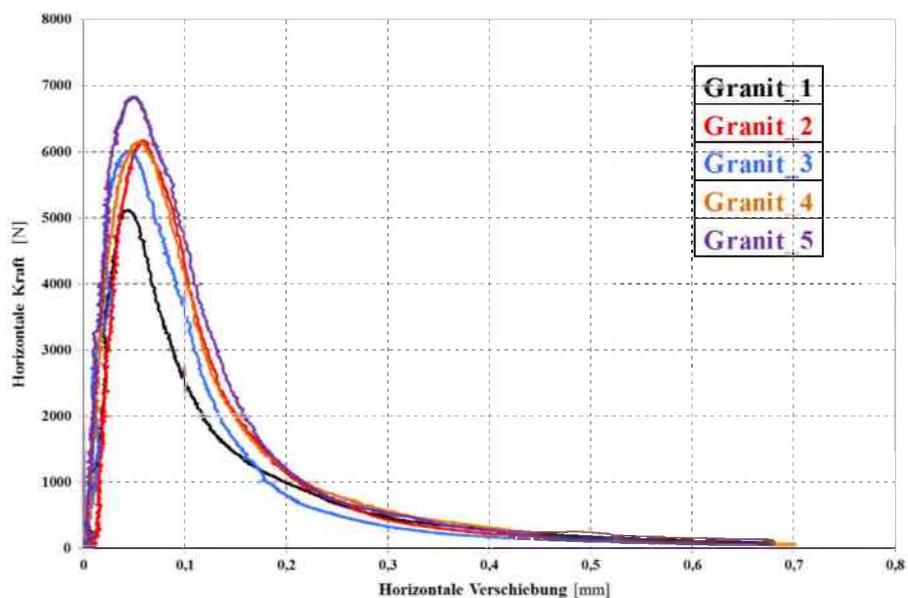


Abb. 3-8: Horizontales Last-Verschiebungsdiagramm Granit

| Probe | $F_{v,max}$ [N] | $F_{h,max}$ [N] | σ_{kz} [MPa] | G_f [N·m ⁻¹] | | G_f' [N·m ⁻¹] | | f_t [MPa] | | G_f^* [N·m ⁻¹] | | E [GPa] | l_k [mm] | | G_f^* / f_t [μm] | |
|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|------------|--------------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------------------|------------|--------------|---------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | | | | trav. | hor. | trav. | hor. | trav. | hor. | trav. | hor. | | trav. | hor. | trav. | hor. |
| SaSt_naS_1 | 903 | 5162 | 8,51 | 167 | 149 | 145 | 125 | 10,11 | 10,61 | 185 | 160 | | | | | |
| SaSt_naS_2 | 1038 | 5934 | 9,71 | 199 | 188 | 179 | 164 | 11,75 | 12,08 | 228 | 209 | | | | | |
| SaSt_naS_3 | 924 | 5282 | 8,57 | 175 | 159 | 155 | 135 | 10,02 | 10,47 | 198 | 172 | | | | | |
| Mittelwert | 955 | 5460 | 8,93 | 180 | 165 | 159 | 141 | 10,63 | 11,05 | 204 | 181 | 43,9 | 79 | 65 | 19 | 16 |
| mittlerer Fehler | 42 | 240 | 0,390 | 10 | 12 | 10 | 12 | 0,561 | 0,514 | 13 | 15 | 0,55 | 10 | 8 | 1,6 | 1,5 |
| SaSt_iS_1 | 1094 | 6253 | 10,31 | 241 | 230 | 212 | 197 | 12,26 | 12,55 | 271 | 252 | | | | | |
| SaSt_iS_2 | 1057 | 6041 | 9,90 | 221 | 208 | 198 | 182 | 11,72 | 12,06 | 253 | 232 | | | | | |
| Mittelwert | 1076 | 6147 | 10,11 | 231 | 219 | 205 | 189 | 11,99 | 12,31 | 262 | 242 | 43,9 | 80 | 70 | 22 | 20 |
| mittlerer Fehler | 19 | 106 | 0,205 | 10 | 11 | 7 | 8 | 0,266 | 0,247 | 9 | 10 | 0,55 | 5 | 4 | 0,9 | 0,9 |

Tab. 3-2: Auswertung Keilspalttest Sandstein (naS → normal auf die Schichtung, iS → in Richtung der Schichtung)

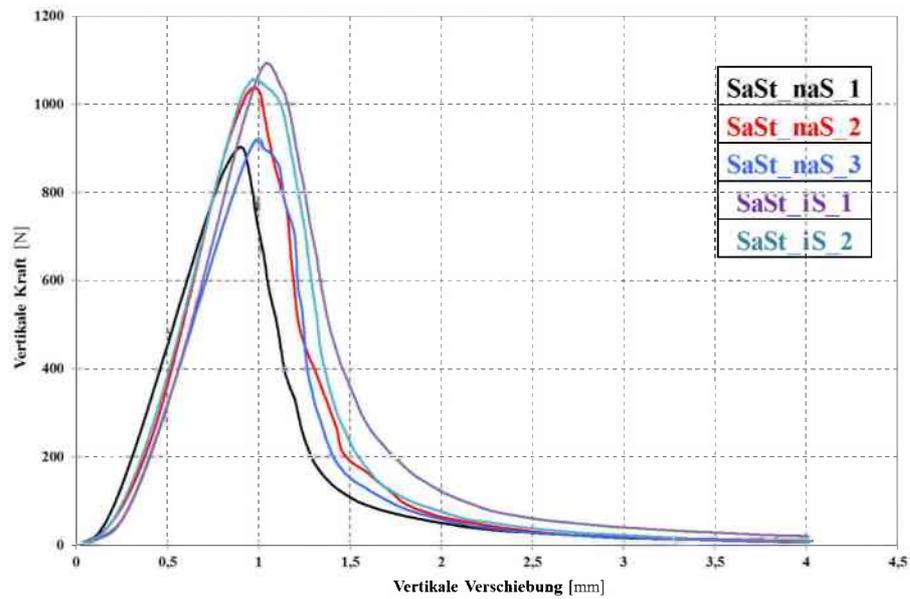


Abb. 3-9: Vertikales Last-Verschiebungsdiagramm Sandstein

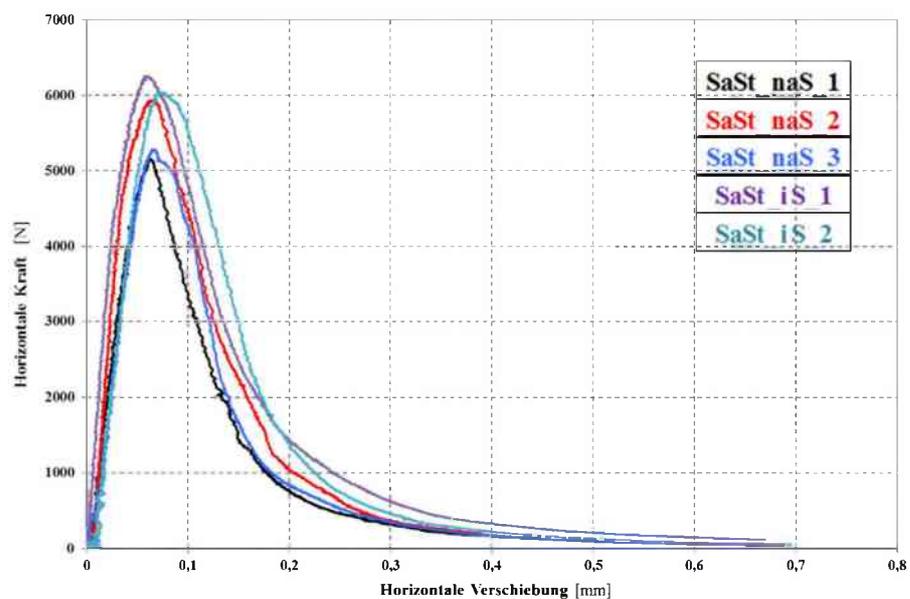


Abb. 3-10: Horizontales Last-Verschiebungsdiagramm Sandstein

Die vertikale Last-Verschiebungskurve und die horizontale Last-Verschiebungskurve unterscheiden sich in ihrer Gestalt aufgrund von Anpassungsvorgängen des Keils und der Lastübertragungselemente zu Versuchsbeginn. Obwohl optisch bei den Granitproben vor der Versuchsdurchführung keine relevanten Unterschiede feststellbar waren, zeigen die Ergebnisse eine, im Vergleich zu den Sandstein-Testreihen, relativ große Streuung. Eine entscheidende Erkenntnis ist, dass bei den Sandsteinproben die Orientierung der Schichtung zur Prüfrichtung einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit und die spezifische Bruchenergie hat. Zusätzlich ist die Streuung der Ergebnisse je Prüfrichtung bei den Sandsteinproben moderat. Diese Erkenntnis korreliert gut mit den Erfahrungen aus anderen Laborversuchen. In Tabelle 3-3 erfolgt der Vergleich zwischen der aus dem Keilspalttest invers bestimmten Kenngröße der Zugfestigkeit f_t und den Ergebnissen von in der Geotechnik üblichen Standardlaborversuchen. Die Ergebnisse werden unabhängig der Orientierung der Schichtung gemittelt, da für die vorhandenen Resultate der direkten Zugversuche und Brazilian-Tests der quantitative Einfluss der Schichtung nicht bekannt ist. Zur Verfügung stehen je Probenmaterial Daten aus fünfzehn Brazilian-Tests und elf direkten Zugversuchen für Neuhauser-Granit bzw. neun direkten Zugversuchen für Imberg-Sandstein.

| Versuch Material | direkter Zugversuch (Mittelwert) [9] | Brazilian-Test (Mittelwert) [10] | Keilspalttest vertikal (Mittelwert) | Keilspalttest horizontal (Mittelwert) |
|------------------------------|--|--|--|--|
| Sandstein f_t MPa | 6.22 | 10.86 | 11.17 | 11.55 |
| Granit f_t MPa | 8.54 | 9.28 | 10.30 | 10.65 |
| Abweichung * Sandstein, % | 46.15 | 5.97 | 3.29 | - |
| Abweichung * Granit, % | 19.81 | 12.86 | 3.29 | - |

* Betrag der Abweichung von den Werten „Keilspalttest horizontal“

Tab. 3-3: Vergleich der Zugfestigkeiten

Wie der Vergleich in Tabelle 3-3 zeigt, sind die Unterschiede für die invers bestimmte Zugfestigkeit aus dem Keilspalttest und die aus Laborversuchen direkt bestimmte Zugfestigkeit relativ groß. Die Differenz zu der aus dem Brazilian-Test bestimmten Spaltzugfestigkeit ist deutlich geringer. Dies liegt zum Teil an der schwierigen Durchführung und Auswertung des direkten Zugversuchs, welche aufgrund von Mängeln, wie dem Versagen an den Klebestellen, nicht immer möglich ist. Andererseits basiert die Ermittlung der Zugfestigkeit aus dem Keilspalttest auf einem formelmäßigen Zusammenhang aus einer Anpassungsfunktion mit der Kerbzugfestigkeit. Der Berechnung der Kerbzugfestigkeit liegt allerdings die unrealistische Annahme einer linearen Spannungsverteilung beim Lastmaximum zugrunde.

3.3 Numerische Simulation

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Verhaltens von Fels auf die im Keilspalttest auftretenden Belastungszustände. In weiterer Folge soll mit Hilfe der Ergebnisse aus dem Keilspalttest, in Verbindung mit den Erkenntnissen aus geotechnischen Standardversuchen, das Verhalten von Fels numerisch nachgebildet werden. Die Umsetzung erfolgt mit dem Finite-Elemente-Programm ABAQUS 6.13-2. ABAQUS bietet verschiedene numerische Analyseverfahren, wobei im Rahmen dieser Arbeit sowohl implizite als auch explizite Verfahren verwendet werden.

3.3.1 Implizite und explizite Modellierung

Bei den impliziten Methoden wird durch oftmalige Iteration der Rechengrößen versucht eine konvergierende Lösung zu finden. Für das vorliegende Problem wird das sogenannte „Dynamic, Implicit“ Verfahren verwendet. Dieses ist den expliziten Verfahren ähnlich, aber bei den expliziten dynamischen Lösungsverfahren werden die Werte der dynamischen Größen für den Zeitpunkt $t + \Delta t$ komplett von den verfügbaren Werten zum Zeitpunkt t bezogen. Im Gegensatz dazu kann bei den impliziten Verfahren der Zeitschritt vergrößert werden, da sowohl die Informationen zum Zeitpunkt t als auch zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ verwendet werden. Ein größerer Zeitschritt bedeutet wiederum einen schnelleren Rechenfortschritt. In dieser Hinsicht unvorteilhaft ist, dass nichtlineare Gleichungen zu lösen sind. [11]

3.3.1.1 Modellaufbau

Die Abmessungen des Modells entsprechen denen der realen Keilspaltproben und sind in Abbildung 3-1 dargestellt. In der vorliegenden Arbeit wird darauf verzichtet, bereits vor Beginn der Simulation Vereinfachungen zu treffen bzw. möglicherweise vorhandene Symmetriebedingungen auszunutzen. Dadurch sollen die unumgänglichen Verfälschungen einer numerischen Nachbildung minimiert werden. Das Modell wird daher dreidimensional aufgebaut und ohne Abwandlung der Probegeometrie erstellt. Detaillierte Informationen zum praktischen Ablauf des Modellaufbaus sind dem Kapitel 6 zu entnehmen. Vorab sei bereits auf den in Abbildung 3-11 dargestellten Zusammenhang zwischen der Probenlänge und der Form der Last-Verschiebungskurve hingewiesen. Aus Gründen der benötigten Rechenkapazität kann die Probenlänge von 75,0 mm auf 37,5 mm ohne signifikante Abweichungen verkürzt werden. Eine weitere Verkürzung führt zu größeren Abweichungen und ist vermutlich auf den mit abnehmender Probenlänge steigenden Einfluss der Führungskerben zurückzuführen.

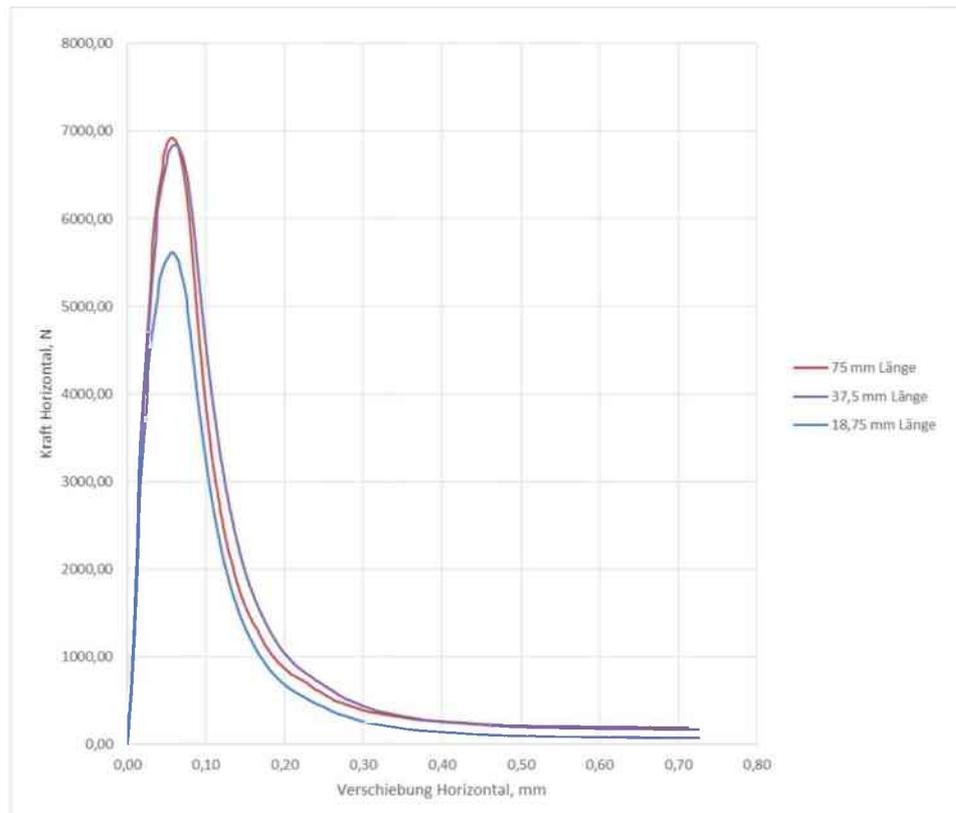


Abb. 3-11: Einfluss der Probenlänge auf das Ergebnis

3.3.1.2 Implizites Modell

Ziel der impliziten Modellerstellung war, die reale Prüfkörpergeometrie auf das numerische Modell zu übertragen. Im Zuge der Modellerstellung bzw. der numerischen Simulation für die implizite Berechnung ergab sich die Notwendigkeit, die Geometrie der Lastübertragungseinheit zu vereinfachen. Aufgrund von unzureichenden Kontaktbedingungen ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht gelungen plausible Ergebnisse im Nachbruchbereich mit der realen Probengeometrie zu erzielen. Das Modell der impliziten Berechnung ist in Abbildung 3-12 dargestellt. Das gesamte Modell besteht aus rund 30.500 Elementen, die Keilspaltprobe selbst aus rund 27.100 hexaedrischen Elementen vom Typ C3D8R. Die Geometrie des Keils wird so verändert, dass er die Lastübertragungsaufgaben der Rollen übernimmt. Der Keil wird „diskrete rigid“ modelliert, was bedeutet, dass der Keil nicht deformierbar und seine Steifigkeit quasi unendlich ist. Dadurch wird Rechenkapazität eingespart. Über den Referenzpunkt des Keils können Kräfte und Verschiebungen ausgelesen werden. Die Lastübertragungselemente werden als deformierbare Körper, mit den Parametern von Stahl und rein elastischem Materialverhalten, modelliert. Bei den experimentellen Versuchen kommen für die gesamte Lastübertragungseinheit aus Keil, Rollen und Lastübertragungselementen Produkte aus Korund zum Einsatz. Da jedoch die Ergebnisse von Körpern aus Korund und Körpern aus Stahl ident sind und außerdem deutlich mehr Literatur zur Interaktion von Fels und Stahl bzw. Stahl und Stahl zur Verfügung steht, werden die Lastübertragungselemente mit Stahl-Parametern modelliert.

Das Auflager wird „analytical rigid“ modelliert und hat somit ebenfalls eine unendliche Steifigkeit und verbraucht weniger Rechenkapazität. Die Belastungsgeschwindigkeit entspricht den realen Versuchen.

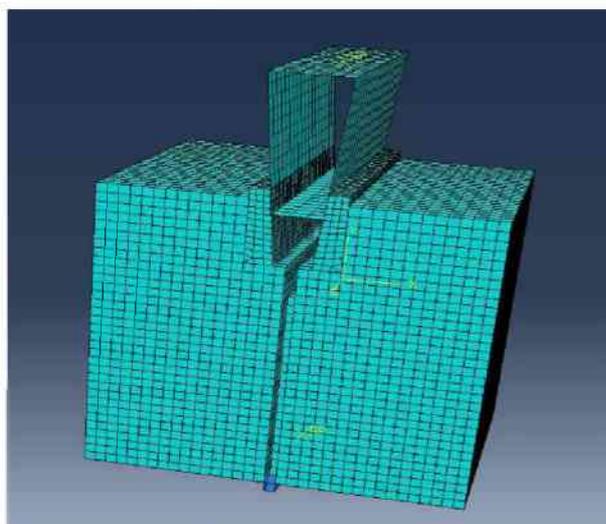


Abb. 3-12: Numerisches Modell für die implizite Berechnung

3.3.1.3 Explizites Modell

Im Gegensatz zur impliziten Berechnung konnten für das explizite Modell die Kontaktbedingungen korrekt formuliert werden und somit ist die numerische Simulation mit der realen Prüfeinrichtungsgeometrie möglich. Da für die explizite Berechnung ungleich mehr Rechenkapazität nötig ist als für die implizite Berechnung und aufgrund des in Abbildung 3-11 dargestellten Zusammenhangs, wird für die Simulation nur der halbe Probenkörper nachgebildet. Das gesamte Modell besteht aus rund 11.100 hexaedrischen Elementen vom Typ C3D8R und 544 keilförmigen Elementen vom Typ C3D6. In der Abbildung 3-13 ist das Modell dargestellt.

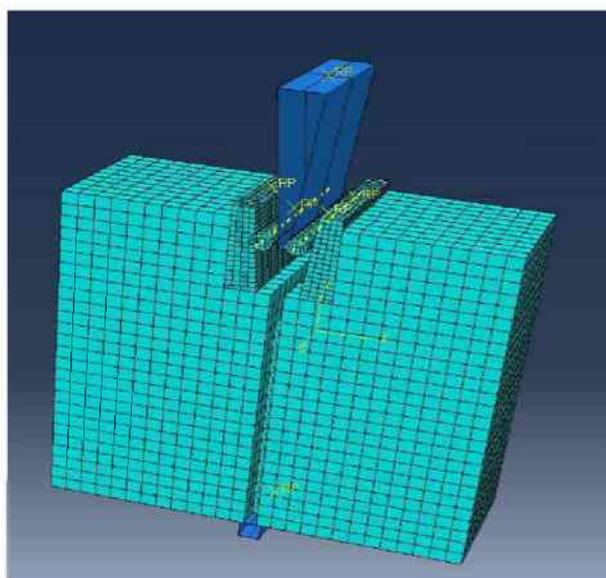


Abb. 3-13: Numerisches Modell für die explizite Berechnung

Der Keil und das Auflager werden „analytical rigid“ modelliert und die Kräfte und Verschiebungen aus dem Referenzpunkt des Keils ausgelesen. Die Rollen und Lastübertragungselemente sind zwar grundsätzlich deformierbare Körper, werden jedoch über sogenannte „constraints“, auch Zwangsbedingungen genannt, in quasi unendlich steife Körper umgewandelt. Der reale Versuchsablauf ist im Grunde als quasi-statisch zu betrachten. Die expliziten Verfahren wurden im Allgemeinen für dynamische Prozesse entwickelt, können jedoch auch für quasi-statische Anwendungen eingesetzt werden. Aufgrund der ansonsten unverhältnismäßig langen Rechendauer wird die Belastungsgeschwindigkeit in der numerischen Simulation verzehnfacht.

Die Berechnung mit dem expliziten Verfahren wird durchgeführt, da mit Hilfe einer Subroutine das Löschen von Elementen implementierbar ist. Indem jene Elemente gelöscht werden, deren Eigenschaften eine definierte Grenzbedingung überschreiten, eröffnet sich die Möglichkeit die Entstehung eines Risses numerisch nachzubilden. Verwendet wird die in ABAQUS enthaltene „VUSDFLD-user-subroutine“. Mit Hilfe der in Abbildung 3-14 dargestellten Subroutine werden bestimmte Werte in den Materialpunkten ausgelesen und bei Erreichen der Grenzbedingung wird der Status des Elements geändert und somit das Element gelöscht. Die Subroutine soll nur auf Zug überbelastete Elemente löschen, daher besteht die Grenzbedingung aus einer positiven Hauptspannung in Verbindung mit definierten Werten für die PEEQTS. PEEQTS sind die plastisch äquivalenten Dehnungen für einaxiale Zugbelastung. Ein zusätzlicher positiver Effekt des Löschens von Elementen ist, dass verformte Elemente die Rechenleistung nicht herabsetzen. [12]

```

subroutine vusdfld(
c Read only variables -
1  nblock, nstatev, nfieldv, nprops, ndir, nshr,
2  jElem, kIntPt, kLayer, kSecPt,
3  stepTime, totalTime, dt, cmname,
4  coordMp, direct, T, charLength, props,
5  stateOld,
c Write only variables -
6  stateNew, field )
c
c   include 'vaba_param.inc'
c
c   dimension jElem(nblock), coordMp(nblock,*),
1      direct(nblock,3,3), T(nblock,3,3),
2      charLength(nblock), props(nprops),
3      stateOld(nblock,nstatev),
4      stateNew(nblock,nstatev),
5      field(nblock,nstatev)
c   character*80 cmname
c
c   Local arrays from vgetvrm are dimensioned to
c   maximum block size (maxblk)
c
c
c   parameter( nrData=1 )
c   character*1 cData(maxblk*nrData)
c   dimension rData(maxblk*nrData), jData(maxblk*nrData)
c
c   character*1 cData2(maxblk*nrData)
c   dimension rData2(maxblk*nrData), jData2(maxblk*nrData)
c
c   real, dimension(nblock,3) :: S
c   real, dimension(nblock,3) :: PEEQT
c
c   jStatus = 1
c   call vgetvrm( 'S', rData, jData, cData, jStatus)
c
c   nStatus = 1
c   call vgetvrm( 'PEEQT', rData2, jData2, cData2, nStatus)
c
c   do k=1, nblock
c     S(k, 1)=rData(k)
c     S(k, 2)=rData(nblock+k)
c     S(k, 3)=rData(2*nblock+k)
c     PEEQT(k, 1)=rData2(k)
c
c     stateNew(k, 1)=S(k, 1)
c     stateNew(k, 2)=S(k, 2)
c     stateNew(k, 3)=S(k, 3)
c     stateNew(k, 4)=S(k, 3)
c     stateNew(k, 5)=PEEQT(k, 1)
c
c     if(S(k, 1) .GT. 0.5 .and. PEEQT(k, 1) .GT. 0.0015) then
c       statenew(k, 1)=0
c     endif
c     if(S(k, 2) .GT. 0.5 .and. PEEQT(k, 1) .GT. 0.0015) then
c       statenew(k, 2)=0
c     endif
c     if(S(k, 3) .GT. 0.5 .and. PEEQT(k, 1) .GT. 0.0015) then
c       statenew(k, 3)=0
c     endif
c   enddo
c
c   return
c   end

```

Abb. 3-14: Subroutine [12]

3.3.1.4 Materialgesetz

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der numerischen Simulation des mechanischen Verhaltens von Fels unter Zugbelastung. Das Verhalten unter Druckbelastung wird jedoch ebenfalls betrachtet. Dazu wird ein passendes Materialgesetz benötigt, wobei das in ABAQUS integrierte „Concrete Damaged Plasticity“ Materialgesetz, kurz CDP, dafür geeignet ist. Das CDP-Materialgesetz wurde zur Nachbildung des Verhaltens von Beton und anderen quasi-spröden Materialien, wie beispielsweise Fels, unter monotoner, zyklischer und dynamischer Belastung entwickelt. Ein geringer Umschlingungsdruck wird vorausgesetzt, da bei höherem Umschlingungsdruck das spröde Materialverhalten allmählich verschwindet. Das Konzept der isotrop geschädigten Elastizität in Verbindung mit isotroper Zug- und Druckplastizität repräsentiert das inelastische Verhalten dieser Materialien. Diesen Ausführungen liegt die Annahme eines linearen und isotropen elastischen Verhaltens zugrunde. Die primäre Anwendung erfolgt für bewehrten Beton, dennoch ist die Simulation von unbewehrtem Beton und anderen Materialien möglich. Um die während eines Bruches auftretende, irreversible Schädigung zu beschreiben, wird für das Materialgesetz eine Kombination aus nichtassoziierter, mehrfach verfestigender Plastizität und skalar geschädigter Elastizität verwendet. Die folgenden makroskopischen Eigenschaften zeigen beispielhaft einige Konsequenzen dieser Effekte. [11, 13]

Die Materialfestigkeit ist bei Zug- bzw. Druckbeanspruchung verschieden, wobei die Festigkeit bei Druckbeanspruchung mindestens einem Zehnfachen der Festigkeit bei Zugbeanspruchung entspricht. Eine Belastung durch Zug resultiert in einer Entfestigung, hingegen tritt bei Druckbeanspruchung zuerst eine Verfestigung mit anschließender Entfestigung auf. Die Verringerung der elastischen Steifigkeit ist je nach Art der Belastung, Zug oder Druck, unterschiedlich. [13]

Das durch das CDP-Materialgesetz implementierte mechanische Verhalten postuliert zwei hauptsächliche Versagensmechanismen. Einerseits durch Zugbeanspruchung induzierte Mikrorissbildung und andererseits das Stauchen durch Druckbeanspruchung. Während die Entwicklung der Fließfläche über zwei Verfestigungsparameter gesteuert wird erfolgt die Verringerung der Steifigkeit über die Schädigungsparameter d_t und d_c . Weitere relevante Parameter sind: [11]

- die Dichte ρ
- der Elastizitätsmodul E_0
- die Poissonzahl ν
- der Dilatanzwinkel ψ
- die Exzentrizität ϵ
- das Verhältnis der biaxialen zur einaxialen Druckfestigkeit σ_{b0}/σ_{c0}
- der Parameter K_c , welcher die Form der Fließfläche beeinflusst
- die einaxiale Druckfestigkeit σ_{c0}
- die einaxiale Zugfestigkeit σ_{t0}
- die spezifische Bruchenergie G_f
- der „crushing-strain“ oder auch inelastische Stauchung ϵ_c^m

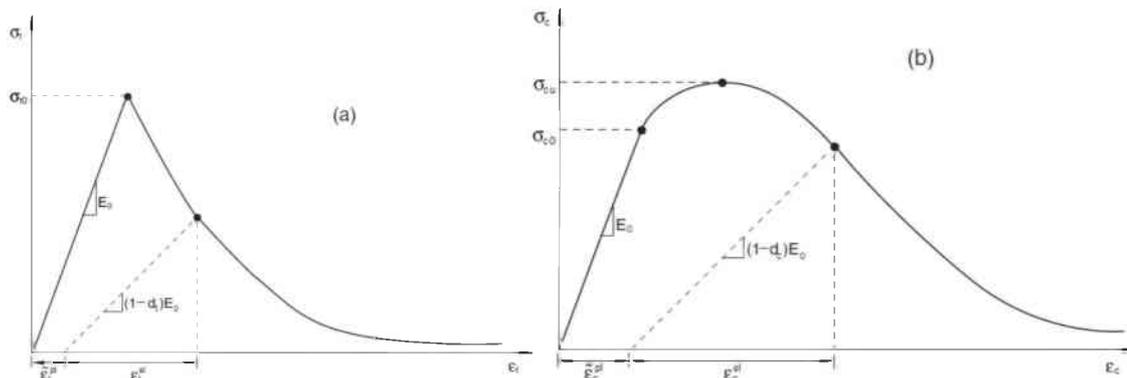


Abb. 3-15: Verhalten von Beton unter einaxialer a) Zugbelastung und b) Druckbelastung [11]

In Abbildung 3-15 ist das Verhalten von Beton unter einaxialer Zug- und Druckbeanspruchung mit entsprechenden Entfestigungs- und Verfestigungseigenschaften dargestellt. Die Schädigungsvariablen d_t und d_c werden aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven realer Versuche entsprechend den Gleichungen 3-6 und 3-7 ermittelt. Die Spannung in einem betrachteten Punkt im Post-Failure-Bereich auf der Spannungs-Dehnungs-Kurve wird mit σ bezeichnet und die zugehörige Schädigung berechnet.

$$\text{Gl. 3-6: } d_t = \frac{\sigma_{t0} - \sigma}{\sigma_{t0}}$$

$$\text{Gl. 3-7: } d_c = \frac{\sigma_{c0} - \sigma}{\sigma_{c0}}$$

In Abbildung 3-16 ist der Einfluss von K_c auf die Form der Fließfläche in der Deviatorebene dargestellt. S_1 , S_2 und S_3 sind dabei die Hauptspannungen, T.M. der Zug-Meridian und C.M. der Druck-Meridian. Daraus ist gut erkennbar, dass eine Variation von K_c einen großen Einfluss auf das Materialverhalten, insbesondere die Festigkeitseigenschaften, hat.

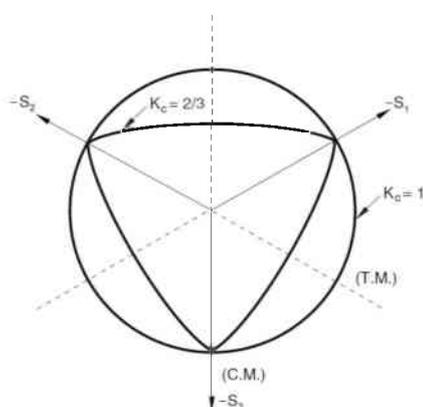


Abb. 3-16: Fließfläche in der Deviatorebene, abhängig von K_c [11]

Das Post-Failure-Verhalten kann zum einen über eine Spannungs-Verformungs-Beziehung gesteuert werden und zum anderen über das sogenannte fracture energy cracking criterion. Im Rahmen dieser Arbeit wurden beide Kriterien verwendet. Allerdings ist die Definition von Spannungs-Verformungs-Beziehungen aus einaxialen Zug- und Druckversuchen an Fels kompliziert, da im Gegensatz zu Beton im Nachbruchbereich kaum brauchbare Daten verfügbar sind. Aus diesem Grund wird das fracture energy cracking criterion bevorzugt. [11]

Das fracture energy cracking criterion basiert auf dem von Hillerborg vorgestellten fiktiven Rissmodell. Diesem liegt die Annahme zugrunde, dass sich ein Material bis zum Erreichen seiner Festigkeit linear elastisch verhält. Eine weitere Erhöhung der verformungsgesteuerten Dehnung resultiert in einer bestimmten Entfestigung innerhalb der Prozesszone und der gleichzeitigen elastischen Entlastung außerhalb der Prozesszone. Anstelle einer Spannungs-Verformungs-Beziehung wird eine Spannungs-Verschiebungs-Beziehung definiert oder die spezifische Bruchenergie direkt als Materialparameter implementiert. Die Verwendung der spezifischen Bruchenergie als Materialparameter ermöglicht eine einfache Definition des Post-Failure-Verhaltens, da keine Entfestigungskurve vorgegeben ist. Die Eingabe der Zugfestigkeit σ_{t0} und der spezifischen Bruchenergie G_f in das Berechnungsprogramm reicht zur Beschreibung des Verhaltens unter Zugbelastung aus. Nach dem Erreichen der Zugfestigkeit wird von einem linearen Festigkeitsverlust ausgegangen, dargestellt in Abbildung 3-17. Die Steigung der Gerade hängt von der spezifischen Bruchenergie ab. Diese Variante hat sich im Laufe der Arbeit unter den gegebenen Rahmenbedingungen als am besten geeignet herausgestellt. [11, 14]

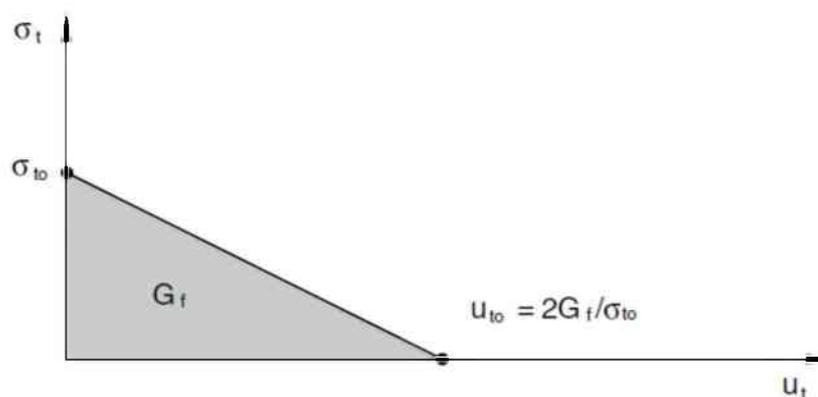


Abb. 3-17: Spannungs-Verschiebungskurve mit fracture energy cracking criterion [11]

3.3.2 Ergebnisse der numerischen Simulation

Ziel der numerischen Simulation ist einerseits die Resultate der durchgeführten Versuche nachbilden zu können und andererseits die Rissbildung numerisch darzustellen. Eine detaillierte Beschreibung des numerischen Modells, der Kontakt- und Randbedingungen, Rechenverfahren usw. findet sich in Kapitel 6, während an dieser Stelle nur die Ergebnisse vorgestellt werden.

3.3.2.1 Implizite Berechnung

Aufgrund des quasi-statischen Versuchsablaufs bietet sich eine implizite Berechnung an. Eines der wichtigsten Auswertekriterien für den Keilspalttest ist der Kurvenverlauf, da sich mit dem Verlauf unter anderem die spezifische Bruchenergie ändert. Die spezifische Bruchenergie G_f , die Kerbzugfestigkeit σ_{KZ} , die direkte Zugfestigkeit f_t und die charakteristische Länge l_c sind weitere wichtige Kenngrößen. In den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen sind die experimentellen Resultate und die Ergebnisse der numerischen Simulation für Granit bzw. Sandstein dargestellt. Im Rahmen der numerischen Simulation wird die im Sandstein auftretende Anisotropie nicht berücksichtigt, sondern eine isotrope Verteilung der Materialeigenschaften angenommen. In den Tabellen 3-4 und 3-5 sind die Mittelwerte der Kenngrößen aller fünf durchgeführten Versuche dargestellt.

| Probe | $F_{v,max}$ [N] | $F_{h,max}$ [N] | σ_{KZ} [MPa] | G_f [N·m ⁻¹] | | G_f' [N·m ⁻¹] | | f_t [MPa] | | E [GPa] | l_c [mm] | |
|-------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|------|----------------|-------|------------|---------------|--------|
| | | | | trav. | hor. | trav. | hor. | trav. | hor. | | trav. | hor. |
| Sandstein-exper. | 1003 | 5735 | 9,40 | 201 | 187 | 178 | 161 | 11,17 | 11,55 | 43,9 | 79 | 67 |
| Sandstein-simul. | 951 | 5391 | 8,85 | 199 | 197 | 166 | 158 | 6,80 | 6,80 | 35,0 | 151 | 149 |
| Abweichung, % | 5,3 | 6,0 | 5,9 | 0,7 | -5,7 | 6,4 | 1,3 | 39,1 | 41,1 | 20,3 | -90,0 | -122,9 |

Tab. 3-4: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation und der experimentellen Keilspalttests für Sandstein

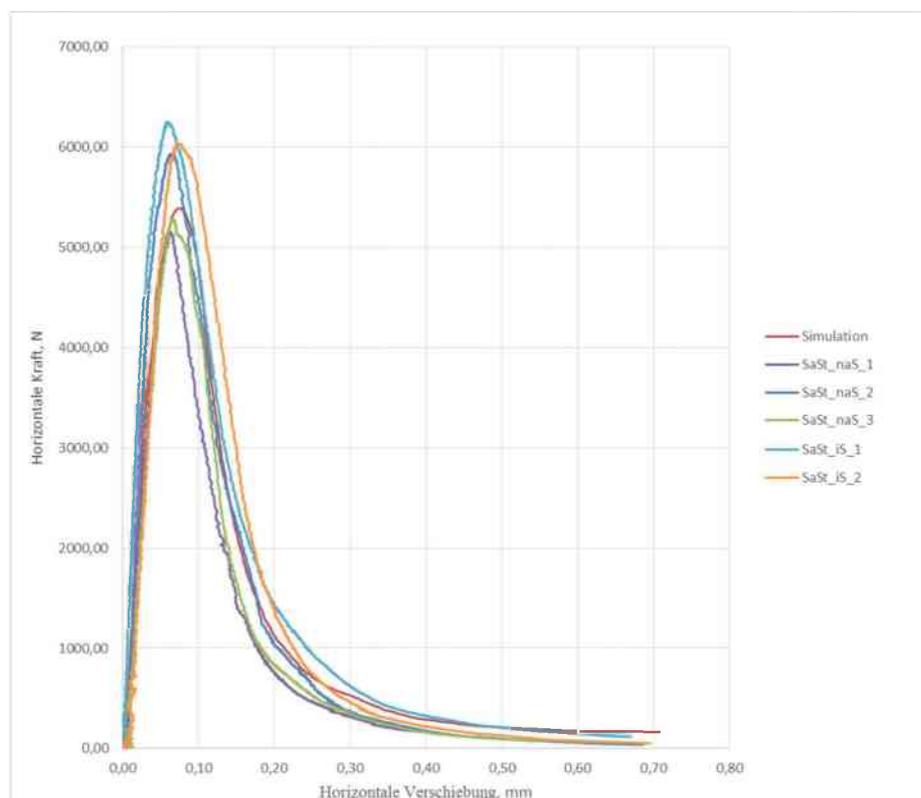


Abb. 3-18: Last-Verschiebungskurven von experimentellen und numerisch simulierten Keilspaltversuchen für Sandstein

| Probe | $F_{v,max}$ [N] | $F_{h,max}$ [N] | σ_{KZ} [MPa] | G_f [N·m ⁻¹] | | G_f' [N·m ⁻¹] | | f_t [MPa] | | E [GPa] | l_c [mm] | |
|----------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|------|----------------|------|------------|---------------|-------|
| | | | | trav. | hor. | trav. | hor. | trav. | hor. | | trav. | hor. |
| Granit-exper. | 1060 | 6056 | 9,76 | 205 | 188 | 178 | 158 | 10 | 11 | 70,0 | 151 | 126 |
| Granit-simul. | 1221 | 6925 | 11,37 | 206 | 203 | 165 | 157 | 8,54 | 8,54 | 60,0 | 169 | 167 |
| Abweichung, % | -15,2 | -14,4 | -16,5 | -0,4 | -8,0 | 7,1 | 0,8 | 17,1 | 19,8 | 14,2 | -11,8 | -33,2 |

Tab. 3-5: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation und der experimentellen Keilspalttests für Granit

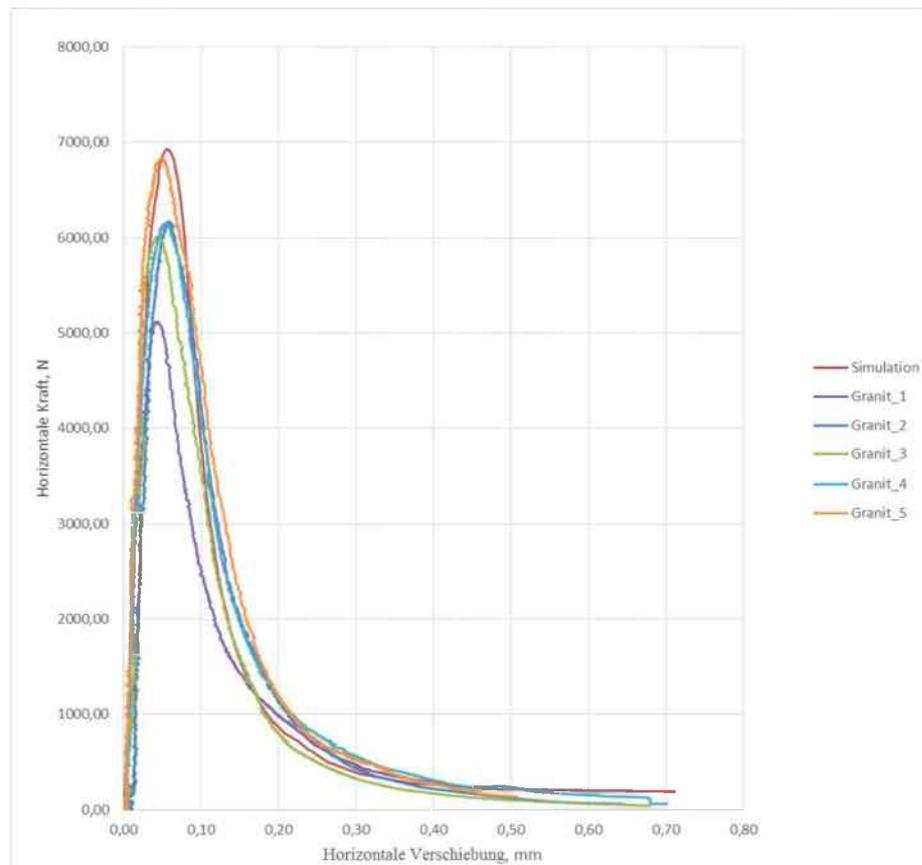


Abb. 3-19: Last-Verschiebungskurven von experimentellen und numerisch simulierten Keilspaltversuchen für Granit

Die Ergebnisse der numerischen Simulation stimmen gut mit den Resultaten der durchgeführten Versuche überein. Vor allem mit dem Hintergrund, dass viele Materialparameter für das CDP-Materialgesetz nicht rückgerechnet, sondern aus realen Versuchen entnommen wurden. Allerdings können für die Exzentrizität, das Verhältnis der biaxialen zur einaxialen Druckfestigkeit σ_{b0}/σ_{c0} und den Parameter K_c die Werte nur mittels Literatur abgeschätzt werden. Eine zusätzliche Ausnahme stellt die Zugfestigkeit von Sandstein dar, welche für die numerische Simulation geringfügig gegenüber den Versuchswerten erhöht wurde. Die verwendeten Materialparameter sind in den Tabellen 3-6 bis 3-8 dargestellt. Für das Verfahren zur Gewinnung der inelastischen Stauchungen bzw. der Rissdehnung und der zugehörigen Schädigung wird auf [15] verwiesen.

| Sandstein | | | | | |
|-------------------------------|--|---|-------------------|--|-------------------|
| Dilatanzwinkel | 10 | ° | Elastizitätsmodul | 35000 | N/mm ² |
| Exzentrizität | 0,1 | | Poissonzahl | 0,15 | |
| σ_{b0}/σ_{c0} | 1,13 | | Dichte | 2,54E-09 | t/mm ³ |
| K_C | 0,66667 | | | | |
| Post-Failure-Verhalten | | | | | |
| Druckbereich | | | | | |
| Spannung N/mm ² | inelastische Stauchung $\widetilde{\varepsilon}_c^{in}$ | | Damage d_c | inelastische Stauchung $\widetilde{\varepsilon}_c^{in}$ | |
| 130,1 | 0,000000 | | 0,00 | 0,000000 | |
| 76,2 | 0,003310 | | 0,41 | 0,003310 | |
| 7,6 | 0,007500 | | 0,94 | 0,007500 | |
| 2,6 | 0,015000 | | 0,98 | 0,015000 | |
| 1,3 | 1,000000 | | 0,99 | 1,000000 | |
| Zugbereich | | | | | |
| Spannung N/mm ² | spez. Bruchenergie N/mm | | Damage d_t | Rissdehnung $\widetilde{\varepsilon}_t^{ck}$ | |
| 6,8 | 0,187 | | - | - | |

Tab. 3-6: Materialparameter für die numerische Simulation von Sandstein

| Granit | | | | | |
|-------------------------------|--|---|-------------------|--|-------------------|
| Dilatanzwinkel | 10 | ° | Elastizitätsmodul | 60000 | N/mm ² |
| Exzentrizität | 0,1 | | Poissonzahl | 0,28 | |
| σ_{b0}/σ_{c0} | 1,13 | | Dichte | 2,66E-09 | t/mm ³ |
| K_C | 0,66667 | | | | |
| Post-Failure-Verhalten | | | | | |
| Druckbereich | | | | | |
| Spannung N/mm ² | inelastische Stauchung $\widetilde{\varepsilon}_c^{in}$ | | Damage d_c | inelastische Stauchung $\widetilde{\varepsilon}_c^{in}$ | |
| 150,6 | 0,000000 | | 0,00 | 0,000000 | |
| 120,0 | 0,001300 | | 0,20 | 0,001300 | |
| 67,0 | 0,002630 | | 0,56 | 0,002630 | |
| 14,0 | 0,005300 | | 0,91 | 0,005300 | |
| 1,5 | 10,000000 | | 0,99 | 10,000000 | |
| Zugbereich | | | | | |
| Spannung N/mm ² | spez. Bruchenergie N/mm | | Damage d_t | Rissdehnung $\widetilde{\varepsilon}_t^{ck}$ | |
| 8,5 | 0,188 | | - | - | |

Tab. 3-7: Materialparameter für die numerische Simulation von Granit

| Stahl | | |
|-------------------|----------|-------------------|
| Elastizitätsmodul | 210000 | N/mm ² |
| Poissonzahl | 0,28 | |
| Dichte | 7,85E-09 | t/mm ³ |

Tab. 3-8: Materialparameter für die numerische Simulation von Stahl

Die Abweichungen bei den rechnerisch ermittelten charakteristischen Längen zwischen den Ergebnissen der realen Versuche und der numerischen Simulation sind hauptsächlich auf die unterschiedliche Parameterermittlung zurückzuführen. Resultate der experimentellen Keilspalttests werden teilweise invers bestimmt, hingegen stehen für die numerische Simulation Ergebnisse aus Laborversuchen zur Verfügung. Zusätzlich zeigen die Sandsteinproben eine erhebliche Differenz zwischen direkter Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit, wie in Tabelle 3-3 dargestellt ist. Entsprechend der Charakteristik des CDP-Materialgesetzes ist jedoch die direkte Zugfestigkeit als Eingabeparameter zu verwenden. Weitere Unterschiede finden sich bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls. Für die experimentellen Keilspaltversuche wird der Elastizitätsmodul mittels RFDA bestimmt, für die numerische Simulation hingegen aus einaxialen Druckversuchen. Diese sind in der Geotechnik gebräuchlicher als die RFDA. Die anisotrope Verteilung der Festigkeitseigenschaften bei den Sandsteinproben ist ebenfalls ein potentieller Einflussfaktor auf die Ergebnisse.

Sowohl der Elastizitätsmodul als auch die Zugfestigkeit gehen in die formelmäßige Berechnung der charakteristischen Länge mit ein. Größere Abweichungen bei diesen beiden Parametern haben eine dementsprechende Auswirkung auf die Resultate. Im Rahmen der Auswertung kann zusätzlich festgestellt werden, dass die Ergebnisse der numerischen Simulation in horizontaler und vertikaler Richtung deutlich geringer voneinander abweichen als in den realen Versuchen. Neben anderen Aspekten ist der Einfluss aus der Vereinfachung der Geometrie der Lastübertragungseinheit zu berücksichtigen. Dieser Faktor ist jedoch nur bedingt quantifizierbar. Abbildung 3-20 zeigt die Bedeutung verschiedener Vereinfachungsarten der Geometrie der Lastübertragungseinheit. Die im Abschnitt 3.3.1.2 vorgestellte vereinfachte Geometrie hat einen modifizierten Keil, jedoch besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Lastübertragungselemente so zu verändern, dass sie die Lastübertragungsaufgaben der Rollen übernehmen und nicht der Keil. Die Geometrie des Keils entspricht dann der in Anhang A dargestellten Originalgeometrie. Obwohl die verbleibenden Einstellungen allesamt beibehalten werden, ergibt sich für die maximale Horizontalkraft eine Differenz von rund 5,0 %. Ein weiterer Einflussfaktor ergibt sich aus der Diskretisierung der Probe durch das Erstellen des Finite-Elemente-Netzes (FEM-Netz). Das für die vorliegende Arbeit verwendete FEM-Netz wird unter Beachtung gängiger Direktiven zur Netzerstellung modelliert. Dazu gehören unter anderem die hauptsächlichliche Verwendung von quadratischen Elementen, die Anpassung des Netzes im Bruchbereich und die Anpassung des Knotenabstandes an die Modellgröße. Der Einfluss des FEM-Netzes auf das Ergebnis wird dadurch minimiert, ohne jedoch komplett eliminiert werden zu können.

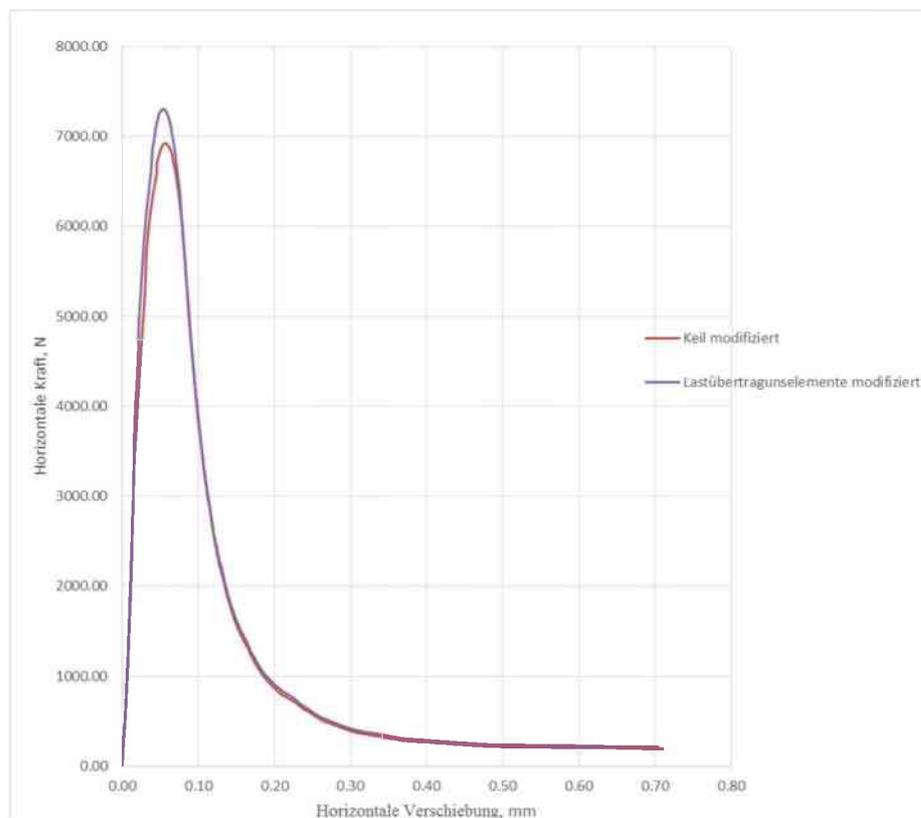


Abb. 3-20: Last-Verschiebungskurven bei unterschiedlicher Geometrie

3.3.2.2 Explizite Berechnung

Die explizite Berechnung wird vor allem zur Nachbildung der tatsächlichen Rissbildung durch das Löschen von Elementen durchgeführt. Ebenso wie bei der impliziten Berechnung werden die Mittelwerte der Versuchsergebnisse herangezogen. Um den Einfluss des Löschkriteriums darstellen zu können, werden in der folgenden Auswertung die Ergebnisse der numerischen Simulation mit und ohne Löschen der Elemente vorgestellt. Als Löschkriterien werden eine positive Hauptnormalspannung und für Granit PEEQT's von 0,0015 und für Sandstein PEEQT's von 0,0028 festgelegt. Die Bestimmung der Werte für die PEEQT's erfolgt invers aus der numerischen Simulation.

