



DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Numerische Untersuchungen des Scherbruchmechanismus in tiefliegenden Tunneln unter anisotropen Primärspannungen mittels FLAC^{2D}

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

a.o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel
E220, Institut für Geotechnik, TU-Wien

und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh
E220, Institut für Geotechnik, TU-Wien

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Rudolf Pernkopf
Matr.Nr.: 0125360
Lindaustraße 6a
A-4820 Bad Ischl

Wien, im Oktober 2009

.....
Rudolf Pernkopf

Vorwort

Ich möchte mich bei all jenen Personen bedanken, die mir die Erstellung dieser Diplomarbeit möglich gemacht haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir eine einmalige Studienzeit ermöglicht haben. Ihre fortwährende Unterstützung, Ihre Geduld, sowie der stete Glaube an mich waren die Grundlage zum erfolgreichen Abschluss meines Studiums.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel und Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh. Durch die ausgezeichnete Betreuung und Ihre große Erfahrung, die Sie jederzeit bereitwillig einbrachten, war es möglich die Themenstellung zielgesteuert zu bearbeiten.

Weiters bedanke ich mich bei allen Mitgliedern des Instituts für Ingenieurgeologie für die freundliche Aufnahme während der Zeit, die ich am Institut verbracht habe. Die angenehme Atmosphäre hat ein produktives und konzentriertes Arbeiten möglich gemacht.

Mein Dank geht auch an meine Geschwister, Studienkollegen und Freunde für die gegenseitige Unterstützung und die vielen schönen Stunden in den letzten Jahren. Durch Sie verließ mich niemals der Wille an meinem Ziel festzuhalten.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Freundin für Ihr Verständnis und Ihre Geduld während meines gesamten Studiums. Danke dass Du immer für mich da bist.

Kurzfassung

Mit Hilfe des finiten Differenzen Codes FLAC^{2D} („Fast Lagrangian Analysis of Continua“) der ITASCA CONSULTING GROUP wurde eine Untersuchung des Scherbruchmechanismus („Kirschkerneversagen“) in tiefliegenden Tunneln unter anisotropen Primärspannungen, bei dem es zum Versagen der Tunnelleibungen kommt, durchgeführt.

Am Beginn wurden ein Vergleich der Netzfeinheit und eine Studie verschiedener Ausbruchquerschnitte durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass ein sehr enges Raster notwendig ist, um die Scherzonen bzw. Scherbrüche darzustellen. Bei der Modellierung der unterschiedlichen Tunnelprofile zeigte sich, dass ein elliptischer Querschnitt im Vergleich zum Kreisprofil unter den gegebenen Randbedingungen keine Vorteile hinsichtlich der Standfestigkeit bringt.

Um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen, wurde für das FLAC-Modell unter einer Vertikalspannung von 50 MPa und einem Seitendruckverhältnis von 1/3 ein in situ-Zustand generiert und nach Ausbruch des Tunnels der Scherbruchmechanismus unter gravitativer Belastung analysiert. Im Zuge dieser Modellierung wurde eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt und der Einfluss des „Strain Softening“ Modells untersucht, welches auf dem Mohr-Coulomb Materialmodell basiert, es aber ermöglicht, ab dem Bruch eine Entfestigung des Materials zu berücksichtigen.

Anhand des so generierten Modells wurden bereits bekannte Modellvorstellungen von RABCEWICZ und FEDER weiterentwickelt. Es konnte festgestellt werden, dass sich der Versagensablauf in zwei Phasen unterteilen lässt. In einer ersten Phase bilden sich Scherbruchkörper im Bereich der Ulmen. Die Horizontalverschiebung bleibt dabei relativ gering (etwa 20 % der Gesamtverschiebung). In der zweiten Phase bilden sich ausgehend von den Spitzen der Scherbruchkörper weit ins Gebirge reichende Bruchflächen aus. Diese Scherbrüche bilden trapezförmige Bereiche in Firste und Sohle, die in Richtung der größeren in situ-Spannung, gegeneinander drücken. Bei 90 % der Gesamtverschiebung beginnen die ausreißenden Bruchflächen zu arretieren und das System stabilisiert sich.

Aus der für dieses Modell erstellten Gebirgskennlinie wird deutlich, dass nach abgeschlossener Bildung der Scherbruchkörper der erforderliche Ausbauwiderstand in der Ulme nur mehr 10 % der horizontalen in situ-Spannung beträgt. Mit diesem verhältnismäßig geringen Ausbau lassen sich 80 % der auftretenden Gesamtverschiebungen verhindern.

Abstract

By using the finite difference program FLAC^{2D} („Fast Lagrangian Analysis of Continua“) of the ITASCA CONSULTING GROUP, an analysis of the shear failure mechanism (“cherry pit mechanism“) was performed for tunnels with high overburden and anisotropic in situ stresses, leading to a collapse of the side walls.

At first the impact of the zone density of the generated grid and the tunnel shape were analyzed. It was ascertained that a very fine mesh is necessary to show the shear zones and shear cracks. Modeling the different shapes of the tunnels cross-section showed that under the used boundary conditions an elliptic shape has no advantage concerning stability compared to a circular profile.

To achieve realistic results the in situ state of stress for the FLAC model was calibrated with a vertical stress of 50 MPa and a horizontal stress of 17 MPa. Afterwards a tunnel with a diameter of 10 meters was excavated and the shear failure mechanism was analyzed under the influence of gravity. In the course of modeling, a sensitivity analysis was performed using the “strain softening” model, which is based on the Mohr-Coulomb model, the difference being the consideration of softening the material strength after the onset of plastic yield.

Using this calibrated model, commonly known theories of RABCEWICZ and FEDER were further developed. It was ascertained that the failure evolution can be classified in two phases. During the first phase notches due to shear failures are being formed at the side walls, causing only little horizontal displacements (approximately 20 % of the overall displacement). During the second phase long shear cracks appear originating in the peaks of the notches and ranging far into the mountain. Thereby trapezoidal areas are formed in the roof and invert that press against each other in direction of the higher in situ stress. After 90 % of the overall displacement occurred, the shear failures arrest and the model equilibrates.

The calculated ground reaction curve shows that after the notches are completely built the required support resistance in the side walls represents only 10 % of the horizontal in situ stress. Using this comparatively low support resistance approximately 80 % of the occurring overall displacements could be prevented.

Inhaltsverzeichnis

1	Der Scherbruchmechanismus	1
1.1	Tiefliegende Tunnel	2
1.2	Definitionen von Rabcewicz, Feder und Sattler.....	3
2	Das Programm FLAC ^{2D}	8
2.1	Modellierung von chaotischen Systemen.....	9
3	Modellaufbau.....	11
3.1	Prinzipieller Berechnungsablauf	11
3.2	Verwendete Materialmodelle	12
3.3	Materialparameter	12
3.4	Netzvergleich	14
3.4.1	Methode.....	14
3.4.2	Untersuchte Netze	14
3.4.3	Ergebnisse	15
3.4.3.1	Netz 100	15
3.4.3.2	Netz 200	16
3.4.3.3	Netz 400	17
3.4.3.4	Vergleich der untersuchten Netzfeinheiten	18
3.4.4	Rechnung am unverformten/verformten Netz.....	19
3.4.4.1	Rezoning.....	24
3.4.4.1.1	Angepasste Modellierung.....	24
3.4.4.1.2	Ergebnisse	24
3.5	Hohlraum mit entfernten Bruchkörpern.....	26
3.5.1	Hintergrund	26
3.5.2	Geometrie.....	26
3.5.3	Ergebnisse und Vergleich.....	27
3.5.3.1	Ellipse.....	27
3.5.3.2	Polygonzug.....	27
3.6	Untersuchung einer gelochten Scheibe	32
3.6.1	Weg- bzw. geschwindigkeitsgesteuerter Druckversuch.....	32
3.6.2	Lastgesteuerter Druckversuch	32

3.7	Einfluss der gravitativen Belastung.....	35
3.8	Strain Softening.....	35
3.9	Parameterkalibrierung.....	36
3.9.1	Vorgehensweise und Ergebnisse.....	37
3.9.1.1	Parametergruppe 1.....	38
3.9.1.2	Parametergruppe 2a.....	40
3.9.1.3	Parametergruppe 2b.....	42
3.9.1.4	Parametergruppe 3a.....	44
3.9.1.5	Parametergruppe 3b.....	46
3.9.1.6	Parametergruppe 4a.....	50
3.9.1.7	Parametergruppe 4b.....	52
3.9.2	Zusammenfassung und Interpretation.....	56
4	Untersuchung des Scherbruchmechanismus („Kirschkerneversagen“).....	58
4.1	Modelleigenschaften.....	58
4.2	Messpunkte.....	59
4.3	Ermittlung der Gebirgskennlinie.....	60
4.4	Ergebnisse.....	61
4.4.1	Beschreibung des Versagensmechanismus.....	61
4.4.2	Gebirgskennlinie.....	67
5	Interpretation der Untersuchungsergebnisse.....	69
6	Zusammenfassung.....	71
7	Abbildungsverzeichnis.....	74
8	Literaturverzeichnis.....	77

1 Der Scherbruchmechanismus

Kommt es unter richtungsbetontem Primärdruck zum Versagen von Tunnelleibungen, wird dies als Kirschkerneversagen bezeichnet. Dabei werden keilförmige, durch Scherbrüche begrenzte Bereiche in den Hohlraum gedrückt (Abbildung 1.1).

Zur einfacheren Darstellung wird in dieser Diplomarbeit die größte Hauptspannung des Primärdruckes als lotrecht angenommen.

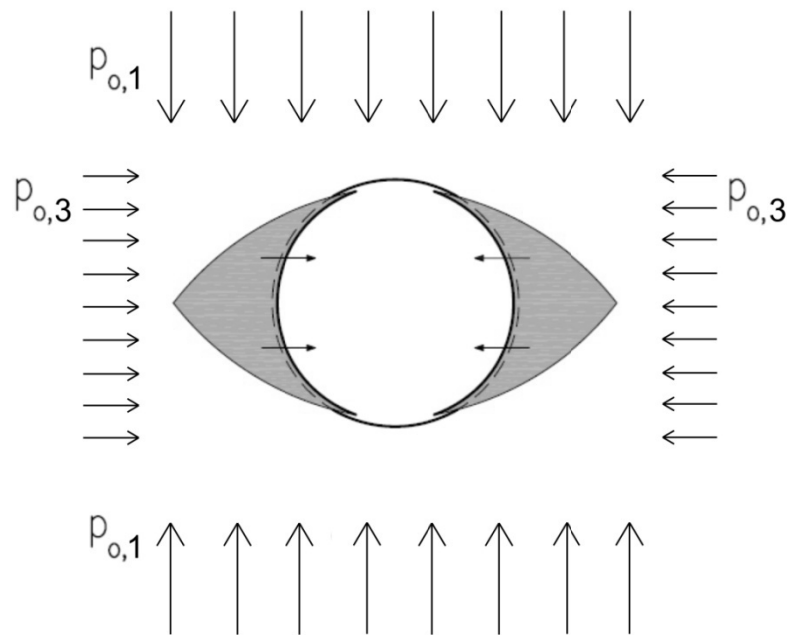


Abbildung 1.1: Prinzipdarstellung Kirschkerneversagen ($P_{o,1} > P_{o,3}$)
(PREH, POISEL, 2009)

W. SCHUBERT (2007) definiert diesen Scherbruchmechanismus folgendermaßen: „In einem nicht zentralsymmetrischen Spannungszustand, also zum Beispiel bei einem Seitendruckverhältnis $K_I < 1,0$, bilden sich Bruchzonen im Bereich der Ulme. Dabei schieben sich, von den Scherbruchflächen und vom Ausbruchrand begrenzte kompakte Blöcke in den Hohlraum („Kirschkerneffekt“). Bei weiterer Steigerung der Beanspruchung kann es durch die Abflachung der Stützlinie und die dadurch entstehende stärkere Krümmung im Ulmbereich, zur Bildung neuer Scherbrüche bergwärts der bereits entstandenen und gelösten Scherbruchkörper kommen.“

1.1 Tiefliegende Tunnel

Nach R. POISEL, W. STEGER und A. ZETTLER (1995):

Bei tiefliegenden Tunneln (große, isotrope in situ-Spannungen) nehmen die Bruchmechanismen der Gesteine eine beherrschende Rolle ein und die Bedeutung des Gefüges geht weitgehend zurück. Die maßgebenden Bruchmechanismen sind der Spaltbruch und der Scherbruch. Der Spaltbruch tritt vor allem bei sehr spröden Gesteinen in anisotropen Spannungszuständen auf, zum Beispiel bei einem Gneis im einaxialen Druckversuch. Bereits bei einem geringen seitlichen Stützdruck geht der Spaltbruch in einen Scherbruch über. Dieser ist bei weniger spröden Gesteinen (zum Beispiel Phyllit) der maßgebende Bruchmechanismus. In einer Tunnelleibung tritt der Spaltbruch im Druckversuch als Bergschlag und der Scherbruch im Druckversuch als Scherbruch in der Tunnelleibung auf (siehe Abbildung 1.2). Die Bildung, beziehungsweise die Ausbreitung von Brüchen, muss möglichst verhindert werden.

Modellversuche, wie zum Beispiel dickwandige Gesteinsrohre unter Außendruck (EWY & COOK, 1990a und 1990b), dürfen auf tiefliegende Tunnel übertragen werden. Am Lochrand, welcher der ungestützten Tunnelleibung entspricht, dürften laut Rechnung die Spannungen die einfache Gesteinsfestigkeit nicht überschreiten. In vielen Versuchen wurde aber eine scheinbare Gesteinsfestigkeit vom zwei- bis vierfachen der Druckfestigkeit ermittelt (GUENOT, 1987). Erst über diesem Wert kam es zum Bruch der Lochwandung.

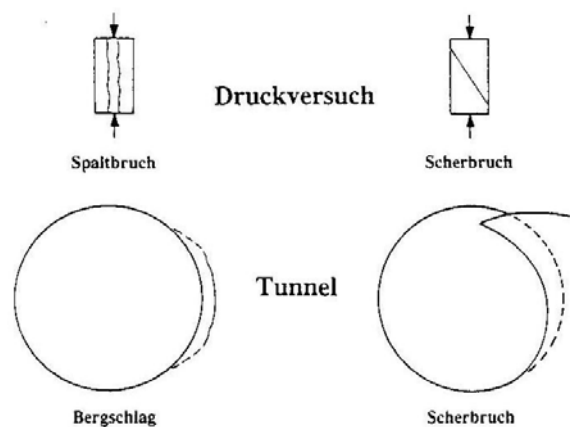


Abbildung 1.2: Spaltbruch und Scherbruch (POISEL, STEGER, TETTLER, 1995)

Die Bruchmechanik bietet sich besonders für die Untersuchung der Ausbreitung und Fortpflanzung von Rissen beziehungsweise Brüchen an. Das Aufreißen beziehungsweise das Öffnen von Rissen (Mode I) und die Scherung beziehungsweise Verschiebung (Mode II) sind die maßgebenden Lastfälle für die Beanspruchung eines Risses beziehungsweise Bruches im Gebirge um einen Tunnel (siehe Abbildung 1.3).

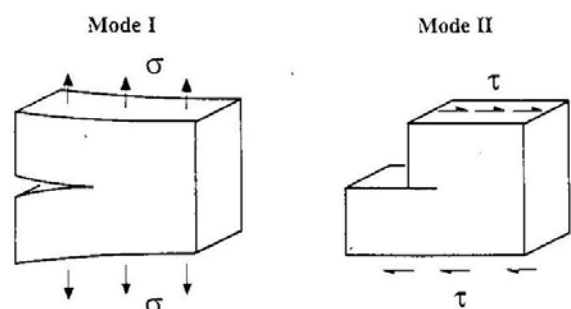


Abbildung 1.3: Aufreißen und Scherung (POISEL, STEGER, TETTLER, 1995)

In einer ersten Phase bilden sich auf beiden Seiten des Tunnels keilförmige Bruchkörper, deren Spitzen auf einer zur Richtung des Primärdruckes normalen Gerade liegen (Abbildung 1.4, I). Diese Keile scheren entlang der so genannten Mohr'schen Flächen ab und drängen in Richtung Tunnelmitte. Der Abstand der Keilspitzen ergibt den 1,5 bis 1,8-fachen Tunneldurchmesser.

Durch die so vergrößerte Spannweite beginnen sich Firste und Sohle aufeinander zuzuschieben (siehe Abbildung 1.4, II). Diese Bewegung nimmt in der dritten Phase weiter zu und es kommt durch den entstehenden und andauernden Seitendruck zu Ausknickungen an diesen Bereichen (Abbildung 1.4, III).

Aus „Zum Stabilitätsnachweis für Hohlräume in festem Gebirge bei richtungsbetontem Primärdruck“, G. FEDER (1977):

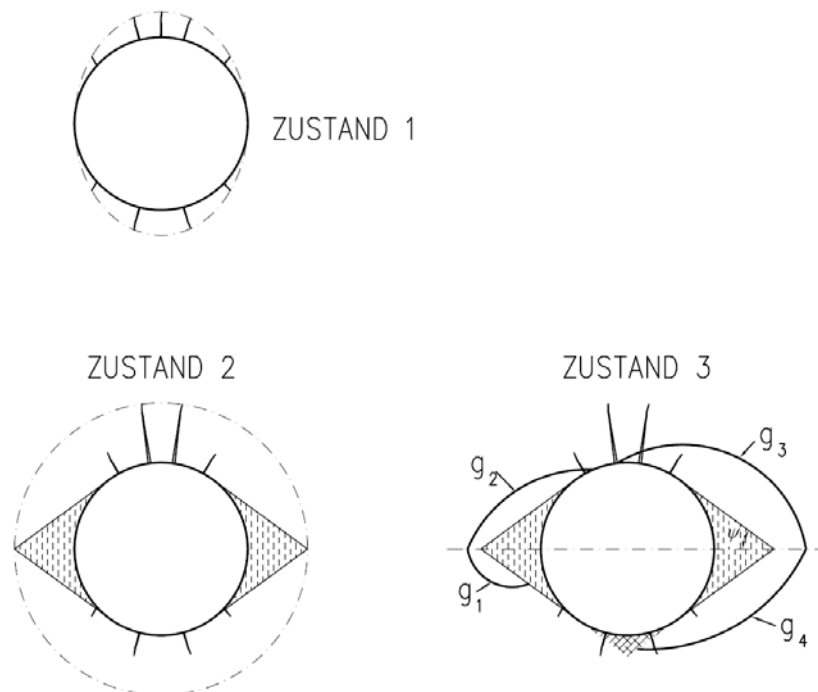


Abbildung 1.5: Zustände des Bruchversagens nach FEDER (1977, modifiziert)

Unter vertikal richtungsbetontem Primärdruck durchläuft der Bruchvorgang eines in festem Gebirge erstellten Hohlraumbaues drei Zustände (siehe Abbildung 1.5):

Zustand 1: Radialrisse in Firste und Sohle

Dieser Zustand tritt unter der Voraussetzung einer Seitendruckziffer kleiner 1 (vertikaler Primärdruck) oder bei flach ovalen Hohlräumen (liegende Ellipse) auf. Im Firstbereich kann in diesem Zustand bereits ein Verbruch bewirkt werden. Eventuell erforderliche Stützmaßnahmen werden durch die Mächtigkeit der auftretenden Zugzone bestimmt. In der Sohle sind in diesem Zustand noch keine Stützmittel erforderlich. Doch kann mit Entspannungsschwellen verbundene Wasseraufnahme,

zusammen mit der Knetwirkung durch Baufahrzeuge, eine Entfestigung des Gebirges im Sohlenbereich bewirkt werden. Dies wirkt sich allerdings erst im Zustand 3 aus, wenn von der Sohle eine Scherfestigkeit erwartet wird.

Zustand 2: Zermalmen der Ulmenbereiche

Diese hinsichtlich der Hohlraumstabilität eher unbedenkliche Phase kann sich zeitlich auch teilweise mit Zustand 1 überschneiden. Das Zermalmen der Ulmenbereiche erfolgt je nach Gebirgsfestigkeit in Form von Bergschlägen, Spaltbruchserien und Ausquetschungen weicher Komponenten oder in Form von Zerquetschungen poröser Komponenten. Zustand 2 ist spätestens dann erreicht, wenn der Winkel ψ dem Reibungswinkel zwischen kompaktem und zermalmtem Material entspricht. Der Winkel ψ muss klein genug werden, um das zum Hohlraum hin gerichtete Ausquetschen von selbst zu sperren. Als Stützmittel sind eine geschlossen anliegende Schale und/oder über die zermalmte Zone hinausreichende Anker sinnvoll. Da eine Vergrößerung der Zugzone im First auftreten kann, muss dies bei der Ermittlung der First-Stützmaßnahmen berücksichtigt werden.

Zustand 3: Scherverbruch (meist von schräg oben)

Wird die Tragfähigkeit des Gebirges im Zustand 2 noch immer überschritten, wechselt der Bruchmechanismus seinen Charakter. Da das Bruchmaterial nicht mehr ausweichen kann, ist ein weiteres Zermalmen nicht mehr möglich. Es kommt zu Fels-Böschungsbrüchen ähnlichen Scherbrüchen, die diesen Zustand 3 charakterisieren. Die gekrümmten Bruchflächen stoßen in den zermalmt Zonen der Ulmenzwickel auf den großen passiven Widerstand des zerquetschten Materials, oder sie erreichen direkt den Hohlraumbereich (siehe Abbildung 1.5, Gleitflächen g_1 und g_2). Gleitfläche g_3 zeigt einen Scherbruch, der erst in den Bereich der versagenden Zugzone läuft, wo er ein zunächst ein Schließen aller Radialrisse bewirkt und dann so weiterläuft als ob sie nie vorhanden gewesen wären. Hat die Zugzone beim Entspannungsschwellen Bergwasser angesaugt, bewirkt der Porenwasserüberdruck ein gehemmtes Weiterlaufen des Scherbruches (Gleitfläche g_4)

Aus „Der Bauingenieur, Die neue Österreichische Tunnelbauweise, II. Statische Wirkungsweise und Bemessung“, K. SATTLER (1965)

Wird in einem zuvor ungestörten Gebirge ein Hohlraum geschaffen, wird der ursprünglich vorhandene, primäre Spannungszustand gestört und es kommt zu einer Kräfteumlagerung. Durch eine sofortige Oberflächensicherung (bewehrte Spritzbetonschale) nach Ausbruch eines Hohlraumes, bleibt mit der damit verbundene Vermeidung von unzulässigen Auflockerungen, das umliegende Gebirge nahezu ungestört und ein räumlicher Spannungszustand bleibt vorhanden. Da sich eine satt anliegende Betonschale nicht für sich allein verformen kann, wird ein großer Bereich des umliegenden Gebirges zur Aufnahme des sekundären Belastungszustandes herangezogen (Verbundwirkung).

Im ersten Stadium der Kräfteumlagerung wird sich das Gebirge in Richtung der Hauptdruckrichtung (meist vertikal) verformen, was zu einer Annäherung der Firste und der Sohle führt (Auftreten von Biegerissen in Felsmodellen). Diese Bewegungen reichen seitlich - an Größe abnehmend - bis weit ins Gebirge hinein. Durch die Annäherung der Firste und Sohle werden die Ulmen (die Spritzbetonschale) gegen das Gebirge gedrückt wobei sich die in Abbildung 1.6 dargestellten Bereiche durch elastische und plastische Verformung bilden. Unter dem erhöhten Seitendruck durch den Umlagerungsvorgang und dem passiven Druck der Ulmen wird der als Kern bezeichnete Bereich weiter zusammengedrückt. Ist der Kern vollständig plastifiziert und kann folglich nicht mehr weiter zusammengedrückt werden, wird er beim weiteren Fortschreiten der Firste und Sohle als Ganzes ins Tunnelinnere gedrückt. Bei einer derartigen Beanspruchung befindet sich der schwächste Punkt des Tunnelprofils im Übergang zwischen Firste und Sohle. Wird die Spritzbetonschale ausreichend stark dimensioniert, können die Scherspannungen aufgenommen und ein Abscheren in den genannten Bereichen verhindert werden, was zu einer vollständigen Beruhigung des Gebirges führt.

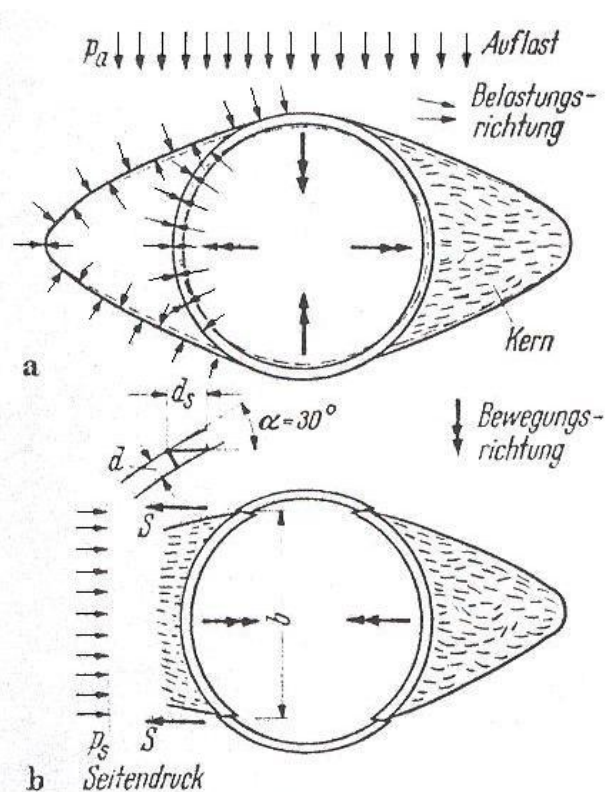


Abbildung 1.6: Schubbruchhypothese nach SATTLER (1965)

Maßgebend für das Herausquetschen des Kernes in Richtung Tunnelinneres ist der Seitendruck p_s (Abbildung 1.6, b). Bei Vorhandensein von großen Druckspannungen kann ein Schubbruch nur unter einem flachen Winkel gegenüber der Normaldruckrichtung erfolgen.

Wird dieser Bruch unter 30° gegenüber der Radialrichtung angenommen, ergibt sich die Bruchschubkraft S pro Längeneinheit nach Gleichung (1.1) in Abhängigkeit von der Scherbruchspannung τ_{Br} und der Bruchschnittlänge $d_S = 2d$ zu:

$$S = \tau_{Br} \cdot d_S \tag{1.1}$$

Die zugehörige Horizontalkraft H des seitlich auszuquetschenden Gebirges ist in Gleichung (1.2) angeführt:

$$H = 2 \cdot S \tag{1.2}$$

Der Bruch der Schale würde bei einer Belastung durch einen Seitendruck $p_{S,Br}$ berechnet nach Gleichung (1.3) oder bei einer Bruchschnittlänge $d_{S,Br}$ berechnet nach Gleichung (1.4) erfolgen:

$$p_{S,Br} = \frac{2 \cdot \tau_{Br} \cdot d_S}{b} \tag{1.3}$$

$$pd_{S,Br} = \frac{H}{2 \cdot \tau_{Br}} \tag{1.4}$$

Die genannten Beziehungen lassen sich durch die Berücksichtigung einer Verankerung der Spritzbetonschale erweitern. Dabei wird außer dem Scherwiderstand der bogenbewehrten Spritzbetonschale auch der Scherwiderstand des geankerten Gebirgsringes berücksichtigt. Die entsprechenden Scherfestigkeiten des Gebirgsringes werden den Mohrschen Hüllkurven der einzelnen Gebirgsarten entnommen (Abbildung 1.7, RABCEWICZ (1973)).

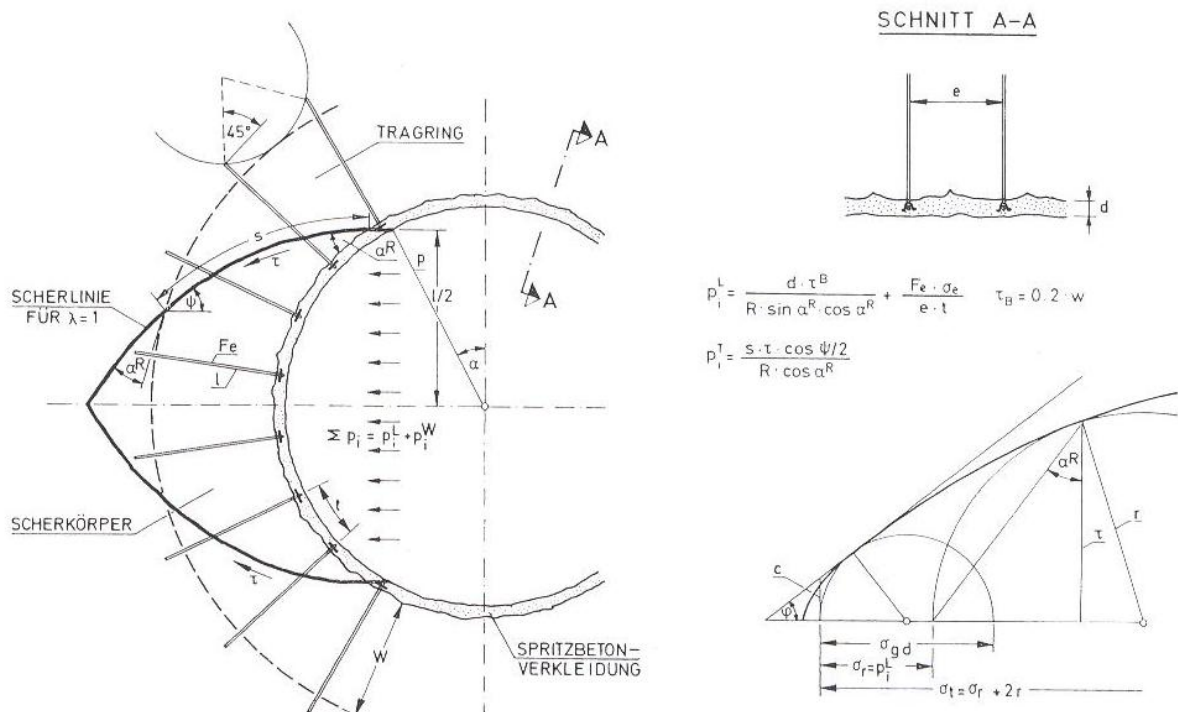


Abbildung 1.7: Scherbruchtheorie, RABCEWICZ (1973)

2 Das Programm FLAC^{2D}

FLAC^{2D} („Fast Lagrangian Analysis of Continua“) ist ein zweidimensionales Finite-Differenzen Programm der ITASCA CONSULTING GROUP für geotechnische Anwendungen. Das Programm simuliert das Verhalten von Locker- und Festgestein oder auch anderen Materialien, bei denen plastisches Fließen auftritt, wenn die Streckgrenze erreicht wird. Der Anwender kann die zu untersuchende Geometrie mit einem Gitternetz modellieren und verschiedenen Regionen beziehungsweise Zonen unterschiedliche Materialgesetze und Materialparameter zuweisen. Das Modellverhalten wird durch programmierte lineare oder nichtlineare Materialgesetze sowie durch Randbedingungen und aufgebrauchte Kräfte gesteuert.

Der allgemeine Berechnungsablauf von FLAC^{2D} ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Anhand der Bewegungsgleichung ermittelt FLAC^{2D} in jedem Zeitschritt Geschwindigkeiten und Verschiebungen durch Ableitung von Spannungen und Kräften. Die Spannungen werden von den Dehnungsgeschwindigkeiten abgeleitet und diese wiederum von den Geschwindigkeiten. Jede Grundgleichung an jedem Knoten durchläuft bei jedem Zeitschritt einen Berechnungszyklus.

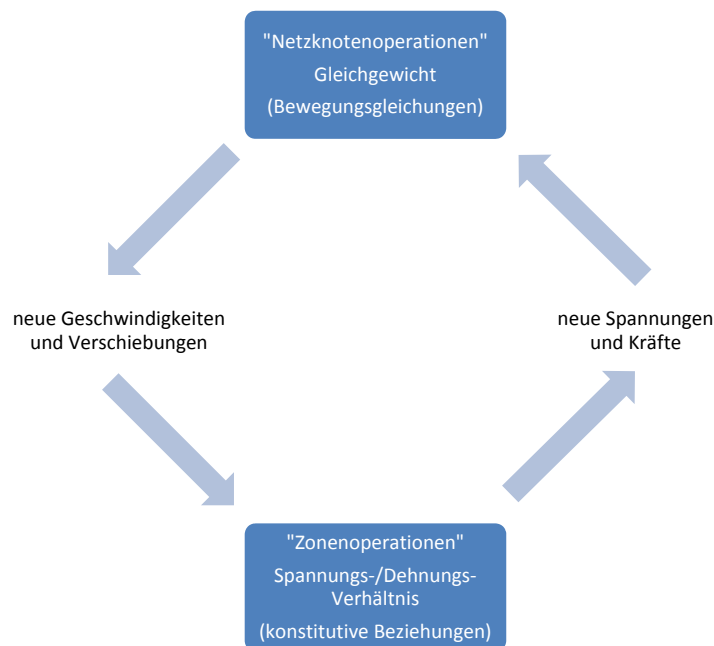


Abbildung 2.1: Berechnungsablauf in FLAC^{2D}, (nach ITASCA, 2008)

Für weiterführende Erläuterungen der Methode der Finiten Differenzen wird auf die Diplomarbeiten von ROTH (1999) und PANHOLZER (2006) verwiesen.

Der prinzipielle Ablauf einer Modellierung mittels FLAC^{2D} ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

2.1 Modellierung von chaotischen Systemen

Obwohl jedes im Zuge dieser Diplomarbeit untersuchte Modell doppelt symmetrisch ist, das heißt, dass sowohl die Geometrie des Netzes als auch die Belastungen symmetrisch sind, zeigen sich bei vielen Ausgabeplots asymmetrische Ergebnisse. Abbildung 2.2 zeigt ein typisches Beispiel einer asymmetrischen Darstellung der Schubverzerrungen.

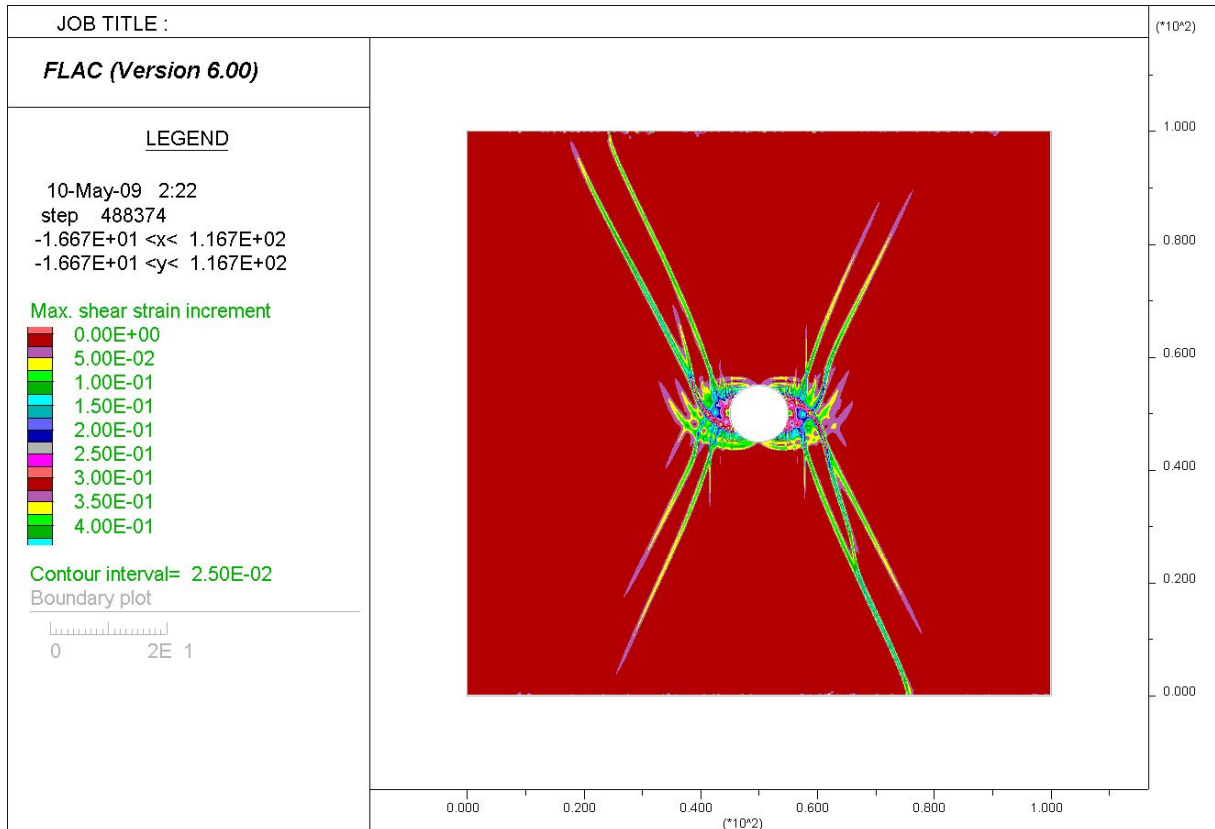


Abbildung 2.2: Beispiel einer asymmetrischen Darstellung der Schubverzerrungen

P.A.CUNDALL (1990) erklärt das Phänomen folgendermaßen:

„In manchen Berechnungen, besonders in solchen mit diskontinuierlichen (unstetigen) Materialien, reagieren die Ergebnisse auf geringfügig geänderte Anfangsbedingungen und einfache Änderungen der Belastungen sehr sensibel. Sogar nicht-physikalische Einflussfaktoren, wie zum Beispiel der Computer-Typ, können das Ergebnis beeinflussen. Im ersten Moment erscheint diese Situation als nicht zufriedenstellend und man tendiert dazu, die Ergebnisse der Computersimulation anzuzweifeln. Dennoch existiert die Empfindlichkeit im nachgebildeten physikalischen Modell. Für das scheinbar unberechenbare Verhalten zeichnen zumindest zwei Ausgangspunkte verantwortlich.

1. Es gibt bestimmte geometrische Modelle von Diskontinuitäten, die das System zwingen, zufällig zwischen zwei Möglichkeiten zu entscheiden. Die anschließende Entwicklung hängt von dieser Entscheidung ab. Abbildung 2.3 zeigt einen kleinen Teil eines geklüfteten Gesteinskörpers.