Aufgrund der langen Rechendauer wurden die Versuche vorzeitig, jedoch erst nach unterschreiten von 15,0 % der Maximallast, abgebrochen. In diesem Fall kann nur die spezifische Bruchenergie G_f korrekt bestimmt werden, womit in weiterer Folge auch die Berechnung der charakteristischen Länge unvollständig ist, da die spezifische Bruchenergie G_f nicht bekannt ist. In den Tabellen 3-9 und 3-10 sind die Ergebnisse der expliziten numerischen Simulation den experimentellen Versuchsergebnissen gegenübergestellt. In den Abbildungen 3-21 und 3-22 sind die zugehörigen Last-Verschiebungskurven dargestellt.

Bei Verwendung des CDP-Materialgesetzes in ABAQUS sind der Beschreibung des Entfestigungsverhaltens mit Hilfe der Spannungs-Verformungs-Beziehung Grenzen vorgegeben. Das bedeutet, dass von Seiten des Programms eine maximal mögliche Steigung der Entfestigungskurve festgelegt ist. Um diese Bedingung für die explizite Berechnung zu erfüllen werden die Materialparameter aus den Tabellen 3-6 und 3-7 im Post-Failure-Bereich geringfügig abgeändert. Die geänderten Materialparameter sind in den Tabellen 3-11 und 3-12 abgebildet.

| Probe | $F_{v,max}$ | $F_{h,max}$ | σ_{KZ} | G_f | | G_f' | | $\dot{\epsilon}_t$ | | E | l_k | |
|--------------------------------|-------------|-------------|---------------|-------|-------|--------|-------|--------------------|-------|------|-------|-------|
| | [N] | [N] | | [MPa] | trav. | hor. | trav. | hor. | trav. | | hor. | [GPa] |
| Sandstein-experimentell | 1003 | 5735 | 9,40 | 201 | 187 | 178 | 161 | 11,17 | 11,55 | 43,9 | 79 | 67 |
| Sandstein mit Löschen | 861 | 4882 | 8,02 | - | - | 29 | 35 | 6,80 | 6,80 | 35,0 | 27 | 27 |
| <i>Abweichung, %</i> | 14,2 | 14,9 | 14,7 | - | - | 83,5 | 78,5 | 39,1 | 41,1 | 20,3 | 65,5 | 59,6 |
| Sandstein ohne Löschen | 1122 | 6366 | 10,45 | - | - | 98 | 116 | 6,80 | 6,80 | 35,0 | 90 | 67 |
| <i>Abweichung, %</i> | -11,9 | -11,0 | -11,1 | - | - | 44,7 | 27,8 | 39,1 | 41,1 | 20,3 | -12,8 | 0,2 |

Tab. 3-9: Vergleich der Ergebnisse aus der expliziten numerischen Simulation und den experimentellen Keilspalttests für Sandstein

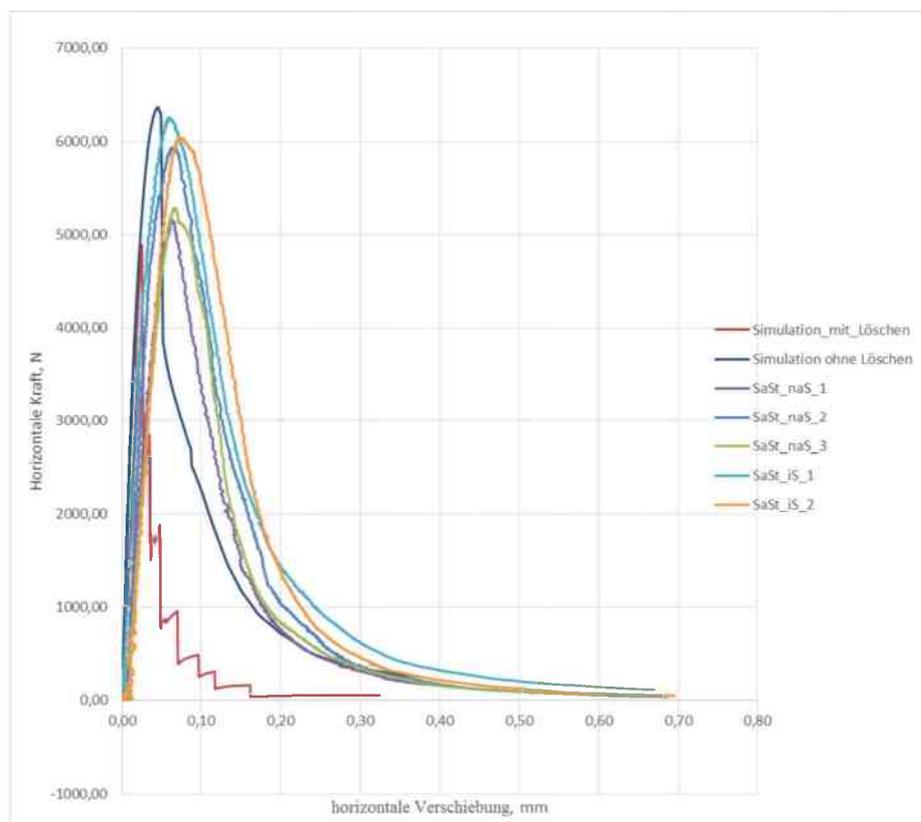


Abb. 3-21: Last-Verschiebungskurven von experimentellen und numerisch simulierten Keilspaltversuchen für Sandstein

| Probe | $F_{v,max}$ [N] | $F_{h,max}$ [N] | σ_{KZ} [MPa] | G_r [N·m ⁻¹] | | G_r' [N·m ⁻¹] | | f_t [MPa] | | E [GPa] | l_c [mm] | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|------|----------------|-------|------------|---------------|------|
| | | | | trav. | hor. | trav. | hor. | trav. | hor. | | trav. | hor. |
| Granit-experimentell | 1060 | 6056 | 9,76 | 205 | 188 | 178 | 158 | 10,30 | 10,65 | 70,0 | 151 | 126 |
| Granit mit Löschen | 1010 | 5730 | 9,41 | - | - | 23 | 27 | 8,54 | 8,54 | 60,0 | 21 | 27 |
| <i>Abweichung, %</i> | 4,7 | 5,4 | 3,6 | - | - | 87,1 | 82,9 | 17,1 | 19,8 | 14,2 | 86,2 | 78,4 |
| Granit ohne Löschen | 1451 | 8229 | 13,51 | - | - | 116 | 137 | 8,54 | 8,54 | 60,0 | 110 | 130 |
| <i>Abweichung, %</i> | -36,9 | -35,9 | -38,5 | - | - | 34,7 | 13,3 | 17,1 | 19,8 | 14,2 | 27,4 | -3,3 |

Tab. 3-10: Vergleich der Ergebnisse aus der expliziten numerischen Simulation und den experimentellen Keilspalttests für Granit

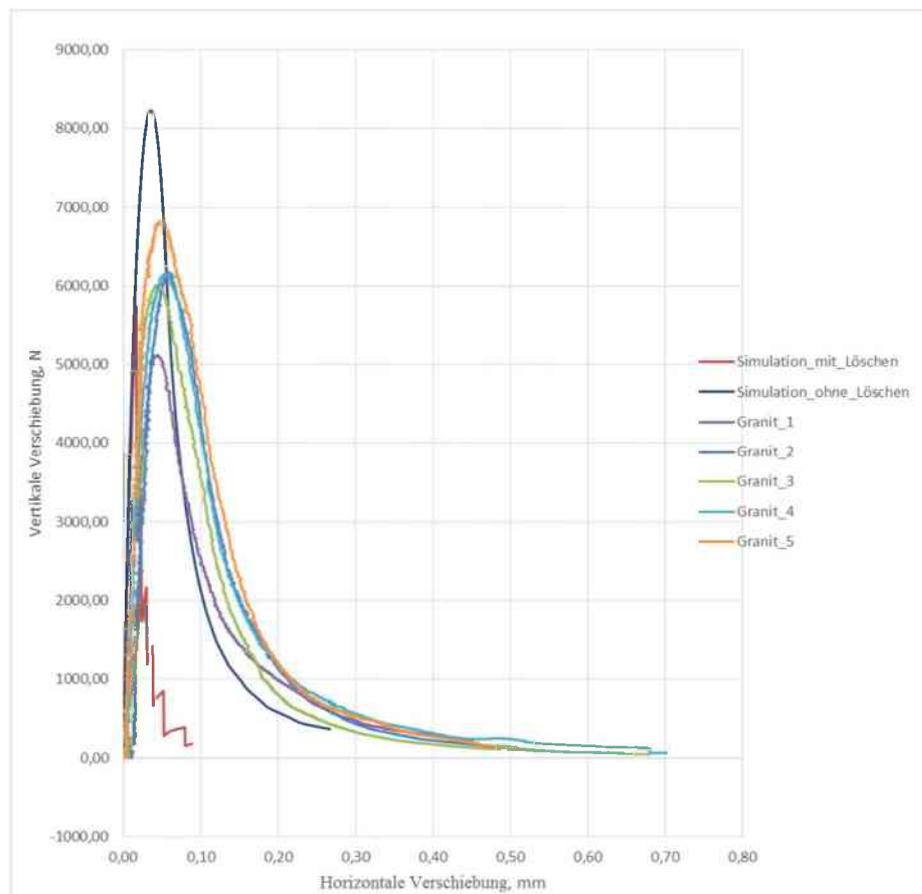


Abb. 3-22: Last-Verschiebungskurven von experimentellen und numerisch simulierten Keilspaltversuchen für Granit

| Sandstein | | | | | |
|-------------------------------|---|--|--------------------------------|---|--|
| Post-Failure-Verhalten | | | | | |
| Druckbereich | | | | | |
| Spannung N/mm ² | inelastische Stauchung $\overline{\varepsilon}_c^{in}$ | | Damage d_c | inelastische Stauchung $\overline{\varepsilon}_c^{in}$ | |
| 130,1 | 0,000 | | 0,00 | 0,000 | |
| 2,6 | 0,015 | | 0,98 | 0,015 | |
| 1,3 | 1,000 | | 0,99 | 1,000 | |

Tab. 3-11: Geänderter Post-Failure-Bereich für die explizite Berechnung Sandstein

| Granit | | | | | |
|-------------------------------|---|--|--------------------------------|---|--|
| Post-Failure-Verhalten | | | | | |
| Druckbereich | | | | | |
| Spannung N/mm ² | inelastische Stauchung $\overline{\varepsilon}_c^{in}$ | | Damage d_c | inelastische Stauchung $\overline{\varepsilon}_c^{in}$ | |
| 150,6 | 0,000 | | 0,00 | 0,000 | |
| 14,0 | 0,100 | | 0,91 | 0,001 | |
| 1,5 | 10,000 | | 0,99 | 0,003 | |

Tab. 3-12: Geänderter Post-Failure-Bereich für die explizite Berechnung Granit

Die Auswertung der numerischen Simulation zeigt, dass mit dem expliziten Berechnungsverfahren grundsätzlich akzeptable Ergebnisse erzielt werden können. Für einen Vergleich mit den experimentellen Versuchsergebnissen eignet sich jedoch nur die Berechnung ohne Löschen der Elemente. Durch das Löschen der Elemente kann die Rissbildung zwar qualitativ gut nachgebildet werden, allerdings führt das Löschen der Elemente zu großen Abweichungen bei der spezifischen Bruchenergie G_f^l und der charakteristischen Länge. Zusätzlich weicht die Form der Last-Verschiebungskurve stark von den Ergebnissen der realen Versuche ab. Die Wahl des Löschkriteriums hat ebenfalls einen starken Einfluss auf die Resultate. Hingegen stimmen die maximale Horizontal- bzw. Vertikalkraft und somit auch die Kerbzugfestigkeit gut mit den realen Versuchsergebnissen überein. Trotz der zahlreichen Nachteile beim Einsatz einer Subroutine zum Löschen der Elemente können im Hinblick auf die Zugfestigkeit, als einzelner Kennwert, brauchbare Resultate erzielt werden. Diese Erkenntnis ist vor allem im Hinblick auf andere Anwendungen mit einem Lösevorgang, wie etwa den Schneidprozess, relevant. Das numerische Modell einer Granitprobe am Versuchsende, unter Verwendung der Subroutine, ist in der Abbildung 3-23 dargestellt. Anzumerken ist, dass die Resultate der numerischen Simulation zum Teil eine den realen Versuchen entgegengesetzte Systematik aufweisen. Beispielsweise sind die charakteristische Länge und die spezifische Bruchenergie G_f^l in horizontaler Richtung größer als in vertikaler. Sowohl für die Granitproben als auch für die Sandsteinproben zeigen die Last-Verschiebungskurven stets ein etwas zu steifes Verhalten im elastischen Bereich. Dieser Effekt ist eventuell auf die gewählten Randbedingungen zurückzuführen.

4 Geotechnische Standardversuche

In diesem Kapitel werden die aus der numerischen Simulation der Keilspaltversuche gewonnenen Ergebnisse mit denen des direkten Zugversuchs und des Brazilian-Tests verglichen. In Tabelle 3-3 wurden bereits die experimentellen Resultate der drei Versuche hinsichtlich der Zugfestigkeit einander gegenübergestellt.

4.1 Direkter Zugversuch

Für die direkten Zugversuche werden zylindrische Probekörper an ihren Enden mit Epoxidharz in Überwurfhülsen geklebt, welche anschließend gelenkig in die Prüfmaschine eingehängt werden. Die verwendeten Probekörper haben einen Durchmesser von rund 50,0 mm und eine Länge von ca. 100,0 mm. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt zwischen 0,5 und 1,0 mm/min. Zur Verfügung stehen Daten aus elf direkten Zugversuchen für Neuhauser-Granit und neun direkten Zugversuchen für Imberg-Sandstein. [16]

4.1.1 Numerisches Modell implizit

Das numerische Modell wird entsprechend den Randbedingungen aus den realen Versuchen aufgebaut. Die Probekörpergeometrie entspricht einem Zylinder mit 50,0 mm Durchmesser und einer Länge von 100,0 mm. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt für die implizite Berechnung 0,5 mm/min und das „Dynamic, Implicit“ Verfahren gelangt zur Anwendung. Die Enden des zylindrischen Probekörpers sind über Zwangsbedingungen an die Bewegung von rechteckigen Platten gekoppelt. Auf die explizite Modellierung der Klebverbindung wird verzichtet. Die Platten werden „discrete rigid“ modelliert und über einen Referenzpunkt gesteuert. Das numerische Modell des Zugversuchs mit den Interaktionen ist in der Abbildung 4-1 dargestellt.

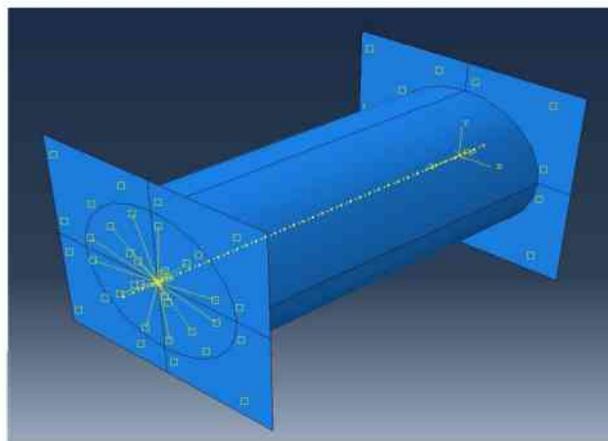


Abb. 4-1: Interaktionen des numerischen Modells des direkten Zugversuchs

Die zylindrische Probe besteht aus rund 9.000 hexaedrischen Elementen vom Typ C3D8R und die beiden Platten aus 800 quadratischen Elementen vom Typ R3D4. Die in dem Abschnitt 3.3.2.1 vorgestellten Materialparameter werden für die Berechnung verwendet. In der Abbildung 4-2 ist das numerische Modell mit dem FEM-Netz dargestellt.

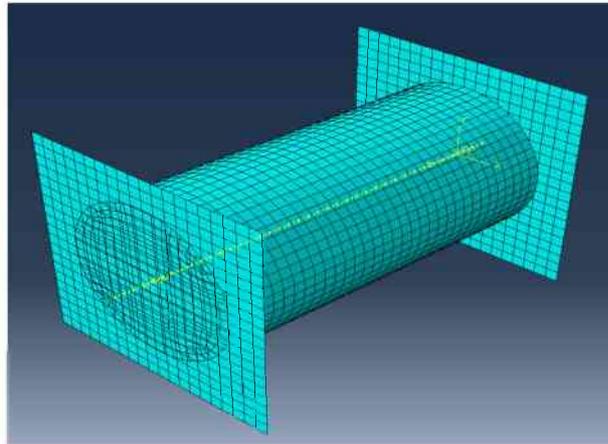


Abb. 4-2: Numerisches Modell mit dem FEM-Netz

4.1.2 Ergebnisse implizit

Ein Ziel der numerischen Simulation des direkten Zugversuchs ist es, die Gültigkeit der aus den Keilspaltversuchen gewonnenen Materialparameter zu überprüfen und in weiterer Folge etwaige Abweichungen zu ermitteln. In den Abbildungen 4-3 und 4-4 sind die Ergebnisse der numerischen Simulation und eines exemplarischen experimentellen Versuchs dargestellt. Die Resultate der Kurve „Numerik-Eingabe“ werden mit den Parametern aus der Tabelle 3-6 bzw. der Tabelle 3-7 berechnet. Für die Ergebnisse „Numerik-korrigiert“ wird die in das numerische Modell eingegebene Zugfestigkeit so variiert, dass die berechnete Zugfestigkeit dem Mittelwert der experimentell bestimmten Zugfestigkeit entspricht. Für Sandstein wird in der numerischen Simulation des Keilspalttests nicht der Mittelwert von 6,22 MPa verwendet, sondern ein leicht erhöhter Wert von 6,80 MPa. Die Eingabewerte für die Numerik bzw. die Resultate der experimentellen Versuche sind in der Tabelle 4-1 dargestellt.

| Daten | Numerik Eingabe | Numerik Korrigiert | Realer Versuch |
|---|--------------------|-----------------------|-------------------|
| Sandstein f_t MPa | 6,80 | 6,43 | 6,22 |
| Granit f_t MPa | 8,54 | 9,05 | 8,54 |
| Abweichung-Sandstein Numerik-Real, % | 9,32 | 3,38 | - |
| Abweichung-Granit Numerik-Real, % | 0,00 | 5,97 | - |

Tab. 4-1: Vergleich der Zugfestigkeit numerisch (implizit) und experimentell

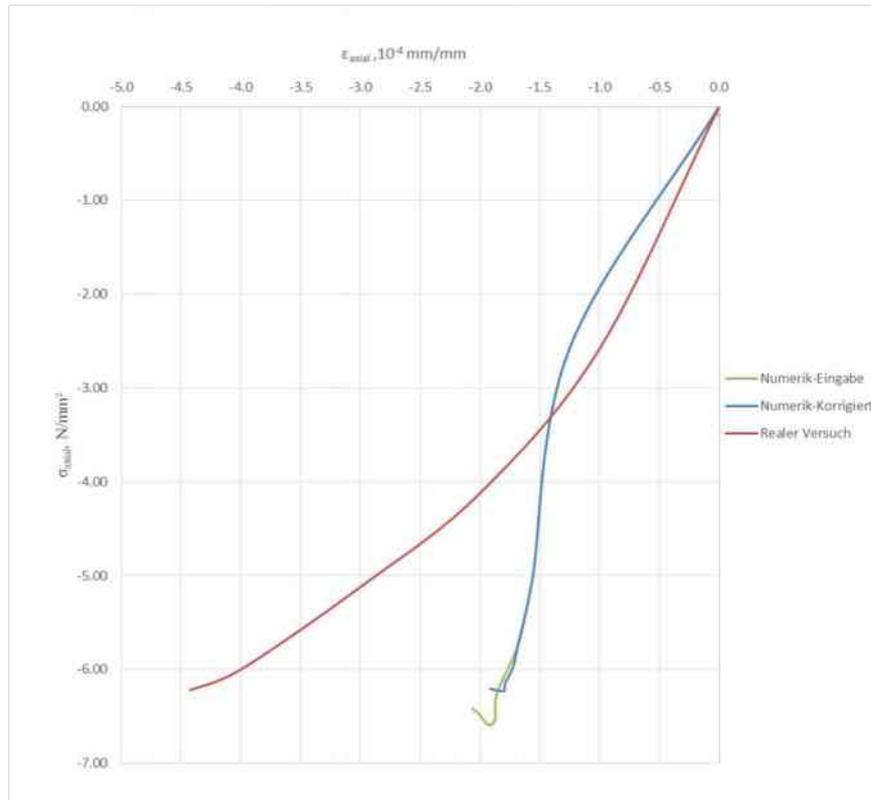


Abb. 4-3: Ergebnisse direkter Zugversuch Sandstein implizit

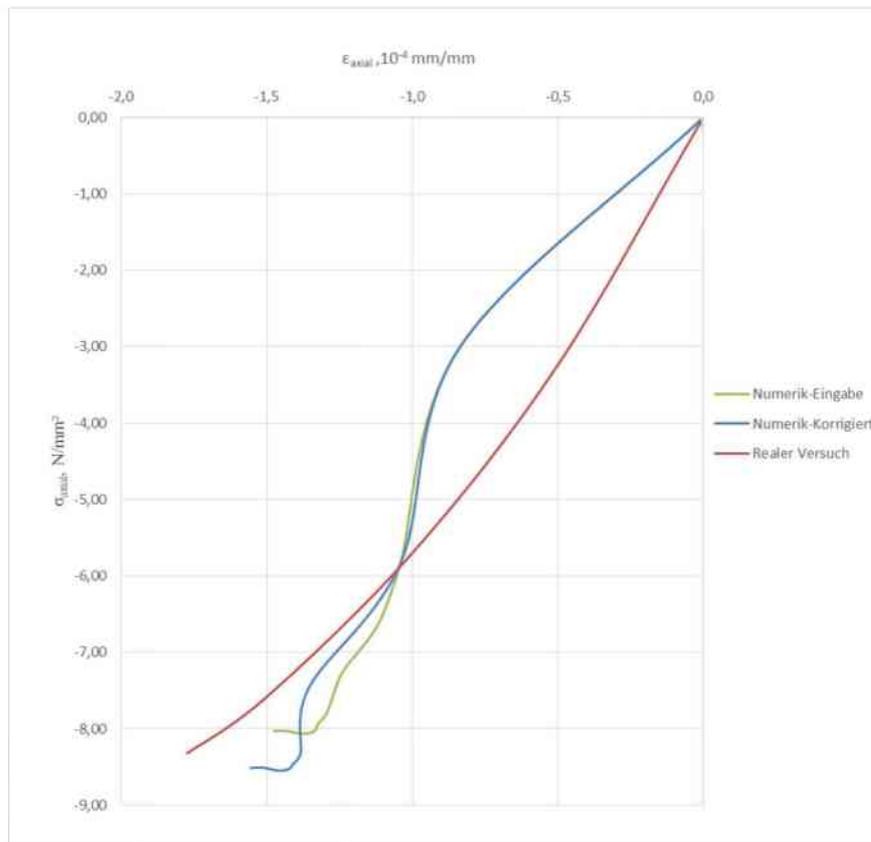


Abb. 4-4: Ergebnisse direkter Zugversuch Granit implizit

Die Zugfestigkeit als einzelner Materialkennwert, kann für beide Probenmaterialien mit den in den Keilspaltversuchen verwendeten Materialparametern numerisch gut nachgebildet werden. Für die Dehnungen ist das bei den Sandsteinproben nicht der Fall. Bei den Granitproben stimmen die Dehnungen hingegen gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Die Form der Ergebniskurve weicht in der Numerik stark von jener der realen Versuche ab, vor allem für den Post-Failure-Bereich. Bei der impliziten Berechnung unter Verwendung des fracture energy cracking criterions ist die Simulation des plötzlich auftretenden Versagens nicht realisierbar. Nach dem Erreichen der Zugfestigkeit folgt eine langsame Entfestigung. Eine schnelle Entfestigung ist nicht möglich, da die Steigung der Entfestigungskurve von der eingegebenen spezifischen Bruchenergie abhängt und somit festgelegt ist. Aus diesem Grund sind in den Abbildungen 4-3 und 4-4 die numerischen Kurven nur bis zur Zugfestigkeit dargestellt.

4.1.3 Numerisches Modell explizit

Das numerische Modell für die explizite Berechnung ist weitgehend ident mit dem Modell für die implizite Berechnung. Die Probekörpergeometrie entspricht einem Zylinder mit 50,0 mm Durchmesser und einer Länge von 100,0 mm. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt allerdings das Zehnfache der impliziten Berechnung: 5 mm/min. Zum Löschen der Elemente wird die in der Abbildung 3-14 dargestellte Subroutine verwendet und die bereits in Abschnitt 3.3.2.2 vorgestellten Löschkriterien gelangen zur Anwendung. Das „Dynamic, Explicit“ Verfahren kommt für die Berechnung zum Einsatz. Die Zwangsbedingungen und Interaktionen entsprechen denen der impliziten Berechnung, wobei die Platten für die explizite Berechnung „analytical rigid“ modelliert werden. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes für die explizite Berechnung wird das FEM-Netz gröber gewählt als für die implizite Berechnung. Die zylindrische Probe besteht aus 1.924 hexaedrischen Elementen vom Typ C3D8R. Als Materialparameter werden die in den Abschnitten 3.3.2.1 und 3.3.2.2 vorgestellten Materialparameter verwendet.

4.1.4 Ergebnisse explizit

Für die explizite Berechnung werden die Resultate der numerischen Simulation mit „Numerik“ bezeichnet. In den Abbildungen 4-5 und 4-6 sind die Resultate der numerischen Simulation wieder einem exemplarischen experimentellen Versuchsergebnis gegenübergestellt. Das Ergebnis der numerischen Simulation des direkten Zugversuchs inklusive der gelöschten Elemente ist in der Abbildung 4-7 dargestellt. In der Tabelle 4-2 sind die berechneten Zugfestigkeiten aus der numerischen Simulation und die Resultate der realen Versuche abgebildet. Der Mittelwert der experimentellen Ergebnisse für die direkten Zugversuche beträgt zwar 6,22 MPa, da jedoch in der numerischen Simulation 6,80 MPa für die Zugfestigkeit eingesetzt werden dient dieser Wert in der Tabelle 4-2 als Vergleichswert.

| Daten | Numerik | Realer Versuch |
|---|---------|----------------|
| Sandstein f_t MPa | 6,53 | 6,80 |
| Granit f_t MPa | 8,06 | 8,54 |
| Abweichung-Sandstein Numerik-Real, % | -3,97 | - |
| Abweichung-Granit Numerik-Real, % | -5,62 | - |

Tab. 4-2: Vergleich der Zugfestigkeit numerisch (explizit) und experimentell

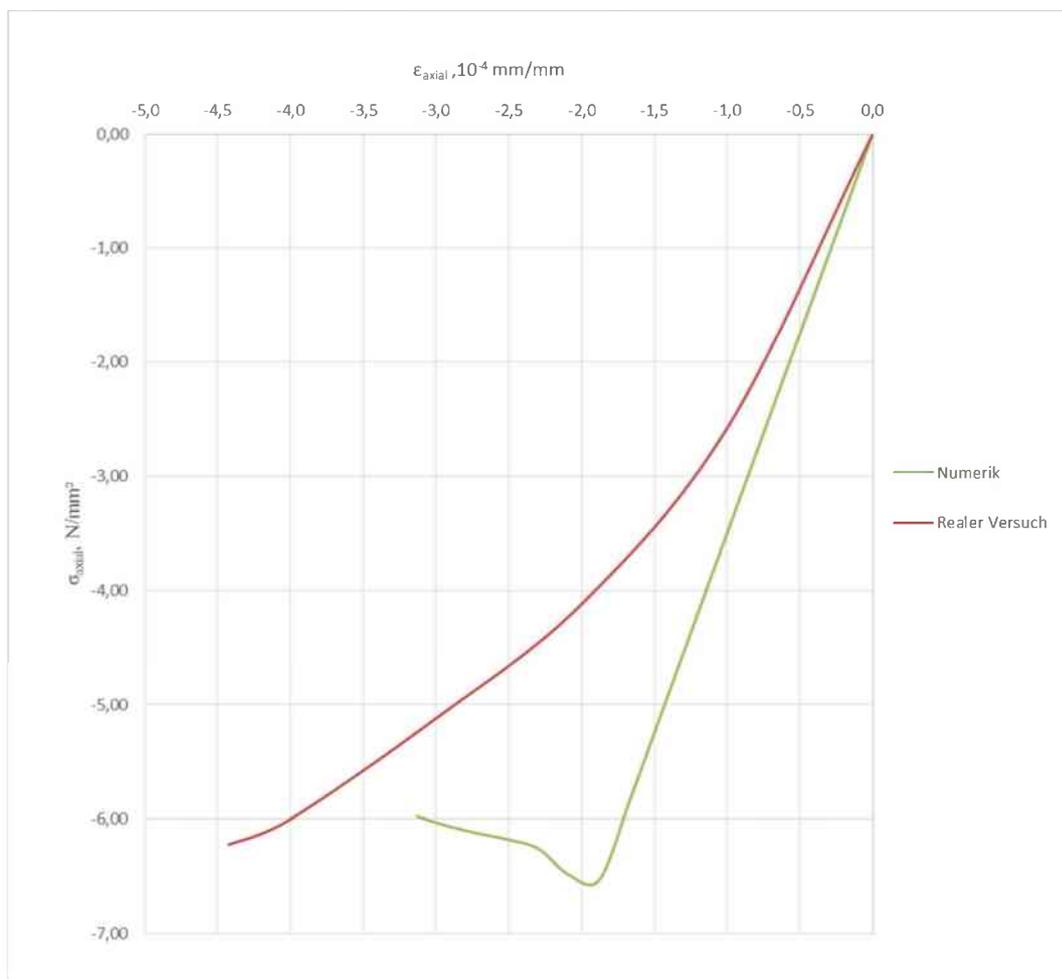


Abb. 4-5: Ergebnisse direkter Zugversuch Sandstein explizit

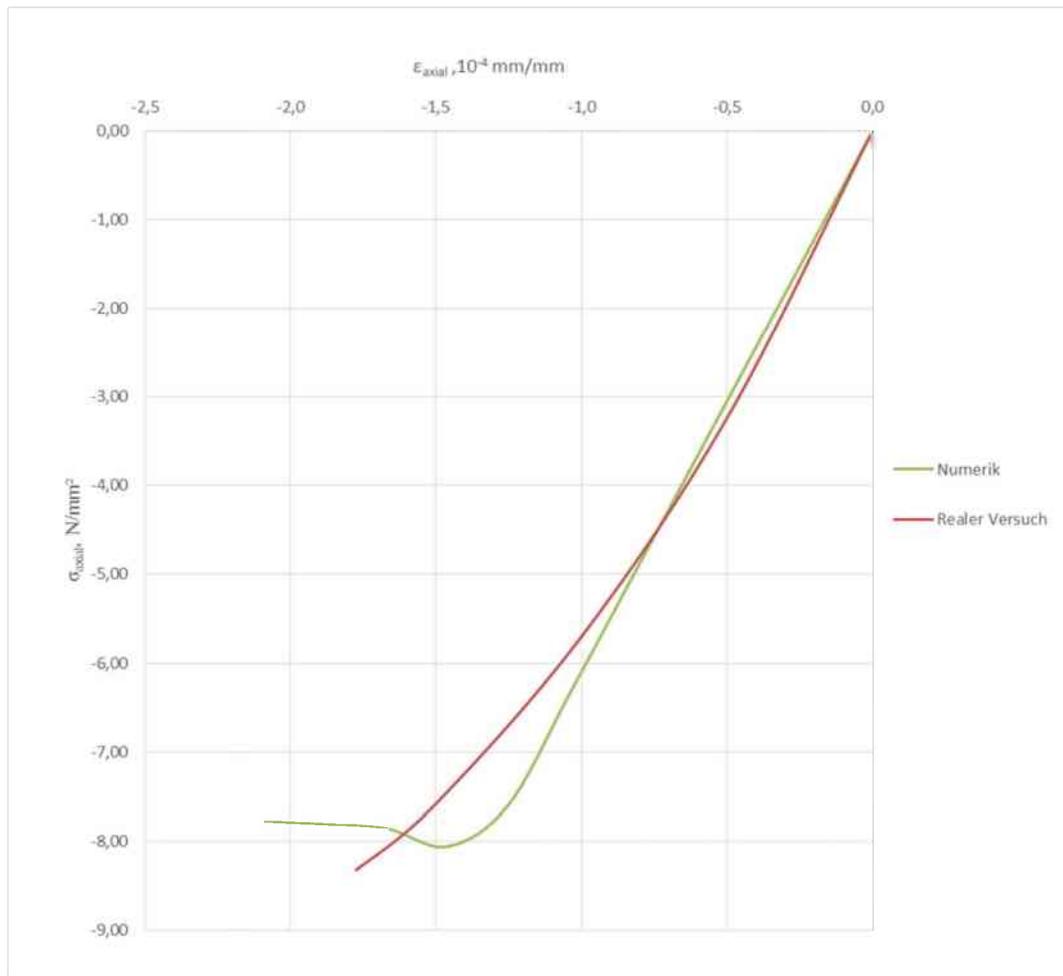


Abb. 4-6: Ergebnisse direkter Zugversuch Granit explizit

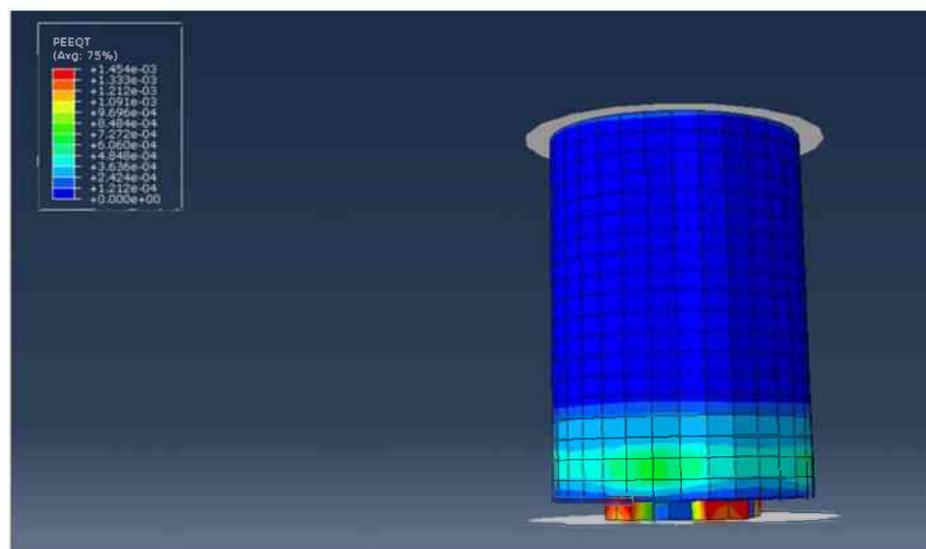


Abb. 4-7: Numerisches Modell mit gelöschten Elementen

Ähnlich dem Verhalten bei der impliziten Berechnung stimmen die Ergebnisse der numerischen Simulation mit den experimentellen Ergebnissen im Post-Failure-Bereich am wenigsten überein. Die als Löschkriterium eingesetzten PEEQT's sind zu groß, weshalb erst nach dem Erreichen der Zugfestigkeit die Elemente gelöscht werden. Hingegen stimmen die erreichten Zugfestigkeiten gut überein, die Abweichung beträgt nur rund 5 %. Insbesondere bei den Granitproben passen zusätzlich die numerisch und experimentell ermittelten Dehnungen zusammen. Im ansteigenden Bereich vor dem Erreichen der Zugfestigkeit zeigen die Kurven das erwartete lineare Verhalten.

4.2 Brazilian-Test

Beim Brazilian-Test, auch indirekter Zugversuch bzw. Spaltzugversuch genannt, werden die gegenüberliegenden Längskanten der zylinderförmigen Probe auf Druck belastet. In Folge dessen entstehen Spaltzugspannungen, welche im Grenzzustand zum Aufspalten der Probe führen. Dabei wird die maximal aufgebrachte Last F_{max} ermittelt. In der Gleichung 4-1 ist die Berechnung der Spaltzugfestigkeit σ_t angeführt.

$$\text{Gl 4-1: } \sigma_t = \frac{2 \times F_{max}}{\pi \times D \times L} \quad [16]$$

Für den Brazilian-Test werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser D von rund 50,0 mm und einer Länge L von ca. 25,0 mm verwendet. Die Belastung wird mit 10,0 kN/s aufgebracht und es stehen Daten aus je fünfzehn experimentellen Brazilian-Tests je Probenmaterial zur Verfügung. Der Aufbau des numerisch nachgebildeten Brazilian-Tests ist in der Abbildung 4-8 dargestellt. [16, 17]



Abb. 4-8: Brazilian-Test Versuchseinrichtung [17]

4.2.1 Numerisches Modell implizit

Das numerische Modell wird entsprechend den Vorgaben aus den realen Versuchen aufgebaut. Die Probekörpergeometrie entspricht einem Zylinder mit 50,0 mm Durchmesser und einer Länge von 25,0 mm. Die Belastung wird über Platten aufgebracht, welchen mittels „inertia“ eine dem tatsächlichen Versuchsaufbau entsprechende Masse zugewiesen wird. Die Platten werden „discrete rigid“ modelliert und über einen Referenzpunkt gesteuert. Über diesen Referenzpunkt wird die Belastung durch eine konzentrierte Last aufgebracht. Verwendet wird das „Dynamic, Implicit“ Verfahren. Die Interaktion zwischen den Platten und der Probe erfolgt über Kontaktbedingungen, mit einem sehr geringen Reibungskoeffizienten zwischen dem Stahl und dem Fels. Die zylindrische Probe besteht aus rund 8.900 hexaedrischen Elementen vom Typ C3D8R und ca. 3.100 keilförmigen Elementen vom Typ C3D6. Die beiden Platten bestehen aus 800 quadratischen Elementen vom Typ R3D4. Bei der Netzerstellung wird die Rissbildung in der Mitte der Probe berücksichtigt. In der Abbildung 4-9 ist das numerische Modell mit FEM-Netz dargestellt.

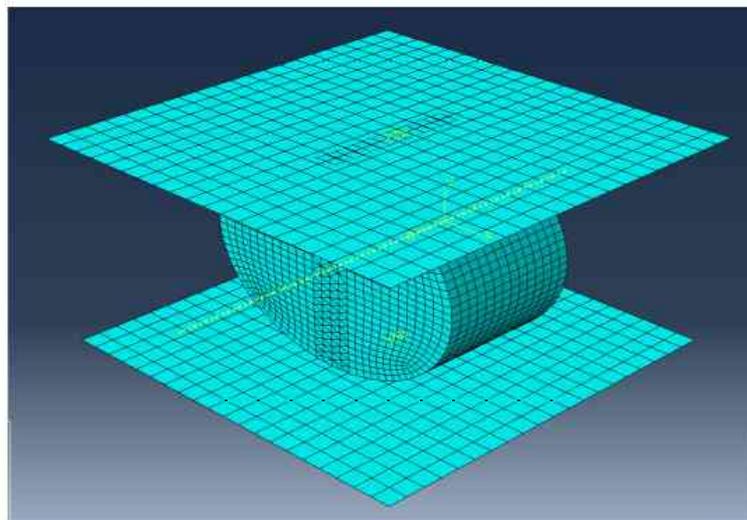


Abb. 4-9: Modell Brazilian-Test mit FEM-Netz

4.2.2 Ergebnisse implizit

Wie bereits bei den Zugversuchen beschrieben, dient die numerische Simulation des Brazilian-Tests dazu, die aus den Keilspaltversuchen gewonnenen Ergebnisse zu vergleichen um in weiterer Folge Abhängigkeiten festlegen zu können. Für die Auswertung des Brazilian-Tests stehen nur Spaltzugfestigkeitswerte aus experimentellen Versuchen zur Verfügung und keine Verformungswerte. In der Tabelle 4-3 steht f_t für die direkte Zugfestigkeit und σ_t für die Spaltzugfestigkeit. In der Spalte „Numerik-Eingabe“ werden die Zugfestigkeiten aus den Tabellen 3-6 und 3-7 verwendet und damit die zugehörige Spaltzugfestigkeit ermittelt. In der Spalte „Numerik-korrigiert“ wird die eingegebene Zugfestigkeit f_t bis zur Übereinstimmung der Spaltzugfestigkeit σ_t mit den experimentellen Ergebnissen korrigiert. In der Spalte „Realer Versuch“ sind die Mittelwerte der zur Verfügung stehenden direkten Zugversuche und Brazilian-Tests abgebildet.

| Daten | Numerik Eingabe | Numerik Korrigiert | Realer Versuch |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| Sandstein f_t MPa | 6,80 | 16,50 | 6,22 |
| Sandstein σ_t MPa | 5,98 | 10,81 | 10,86 |
| Granit f_t MPa | 8,54 | 12,00 | 8,54 |
| Granit σ_t MPa | 7,16 | 9,22 | 9,28 |

Tab. 4-3: Vergleich der Zugfestigkeiten implizit

Wie aus Tabelle 4-3 ersichtlich, ist die Differenz zwischen den Ergebnissen der experimentellen direkten Zugversuche und Brazilian-Tests für Sandstein relativ groß. Da die Versuche nicht vom Autor selbst durchgeführt wurden, kann keine zuverlässige Aussage zu diesem Umstand gemacht werden. Numerisch zeigt sich allerdings ein entgegengesetzter Trend, da hier die Spaltzugfestigkeit für die Sandsteinproben deutlich unter der direkten Zugfestigkeit liegt. Bei den Granitproben ist die Abweichung geringer, dennoch zeigt sich der Trend der numerisch geringeren Spaltzugfestigkeit auch bei den Granitproben.

4.2.3 Numerisches Modell explizit

Das explizite Modell unterscheidet sich in einigen Punkten vom impliziten Modell. Die Abmessungen der Probe sind ident, allerdings werden gebogene Klemmbacken zur Lastaufbringung verwendet. Der Radius der Klemmbacken entspricht dem 1,5-fachen Probenradius und erfüllt somit die Forderungen in [18]. Die Klemmbacken werden „analytical-rigid“ modelliert. Die Steuerung und Lastaufbringung erfolgt wie beim impliziten Modell über einen Referenzpunkt. Die Belastung wird mit 10,0 kN/s aufgebracht und zwischen den Klemmbacken und der Probe besteht Reibungskontakt. Die Probe besteht aus 2.550 hexaedrischen Elementen vom Typ C3D8R und ca. 11.600 keilförmigen Elementen vom Typ C3D6. In Abbildung 4-10 ist das explizite Modell mit dem FEM-Netz dargestellt.

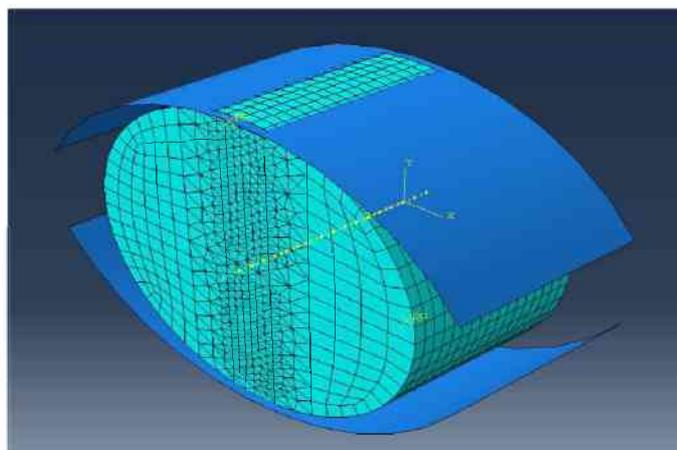


Abb. 4-10: Explizites Modell mit dem FEM-Netz

4.2.4 Ergebnisse explizit

Die Ergebnisse der expliziten Berechnung sind denen der impliziten Berechnung ähnlich, wobei dieselben Trends beobachtet werden können. Ein relevanter Unterschied ist die Möglichkeit, dass im Rahmen der expliziten Berechnung die Rissentstehung durch das Löschen der Elemente dargestellt werden kann. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-4 und das numerische Modell nach dem Erreichen der maximalen Festigkeit und der damit einhergehenden Rissbildung in Abbildung 4-11 dargestellt. In der Spalte Numerik sind die in der numerischen Simulation verwendeten direkten Zugfestigkeiten f_t und die berechneten Spaltzugfestigkeiten σ_t abgebildet. Die explizite Berechnung des Brazilian-Tests zeigt erneut, dass die qualitative Rissbildung gut nachgebildet werden kann.

| Daten | Numerik | Realer Versuch |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Sandstein f_t MPa | 6,80 | 6,22 |
| Sandstein σ_t MPa | 5,70 | 10,86 |
| Granit f_t MPa | 8,54 | 8,54 |
| Granit σ_t MPa | 7,00 | 9,28 |

Tab. 4-4: Vergleich der Zugfestigkeiten explizit

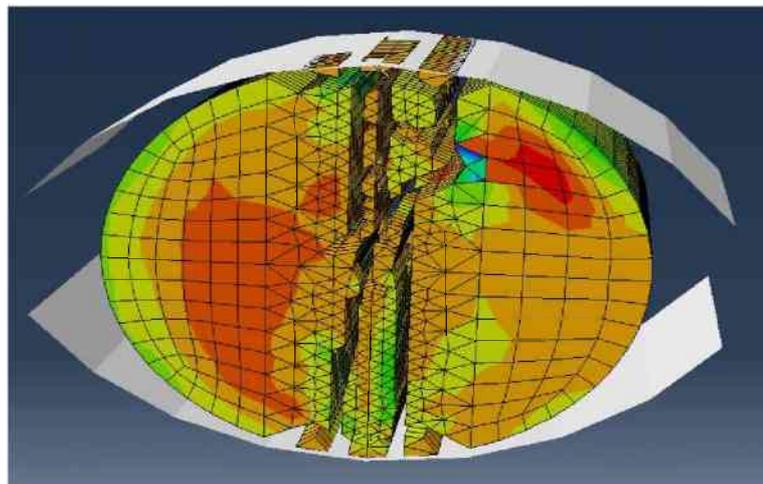


Abb. 4-11: Ergebnis der numerischen Simulation explizit

4.3 Einaxialer Druckversuch

Für die vollständige Implementierung des CDP-Materialgesetzes ist neben der Untersuchung des Zugbereichs auch die Bestimmung des Verhaltens unter Druckbelastung notwendig. Dazu stehen drei einaxiale Druckversuche für Neuhauser-Granit und fünf einaxiale Druckversuche für Imberg-Sandstein zur Verfügung. Bei einem einaxialen Druckversuch wird die Probe zentrisch in die Prüfmaschine eingebaut und dann kraft- oder weggeregelt in axialer Richtung belastet. Die verwendeten Probekörper sind zylindrisch, haben einen Durchmesser von rund 50,0 mm und eine Höhe von ca. 100,0 mm. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt zwischen 0,02 und 0,12 mm/min. Im Rahmen dieser Arbeit werden die einaxialen Druckversuche nur implizit mit dem Verfahren „Dynamic, Implicit“ simuliert und die Eingabeparameter für die explizite Berechnung entsprechend den Tabellen 3-11 und 3-12 abgeändert.

4.3.1 Numerisches Modell

Die Probekörpergeometrie ist zylindrisch mit einem Durchmesser von 50,0 mm und einer Höhe von 100,0 mm. Die Last wird über Platten aufgebracht, welche „discrete rigid“ modelliert und über einen Referenzpunkt gesteuert werden. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt rund 0,07 mm/min. Zwischen den Platten und den Endflächen der Probe besteht Reibungskontakt, mit einem niedrigen Reibungskoeffizienten von 0,01. Die zylindrische Probe besteht aus rund 15.400 hexaedrischen Elementen vom Typ C3D8R und die Platten aus ca. 800 quadratischen Elementen vom Typ R3D4. In der Abbildung 4-12 ist das numerische Modell des einaxialen Druckversuchs mit dem FEM-Netz dargestellt.

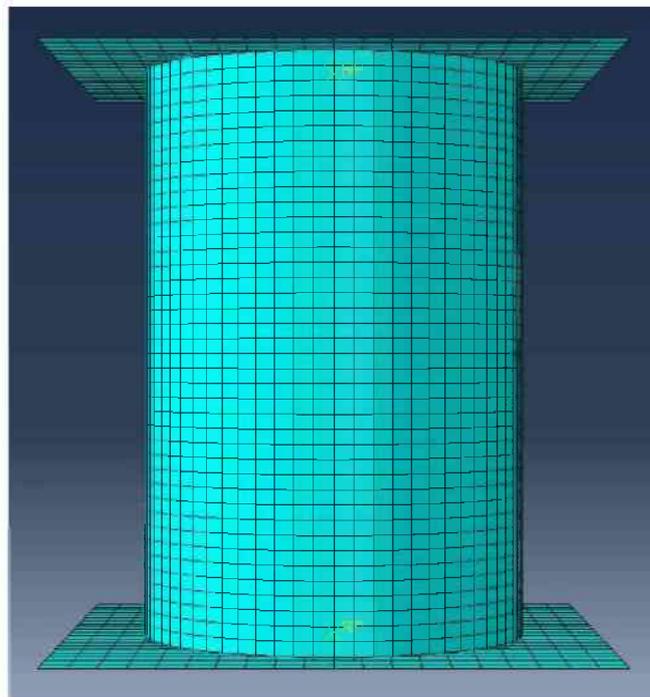


Abb. 4-12: Modell einaxialer Druckversuch mit FEM-Netz

4.3.2 Ergebnisse einaxialer Druckversuch

Der primäre Zweck der numerischen Simulation des einaxialen Druckversuchs ist es, die gemäß [15] ermittelten und in den Tabellen 3-6 und 3-7 dargestellten Materialparameter zu verifizieren. Wie die in den Abbildungen 4-12 und 4-13 und in der Tabelle 4-5 dargestellten Ergebnisse zeigen, ist eine numerische Nachbildung des Verhaltens von Gestein unter Druckbelastung gut möglich. Sowohl die einaxiale Druckfestigkeit σ_c als einzelne Kenngröße als auch die zugehörigen Verformungen stimmen mit den experimentellen Resultaten überein. Kleine Abweichungen bei den Verformungen treten deshalb auf, weil bei den experimentellen Versuchen Schleifen zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls gefahren wurden und in der numerischen Simulation nicht. Außerdem liegt dem Materialgesetz ein linear-elastisches Verhalten im ansteigenden Ast zugrunde - was nicht exakt der Realität entspricht. Als Vergleich wird in den Diagrammen exemplarisch jener experimentelle Druckversuch dargestellt, aus welchem die Parameter ermittelt werden. Auf eine explizite Berechnung wird verzichtet, da der erwartete Erkenntnisgewinn gering ist und die implizite Berechnung zur Verifizierung der ermittelten Materialparameter ausreichend ist.

| Daten | Numerik | Realer Versuch |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Sandstein σ_c MPa | 129,53 | 130,10 |
| Abweichung Sandstein, % | 0,44 | - |
| Granit σ_c MPa | 150,17 | 150,60 |
| Abweichung Granit, % | 0,29 | - |

Tab. 4-5: Vergleich der Druckfestigkeit

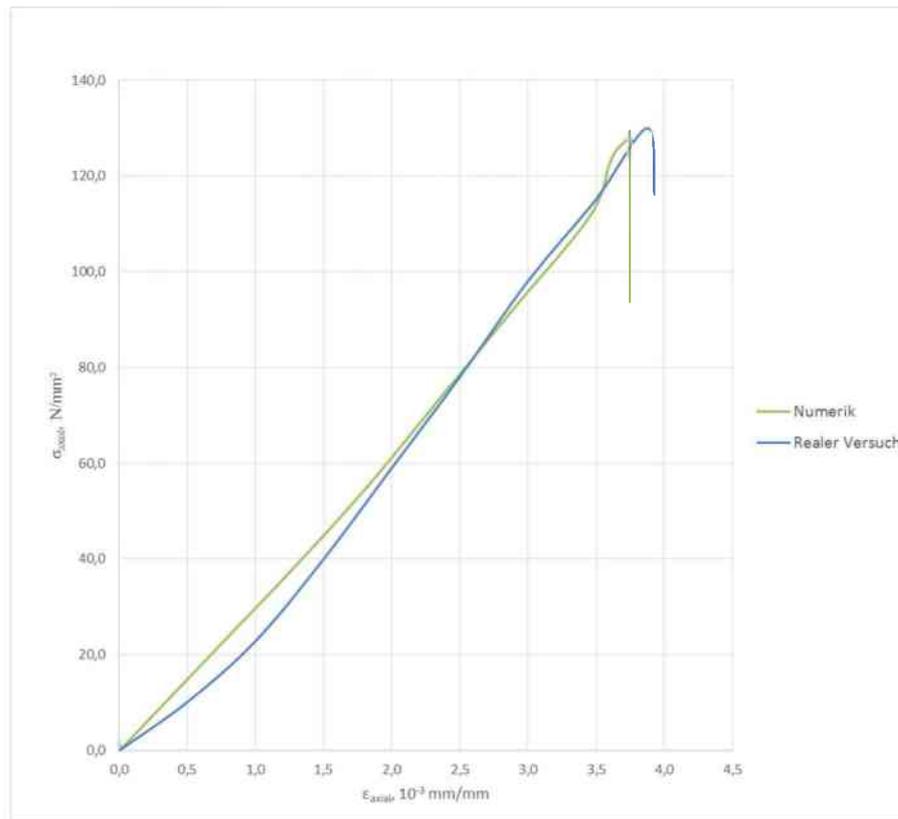


Abb. 4-13: Resultat einaxialer Druckversuch Sandstein

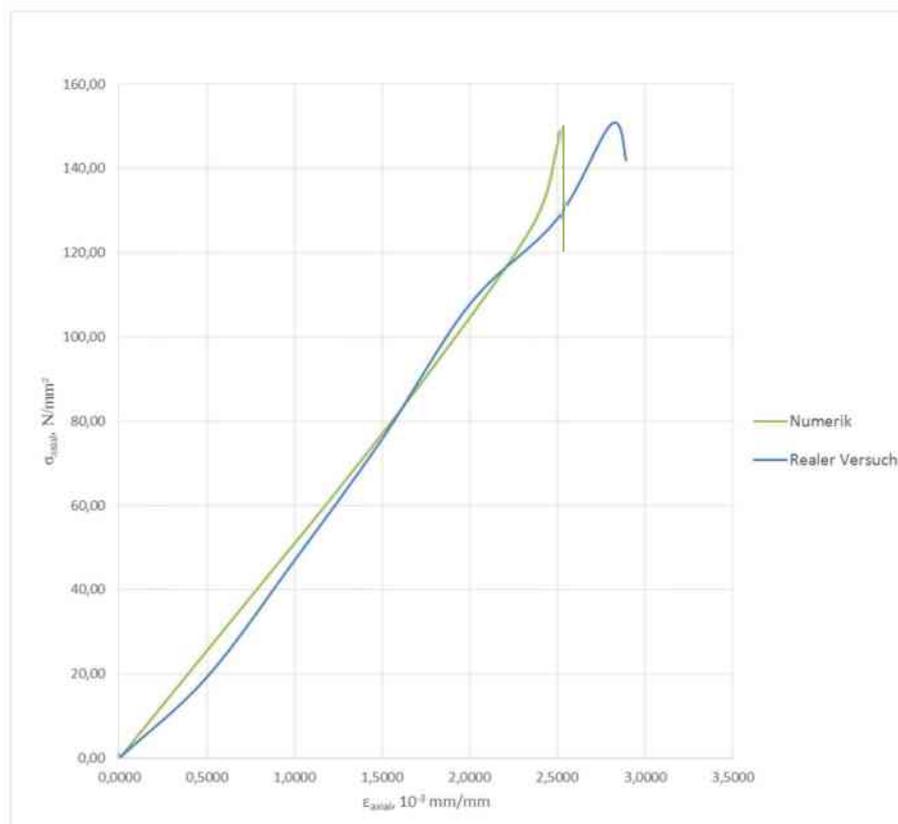


Abb. 4-14: Resultat einaxialer Druckversuch Granit

5 Resultate und Schlussfolgerungen

Der Keilspalttest stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Zugfestigkeit von Gesteinsproben indirekt zu bestimmen. Neben der unmittelbar aus den Versuchsergebnissen berechneten Kerbzugfestigkeit kann auch die direkte Zugfestigkeit invers ermittelt werden. Die Resultate hinsichtlich der Zugfestigkeit zeigen in Bezug auf die am selben Probenmaterial durchgeführten Brazilian-Tests eine relativ geringe Abweichung. Im Vergleich zu den Brazilian-Tests sind allerdings die Probenvorbereitung und die Versuchsdurchführung für die Keilspaltversuche deutlich aufwendiger. Vorteilhaft ist die Tatsache, dass neben der direkten Zugfestigkeit auch der Elastizitätsmodul und die spezifische Bruchenergie bestimmt werden können. Die spezifische Bruchenergie kann in weiterer Folge als Materialparameter in das Concrete-Damaged-Plasticity-Modell implementiert werden. Die Orientierung der Schichtung zur Prüfrichtung hat einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit. Die Abweichung der Ergebnisse aus den Keilspalttests zu den Resultaten der direkten Zugversuche ist vor allem für die Sandsteinproben beträchtlich, wobei die direkten Zugversuche und die Brazilian-Tests nicht vom Autor selbst durchgeführt wurden.