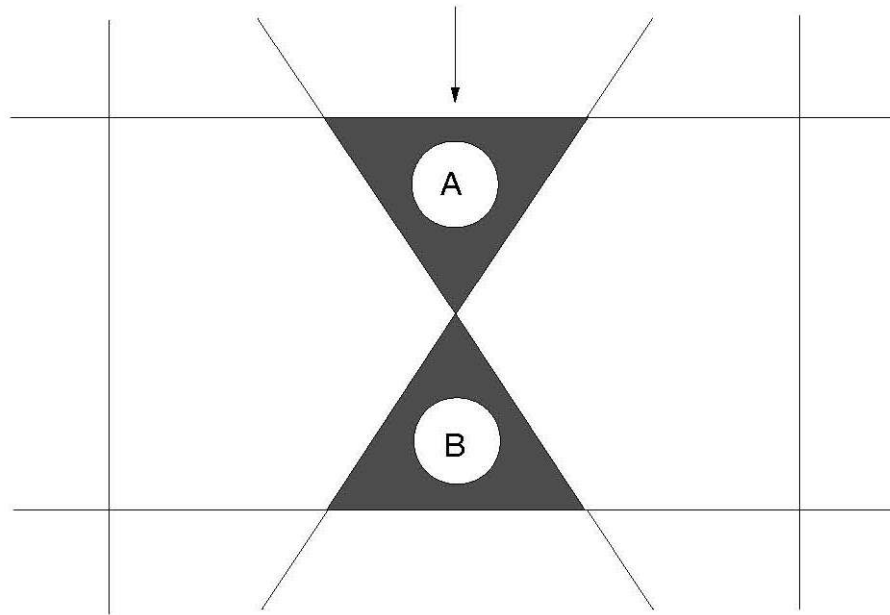


Abbildung 2.3: Teil eines geklüfteten Gesteinskörpers (ITASCA, 2006)

Wird Block A nach unten gedrückt, kann er entweder links oder rechts von B nach unten gleiten. Die Wahl hängt von mikroskopisch kleinen Unregelmäßigkeiten in Geometrie, Materialeigenschaften oder der kinetischen Energie ab.

2. Im System finden Entfestigungs-Prozesse statt, oder allgemeiner, Fälle von positiver Rückkopplung. In einem annähernd gleichförmigen Spannungsfeld, werden kleine Störungen in der nachfolgenden Entwicklung vergrößert, weil eine größere Verzerrung in einer Region mehr entfestigt und dadurch noch mehr Verzerrungen hervorruft und so weiter (Kreislauf einer positiven Rückkopplung).

Beide Phänomene verursachen chaotisches Verhalten in extremer Form (nach GLEICK (1987) und THOMPSON und STEWART (1986)). Die Untersuchung von chaotischen Systemen ergibt, dass die genaue Entwicklung eines solchen Systems nicht vorhersehbar ist, nicht einmal grundsätzlich. Die beobachtete Empfindlichkeit des Computer-Modells bei kleinen Änderungen des Ausgangszustandes oder der numerischen Einflussgrößen, ist eine Wiedergabe ähnlicher Gegebenheiten in der Natur. Wie soll man also angesichts eines chaotischen Systems vorgehen? Das Beste, das man von einem Modell erwarten kann, ist eine begrenzte Bandbreite von erwartetem Verhalten.

Man sollte einen Bereich anfänglicher Unregelmäßigkeiten einführen und die Berechnungen mehrmals durchführen. Unter diesen Umständen kann man Schwankungen im Verhalten des Modells erwarten, die eher von den eingeführten Unregelmäßigkeiten ausgelöst werden als vom numerischen Lösungskonzept. Die Ergebnisse können statistisch aufbereitet und analysiert werden.“ ((Ende Zitat))

3 Modellaufbau

3.1 Prinzipieller Berechnungsablauf

In Abbildung 3.1 ist der prinzipielle Ablauf einer Modellierung mittels FLAC^{2D} dargestellt.

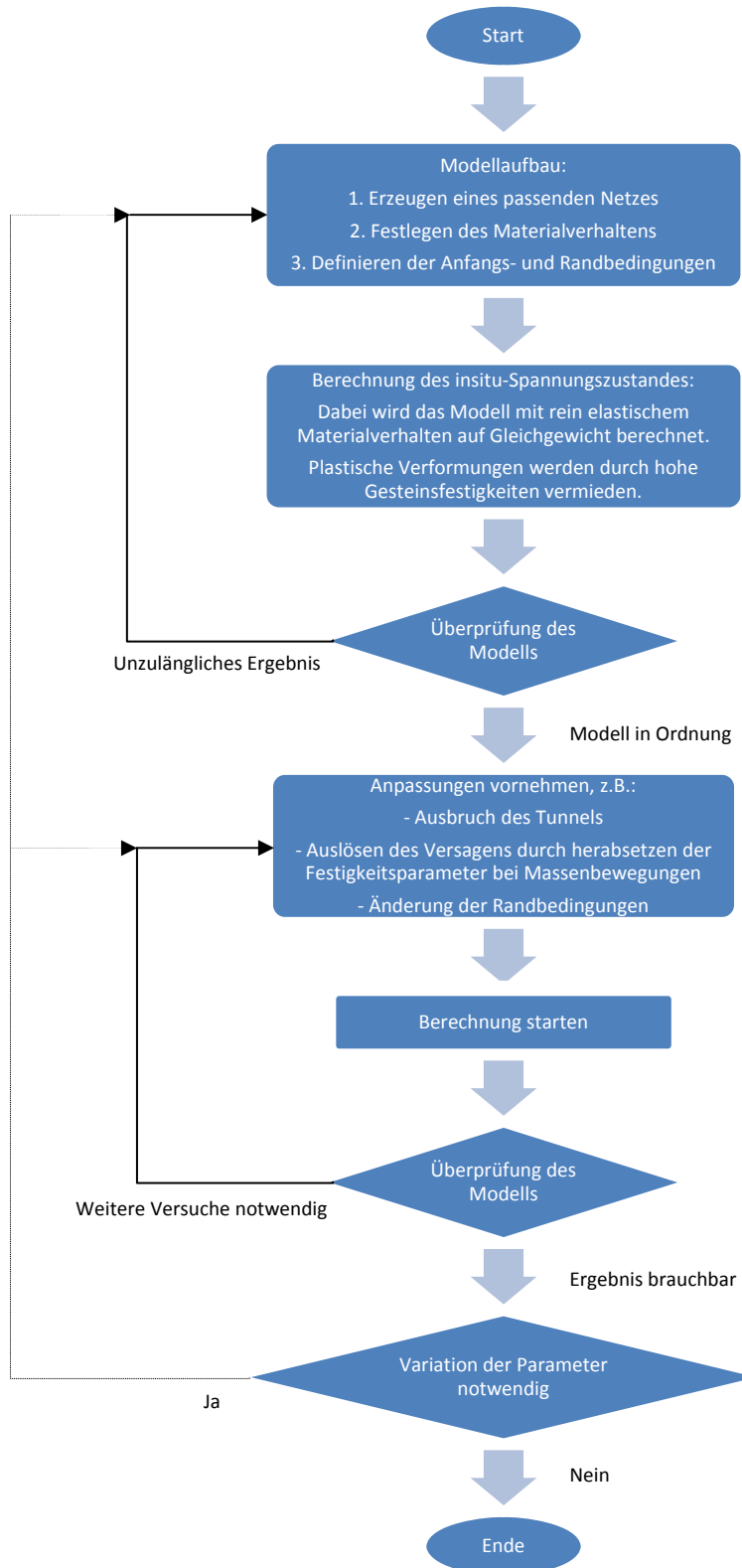


Abbildung 3.1: Lösungsverfahren von FLAC^{2D} (nach ITASCA, 2008)

3.2 Verwendete Materialmodelle

Zur Berechnung des in situ-Zustandes wurde das linear-elastische Materialmodell verwendet, bei dem das Hooksche Gesetz angewendet wird und somit ein lineares Spannungs-Dehnungsverhältnis besitzt.

Für die Berechnung des sekundären Spannungszustandes (Ausbruch des Tunnels), kam das Materialmodell nach Mohr-Coulomb zur Anwendung, welches sowohl elastisches als auch plastisches Verhalten berücksichtigt (Abbildung 3.2). Das in der Skizze eingezeichnete „Strain Softening“ wird in Abschnitt (3.8) erklärt.

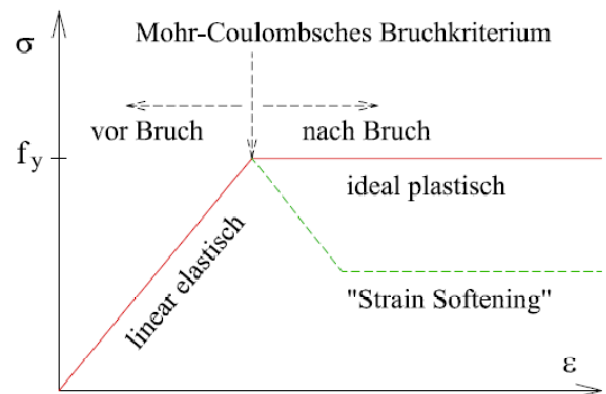


Abbildung 3.2: Materialmodell nach Mohr-Coulomb
(f_y ...Streckgrenze/Bruchspannung)

Das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium (Abbildung 3.3) wird durch die Kohäsion c , den Reibungswinkel φ und die Normalspannung σ definiert. Die Scherfestigkeit eines Körpers wird überschritten, wenn der Mohrsche Kreis (definiert durch die kleinste und größte Hauptnormalspannung) die Mohrsche Bruchgerade (definiert durch Kohäsion und Reibungswinkel) schneidet.

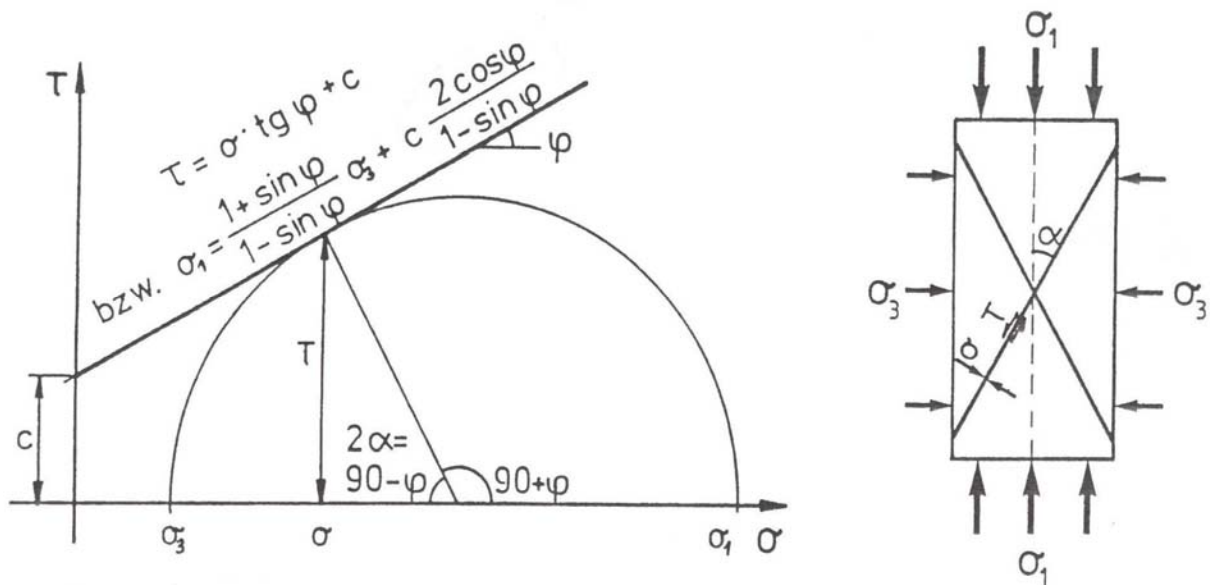


Abbildung 3.3: Mohr-Coulomb'sches Bruchkriterium (Felsmechanik VO, 2006)

3.3 Materialparameter

Um das Materialmodell Mohr-Coulomb in FLAC anwenden zu können, müssen folgende Eingangsparameter definiert werden:

- Materialdichte
- Elastizitätsmodul

- Querdehnungszahl
- Reibungswinkel
- Kohäsion
- Dilatanz
- Zugfestigkeit.

Für die in diesem Kapitel beschriebenen Modelle, sind die verwendeten Materialkennwerte in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Materialdichte ρ	2700 kg/m ³
Kohäsion c	1 MPa
Elastizitätsmodul E	1000 MPa
Reibungswinkel φ	30°
Querdehnungszahl ν	0,25

Tabelle 3.1: Materialkennwerte

Unter Verwendung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnungszahl wurden der Schermodul G und der Kompressionsmodul K mit Hilfe der Gleichungen (3.1) beziehungsweise (3.2) berechnet.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 400 \text{ MPa} \quad (3.1)$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} = 666,67 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

Der Seitendruckbeiwert λ für das Gebirge ergibt sich durch die fixierten seitlichen Ränder des Modells und nach Gleichung (3.3) zu:

$$\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu} = 1/3 \quad (3.3)$$

Die einaxiale Druckfestigkeit σ_D ist vom Reibungswinkel φ und der Kohäsion c abhängig und ergibt sich nach Gleichung (3.4) zu:

$$\sigma_D = c \cdot \frac{2 \cdot \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} = 3,46 \text{ MPa} \quad (3.4)$$

Um die Überlagerung von für tiefliegende Tunnel nachzubilden, wurde das Modell mit einer Auflast von 27 MPa belastet, welche nach Gleichung (3.5) berechnet wurde.

$$\sigma_V = \rho \cdot g \cdot h = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1000 \text{ m} = 27 \text{ MPa} \quad (3.5)$$

3.4 Netzvergleich

Es wurde untersucht, welche Netzgröße und Feinheit des Netzes notwendig beziehungsweise ausreichend ist, um den Scherbruchmechanismus möglichst detailgenau darzustellen.

3.4.1 Methode

Um die Netze untereinander vergleichbar zu machen, wurde der Systemzustand bei einer Ulmenverschiebung von 0,5 m für die untersuchten Netze berechnet. Anhand der Kontur-Plots der Schubverzerrungen wurde die Qualität der Abbildungen des Versagensmechanismus bewertet. Somit lassen sich die Netze unabhängig von den Berechnungsschritten miteinander vergleichen.

3.4.2 Untersuchte Netze

Es wurden drei unterschiedliche Netze untersucht. Das größte Netz hat 100x100 Zonen (kurz „Netz 100“), das mittlere Netz 200x200 Zonen (kurz „Netz 200“) und das feinste Netz besteht aus 400x400 Zonen (kurz „Netz 400“).

Alle drei untersuchten Netze haben eine äußere Abmessung von 160x160 Meter und sind am unteren Modellrand (in X- und Y-Richtung) sowie an den Seiten (in X-Richtung) fixiert (siehe Abbildung 3.4). Die Überlagerung von 1000 Meter wurde mit einem am oberen Modellrand aufgebrauchten Druck von 27 MPa nachgebildet.

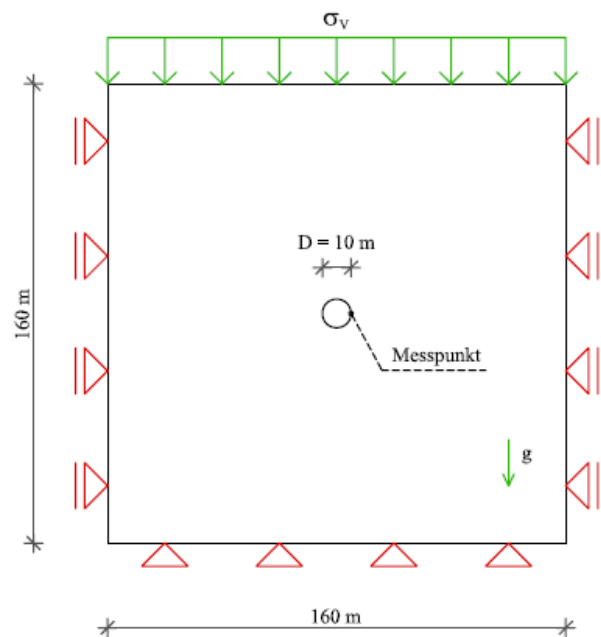


Abbildung 3.4: Skizze des Modells

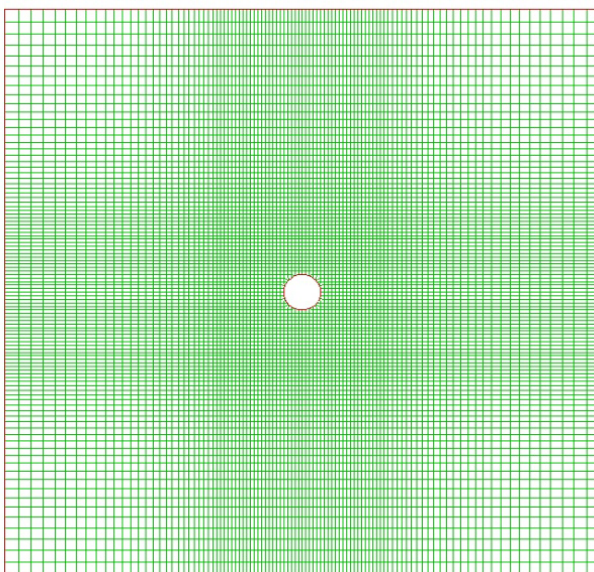


Abbildung 3.5: Abgestuftes Netz

Im Nahbereich des Tunnels (40x40m) ist das Raster regelmäßig ausgeführt. Da am Rand des Modells keine Effekte des Kirschkernversagens beobachtet werden können, wurde das Netz zu den Rändern hin etwas gröber verlaufend abgestuft (siehe Abbildung 3.5).

Die Berechnung erfolgte mit aktivierter Gravitation.

3.4.3 Ergebnisse

3.4.3.1 Netz 100

Im Nahbereich des Tunnels ergibt sich ein Raster von 1x1 m. Die Berechnung kann sowohl am unverformten, als auch am verformten Netz (Koordinaten werden laufend aktualisiert) durchgeführt werden. Durch die wenigen Zonen ergibt sich für dieses Modell die kürzeste Rechenzeit. Die Scherbruchkörper lassen sich zwar erkennen, werden aber nicht in der gewünschten Feinheit dargestellt (Abbildung 3.6).

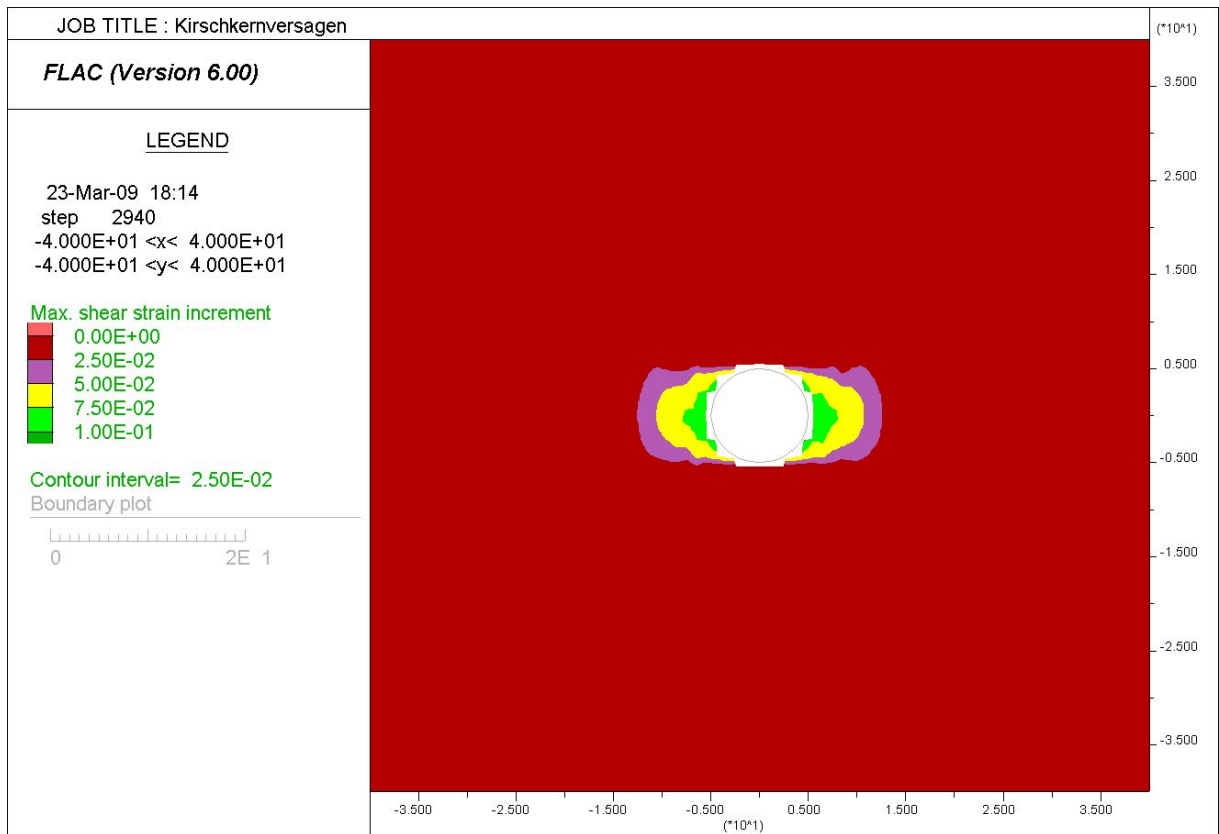


Abbildung 3.6: Netz 100, Schubverzerrungen bei 0,5 m Verschiebung in der Ulme

3.4.3.2 Netz 200

Im Nahbereich des Tunnels ergibt sich ein Raster von 0,5x0,5 m. Die Berechnung kann auch bei diesem Netz sowohl am unverformten, als auch am verformten Netz durchgeführt werden. Die Berechnungsdauer ist akzeptabel, die Scherbruchkörper lassen sich gut erkennen und werden in annehmbarer Feinheit dargestellt (Abbildung 3.7).

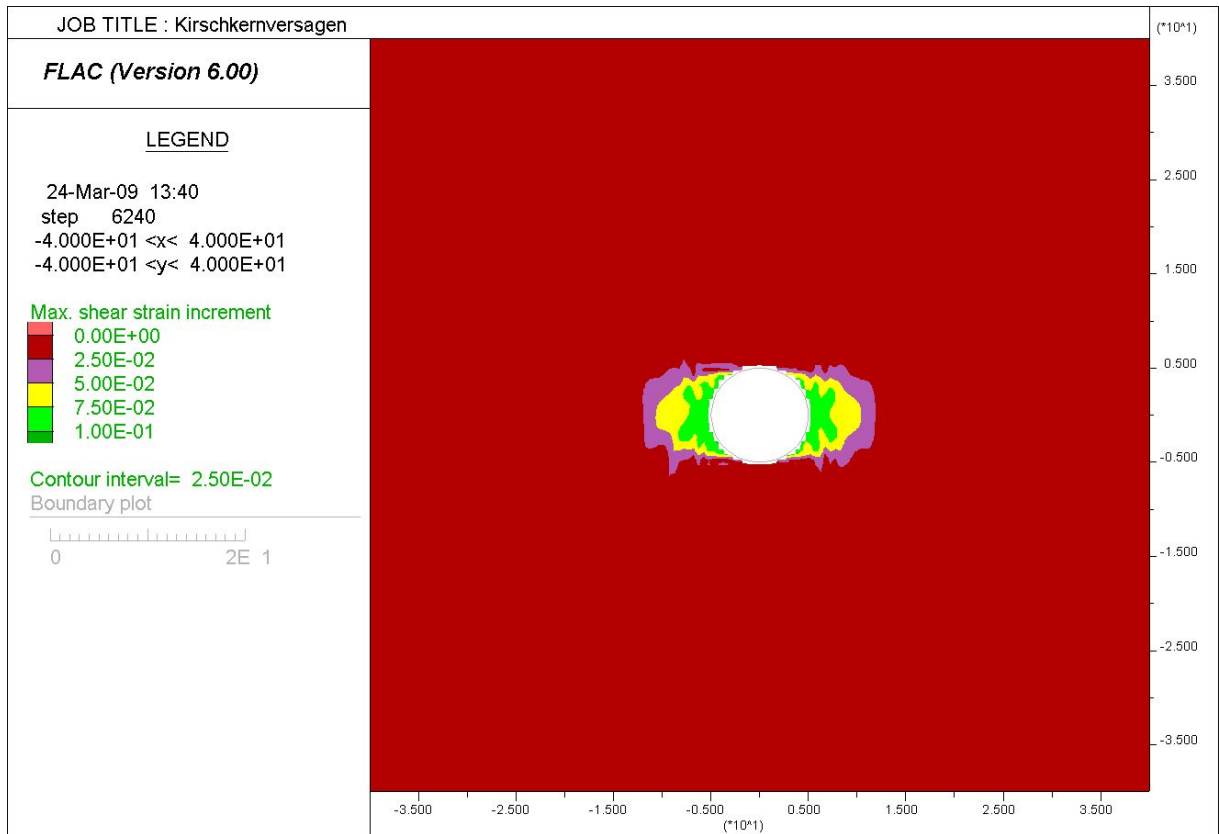


Abbildung 3.7: Netz 200, Schubverzerrungen bei 0,5 m Verschiebung in der Ulme

3.4.3.3 Netz 400

Im Nahbereich des Tunnels ergibt sich ein Raster von 0,25x0,25 m. Die Berechnung kann hier nur am unverformten Netz erfolgen. Wird am verformten Netz gerechnet, bricht die Berechnung aufgrund zu starker Verformungen einzelner Zonen ab. Es wurde versucht, den neuen FLAC-Befehl „rezone“ anzuwenden, jedoch ohne zufriedenstellenden Erfolg (siehe 3.4.4.1 Rezoning). Aufgrund des engen Rasters werden die Scherbruchkörper mit der größten Feinheit dargestellt (Abbildung 3.8). Im Vergleich zum Netz 200 verdoppelt sich jedoch die Rechenzeit.

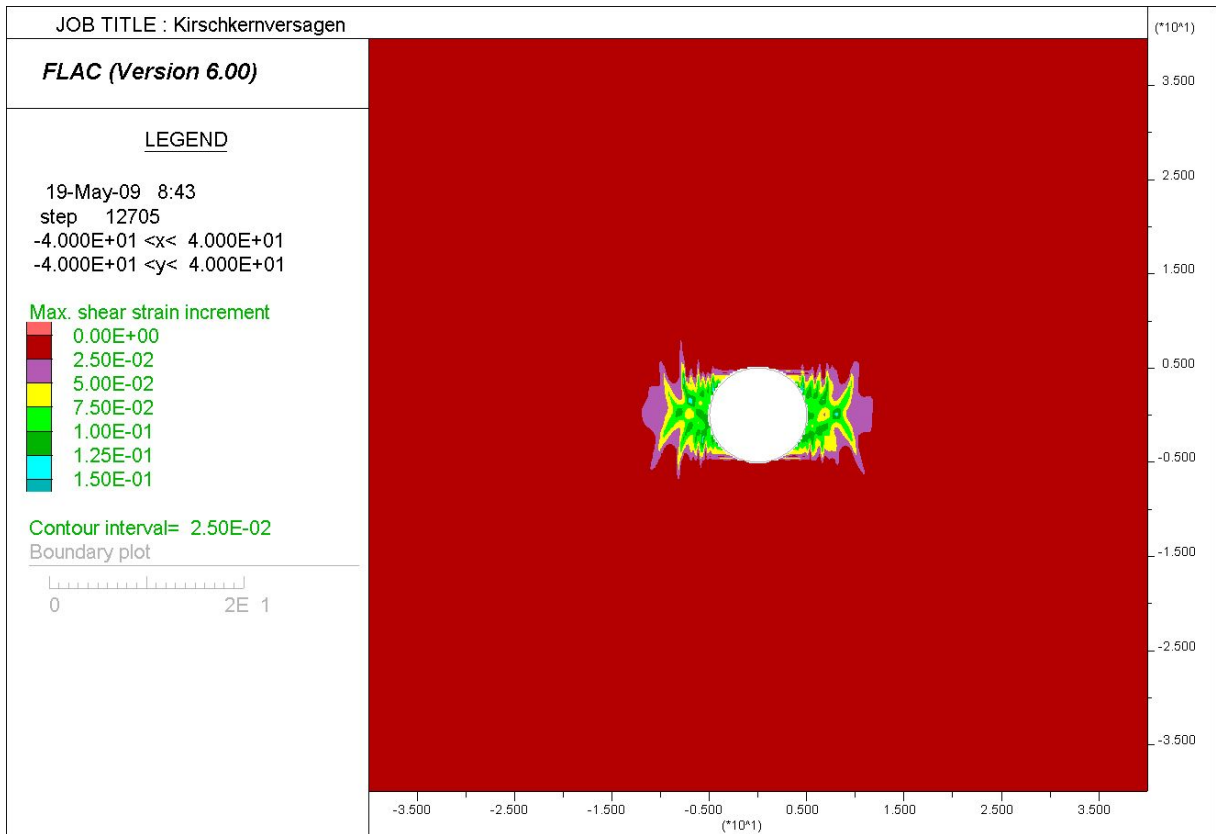


Abbildung 3.8: Netz 400, Schubverzerrungen bei 0,5 m Verschiebung in der Ulme

3.4.3.4 Vergleich der untersuchten Netzfeinheiten

Der wesentlichste Unterschied ergibt sich bei den erreichten Verschiebungen. In Tabelle 3.2 sind die Verschiebungen zusammengefasst, die sich einstellen, wenn das System bei den gegebenen Materialparametern einen Gleichgewichtszustand erreicht. Je feiner das Netz skaliert wird, desto größere Verschiebungen werden berechnet.

Netz	Verschiebung bei Rechnung am unverformten Netz [m]	Verschiebung bei Rechnung am verformten Netz [m]
Netz 100	0,813	1,054
Netz 200	1,451	1,147
Netz 400	1,774	0,902 (beim Abbruch)

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der Verschiebungen

Im folgenden Diagramm (Abbildung 3.9) ist der Anstieg der Berechnungsschritte mit der Zunahme der Netzfeinheit gut ersichtlich. Durch diesen Anstieg verlängert sich in gleichem Maße auch die Berechnungsdauer. Der niedrige Wert bei Netz 400, Rechnung am verformten Netz ergibt sich durch den Abbruch von FLAC.

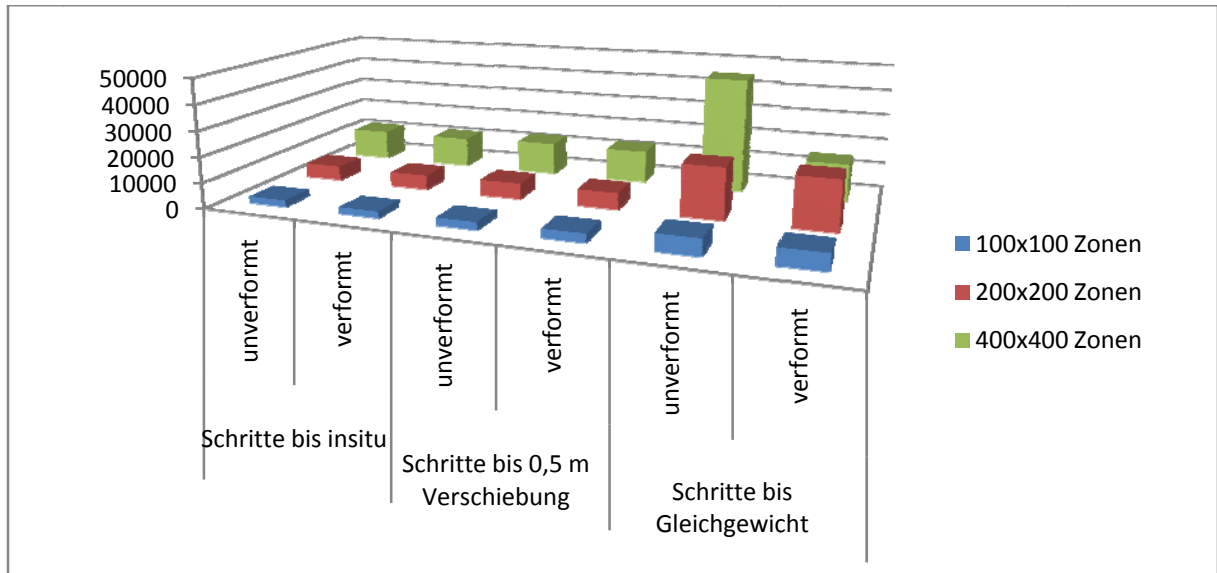


Abbildung 3.9: Vergleich der Berechnungsschritte

3.4.4 Rechnung am unverformten/verformten Netz

Im Folgenden wird der Unterschied zwischen der Rechnung am unverformten beziehungsweise am verformten Netz erläutert. Da bei vielen Berechnungen in dieser Diplomarbeit aus Effizienzgründen am unverformten Netz gerechnet werden musste, wird hier anhand von Vergleichsrechnungen gezeigt, dass diese Vorgangsweise zulässig ist.

Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11 zeigen Plots der Schubverzerrungen zu dem Zeitpunkt, an dem die Verschiebung in der Ulme 0,5 m beträgt. Es wird ersichtlich, dass sich abgesehen vom etwas gedrungenen Kreis des Tunnelquerschnitts beim verformten Netz, nahezu keine Unterschiede zeigen. Lässt man die Berechnung bis zum Gleichgewichtszustand weiterlaufen und vergleicht die Ergebnisse erneut (Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13), erscheint das Profil des Tunnels beim verformten Netz zwar noch weiter zusammengedrückt, doch die Darstellung der Schubverzerrungen ist qualitativ annähernd gleich.

Weiters wurden Kontur-Plots der Horizontal- und Vertikalverschiebungen erstellt. Auf Seite 22 werden Plots der Bereiche gleicher Horizontalverschiebungen zum Zeitpunkt „0,5 m Verschiebung in der Ulme“ gegenübergestellt (Abbildung 3.14 und Abbildung 3.15) und auf Seite 23 Plots der Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen im Gleichgewichtszustand (Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17).

Während bei den Horizontalverschiebungen kein Unterschied zu sehen ist, wird zum Zeitpunkt an dem sich das System stabilisiert sichtbar, dass sich bei Rechnung am unverformten Netz (Abbildung 3.16) größere Verschiebungen einstellen als am verformten Netz (Abbildung 3.17).

Die Vergleichsrechnungen zeigen, dass der Versagensmechanismus und der Versagensablauf auch bei einer Berechnung am unverformten Netz ausreichend genau abgebildet werden und es daher zulässig ist, die Untersuchungen am unverformten Netz durchzuführen.