Im Rahmen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der Keilspaltversuche mit den aus experimentellen Versuchen gewonnenen Materialparametern gut numerisch nachgebildet werden können. Zur Verifizierung der Resultate wurden der direkte Zugversuch und der Brazilian-Test ebenfalls, mit identen Materialparametern, numerisch simuliert. Für den direkten Zugversuch sind die Abweichungen zwischen den numerischen Resultaten und den experimentellen Ergebnissen hinsichtlich der Zugfestigkeit als einzelner Parameter gering, jedoch ist das Post-Failure-Verhalten stark unterschiedlich. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse des Brazilian-Tests weichen deutlicher voneinander ab. In den Tabellen 5-1 und 5-2 sind die Ergebnisse der drei verschiedenen Versuchsarten dargestellt. Die abgebildeten Kennwerte wurden mit dem impliziten Berechnungsverfahren ermittelt. Für den Keilspalttest wird die Kerbzugfestigkeit als Vergleichswert verwendet, da diese direkt aus den Versuchsergebnissen gewonnen wird.

| Versuch | Keilspalttest | direkter Zugversuch | Brazilian Test |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|----------------|
| experimentelle Ergebnisse f_t , MPa | 9,40 | 6,80 | 10,86 |
| numerische Ergebnisse f_t , MPa | 8,85 | 6,59 | 5,98 |
| Abweichung, | -5,85 | -3,09 | -44,94 |

Tab. 5-1: Vergleich der Ergebnisse für Sandstein

| Versuch | Keilspalttest | direkter Zugversuch | Brazilian Test |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|----------------|
| experimentelle Ergebnisse f_t , MPa | 9,76 | 8,54 | 9,28 |
| numerische Ergebnisse f_t , MPa | 11,37 | 8,06 | 7,16 |
| Abweichung, | 16,50 | -5,62 | -22,84 |

Tab. 5-2: Vergleich der Ergebnisse für Granit

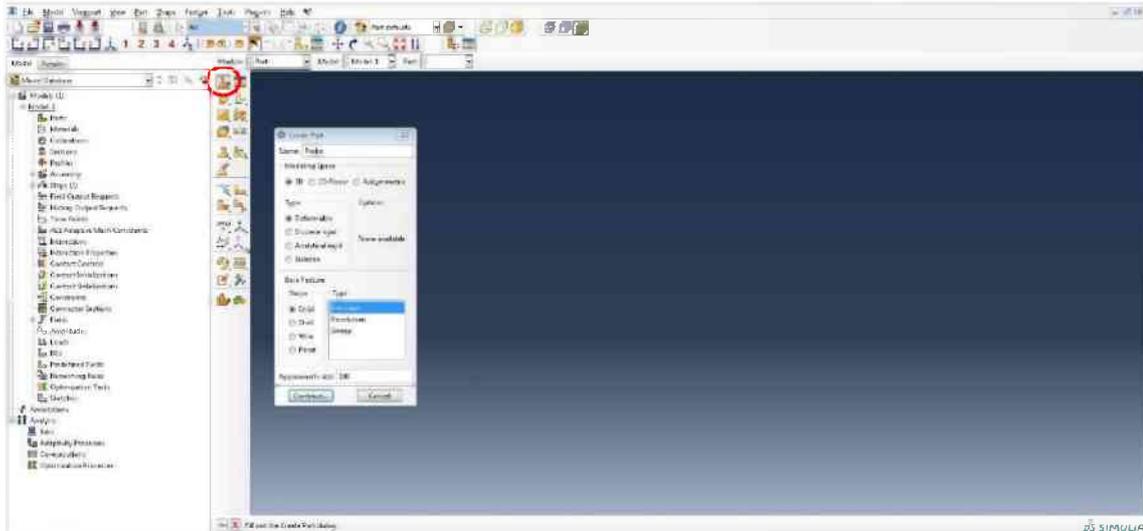
Die Tabellen 5-1 und 5-2 zeigen, dass die Abweichung zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen in den meisten Fällen 20,0 % und weniger beträgt. Nur die Resultate des Brazilian-Tests weisen größere Differenzen auf. Eine entsprechende Korrelation der Ergebnisse konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden.

Durch die numerische Simulation mit dem expliziten Verfahren, in Verbindung mit dem Löschen der Elemente über eine Subroutine, ist die qualitative Modellierung der Rissentstehung und Rissausbreitung für jeden der drei vorgestellten Versuche gut möglich. Allerdings ist die benötigte Rechenleistung vergleichsweise groß und die berechneten Ergebnisse weichen teilweise deutlich von den experimentellen Resultaten ab. Aus diesem Grund ist für die quantitative Auswertung das implizite Berechnungsverfahren vorzuziehen. Andererseits sind die Einsatzmöglichkeiten dieser numerischen Modellierungsmethodik in anderen Bereichen, wie etwa dem Gesteinslöseprozess, vielfältig.

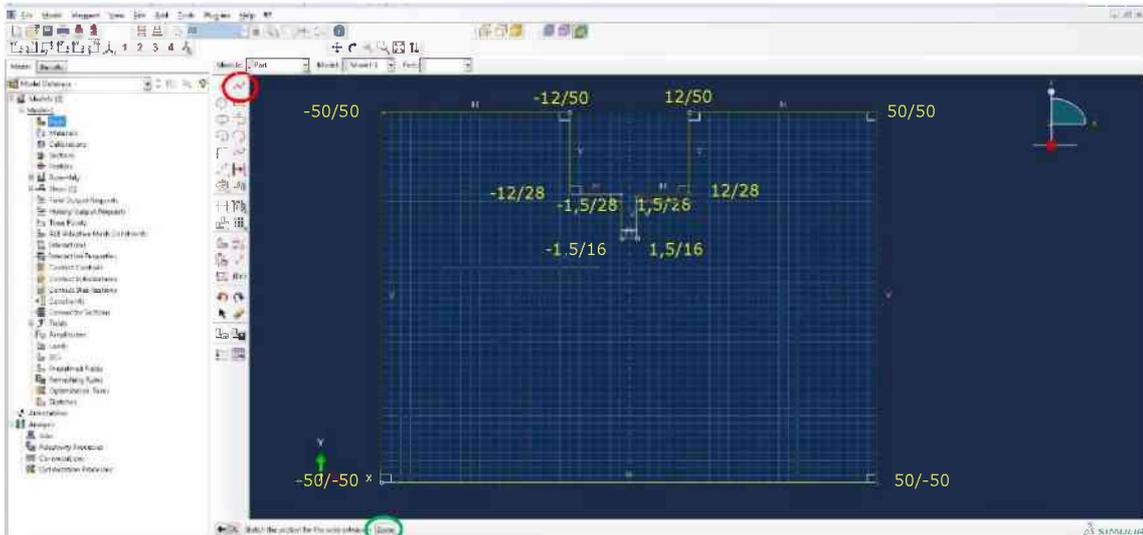
6 Tutorial

Im folgenden Kapitel ist der Aufbau des numerischen Modells, inklusive Kontakt- und Zwangsbedingungen, Randbedingungen etc. beschrieben. Wobei die ersten Schritte für das implizite und explizite Modell ident sind, in weiterer Folge aber der Aufbau unterschiedlich ist. (Da das Programm ABAQUS grundsätzlich einheitenlos ist werden nachfolgend keine Einheiten hinter die angegebenen Zahlen geschrieben.)

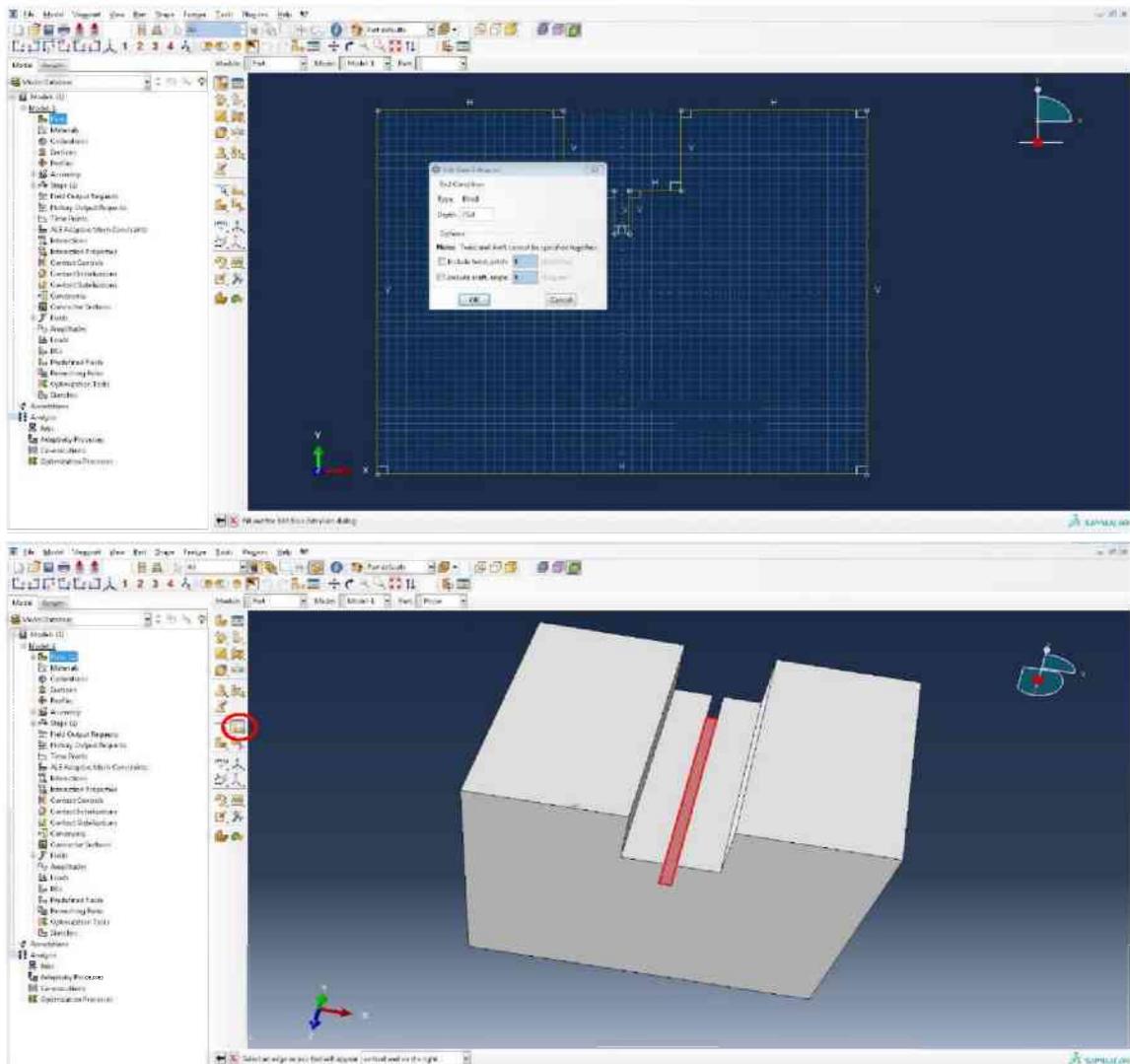
6.1 Aufbau allgemein



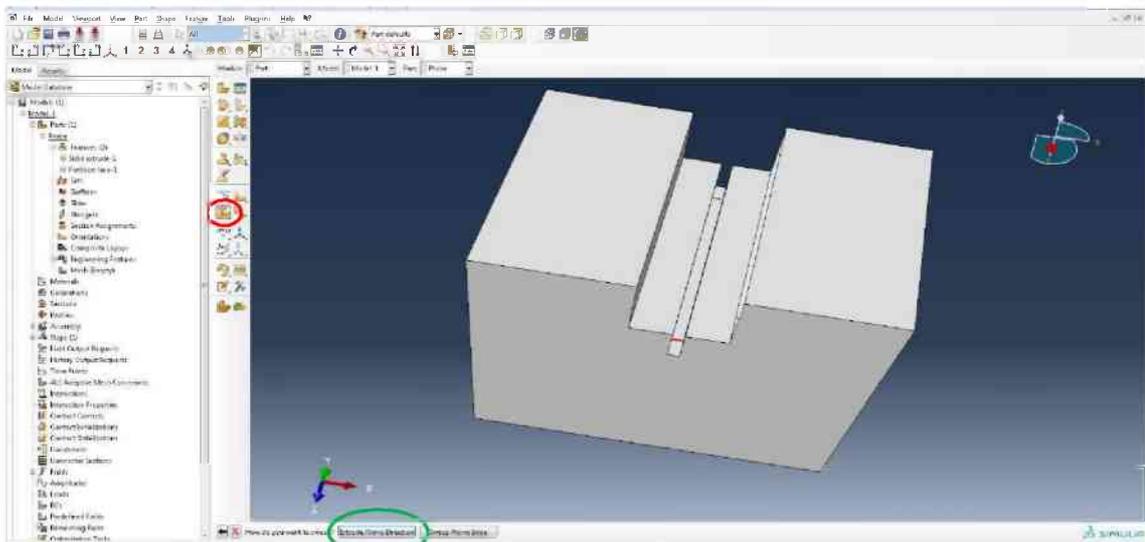
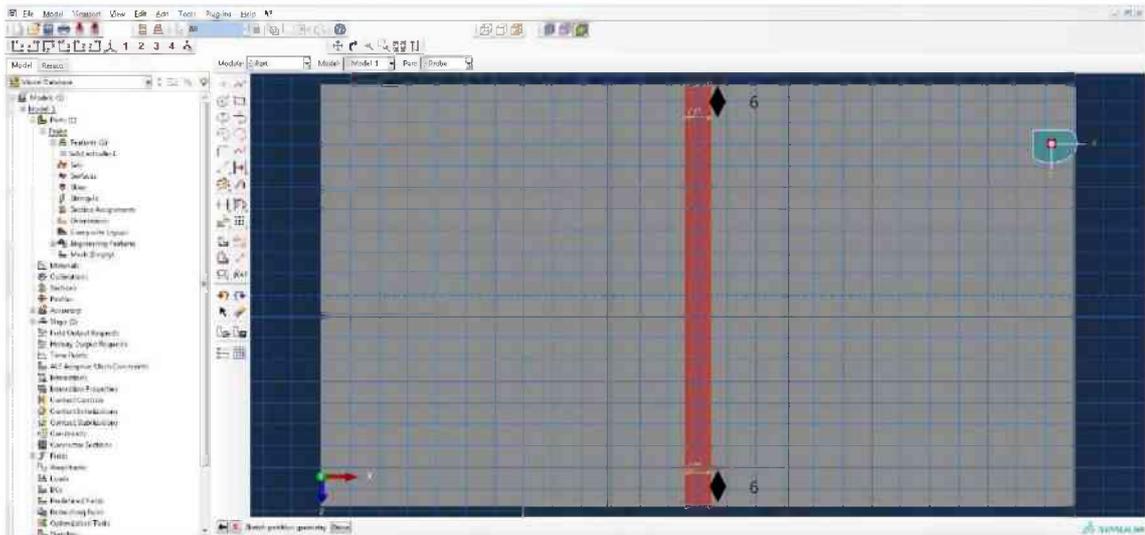
Als erster Schritt: Klicken auf den Create-Part-Knopf (rote Ellipse). Die Punkte 3D, Deformable, Solid und Extrusion auswählen. Für Approximate size immer 100 eingeben.



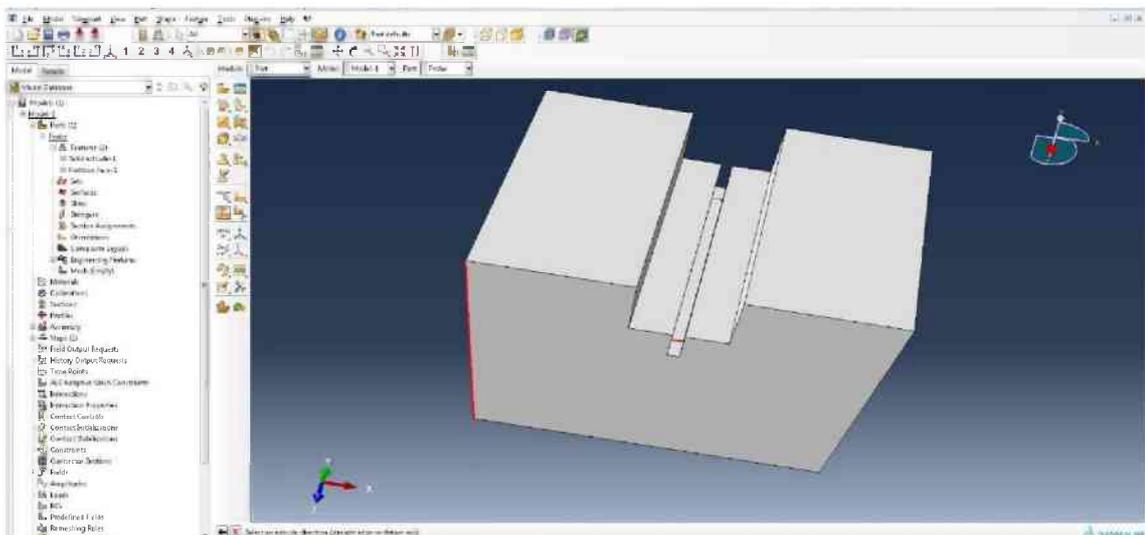
Im nächsten Schritt wird die Frontansicht der Gesteinsprobe über den Create-Lines-Connected-Knopf (rote Ellipse) nachgebildet. Die Linien werden am einfachsten über die Eingabe von Koordinaten erstellt. Geometrie entsprechend Anhang A. Wenn die komplette Geometrie übertragen und durch klicken auf Done (grüne Ellipse) bestätigt wurde, in Depth 75,0 eingeben und auf OK klicken. Die Probe wird extrudiert.

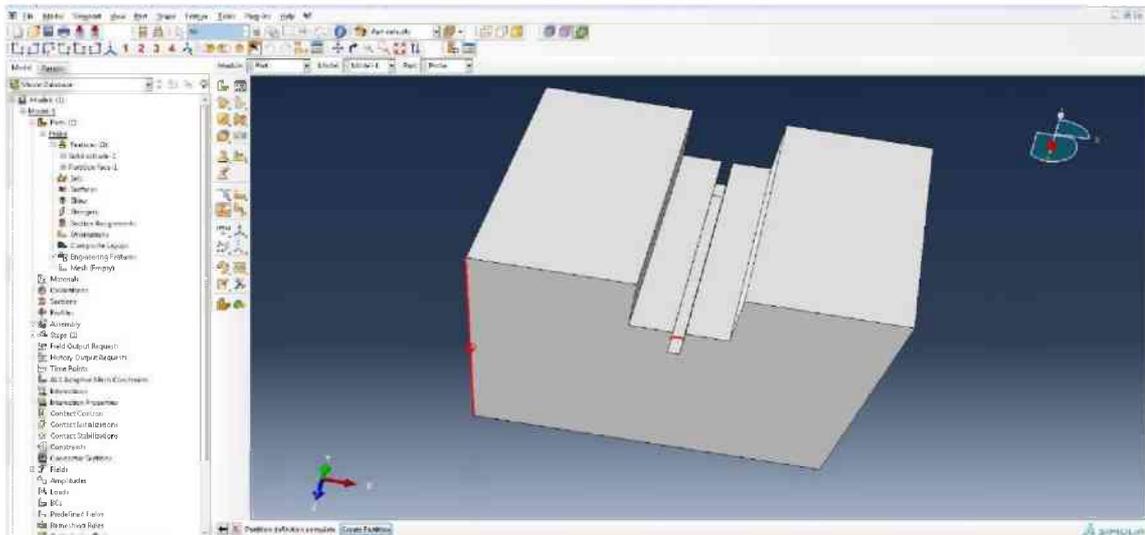


Zur Modellierung der Führungskerben wird die rot markierte Fläche mit dem Partition-Face-Tool (rote Ellipse) ausgewählt. Danach klicken auf die rechte Kante des im Bild rot-markierten Rechtecks. Mit dem Create-Lines-Connected-Tool wird wiederum die Fläche entsprechend den Angaben in Anhang A unterteilt. Eine auf die Seitenkante rechteckige Linie ist je 6,0 vom linken und rechten Rand zu erstellen und mit Done zu bestätigen.

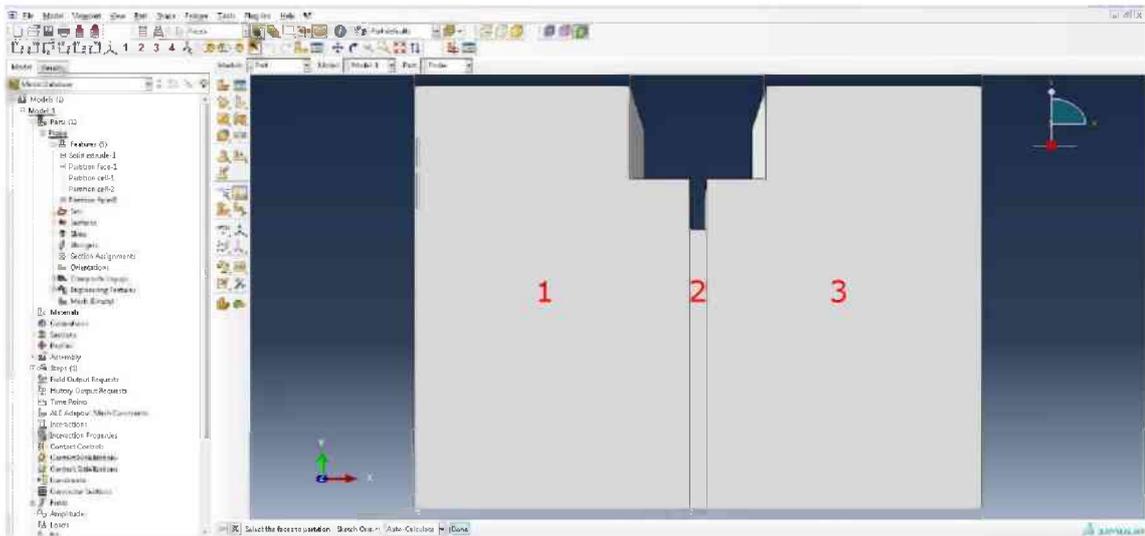


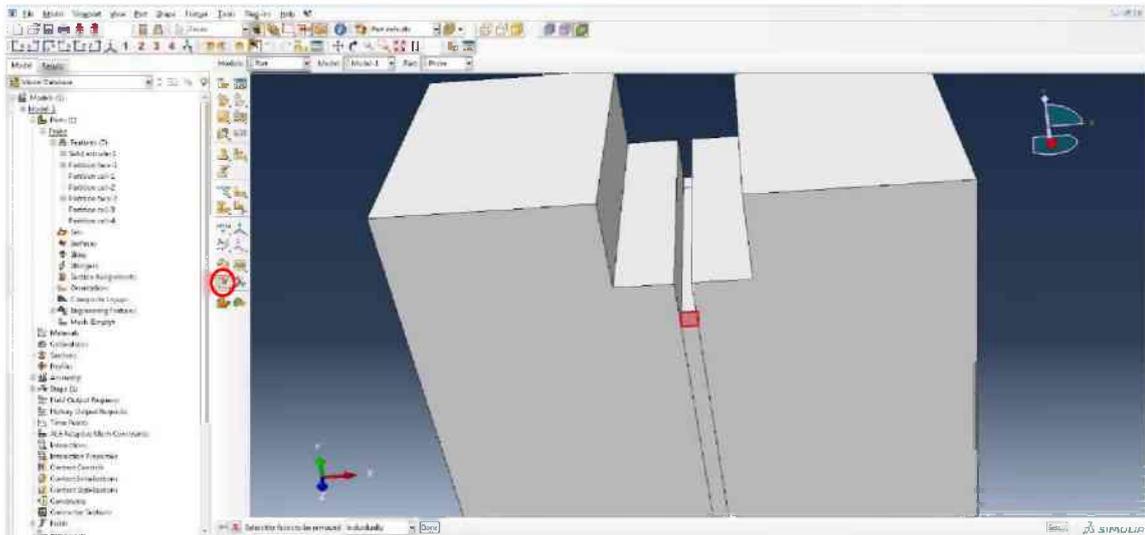
Die Probe jetzt entlang der skizzierten Linien partitionieren. Dazu mit der linken Maustaste wenige Sekunden lang auf den Partition-Cell-Knopf drücken und dann aus der Auswahlliste das in der roten Ellipse dargestellte Symbol auswählen (Extrude/Sweep-Edges). Im Anschluss klicken auf „Extrude Along Direction“ (grüne Ellipse) und Auswählen der rot gefärbten Kante (untere Abbildung).



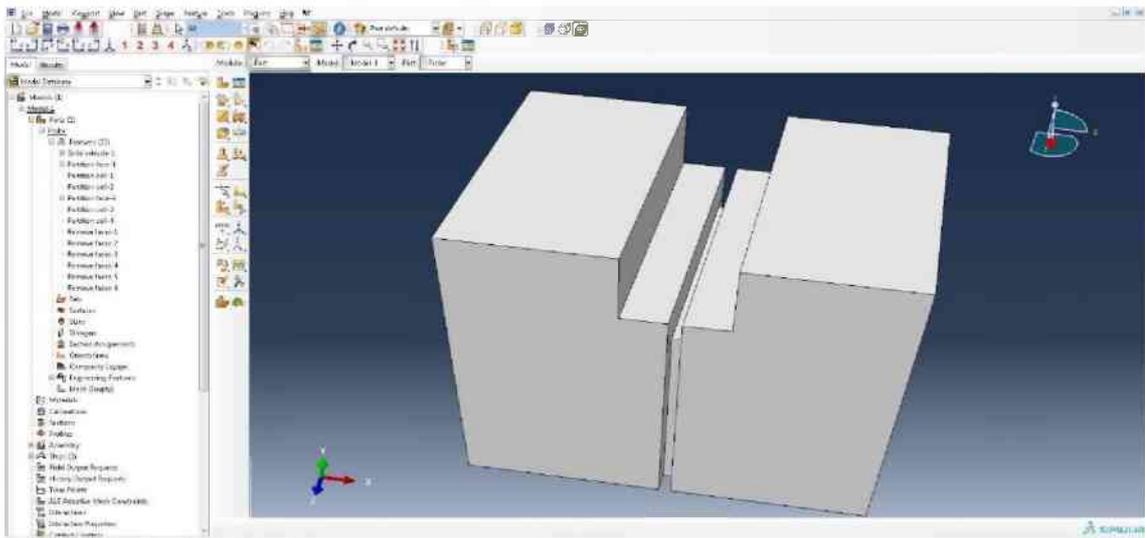


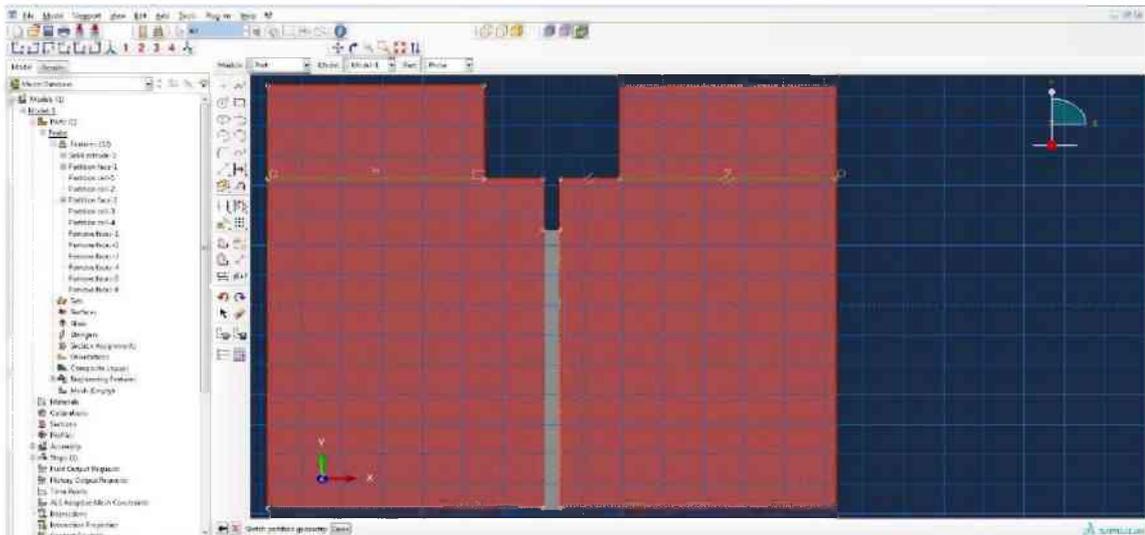
Klicken auf Partition-Cell: Extrude/Sweep-Edges. Der Vorgang wird für die drei anderen Kanten dieses Rechtecks wiederholt. Dadurch entstehen drei „Teil-Parts“ (1, 2, 3). Auf der anderen Seite ebenfalls ausführen.



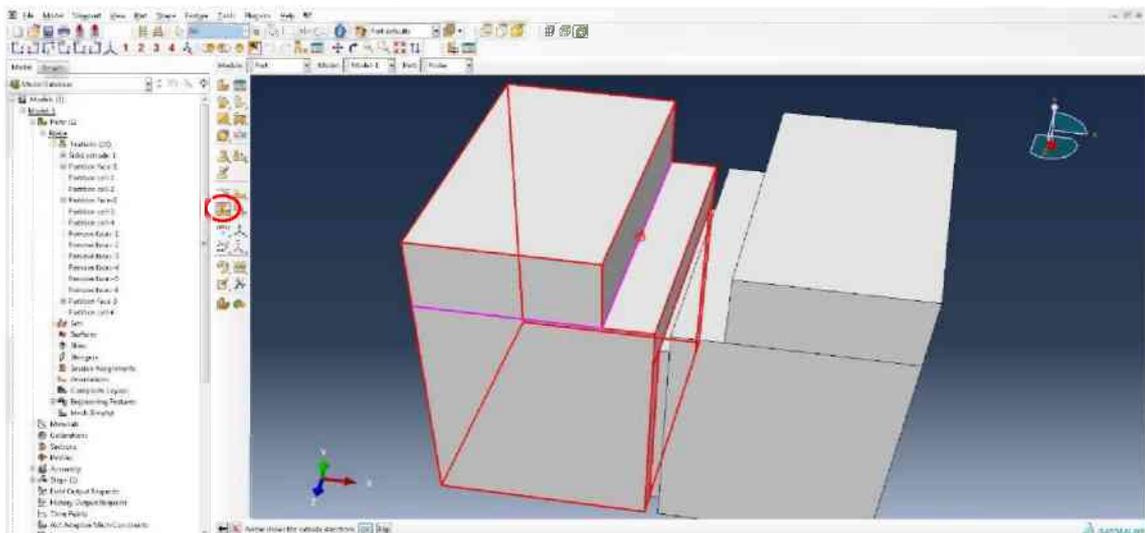


Um die Führungskerben herzustellen werden die drei störenden Flächen, durch Drücken des Remove-Faces-Knopfes (rote Ellipse) auf beiden Seiten der Probe gelöscht und so die Probegeometrie realitätstreu nachgebildet.

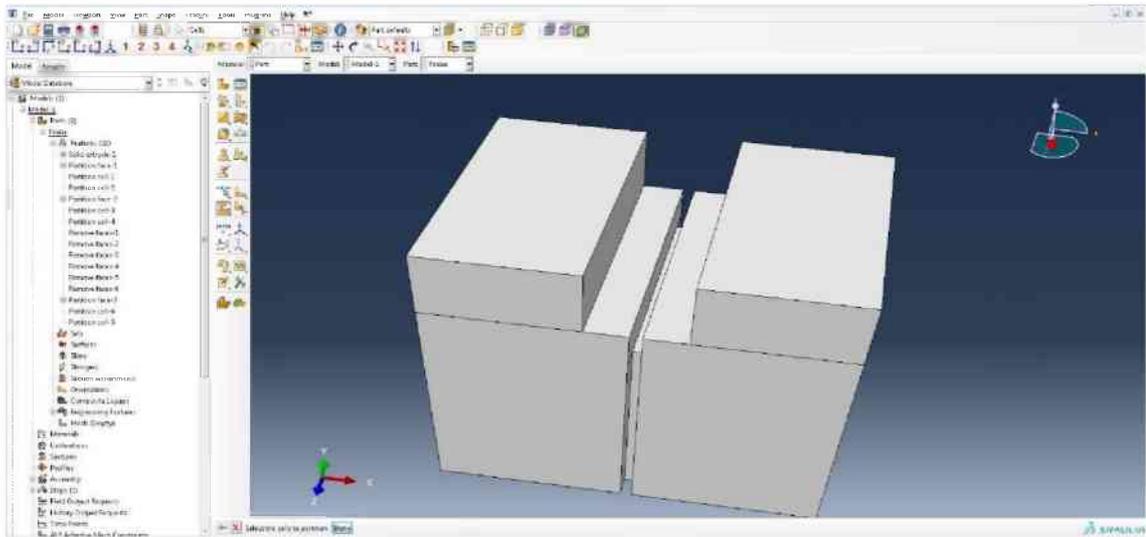




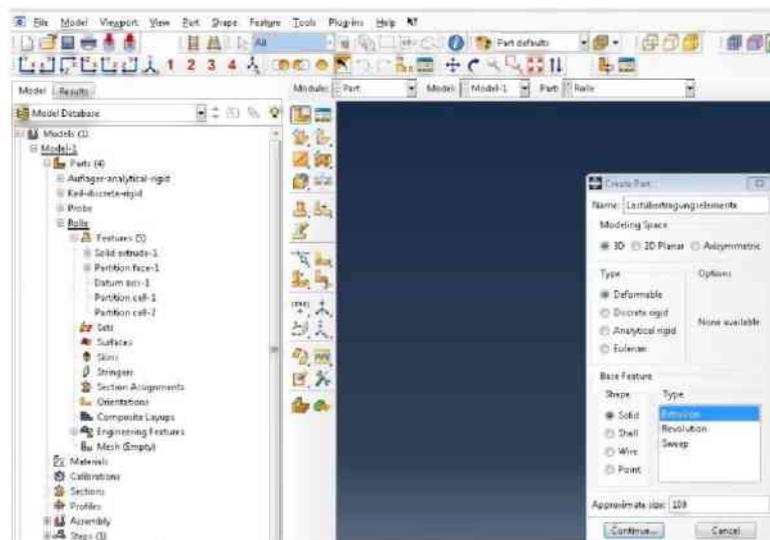
Anschließend auswählen der Flächen 1 und 3 mit dem Partition-Face-Tool und mit Done bestätigen. Aufgrund von Vorteilen beim Vernetzen wird die Probe weiter partitioniert. Dazu werden zuerst auf der Vorderseite der Probe, auf Höhe der Unterkante der großen Kerbe, zwei zu den Seitenkanten rechtwinkelige Linien gezeichnet. Mit Done bestätigen.



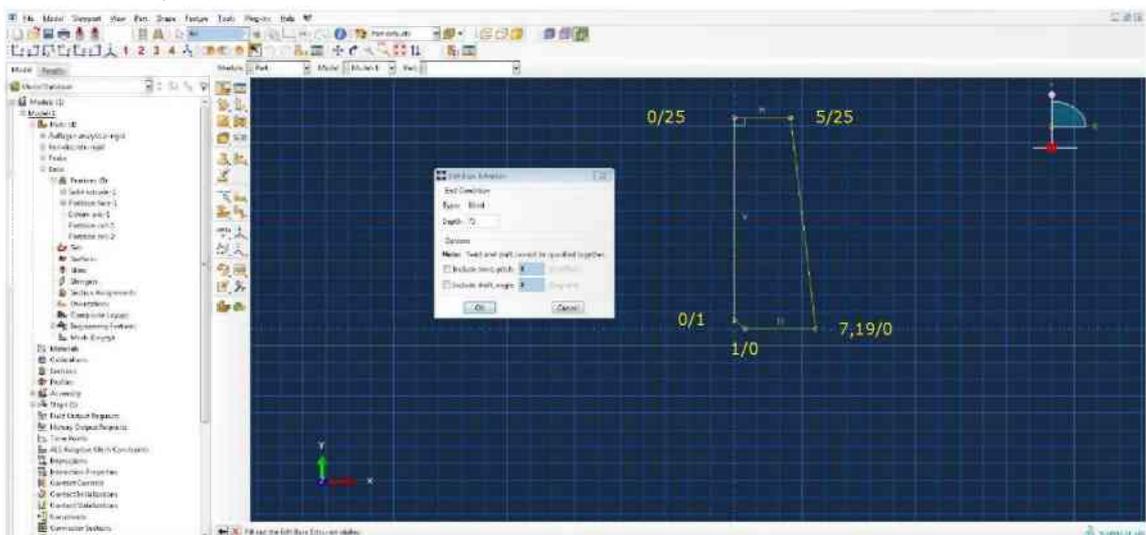
Erneut erfolgt der Partitionierungsvorgang: Auswählen Partition-Cell: Extrude/Sweep-Edges (rote Ellipse)-> Auswählen der „Startkante (pink)“ -> klicken „Extrude Along Direction“ -> Auswählen der Kante mit dem Pfeil -> Bestätigen mit OK. Diesen Vorgang für die Teile 1 und 3 ausführen.



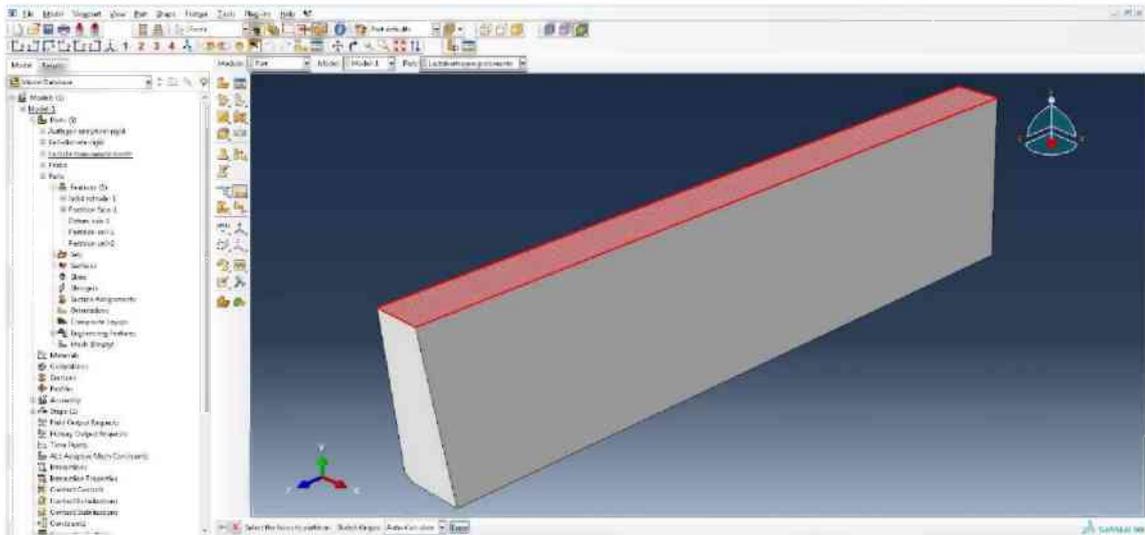
Fertiger Probekörper, mit Done wird die Partitionierung beendet.



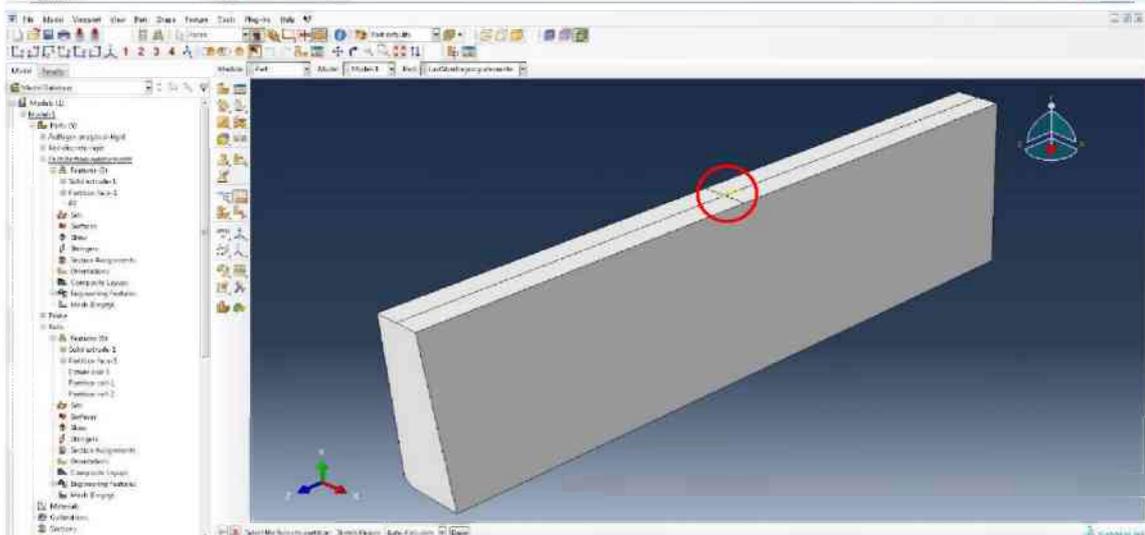
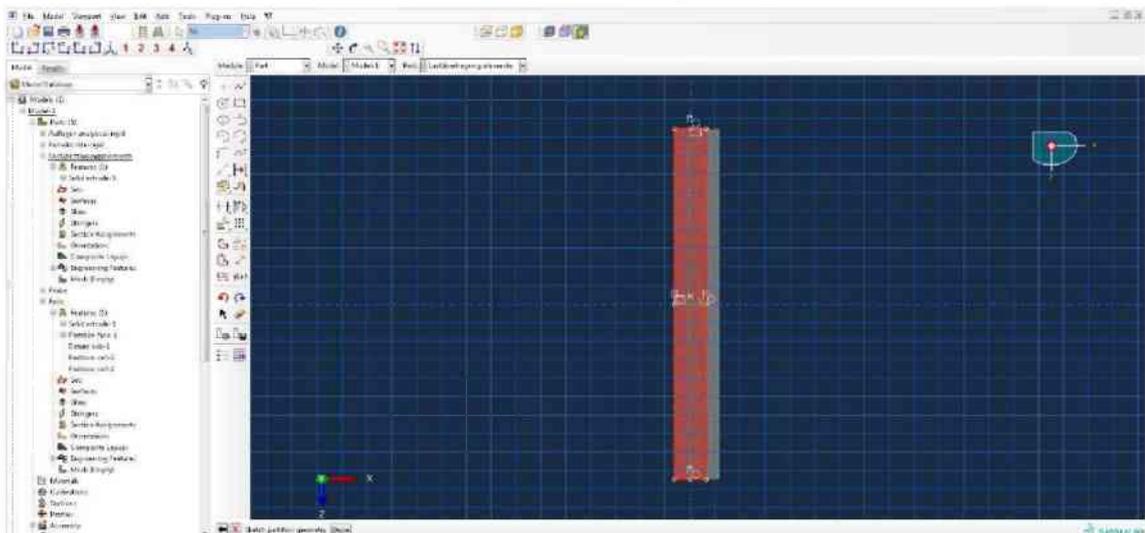
Erstellen der Lastübertragungselemente. Klicken auf den Create-Part-Knopf und 3D, Deformable, Solid und Extrusion auswählen.



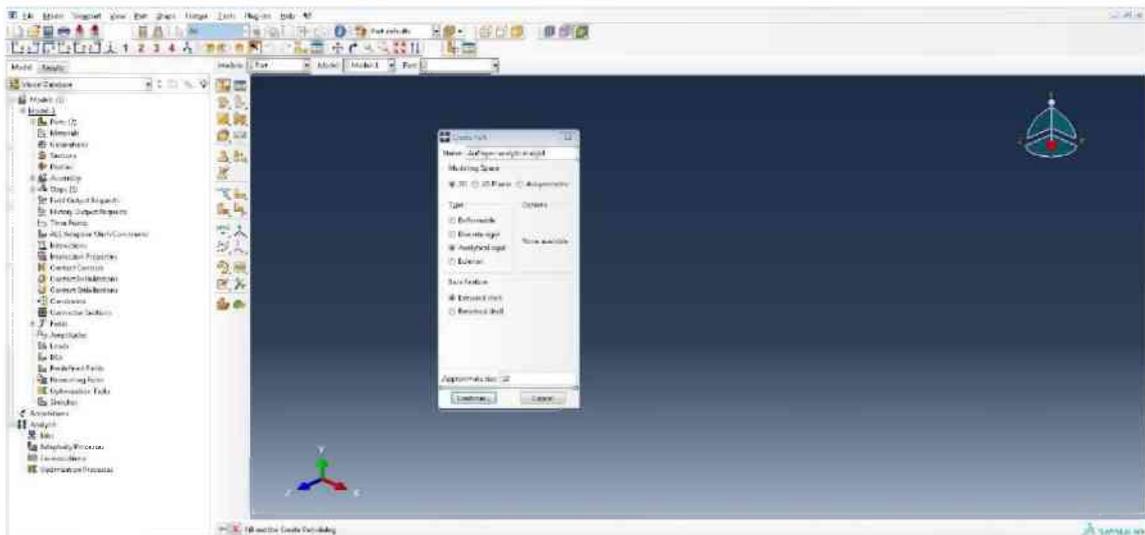
Erstellen der Geometrie entsprechend Anhang A und extrudieren auf 75,0.



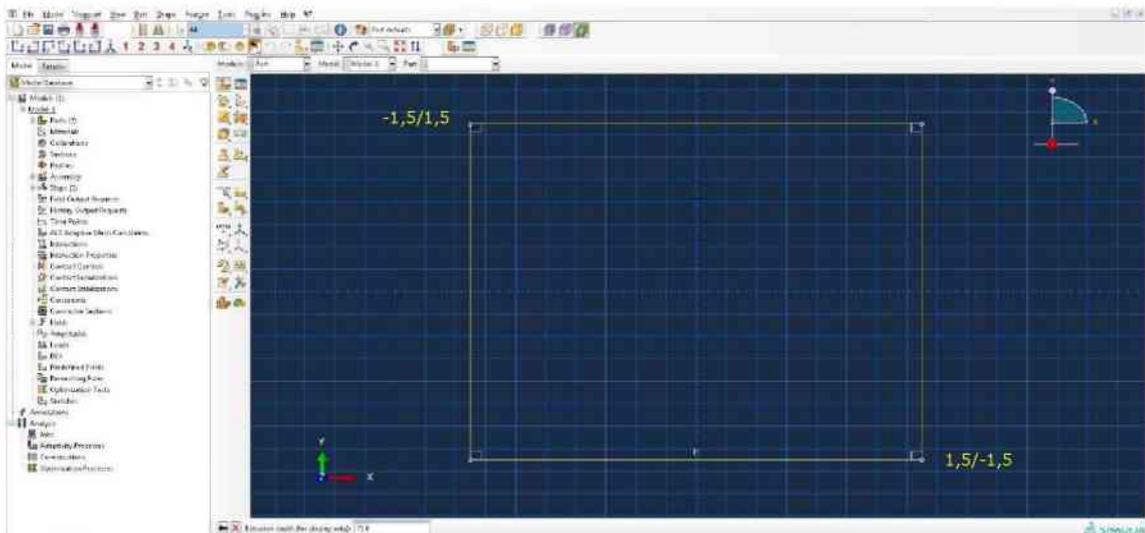
Mit dem Partition-Face-Tool die obere Fläche des Lastübertragungselements auswählen und jeweils in Längs- und Querrichtung mittig eine Linie erstellen.



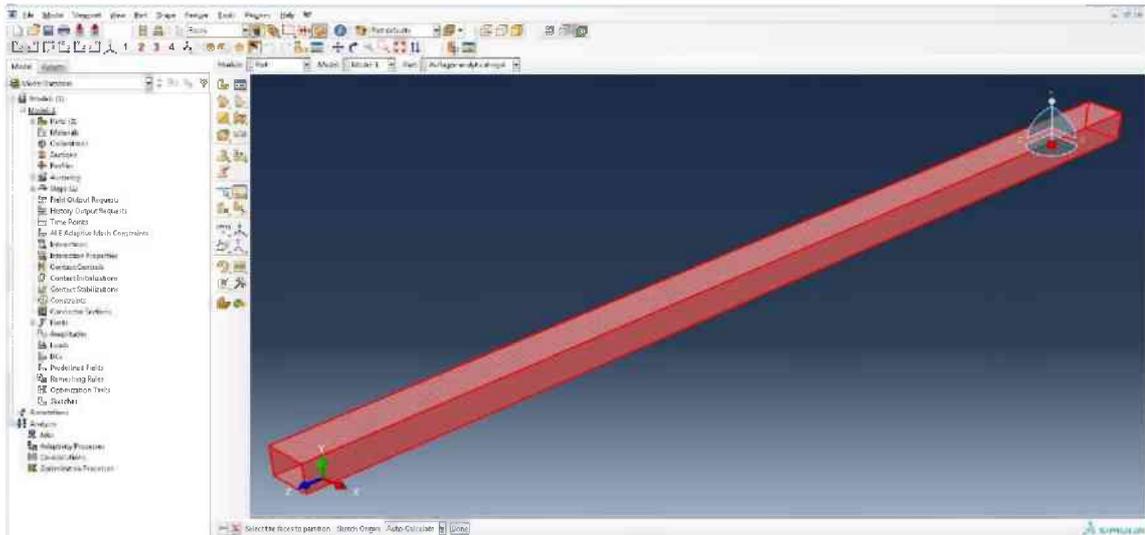
Dem Mittelpunkt der Fläche über: Tools -> Reference Point -> mit der Maus den Mittelpunkt (rote Ellipse) auswählen einen Referenzpunkt zuweisen.