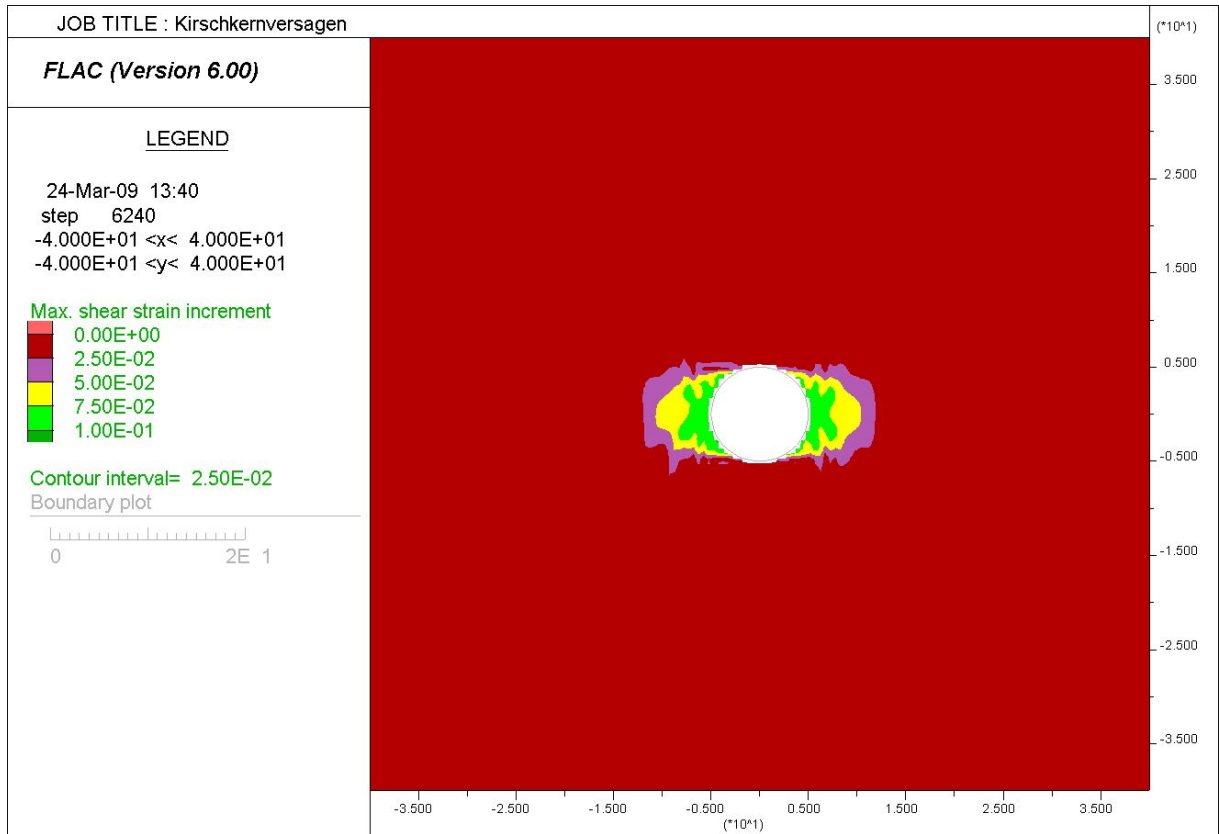


Abbildung 3.10: Schubverzerrungen unverformtes Netz, 0,5m Verschiebung in der Ulme

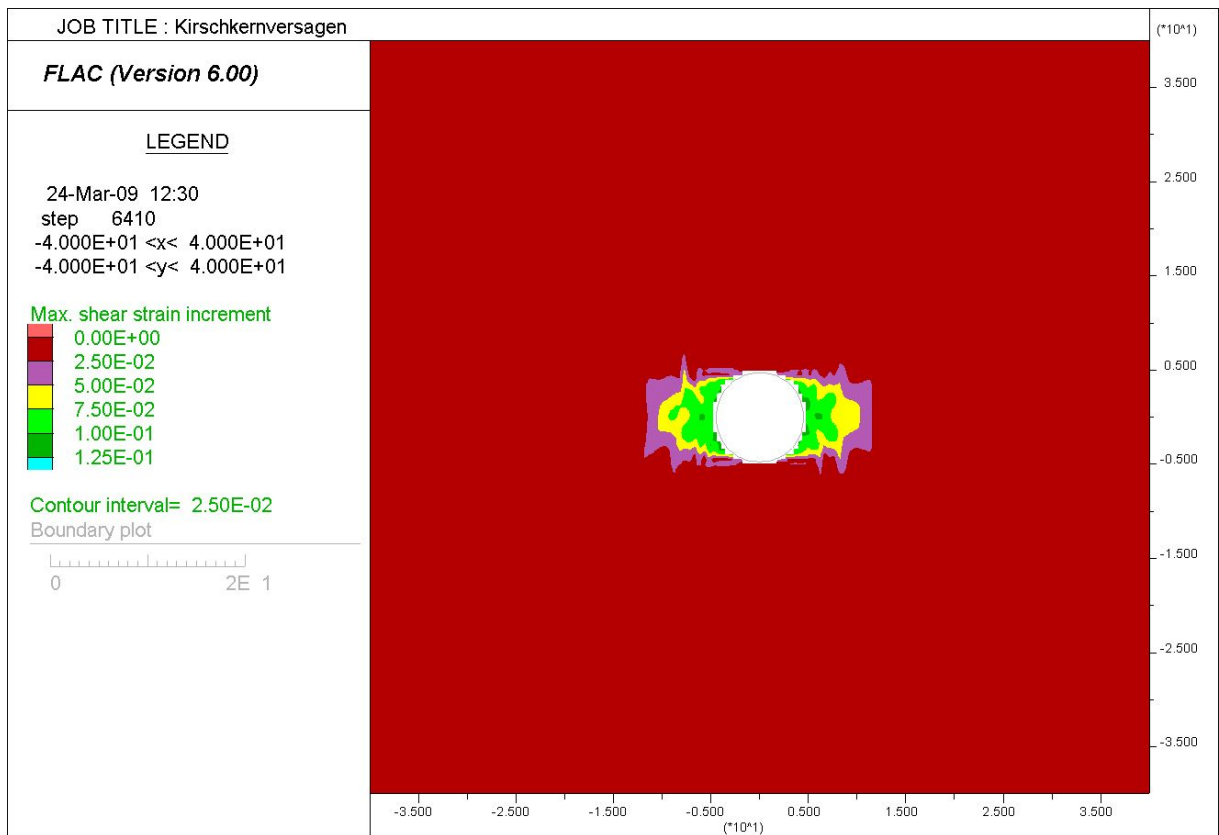


Abbildung 3.11: Schubverzerrungen verformtes Netz, 0,5m Verschiebung in der Ulme

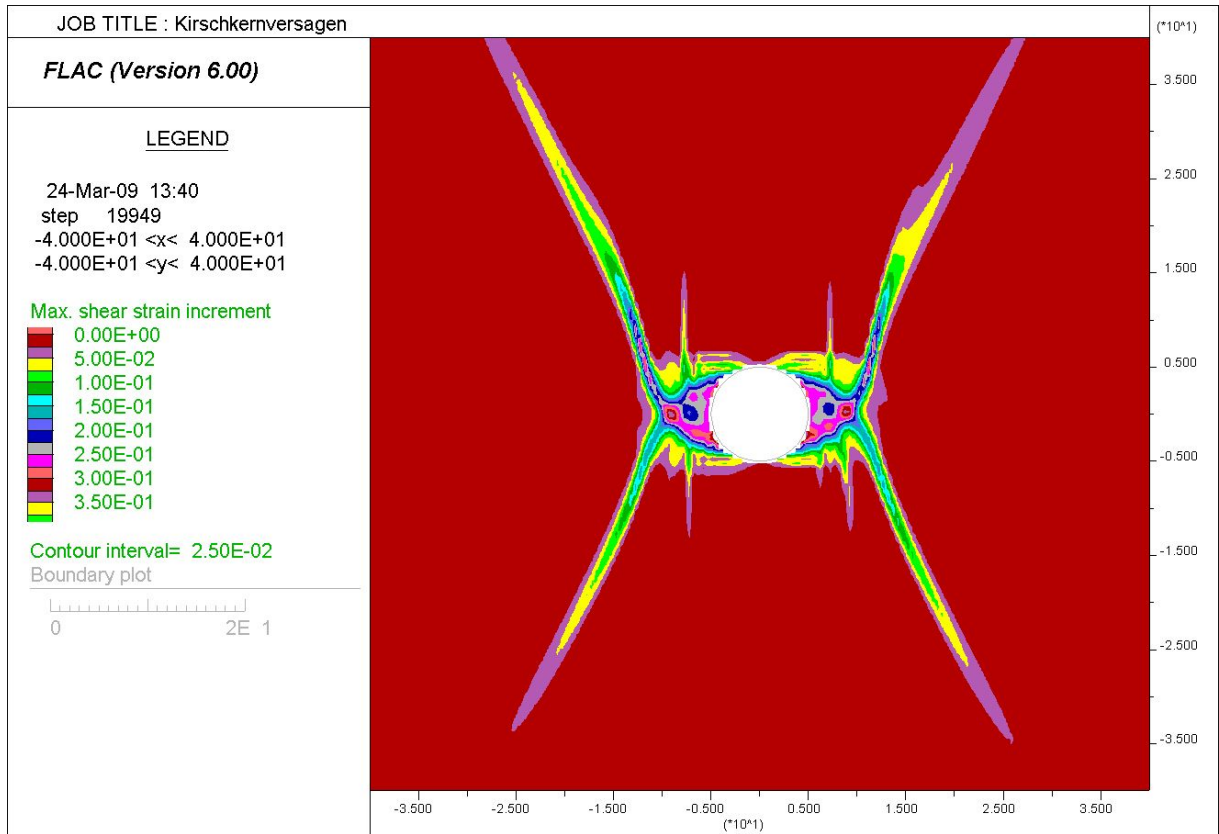


Abbildung 3.12: Schubverzerrungen unverformtes Netz, Gleichgewichtszustand

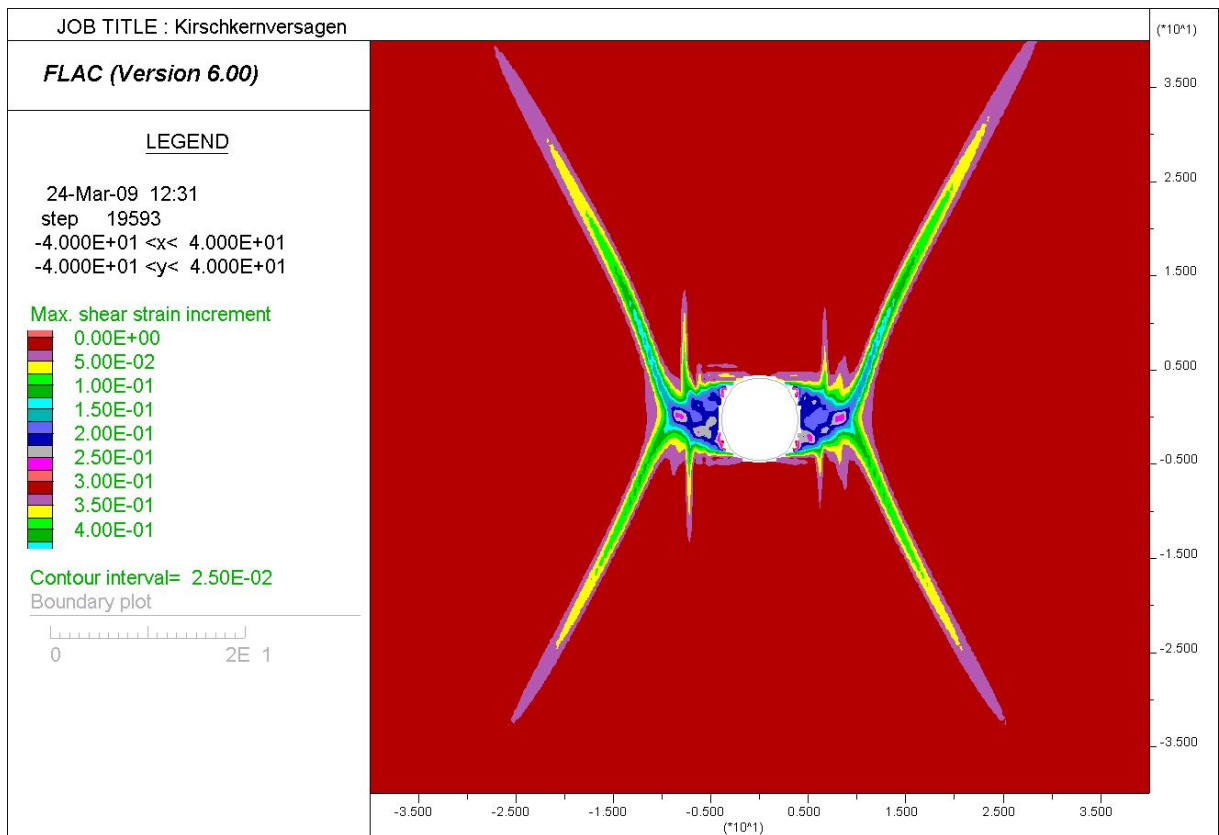


Abbildung 3.13: Schubverzerrungen verformtes Netz, Gleichgewichtszustand



Abbildung 3.14: Bereiche gleicher Horizontalverschiebungen, unverformtes Netz

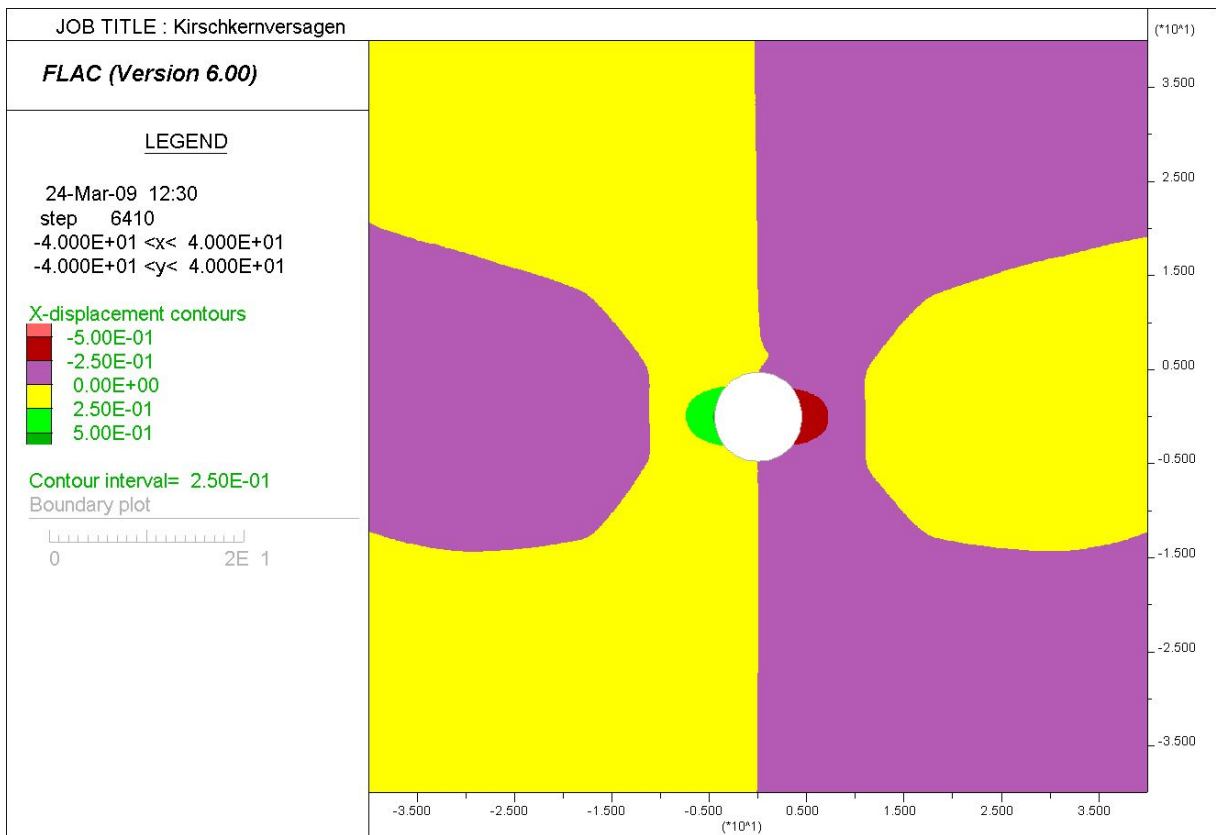


Abbildung 3.15: Bereiche gleicher Horizontalverschiebungen, verformtes Netz

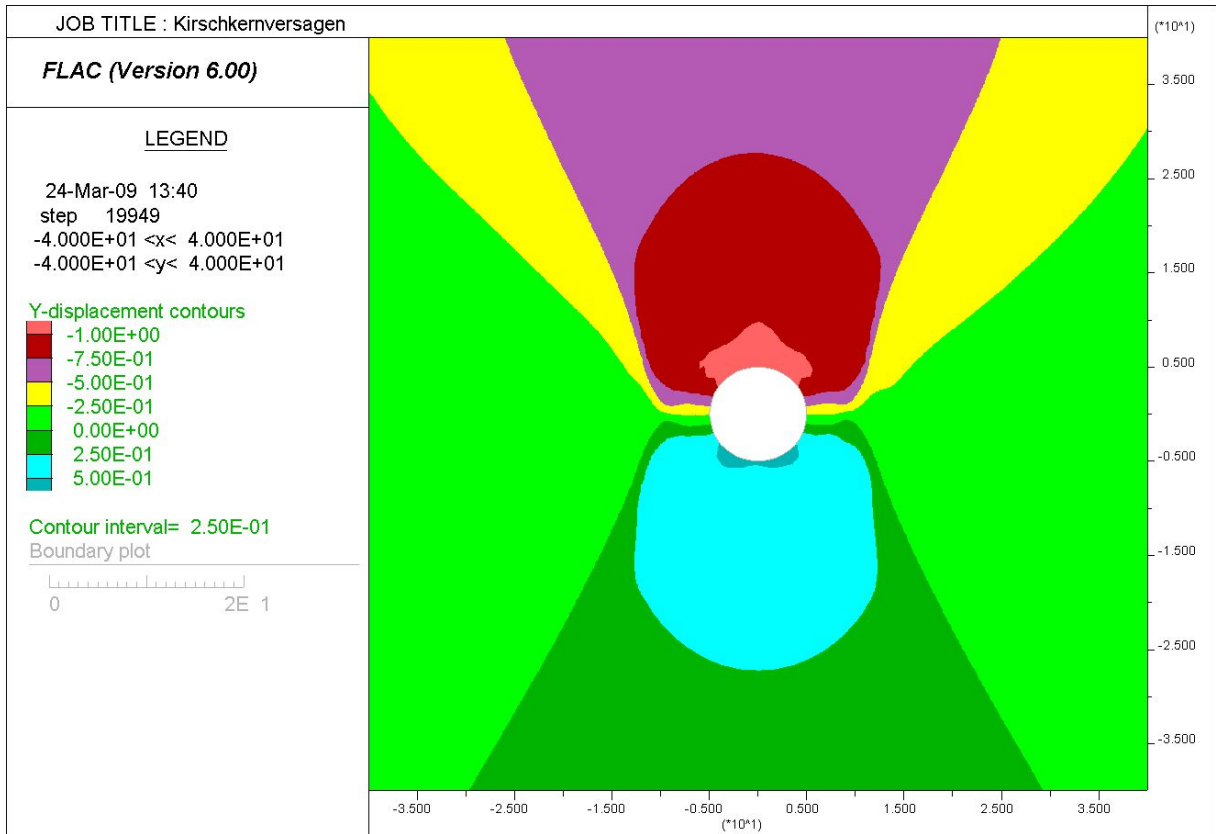


Abbildung 3.16: Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen, unverformtes Netz, Gleichgewichtszustand

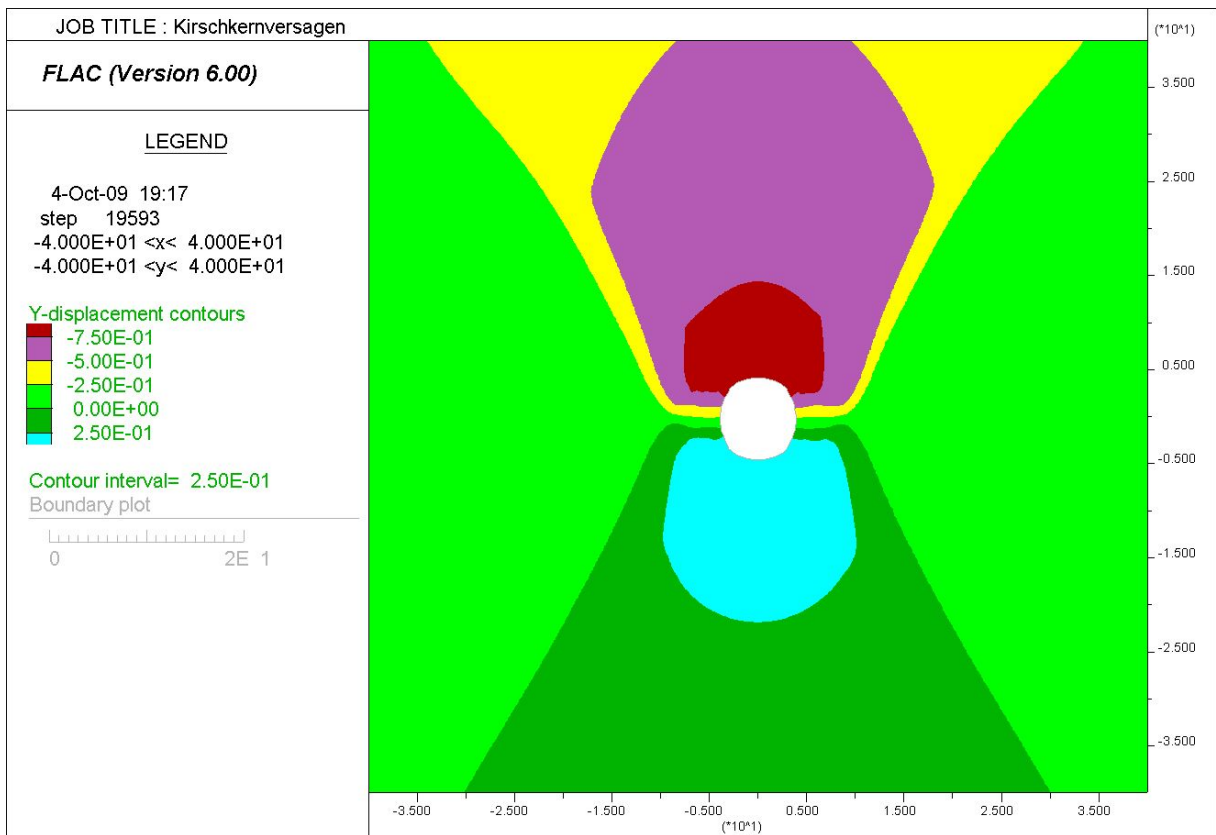


Abbildung 3.17: Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen, verformtes Netz, Gleichgewichtszustand

3.4.4.1 Rezoning

Rechnet FLAC am verformten Netz und mit großer Netzfeinheit, kommt es oft vor, dass die Berechnung abgebrochen wird, wenn manche Zonen so stark verzerrt werden, dass das Netz korrupt wird und nicht mehr fehlerfrei berechnet werden kann.

Seit der Programmversion FLAC 6.0 gibt es die automatische „rezone logic“, die die auftretenden Spannungen, Geschwindigkeiten und Verschiebungen aufzeichnet und in einem neu generierten Netz ausgibt, sodass die Berechnung fortgeführt werden kann. Da während der Neuzuordnungen interpoliert werden muss, sind gewisse „Verschmierungseffekte“ und ein Genauigkeitsverlust unvermeidbar. Um diese Effekte möglichst minimal zu halten werden die Spannungen für jeden Teilbereich einzeln festgelegt. Um eine genaue Abschätzung des neuen Spannungstensors zu erhalten, wird eine Überlagerung des neuen und des alten Teilbereiches durchgeführt.

3.4.4.1.1 *Angepasste Modellierung*

Für diese neue „Rezone-Funktion“ gibt es nur eine begrenzte Anzahl von dokumentierten Musterbeispielen im Handbuch, an denen man sich bei der Anwendung orientieren kann. Bei allen vorgestellten Modellen handelt es sich um Böschungen oder andere oberflächennahe Untersuchungen. Bei der Übertragung und Anwendung der Funktionen auf das Tunnelmodell kam es zu etlichen Problemen.

Nach einigen fehlgeschlagenen Versuchen deutete vieles darauf hin, dass eine durchgehende Konturlinie notwendig ist, damit sich das Netz immer neu generieren kann. Deswegen wurde das bisher verwendete Modell halbiert, was durch die Symmetrie kein Problem darstellen sollte. Um die durchgehende Oberfläche zu erzeugen konnte der Befehl „gen circle“ nicht angewendet werden, deshalb wurde die Tunnelgeometrie mit einem Polygonzug definiert.

Die Außenabmessungen des Modells wurden mit 40x80 m gewählt, das ergibt bei 160x320 Zonen eine Rasterfeinheit von 0,25x0,25 m. Auf ein abgestuftes Netz wurde bei dieser Anwendung verzichtet. Es wurden dieselben Materialparameter wie unter Punkt 3.3 verwendet.

3.4.4.1.2 *Ergebnisse*

Nach anfänglich recht brauchbaren Ergebnissen (siehe Abbildung 3.18), kam es in weiterer Folge an der rechten oberen Modellecke zu wesentlich größeren vertikalen Verschiebungen des Netzes (Abbildung 3.19) als bei einer Berechnung ohne der „rezone logic“. Es zeigte sich auch, dass die derzeit implementierte Funktion bei großen Verschiebungen instabil wird. Aus diesem Grund wurde die Arbeit mit der „Rezone-Funktion“ nicht weitergeführt.

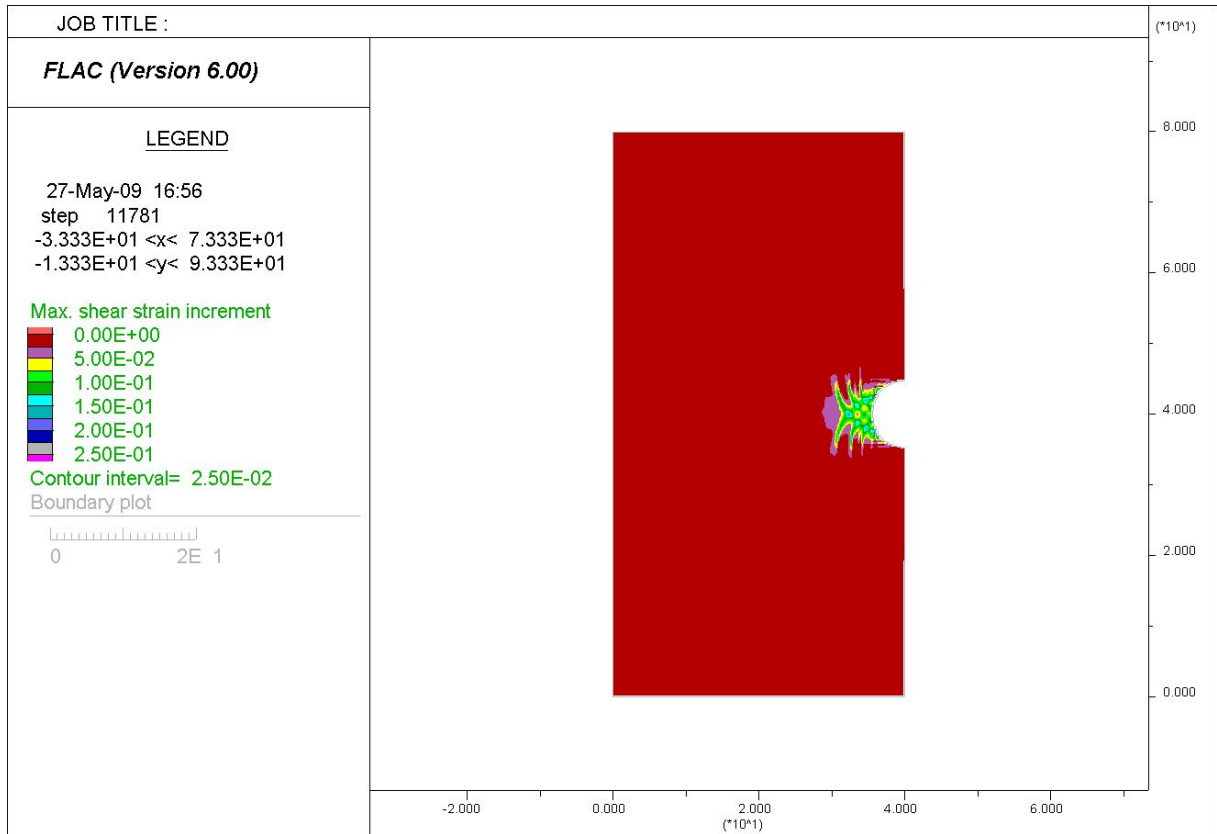


Abbildung 3.18: Schubverzerrungen bei 0,5 m Verschiebung in der Ulme (mit Rezoning)

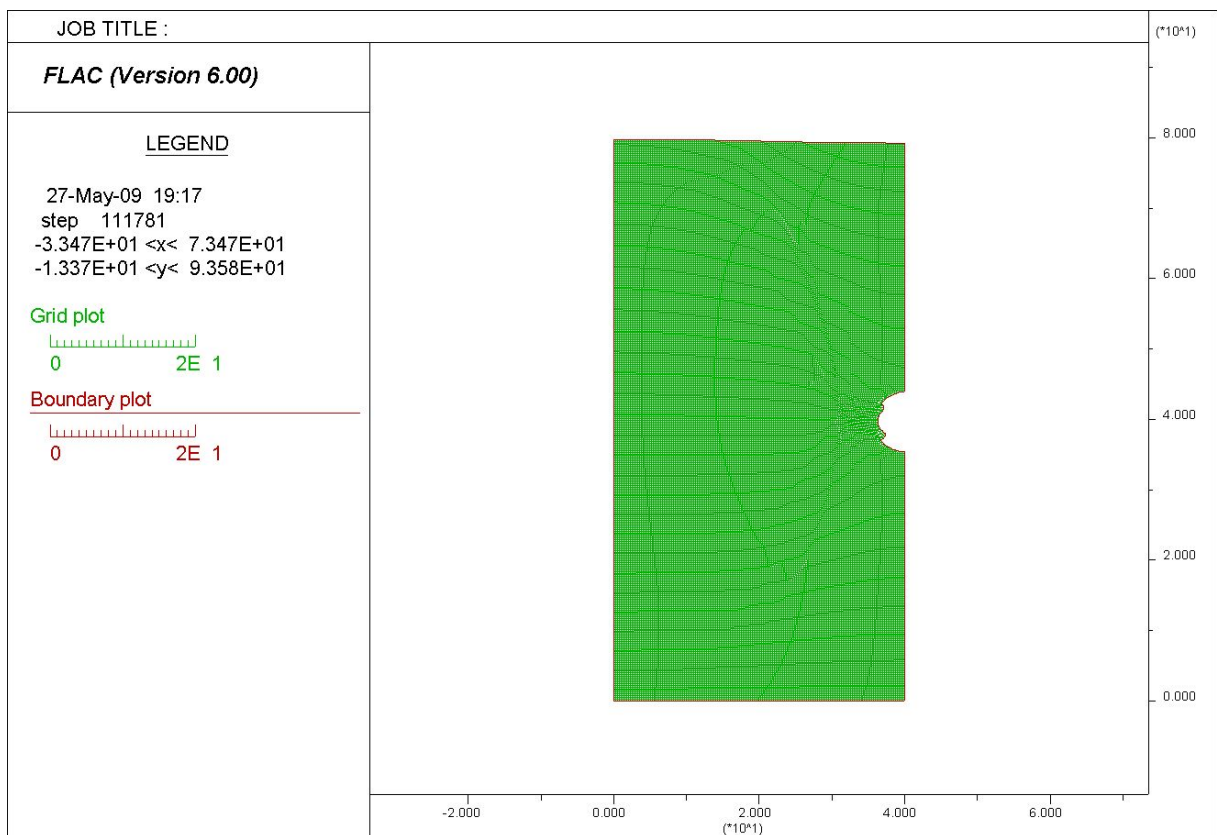


Abbildung 3.19: Verzerrung des Netzes unter Anwendung der „Rezone-Funktion“

3.5 *Hohlraum mit entfernten Bruchkörpern*

3.5.1 Hintergrund

Es wurde ein neuer Tunnelquerschnitt untersucht der sich aus der folgenden Überlegung ergibt. Nach RABCEWICZ (1964) entstehen bei der Spannungsumlagerung in einer ersten Phase keilförmige Bruchkörper im Ulmenbereich, die eine Ausdehnung vom 1,5 bis 1,8-fachen Durchmesser erreichen (Abbildung 1.4). Diese Bruchkörper wurden nun gleich in den Ausbruchquerschnitt eingebunden.

Wie in Abbildung 3.20 ersichtlich ist, reißen von den Ecken/Spitzen dieser Bruchkörper, weit ins Gebirge reichende Scherbrüche nach oben und unten aus.

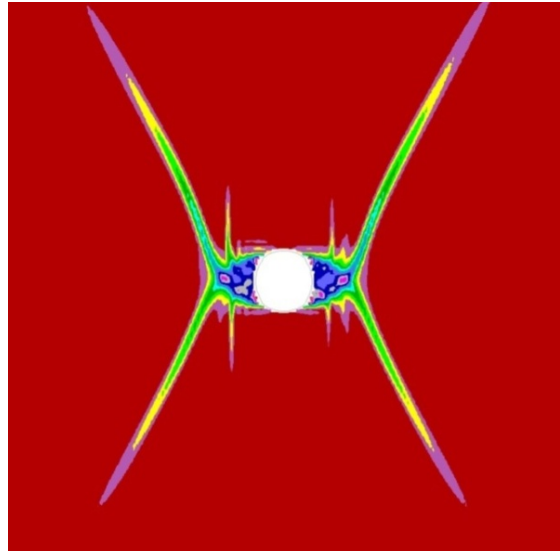


Abbildung 3.20: Scherbruchkörper

Es wurde überprüft, ob sich die Scherbrüche auch an den Spitzen des um die Bruchkörper erweiterten Ausbruchquerschnittes bilden und ob das geänderte Tunnelprofil Vorteile hinsichtlich der Standfestigkeit mit sich bringt.

3.5.2 Geometrie

Die keilförmigen Bruchkörper wurden auf zwei verschiedene Arten nachgebildet. Abbildung 3.21 zeigt einen elliptischen Ausbruch und Abbildung 3.22 zeigt das mit einem Polygonzug konstruierte Tunnelprofil. Es wurde auf eine sehr detaillierte Darstellung Wert gelegt, deswegen wurde das Netz 400 (zum Rand abgestuft) verwendet.

Die horizontale Ausdehnung der Ellipse (normal auf die größte in situ-Spannung) beträgt 18 Meter (1,8 x 10 m), die vertikale Ausdehnung ergab sich durch die Netzgenerierung auf 9 Meter.

Um die Ecken/Spitzen besser nachbilden zu können, wurden im zweiten Versuch die Bruchkörper mit einem Polygonzug angenähert. Die horizontale Ausdehnung beträgt wie bei der Ellipse 18 Meter, während die vertikale Ausdehnung bezüglich des Kreisquerschnittes nicht verändert und mit 10 Meter festgelegt wurde.

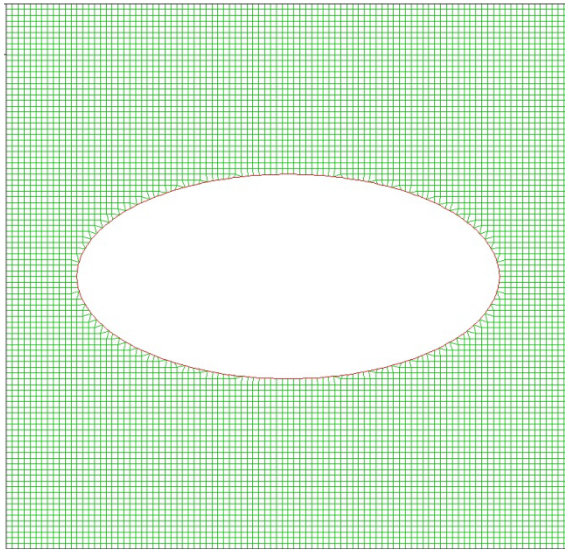


Abbildung 3.21: Elliptischer Ausbruch

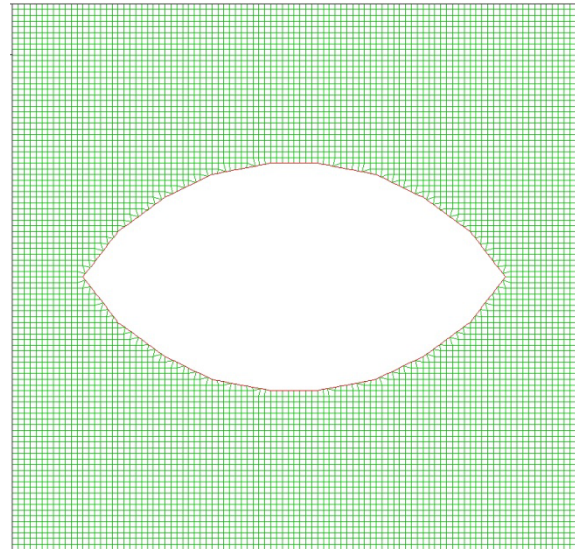


Abbildung 3.22: Ausbruch mit Polygonzug

3.5.3 Ergebnisse und Vergleich

3.5.3.1 Ellipse

Entgegen der Annahme, dass die Phase der Bildung der keilförmigen Bruchkörper übersprungen wird, bilden sich in den Ulmen erneut Scherbruchkörper aus. Abbildung 3.23 zeigt die Schubverzerrungen 300 Berechnungsschritte nach dem in situ-Zustand. Analog zum Ablauf beim Kreisquerschnitt, bilden sich danach Bruchflächen nach oben und unten aus (Abbildung 3.24).

Vergleicht man die Verläufe der Verschiebungen des ellipsenförmigen Hohlraumes (Abbildung 3.26) mit dem kreisförmigen (Abbildung 3.25), wird ersichtlich, dass ein ellipsenförmiger Querschnitt zu keiner Besserung der Standsicherheit führt. Die Horizontalverschiebungen in der Ulme sind beim Ellipsenprofil um circa 30 % größer als beim Kreisprofil. Noch größer ist der Unterschied bei den Vertikalverschiebungen in der Firste. Dort sind sie beim Ellipsenprofil um circa 60 % größer als beim Kreisprofil.

3.5.3.2 Polygonzug

Auch dieser Versuch brachte nicht das erwartete Ergebnis. Anfänglich scheinen sich noch die Scherbrüche von den Spitzen ausgehend auszubilden (Abbildung 3.27), doch in weiterer Folge entstehen neue Scherbruchkörper von denen mehrere Scherbrüche ausreißen (Abbildung 3.28).

Hinsichtlich Standfestigkeit wirkt sich diese Profilform negativ aus. Auffällig ist, dass bei diesem Modell die Verschiebungen in der Firste größer sind als jene in der Ulme (Abbildung 3.29). Während die Verschiebungen in der Ulme mit 1,7 Meter im Vergleich zum Kreisprofil gleich bleiben, sind sie in der Firste um 60 % größer.