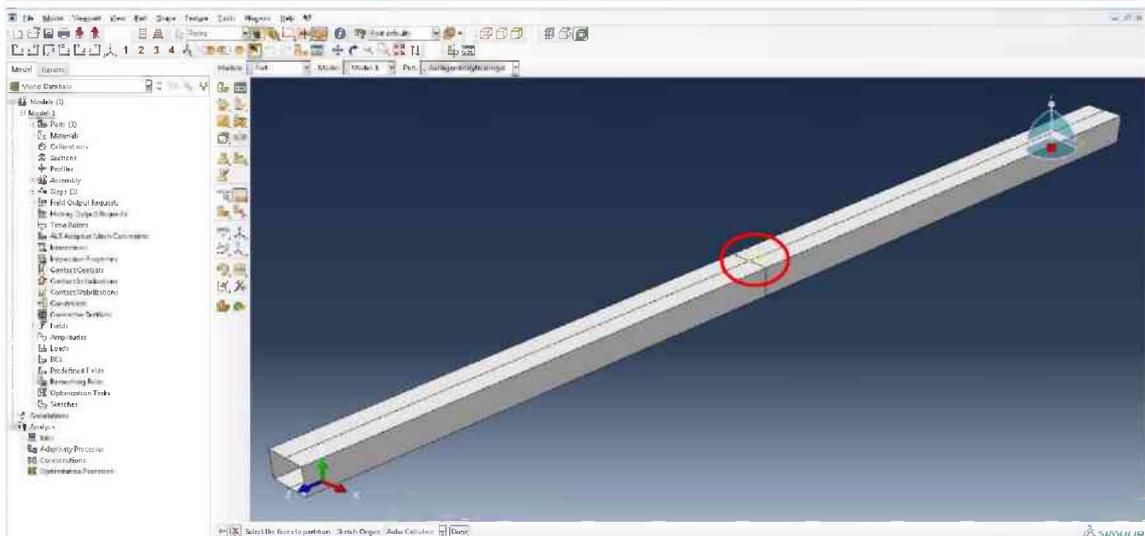
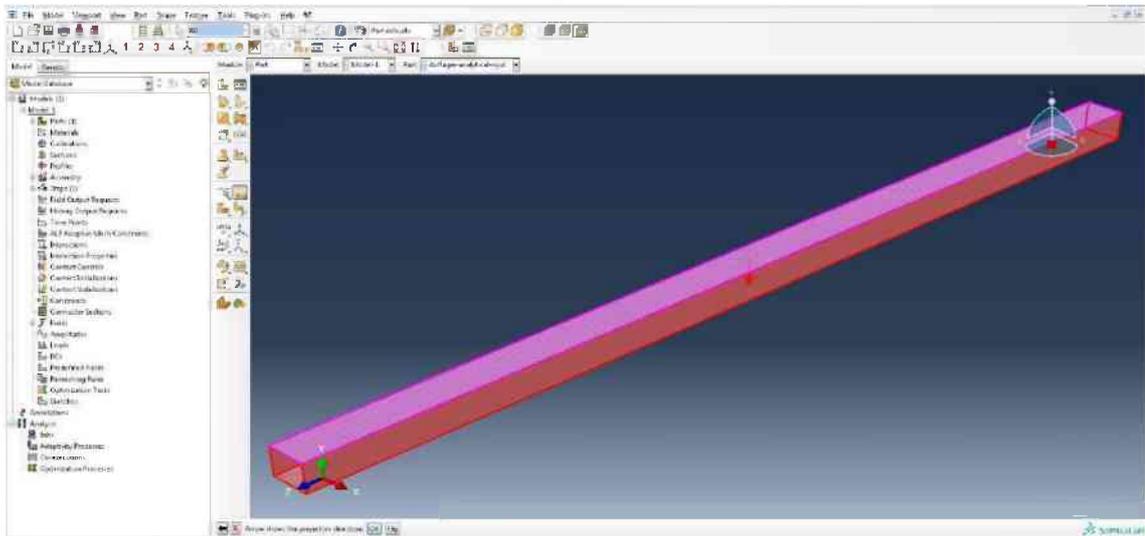
Erstellen des quaderförmigen Auflagers mit 3D, Analytical rigid und Extruded shell.



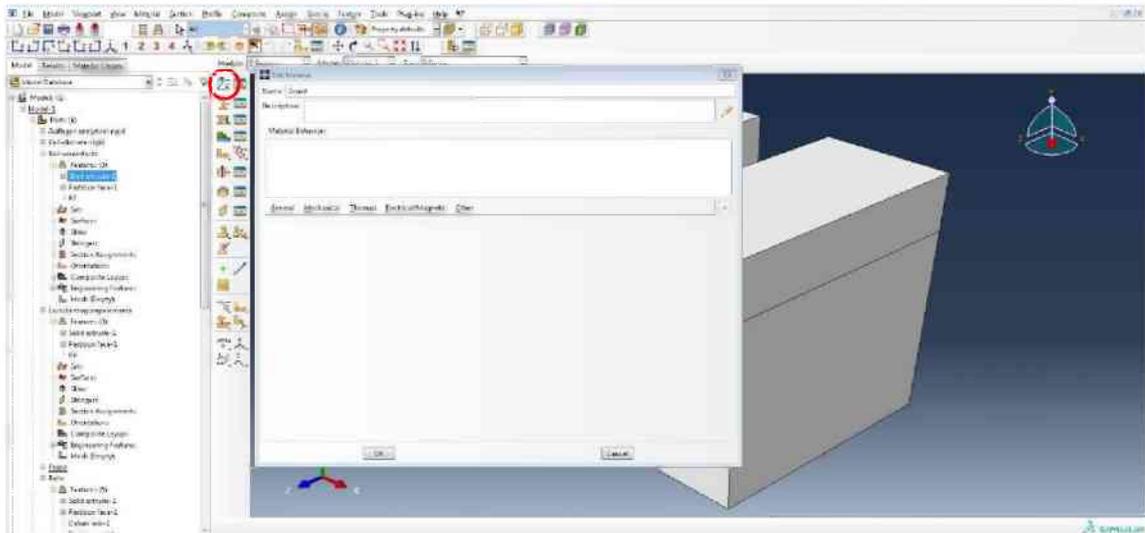
Zeichnen eines Quadrats durch Klicken auf Create-Lines-Rectangle (rote Ellipse) und extrudieren auf 75,0. Abmessungen des Quadrats 3,0x3,0.



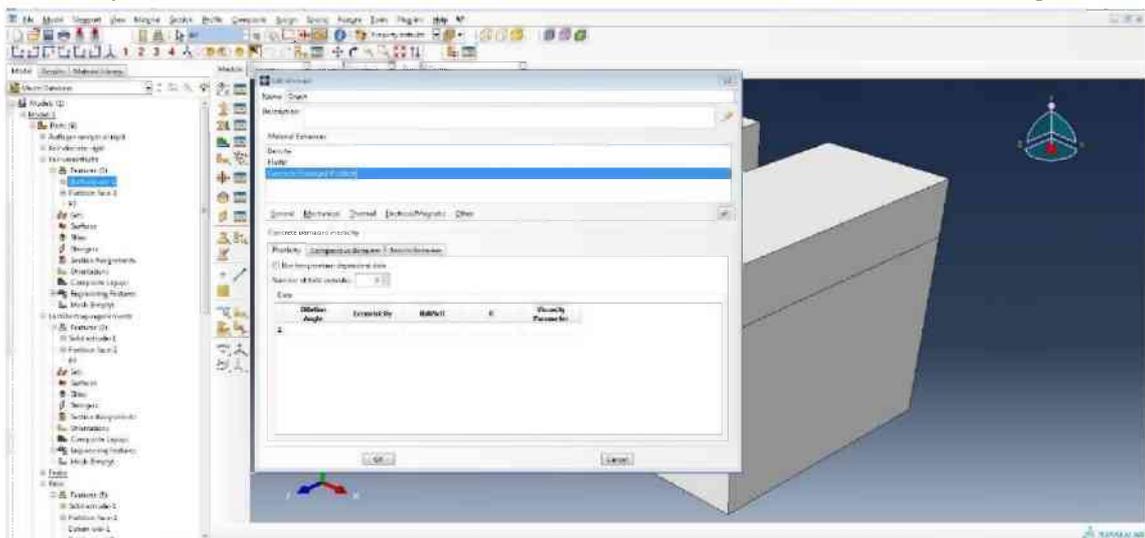
Auswählen des Auflagers nach dem Drücken des Partition-Face-Knopfs, auswählen der oberen Fläche, wobei der Pfeil nach unten gerichtet sein muss, anschließend jeweils in Längs- und Querrichtung mittig eine Linie erstellen.

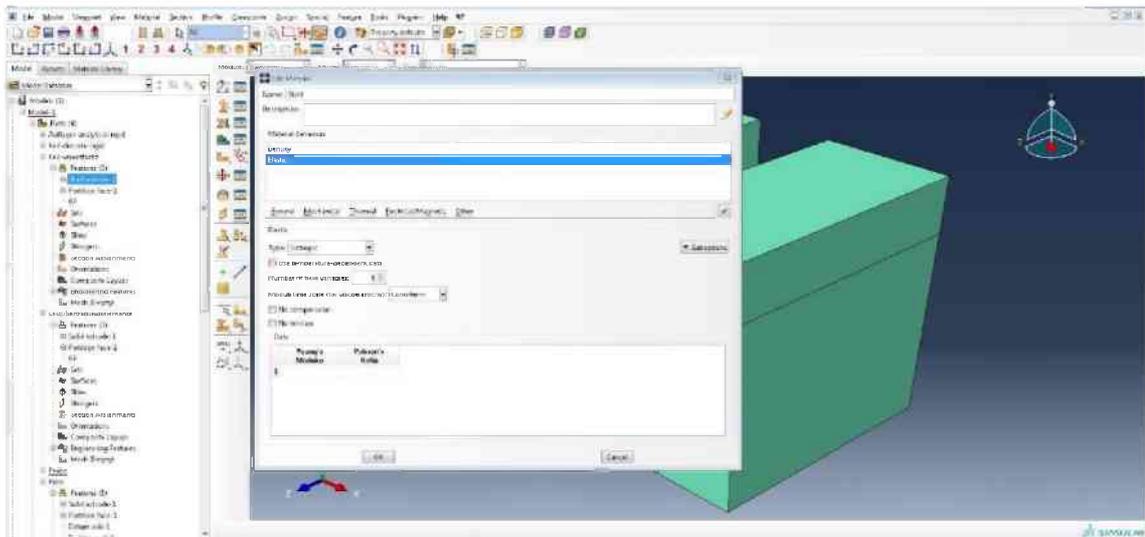


Dem Mittelpunkt der Fläche wie bereits bei den Lastübertragungselementen gezeigt, einen Referenzpunkt (rote Ellipse) zuweisen.

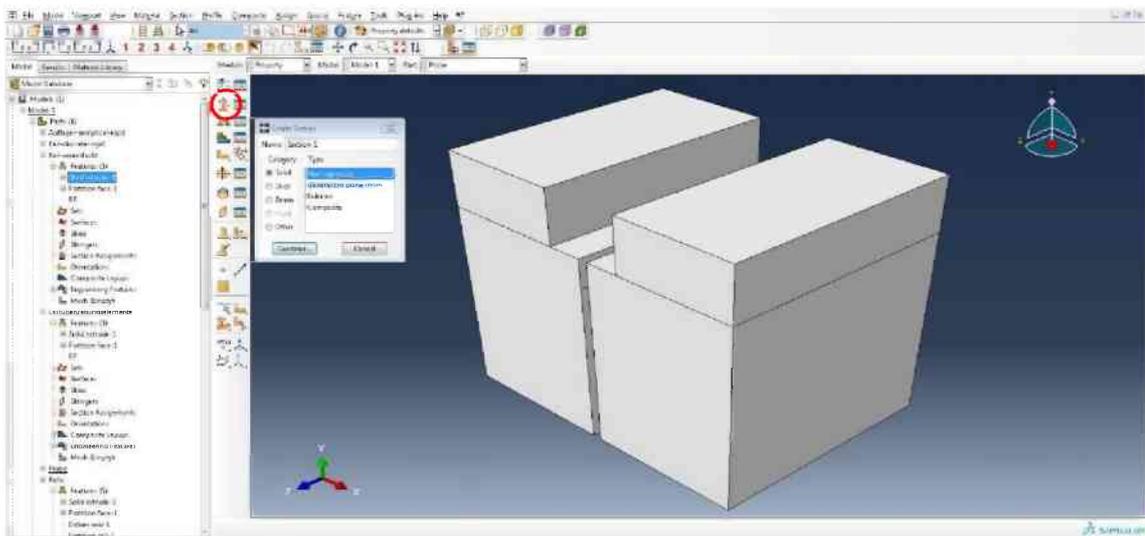


In das Modul Property wechseln. Mit dem Create-Material-Knopf (rote Ellipse) einen Materialtyp erstellen und je nach Probematerial (hier Granit) benennen. Anschließend aus den Auswahllisten die Eigenschaften Density, Elastic und Concrete Damaged Plasticity auswählen und die Parameter aus den Tabellen 3-6 und 3-7 eintragen.

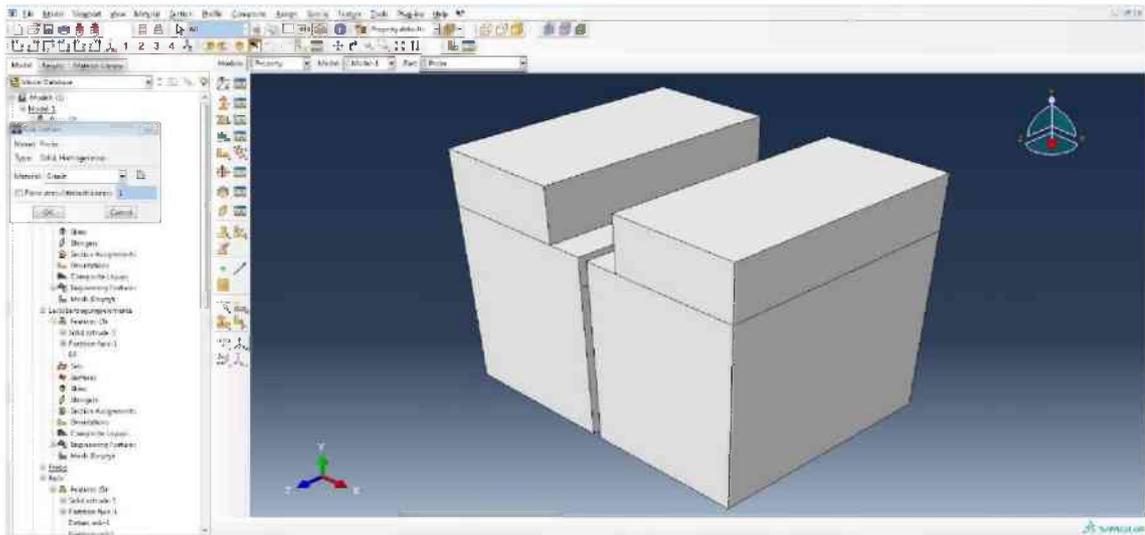




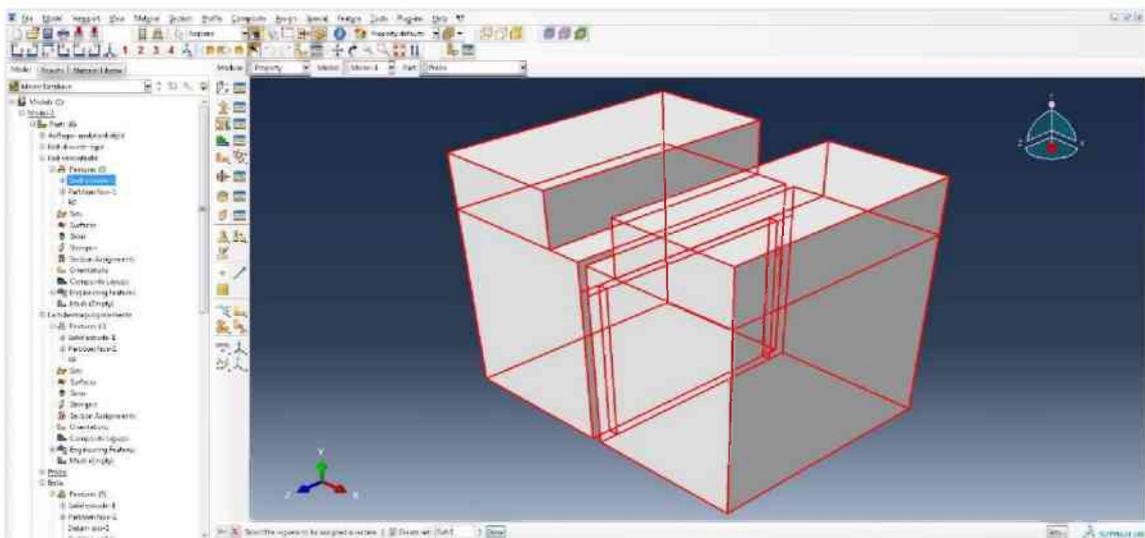
Die Lastübertragungselemente werden elastisch mit den Parametern von Stahl modelliert. Daher wie für Granit einen Materialtyp erstellen, allerdings nur die Eigenschaften Density und Elastic auswählen und die Parameter von Stahl einsetzen.



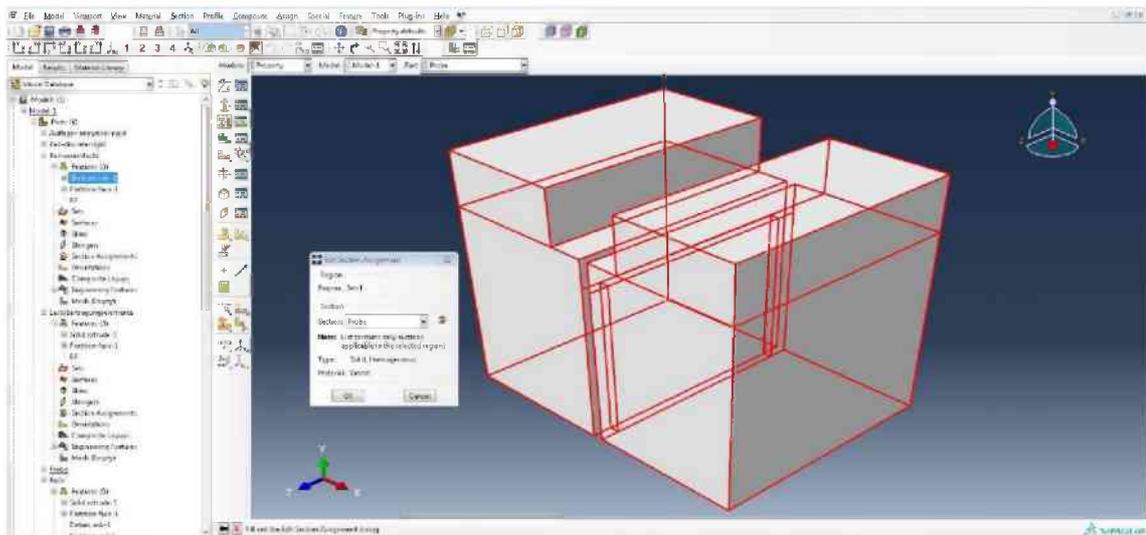
Um der Probe das gewünschte Material zuweisen zu können, wird eine Section erstellt. Klicken auf „Create-Section“ (rote Ellipse), Homogeneous und Solid auswählen. Der Name ist Probe.



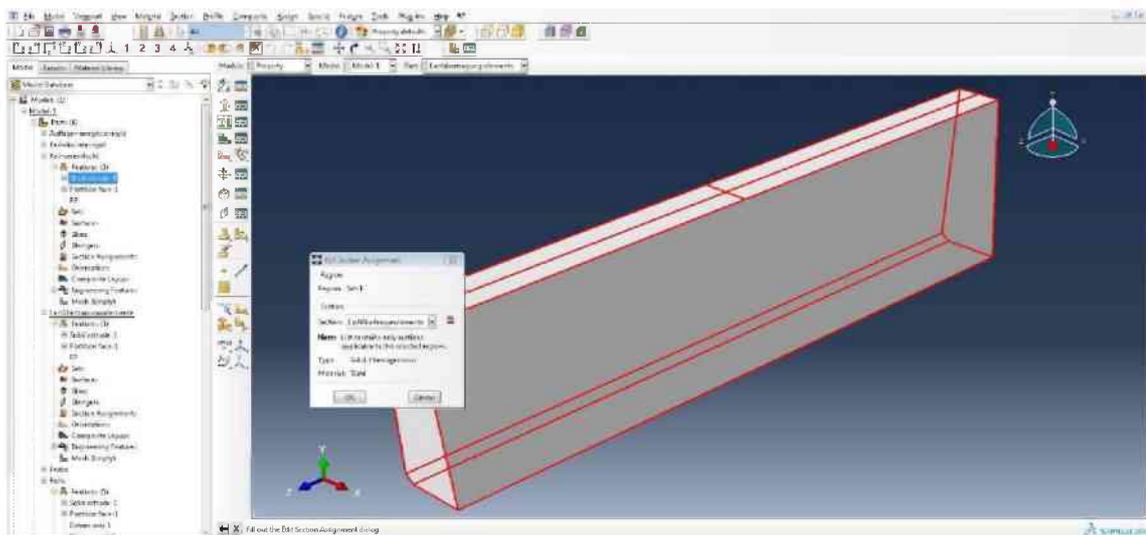
Nun muss der Section das gewünschte Material zugewiesen werden. Einfach aus der Auswahlliste Granit auswählen. Der Vorgang wird für die Lastübertragungselemente wiederholt, allerdings benennen mit Lastübertragungselemente und als Materialtyp Stahl auswählen.



Im nächsten Schritt wird die Section einem Set zugewiesen. Dazu zuerst den Assign-Section-Knopf drücken und dann die gesamte Probe markieren. Mit Done bestätigen.

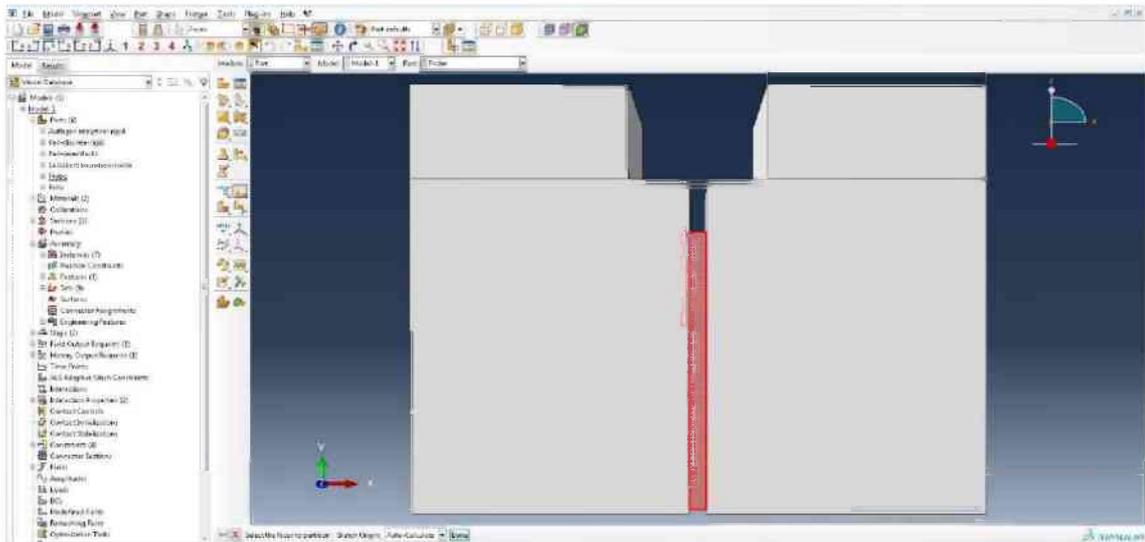


Die Section „Probe“ auswählen und mit OK bestätigen. Denselben Vorgang für die Lastübertragungselemente ausführen, aber die Section „Lastübertragungselemente“ auswählen.

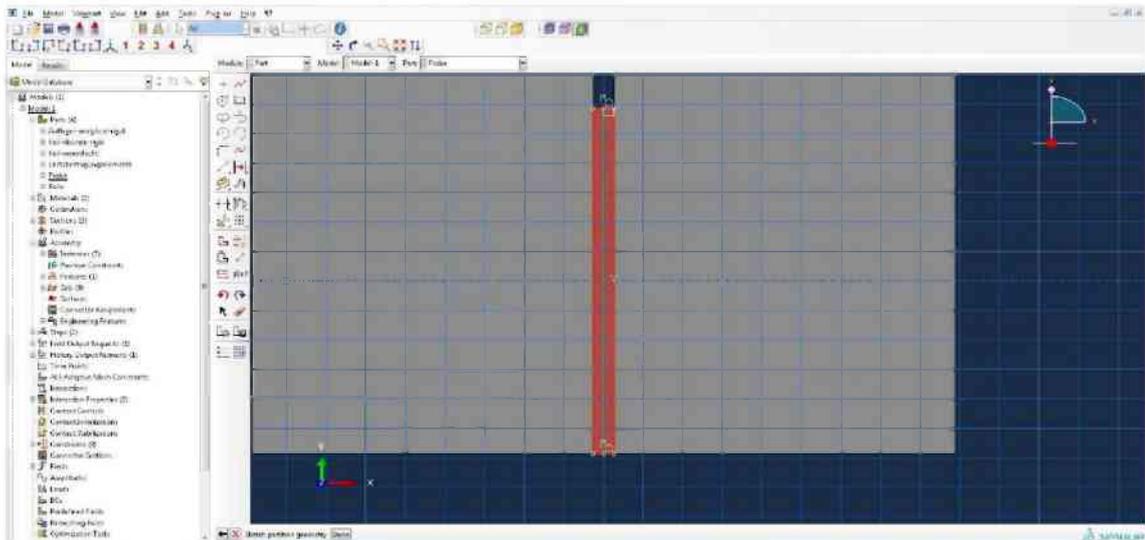


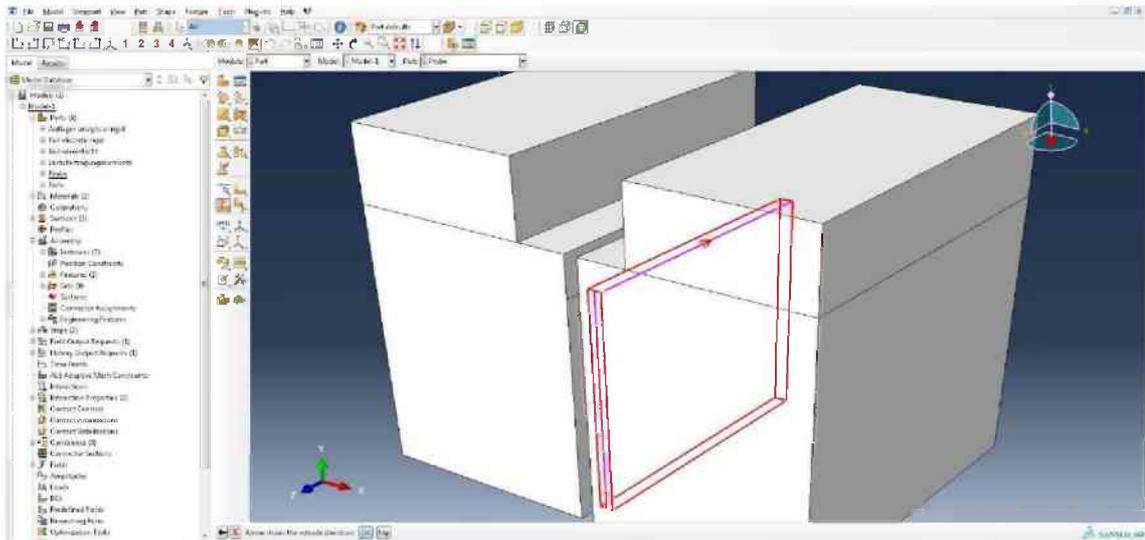
6.2 Explizites Modell

Da für das Modell der expliziten Berechnung andere Schritte nötig sind als für das Modell mit dem impliziten Berechnungsverfahren, werden diese gesondert angeführt. Das Resultat der expliziten Modellierung ist die geometrisch exakte Nachbildung des realen Versuchs. Die Abmessungen werden Anhang A entnommen.

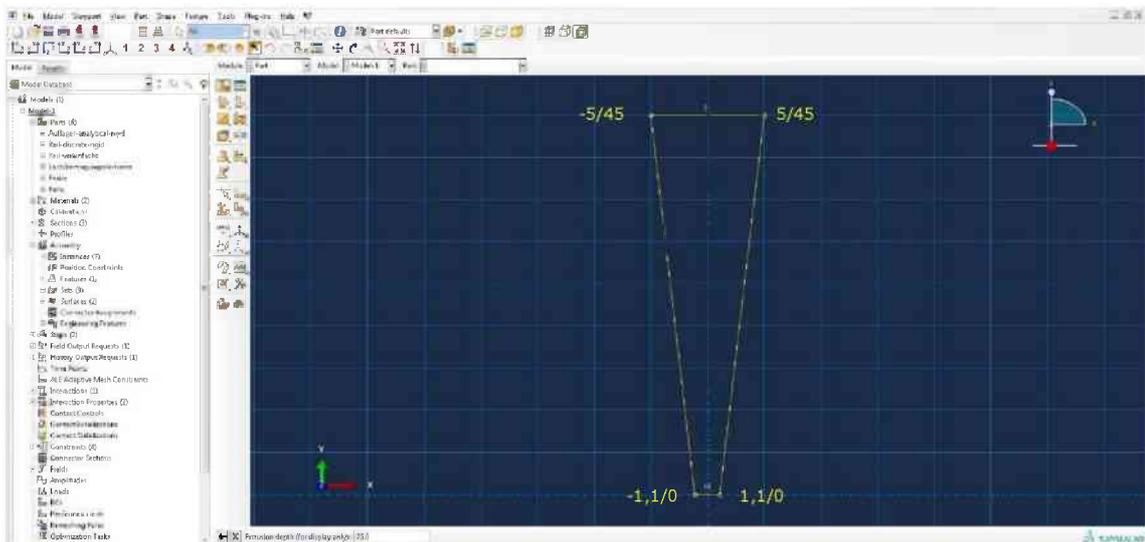


Aus Gründen der besseren Vernetzbarkeit für die explizite Berechnung muss die Probe erneut partitioniert werden. Dazu Fläche 2 mit dem Partition-Face-Knopf auswählen und anschließend genau in der Mitte eine Linie erstellen.

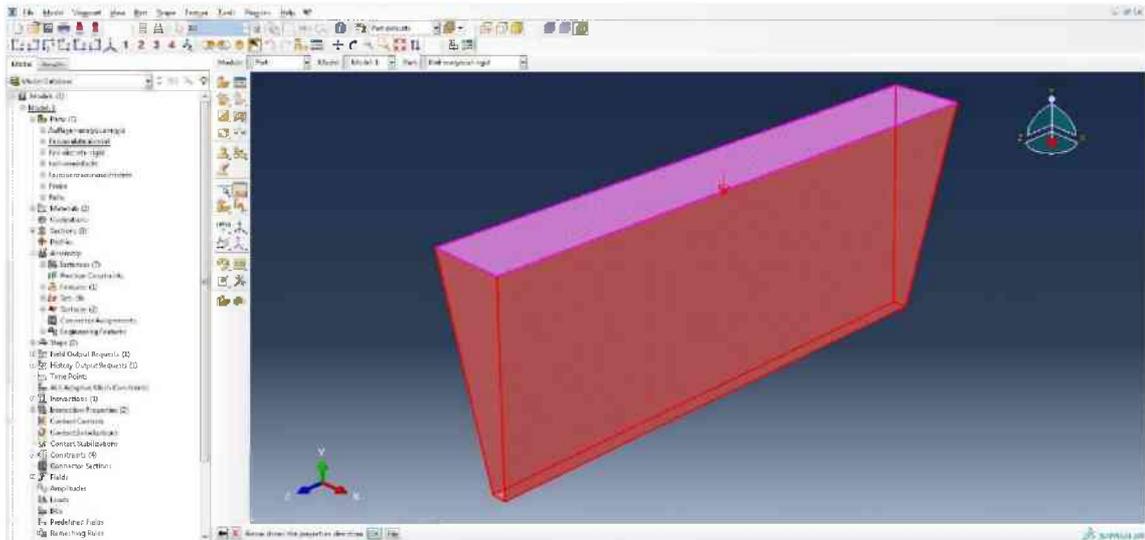




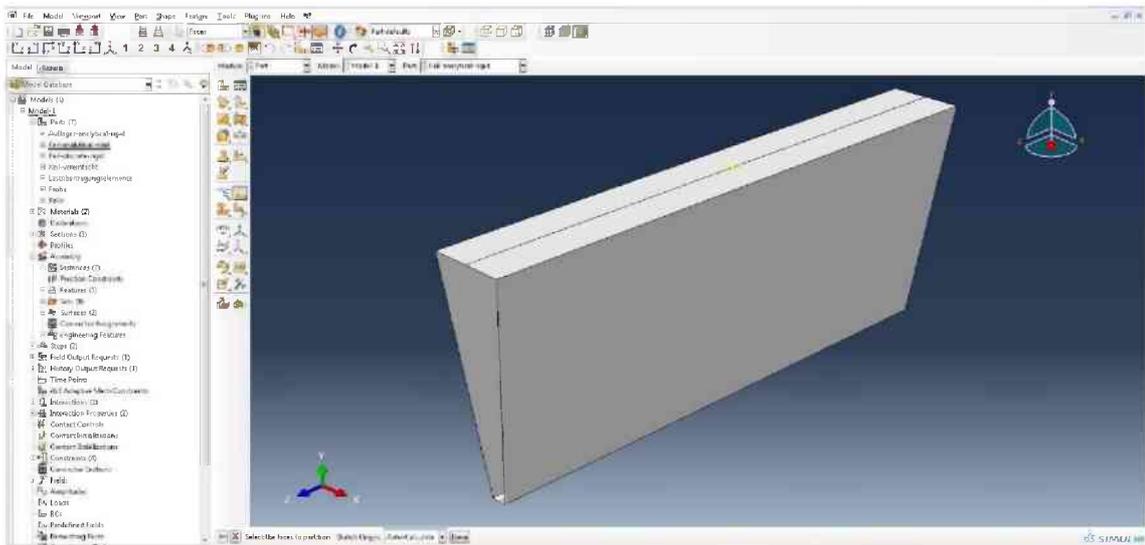
Den Teil 2 entlang der Mittellinie mit dem bereits bekannten Partitionierungsvorgang bearbeiten und so in zwei Halfen teilen.

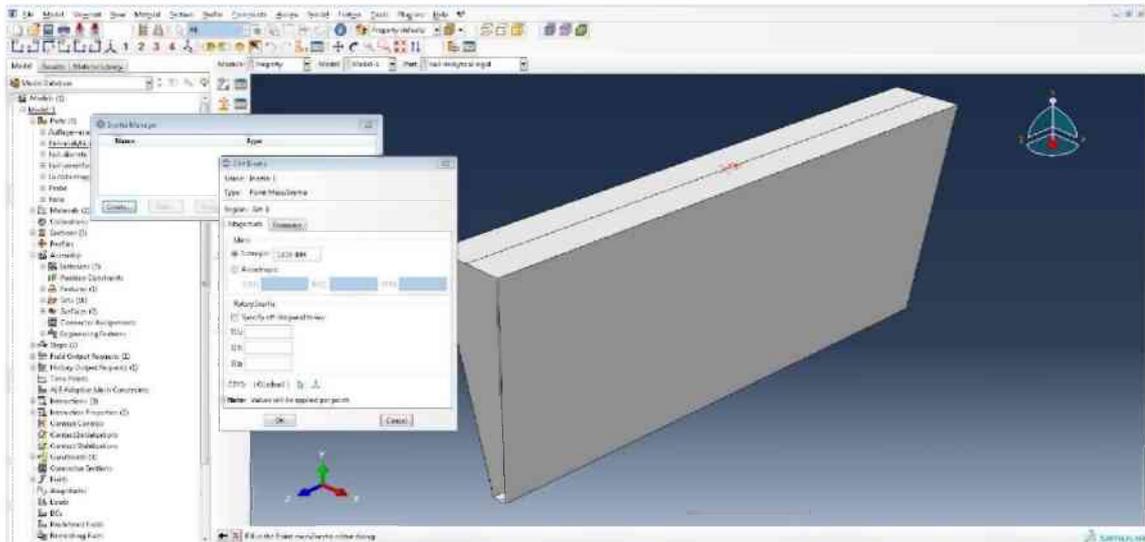


Erstellen eines neuen Parts mit folgenden Eigenschaften: 3D, Analytical rigid, Extruded shell und Benennung mit Keil-analytical-rigid. Danach wieder mit dem Create-Lines-Connected-Tool die Geometrie erstellen und auf 75,0 extrudieren.

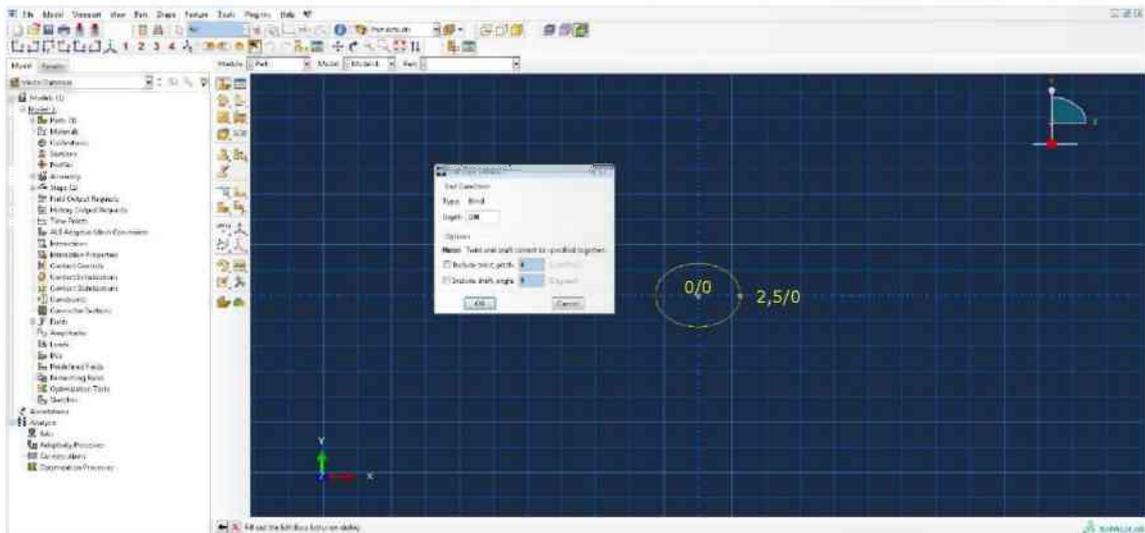


Mit Partition-Face die obere Fläche auswählen und die rechte Kante mit der Maus anklicken. Der Pfeil muss nach unten zeigen. Im Anschluss längsseitig in der Mitte eine Linie erstellen und dem Mittelpunkt wieder einen Referenzpunkt zuweisen.

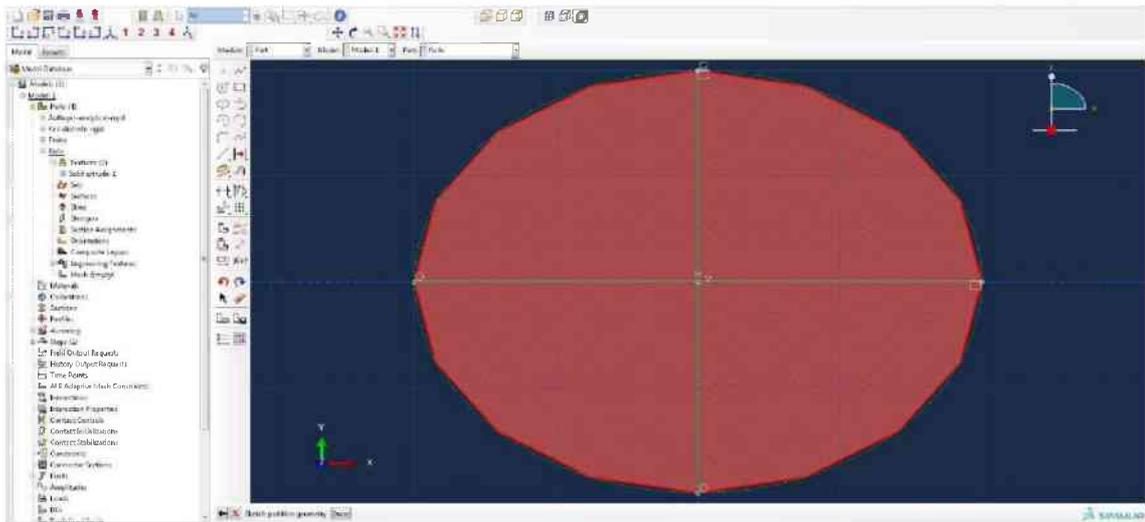




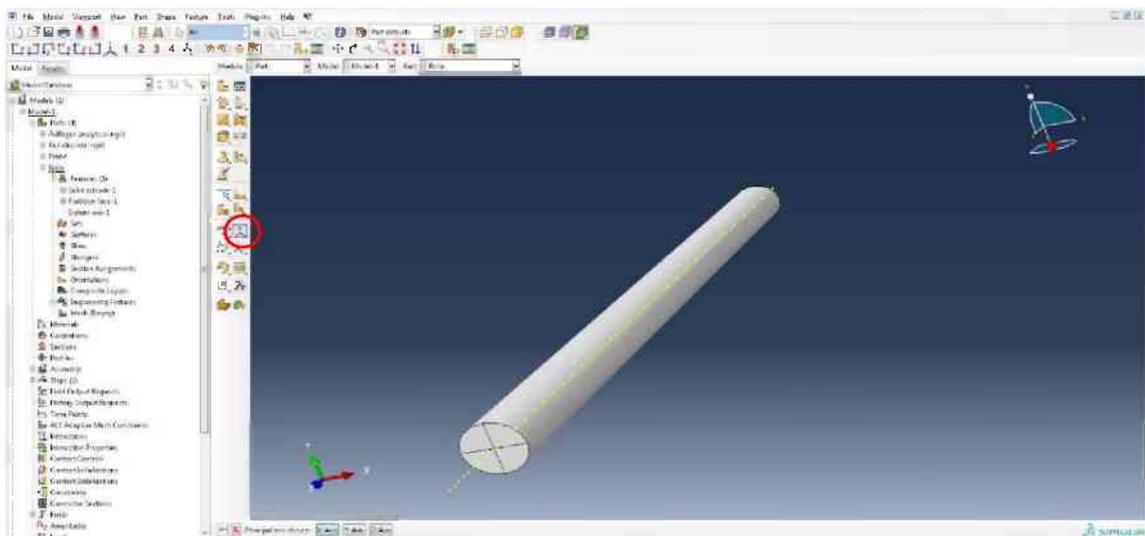
Wechseln zu Property, auf Special -> Inertia -> Create -> Point Mass/Inertia klicken und dann direkt den Referenzpunkt auswählen. Dieser wird rot. Eingabe der realen Masse des Keils in das Feld Isotropic in Tonnen. Bestätigen mit OK.



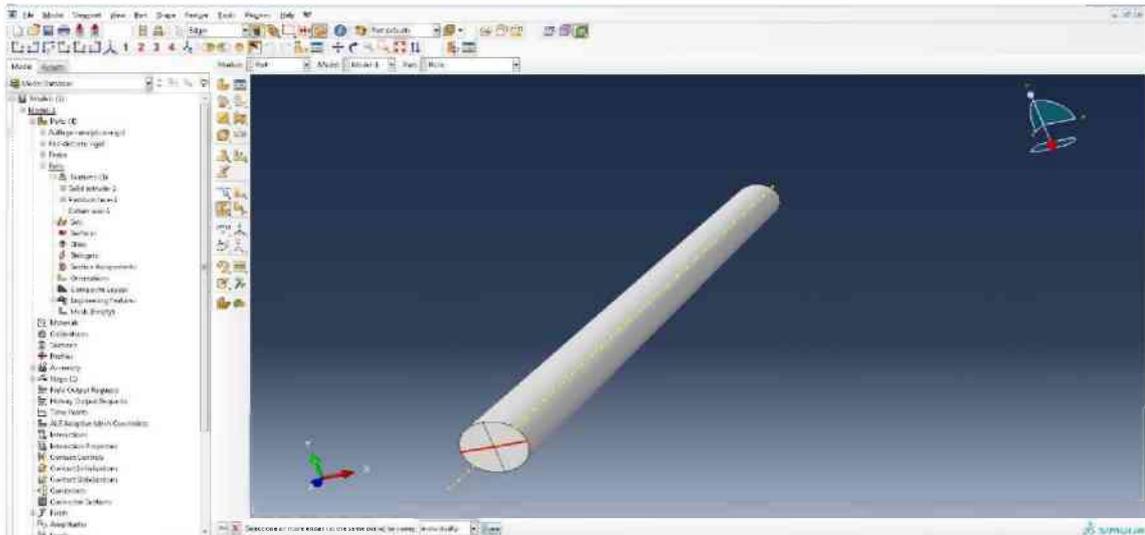
Erstellen eines neuen Parts mit den Eigenschaften 3D, Deformable, Solid und Extrusion. Der Name des neuen Parts ist Rolle. Erstellen der Geometrie über Create-Circle und Eingabe des Mittelpunkts und eines Punkts am Kreisumfang. Anschließend auf 90,0 extrudieren.



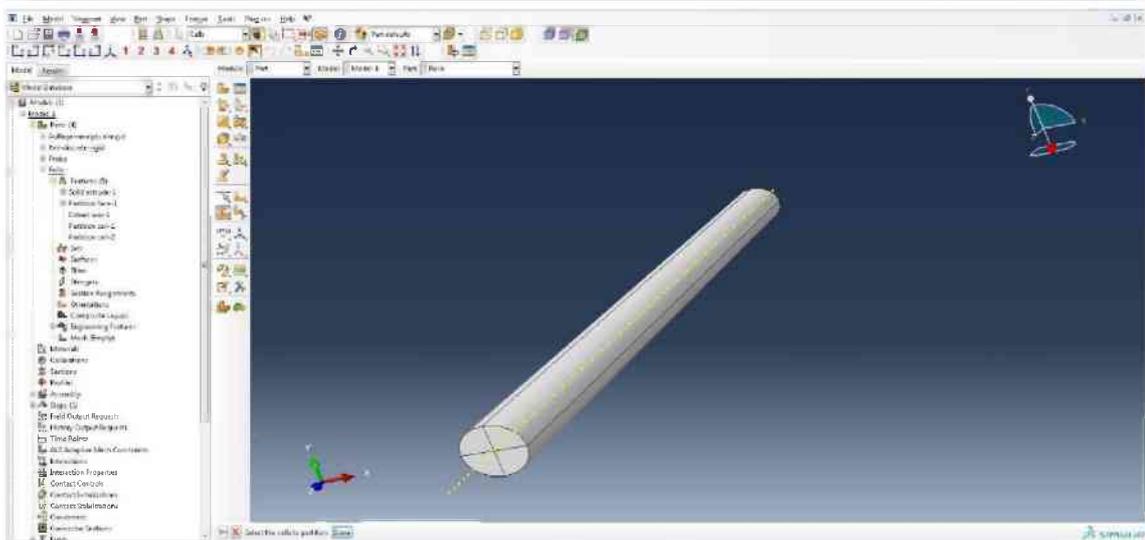
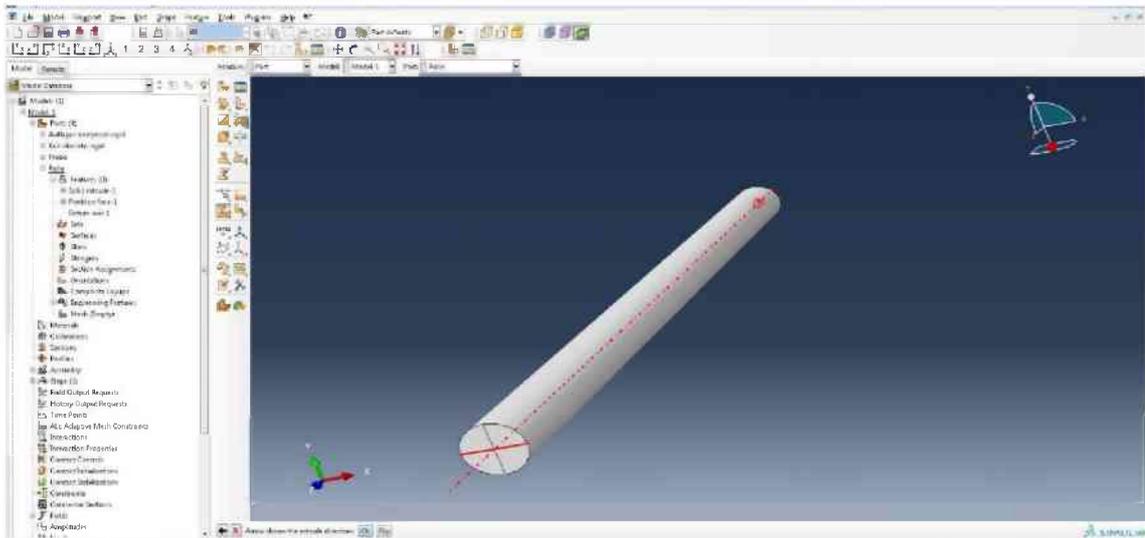
Beim erstellten Part die Frontfläche mit Partition-Face markieren und anschließend zwei aufeinander rechtwinkelige Linien erstellen.



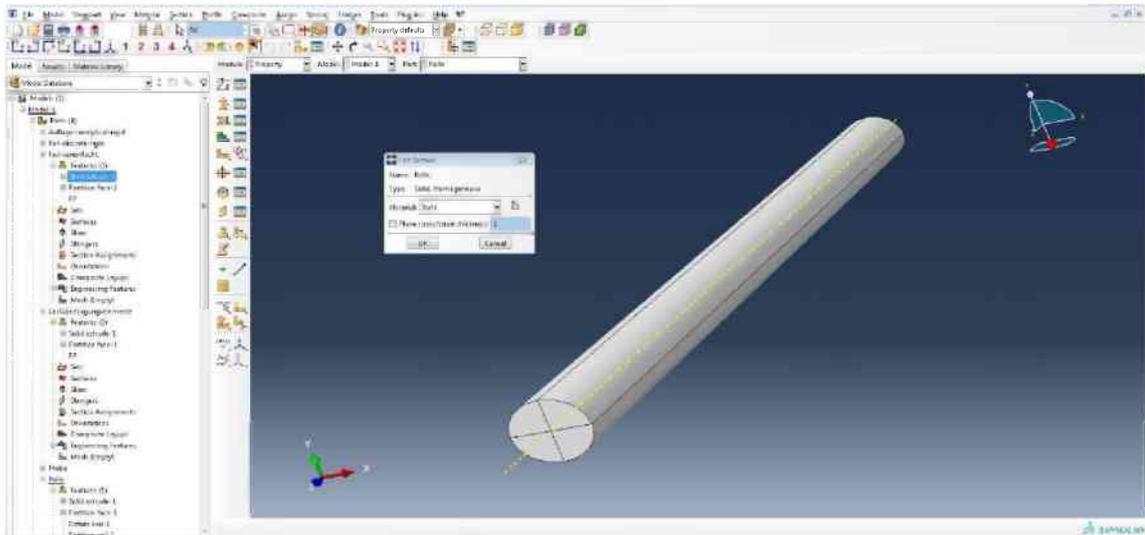
Erstellen der gelb gepunkteten Achse über Create-Datum-Axis (rote Ellipse) und auswählen der Z-Axis.



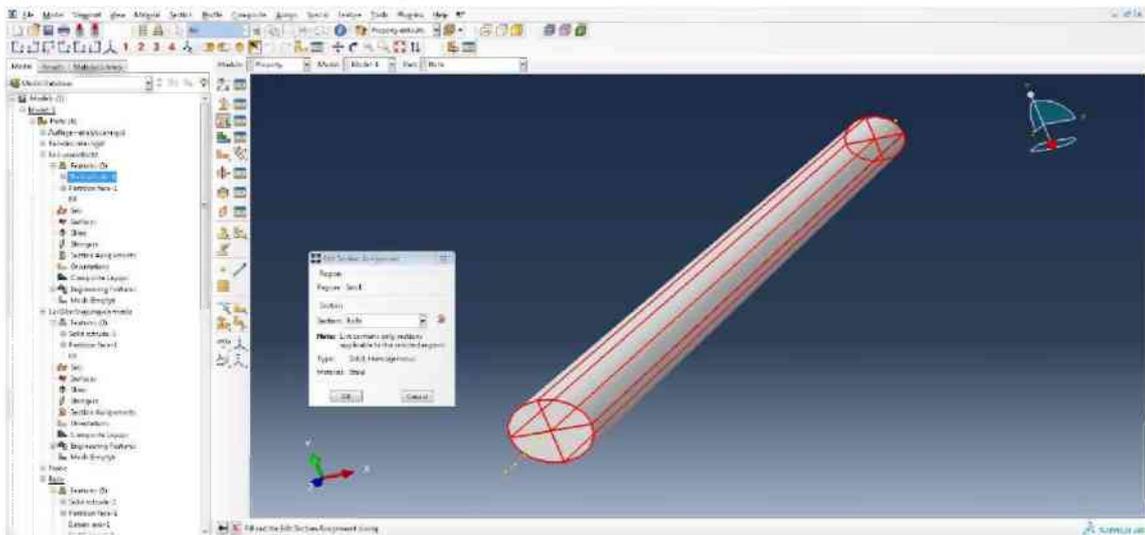
Partitionieren des Parts über Partition Cell: Extrude/Sweep-Edges und auswählen der im Bild roten Kante. Anschließend die Datum-Axis als Partitionierlinie auswählen. Den Vorgang für die vertikale Linie in der Frontfläche wiederholen.