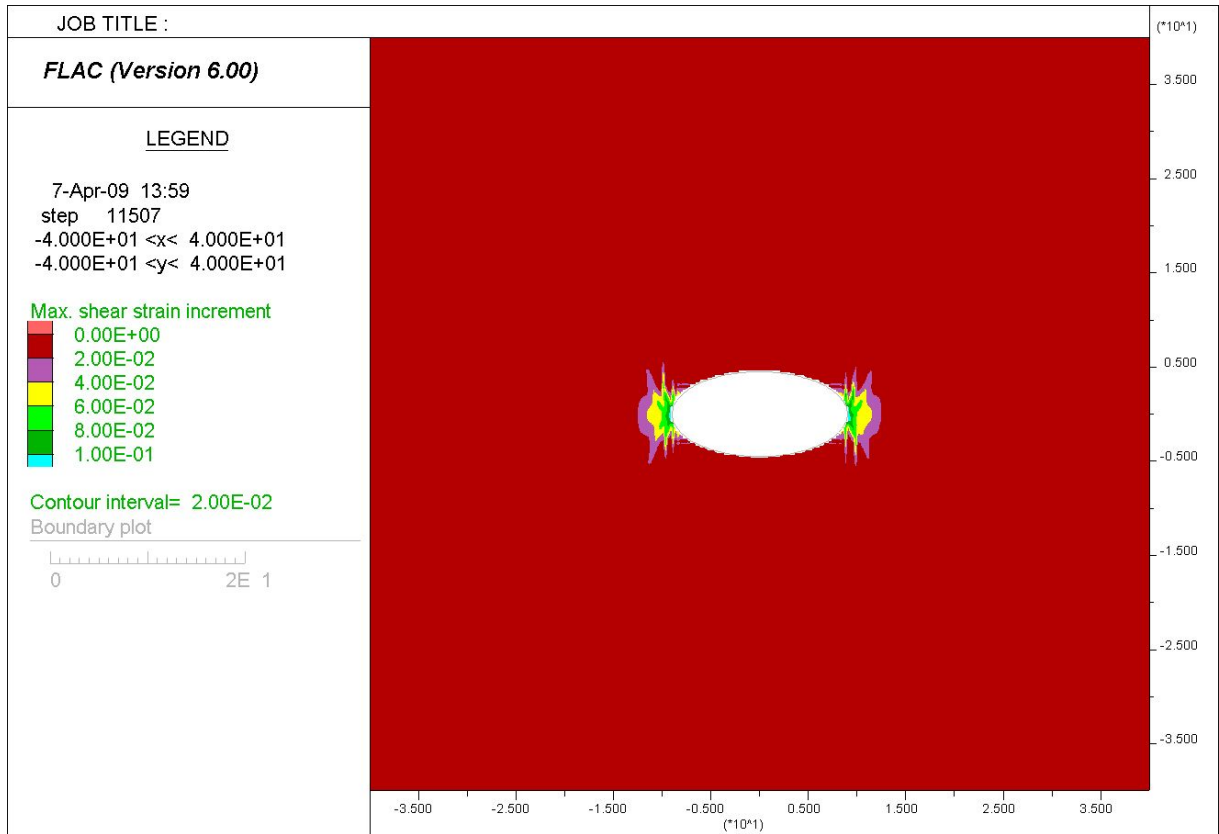


Abbildung 3.23: Elliptischer Ausbruch, Schubverzerrungen 300 Berechnungsschritte nach in situ

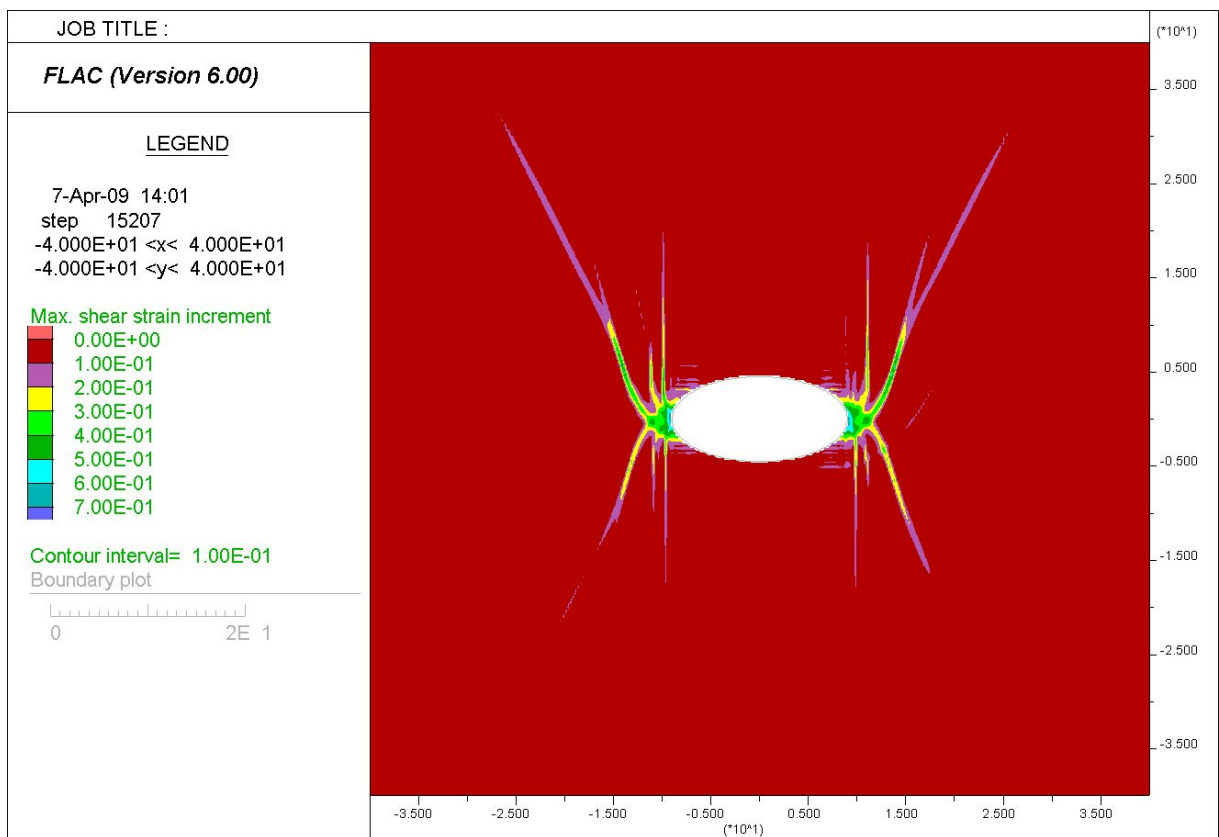


Abbildung 3.24: Elliptischer Ausbruch, Schubverzerrungen 4000 Berechnungsschritte nach in situ

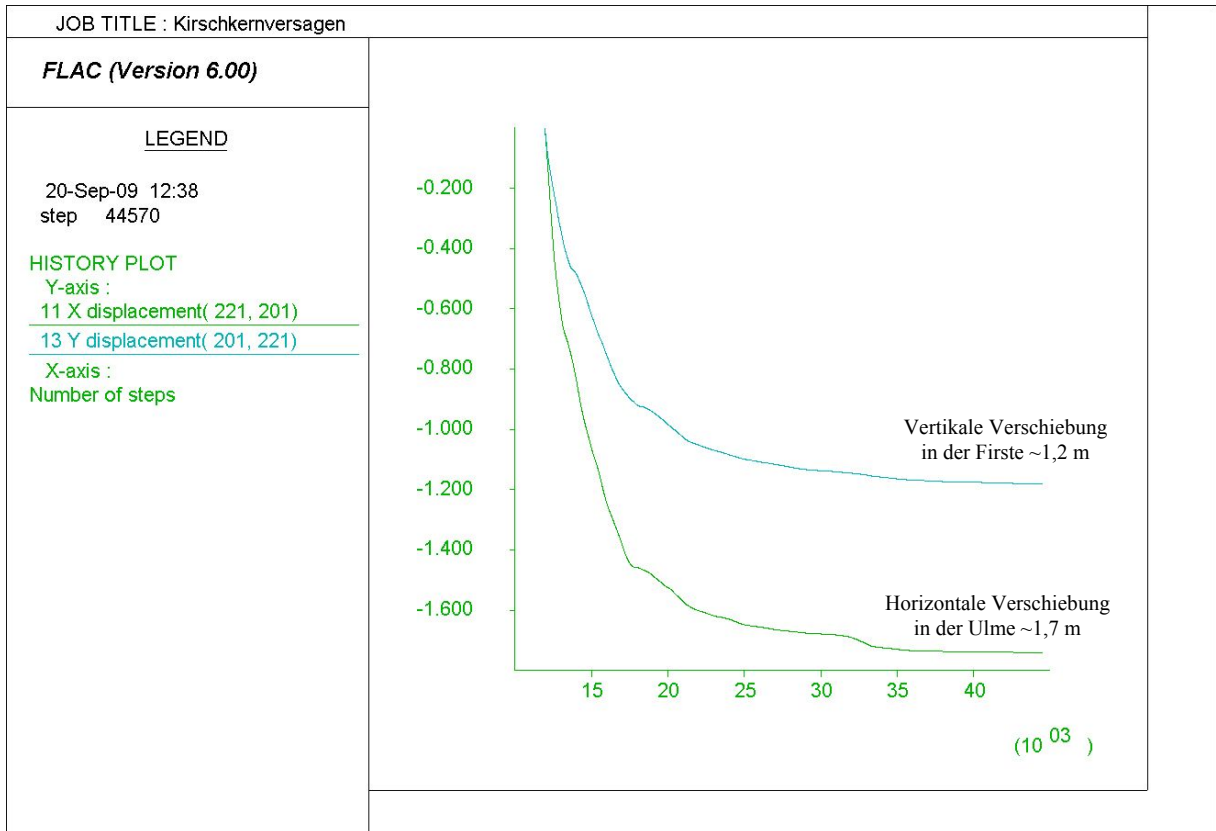


Abbildung 3.25: Verlauf der Verschiebungen, kreisförmiger Hohlraum

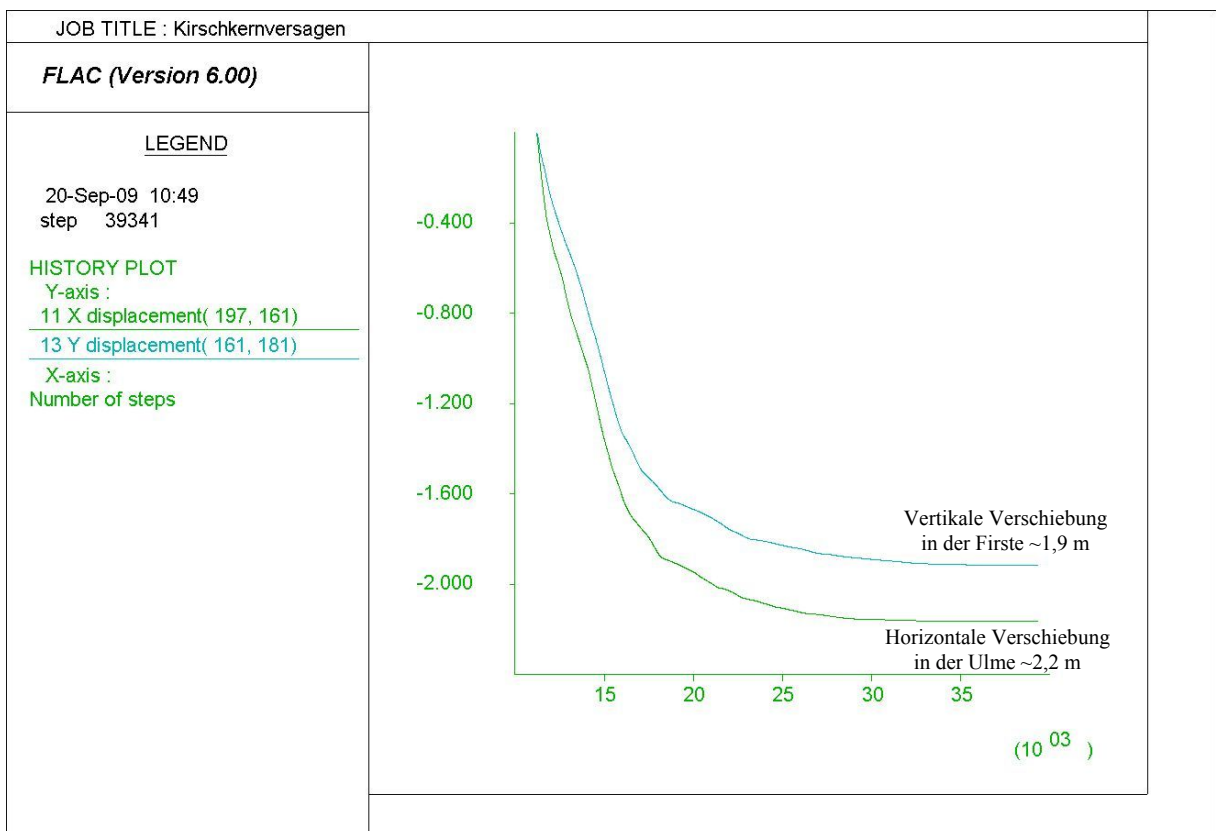


Abbildung 3.26: Verlauf der Verschiebungen, ellipsenförmiger Querschnitt

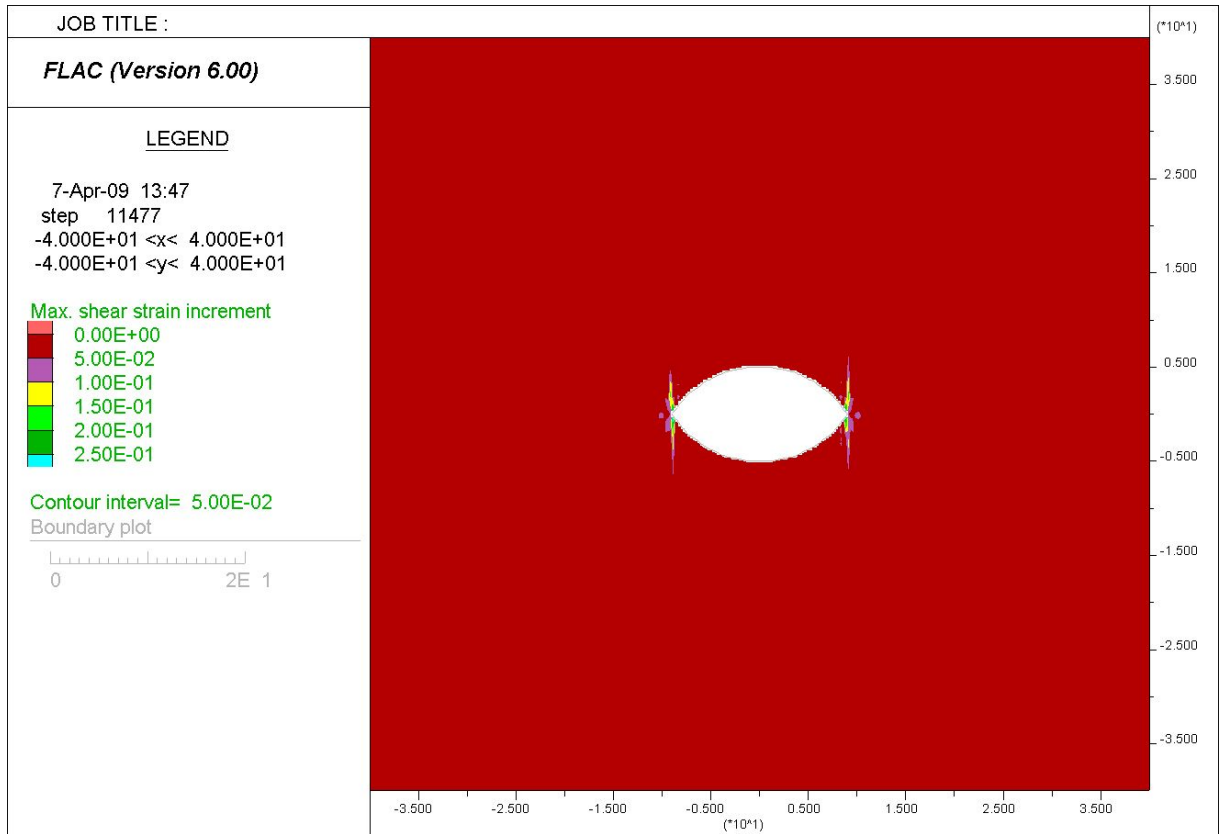


Abbildung 3.27: Ausbruch mit Polygonzug, Schubverzerrungen 300 Berechnungsschritte nach in situ

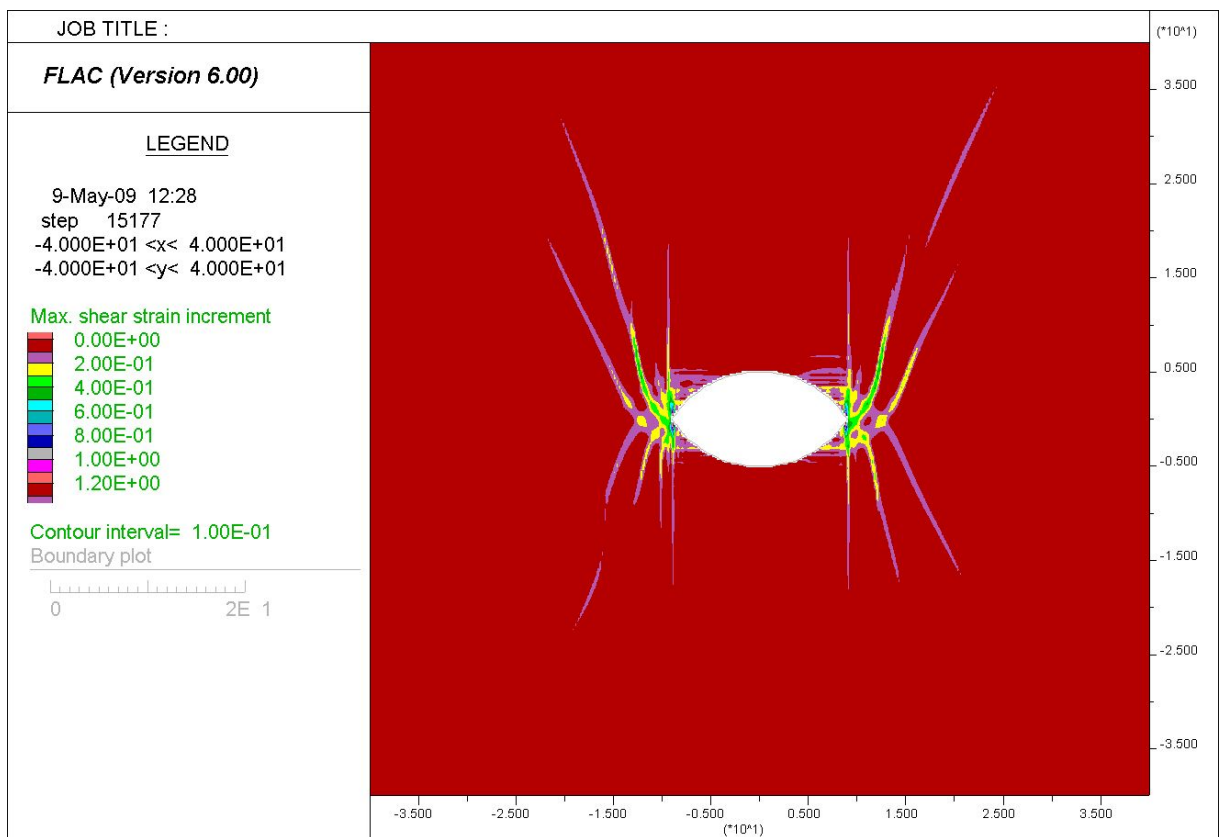


Abbildung 3.28: Ausbruch mit Polygonzug, Schubverzerrungen 4000 Berechnungsschritte nach in situ

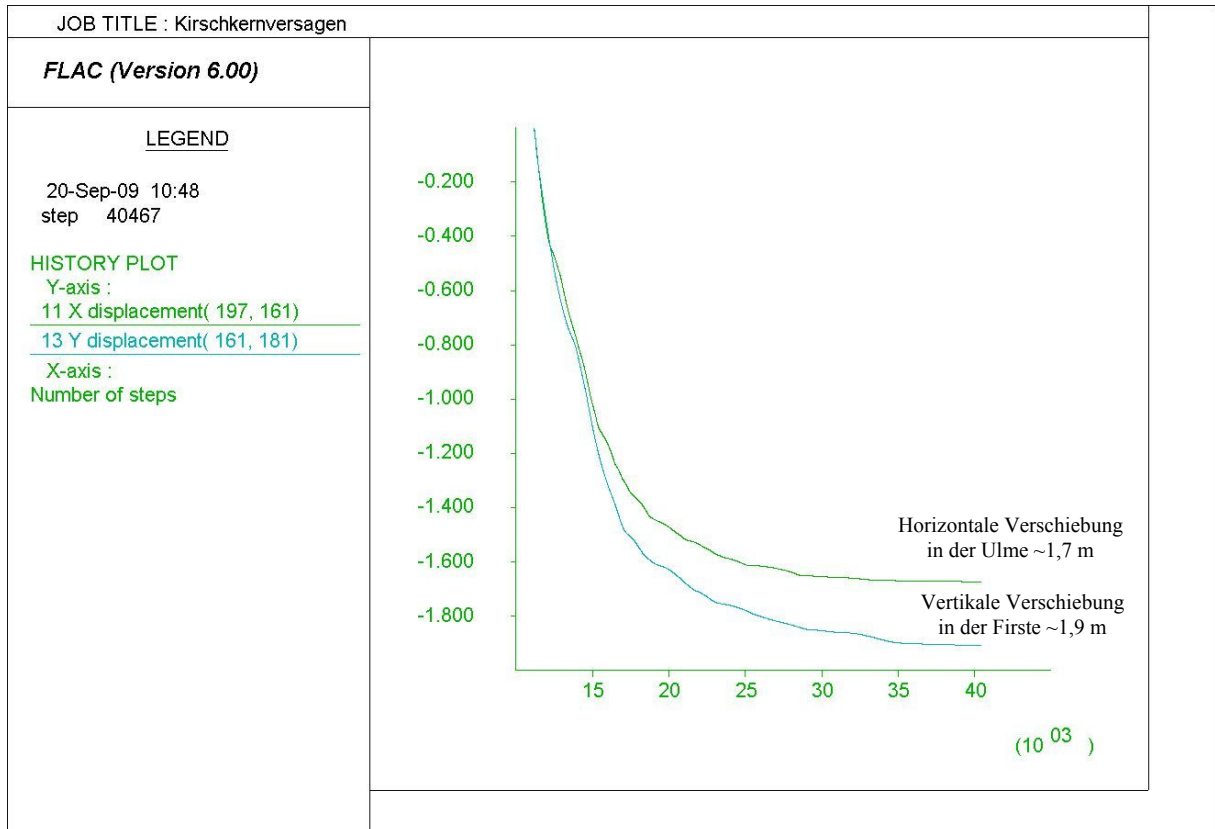


Abbildung 3.29: Verlauf der Verschiebungen, Ausbruch mit Polygonzug

In Tabelle 3.3 sind die erreichten Verschiebungen bis zum Gleichgewichtszustand für jede Profilform zusammengefasst.

	Ulme			Firste		
	Kreis	Ellipse	Polygonzug	Kreis	Ellipse	Polygonzug
Verschiebung bis zum Gleichgewichtszustand	1,7 m	2,2 m	1,7 m	1,2 m	1,9 m	1,9 m

Tabelle 3.3: Zusammenfassung der Verschiebungen

3.6 Untersuchung einer gelochten Scheibe

Es wurde versucht, den Ablauf des Scherbruchmechanismus anhand eines simulierten Druckversuches an einer „Scheibe mit Loch“ zu analysieren. Um eine gute Vergleichbarkeit mit den anderen Untersuchungen dieser Diplomarbeit zu erzielen, wurde ein Modell mit quadratischem Querschnitt und einer äußeren Abmessung von 100x100 Meter gewählt. Das verwendete Netz besteht aus 400x400 Zonen (Rasterfeinheit 0,25x0,25 m, ohne Abstufung). Das Modell wurde bei nicht aktivierter Gravitation von oben und unten belastet und an den seitlichen Rändern in X-Richtung fixiert. Auch hier wurden die in Abschnitt 3.3 angeführten Materialparameter verwendet.

3.6.1 Weg- bzw. geschwindigkeitsgesteuerter Druckversuch

Beim weggesteuerten Druckversuch wurde am oberen und unteren Modellrand eine Geschwindigkeit aufgeprägt ($1 \cdot 10^{-5}$ m/Berechnungsschritt).

Mit dieser Versuchsvariante wurden zwar die zu erwartenden Ergebnisse erreicht, für eine analytische Vergleichsrechnung ist das geschwindigkeitsgesteuerte Modell allerdings nicht brauchbar, da sich die aufgebrachten Lasten nur schlecht ausgeben lassen.

Aus diesem Grund wurde auf ein druckgesteuertes Modell übergegangen. Somit sind zu jedem Zeitpunkt beziehungsweise Berechnungsschritt die aufgebrachten Lasten, beziehungsweise Spannungen σ_V und σ_H bekannt und können für weitere Vergleichsrechnungen herangezogen werden.

3.6.2 Lastgesteuerter Druckversuch

Mit Hilfe einer FISH-Routine wurde eine Laststeigerung von 0 bis 25 MPa simuliert. Dabei wurde die vertikale Belastung σ_V in 100 Schritten zu je 0,25 MPa gesteigert und jede einzelne Laststufe auf Gleichgewicht gerechnet.

Da bei diesem Belastungsablauf der Prüfkörper (das Modell) bereits gelocht ist, erfassen die Brucherscheinungen den gesamten Prüfkörper und nicht nur die Hohlraumumgebung. Somit erfolgen andere Spannungsumlagerungen als in einem bereits belasteten Körper, aus dem ein Hohlraum ausgebrochen wird.

Es kann beobachtet werden, dass sich die Scherbruchkörper im Ulmenbereich und die ins Gebirge reichenden Scherbrüche nicht zeitlich nacheinander, sondern gleichzeitig ausbilden (Abbildung 3.30). Nach weiterer Steigerung der Belastung haben sich die Scherbruchkörper deutlich vergrößert und Scherbrüche reißen auf beiden Seiten signifikant nach oben und unten aus (Abbildung 3.31), bis sie schlussendlich den Modellrand erreichen (Abbildung 3.32). Der Verlauf der Verschiebungen zeigt keine Besonderheiten (zunehmende Belastung erzeugt zunehmende Verschiebung, Abbildung 3.33). Messpunkt 145 (grüne Linie, siehe Legende in Abbildung 3.33) liegt direkt am Tunnelrand in der rechten Ulme, Messpunkt 146 liegt horizontal 0,5 m weiter im Gebirge und die Messpunkte 147 und 148 liegen jeweils einen weiteren Meter daneben (siehe auch 4.2).

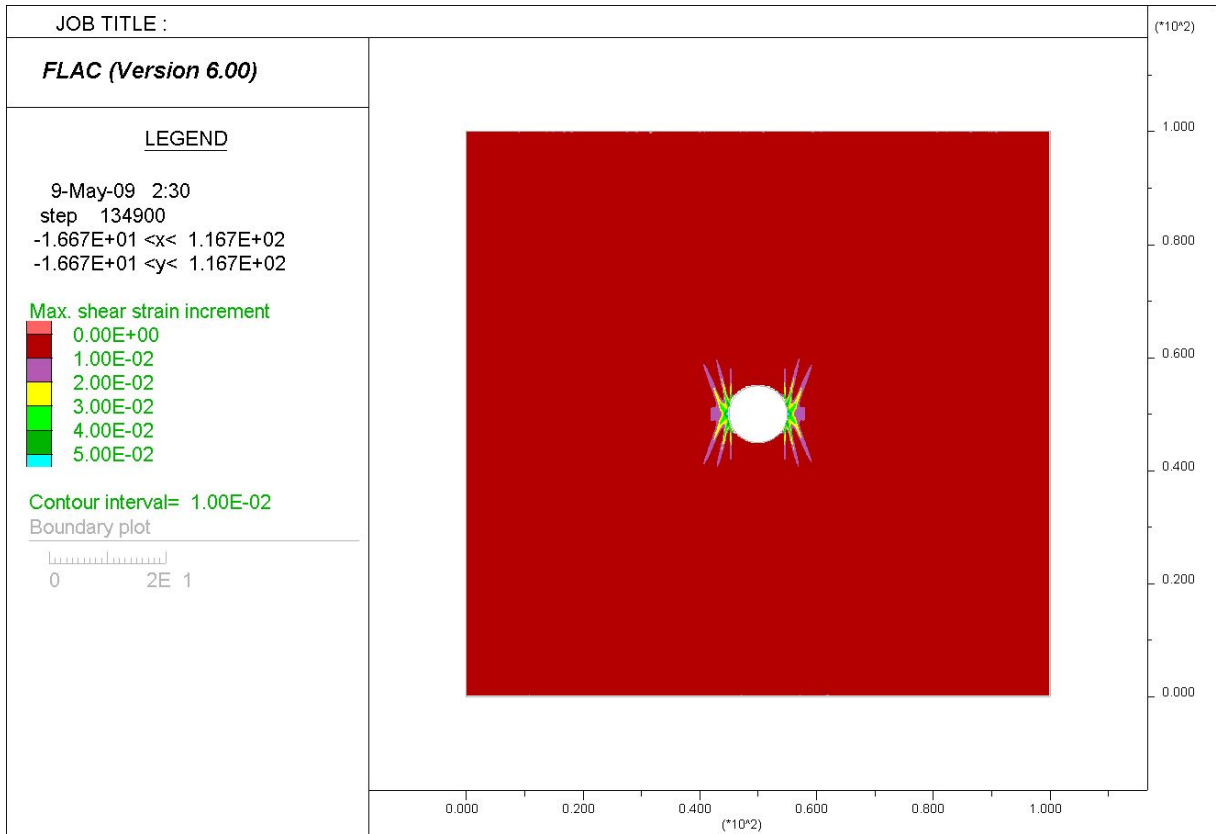


Abbildung 3.30: Schubverzerrungen bei $\sigma_v = 8$ MPa

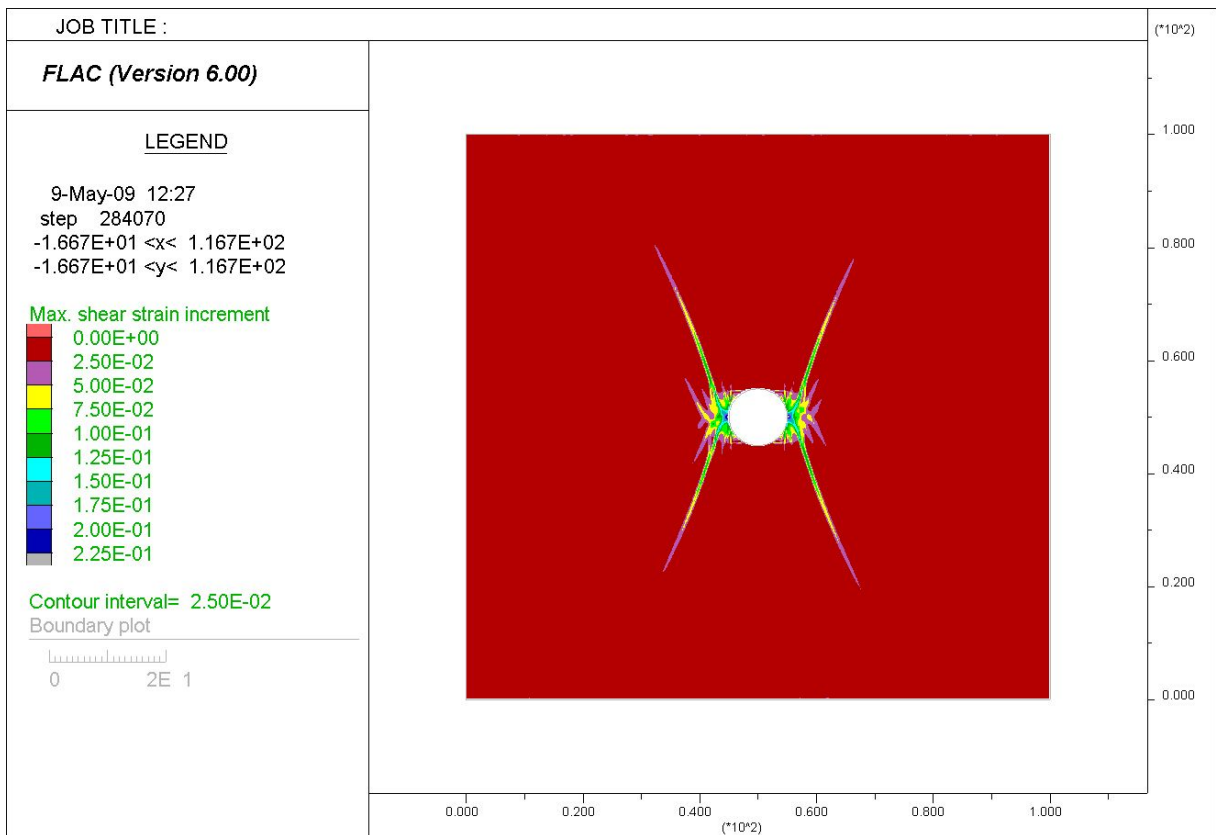


Abbildung 3.31: Schubverzerrungen bei $\sigma_v = 16$ MPa

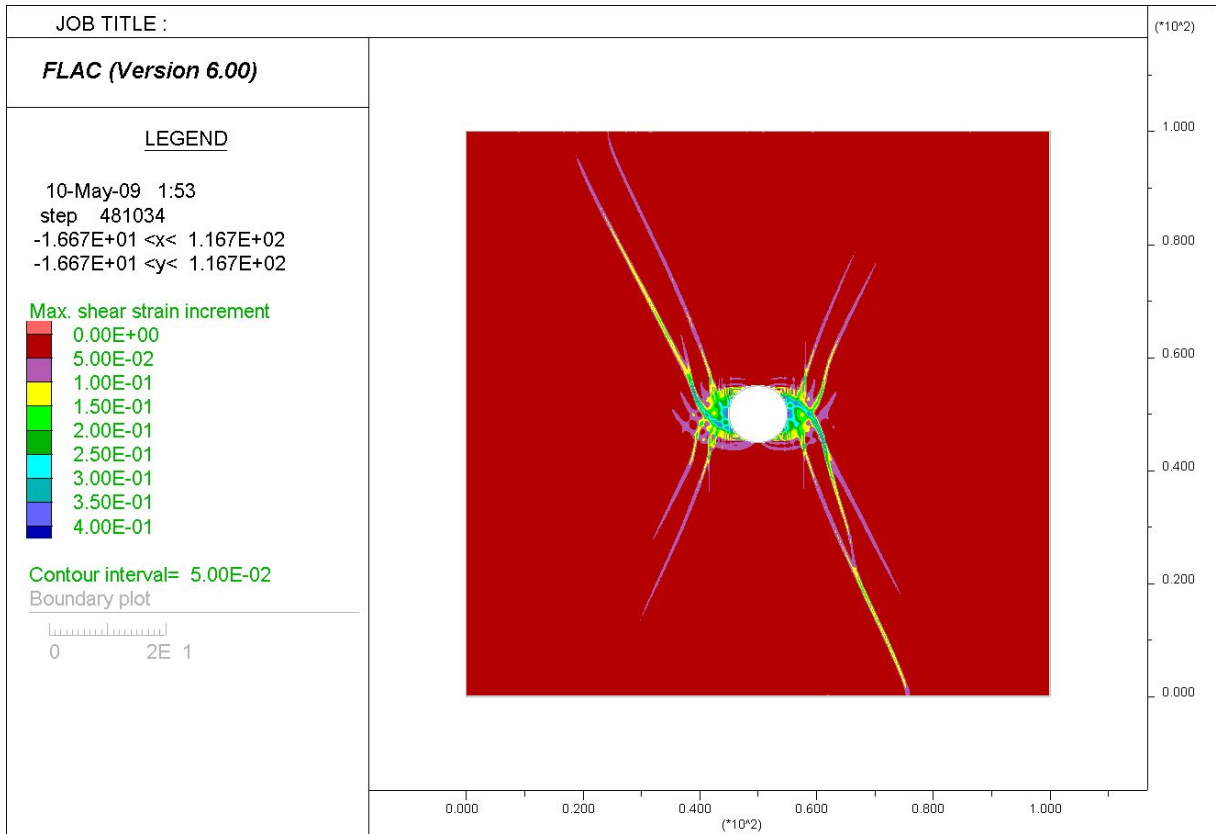


Abbildung 3.32: Schubverzerrungen bei $\sigma_v = 25$ MPa

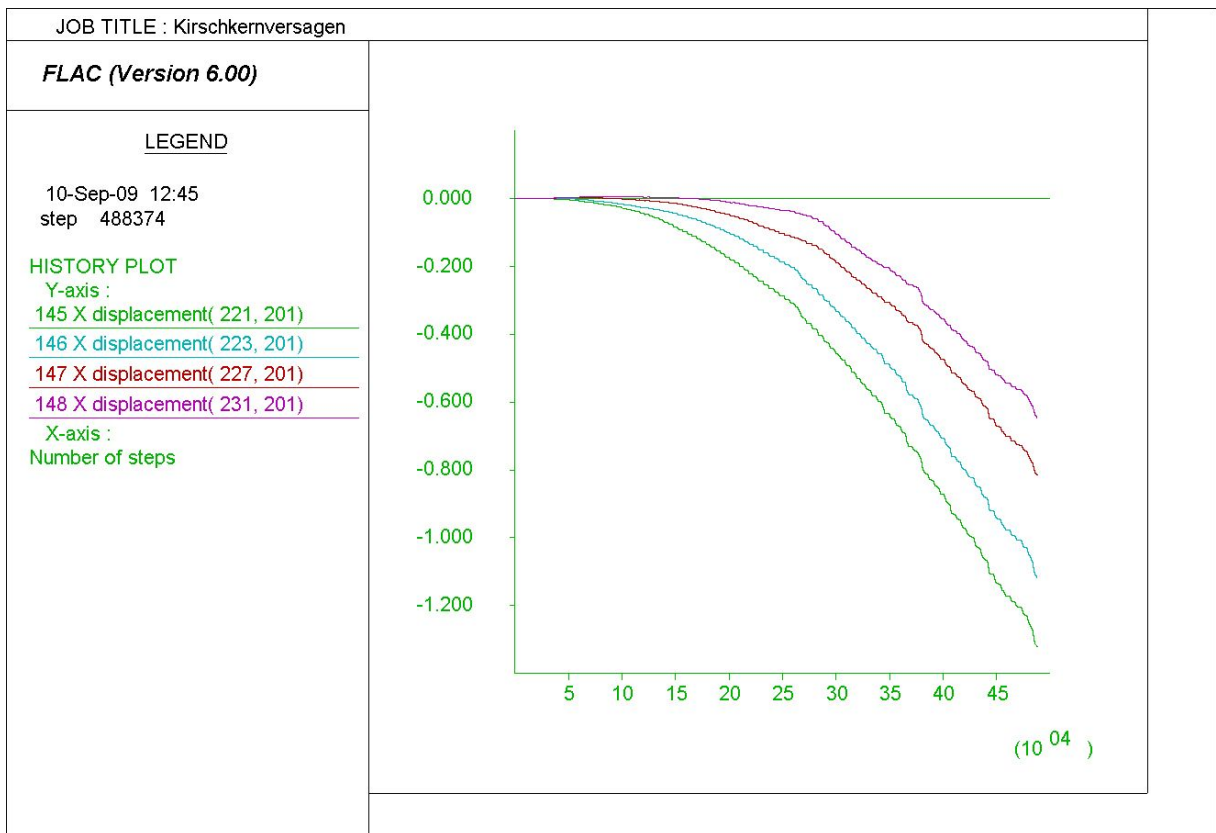


Abbildung 3.33: Verlauf der Horizontalverschiebungen in der Ulme

3.7 Einfluss der gravitativen Belastung

Da der Versuch mit Laststeigerung an der „Scheibe mit Loch“ keine zeitlich getrennte Ausbildung der Scherbruchkörper an den Ulmen und der ausreißenden Scherbrüche ergeben hat, wird dieser Modellierungsablauf nicht weitergeführt.