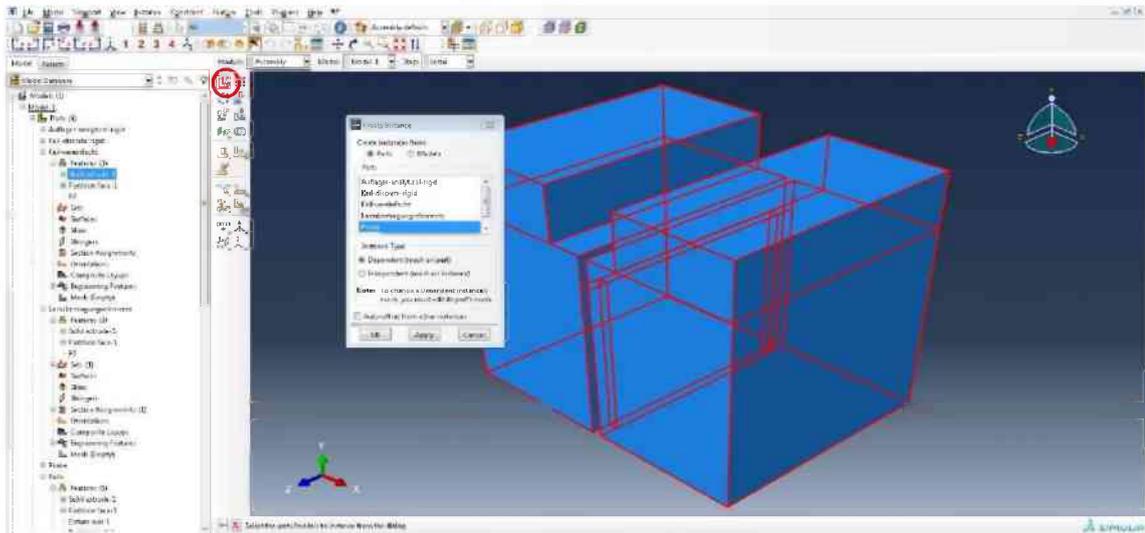


Die Partitionierung des Parts Rolle ist abgeschlossen.

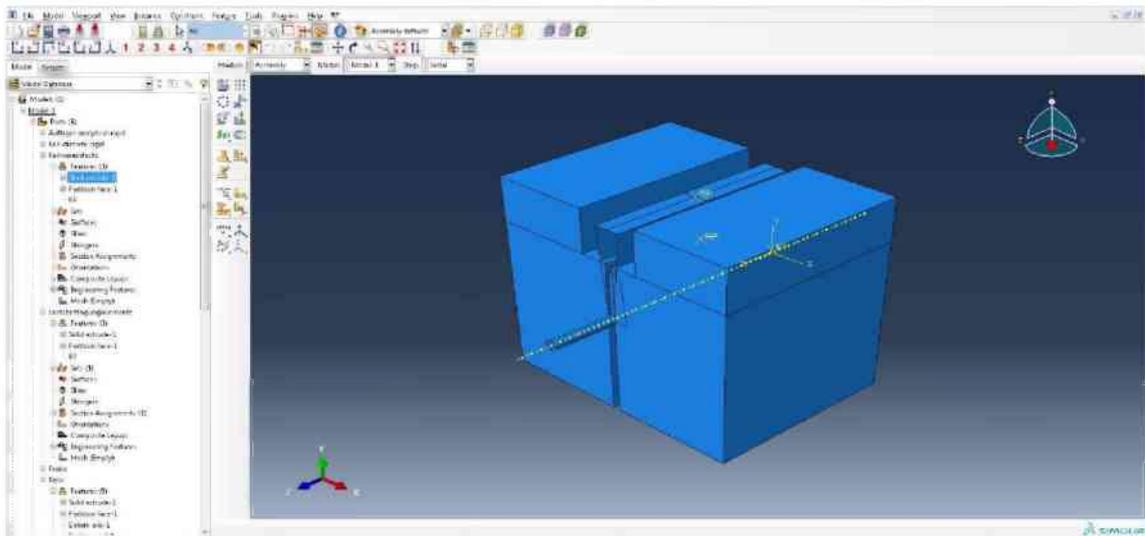


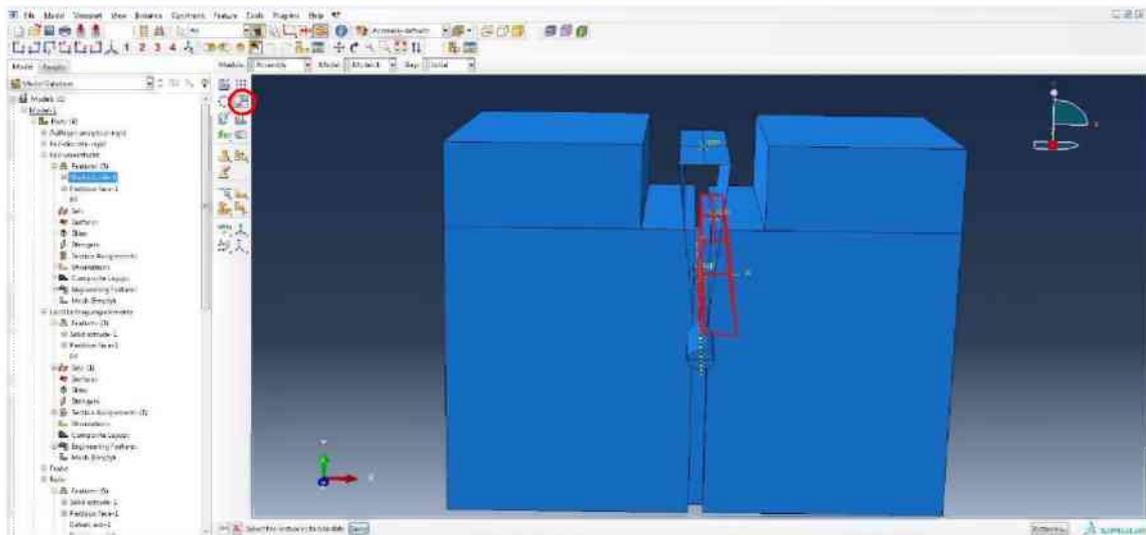
Die Section Rolle nach bekanntem Verfahren erstellen und anschließend das Material Stahl zuweisen. Danach den ganzen Part markieren und die Section Rolle zuweisen.



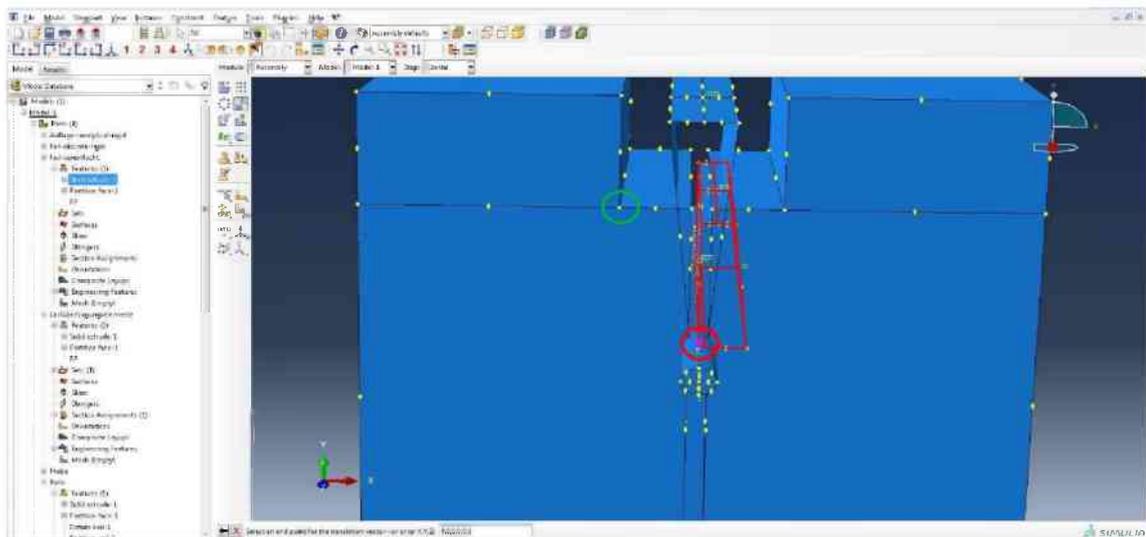


In das Modul Assembly wechseln und den Create-Instance-Knopf (rote Ellipse) drücken. Dann jeweils auf den Part klicken und Apply drücken. Die Parts Probe, Keil-analytisch-rigid und Auflager sind je einmal und die Parts Rolle und Lastübertragungselemente je zweimal einzufügen.

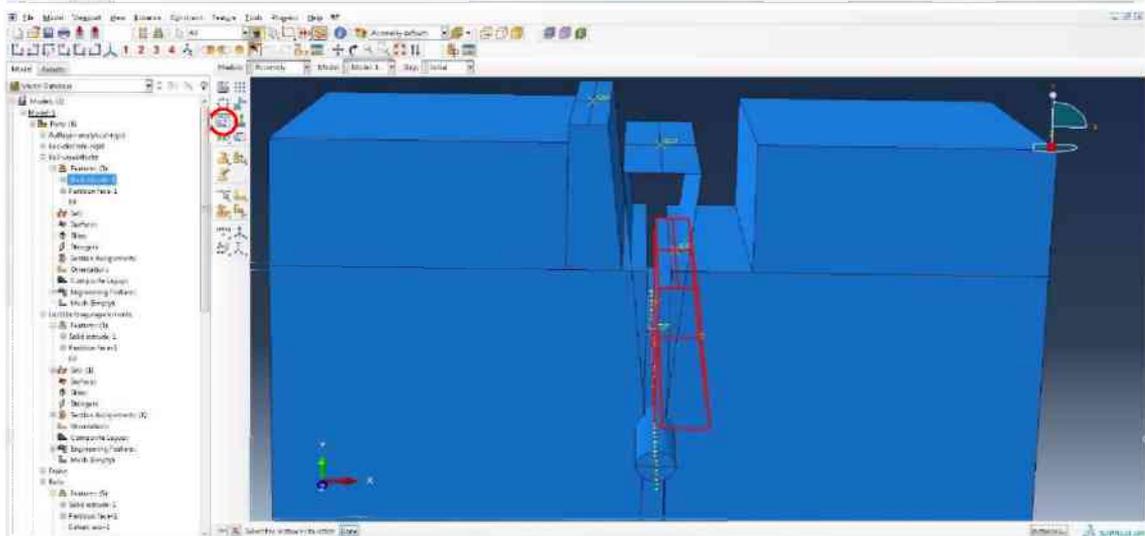
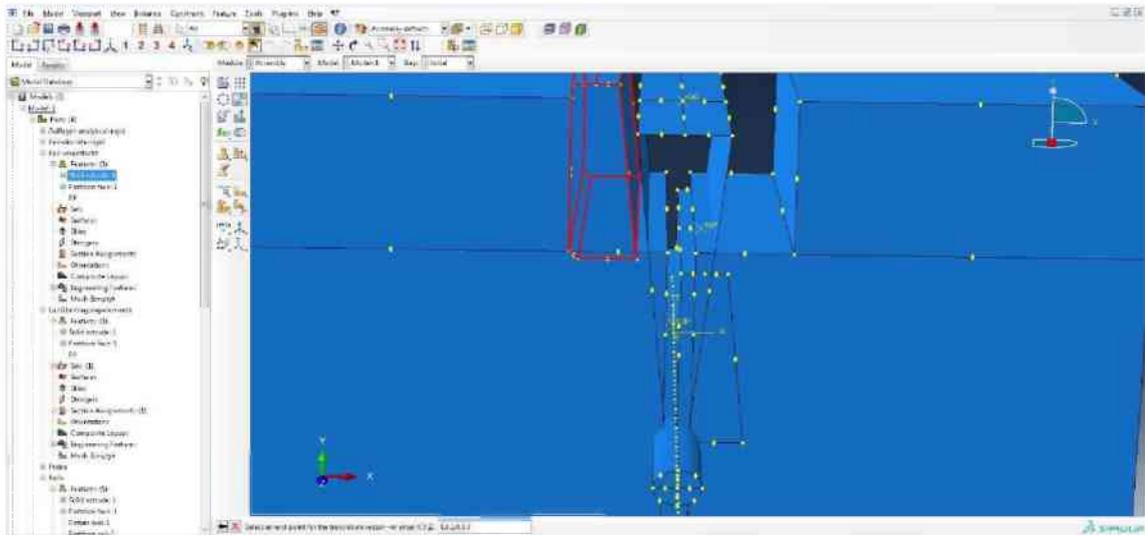




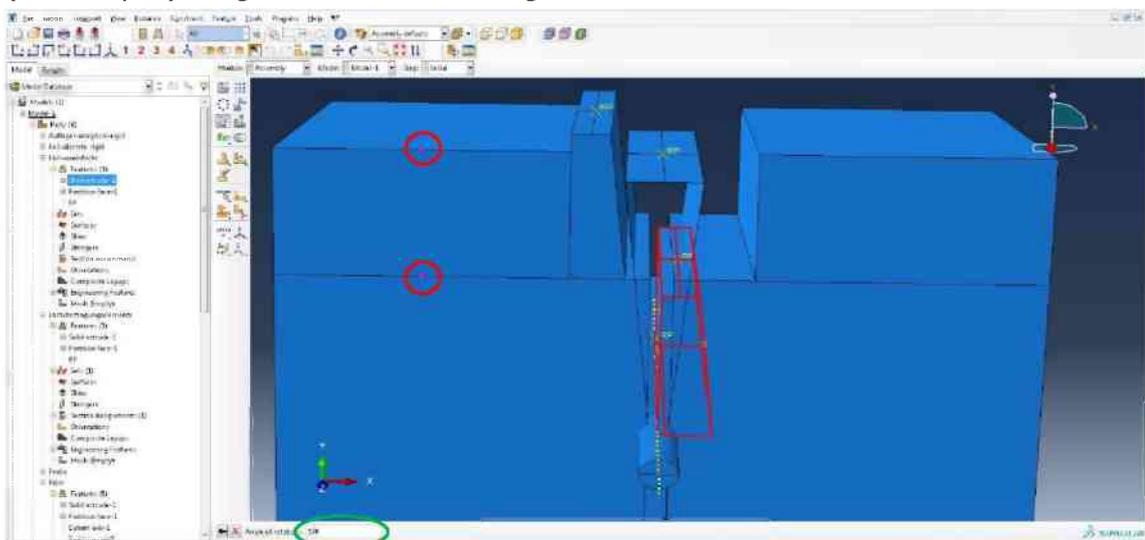
Die Parts können durch klicken auf Translate-Instance (rote Ellipse) und markieren des gewünschten Parts entweder koordinativ oder durch Auswählen des Start- und Endpunkts verschoben werden.



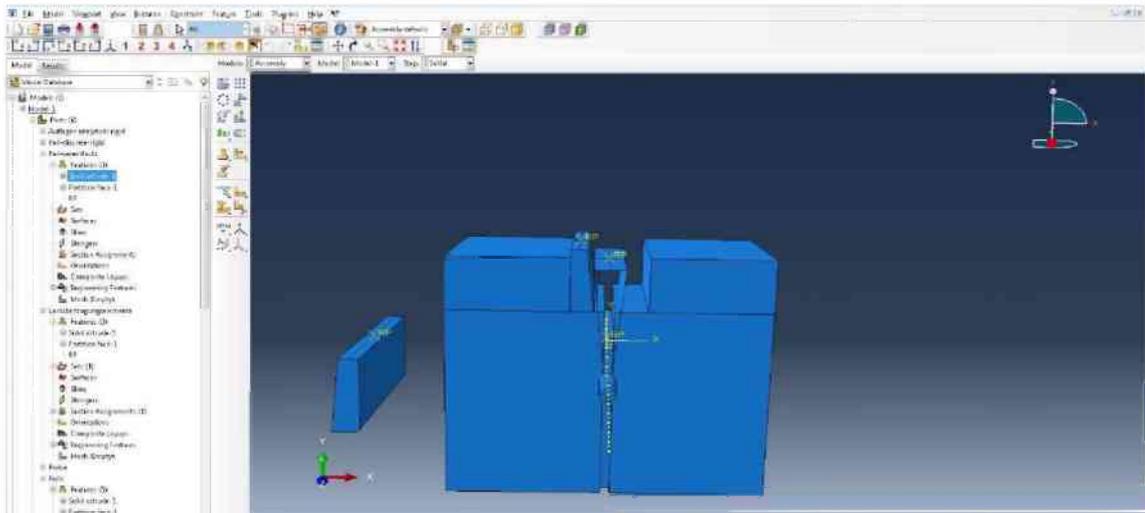
Als Startpunkt den violetten Punkt (rote Ellipse) und als Endpunkt den Eckpunkt der Kerbe (grüne Ellipse) auswählen. Danach das gleiche Lastübertragungselement erneut mit Translate-Instance auswählen. Für den Startpunkt die Koordinaten auf 0.0/0.0/0.0 belassen und für den Endpunkt 0.0/1.0/0.0 eingeben. Dadurch wird das Lastübertragungselement 1,0 nach oben verschoben.



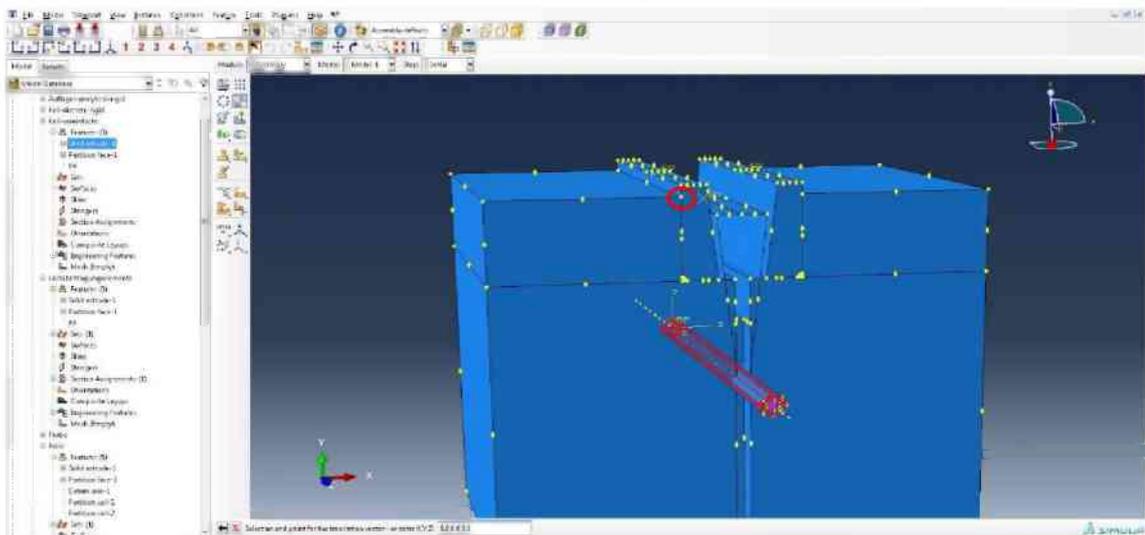
Das zweite Lastübertragungselement ist verdreht, es muss über Rotate-Instance (rote Ellipse) ausgewählt und um 180 gedreht werden.



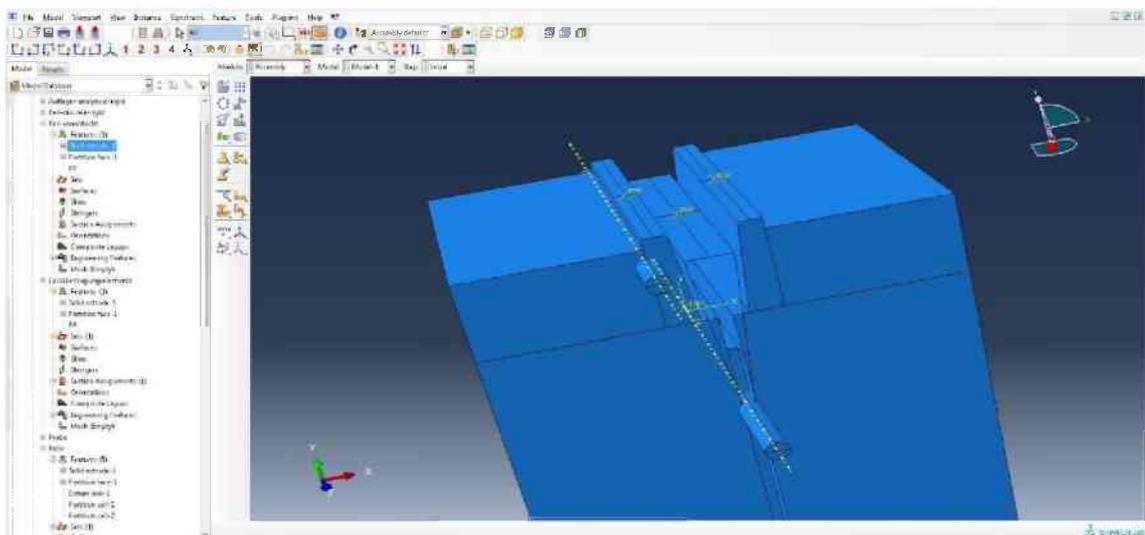
Als Achse werden die beiden pinken Punkte ausgewählt (rote Ellipsen). Den Drehwinkel mit 180 eintragen (grüne Ellipse).

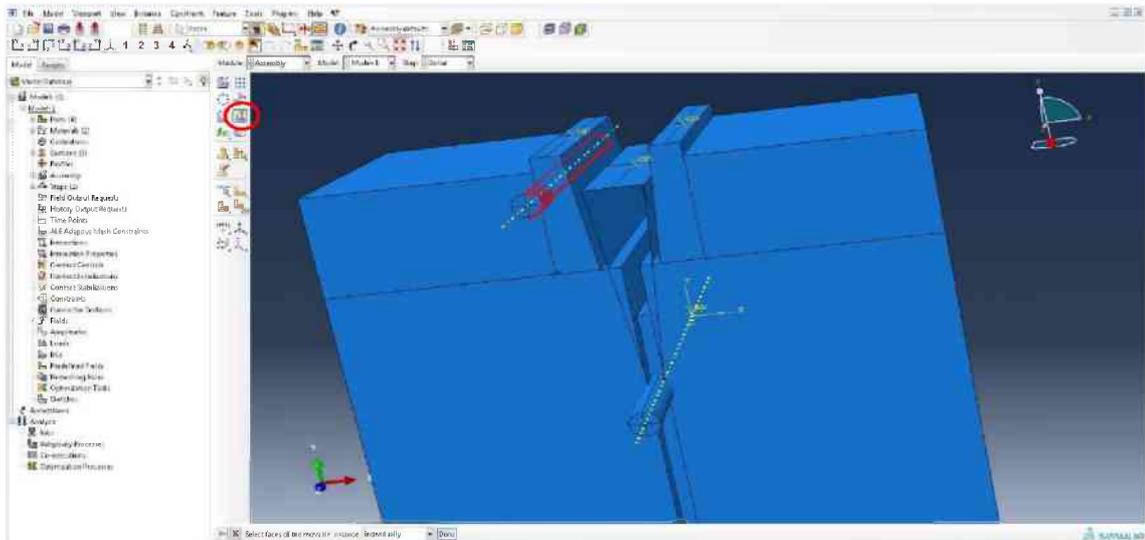


Anschließend Translate-Instance drücken und dann den Start- und Endpunkt auswählen, danach folgt das Verschieben um 1,0 nach oben wie beschrieben.

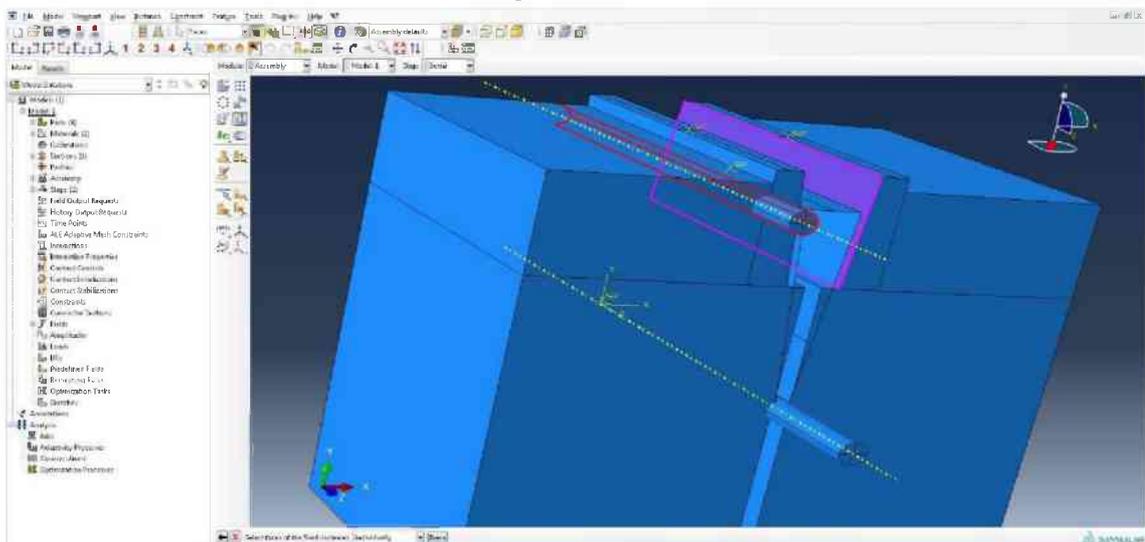


Im nächsten Schritt wird die Rolle mit Translate-Instance ausgewählt und an den Punkt innerhalb der roten Ellipse verschoben und dann im Anschluss 5,0 gerade nach unten versetzt.

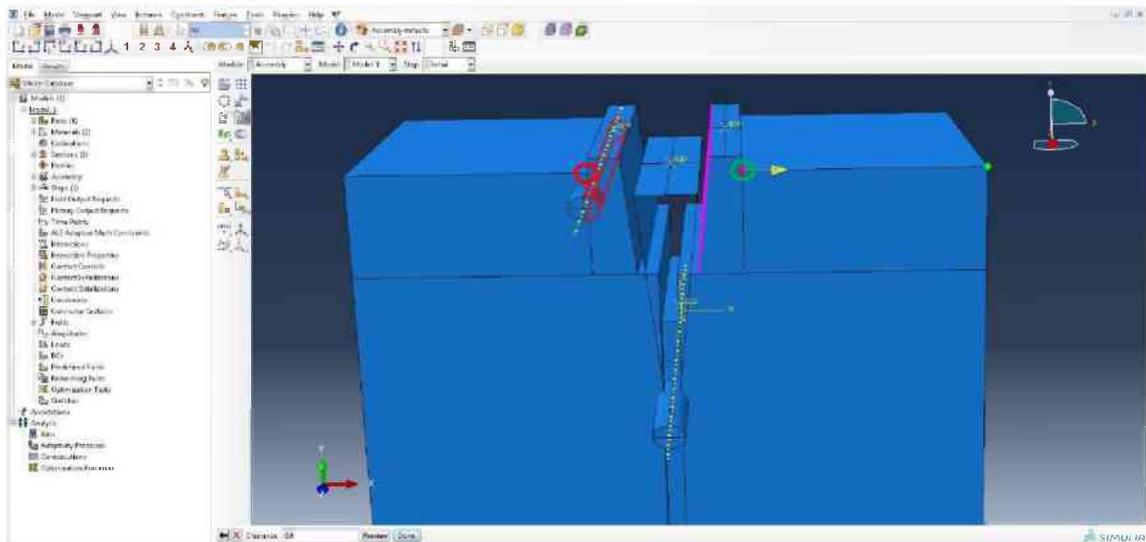




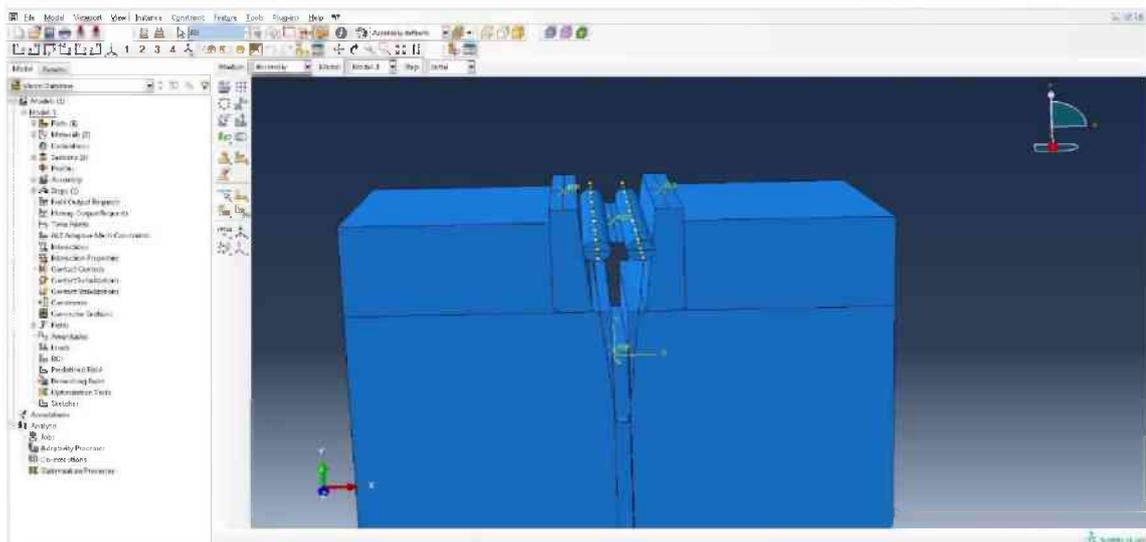
Den Translate-to-Knopf (rote Ellipse) drücken und die beiden innenliegenden Flächen der Rolle markieren. Mit Done bestätigen.

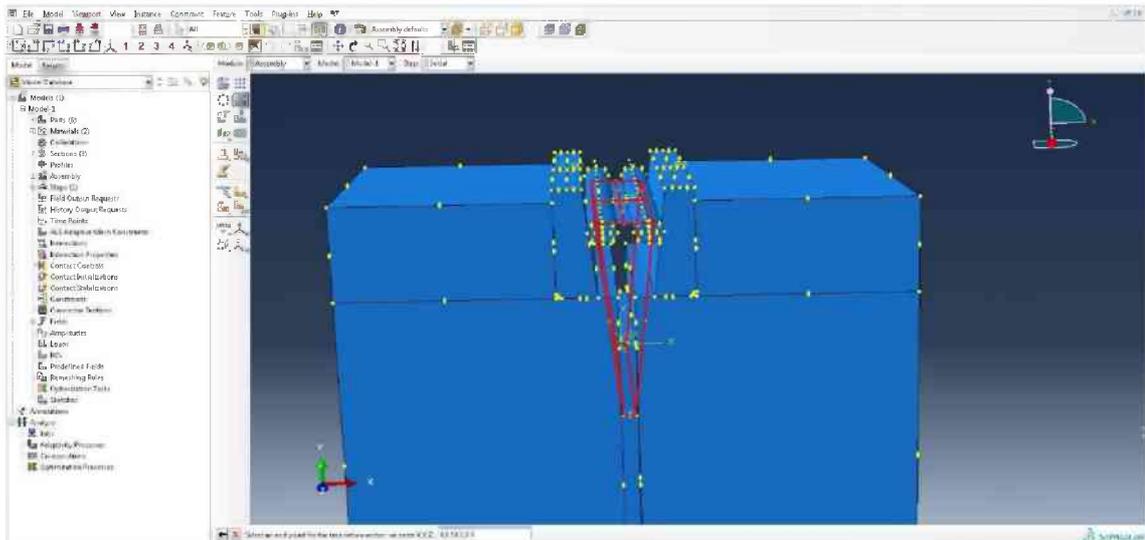


Die gegenüberliegende geneigte Fläche des Lastübertragungselements markieren und mit Done bestätigen.

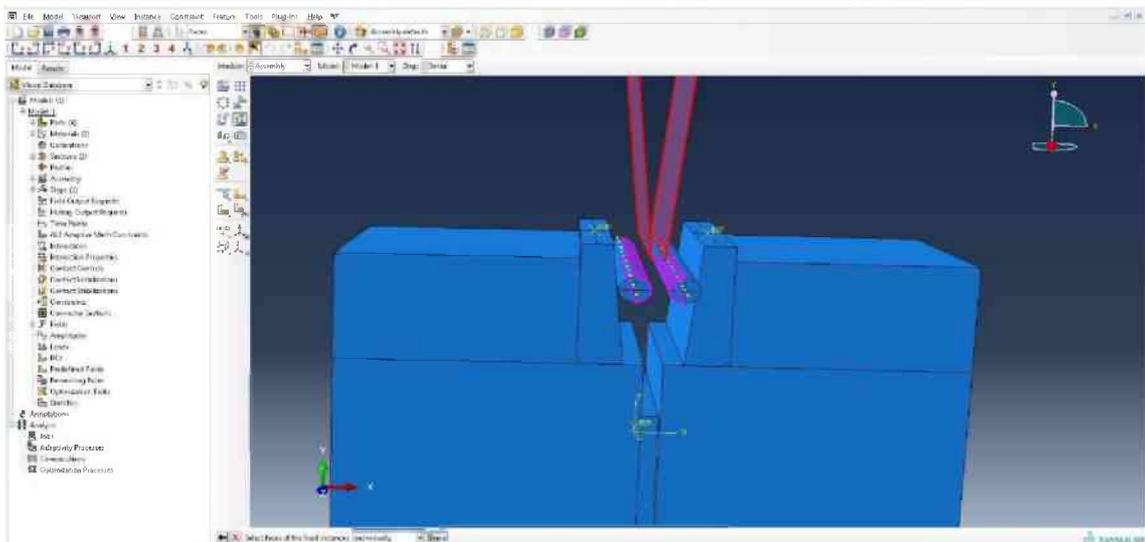


Die Richtung der Verschiebung wird durch das Anklicken mit der Maus auf Punkt 1 (rote Ellipse) und anschließend auf Punkt 2 (grüne Ellipse) festgelegt. Clearance von 0,0 mit Done bestätigen. Den gesamten Vorgang analog für die zweite Rolle wiederholen.

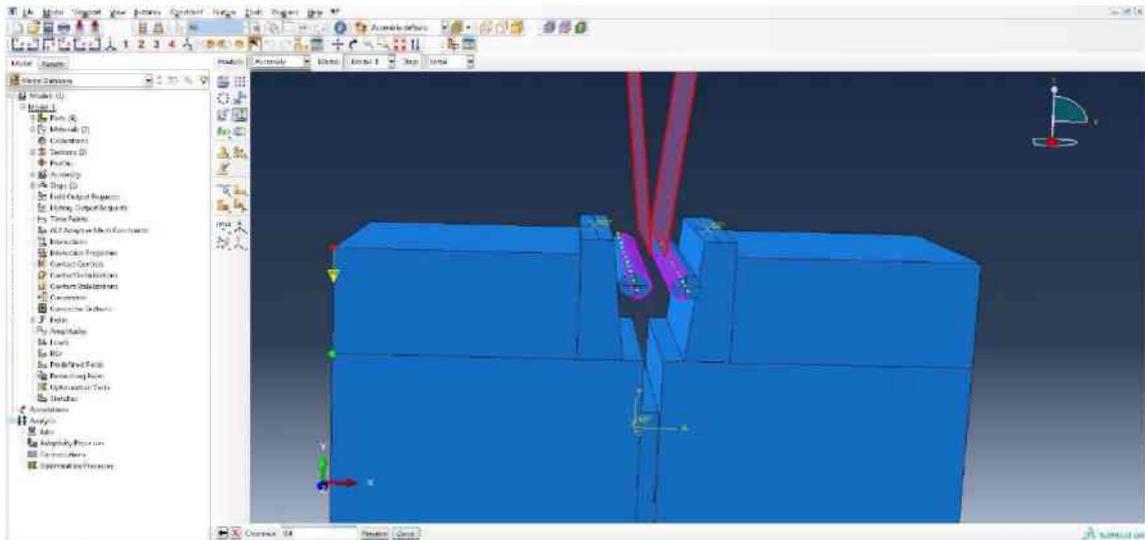




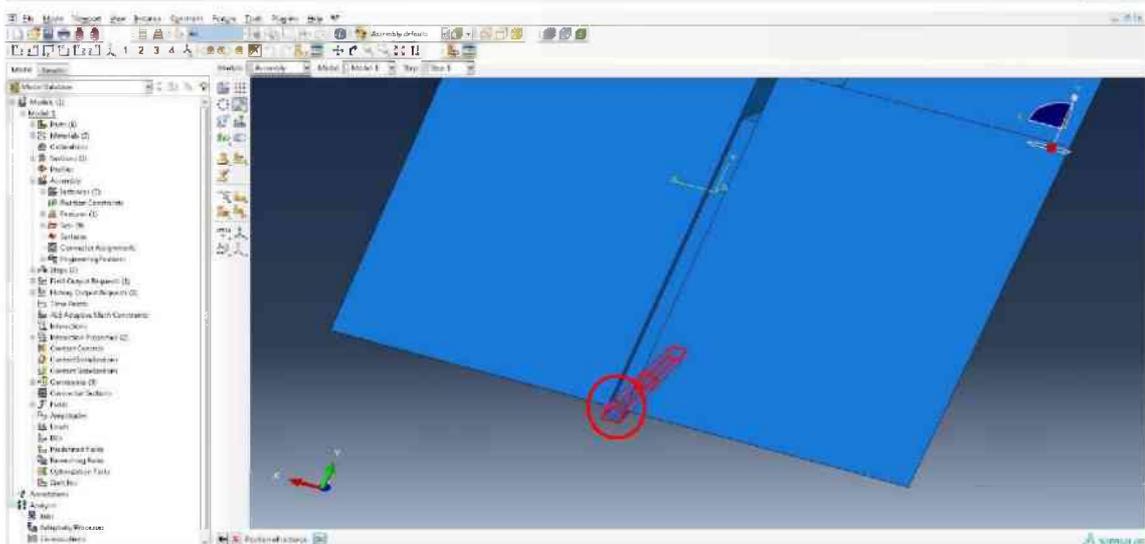
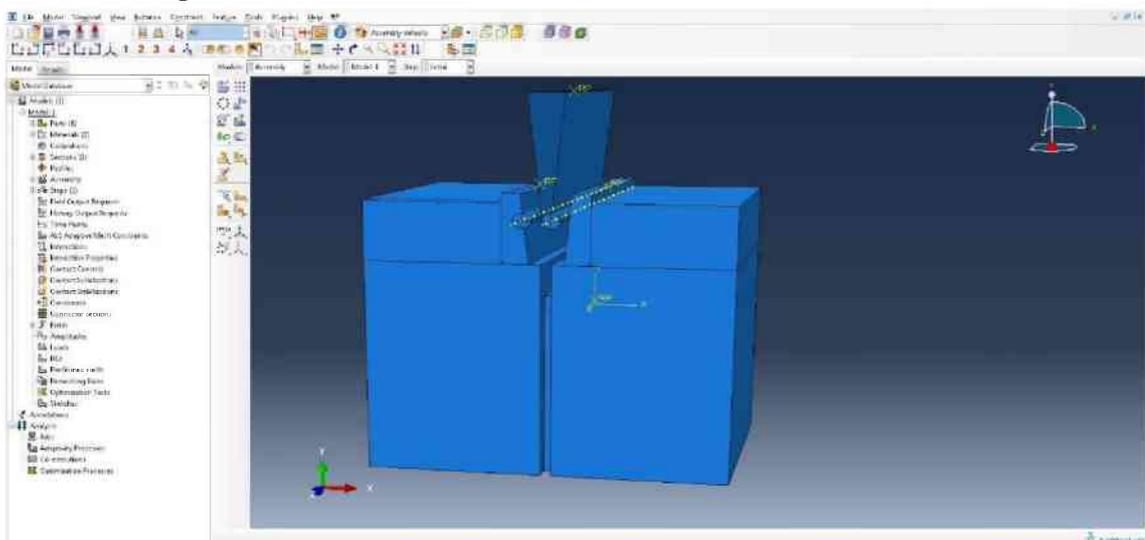
Den Keil mit Translate-Instance markieren und 50,0 in die positive Richtung der Y-Achse verschieben (nach oben).



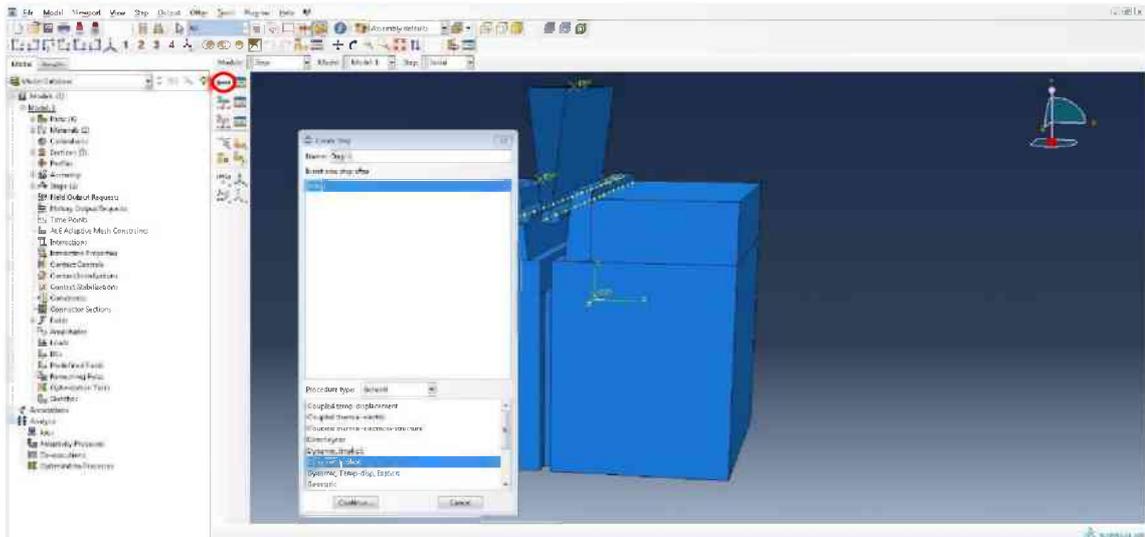
Translate-to-Knopf drücken und die Außenseiten des Keils markieren, Done drücken. Anschließend die inneren Flächen der Rollen markieren und mit Done bestätigen.



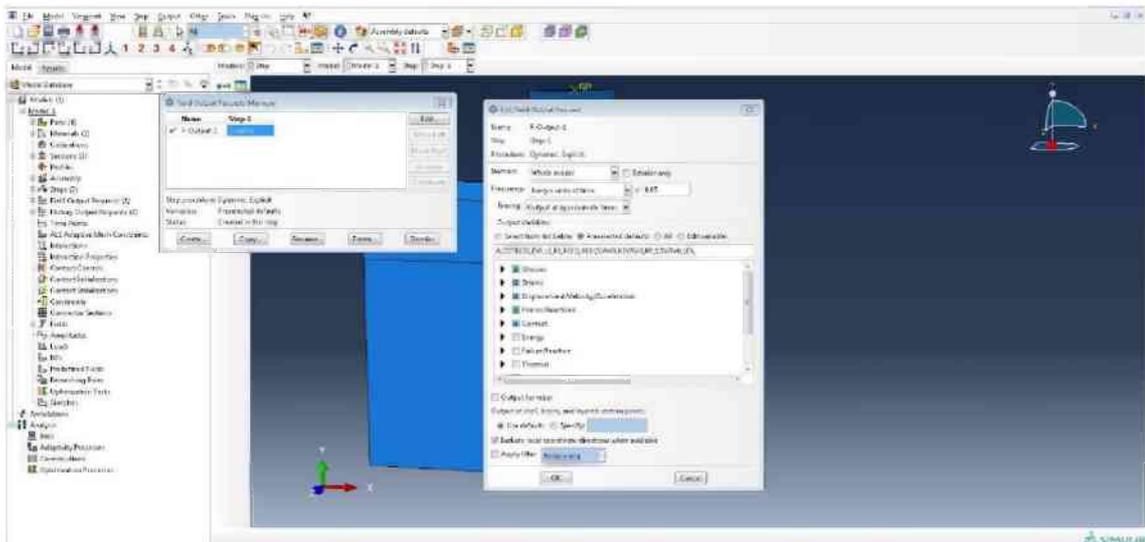
Zuerst den roten dann den grünen Punkt auswählen und die Clearance von 0,0 mit Done bestätigen.



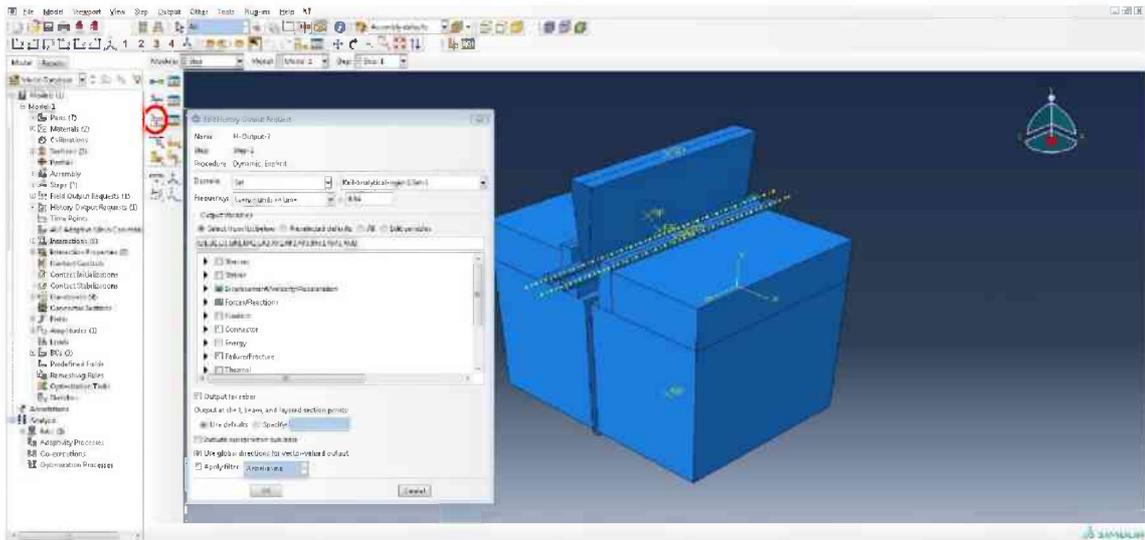
Das Auflager mit Translate-to auswählen und den linken oberen Eckpunkt als Startpunkt und den Eckpunkt der Führungskerbe als Endpunkt (rote Ellipse) wählen.



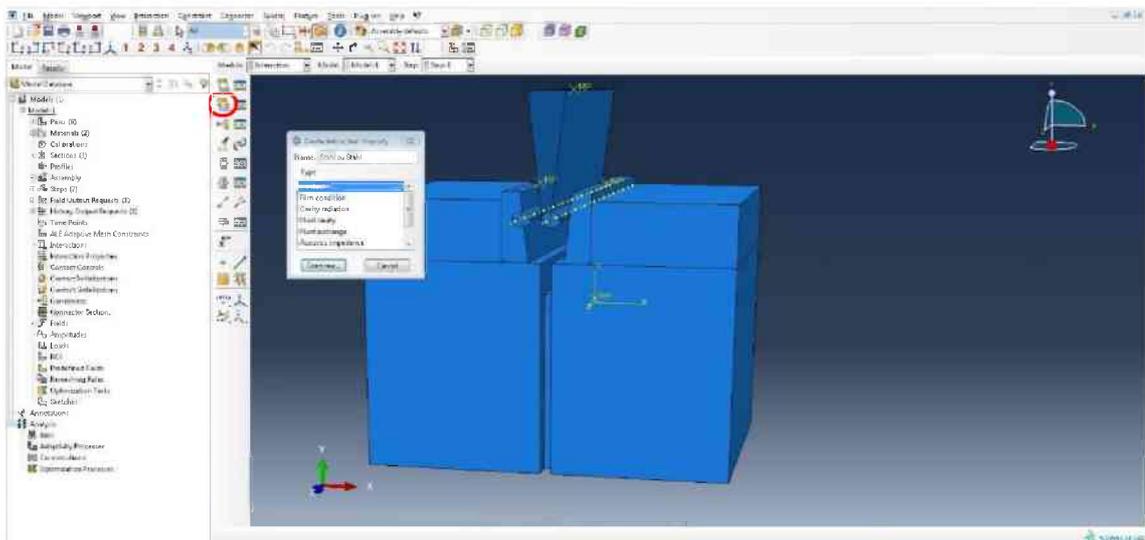
Zum Modul Step wechseln, auf den Create-Step-Knopf drücken (rote Ellipse). Anschließend Dynamic, Explizit wählen auf Continue klicken und bei Time period 120 eingeben.



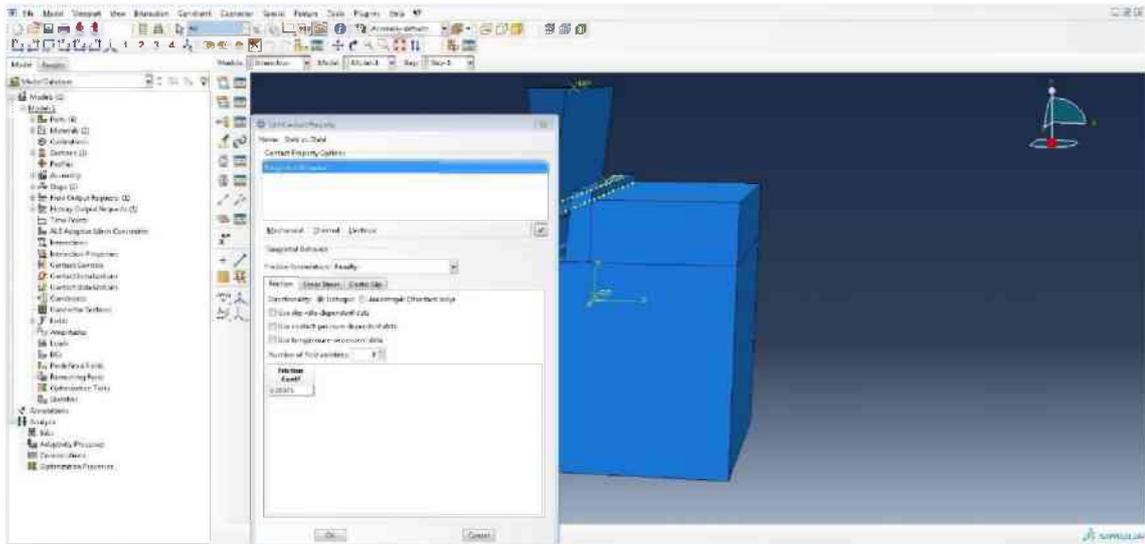
Den Field-Output-Manager-Knopf drücken und die gewünschten Ausgabeparameter anklicken und den Ausgabezeitpunkt einstellen. Frequency: Every x units of time, x: 0,05.



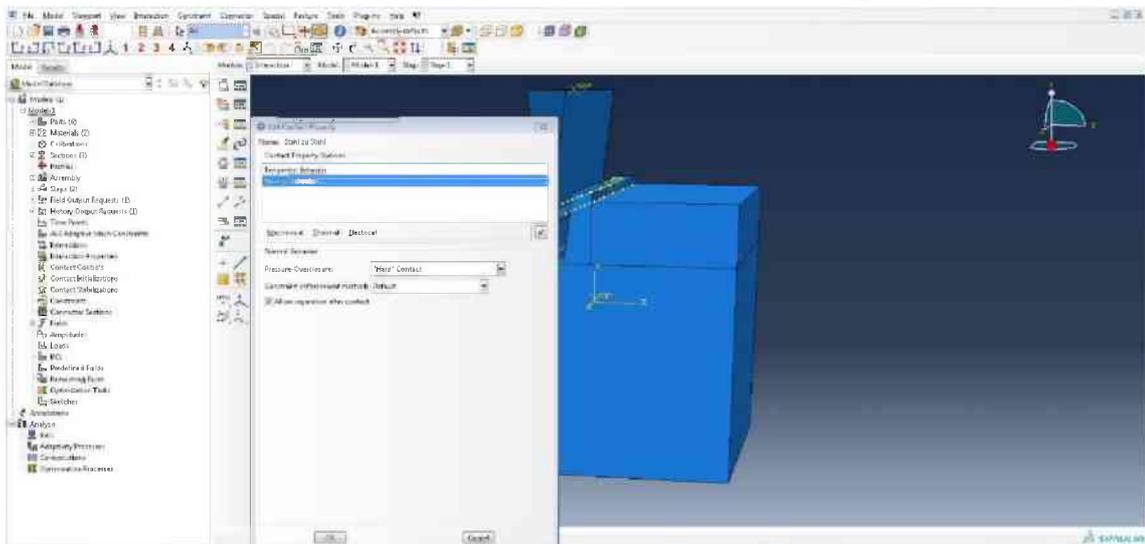
Den Create-History-Output-Knopf (rote Ellipse) drücken, benennen mit H-Output-2 und dann das Set Keil-analytical-rigid auswählen, die Ausgabegrößen RF und U anklicken und mit OK bestätigen. Danach allerdings durch Klicken auf das grüne Häkchen den History-Output wieder deaktivieren.