Um realitätsnähere Ergebnisse zu erzielen, wurde für das Modell zuerst der in situ - Spannungszustand erzeugt und danach der volle Tunnelquerschnitt ausgebrochen. Die Belastung durch die Überlagerung wurde mit einer am oberen Modellrand aufgebracht Gleichlast nachgebildet. Das Modell ist am unteren Rand in X- und Y-Richtung sowie an den Seiten in X-Richtung fixiert (Abbildung 3.34). Die Berechnung erfolgte mit aktivierter Gravitation.

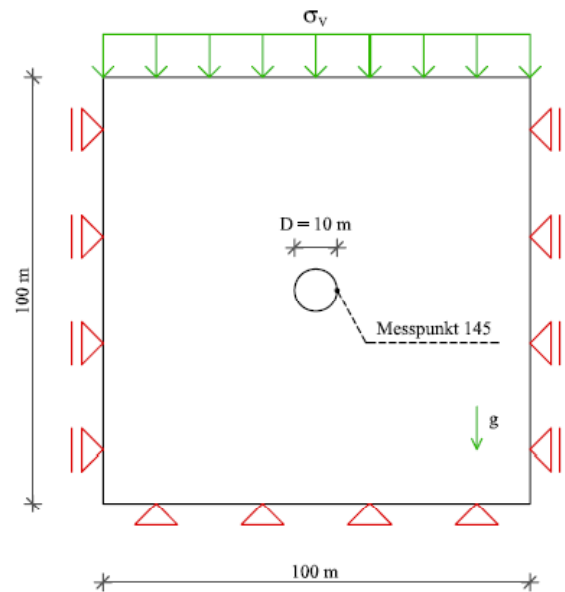


Abbildung 3.34: Skizze des Modells

3.8 Strain Softening

Das Modell basiert auf dem FLAC Mohr-Coulomb Materialmodell mit dem Unterschied, dass die Kohäsion und der Reibungswinkel nach dem Bruch auf einen definierten Wert abgemindert werden, während beim Mohr-Coulomb Modell alle Parameter konstant bleiben. In der in FLAC implementierten Routine werden die Kohäsion und der Reibungswinkel als eine stückweise lineare Funktion bezogen auf die erfassten plastischen Schubverzerrungen definiert (siehe Abbildung 3.35).

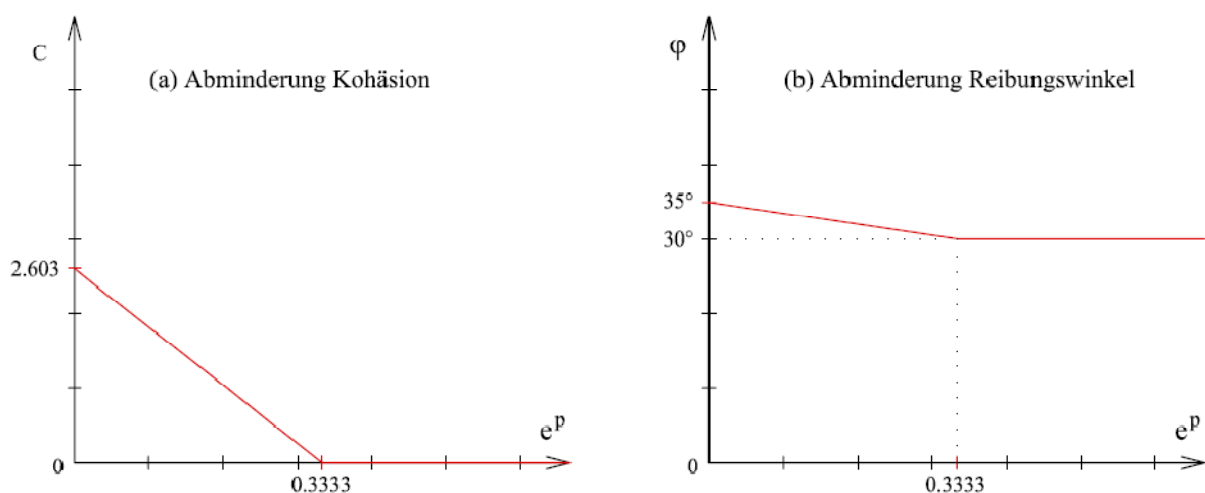


Abbildung 3.35: Abminderung Kohäsion/Reibungswinkel (e^p ...plastische Schubverzerrungen)

Durch die Festlegung eines Grenzwertes (e^p) kann bestimmt werden, wie schnell die Entfestigung nach dem Bruch erfolgen soll (Vergleiche Abschnitt 3.2). Dieser Wert wird in der Folge „Bezugswert der plastischen Verzerrungen“ genannt.

3.9 Parameterkalibrierung

Ziel der Untersuchung war es, geeignete und aufeinander abgestimmte Parameter für das FLAC-Modell zu finden. Dabei wurde bei einer fixen Belastung von $\sigma_V = 50$ MPa und einem Reibungswinkel von 35° , unter Anwendung des „Strain Softening“ Modells analysiert, in welchem Ausmaß eine Abminderung der Parameter Kohäsion und Reibungswinkel relevant beziehungsweise zielführend ist. Zusätzlich wurden der Elastizitätsmodul und die Druckfestigkeit, unter Einhaltung der in (3.6) und (3.8) angeführten Grenzwerte, variiert. Die Querdehnungszahl $\nu = 0,25$ und damit das Seitendruckverhältnis (1/3) wurden nicht verändert.

Für die Parameterkalibrierung war es erforderlich, das Verhältnis von Festigkeit zur Verformbarkeit in realistischen Grenzen zu halten. Die Versuche von DEERE/MILLER (1966, Abbildung 3.36) haben gezeigt, dass sich der Elastizitätsmodul bezüglich der Druckfestigkeit im Bereich von (3.6) bewegen soll.

$$E/\sigma_D = 200/1 \text{ bis } 500/1 \quad (3.6)$$

Der Reibungswinkel φ und die Kohäsion c bestimmen die Druckfestigkeit σ_D (Gleichung (3.7)). Um möglichst brauchbare Ergebnisse zu erzielen, soll sich das Verhältnis der Vertikalspannung σ_V zur Druckfestigkeit im Bereich von (3.8) befinden (Erfahrungswert durch die Vielzahl der Kalibrierungsversuche).

$$\sigma_D = c \cdot \frac{2 \cdot \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3.7)$$

$$\sigma_V/\sigma_D = 5/1 \text{ bis } 8/1 \quad (3.8)$$

Die Bewertung, ob eine Gruppe von Parametern geeignet war, erfolgte hauptsächlich über den Verlauf der Verschiebungen, beziehungsweise über die erreichte Gesamtverschiebung in der Ulme. Um diese Verschiebungen aufzeichnen zu können wurden Messpunkte, sogenannte „History Points“ im Netz festgelegt (siehe Kapitel 4.2).

Um zu lange Rechenzeiten zu vermeiden wurde die FLAC-Routine so programmiert, dass die Berechnung abgebrochen wird, wenn die Horizontalverschiebung in der Ulme zwei Meter überschreitet.

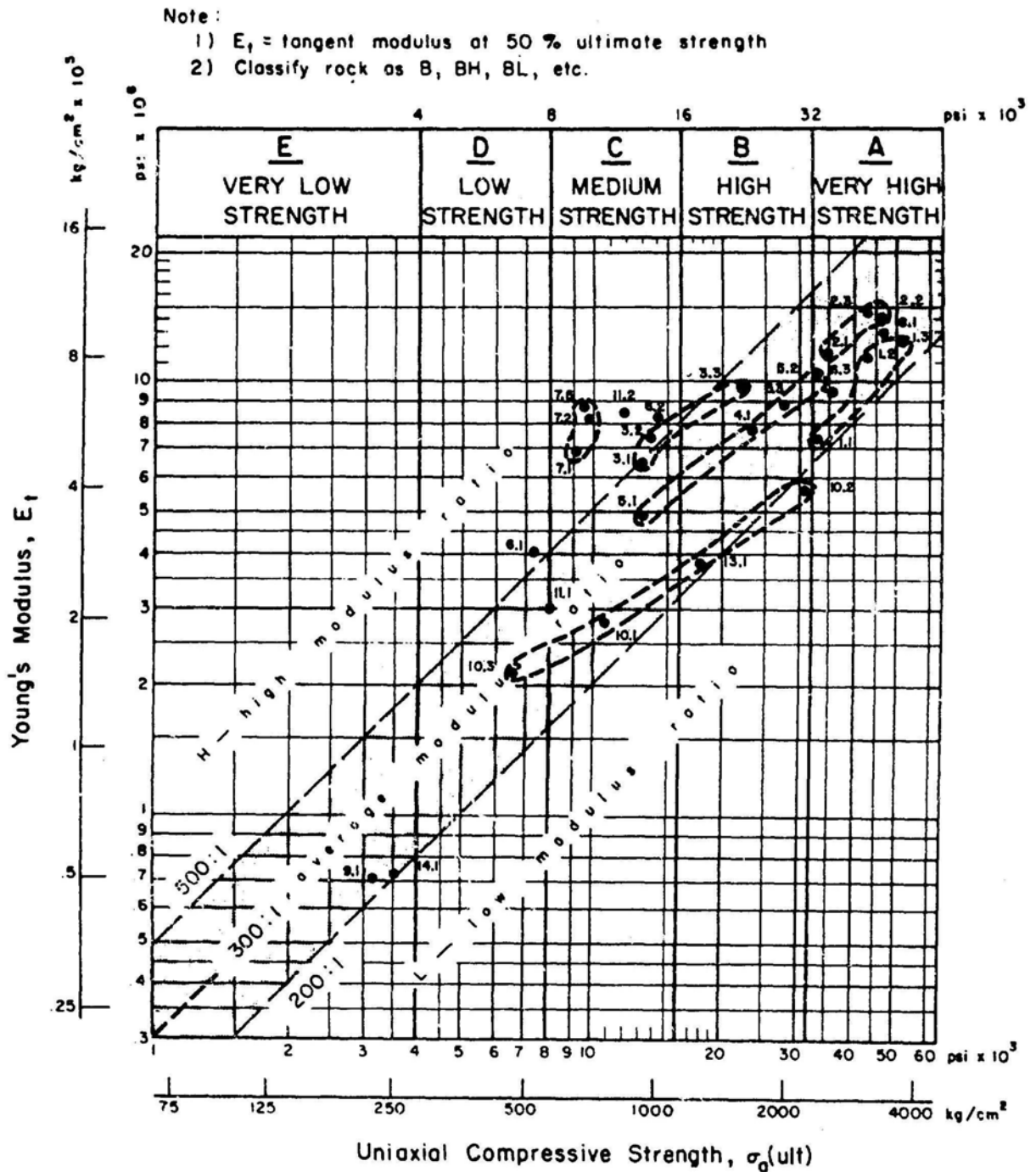


Abbildung 3.36: Verhältnis E-Modul zu Druckfestigkeit (aus DEERE/MILLER, 1966)

3.9.1 Vorgehensweise und Ergebnisse

Die folgenden Beispiele sollen verdeutlichen, wie zum Zwecke der Kalibrierung vorgegangen wurde. Ziel war es, die Parameter so abzustimmen, dass sich im Ulmenpunkt eine Verschiebung von circa einem Dreivierteltemer einstellt (Zustand nahe dem Grenzgleichgewicht).

3.9.1.1 Parametergruppe 1

Ausgehend von den in Abschnitt 3.3 angeführten Materialparametern wurden bei dieser Parametergruppe die Belastung von 27 MPa auf 50 MPa und der Reibungswinkel von 30° auf 35° erhöht. Die Druckfestigkeit wurde mit 5,0 MPa festgelegt, daraus ergibt sich die Kohäsion zu 1,300 MPa. Der Elastizitätsmodul wurde nicht verändert und beträgt 1 GPa. Auf ein „Strain Softening“ wurde bei diesem Versuch verzichtet.

E	σ_D	φ	c
[GPa]	[MPa]	[°]	[MPa]
1	5,0	35	1,300

Tabelle 3.4: Materialkennwerte Parametergruppe 1

Wie Abbildung 3.37 zeigt, beläuft sich die Verschiebung im Ulmenpunkt (Messpunkt 145) auf rund 2,5 Meter. Diese große Verschiebung entsteht durch die annähernd verdoppelte Belastung, während die Druckfestigkeit nur geringfügig erhöht wurde.

Abbildung 3.38 und Abbildung 3.39 zeigen Plots der Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach dem in situ-Zustand, beziehungsweise wenn das System bei den gegebenen Materialkennwerten einen Gleichgewichtszustand erreicht hat.

Obwohl diese Parametergruppe qualitativ die angestrebten Ergebnisse liefert, ist sie aufgrund der zu großen Verschiebungen nicht geeignet.

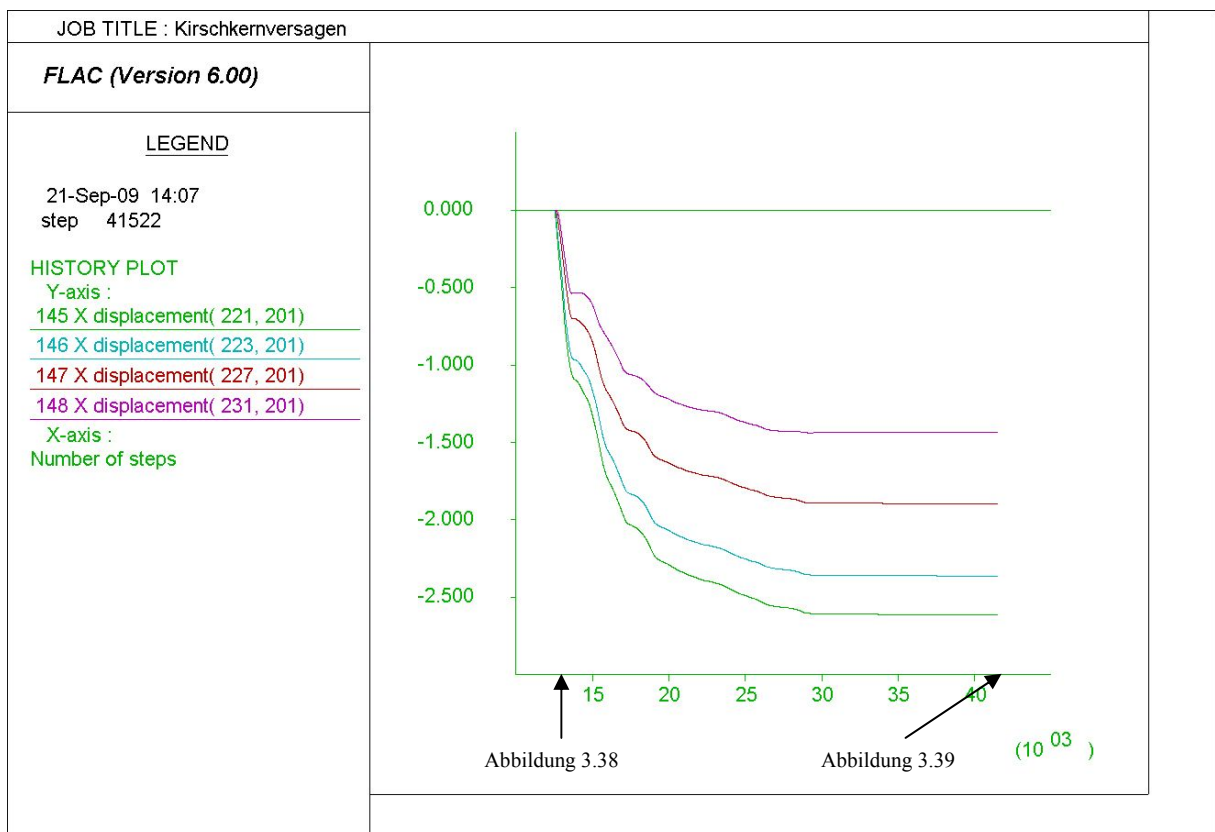


Abbildung 3.37: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 1

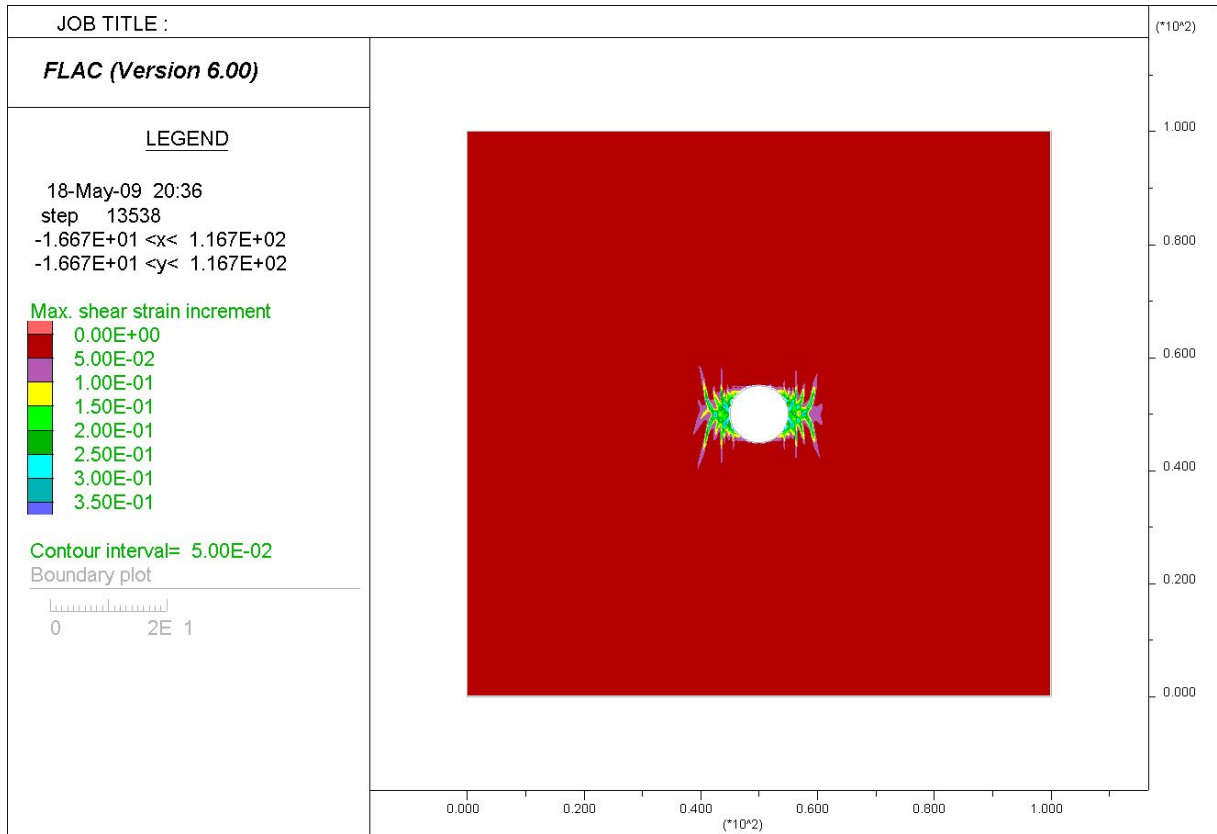


Abbildung 3.38: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 1

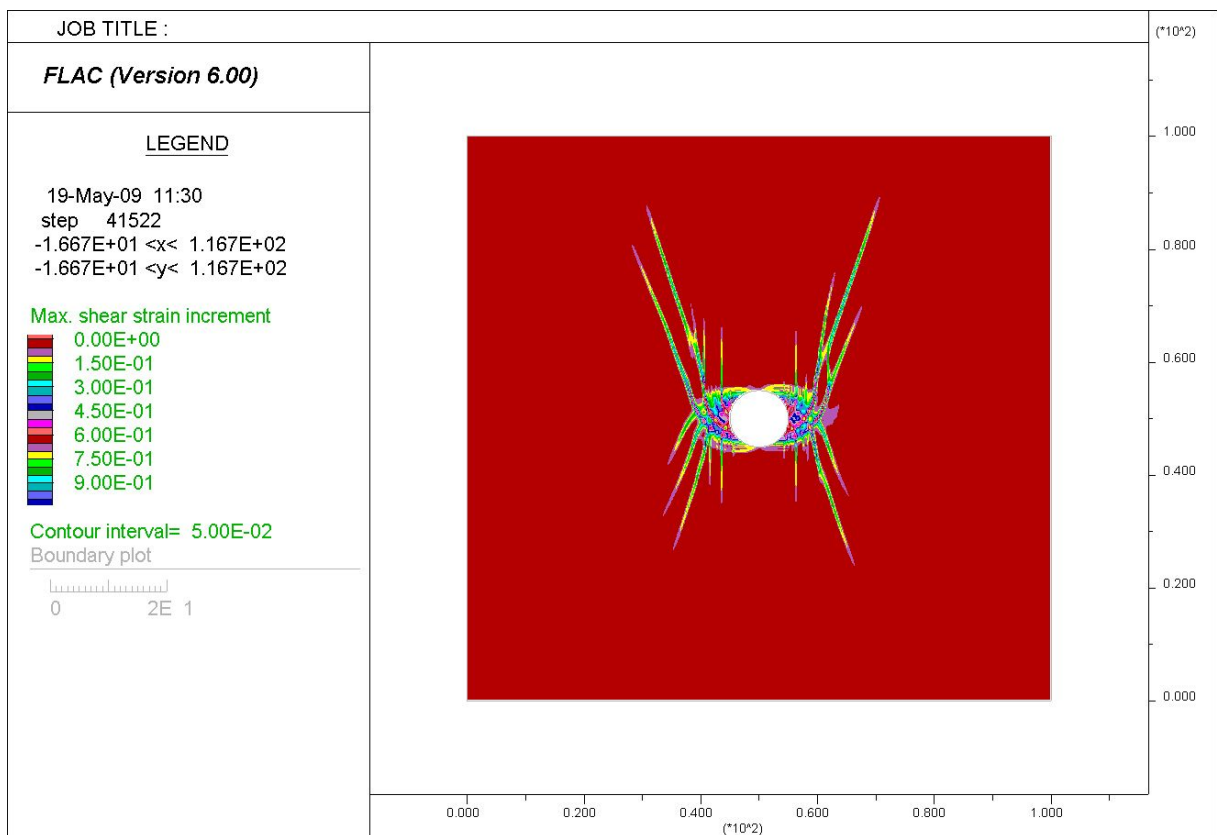


Abbildung 3.39: Schubverzerrungen bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes, Parametergruppe 1

3.9.1.2 Parametergruppe 2a

Die bei diesem Versuch verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst. Es wurden sowohl der Elastizitätsmodul als auch die Druckfestigkeit erhöht und bei gleich bleibendem Reibungswinkel die Kohäsion angepasst. Auf ein „Strain Softening“ wurde noch verzichtet, da man für einen späteren Vergleich einen Bezugswert mit konstanten Parametern benötigt.

E	σ_D	φ	c
[GPa]	[MPa]	[°]	[MPa]
2	7,5	35	1,952

Tabelle 3.5: Materialkennwerte Parametergruppe 2a

Wie Abbildung 3.40 zeigt, beläuft sich die Verschiebung im Ulmenpunkt (Messpunkt 145) auf rund 85 Zentimeter und ist damit deutlich geringer als bei Parametergruppe 1.

Abbildung 3.41 und Abbildung 3.42 zeigen Plots der Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach dem in situ-Zustand beziehungsweise wenn das System bei den gegebenen Materialkennwerten einen Gleichgewichtszustand erreicht hat.

Auf diesem brauchbaren Ergebnis aufbauend wurde mit der Parametergruppe 2b versucht, das „Strain Softening“ Modell anzuwenden.

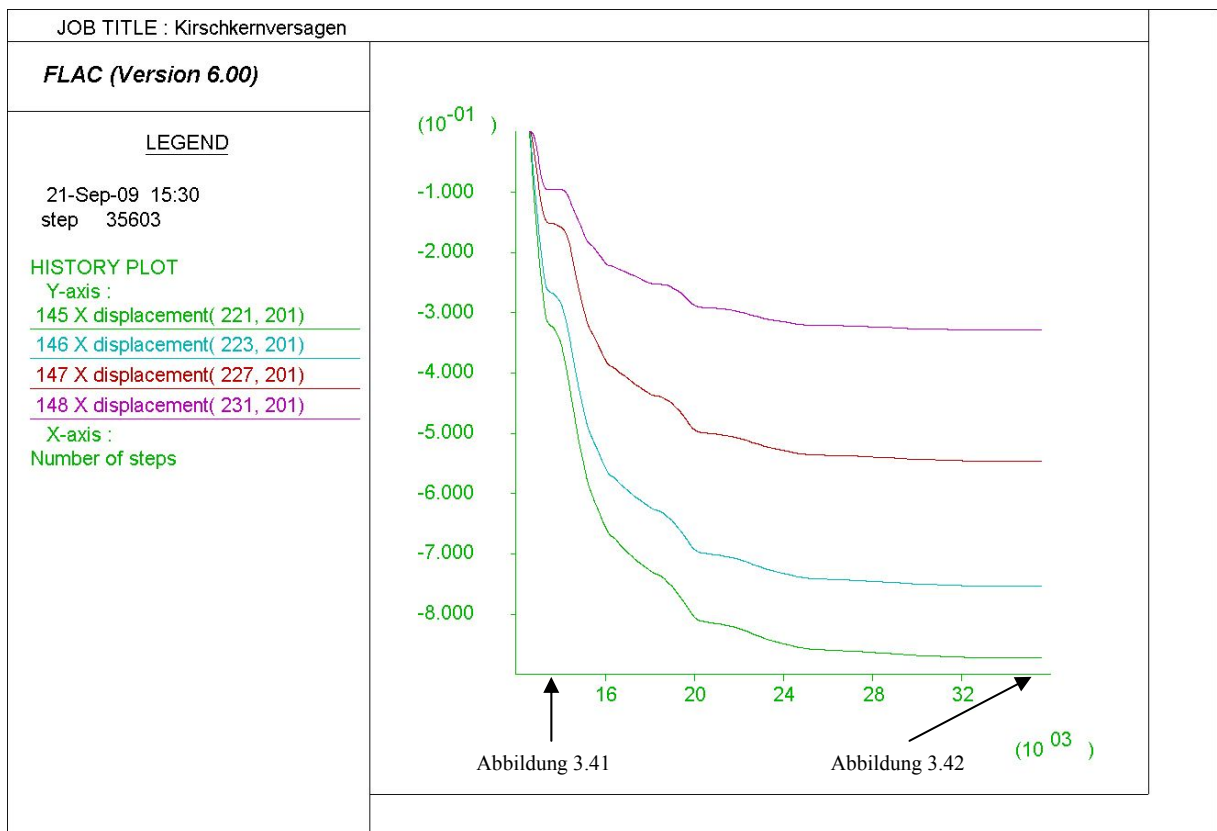


Abbildung 3.40: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 2a

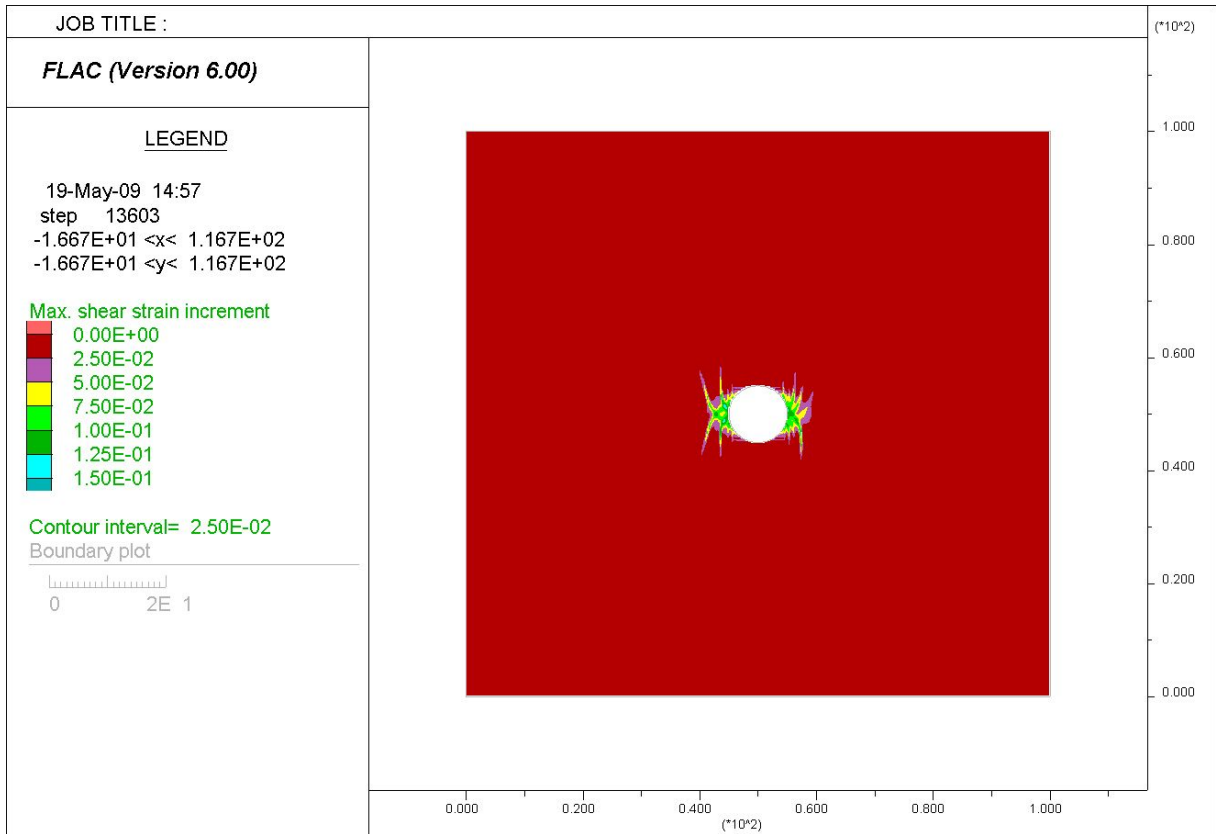


Abbildung 3.41: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 2a

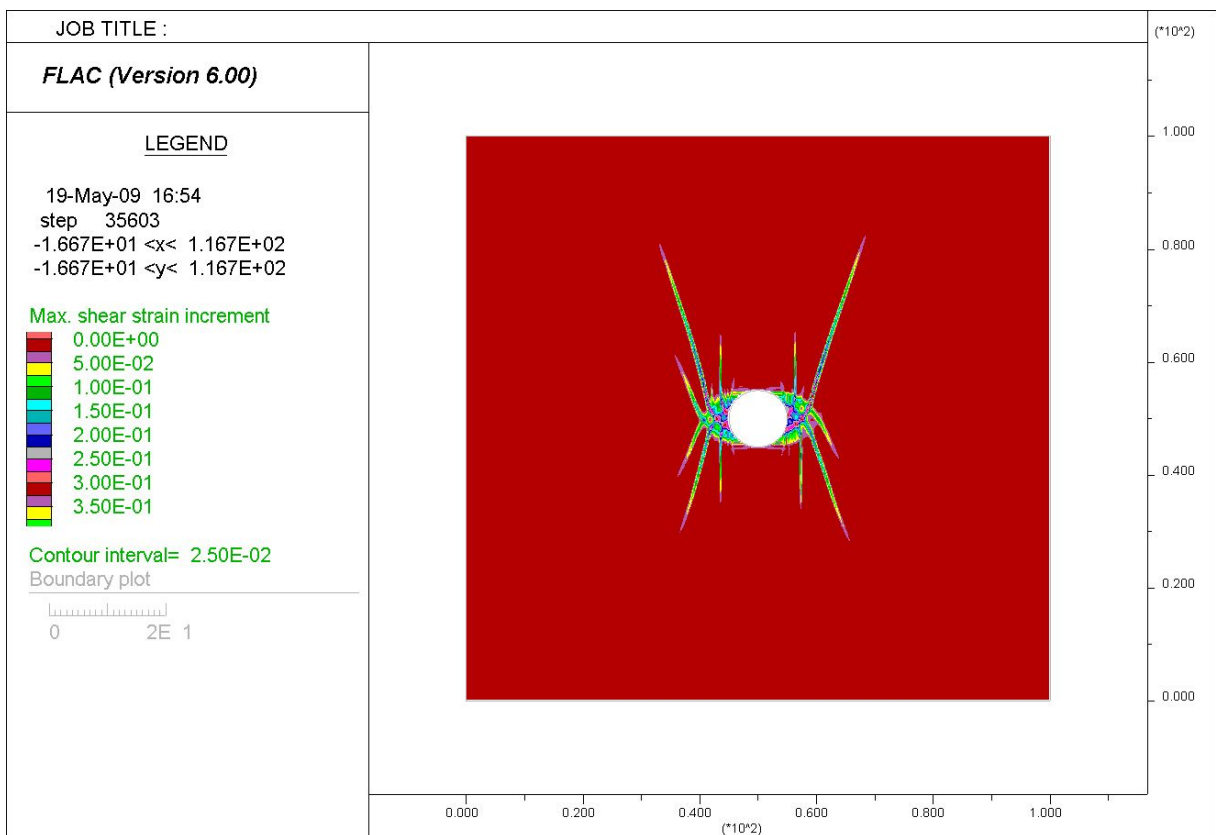


Abbildung 3.42: Schubverzerrungen bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes, Parametergruppe 2a

3.9.1.3 Parametergruppe 2b

Die Materialkennwerte der Parametergruppe 2b sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst. Es sind dies die gleichen wie bei Parametergruppe 2a, jedoch wurde nun das „Strain Softening“ Modell angewendet. Als erstes wurde eine Reduktion mit dem Bezugswert der plastischen Verzerrung von $e^p = 0,1$ versucht.

E	σ_D	φ	φ_{red}	c	c_{red}
[GPa]	[MPa]	[°]	[°]	[MPa]	[MPa]
2	7,5	35	25	1,952	0,976

Tabelle 3.6: Materialkennwerte Parametergruppe 2b

Wie Abbildung 3.43 zeigt, wirkt sich die Abminderung bei dieser Parametergruppe drastisch aus. Bereits nach relativ wenigen Berechnungsschritten überschreitet die Verschiebung im Ulmenpunkt (Messpunkt 145) zwei Meter und die FLAC-Routine bricht die Berechnung ab.

Abbildung 3.44 und Abbildung 3.45 zeigen typische Plots der Schubverzerrungen für instabile Verhältnisse.

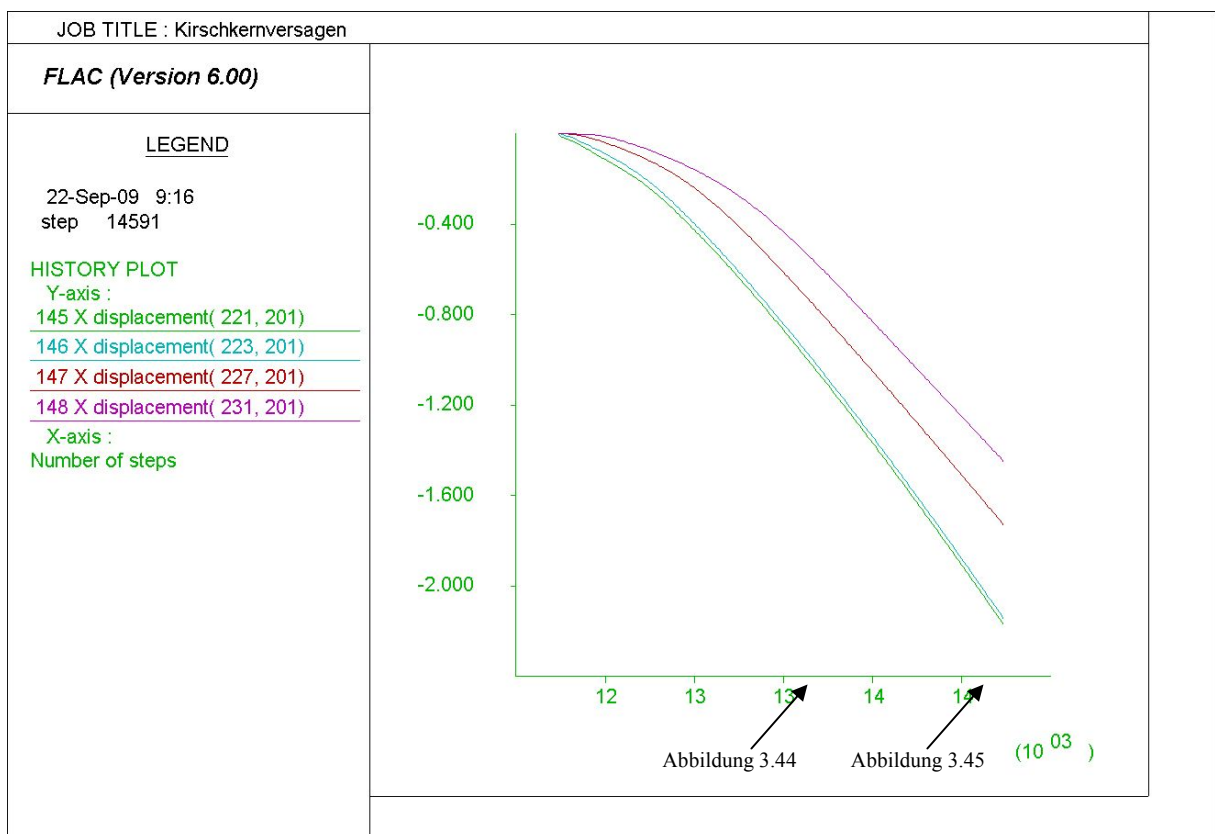


Abbildung 3.43: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 2b

Der Bezugswert der plastischen Verzerrungen wurde in der Folge schrittweise erhöht, doch selbst bei konstantem Reibungswinkel und einer Reduktion der Kohäsion auf lediglich die Hälfte stabilisiert sich das System nicht mehr. In Tabelle 3.12 auf Seite 57 sind alle untersuchten Varianten zusammengefasst.