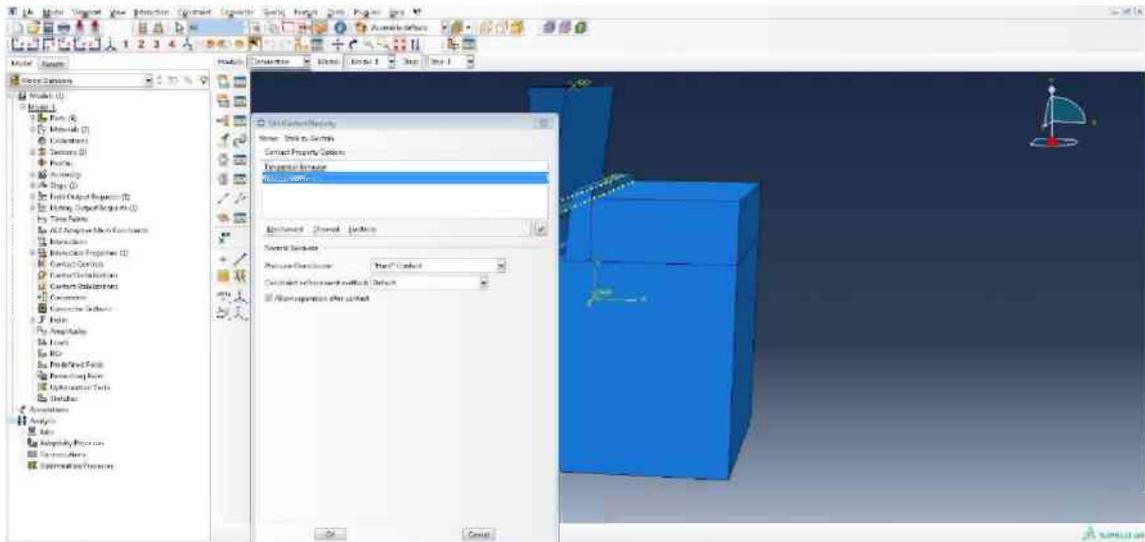


In das Modul Interaction wechseln. Den Create-Interaction-Knopf (rote Ellipse) drücken und Contact auswählen. Benennen mit Stahl zu Stahl

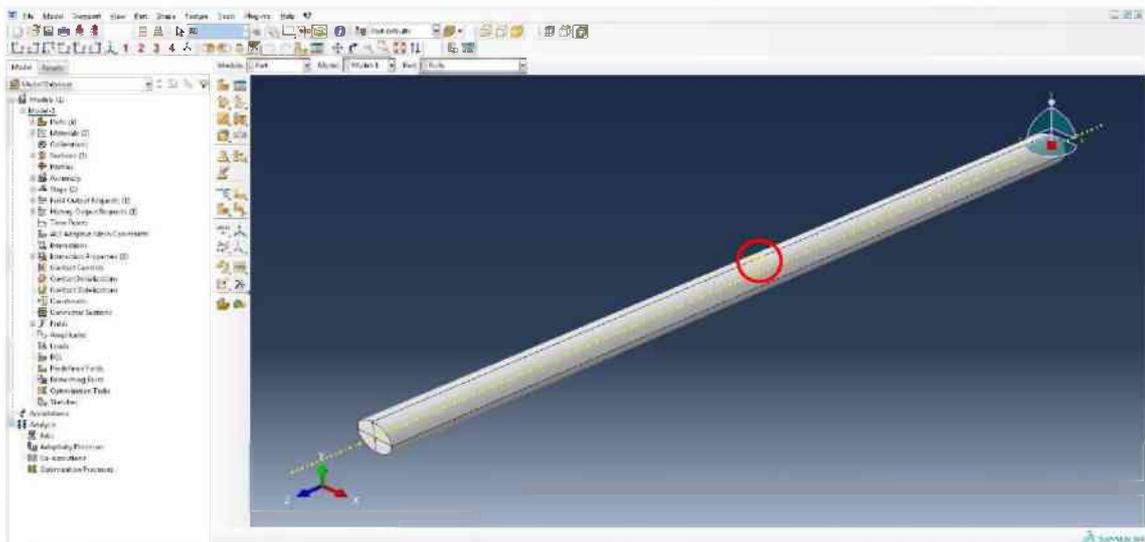


Auf Mechanical klicken und Tangential Behavior auswählen, für Friction formulation auf Penalty klicken und 0,00075 eingeben. Anschließend unter Mechanical noch Normal behavior auswählen und Hard Contact als Voreinstellung übernehmen

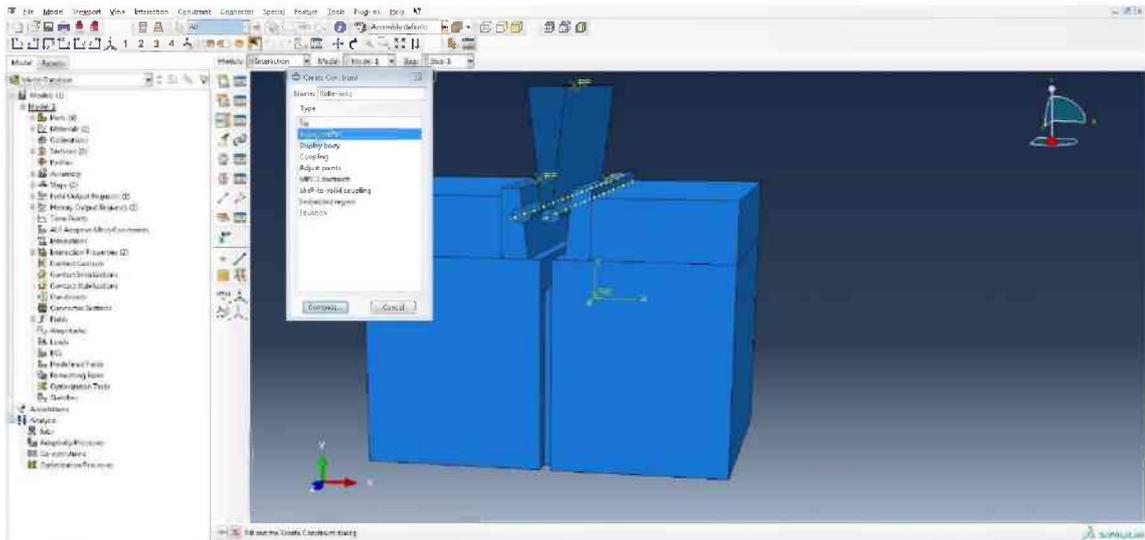




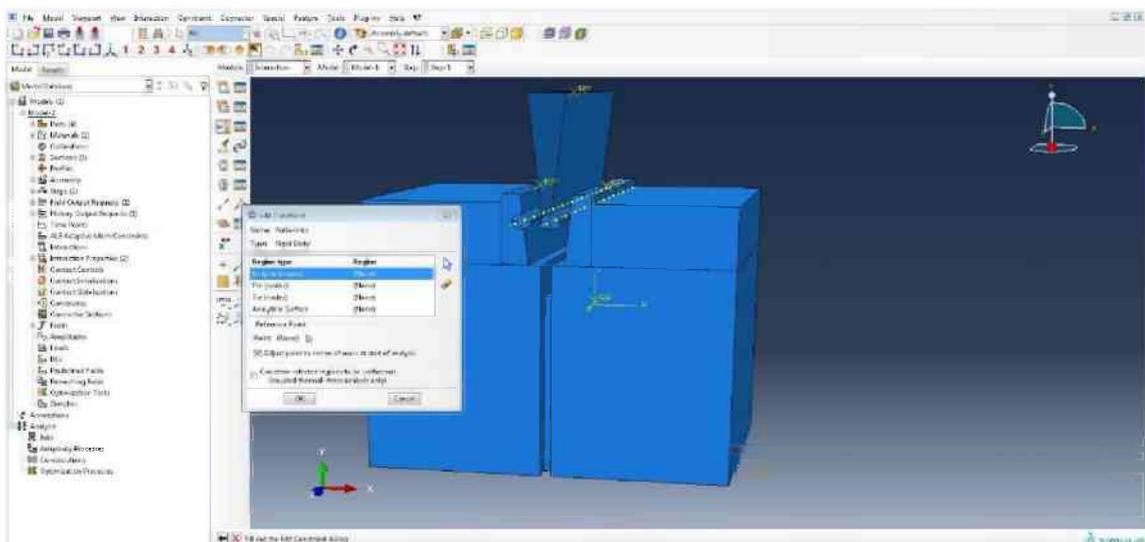
Diesen Vorgang wiederholen, allerdings mit Stahl zu Gestein benennen und für die Friction formulation Penalty auswählen und 0,35 eingeben.



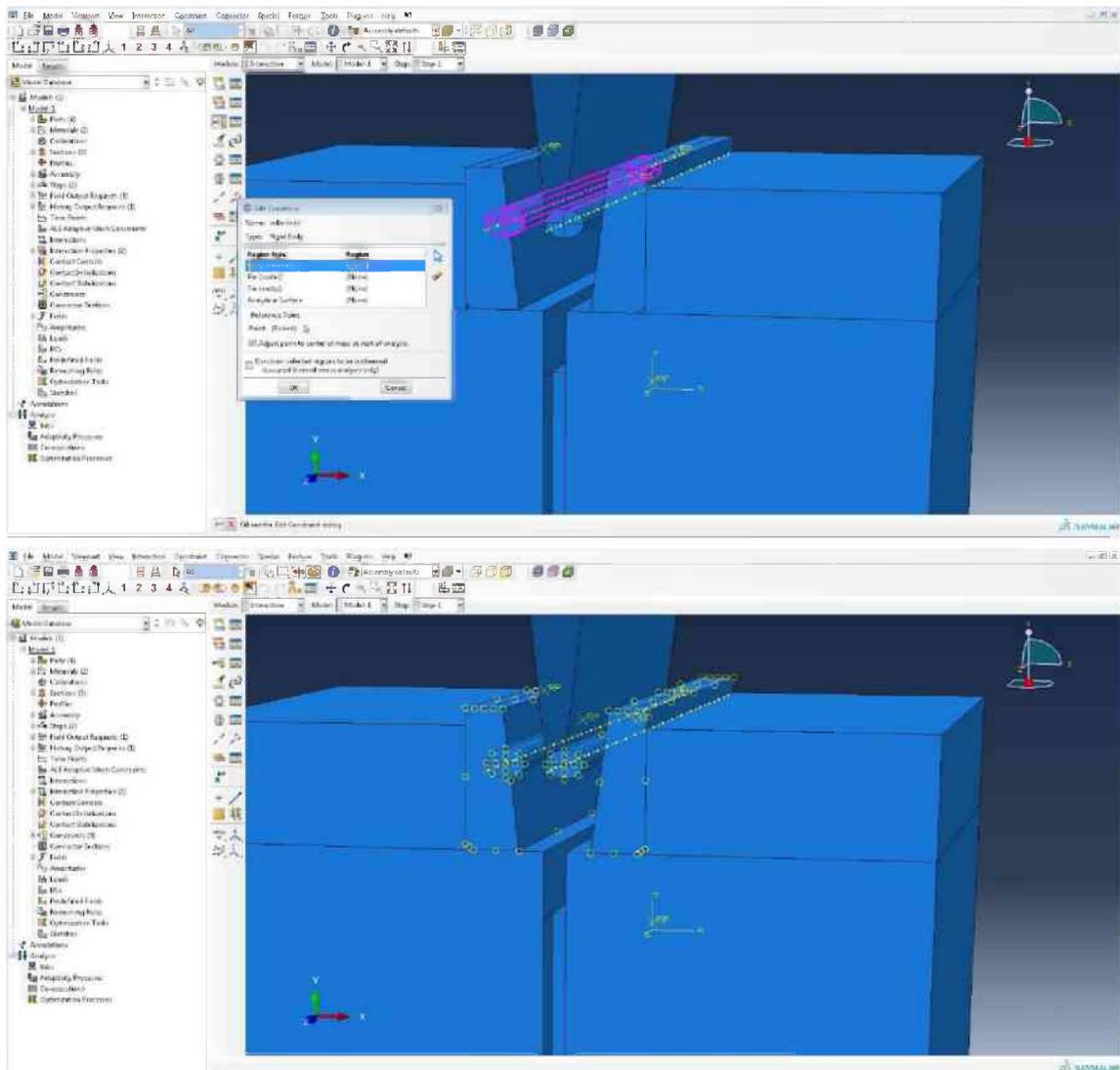
In das Modul Part wechseln und dem Part Rolle über Tools -> Reference Point in der Mitte (rote Ellipse) einen Referenzpunkt zuweisen.



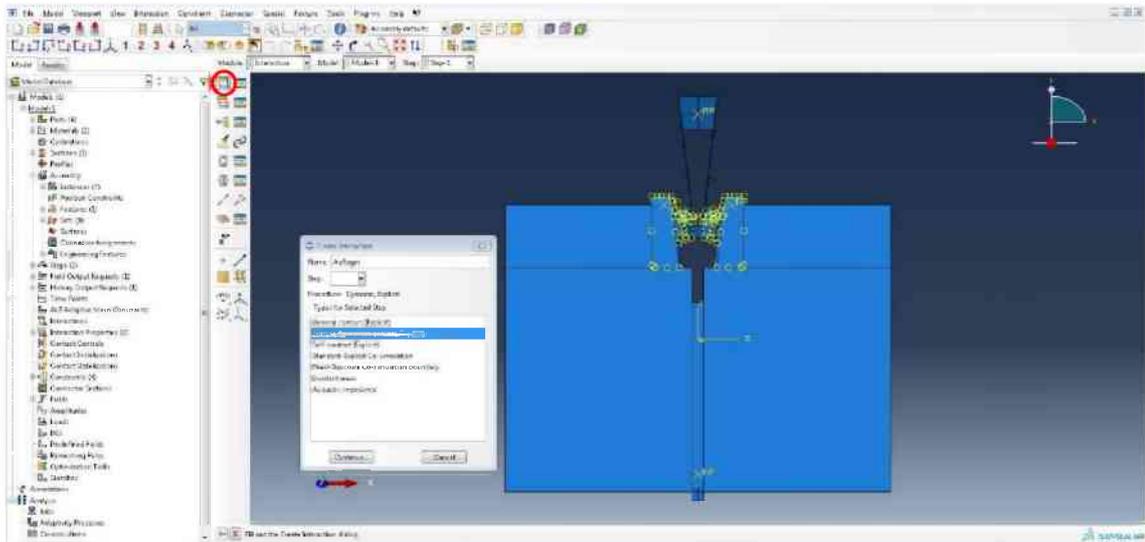
Auf den Create-Constraint-Knopf drücken und Rigid body auswählen. Mit Rolle links benennen.



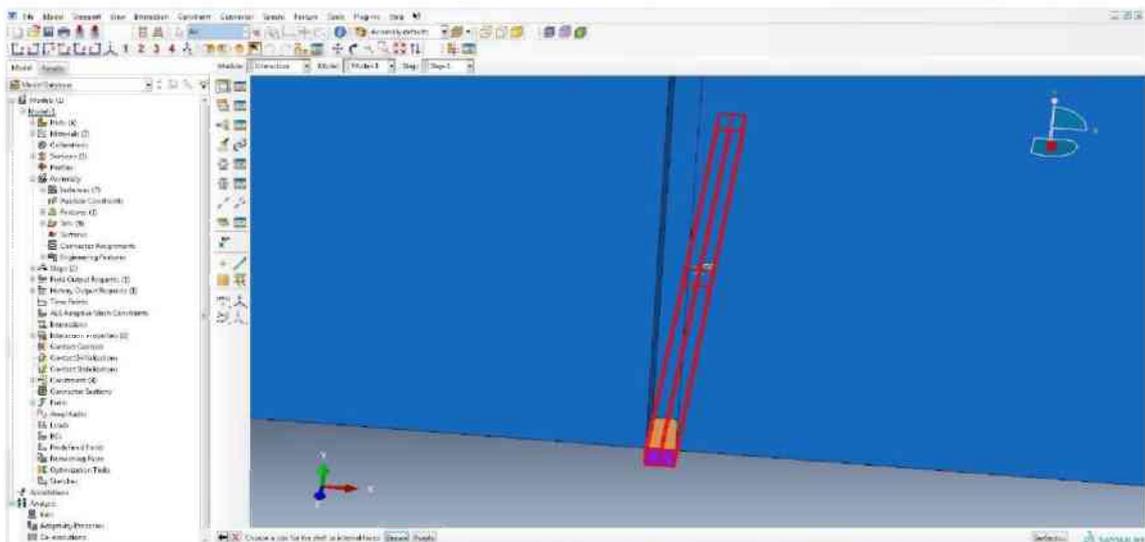
Zuerst auf Body klicken, dann auf den Pfeil, anschließend markieren der linken Rolle und mit Done bestätigen. Dann das Kästchen unter Point abhaken, auf den Pfeil daneben klicken und den Referenzpunkt der Rolle anklicken. Mit OK bestätigen.



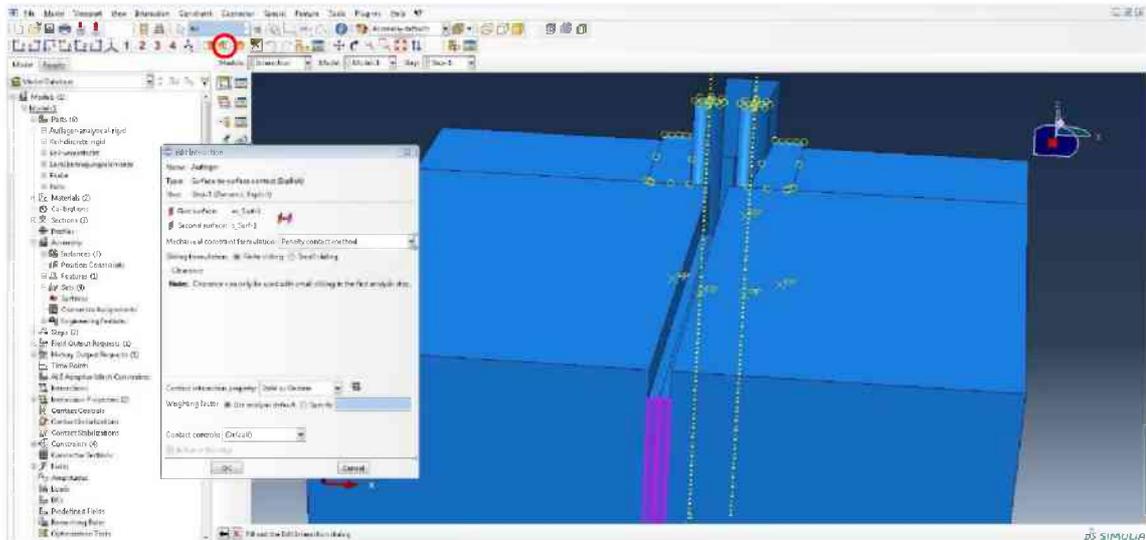
Den beschriebenen Vorgang für die zweite Rolle und die beiden Lastübertragungselemente wiederholen. Jedem Element den eigenen Referenzpunkt zuweisen.



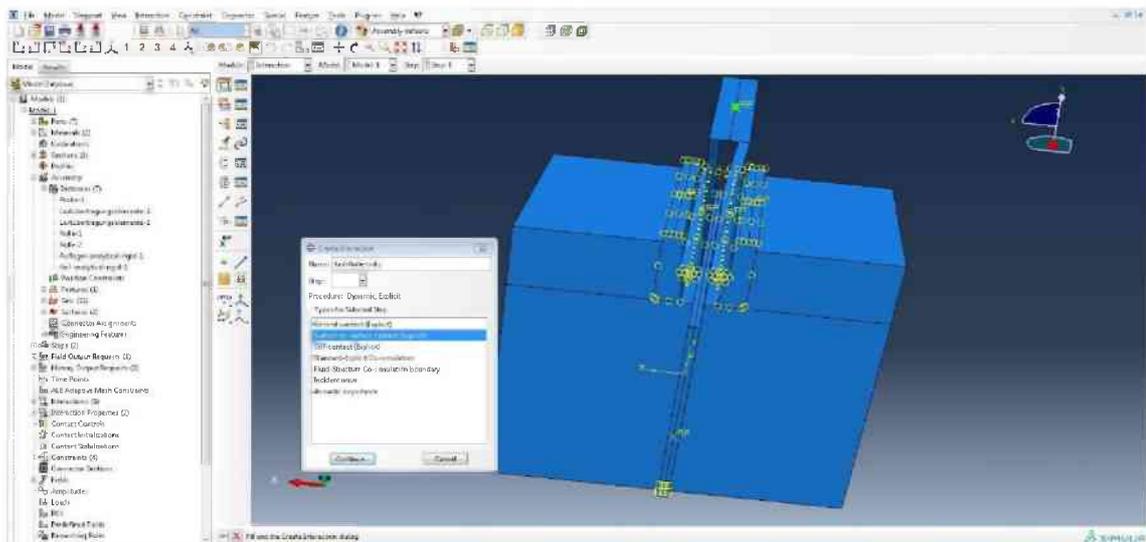
Auf Create-Interaction (rote Ellipse) klicken und Surface-to-Surface contact auswählen. Benennen mit Auflager, Step ist Initial und dann Continue drücken.



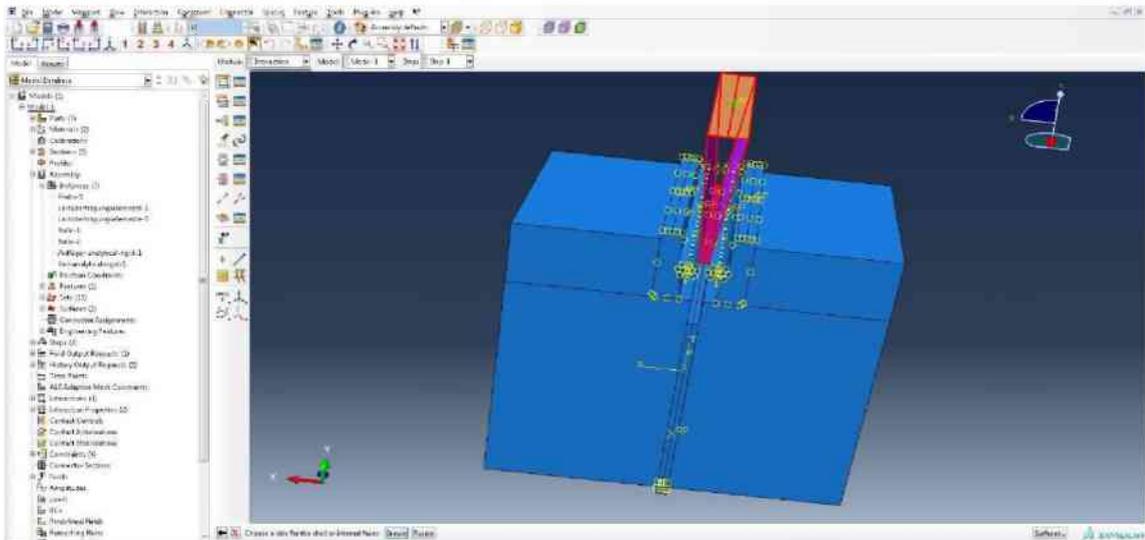
Das Auflager als Master surface auswählen und über die Farbe die Außenseite bestimmen. In diesem Fall Brown wählen und surface für den Second surface type auswählen.



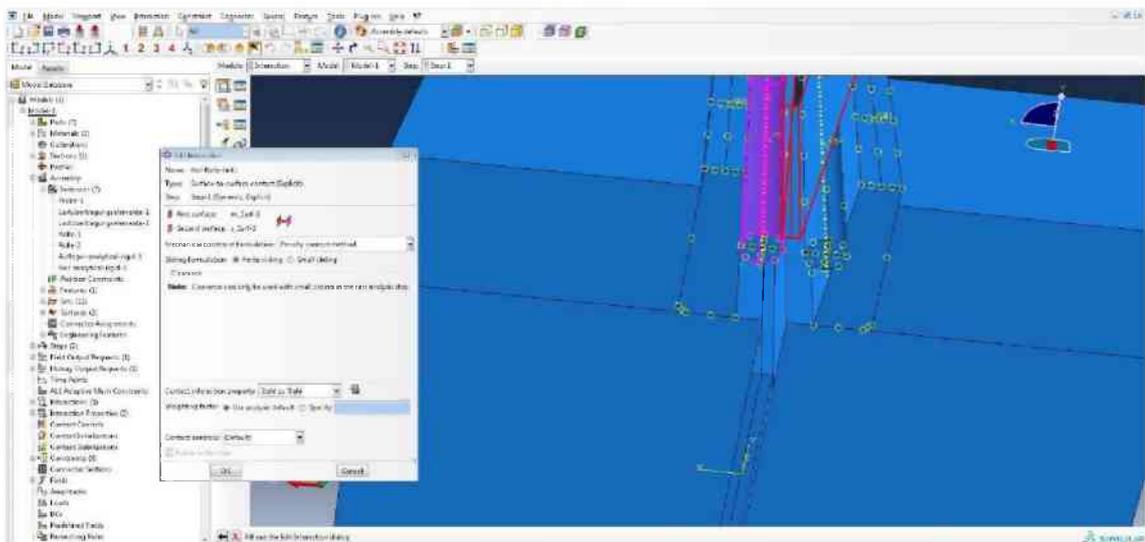
Zuerst auf Remove Selected (rote Ellipse) klicken und dann die beiden unteren Flächen des Teils 2 markieren, bei der Mechanical constraint formulation auf Penalty contact method umstellen. Als Contact interaction property Stahl zu Gestein auswählen.



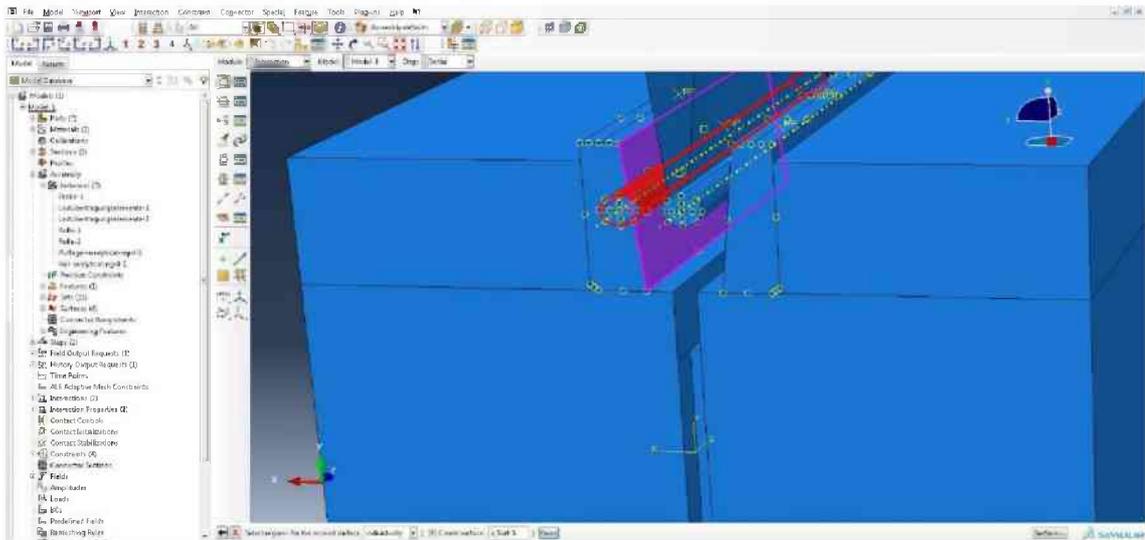
Erneut einen Surface-to-Surface contact erstellen und mit Keil-Rolle-links benennen. Step ist wieder Initial.



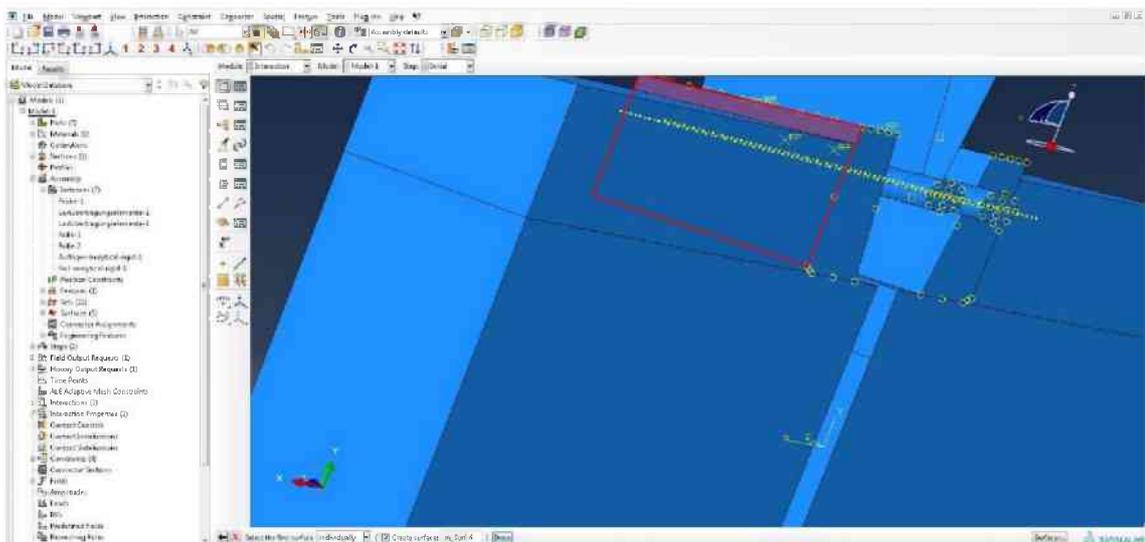
Den Keil als First surface markieren und die Außenseite auswählen. Als Second surface type wieder surface anklicken und die Mantelfläche der linken Rolle markieren.



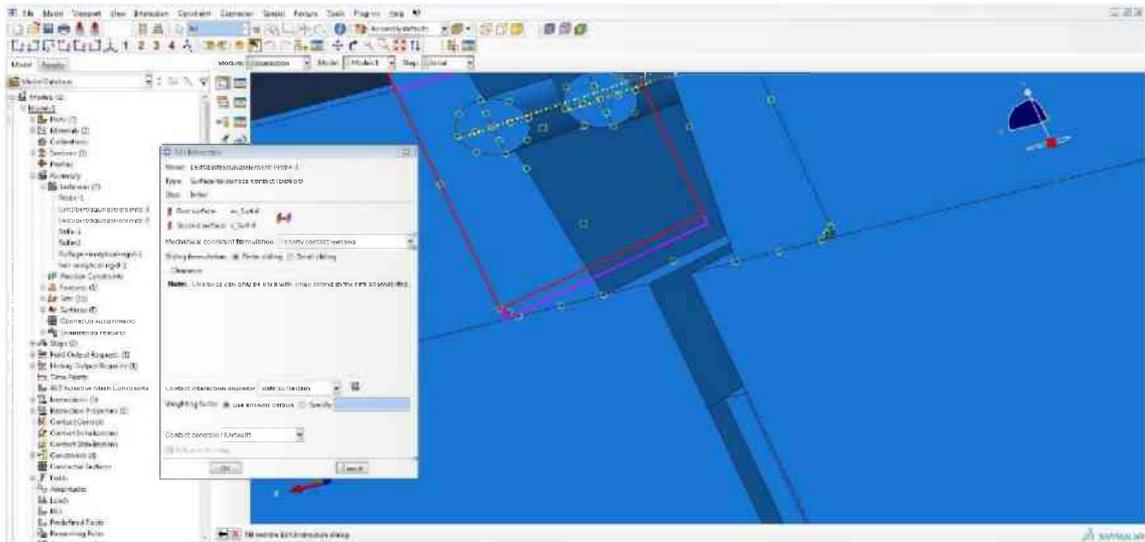
Die Penalty contact method und als Contact interaction property Stahl zu Stahl auswählen.



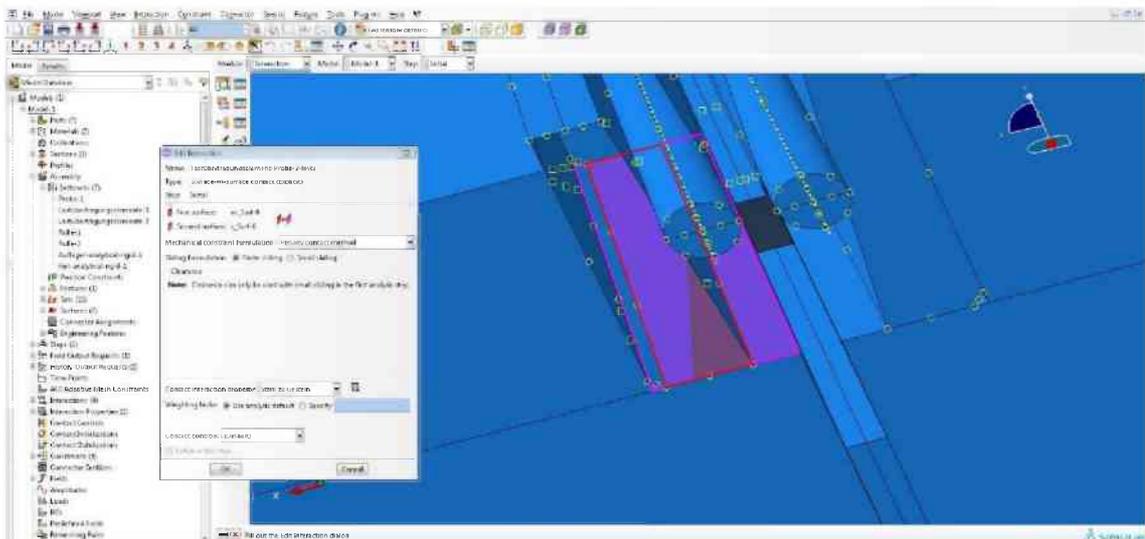
Erneut einen Surface-to-Surface contact erstellen. Benennen mit Rolle-Lastübertragungselement-links und Step ist Initial. Als First surface die Rolle und als Second surface die geeignete Fläche des Lastübertragungselements auswählen. Die Penalty contact method und die Contact interaction property Stahl zu Stahl sind zu verwenden.



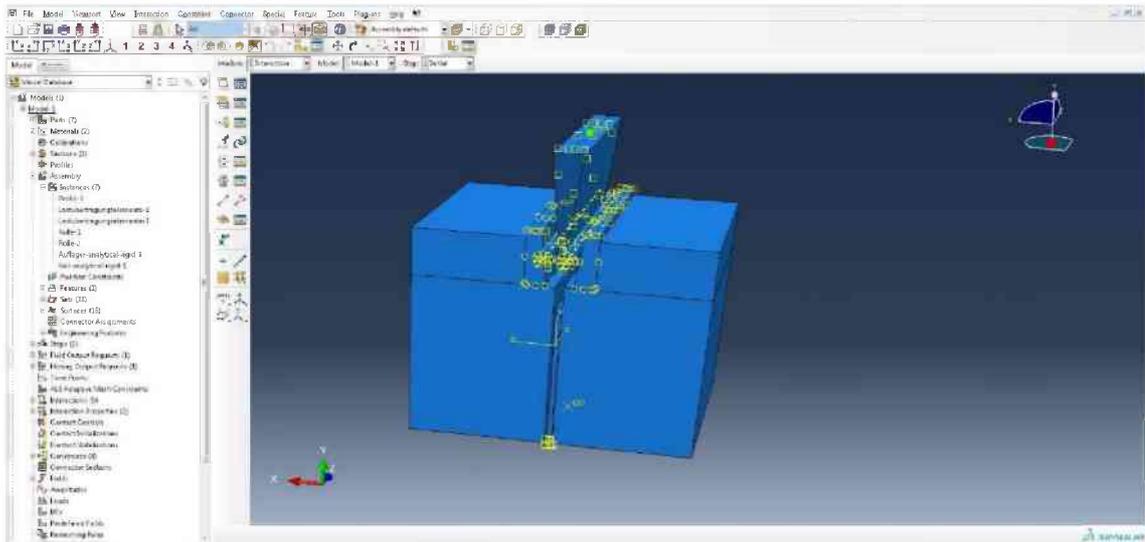
Einen neuen Surface-to-Surface contact erstellen und mit Lastübertragungselement-Probe-1-links benennen. Anschließend die rückseitige Fläche des Lastübertragungselements als First surface auswählen.



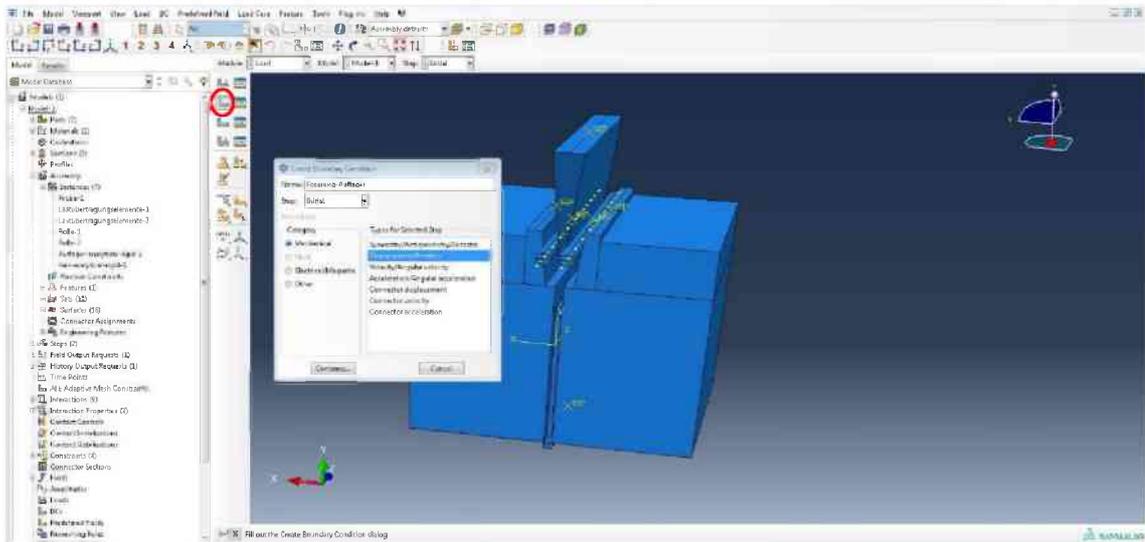
Als Second surface die direkt an das Lastelement grenzende, vertikale Fläche der Kerbe wählen. Die Penalty contact method und Stahl zu Gestein als Contact interaction property verwenden.



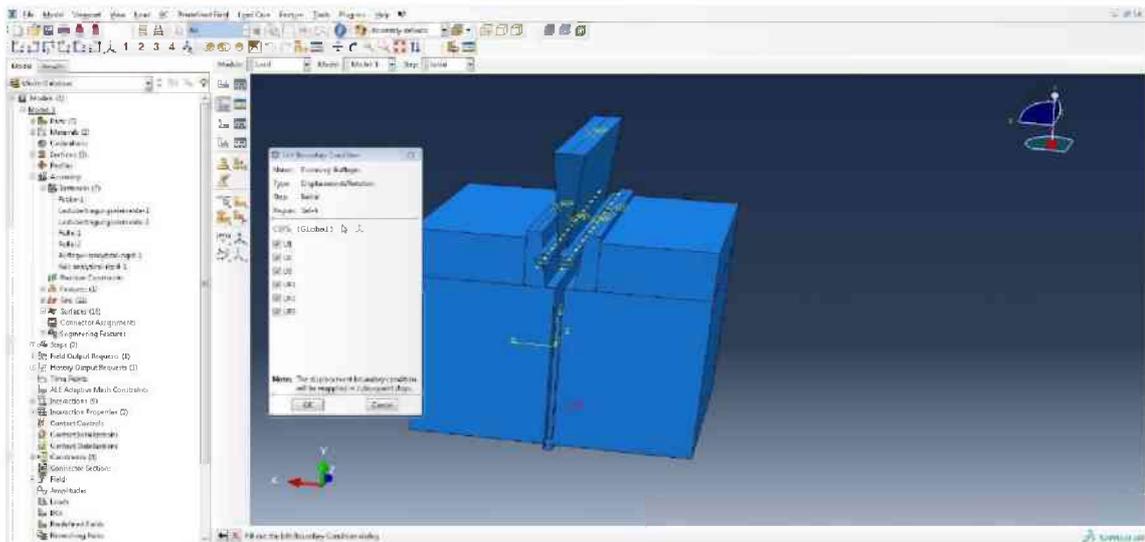
Einen Surface-to-Surface contact mit Namen Lastübertragungselement-Probe-2-links erstellen. Die Unterseite des Lastübertragungselements als First surface und die linke Bodenseite der großen Kerbe als Second surface auswählen. Um die Unterseite des Lastübertragungselements auswählen zu können muss zuerst eine Seitenwand mit dem Remove-Selected-Tool entfernt werden.



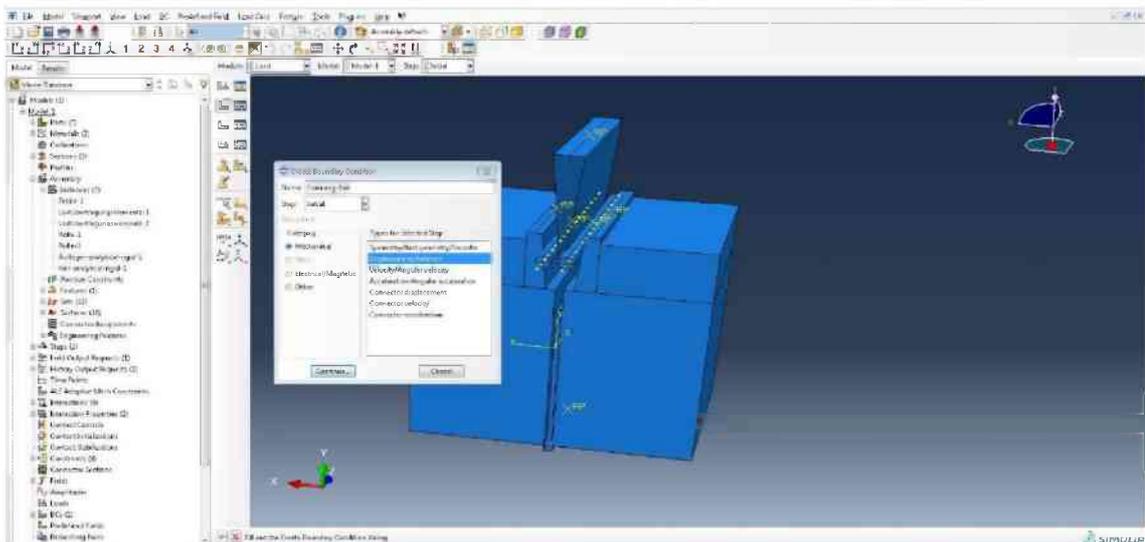
Alle beschriebenen Vorgänge sind sinngemäß für die rechte Seite zu wiederholen.



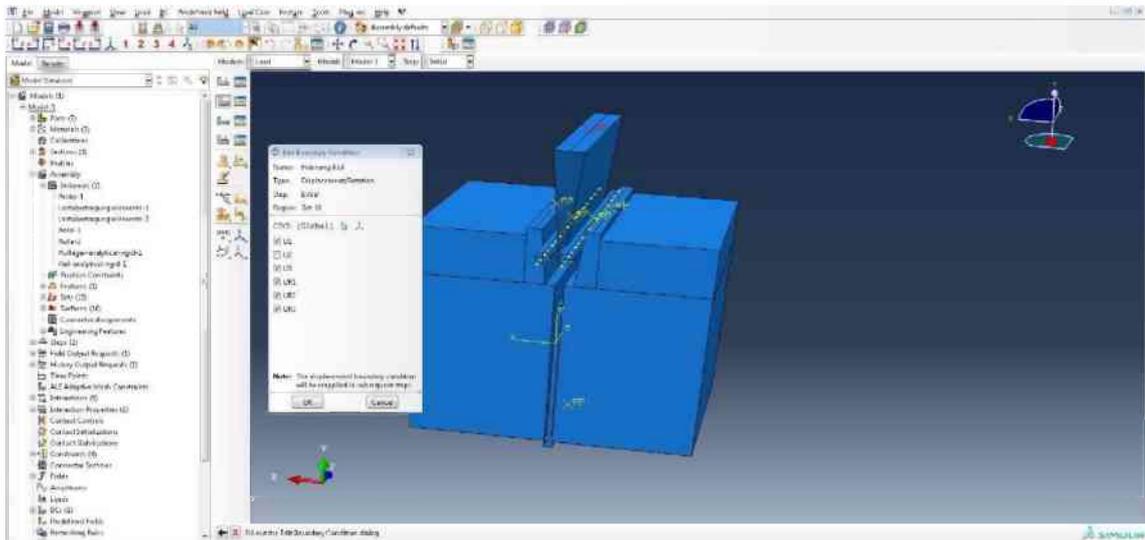
In das Modul Load wechseln. Auf Create-Boundary-Condition (rote Ellipse) drücken und den Step Initial und Displacement/Rotation auswählen. Benennen mit Fixierung-Auflager. Danach Continue drücken.



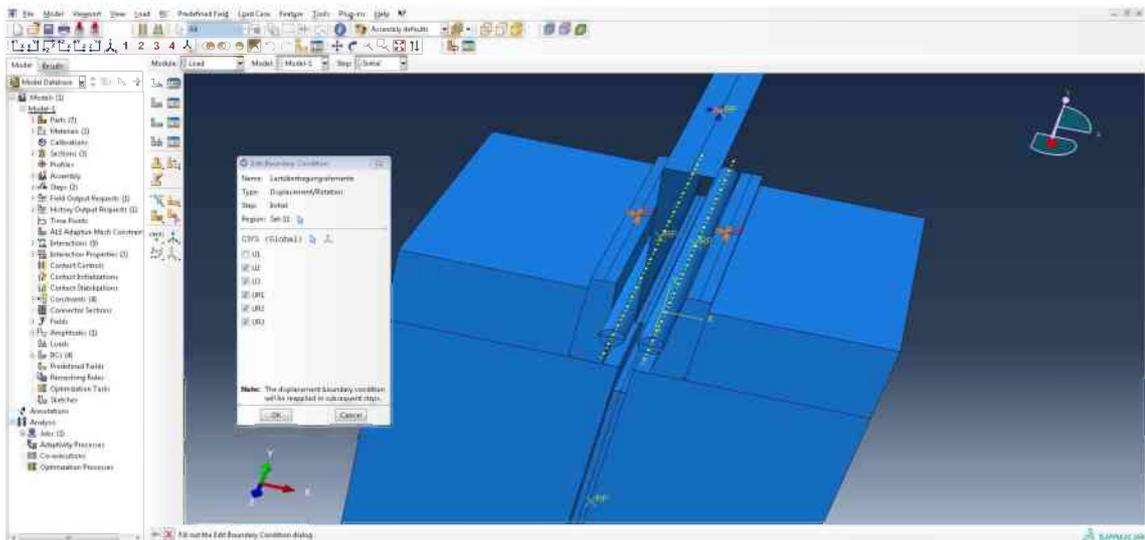
Den Referenzpunkt des Auflagers auswählen, mit Done bestätigen und dann alle Punkte auswählen und mit OK bestätigen.



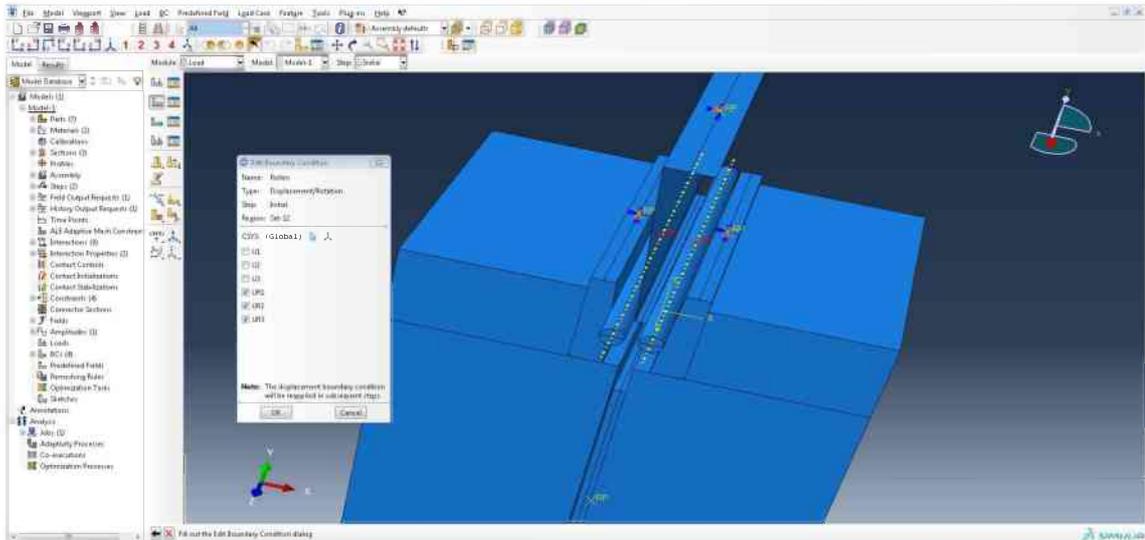
Erneut auf Create-Boundary-Condition drücken, Name ist Fixierung-Keil, Step ist Initial, Displacement/Rotation auswählen, danach Continue drücken.



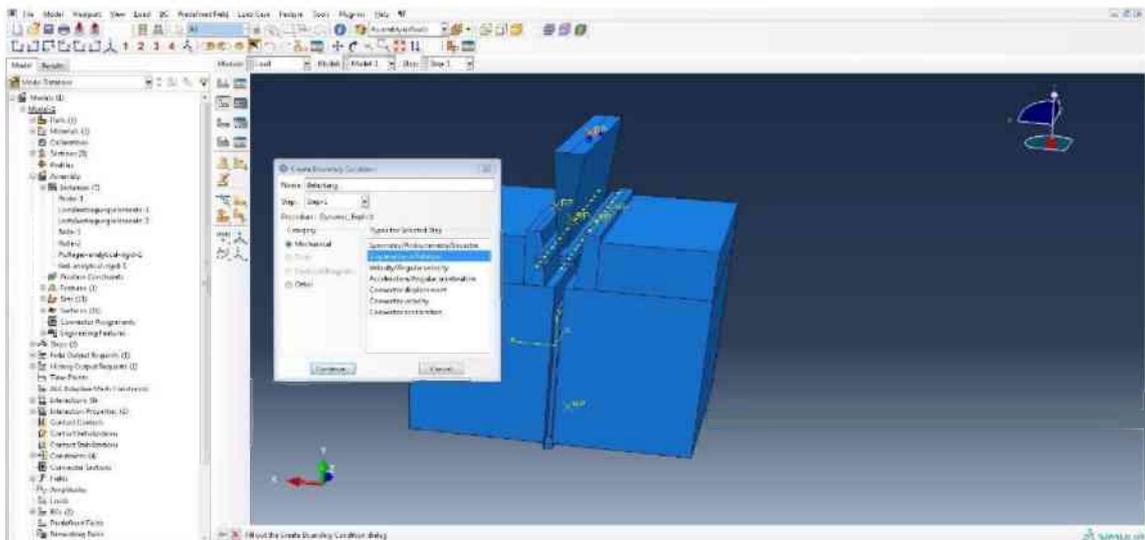
Den Referenzpunkt des Keils auswählen und alle Punkte bis auf U2 ankreuzen. Mit OK bestätigen.



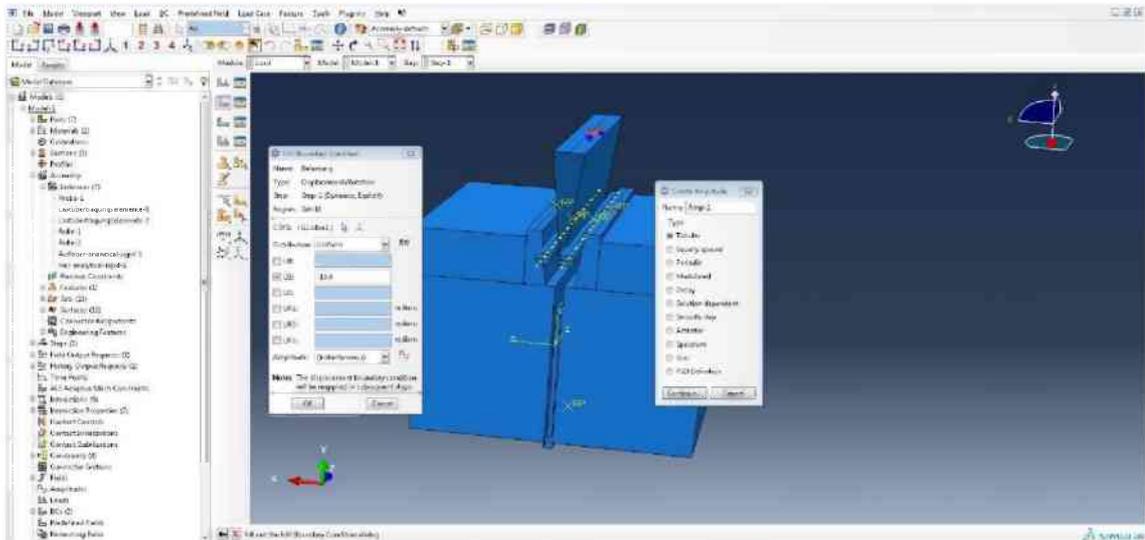
Create-Boundary-Condition anklicken, Step Initial und Displacement/Rotation wählen und mit Lastübertragungselemente benennen. Continue und anschließend die beiden Referenzpunkte der Lastübertragungselemente auswählen und mit Done bestätigen. Alle Punkte bis auf U1 anklicken und OK drücken.