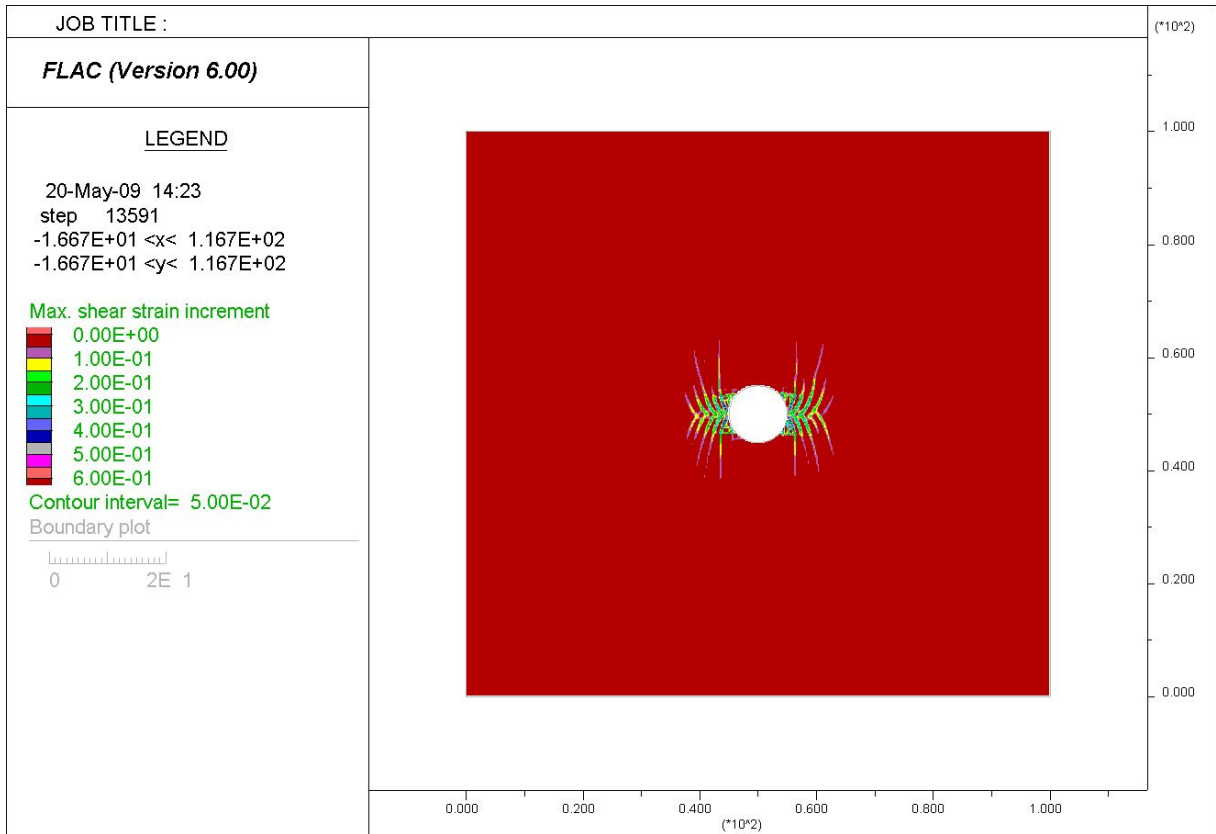


Abbildung 3.44: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 2b

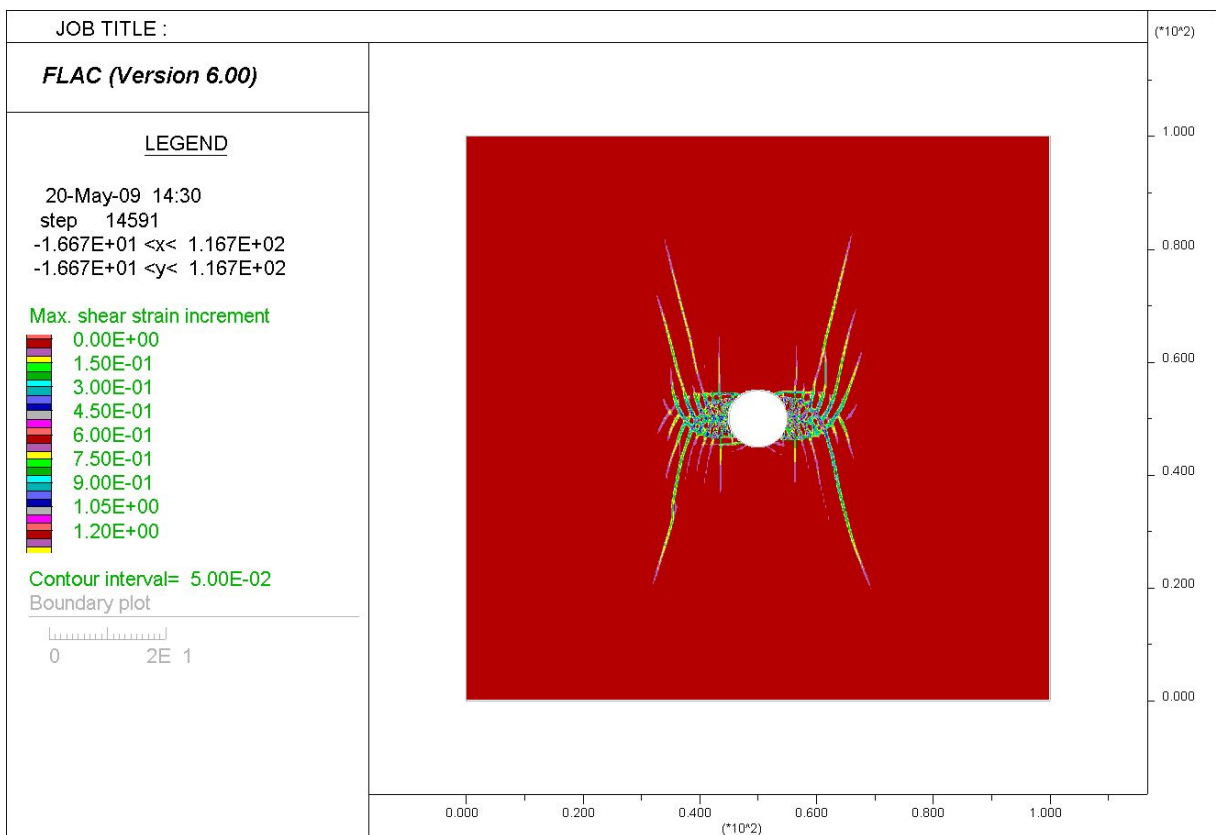


Abbildung 3.45: Schubverzerrungen zum Zeitpunkt des Abbruchs, Parametergruppe 2b

3.9.1.4 Parametergruppe 3a

Die bei dieser Variante verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst. Im Vergleich zur Parametergruppe 2a wurden sowohl der Elastizitätsmodul als auch die Druckfestigkeit erhöht und bei gleich bleibendem Reibungswinkel die Kohäsion angepasst. Auf ein „Strain Softening“ wurde noch verzichtet, da man für einen späteren Vergleich einen Bezugswert mit konstanten Parametern benötigt.

E	σ_D	φ	c
[GPa]	[MPa]	[°]	[MPa]
4	10,0	35	2,603

Tabelle 3.7: Materialkennwerte Parametergruppe 3a

Wie Abbildung 3.46 zeigt, beläuft sich die Verschiebung im Ulmenpunkt (Messpunkt 145) auf rund 30 Zentimeter und ist damit deutlich geringer als in den vorherigen Parametergruppen.

Abbildung 3.47 und Abbildung 3.48 zeigen Plots der Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach dem in situ-Zustand beziehungsweise wenn das System bei den gegebenen Materialkennwerten einen Gleichgewichtszustand erreicht hat.

Auf diesem brauchbaren Ergebnis aufbauend wurde mit der Parametergruppe 3b versucht, das „Strain Softening“ Modell anzuwenden.

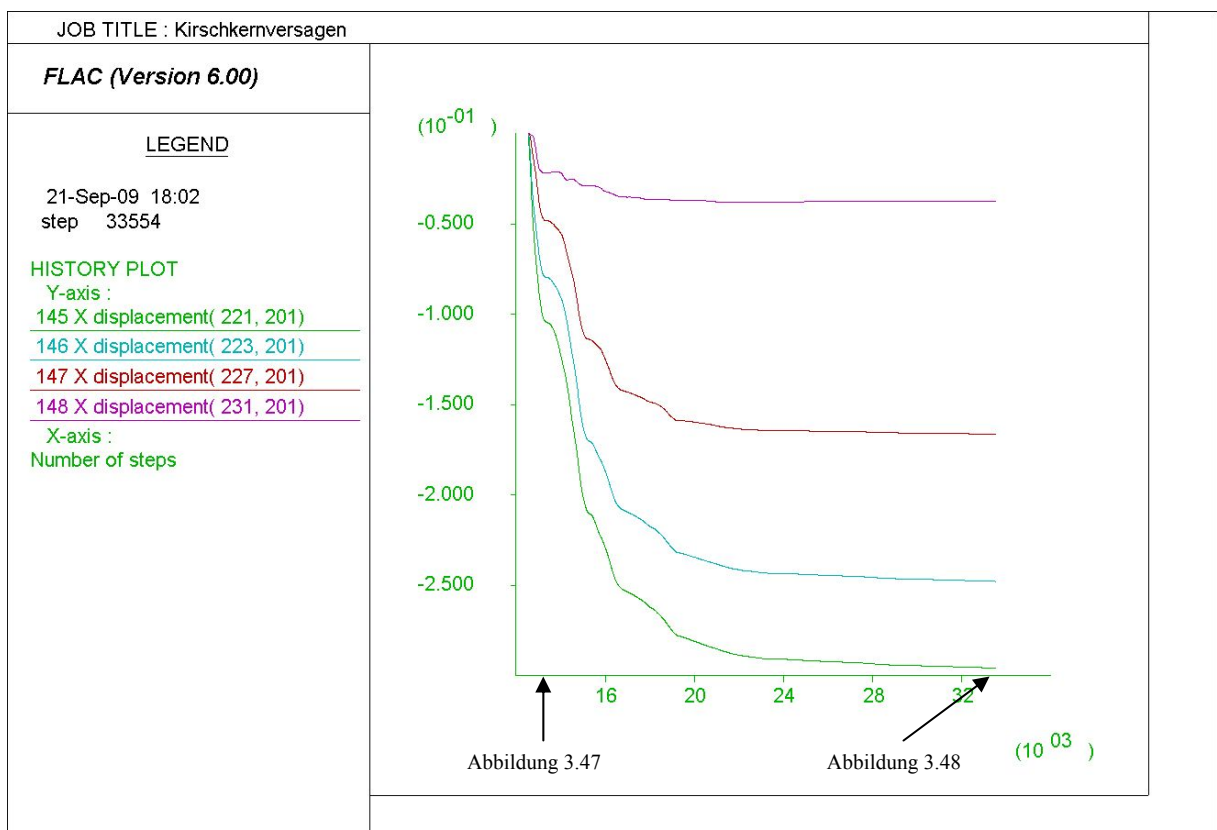


Abbildung 3.46: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 3a

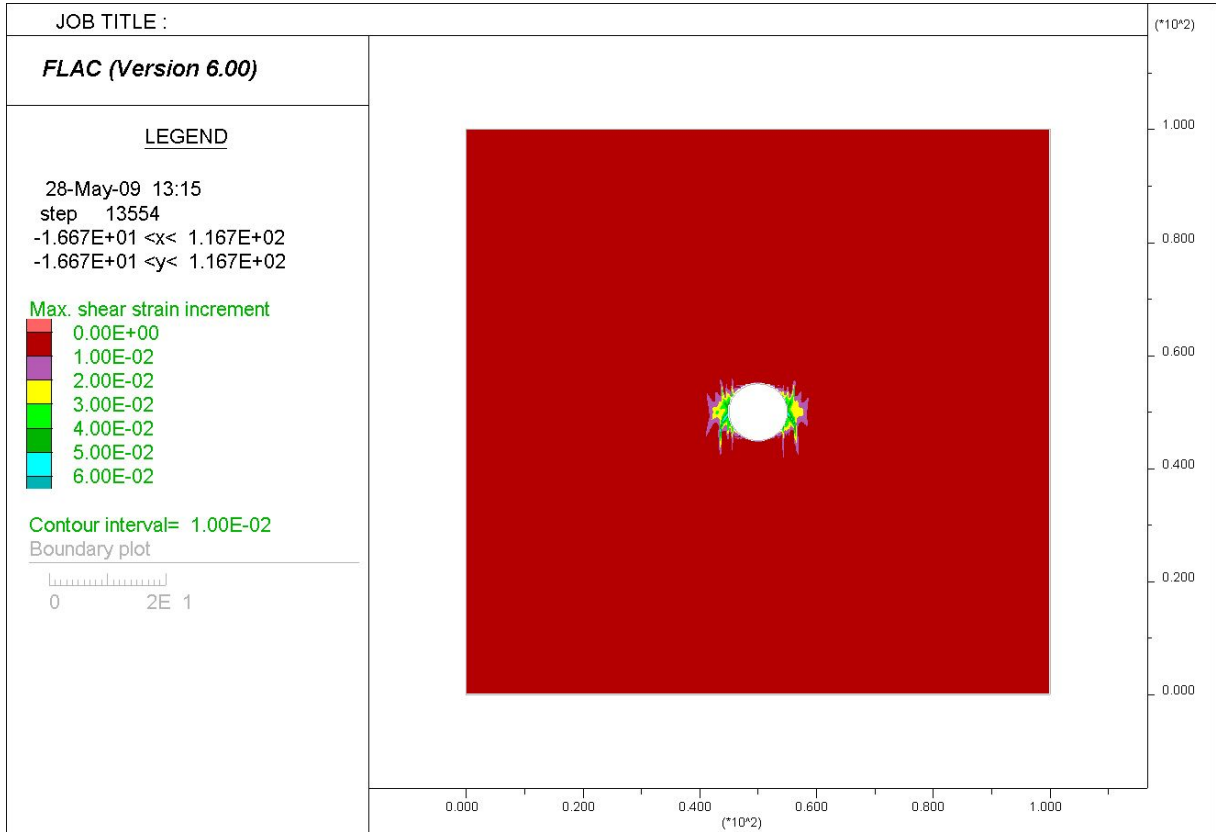


Abbildung 3.47: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 3a

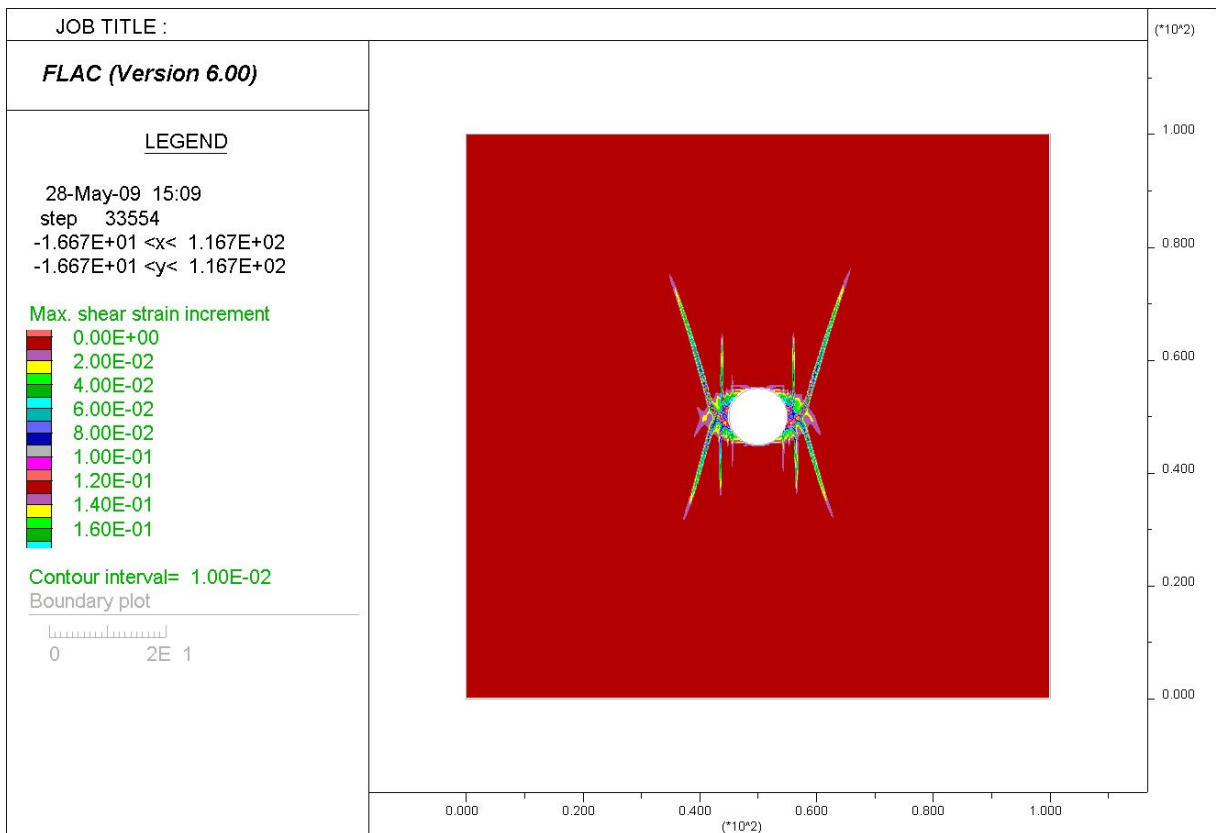


Abbildung 3.48: Schubverzerrungen bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes, Parametergruppe 3a

3.9.1.5 Parametergruppe 3b

Aufgrund der Erfahrungen aus den vorangehenden Versuchen wusste man, dass die Reduktion der Parameter nicht zu abrupt erfolgen darf. Deswegen wurde mit einer konservativen Reduktion begonnen und der Bezugswert der plastischen Verzerrungen bei jedem weiteren Versuch minimal herabgesetzt. So konnte eine Grenze zwischen stabilem und instabilem System eruiert werden. Diese befindet sich zwischen den Bezugswerten 0,33 und 0,30.

Während sich bei den in Tabelle 3.8 aufgelisteten Materialkennwerten und einem Bezugswert von 0,33 noch ein Gleichgewichtszustand einstellt (Abbildung 3.49), führt ein geringfügig abgeminderter Bezugswert von 0,30 zu einem instabilen Zustand (Abbildung 3.50).

E [GPa]	σ_D [MPa]	φ [°]	φ_{red} [°]	c [MPa]	c_{red} [MPa]
4	10,0	35	30	2,603	0

Tabelle 3.8: Materialkennwerte Parametergruppe 3b

Bei einem Bezugswert der plastischen Verzerrung von 0,33 wurden unter allen untersuchten Varianten die besten Ergebnisse erzielt. Diese werden in Kapitel 4.4 ausführlich diskutiert.

Betrachtet man den Verlauf der Horizontalverschiebungen in Abbildung 3.50 ist zu erkennen, dass zwischen den Berechnungsschritten 20000 und 25000 die Verschiebungen nur geringfügig zunehmen. Bis zu diesem Zeitpunkt entspricht die Entwicklung der Verschiebungen etwa dem in Abbildung 3.49 dargestellten Verlauf. Auch die Plots der Schubverzerrungen zeigen bis dahin eine Bildung der Scherbruchkörper (Abbildung 3.51 und Abbildung 3.52). Doch anders als beim Bezugswert von 0,33 nehmen die Verschiebungen nach dieser vorübergehenden Verlangsamung wieder zu, bis die FLAC-Routine bei einer Verschiebung im Ulmenpunkt von zwei Metern abbricht. Abbildung 3.53 und Abbildung 3.54 zeigen typische Plots der Schubverzerrungen für instabile Verhältnisse.

In Tabelle 3.12 auf Seite 57 sind alle untersuchten Varianten zusammengefasst.

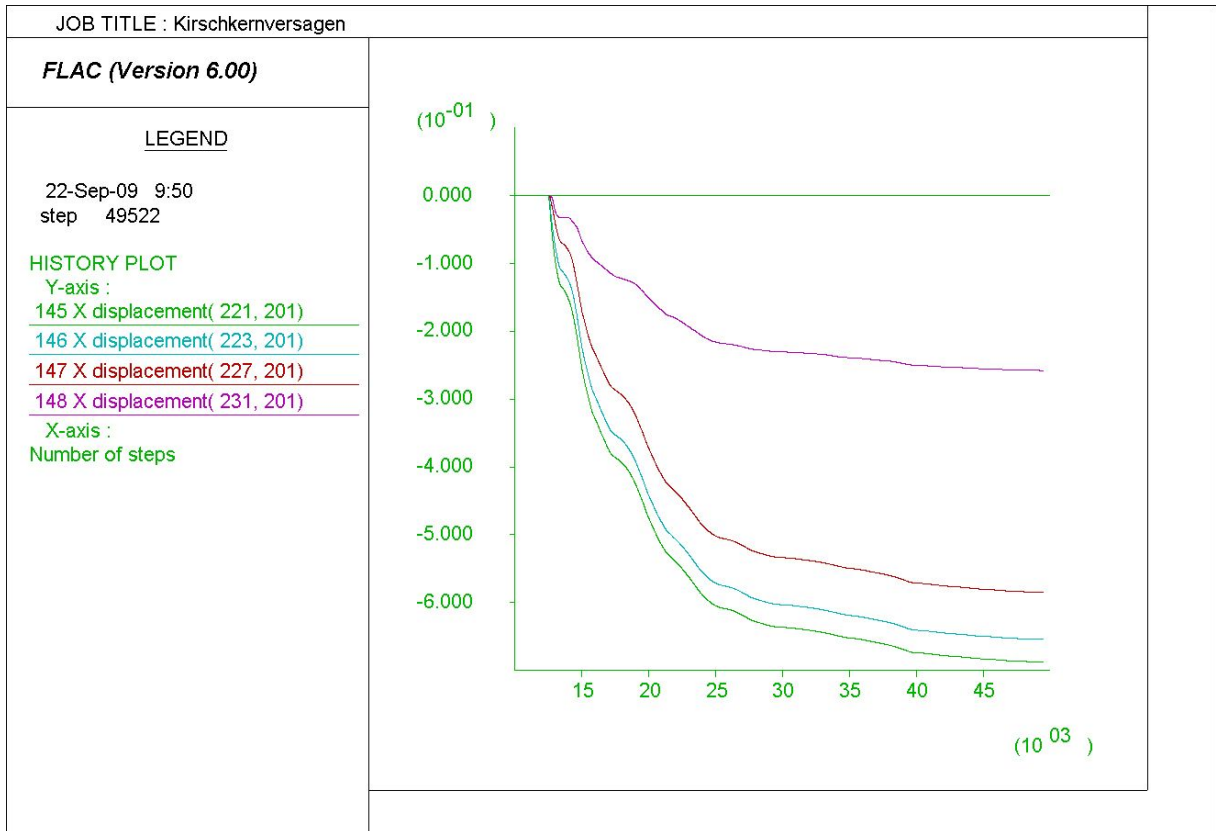


Abbildung 3.49: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 3b, Bezugswert 0,33 (stabil)

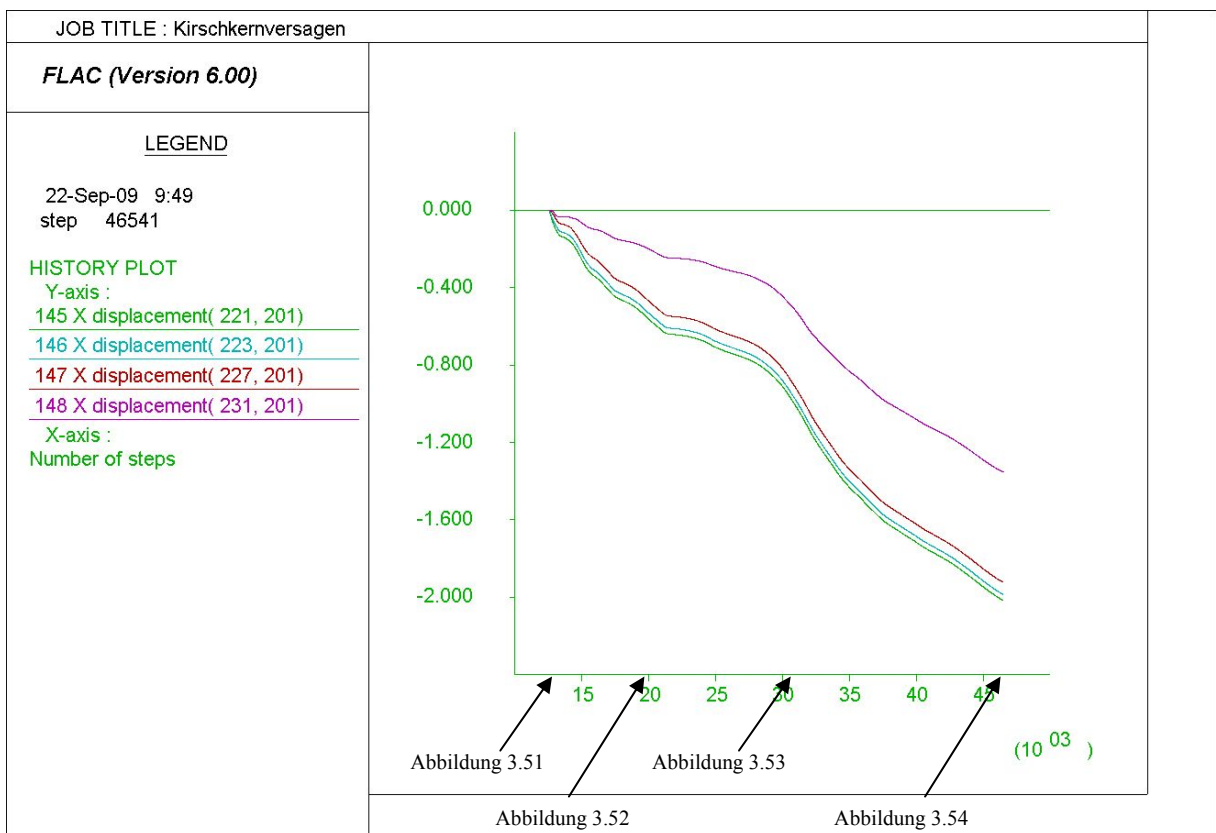


Abbildung 3.50: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 3b, Bezugswert 0,30 (instabil)

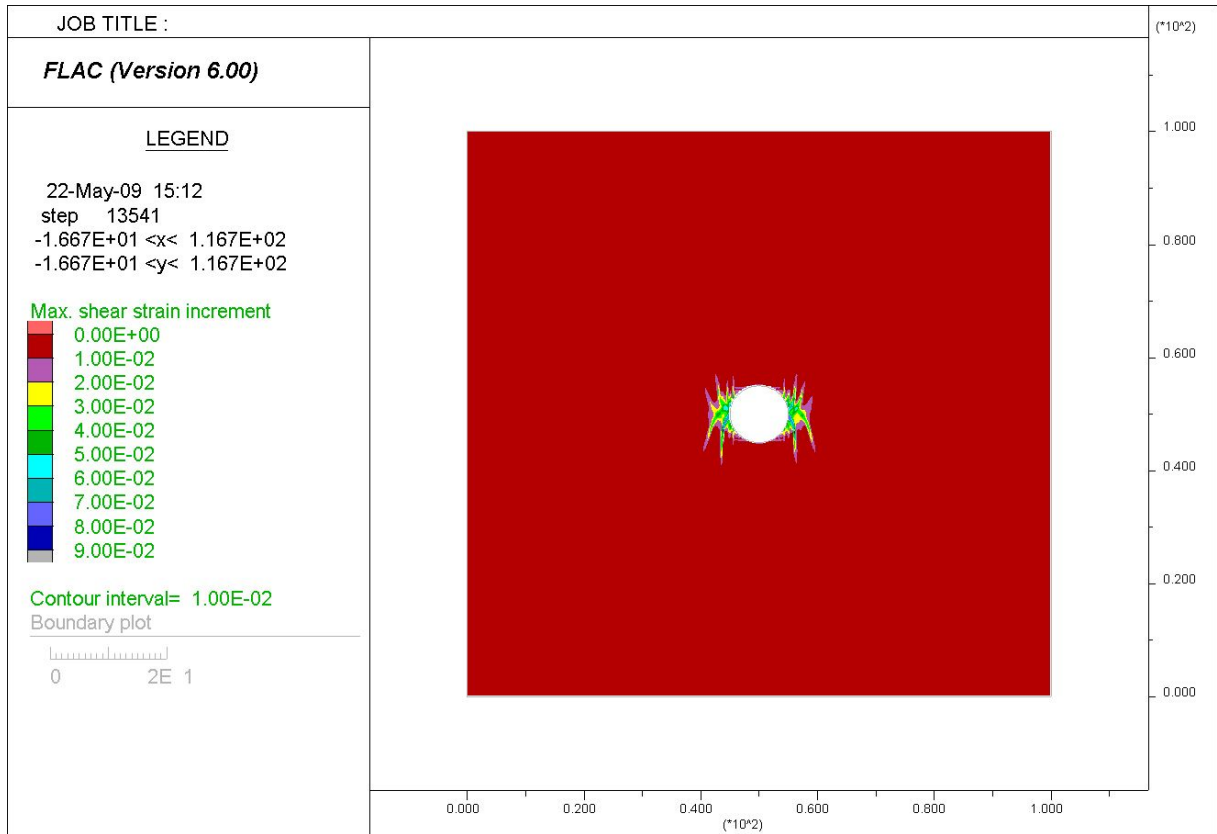


Abbildung 3.51: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 3b, instabil

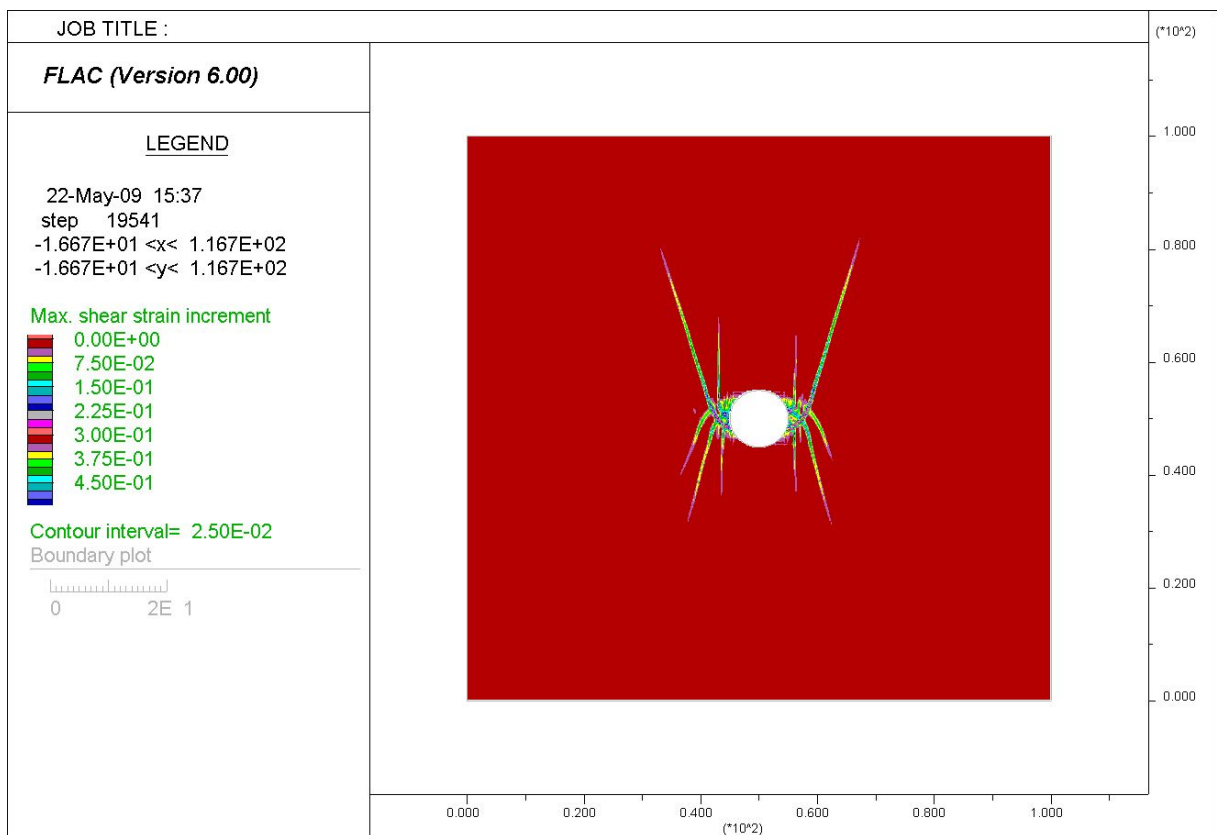


Abbildung 3.52: Schubverzerrungen nach 19541 Berechnungsschritten, instabil

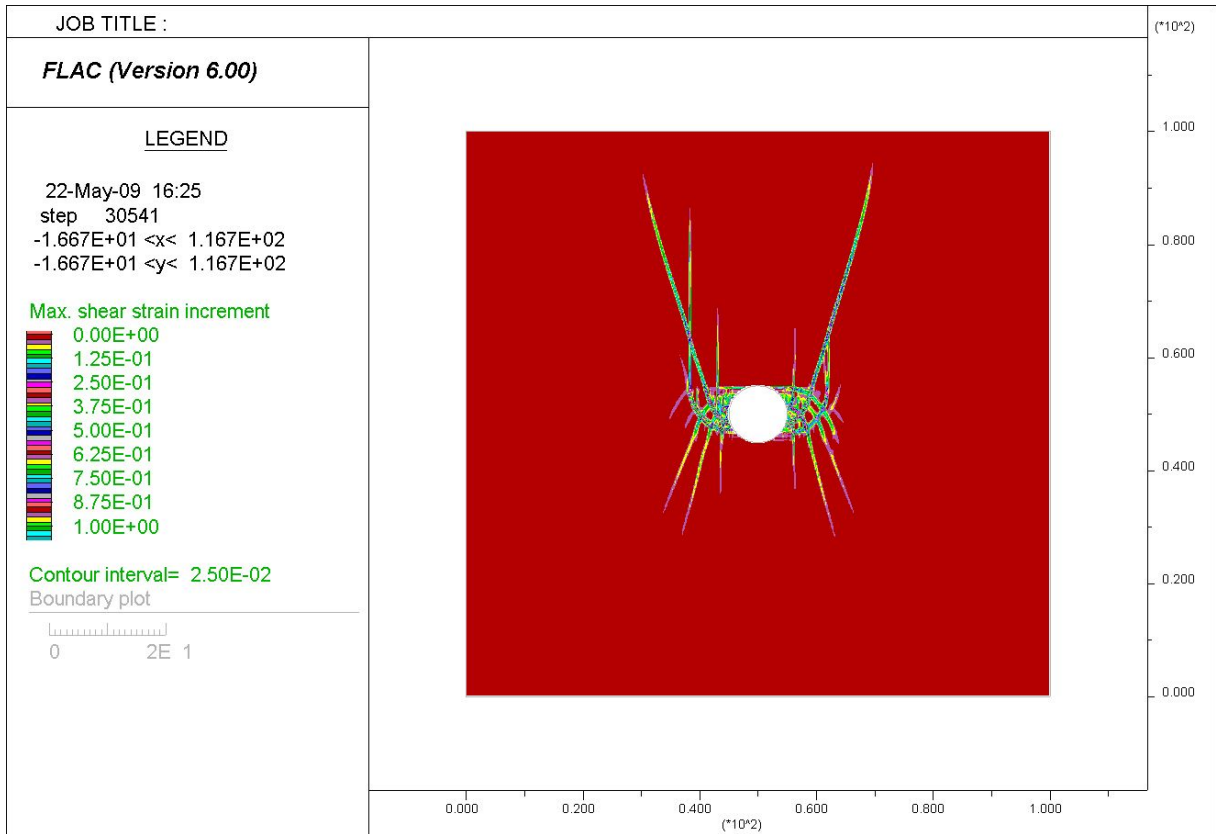


Abbildung 3.53: Schubverzerrungen nach 30541 Berechnungsschritten, instabil

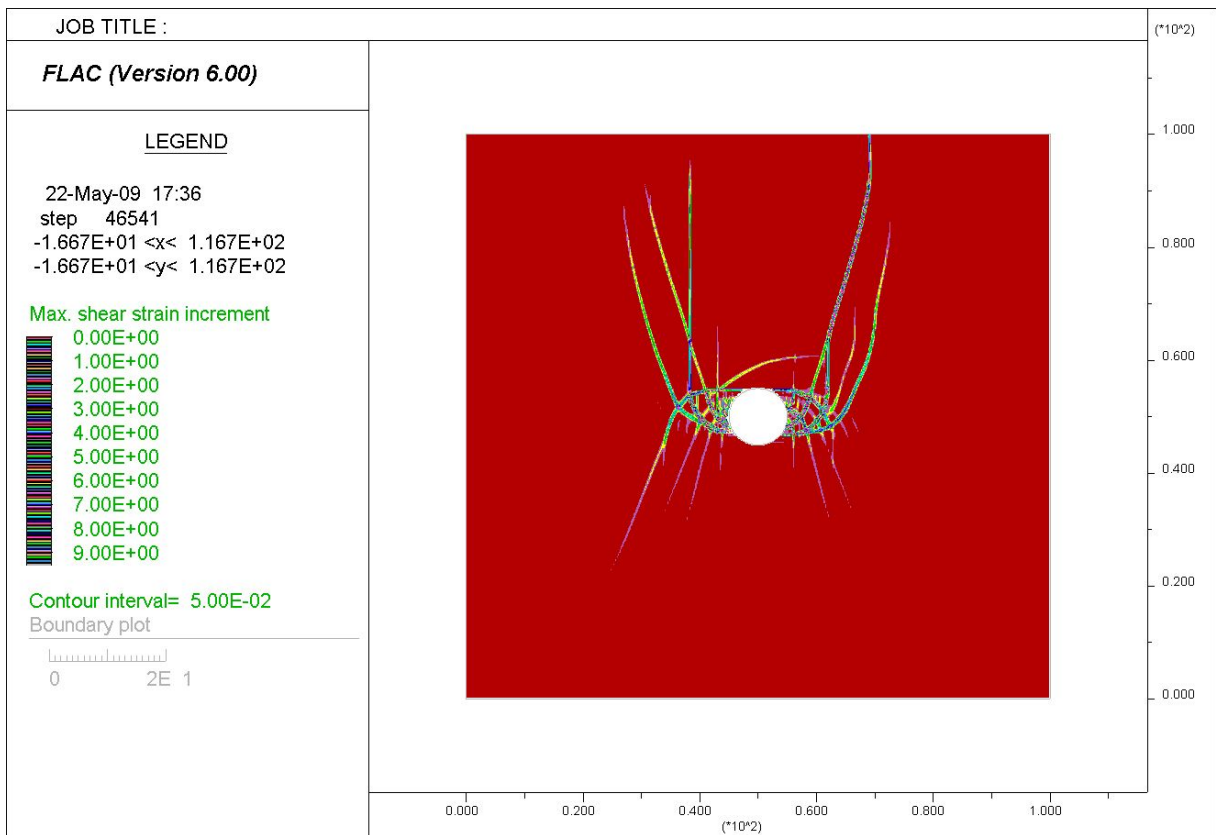


Abbildung 3.54: Schubverzerrungen zum Zeitpunkt des Abbruchs, Parametergruppe 3b, instabil

3.9.1.6 Parametergruppe 4a

Als eine weitere Variante wurde der Elastizitätsmodul auf 5 GPa erhöht. Druckfestigkeit, Reibungswinkel und Kohäsion blieben im Vergleich zur Parametergruppe 3a unverändert (siehe Tabelle 3.9).