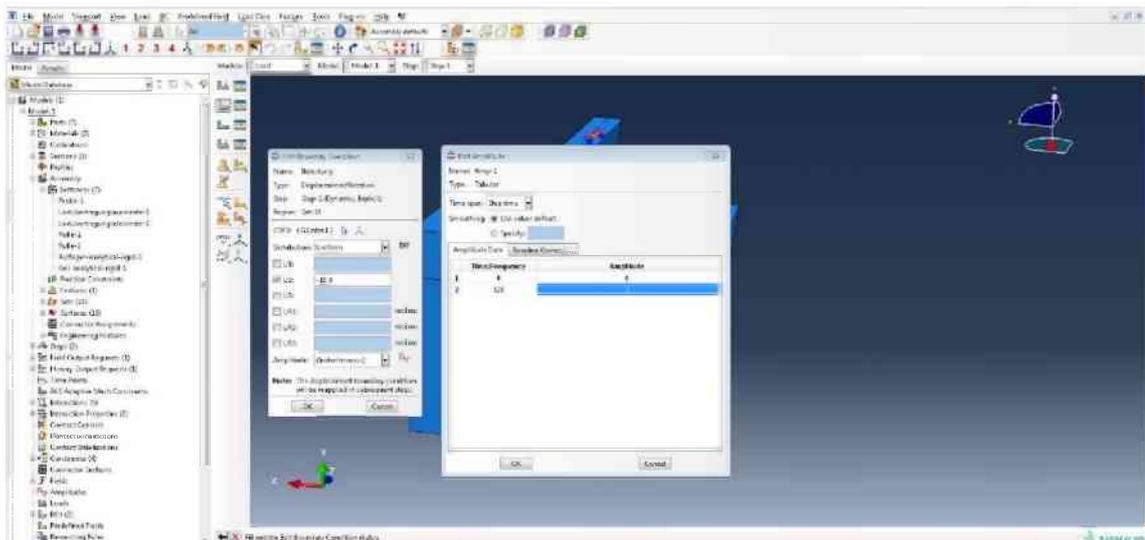
Create-Boundary-Condition anklicken, Step Initial und Displacement/Rotation wählen und mit Rollen benennen. Continue und anschließend die beiden Referenzpunkte der Rollen auswählen und mit Done bestätigen. UR1, UR2 und UR3 anklicken und OK drücken.



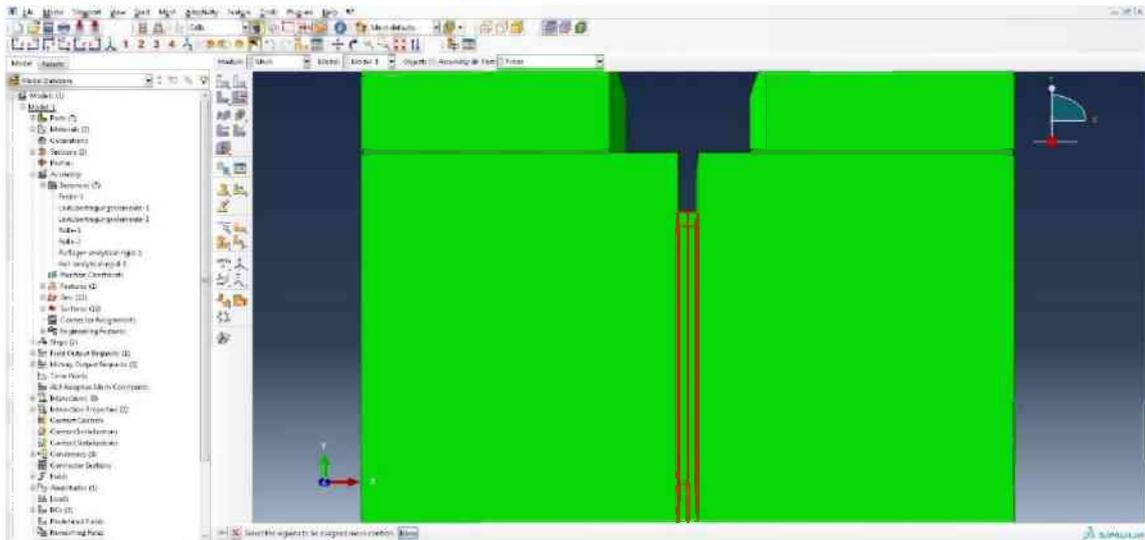
Create-Boundary-Condition drücken, Step 1 und Displacement/Rotation auswählen. Benennen mit Belastung und wieder den Referenzpunkt des Keils auswählen.



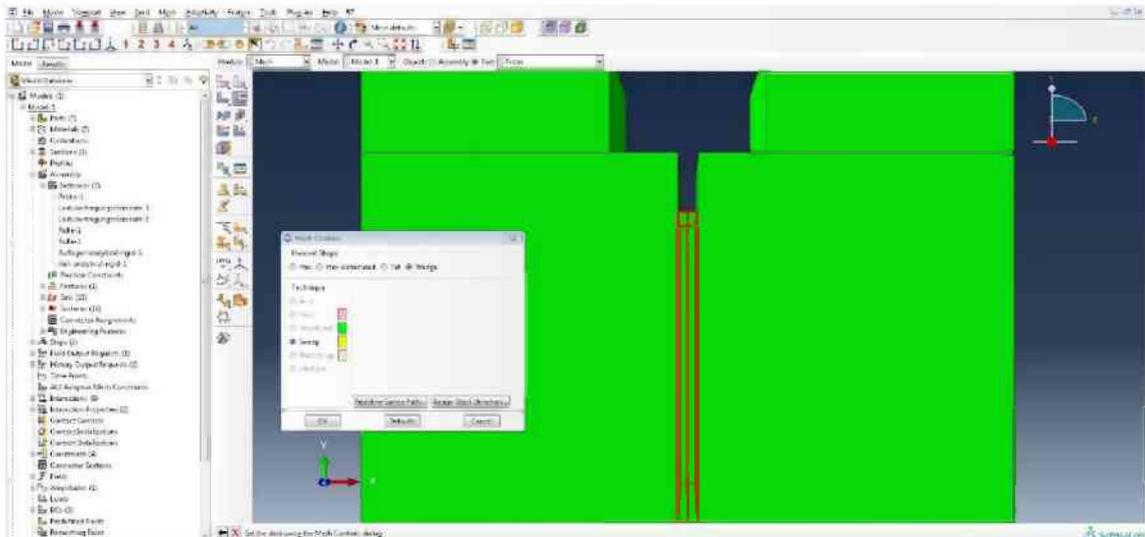
Das U2 Kästchen ankreuzen und -10,0 eingeben. Danach bei Amplitude die sinusförmige Graphik anklicken und Tabular auswählen, dann Continue drücken.



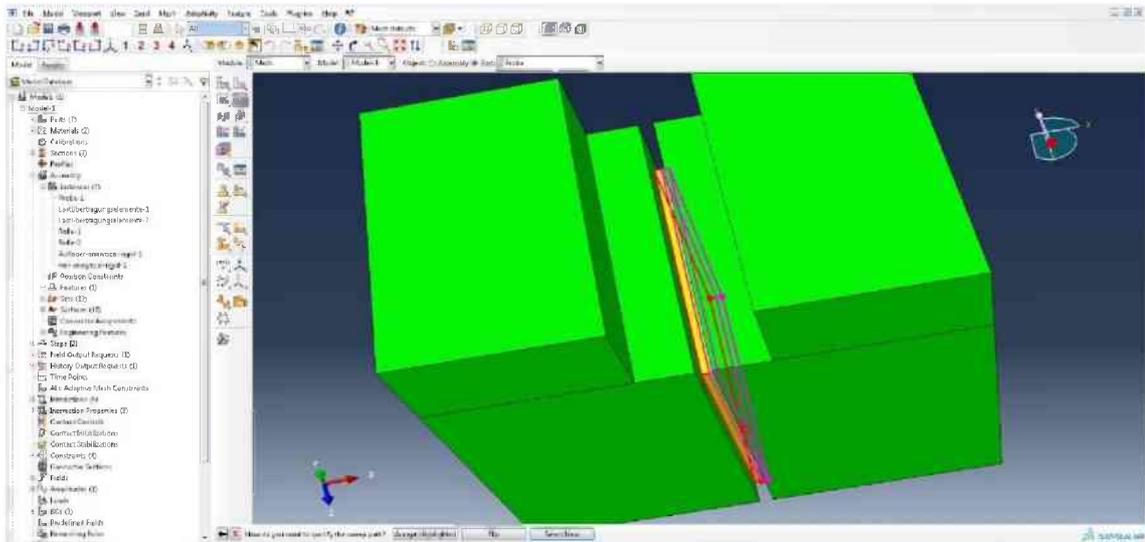
In die Graphik links oben 0 und links unten 120 eingeben. Rechts oben ebenfalls 0 und rechts unten 1 eingeben. Jeweils mit OK bestätigen.



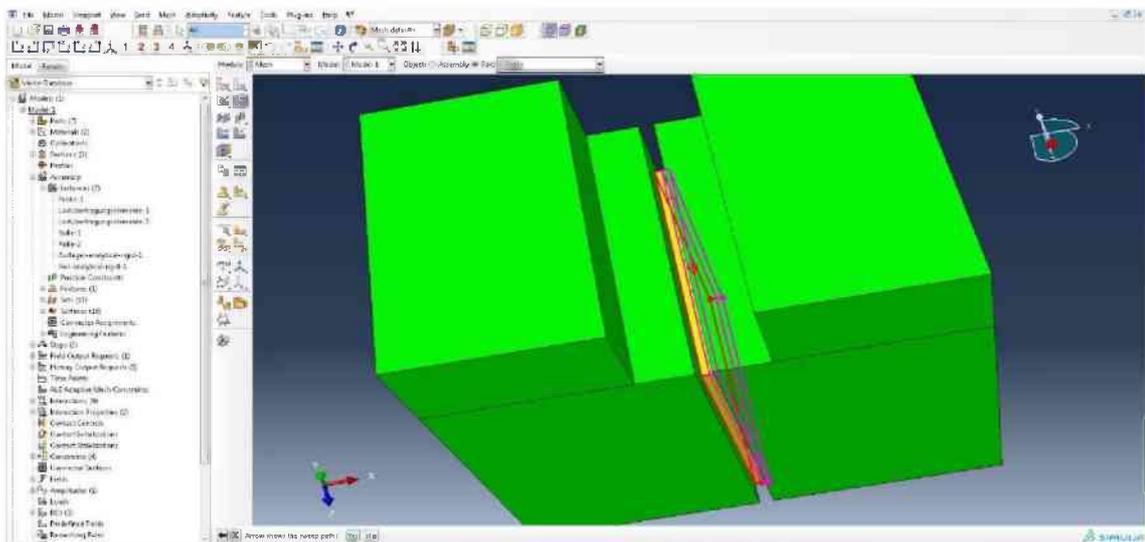
In das Modul Mesh wechseln, mittig-oben von Assembly auf Part wechseln, Probe auswählen, auf Assign-Mesh-Controls drücken und die beiden rot markierten Teile auswählen, mit Done bestätigen.



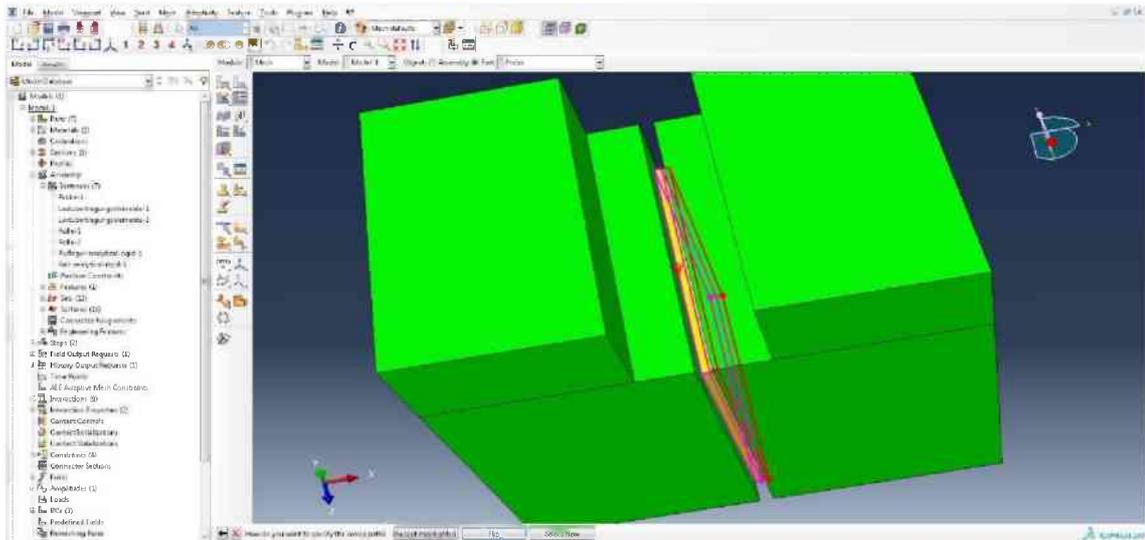
Wedge auswählen und dann auf Redefine Sweep Path klicken.



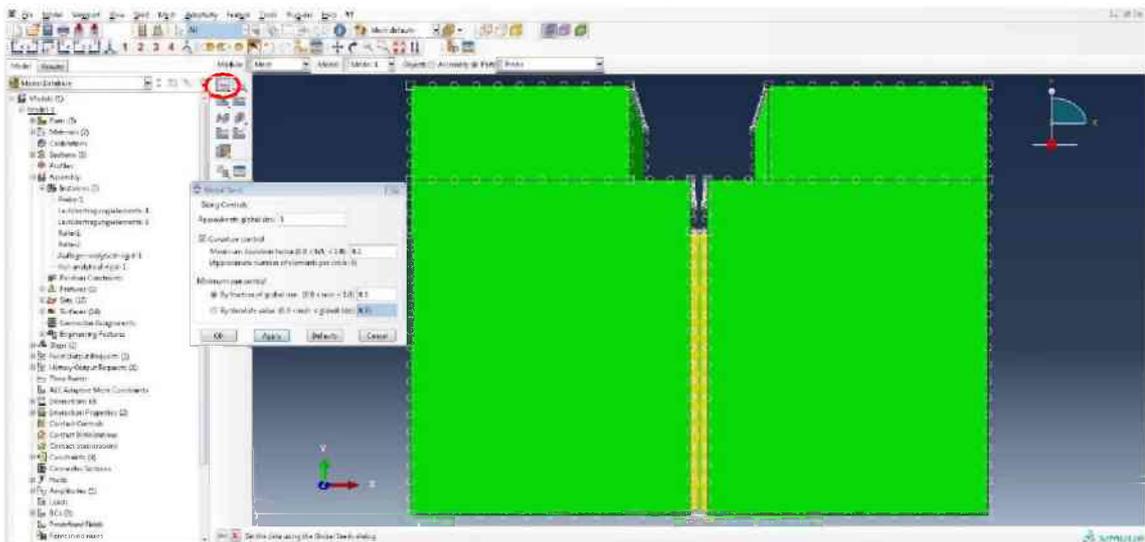
Select New wählen und dann auf die obere rechte Kante klicken, daraufhin erscheint ein Pfeil.



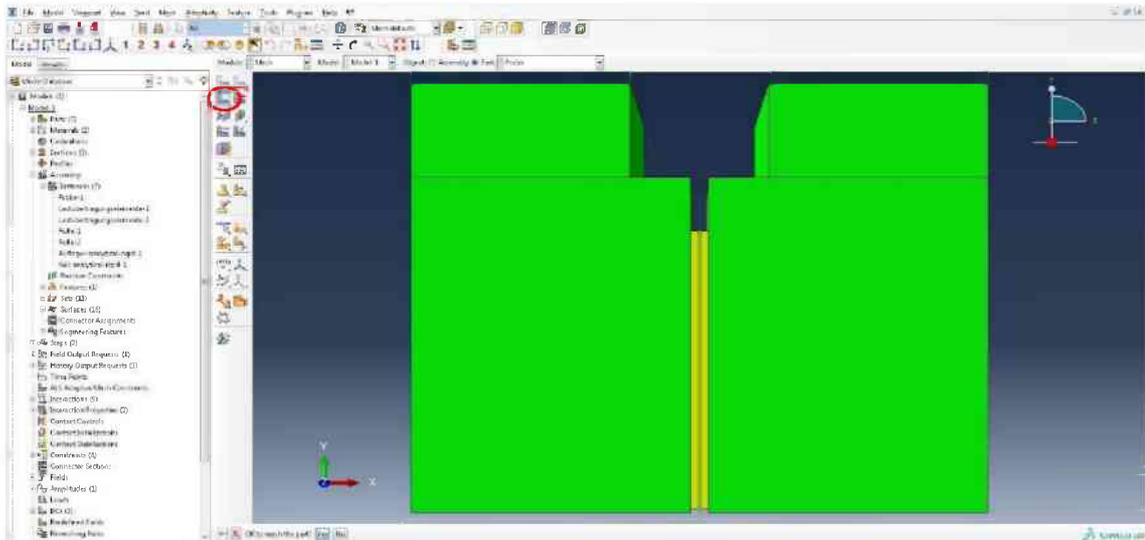
Der Pfeil muss aus der Ebene heraus zeigen. Ansonsten Flip drücken. Mit Yes bestätigen. Der Pfeil muss nun auf die andere Seite „hüpfen“.



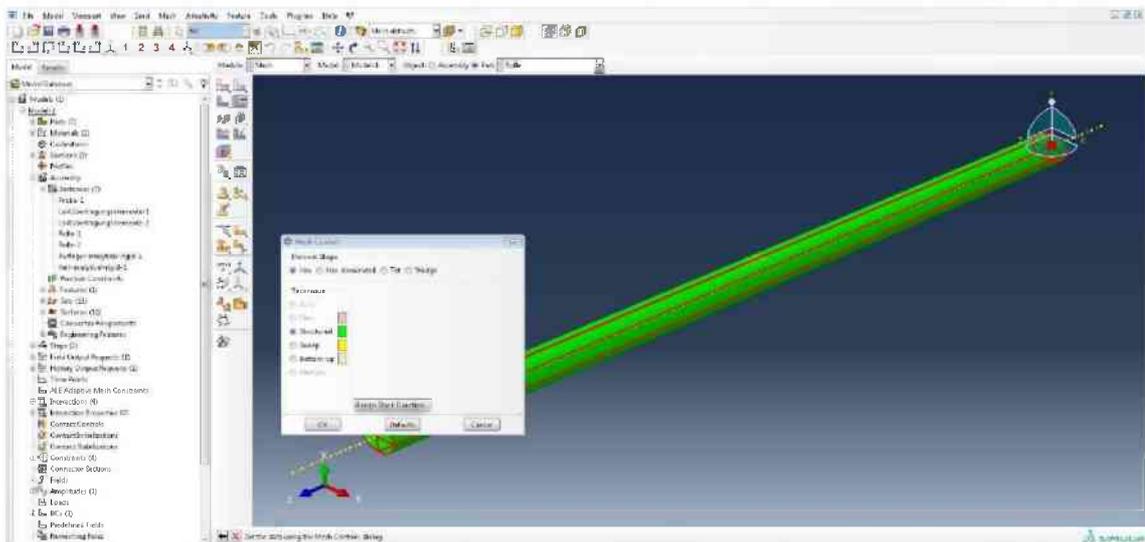
Der Pfeil soll in dieselbe Richtung zeigen wie auf der anderen Seite. Ansonsten mit Flip die Richtung des Pfeils drehen. Dann bestätigen.



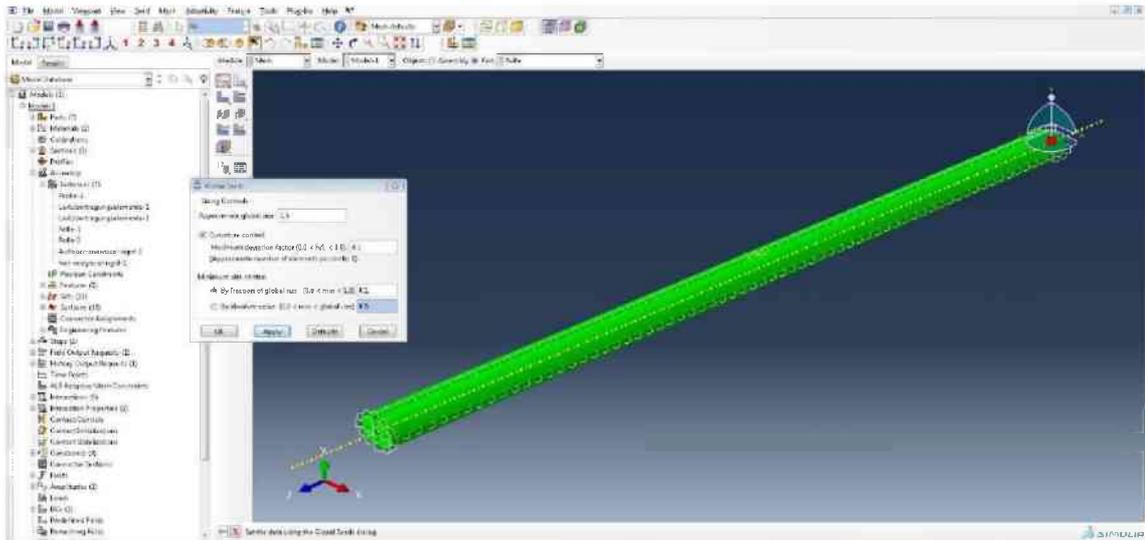
Auf Seed-Part (rote Ellipse) klicken und für Approximate global size 3 eingeben, dann zuerst mit Apply und anschließend mit OK bestätigen.



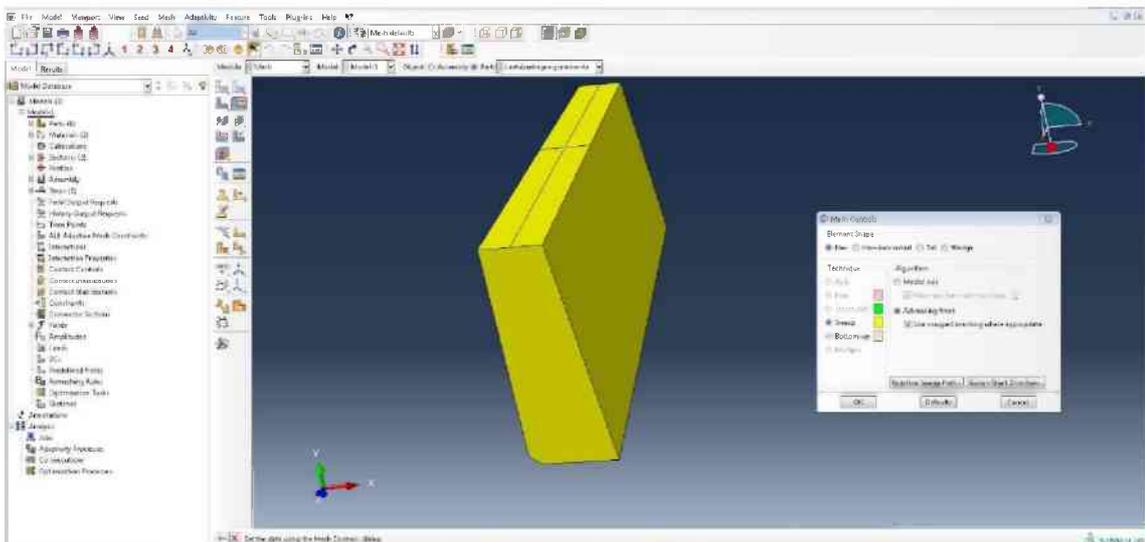
Auf Mesh-Part (rote Ellipse) klicken und mit Yes bestätigen.



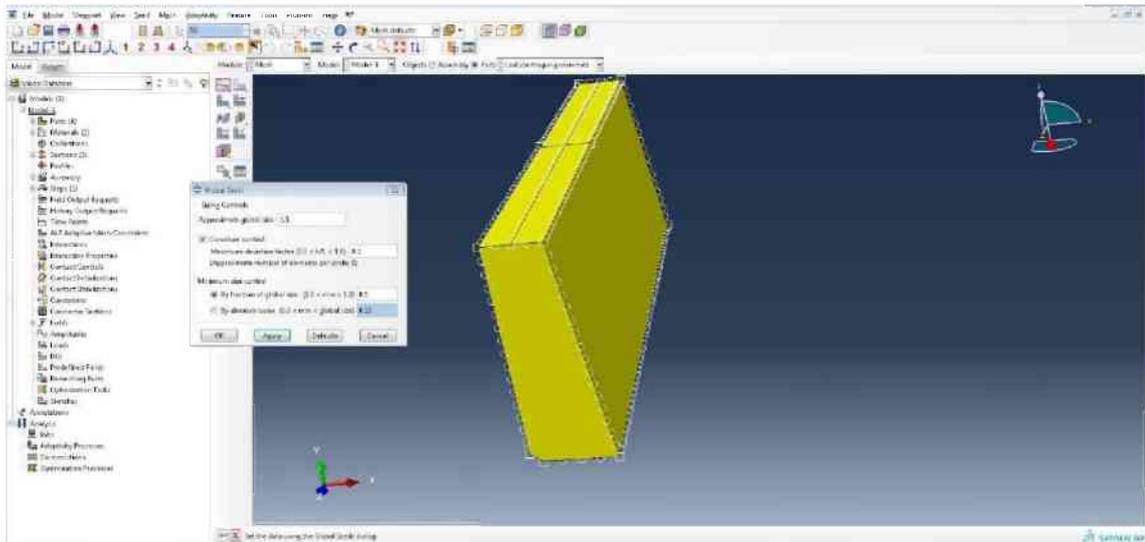
Auf den Part Rolle wechseln, Assign-Mesh-Controls drücken und die ganze Rolle auswählen, mit Done bestätigen. Auf Hex klicken und Structured auswählen.



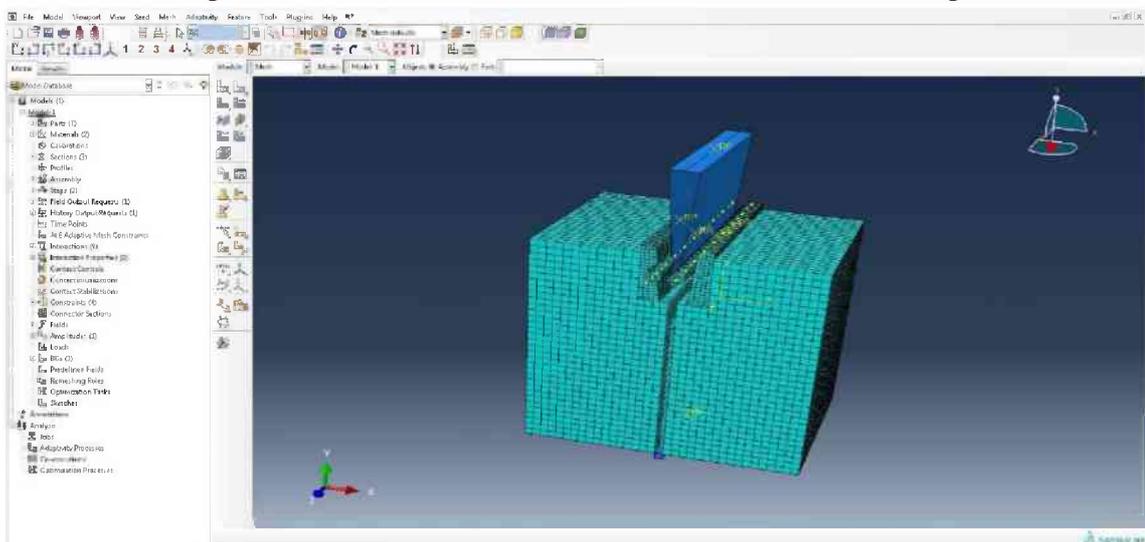
Auf Seed-Part klicken, bei Approximate global size 1,5 eingeben und dann mit Apply und OK bestätigen. Danach auf Mesh-Part klicken und mit Yes bestätigen.



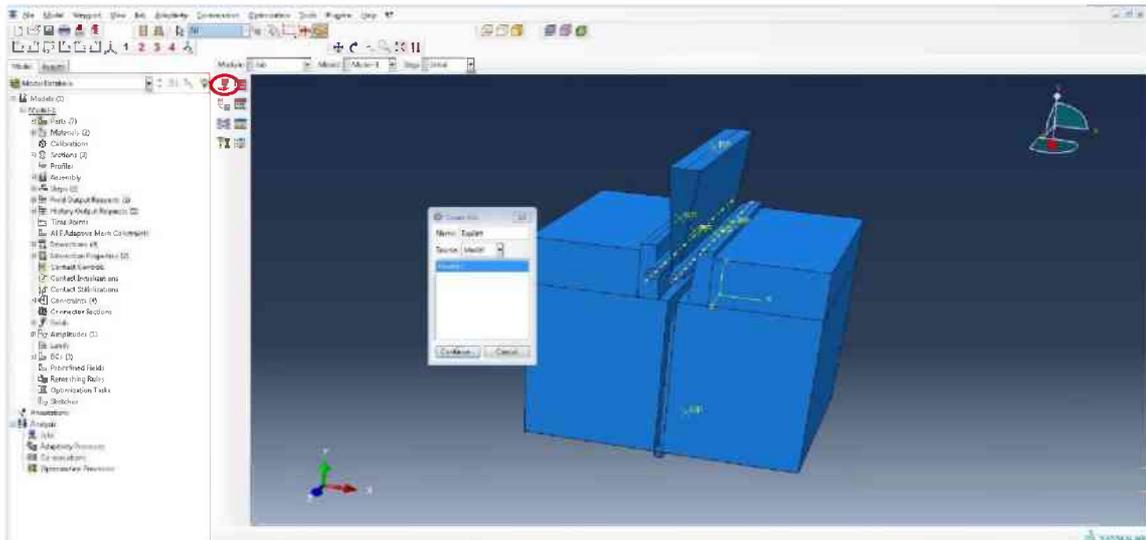
Auf den Part Lastübertragungselemente wechseln, auf Assign-Mesh-Controls drücken und den ganzen Part auswählen, mit Done bestätigen. Auf Hex klicken und Sweep auswählen und mit OK bestätigen.



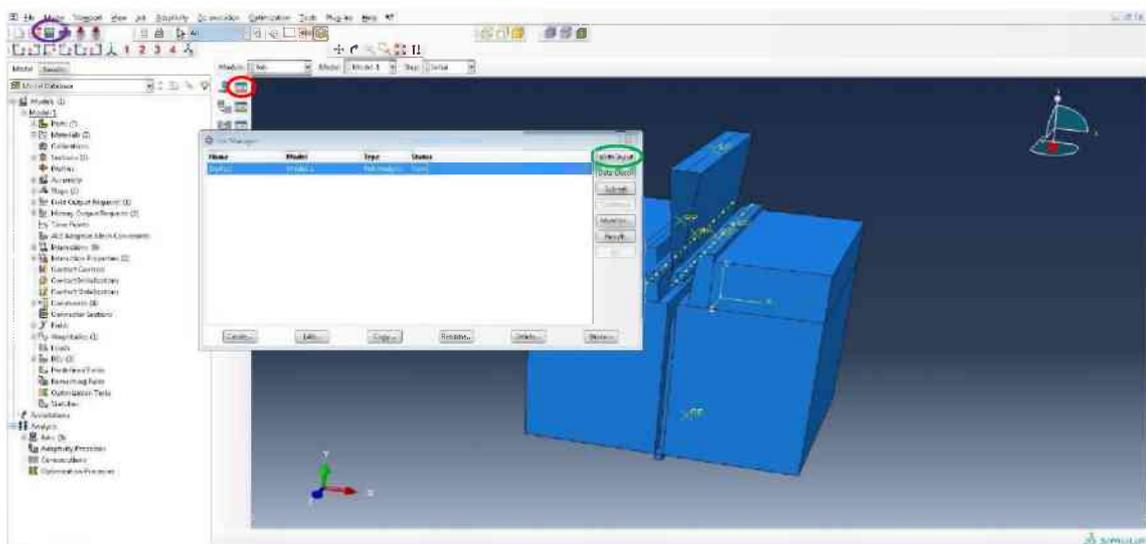
Auf Seed-Part klicken und bei Approximate global size 1,5 eingeben und mit Apply und OK bestätigen. Danach auf Mesh-Part klicken und mit Yes bestätigen.



Von Part auf Assembly wechseln um das gesamte Modell zu betrachten.



In das Modul Job wechseln, auf Create-Job klicken (rote Ellipse) und Explizit benennen. Auf Continue klicken und im nächsten Fenster auf OK klicken.



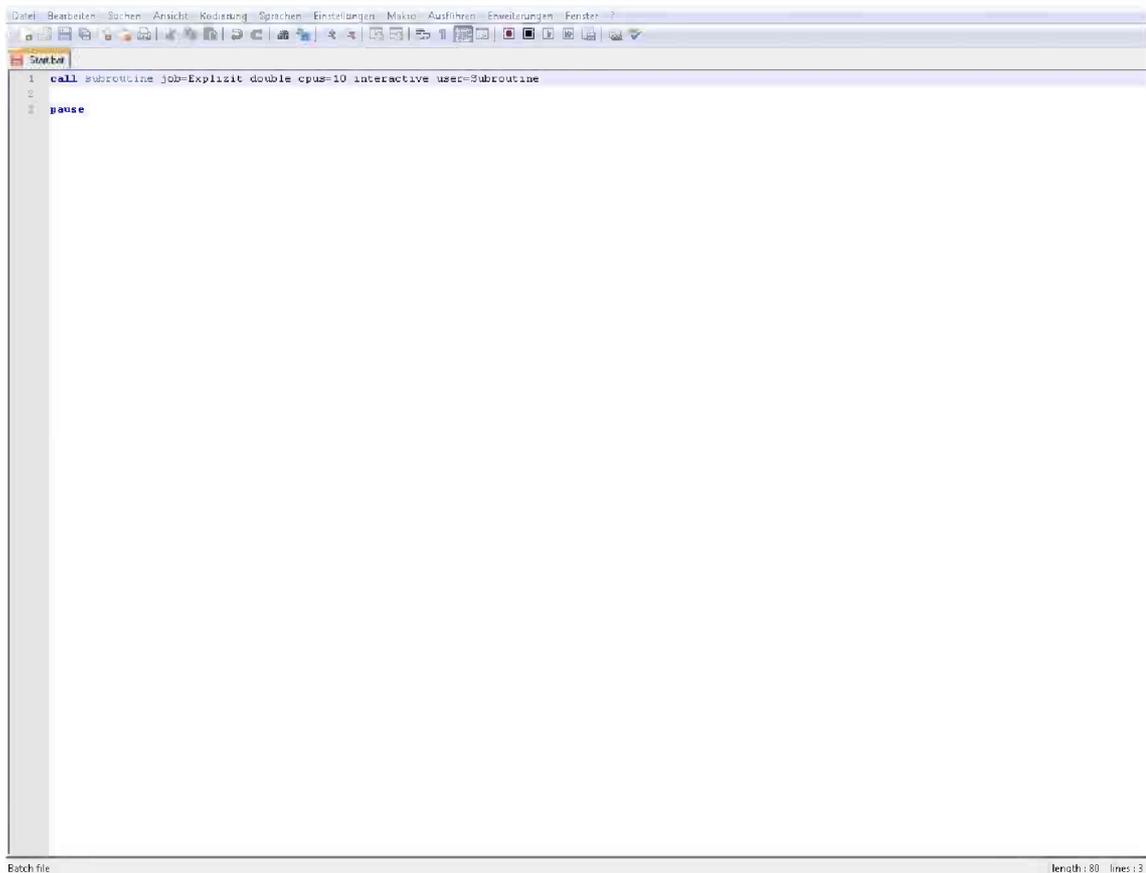
Auf Job-Manager (rote Ellipse) klicken und den Job auswählen. Anschließend auf Write Input (grüne Ellipse) klicken. Speichern des CAE-Files (violette Ellipse) und Fenster minimieren.

```

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
**
** MATERIALS
**
*Material, name=Granit
*Density
2.66e-09,
*Depvar, delete=1
5
1, Status, "Status"
2, s11, "s11"
3, s22, "s22"
4, s33, "s33"
5, PEEQT, "PEEQT"
*User Defined Field
*Elastic
60000., 0.28
*Concrete Damaged Plasticity
10., 0.1, 1.13, 0.66667, 0.
*Concrete Compression Hardening
150.6, 0.
14., 0.1
1.5, 10.
*Concrete Tension Stiffening, type=GFI
8.54, 0.188
*Concrete Compression Damage
0., 0.
0.91, 0.1
0.99, 10.
*Concrete Tension Damage
0., 0.
*Material, name=Korund
*Density
7.85e-09,
*Elastic
210000., 0.3
*Material, name=Stahl
*Density
7.85e-09,
*Elastic
210000., 0.25
**
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name="Stahl zu Gestein"
*Friction
0.35,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
*Surface Interaction, name="Stahl zu Stahl"
*Friction
0.00075,

```

Die Datei mit Namen Explizit und der Endung .inp öffnen und fast bis zum Ende der Datei scrollen um im Unterpunkt MATERIALS exakt die angezeigten Daten einzufügen und zu speichern. Das Explizit.inp-File schließen. (Dargestellt ist Granit, für Sandstein sinngemäß übernehmen)

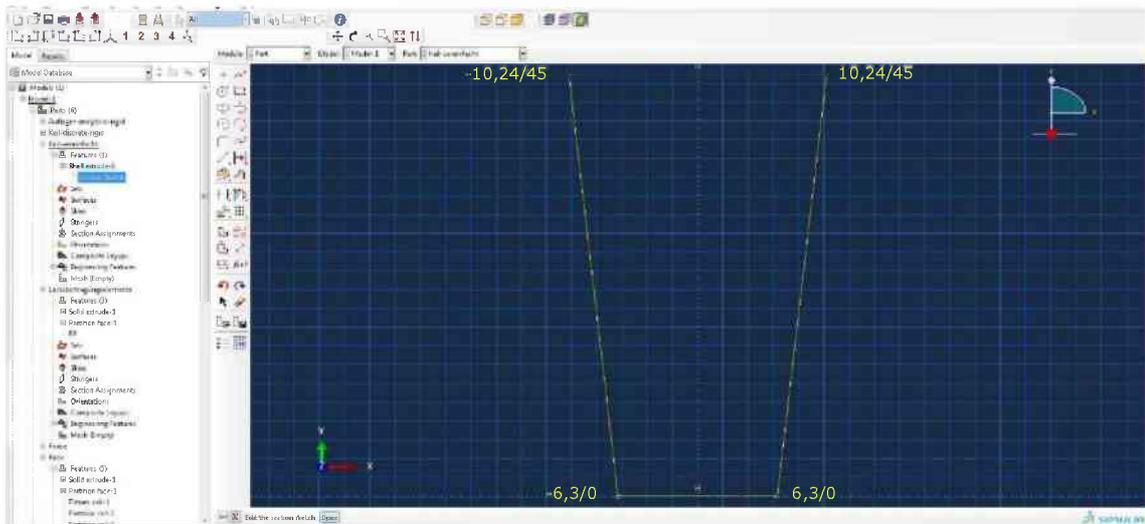


```
1 call subroutine job=Explizit double cpus=10 interactive user=Subroutine
2
3 pause
```

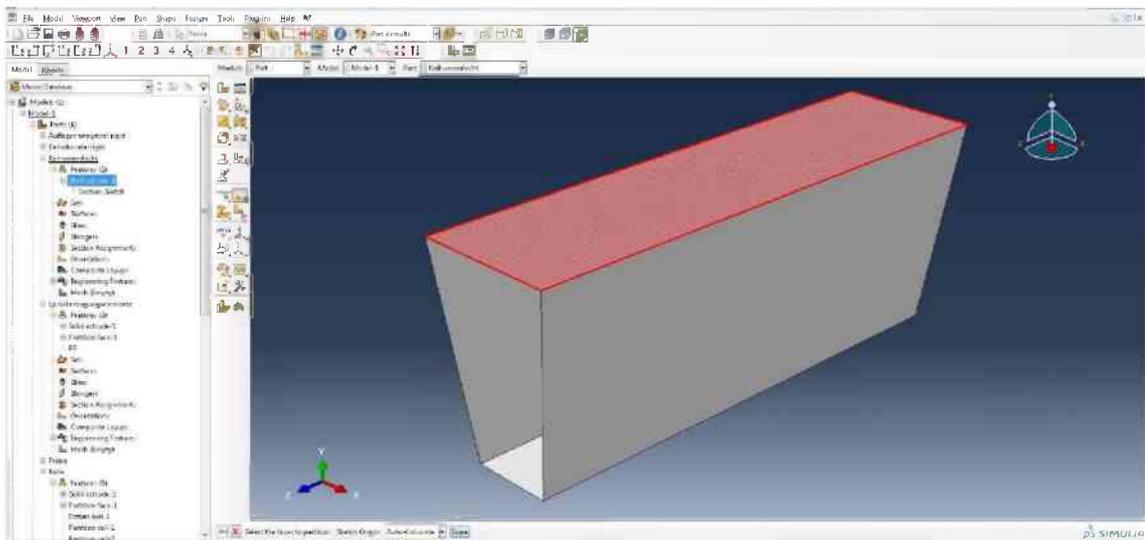
Eine Textdatei erstellen und den dargestellten Text übertragen. Dann unter Start speichern und die Textdatei schließen. Die Endung von .txt auf .bat ändern und zur Kontrolle mit dem Notepad öffnen (obige Abbildung). Schließen und mit einem Doppelklick auf die Start.bat-Datei die Berechnung starten.

6.3 Implizites Modell

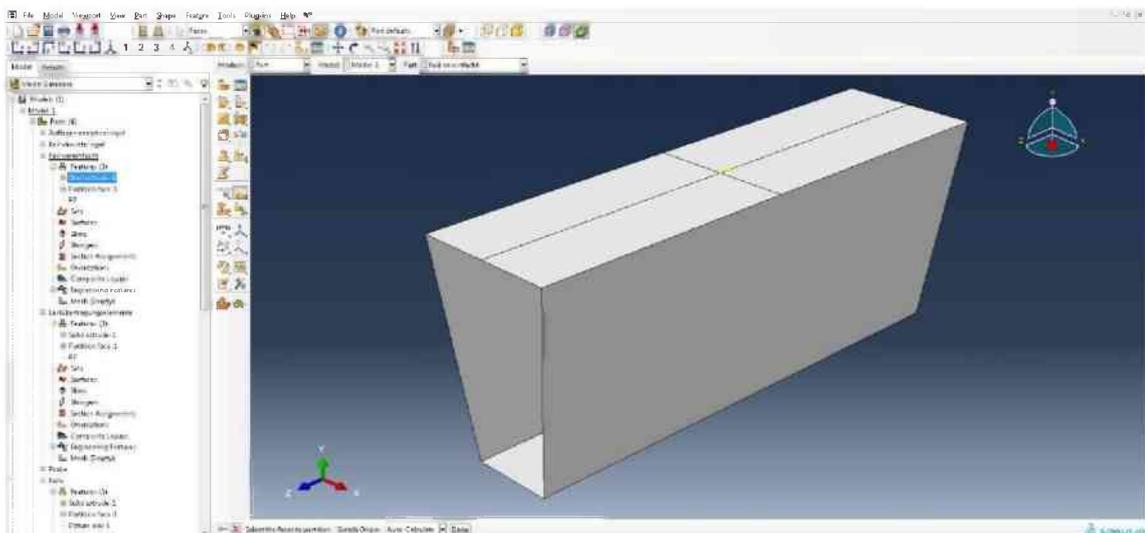
Viele Schritte sind jenen des expliziten Modells ähnlich, weshalb nachfolgend nur noch auf die zum expliziten Modell unterschiedlichen Aufbauschritte näher eingegangen wird.

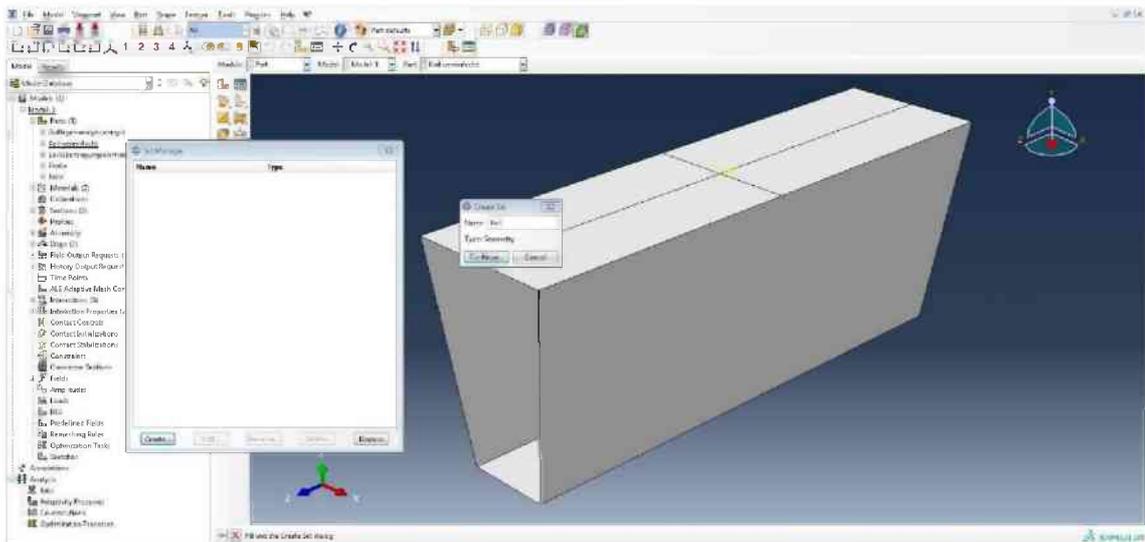


Erstellen eines Parts mit Namen Keil-vereinfacht und den Eigenschaften 3D, Discrete rigid, Shell und Extrusion. Erstellen der Geometrie und extrudieren auf 75,0.

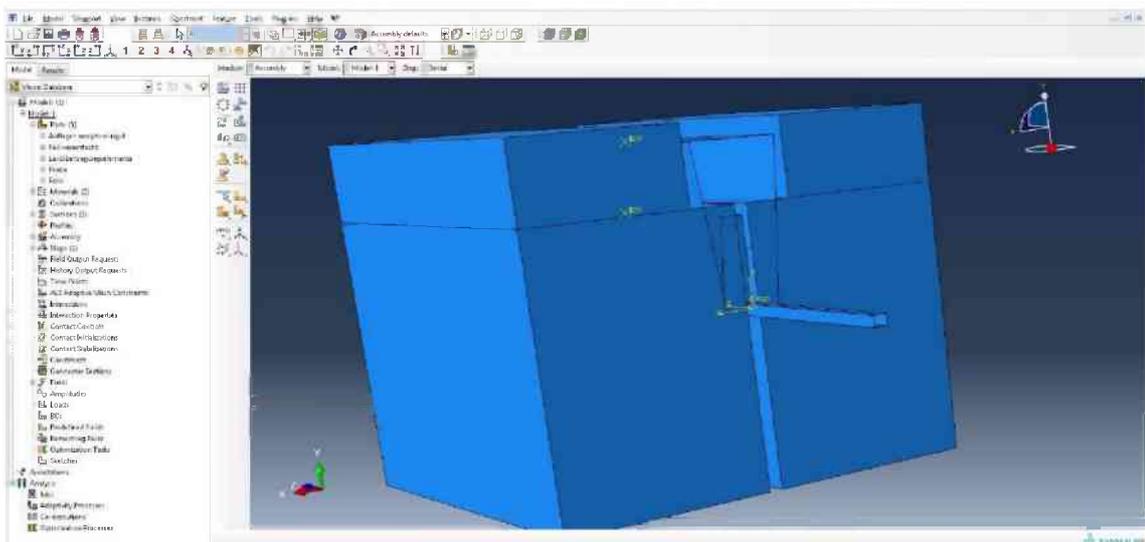


Mit Partition-Face die obere Fläche des Keils markieren und in Längs- und Querrichtung jeweils mittig eine Linie erstellen. Im Anschluss dem Mittelpunkt einen Referenzpunkt zuweisen.

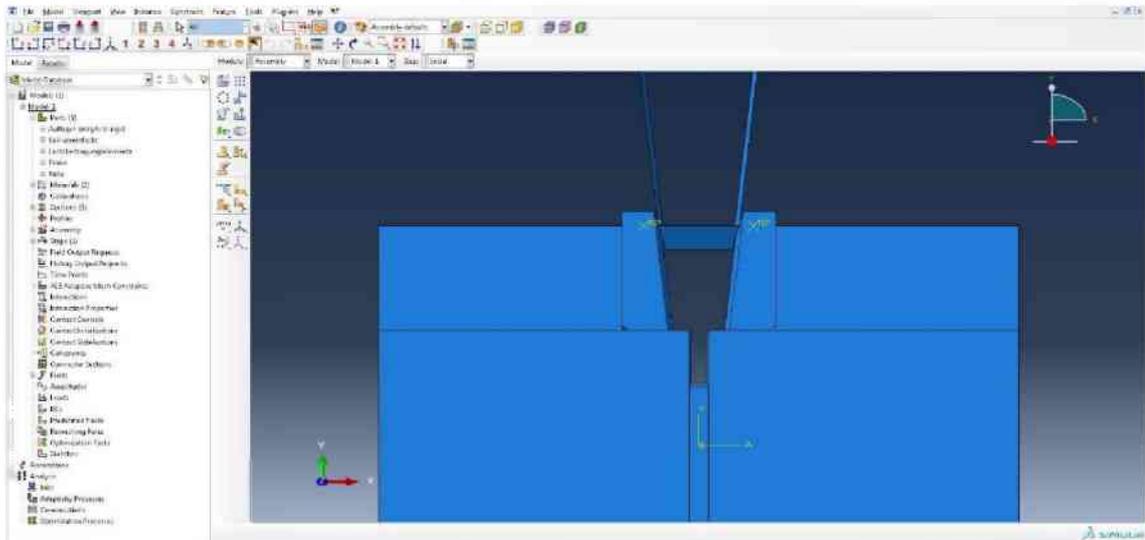




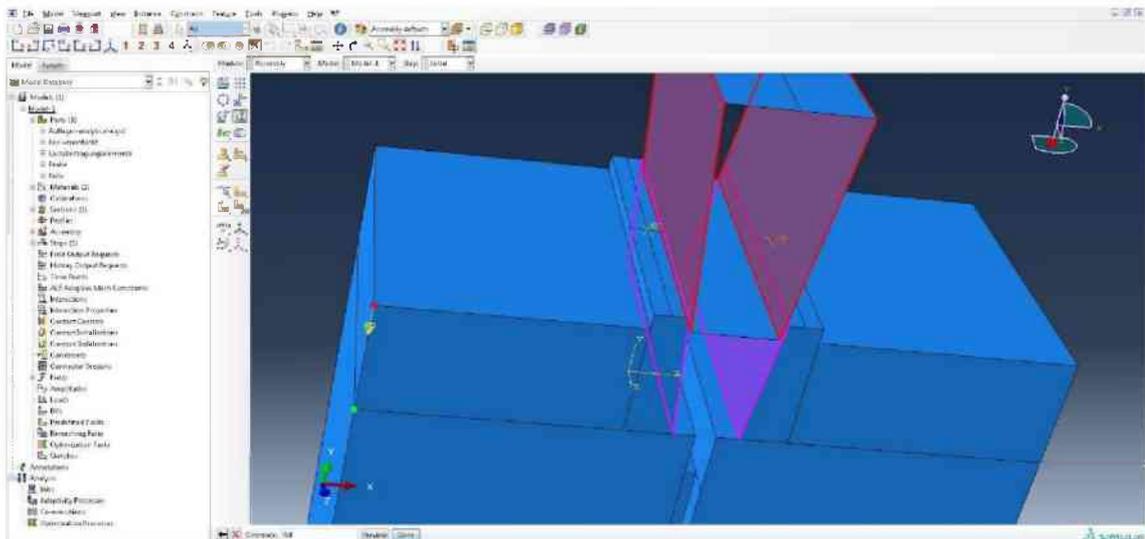
Mit Tools -> Set -> Create ein Set mit Namen Keil erstellen und den Referenzpunkt des Keils auswählen.



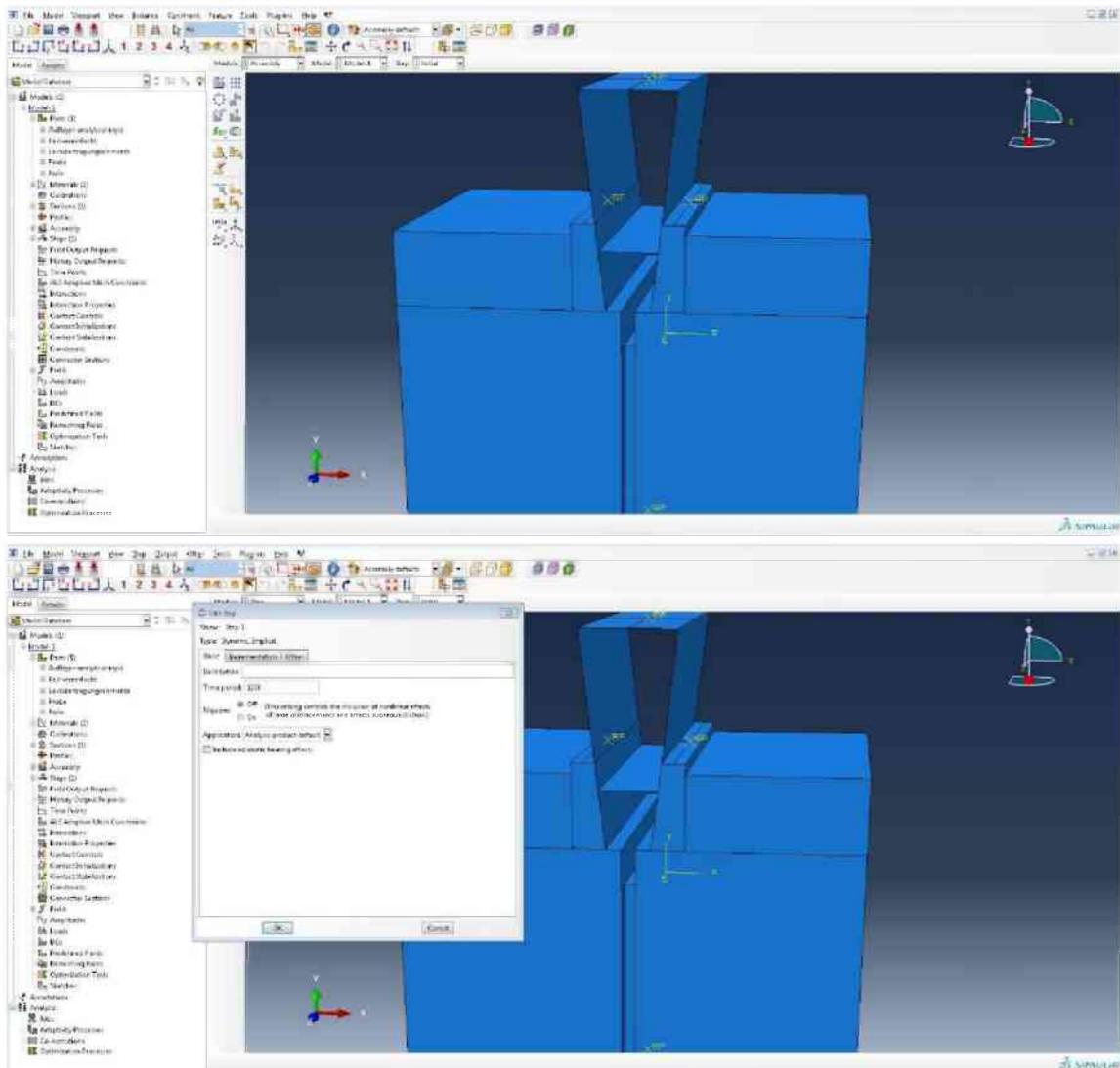
Im Modul Assembly die Probe, das Auflager, zwei Lastübertragungselemente und den Keil einfügen.



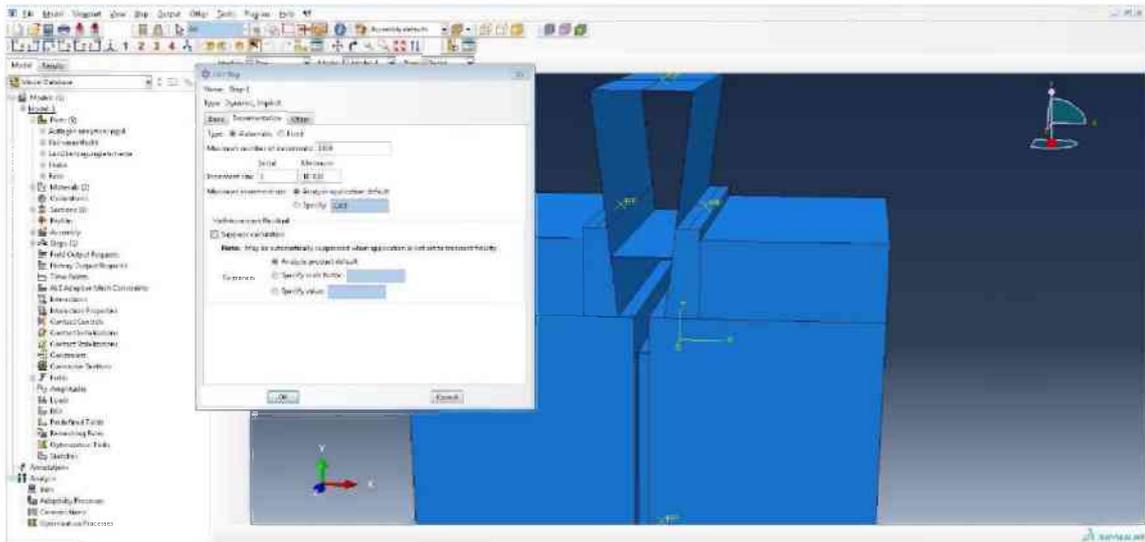
Auf dieselbe Art und Weise wie beim expliziten Modell, das Auflager und die Lastübertragungselemente anordnen. Denn Keil zunächst mittig mit geringem Abstand über den Lastübertragungselementen platzieren.



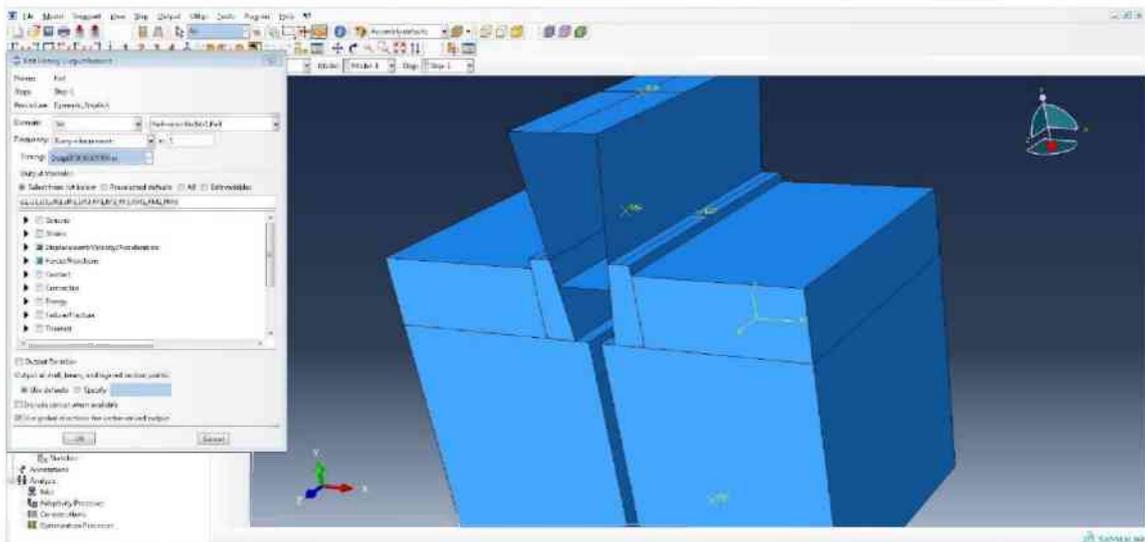
Mit Translate-to zuerst die Seitenflächen des Keils und dann die geneigten Flächen der Lastübertragungselemente markieren, dann den roten und grünen Punkt als Verschiebungsrichtung auswählen und Clearance 0,0 mit Done bestätigen.



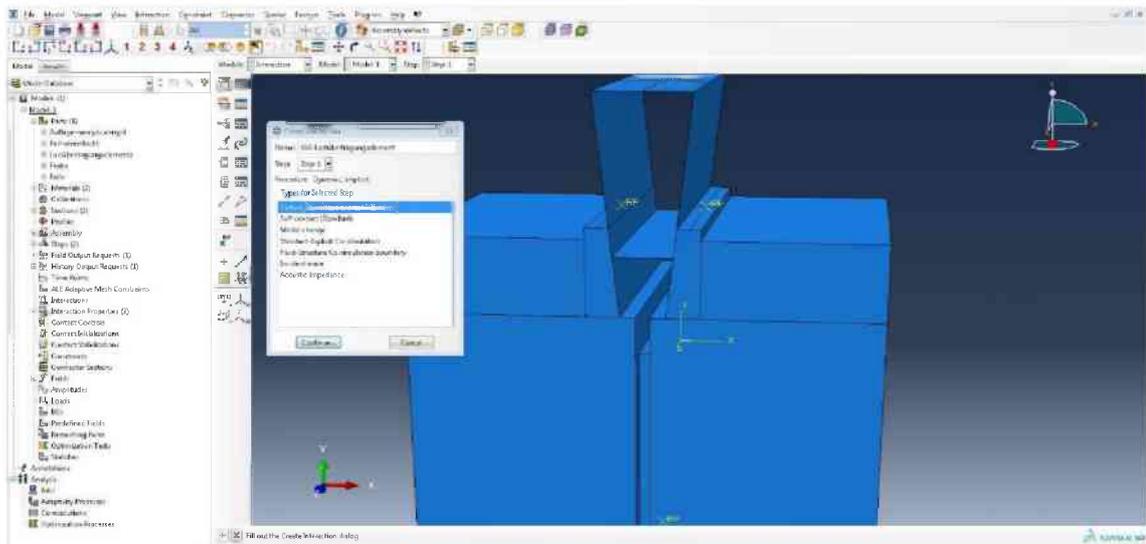
In das Modul Step wechseln, einen neuen Step erstellen, Dynamic, Implizit auswählen, Continue drücken und für die Time period 1200 einfügen.



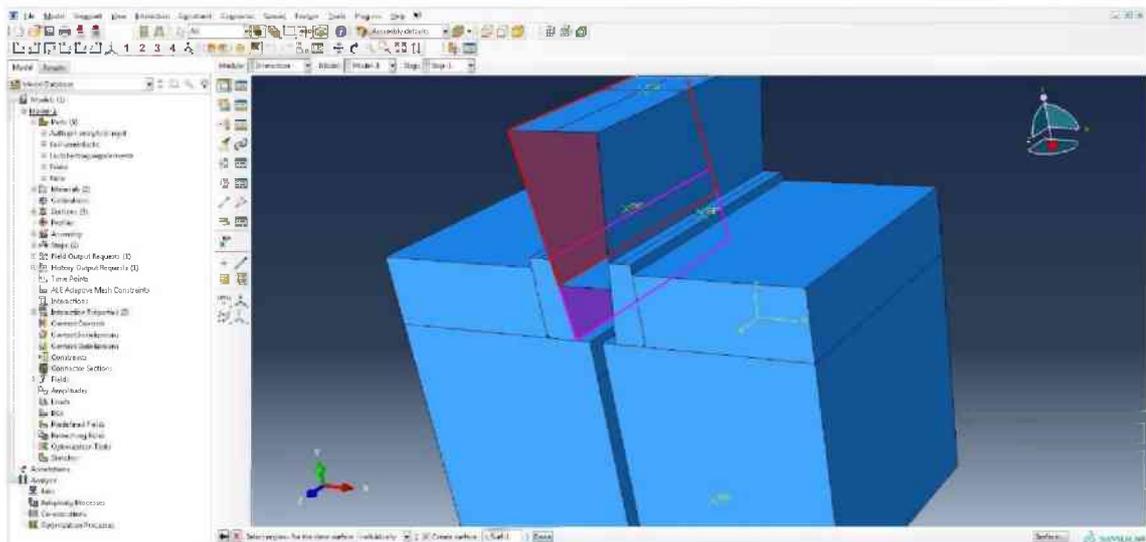
Von Basic zu Incrementation wechseln und für die Maximum number of increments 1000 einstellen, Incremente size Initial 1 und Minimum $1 \cdot 10^{-10}$ eingeben.



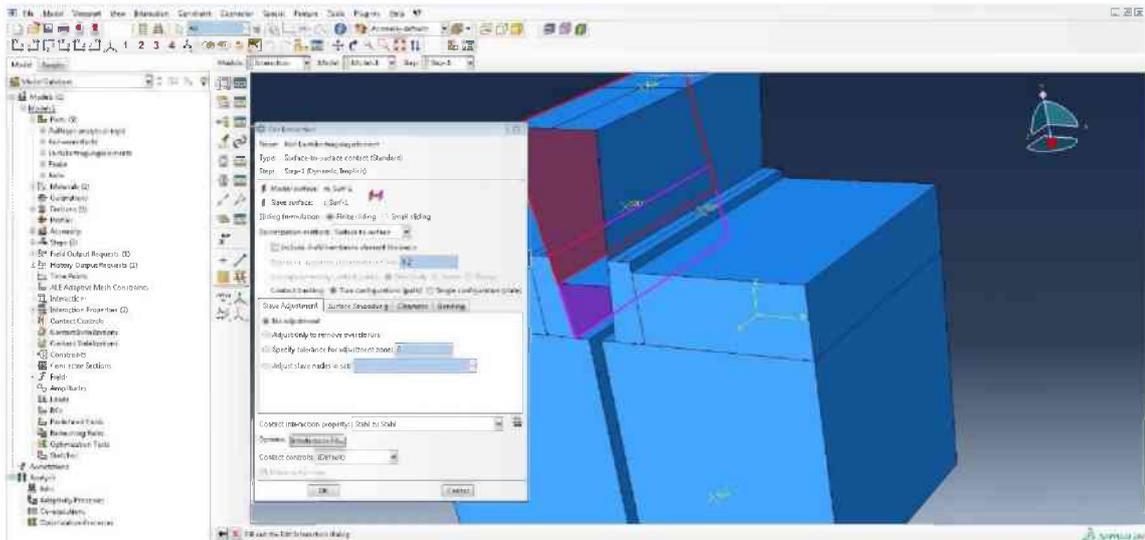
Einen neuen History-Output erstellen, das Set Keil-vereinfacht-1.Keil auswählen, bei Frequency auf Every n increments umstellen und 1 eingeben. Die Größen Displacement/Velocity/Acceleration und Forces/Reactions auswählen. Mit OK bestätigen.



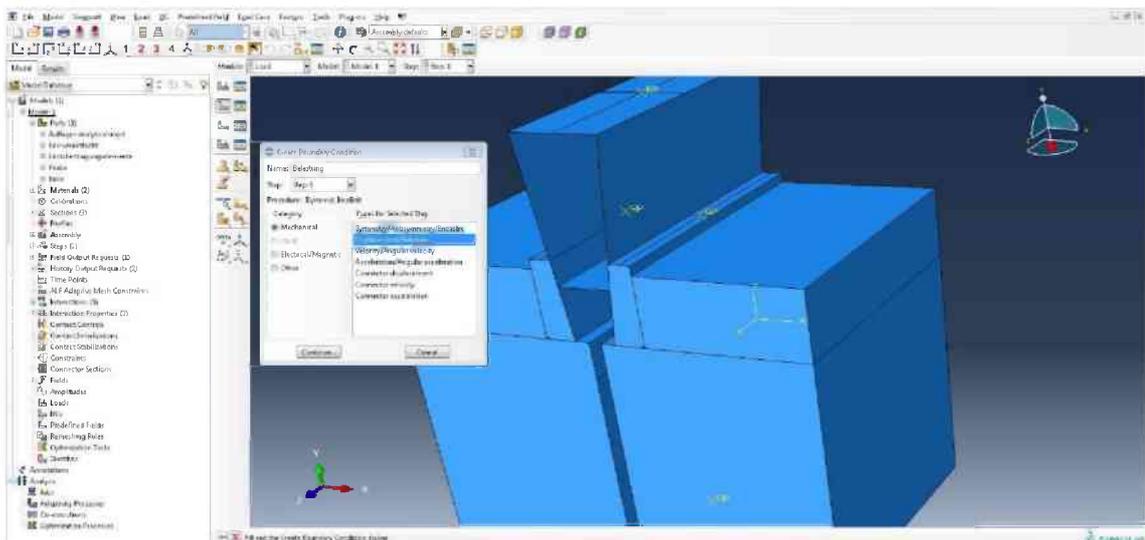
In das Modul Interaction wechseln, eine neue Interaction erstellen, mit Keil-Lastübertragungselement-links benennen und Surface-to-Surface contact auswählen.



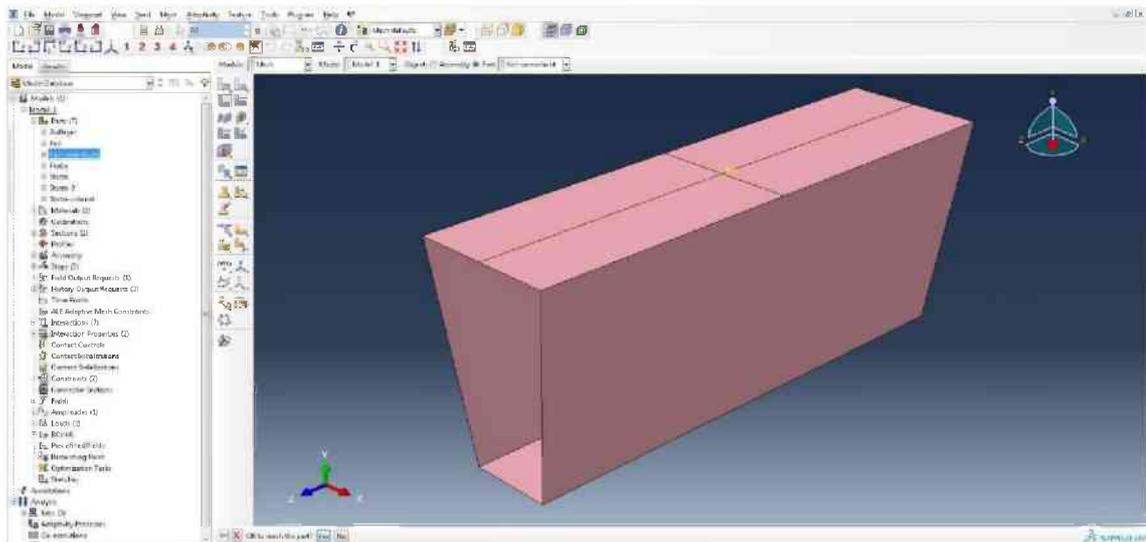
Die linke Seite des Keils als First surface und die geneigte Seite des linken Lastübertragungselements als Second surface auswählen.



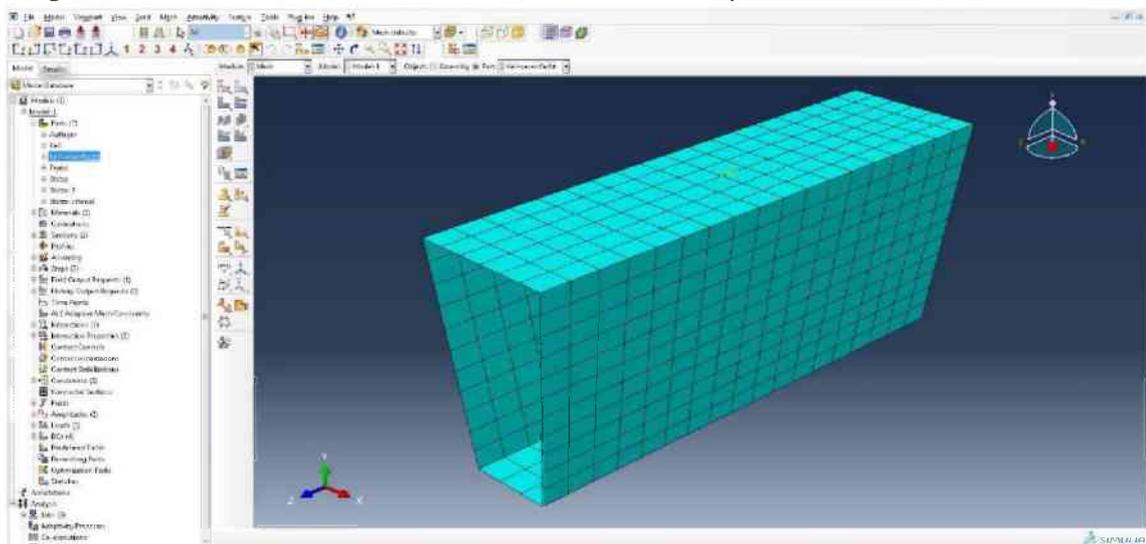
Stahl zu Stahl für die Contact interaction property auswählen. Den Vorgang für die rechte Seite wiederholen. Für die Interaktionen zwischen der Probe und den Lastübertragungselementen die im expliziten Modell vorgestellten Abläufe mit den hier gezeigten Einstellungen wiederholen.

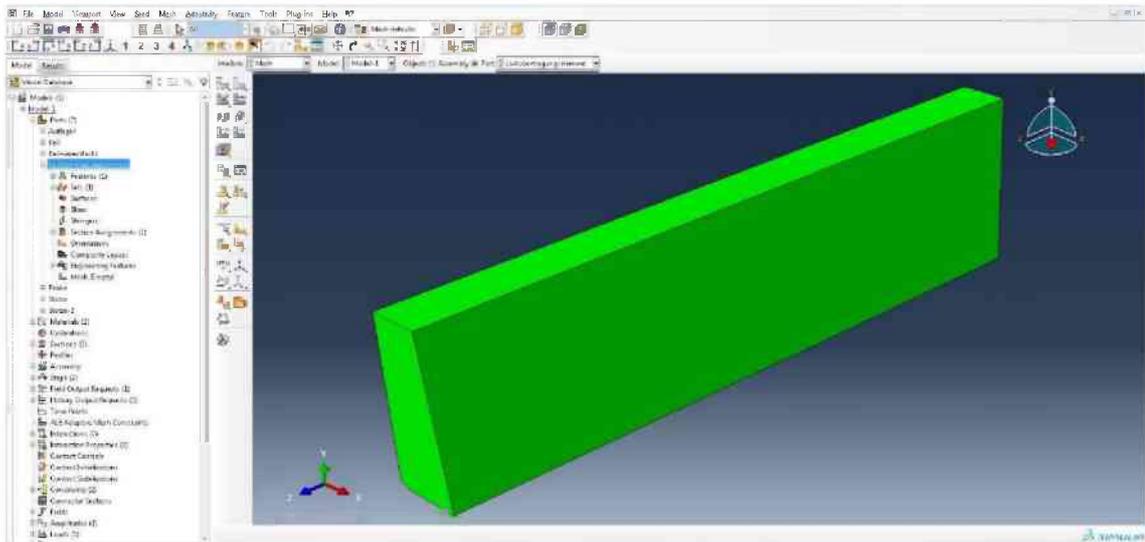


In das Modul Load wechseln. Für den Keil und das Auflager die exakt gleichen Boundary Conditions erstellen wie im expliziten Modell. Ansonsten sind keine weiteren Boundary Conditions nötig.

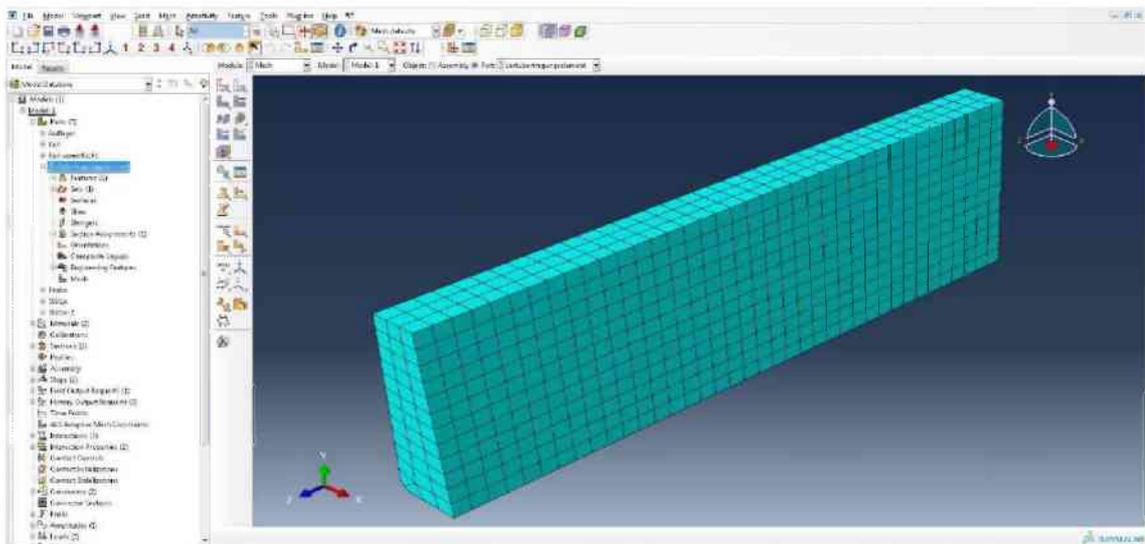


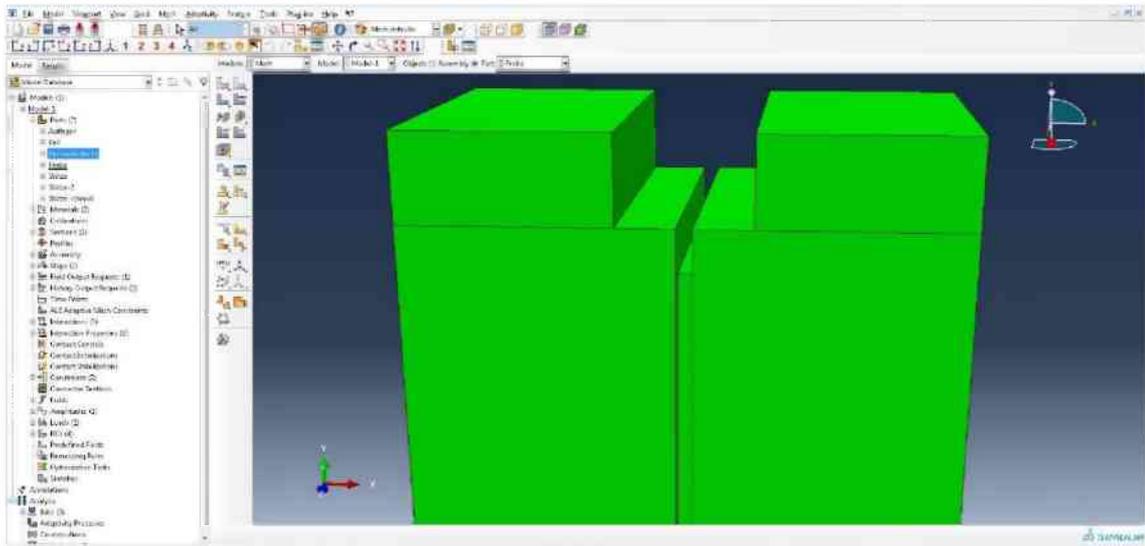
In das Modul Mesh wechseln. Für den Part Keil-vereinfacht in Seed-Part die Zahl 4 eingeben und mit dem Klicken auf Mesh-Part den Körper vernetzen.



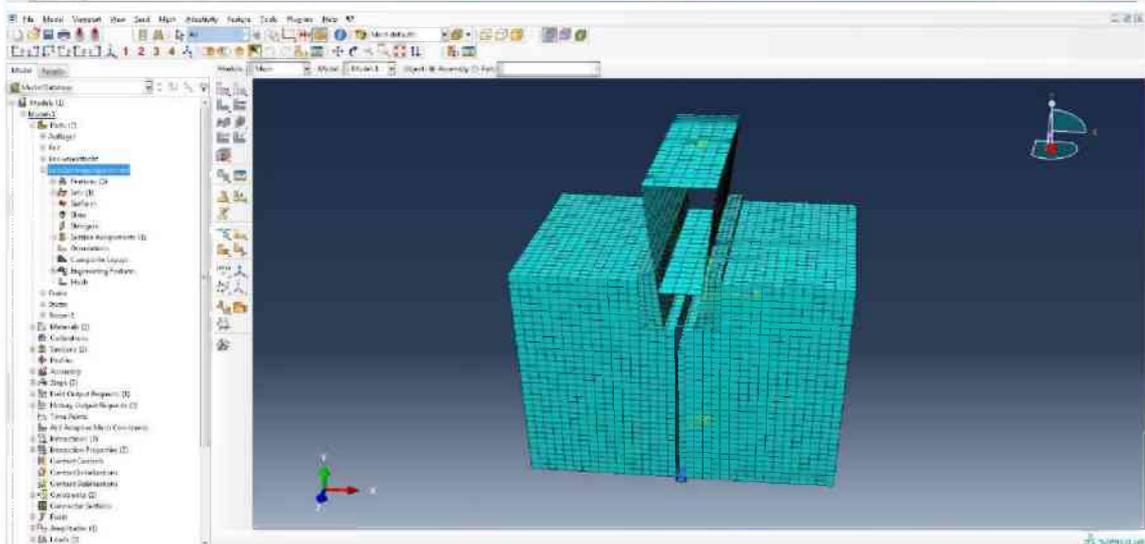
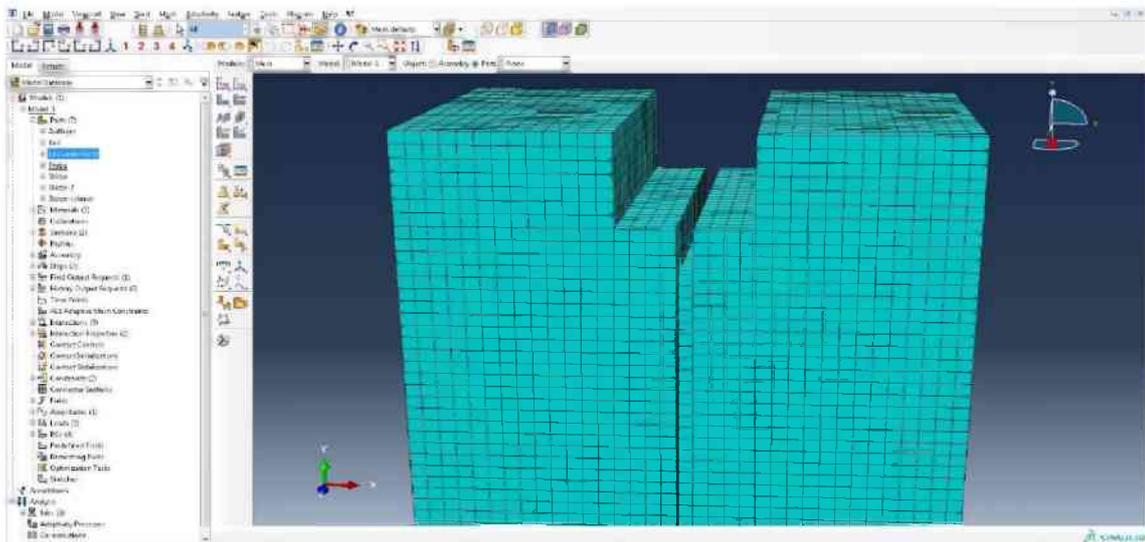


Auf den Part Lastübertragungselement wechseln. Im Vergleich zur expliziten Berechnung wird das Lastübertragungselement nach der Erstellung nicht partitioniert. Daher in Seed-Part die Zahl 1,5 eingeben und danach mit Mesh-Part das Netz erstellen.

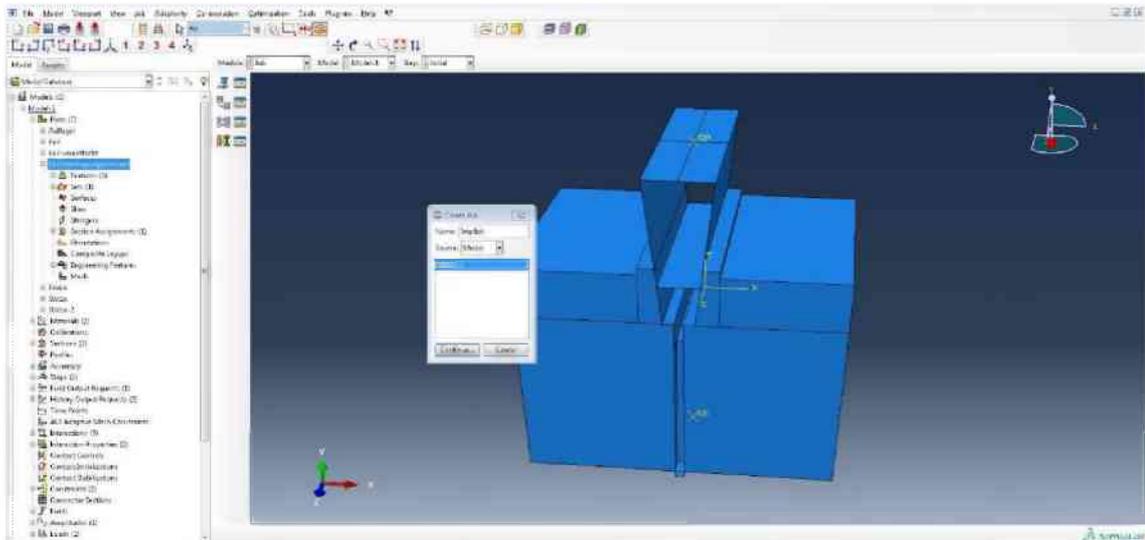




Auf den Part Probe wechseln, in Seed-Part die Zahl 3 eingeben und mit Mesh-Part vernetzen.



Von Part auf Assembly wechseln.



In den Modul Job wechseln, mit Create-Job einen neuen Job erstellen, mit Implizit benennen und mit Continue fortfahren und im nächsten Fenster mit OK bestätigen.



Mit Klicken auf Submit (rote Ellipse) den Job starten.

Literaturverzeichnis

- [1] Auer, T.: Untersuchungen zur Simulation des Bruchverhaltens feuerfester Baustoffe mit Hilfe der Finite Elemente Methode, Dissertation, Leoben, 2006
- [2] Gross, D.; Seelig, T.: Bruchmechanik, 4 Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Darmstadt und Freiburg, 2006
- [3] Tschegg, E.; Linsbauer H.: Prüfeinrichtung zur Ermittlung von bruchmechanischen Kennwerten sowie hierfür geeignete Prüfkörper, Patentschrift, Wien, 1990
- [4] Tschegg, E.; Ehart R.: Probekörper zur Gewinnung von bruchmechanischen Kennwerten, Patentschrift, Wien, 2000
- [5] Gerer, S.: Entwicklung eines Auswerteverfahrens zur Ermittlung mechanischer Materialparameter durch FEM-Simulation einer bruchmechanischen Prüfung, Diplomarbeit, Leoben, 2005
- [6] Lackner, S.: Anwendung eines Inversenverfahrens zur Auswertung eines Keilspalttests für die bruchmechanische Charakterisierung von Feuerfestbaustoffen, Magisterarbeit, Leoben, 2007
- [7] Jin, S. et al.: Determination of Young's modulus, fracture energy and tensile strength of refractories by invers estimation of a wedge splitting procedure, in: (Ingraffea A.R.; Schwalbe K.-H.) Engineering Fracture Mechanics 116, (Seite 228 – 236), Elsevier, Leoben, 2013
- [8] Resonanz-Frequenz-Dämpfungsanalyse
http://www.ifam.fraunhofer.de/de/Dresden/technologien/instrumentelle_analytik/resonanz-frequenz-daempfungsanalyse/fda.html am 05.07.2015
- [9] Versuchsergebnisse AlltestsMGComet (unveröffentlicht), 2013
- [10] Versuchsergebnisse Neuhauser Granit und Imberg Sandstein (unveröffentlicht), Zeltweg, 2015
- [11] Dassault Systèmes Simulia Corp.: Abaqus Analysis User's Manual Volume III, 2010
- [12] Gehwolf, P.: Numerical Simulation of the Small Scale Rock Cutting Test, Masterarbeit, Leoben, 2014
- [13] Dassault Systèmes Simulia Corp.: Abaqus Theory Manual, 2010
- [14] Lüthold, A.: Biegetragverhalten und Mindestbewehrung von Stahlbetonbauteilen, Dissertation, Zürich, 2002
- [15] Gehwolf, P. et al.: Prediction of damage evolution from micro to makro scale - New simulation tools and design concepts, WP5: Mechanical behaviour and damage of brittle disordered materials, Leoben, 2014.

- [16] Von Soos, P.; Engel, J.: Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor, in (Witt, K. J.) Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2008
- [17] Restner, U.: Sandvik Mining and Construction's Rock Testing Standards, Zeltweg, 2008
- [18] Pittino, G. Gimpel, M.: Indirekte Bestimmung der einaxialen Zugfestigkeit – Teil 1 Brazilian-Test nach ISRM versus ÖNORM, in: (ASMET und BVÖ) BHM Vol. 156, (Seite 476 – 481), Springer-Verlag, Berlin, 2011

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| <i>Tab. 3-1: Auswertung Keilspalttest Granit.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Tab. 3-2: Auswertung Keilspalttest Sandstein (naS → normal auf die Schichtung, iS → in Richtung der Schichtung).....</i> | <i>14</i> |
| <i>Tab. 3-4: Vergleich der Zugfestigkeiten.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Tab. 3-5: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation und der experimentellen Keilspalttests für Sandstein</i> | <i>24</i> |
| <i>Tab. 3-6: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation und der experimentellen Keilspalttests für Granit</i> | <i>25</i> |
| <i>Tab. 3-7: Materialparameter für die numerische Simulation von Sandstein</i> | <i>26</i> |
| <i>Tab. 3-8: Materialparameter für die numerische Simulation von Granit.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Tab. 3-9: Materialparameter für die numerische Simulation von Stahl.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Tab. 3-10: Vergleich der Ergebnisse aus der expliziten numerischen Simulation und den experimentellen Keilspalttests für Sandstein</i> | <i>29</i> |
| <i>Tab. 3-11: Vergleich der Ergebnisse aus der expliziten numerischen Simulation und den experimentellen Keilspalttests für Granit</i> | <i>30</i> |
| <i>Tab. 3-12: Geänderter Post-Failure-Bereich für die explizite Berechnung Sandstein</i> | <i>31</i> |
| <i>Tab. 3-13: Geänderter Post-Failure-Bereich für die explizite Berechnung Granit ...</i> | <i>31</i> |
| <i>Tab. 4-1: Vergleich der Zugfestigkeit numerisch (implizit) und experimentell</i> | <i>34</i> |
| <i>Tab. 4-2: Vergleich der Zugfestigkeit numerisch (explizit) und experimentell</i> | <i>37</i> |
| <i>Tab. 4-3: Vergleich der Zugfestigkeiten implizit.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Tab. 4-4: Vergleich der Zugfestigkeiten explizit.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Tab. 4-5: Vergleich der Druckfestigkeit</i> | <i>44</i> |
| <i>Tab. 5-1: Vergleich der Ergebnisse für Sandstein.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Tab. 5-2: Vergleich der Ergebnisse für Granit.....</i> | <i>47</i> |

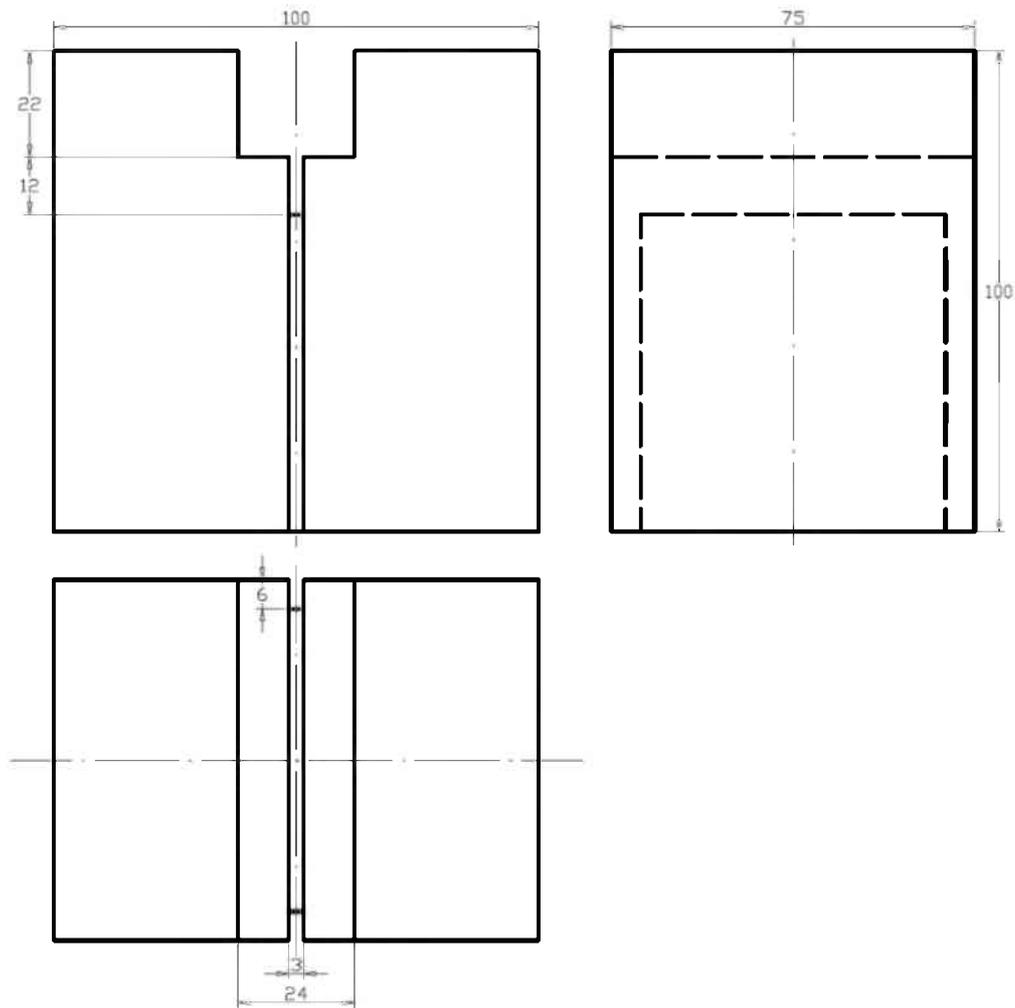
Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| <i>Abb. 2-1: a) transkristalliner Riss; b) interkristalliner Riss [2]</i> | <i>3</i> |
| <i>Abb. 2-2: Bezeichnungen [2]</i> | <i>4</i> |
| <i>Abb. 2-3: Rissöffnungsarten [2]</i> | <i>4</i> |
| <i>Abb. 2-4: Spröde Schädigung bei Zugbelastung [2]</i> | <i>6</i> |
| <i>Abb. 3-1: Schematischer Probekörper mit Abmessungen</i> | <i>7</i> |
| <i>Abb. 3-2: Schematische Abbildung des Keilspalttest.....</i> | <i>8</i> |
| <i>Abb. 3-3: Realer Keilspaltversuch mit einer Sandsteinprobe.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Abb. 3-4: a) Numerisches Modell b) Flussdiagramm der Auswerteroutine [7]</i> | <i>11</i> |
| <i>Abb. 3-5: a) Sandsteinprobe in Richtung der Schichtung b) Sandsteinprobe normal zur Schichtung c) Granitprobe.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Abb. 3-6: Granitprobe mit Riss außerhalb der Führungskerbe.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Abb. 3-7: Vertikales Last-Verschiebungsdiagramm Granit.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Abb. 3-8: Horizontales Last-Verschiebungsdiagramm Granit</i> | <i>13</i> |
| <i>Abb. 3-9: Vertikales Last-Verschiebungsdiagramm Sandstein.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Abb. 3-10: Horizontales Last-Verschiebungsdiagramm Sandstein</i> | <i>14</i> |
| <i>Abb. 3-11: Einfluss der Probenlänge auf das Ergebnis</i> | <i>17</i> |
| <i>Abb. 3-12: Numerisches Modell für die implizite Berechnung.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Abb. 3-13: Numerisches Modell für die explizite Berechnung</i> | <i>18</i> |
| <i>Abb. 3-14: Subroutine [12]</i> | <i>20</i> |
| <i>Abb. 3-15: Verhalten von Beton unter einaxialer a) Zugbelastung und b) Druckbelastung [11]</i> | <i>22</i> |
| <i>Abb. 3-16: Fließfläche in der Deviatorebene, abhängig von K_C [11].....</i> | <i>22</i> |
| <i>Abb. 3-17: Spannungs-Verschiebungskurve mit fracture energy cracking criterion [11].....</i> | <i>23</i> |
| <i>Abb. 3-18: Last-Verschiebungskurven von experimentellen und numerisch simulierten Keilspaltversuchen für Sandstein.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Abb. 3-19: Last-Verschiebungskurven von experimentellen und numerisch simulierten Keilspaltversuchen für Granit.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Abb. 3-20: Last-Verschiebungskurven bei unterschiedlicher Geometrie</i> | <i>28</i> |
| <i>Abb. 3-21: Last-Verschiebungskurven von experimentellen und numerisch simulierten Keilspaltversuchen für Sandstein.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Abb. 3-22: Last-Verschiebungskurven von experimentellen und numerisch simulierten Keilspaltversuchen für Granit.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Abb. 3-23: Numerisches Modell mit Löschen der Elemente.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Abb. 4-1: Interaktionen des numerischen Modells des direkten Zugversuchs.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Abb. 4-2: Numerisches Modell mit dem FEM-Netz.....</i> | <i>34</i> |

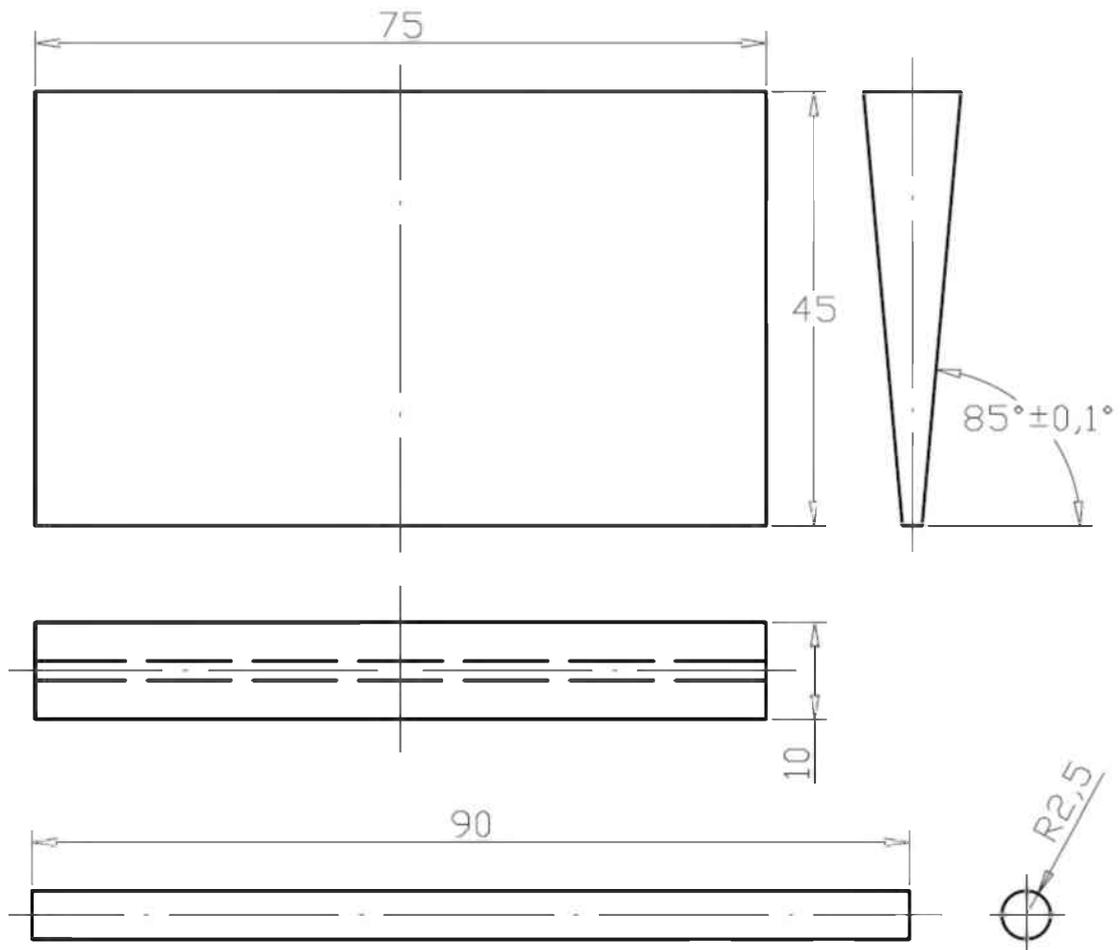
| | |
|---|-----------|
| <i>Abb. 4-3: Ergebnisse direkter Zugversuch Sandstein implizit.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Abb. 4-4: Ergebnisse direkter Zugversuch Granit implizit.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Abb. 4-5: Ergebnisse direkter Zugversuch Sandstein explizit.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Abb. 4-6: Ergebnisse direkter Zugversuch Granit explizit.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Abb. 4-7: Numerisches Modell mit gelöschten Elementen</i> | <i>38</i> |
| <i>Abb. 4-8: Brazilian-Test Versuchseinrichtung [17]</i> | <i>39</i> |
| <i>Abb. 4-9: Modell Brazilian-Test mit FEM-Netz.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Abb. 4-10: Explizites Modell mit dem FEM-Netz</i> | <i>41</i> |
| <i>Abb. 4-11: Ergebnis der numerischen Simulation explizit.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Abb. 4-12: Modell einaxialer Druckversuch mit FEM-Netz.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Abb. 4-13: Resultat einaxialer Druckversuch Sandstein</i> | <i>45</i> |
| <i>Abb. 4-14: Resultat einaxialer Druckversuch Granit</i> | <i>45</i> |

Anhang A

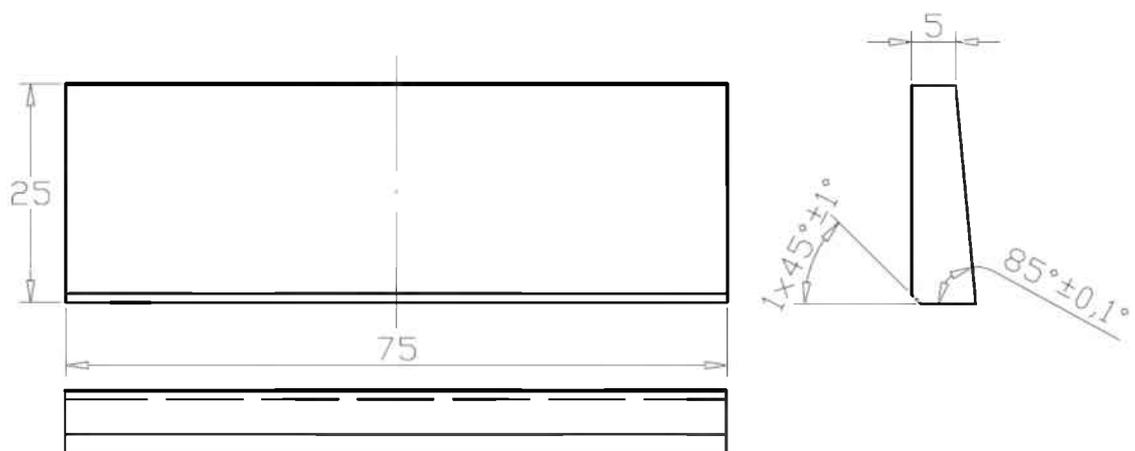
Geometrie Keilspalttesteinrichtung



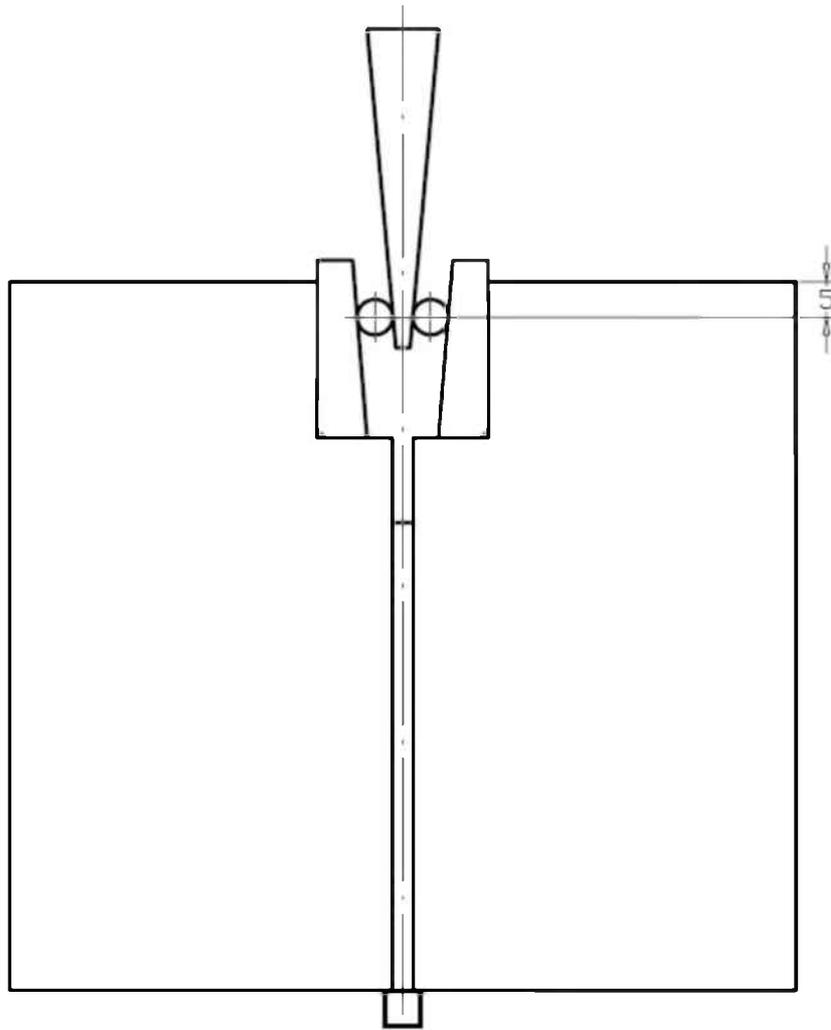
Geometrie und Abmessungen des Probekörpers



Geometrie und Abmessungen des Keils und der Rollen



Geometrie und Abmessungen der Lastübertragungselemente



Frontalansicht der Keilspalteinrichtung und Platzierung der Rollen