E [GPa]	σ_D [MPa]	φ [°]	c [MPa]
5	10,0	35	2,603

Tabelle 3.9: Materialkennwerte Parametergruppe 4a

Wurde ohne „Strain Softening“ gerechnet, hatte der erhöhte Elastizitätsmodul zur Folge, dass die Verschiebungen in der Ulme nur 22 Zentimeter erreichen, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt (Abbildung 3.55).

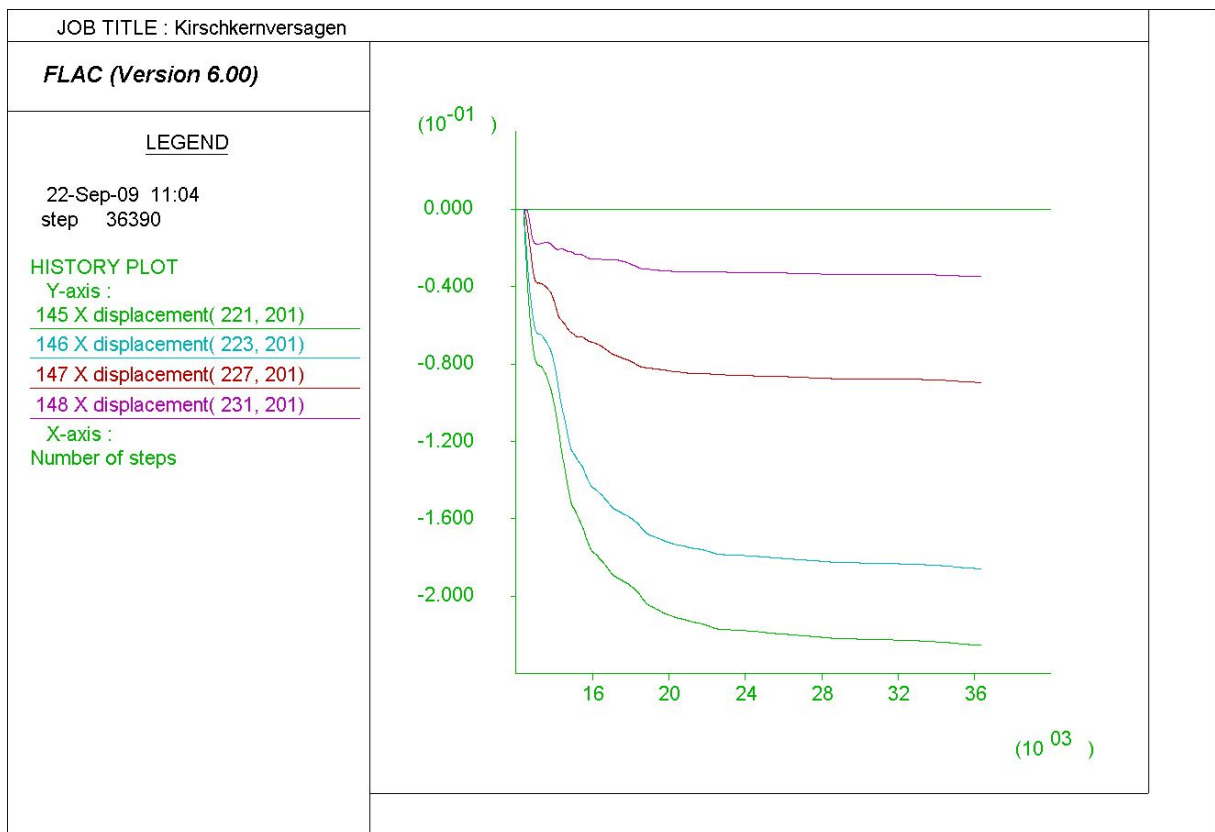


Abbildung 3.55: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 4a, stabil

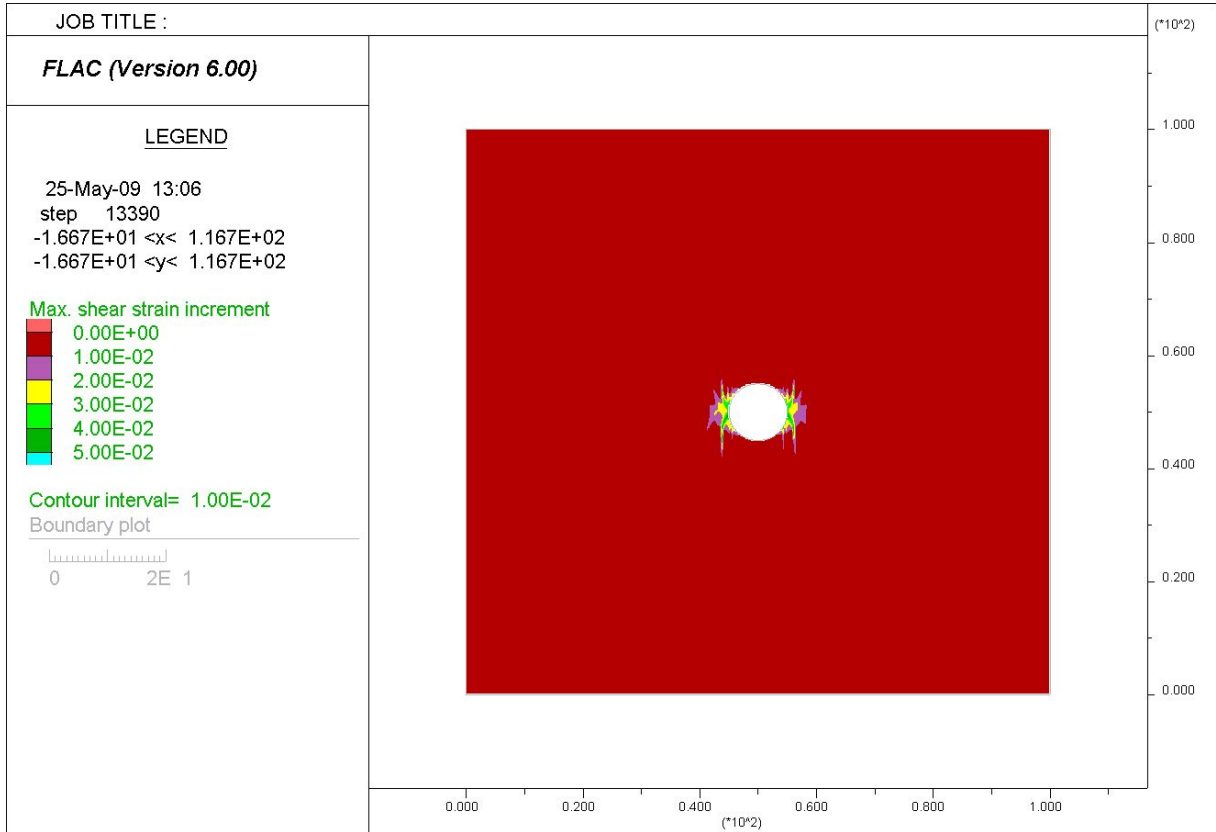


Abbildung 3.56: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 4a

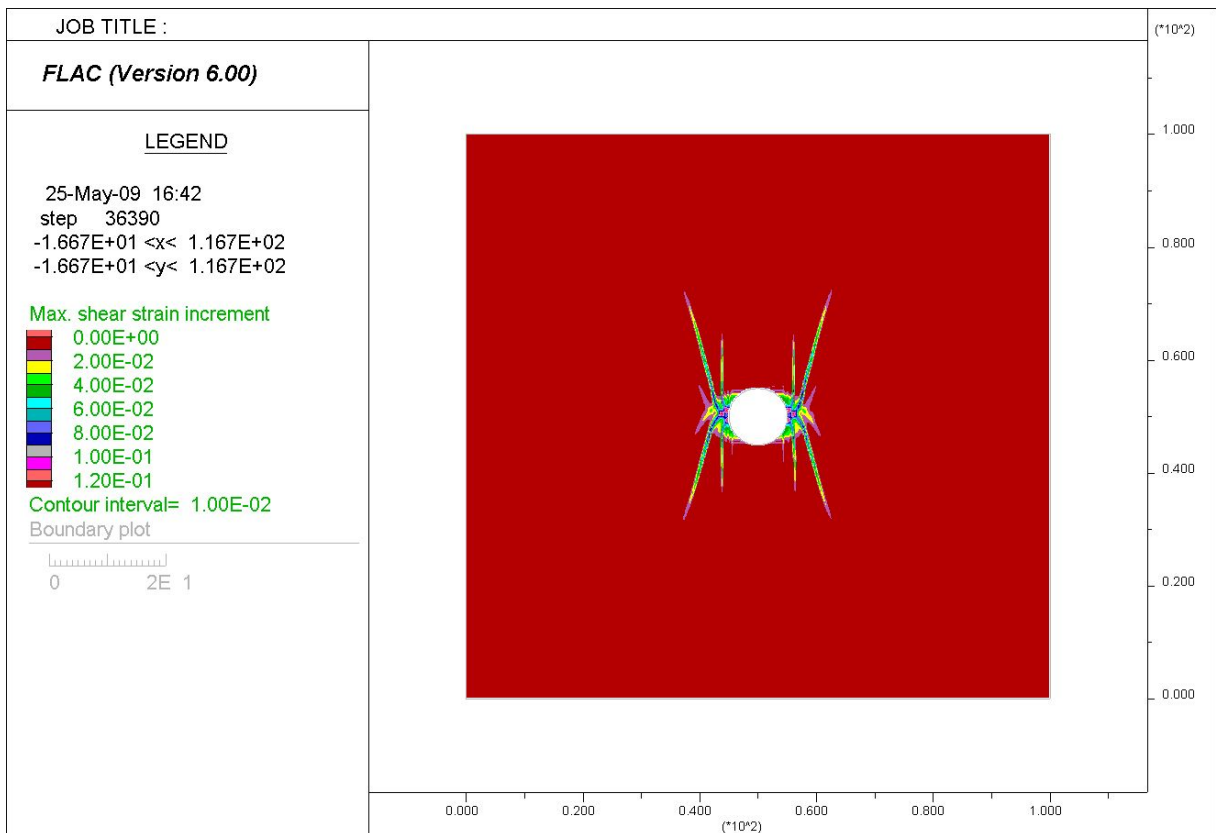


Abbildung 3.57: Schubverzerrungen bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes, Parametergruppe 4a

3.9.1.7 Parametergruppe 4b

Aufbauend auf dem guten Ergebnis von Parametergruppe 4a wurde nun das „Strain Softening“ angewendet. Die Reduktion des Reibungswinkels auf 30° und Herabsetzung der Kohäsion auf null (Tabelle 3.10), bei einem Bezugswert der plastischen Verzerrung von 0,30 führten zur Verdopplung der Verschiebungen (Abbildung 3.58).

E [GPa]	σ_D [MPa]	φ [°]	φ_{red} [°]	c [MPa]	c_{red} [MPa]
5	10,0	35	30	2,603	0

Tabelle 3.10: Materialkennwerte Parametergruppe 4b, stabil

Wurde jedoch eine größere Abminderung versucht (zum Beispiel Reduktion des Reibungswinkels auf 25° , Tabelle 3.11) wurde das System wieder instabil (Abbildung 3.59).

E [GPa]	σ_D [MPa]	φ [°]	φ_{red} [°]	c [MPa]	c_{red} [MPa]
5	10,0	35	25	2,603	0

Tabelle 3.11: Materialkennwerte Parametergruppe 4b, instabil

Betrachtet man den Verlauf der Horizontalverschiebungen in Abbildung 3.59 ist zu erkennen, dass zwischen den Berechnungsschritten 22000 und 38000 die Verschiebungen nur geringfügig zunehmen. Bis zu diesem Zeitpunkt zeigen die Plots der Schubverzerrungen eine Bildung von Scherbruchkörpern (Abbildung 3.60 und Abbildung 3.61), aber in weiterer Folge nehmen die Verschiebungen nach dieser vorübergehenden Verlangsamung wieder zu, bis die FLAC-Routine bei einer Verschiebung im Ulmenpunkt von zwei Metern abbricht. Abbildung 3.62 und Abbildung 3.63 zeigen typische Plots der Schubverzerrungen für instabile Verhältnisse.

In Tabelle 3.12 auf Seite 57 sind alle weiteren untersuchten Varianten zusammengefasst.

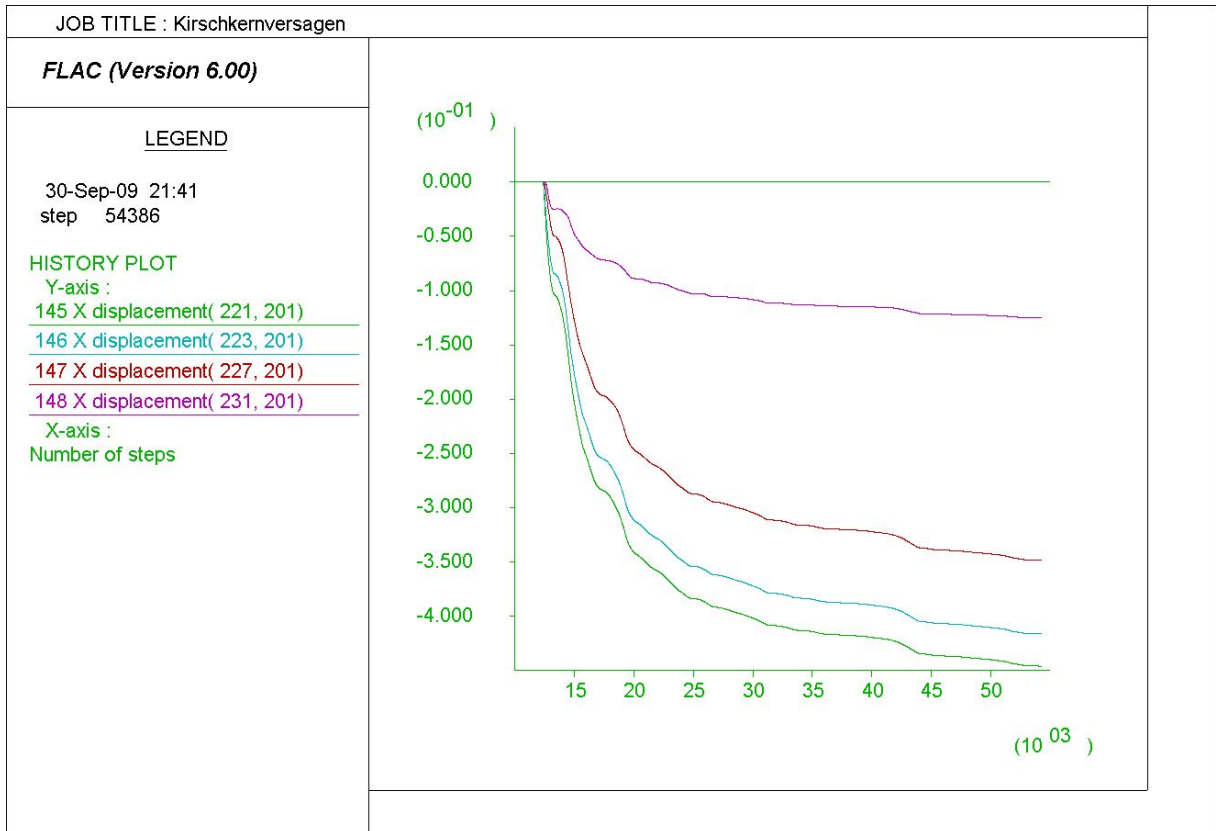


Abbildung 3.58: Verlauf der Verschiebungen Parametergruppe 4b, stabil

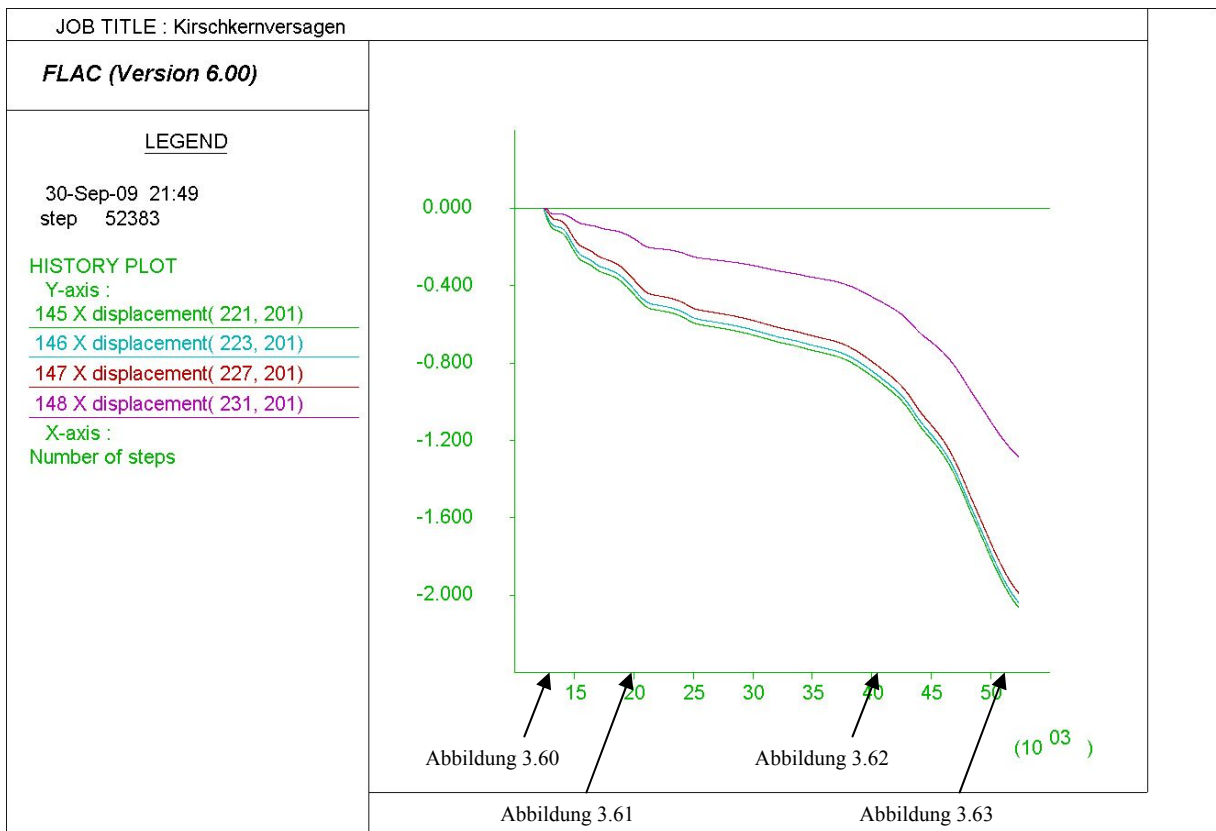


Abbildung 3.59: Verlauf der Verschiebungen Parametergruppe 4b, instabil

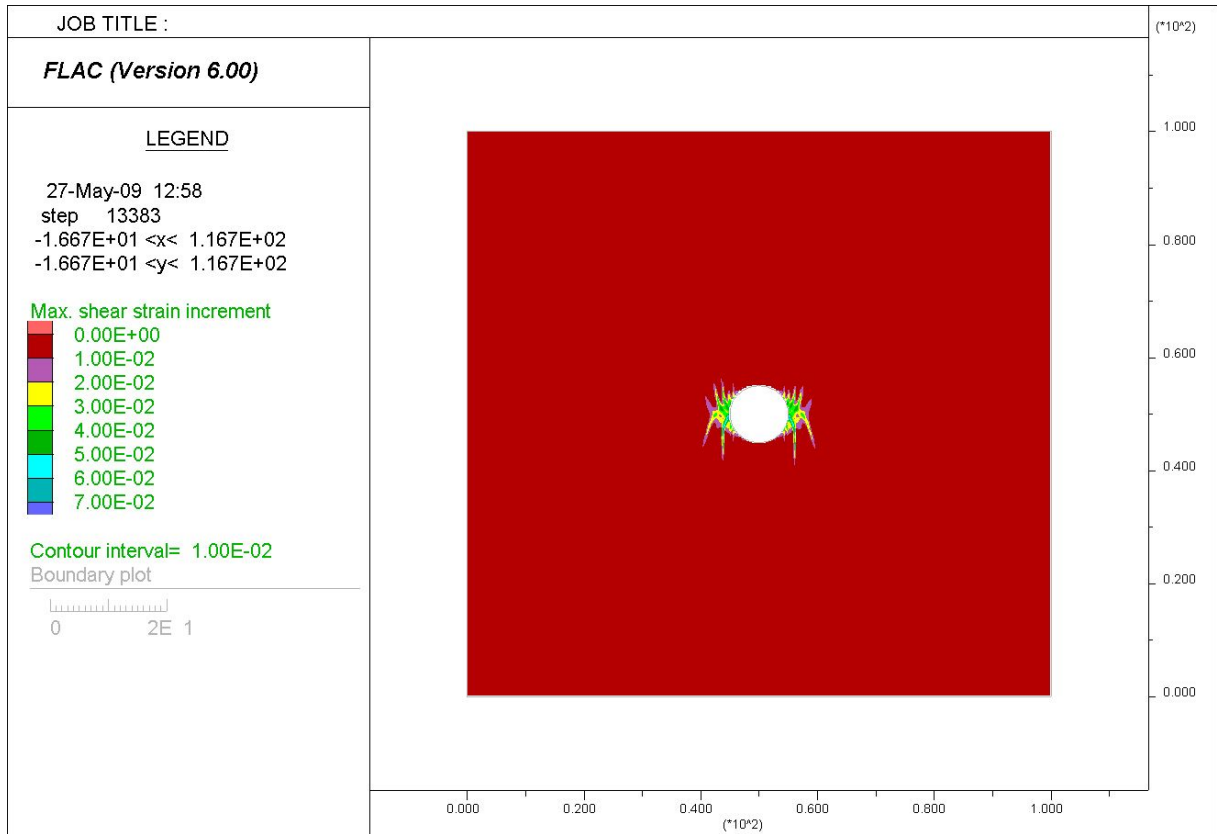


Abbildung 3.60: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 4b, instabil

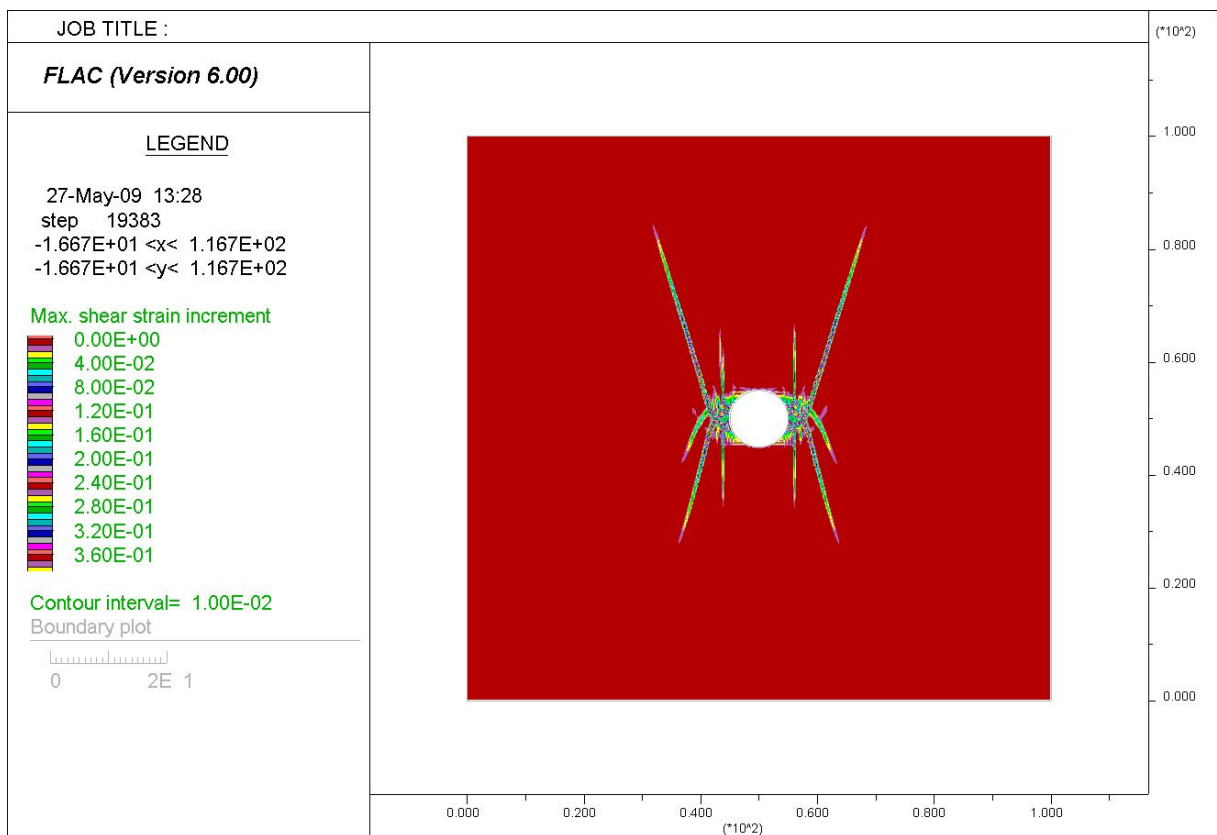


Abbildung 3.61: Schubverzerrungen nach 19383 Berechnungsschritten, Parametergruppe 4b, instabil

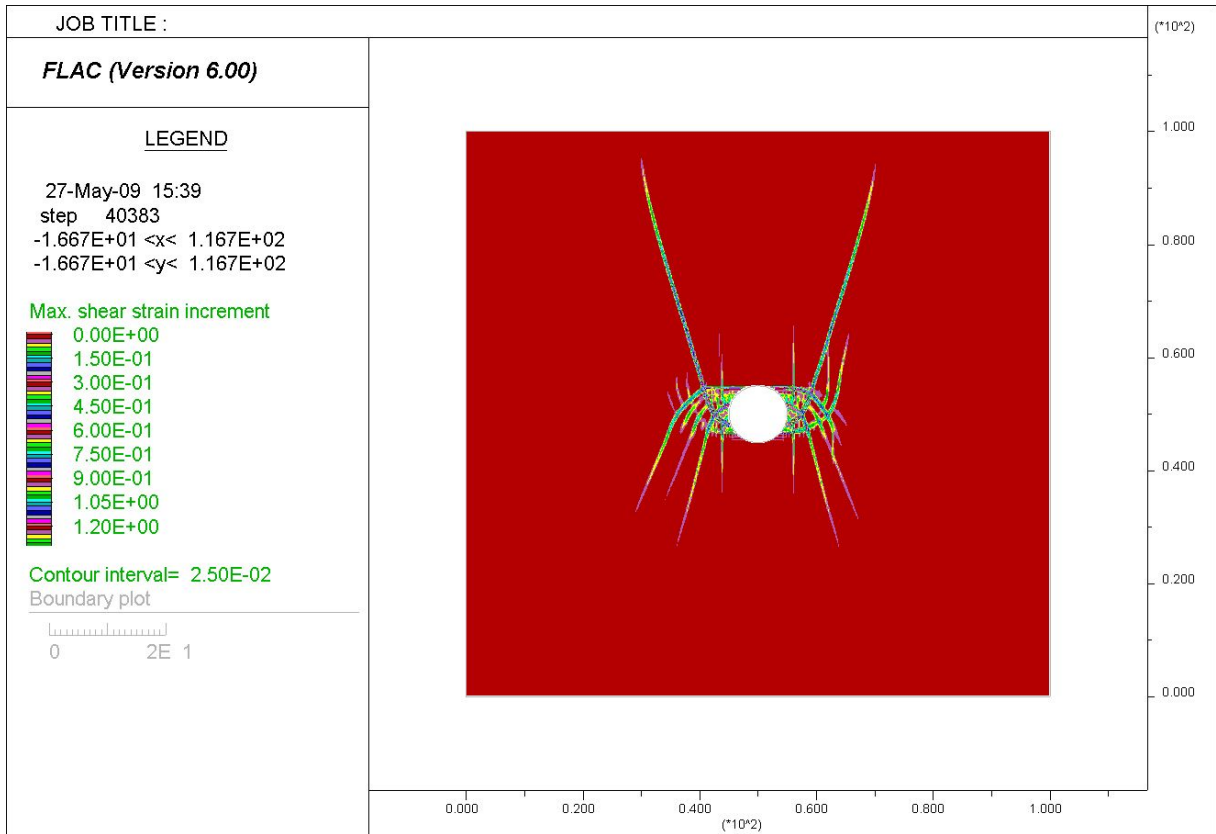


Abbildung 3.62: Schubverzerrungen nach 40383 Berechnungsschritten, Parametergruppe 4b, instabil

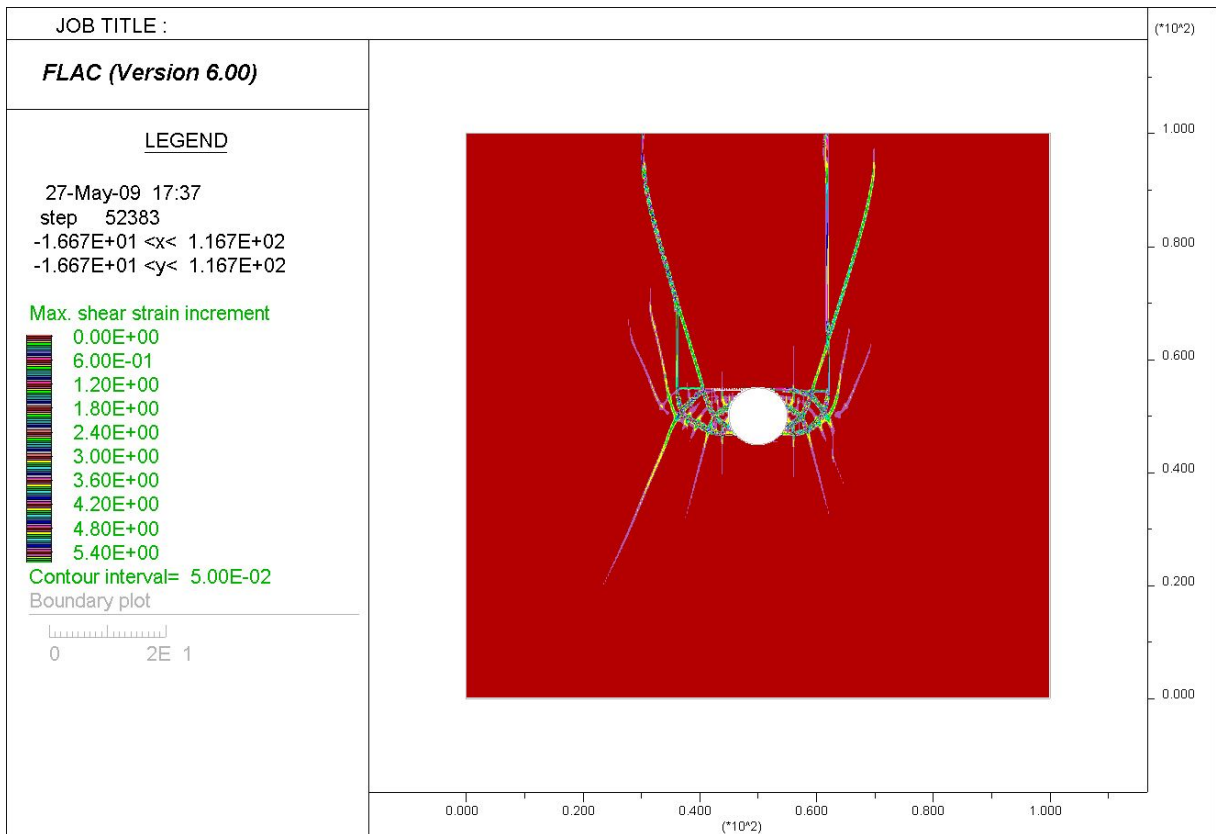


Abbildung 3.63: Schubverzerrungen zum Zeitpunkt des Abbruchs, Parametergruppe 4b, instabil

3.9.2 Zusammenfassung und Interpretation

Zur besseren Übersichtlichkeit sind in Tabelle 3.12 die untersuchten Parametergruppen zusammengefasst.

In den linken neun Spalten sind alle verwendeten Materialkennwerte angeführt, inklusive dem Bezugswert der plastischen Verzerrungen und dem Wert, auf den abgemindert wird.

In der Spalte „Verschiebung“ ist jener Wert angeführt, der aus dem Verlauf der Horizontalverschiebungen, für den Ulmenpunkt (Messpunkt 145) abgelesen wurde.

Unter Bemerkungen ist zu lesen, ob sich das System stabilisiert, oder ob die FLAC-Routine die Berechnung nach Überschreitung von zwei Metern Verschiebung in der Ulme die Berechnung abgebrochen hat.

Aus den Spalten „Steps“ ist ersichtlich wieviele Berechnungsschritte FLAC bis zum Gleichgewicht beziehungsweise bis zum Abbruch benötigt. Wenige Berechnungsschritte bis zum Abbruch bedeuten, dass die Verschiebungsgeschwindigkeiten hoch sind.

Durch Tabelle 3.12 wird ersichtlich, dass das „Strain Softening“ nicht zu abrupt erfolgen darf, da das Modell sehr empfindlich reagiert. Minimale Unterschiede in der Größe der Festigkeitsreduktion können enorme Auswirkungen auf die Verschiebungen in der Ulme verursachen und somit entweder ein stabiles oder instabiles System bewirken (siehe Parametergruppe 3b, Abbildung 3.49 und Abbildung 3.50).

Dies lässt jede Art der Vordimensionierung beziehungsweise Festlegung von Gebirgsverhaltenstypen (nach ÖGG-Richtlinie) problematisch erscheinen, da bei tiefliegenden Tunneln die Ermittlung dieser Parameter mit einer derartigen Genauigkeit in der Planungsphase nicht möglich ist.

Des Weiteren besteht ein Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul und der Reaktion des Systems auf die Abminderung. Grundsätzlich kann man sagen, dass bei sonst gleichen Parametern ein kleiner Elastizitätsmodul größere Verschiebungen zur Folge hat. Dafür lässt er wenig Spielraum für eine Reduktion der Parameter. Ist der Wert des E-Moduls zu hoch angesetzt, stellen sich nur geringe Verschiebungen (im Dezimeterbereich) ein. Durch eine Abminderung von c und φ kann sich die Größe der Verschiebungen allerdings verdoppeln.

Es konnte festgestellt werden, dass bei Reduktion der Kohäsion auf die Hälfte, oder bei Abminderung auf null, kein großer Unterschied besteht (Tabelle 3.12, Zeile E = 4 GPa, $\sigma_D = 10$ MPa). Auf eine zu große Abminderung des Reibungswinkels, bei gleicher Kohäsion (Tabelle 3.12, Zeile E = 5 GPa, $\sigma_D = 10$ MPa), reagiert das Modell allerdings sehr deutlich.

E-Modul	σ_v [Mpa]	σ_b [Mpa]	Kohäsion c		Reibungswinkel		Verschiebung in der Ulme	Bemerkungen	Steps		
			Abminderung bei	auf	Abminderung bei	auf			insitu	gesamt	Δ
1	50	5,0	[Mpa]	1,300	[°]	35	[m]	Gleichgewicht	12528	41522	28994
			-	-	-	-	2,50	-	12581	14591	2010
2	50	7,5	0,10	0	35	0,10	25	Abbruch wegen zu großer Verschiebung	12581	14591	2010
			0,10	0		-	-	12544	15554	3010	
			0,10	0,976		-	-	12511	15521	3010	
			0,20	0		0,20	30	12570	15580	3010	
			0,20	0		-	-	12507	16517	4010	
			0,20	0,976		-	-	12535	16545	4010	
			0,30	0		0,30	30	12544	16544	4000	
			0,30	0		-	-	12524	17534	5010	
4	50	7,5	0,30	0	35	-	-	Abbruch wegen zu großer Verschiebung	12483	17493	5010
			-	-		-	-	12593	35603	23010	
			0,30	0		0,30	30	12595	26605	14010	
			-	-		-	-	12593	35603	23010	
4	50	10,0	0,30	1,302	35	0,30	30	Abbruch wegen zu großer Verschiebung	12531	46541	34010
			0,33	0		0,33	30	12512	49522	37010	
			0,35	0		-	-	12495	43505	31010	
			0,35	1,302		0,35	30	12619	41629	29010	
			0,40	1,302		0,40	30	12553	39563	27010	
			-	-		-	-	12544	33554	21010	
5	50	10,0	0,20	1,302	35	0,20	30	Abbruch wegen zu großer Verschiebung	12387	31397	19010
			0,25	0		0,25	30	12341	47351	35010	
			0,25	1,302		0,25	30	12337	56347	44010	
			0,25	1,302		0,30	30	12405	50415	38010	
			0,30	0		0,30	25	12373	52383	40010	
			0,30	0		0,30	30	12376	54386	42010	
			0,30	1,302		0,30	25	12344	52354	40010	
			0,30	1,302		0,30	30	12389	43399	31010	
								12380	36390	24010	

Tabelle 3.12: Aufstellung der untersuchten Parameter

4 Untersuchung des Scherbruchmechanismus („Kirschkernversagen“)

4.1 Modelleigenschaften

Aus allen in Kapitel 3 untersuchten Modellen stellte sich das Modell mit gravitativer Belastung (siehe Abschnitt 3.7) für die Untersuchung des Scherbruchmechanismus („Kirschkernversagen“) als am geeignetsten heraus. Das Modell wurde am oberen Rand belastet und am unteren Rand in X- und Y-Richtung sowie an den Seiten in X-Richtung fixiert. Nach Erzeugung des in situ-Zustandes wurde der Tunnel ausgebrochen und bis zur Stabilisierung des Systems gerechnet.

Es wurde das „Strain Softening“ Modell angewendet, welches es erlaubt, ab dem Bruch eine Reduktion der Parameter Reibungswinkel und Kohäsion zu berücksichtigen (siehe 3.8).

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 3.9 stellte sich die Parametergruppe 3b mit einem Bezugswert der plastischen Verzerrung von $e^p = 0,33$ als am besten geeignet heraus. Dabei wurden die Parameter c und φ auf $c_{red} = 0$ und $\varphi_{red} = 30^\circ$ reduziert. In Tabelle 4.1 sind die verwendeten Materialkennwerte zusammengefasst.

Materialdichte ρ	2700 kg/m ³
Kohäsion c	2,603 MPa
Kohäsion reduziert c_{red}	0 MPa
Elastizitätsmodul	4 GPa
Reibungswinkel φ	35°
Reibungswinkel reduziert φ_{red}	30°
Querdehnungszahl ν	0,25

Tabelle 4.1: Materialkennwerte

Unter Verwendung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnungszahl wurden der Schermodul G und der Kompressionsmodul K mit Hilfe der Gleichungen (4.1) beziehungsweise (4.2) berechnet.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 1600 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} = 2666,67 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

Der Seitendruckbeiwert λ für das Gebirge ergibt sich durch die fixierten seitlichen Ränder des Modells und nach Gleichung (4.3) zu:

$$\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu} = 1/3 \quad (4.3)$$

Es herrscht daher vertikal betonter Primärdruck, das ergibt unter Festlegung der Vertikalspannung mit $\sigma_V = 50 \text{ MPa}$ und unter Verwendung von Gleichung (4.3) eine Horizontalspannung von $\sigma_H = 17 \text{ MPa}$.

Die einaxiale Druckfestigkeit σ_D ist vom Reibungswinkel φ und der Kohäsion c abhängig und ergibt sich nach Gleichung (4.4) zu:

$$\sigma_D = c \cdot \frac{2 \cdot \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} = 10,0 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

4.2 Messpunkte

Im Netz wurden Messpunkte, sogenannte „History-Points“ definiert, an denen die Verläufe der minimalen und maximalen Hauptspannungen (Radialspannung und Tangentialspannung), der horizontalen und vertikalen Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten aufgezeichnet wurden.

Die Punkte wurden jeweils am Tunnelrand beginnend strahlenförmig, nach außen hin mit größeren Abständen, gesetzt (Abbildung 4.1). Dabei liegt der erste Punkt jeweils direkt am Ausbruchrand. Da die nähere Tunnelumgebung genauer dokumentiert werden soll, beträgt der Abstand der ersten Punkte nur 0,5 m und 1,0 m, weiter außen liegende Punkte sind in Abständen von 5,0 m angeordnet.

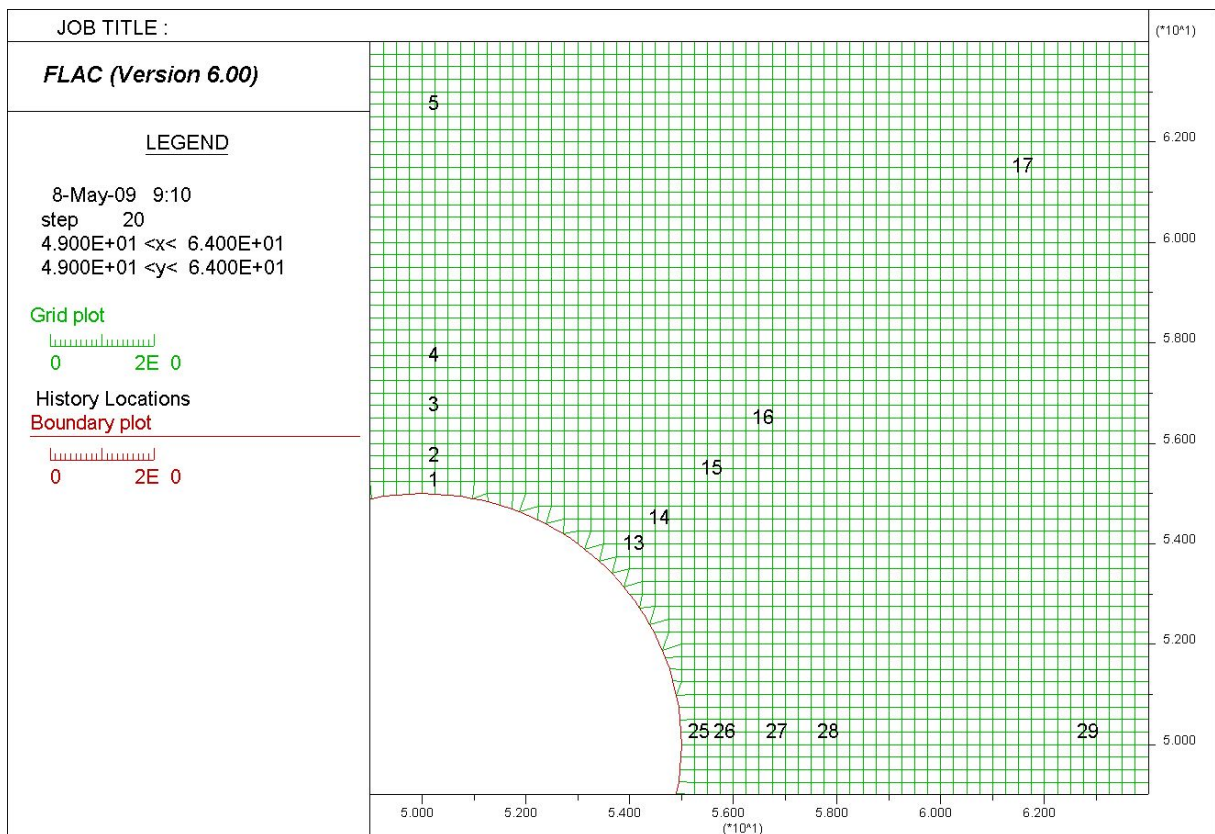


Abbildung 4.1: Anordnung von „History Points“

4.3 Ermittlung der Gebirgskennlinie

Eine Gebirgskennlinie stellt die Beziehung zwischen der Radialverschiebung am Ausbruchsrund (u_r) und dem Ausbauwiderstand (P_i) dar. Sie ist der allgemeine Ausdruck für die Verformung des Gebirges als Reaktion auf den Ausbruch (SCHUBERT, 2007). Die erstellte Linie gibt für eine bestimmte Verformung den für Gleichgewicht erforderlichen Ausbauwiderstand an. Schneidet die Gebirgskennlinie die Abszisse, ist der Zustand stabil (Abbildung 4.2). Nähert sich die Gebirgskennlinie asymptotisch einem bestimmten Wert des Ausbauwiderstandes, stellt dieser Wert den Minimalwert des Ausbauwiderstandes dar, der zur Stabilisierung des Tunnels erforderlich ist. Allerdings treten bei diesem Ausbauwiderstand große Verschiebungen auf.

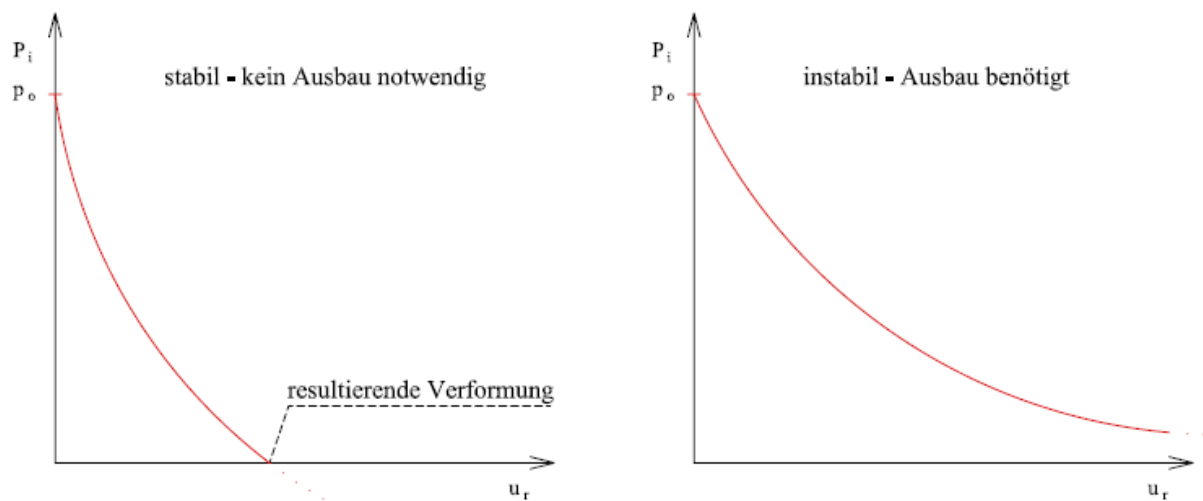


Abbildung 4.2: Beispiel für eine stabile und instabile Gebirgskennlinie

Mit FLAC wird die Gebirgskennlinie wie folgt berechnet: Nach der Berechnung des in situ-Zustandes wird der Tunnel ausgebrochen und zeitgleich die Knoten entlang des Tunnelquerschnittes fixiert und markiert. Danach werden in den markierten Knotenpunkten die Reaktionskräfte (Stützkräfte) berechnet und gespeichert. Diese sind jene Stützkräfte, die erforderlich sind, um Verschiebungen des Tunnelrandes komplett zu verhindern (Punkt p_0 der Gebirgskennlinie). Im weiteren Ablauf werden die Reaktionskräfte in fünf-Prozent-Schritten reduziert bis keine Stützkräfte mehr in der Berechnung wirken. Die in jedem Schritt aufgezeichneten, rückhaltenden Reaktionskräfte (entspricht dem Ausbau) und die zugehörigen Verschiebungen werden als Gebirgskennlinie ausgegeben.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Beschreibung des Versagensmechanismus

Wie der Verlauf der Horizontalverschiebungen in der Ulme (Abbildung 4.3) zeigt, lässt sich der Ablauf des Versagens in zwei Phasen unterteilen. In der frühen, ersten Phase bilden sich sehr rasch die Scherbruchkörper in der Ulme aus (Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5). Dies bewirkt eine Horizontalverschiebung im Ulmenpunkt von 13 cm.

In weiterer Folge bilden sich Scherbruchflächen aus, die - ausgehend von den Spitzen der Scherbruchkörper - bis tief in das Gebirge reichen (Abbildung 4.6). Die Abmessungen des Modells sind daher so groß zu wählen, dass diese Scherbrüche von den Modellrändern nicht beeinflusst werden. Diese Scherbrüche bilden trapezförmige Bereiche in der Firste und in der Sohle, die in der Richtung der größeren in situ-Spannung gegeneinander drücken und in der Darstellung der Bereiche mit gleichen Vertikalverschiebungen gut erkennbar sind (Abbildung 4.7). Mit den weiter wachsenden Scherbruchflächen vergrößert sich auch die Verschiebung auf rund 60 cm.

Ab diesem Zeitpunkt nehmen die Verschiebungen weniger zu und das System beginnt sich zu stabilisieren (Abbildung 4.3). Nach 49522 Berechnungsschritten befindet sich das System im Gleichgewichtszustand (Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9). Die Horizontalverschiebung bis zur Stabilisierung beträgt etwa 68 cm. Die Verschiebungsgeschwindigkeit der Ulmen nimmt während dem Versagensablauf von 10^{-4} auf 10^{-5} m/Berechnungsschritt ab (Abbildung 4.10).

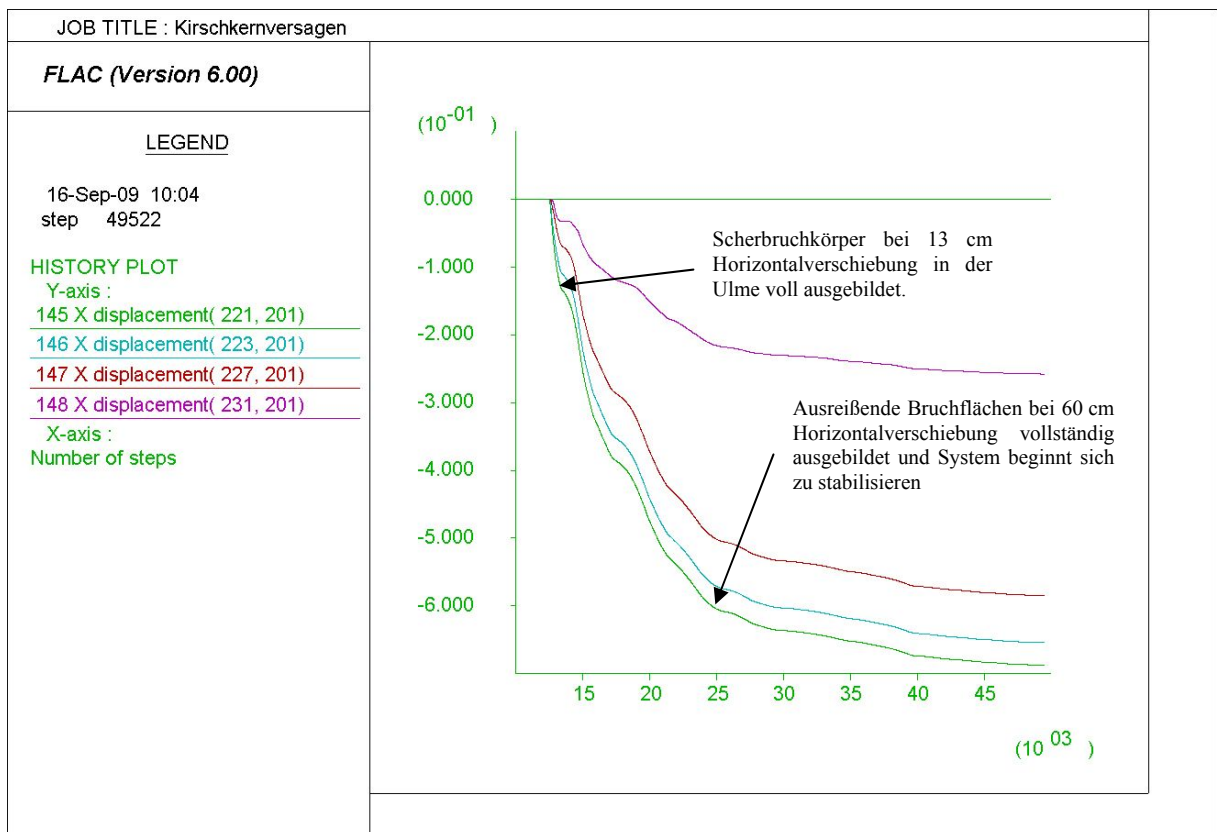


Abbildung 4.3: Verlauf der Horizontalverschiebungen der Ulme

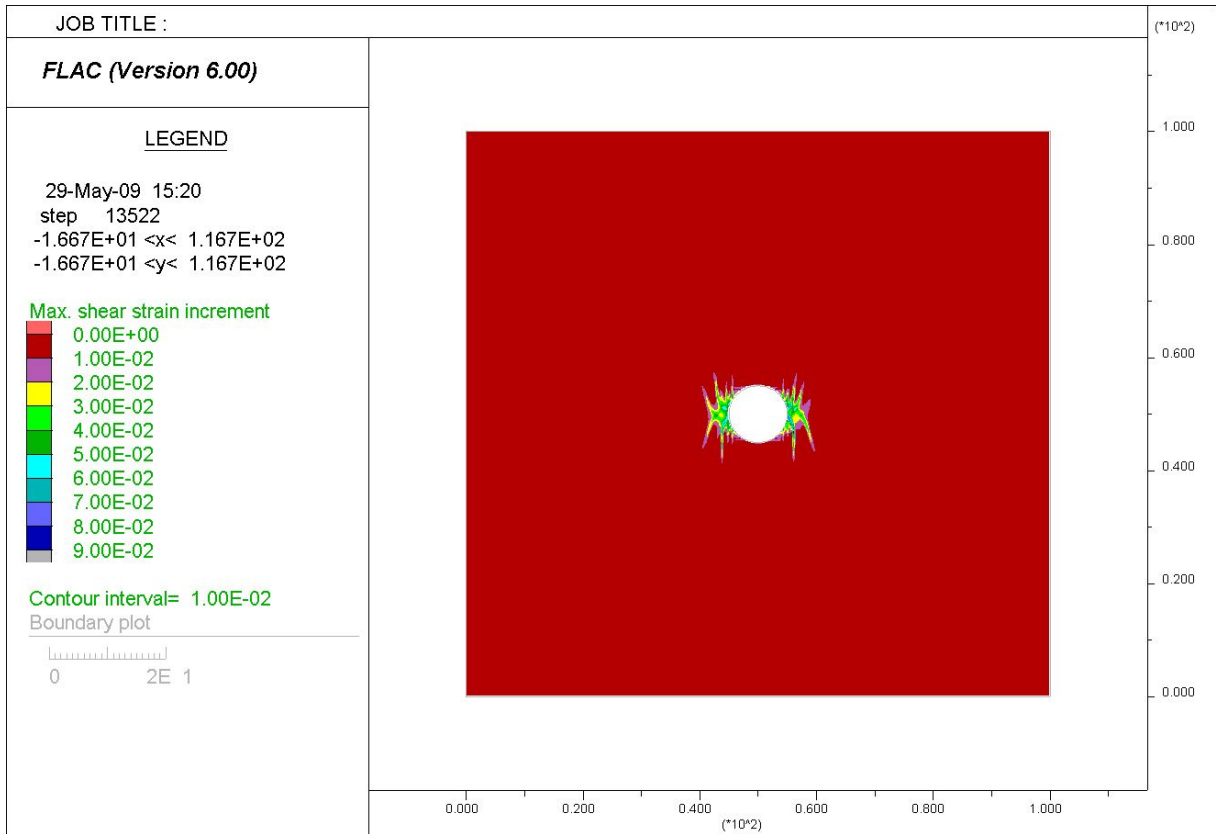


Abbildung 4.4: Schubverzerrungen nach 13522 Berechnungsschritten



Abbildung 4.5: Bereiche gleicher Horizontalverschiebungen [m] nach 13522 Berechnungsschritten

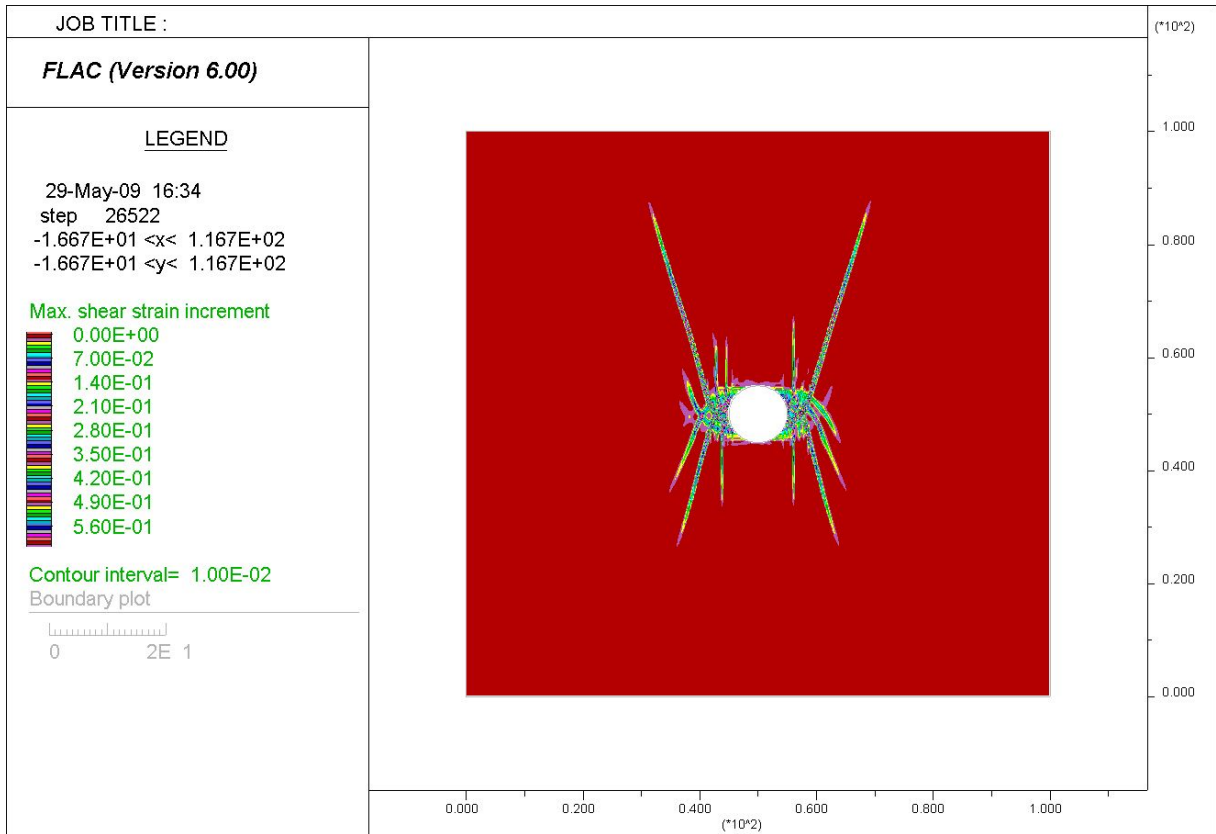


Abbildung 4.6: Schubverzerrungen nach 26522 Berechnungsschritten

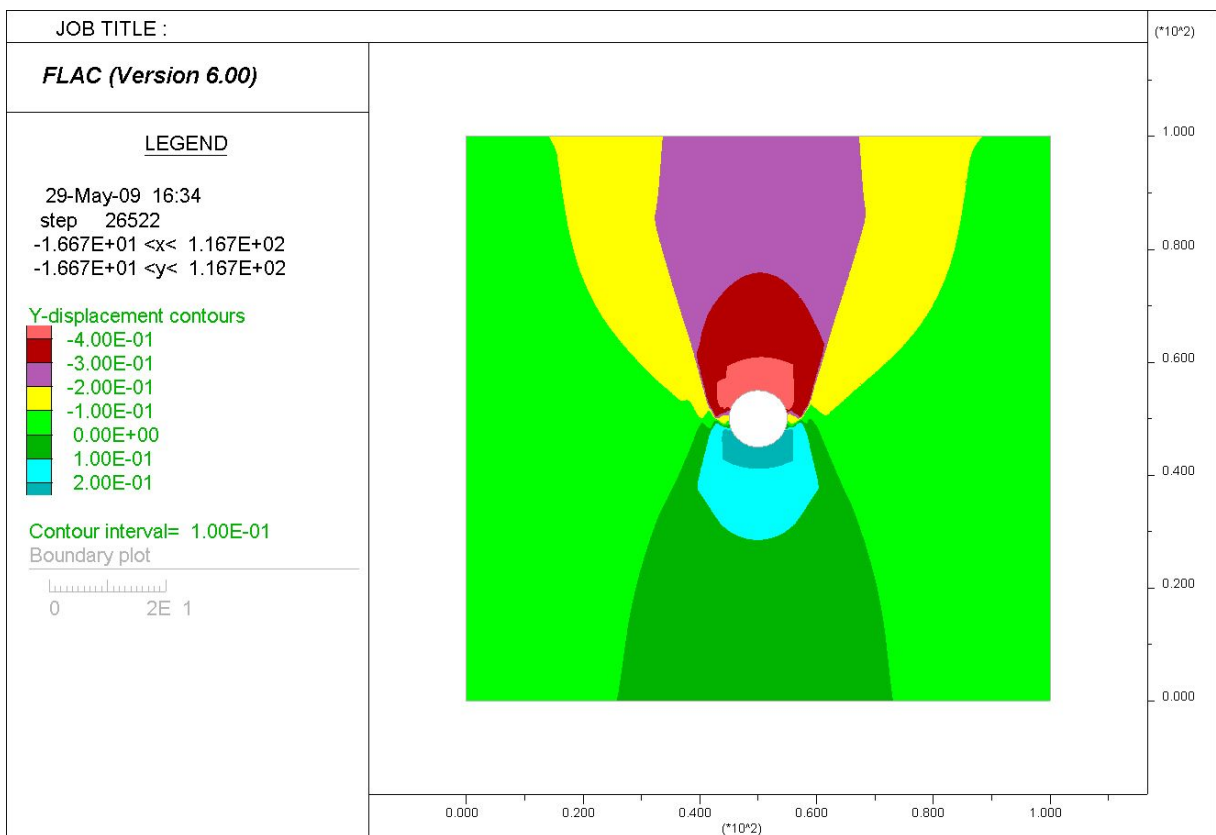


Abbildung 4.7: Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen [m] nach 26522 Berechnungsschritten

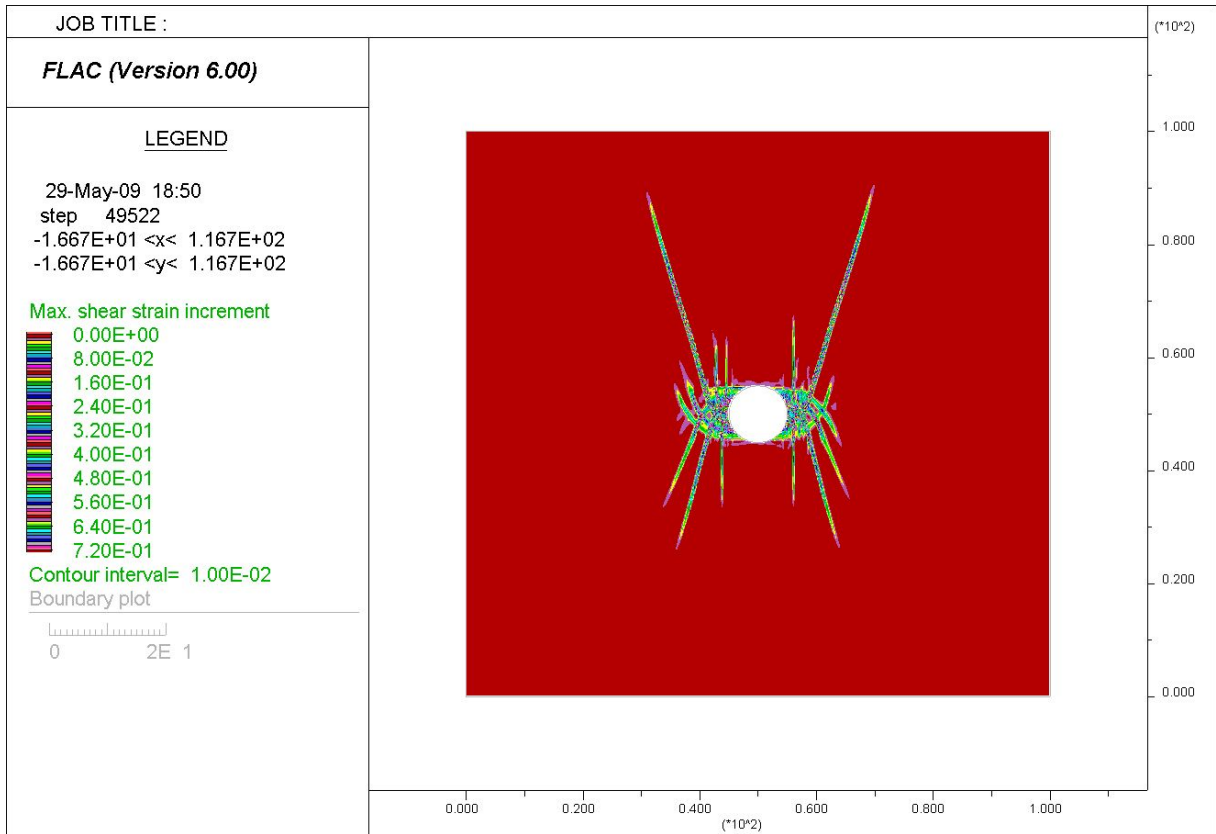


Abbildung 4.8: Schubverzerrungen nach 49522 Berechnungsschritten (stabil)

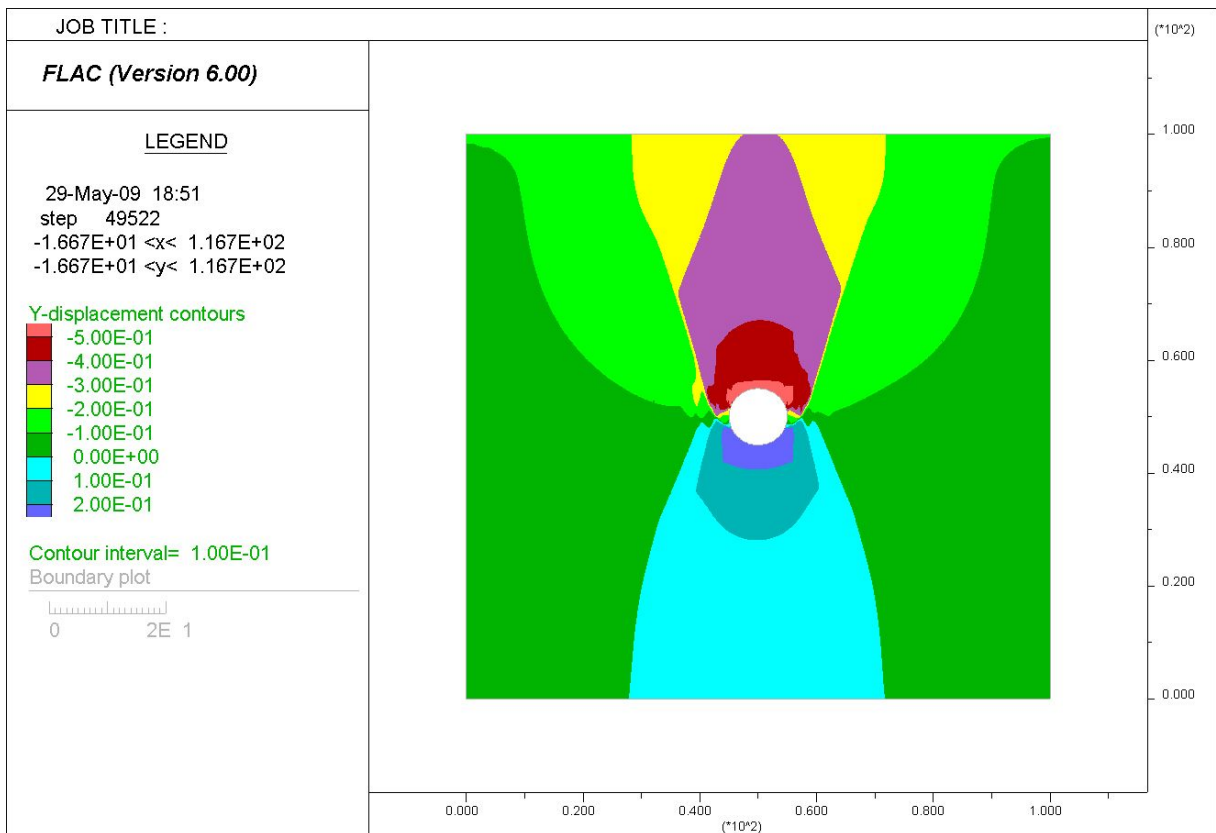


Abbildung 4.9: Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen [m] nach 49522 Berechnungsschritten (stabil)

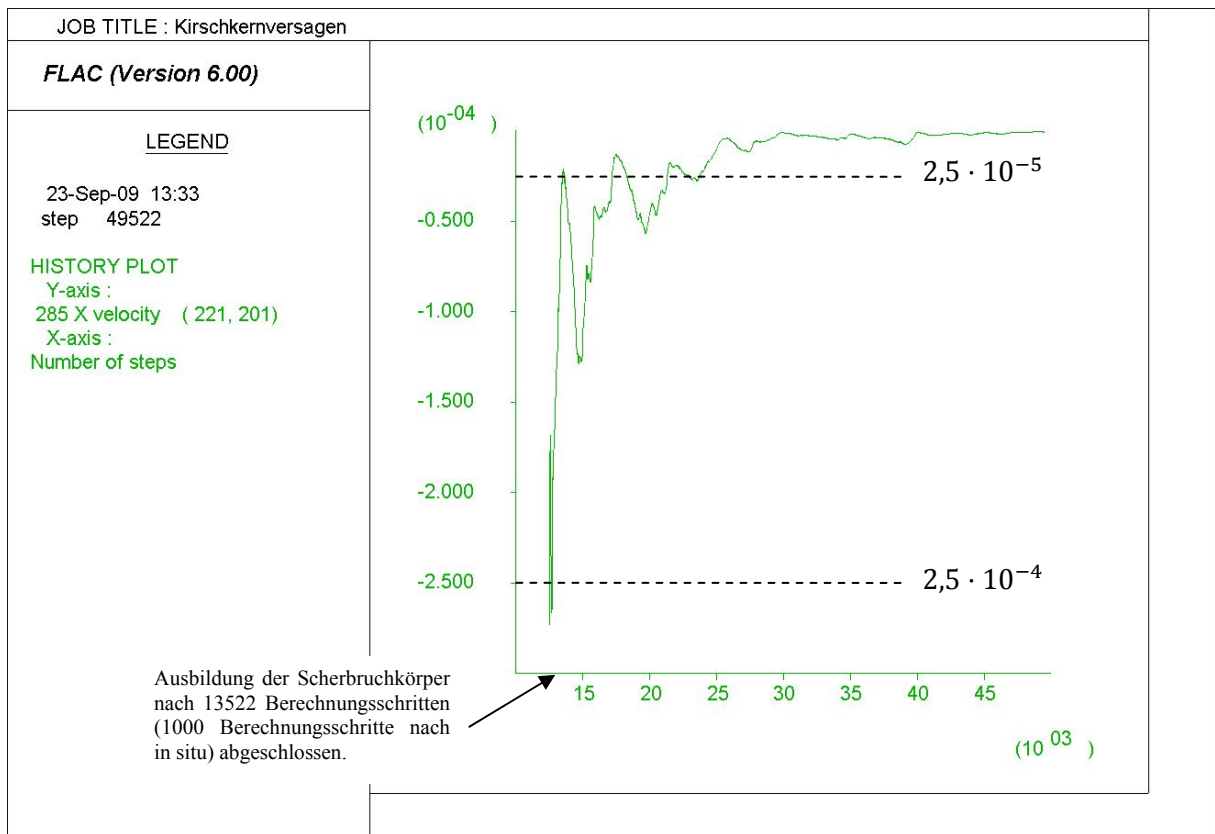


Abbildung 4.10: Verlauf der horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten

Abbildung 4.11 zeigt die Entwicklung der maximalen Hauptspannung (Tangentialspannung) in der Ulme (Messpunkt 25 liegt direkt am Tunnelrand, siehe Abschnitt 4.2). Es ist zu erkennen, dass bei der Bildung der Scherbruchkörper, die Tangentialspannung am Hohlraumrand ein Mehrfaches der Druckfestigkeit beträgt.

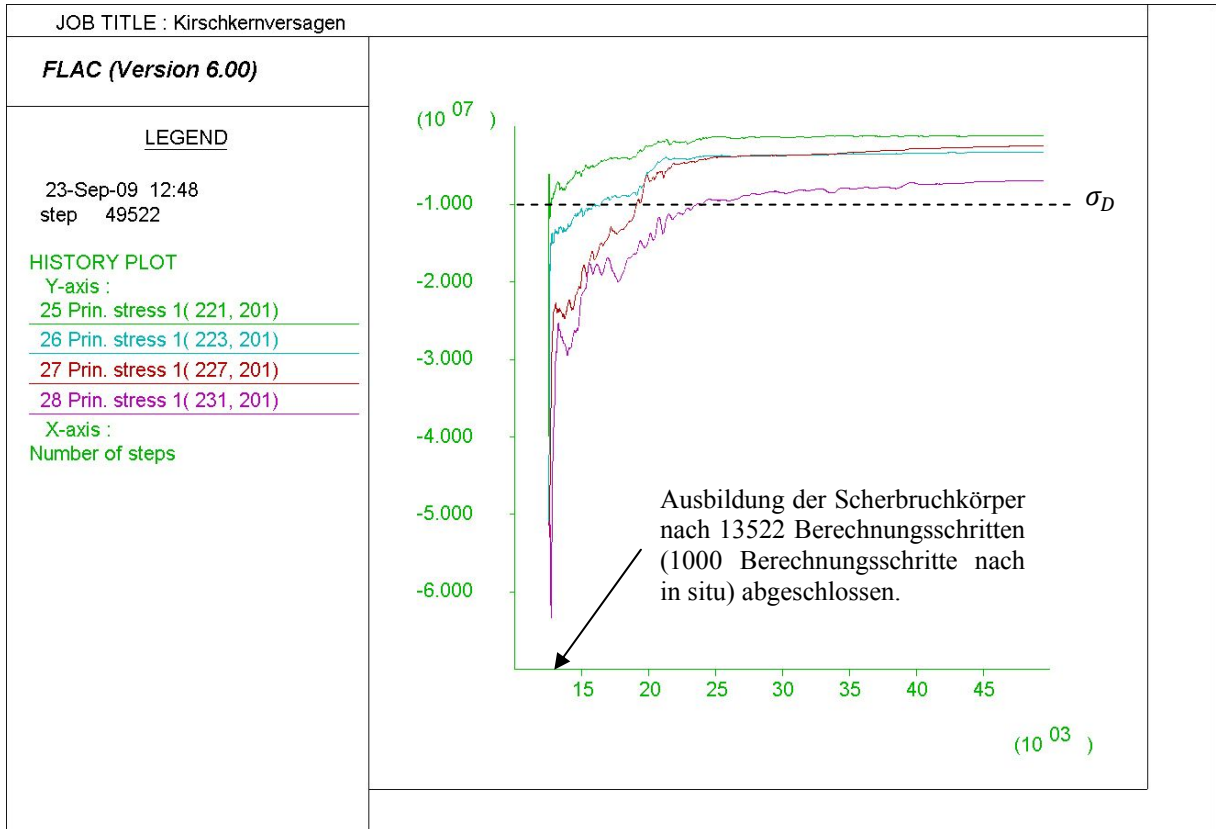


Abbildung 4.11: Verlauf der maximalen Hauptspannung (Tangentialspannung)

4.4.2 Gebirgskennlinie

Abbildung 4.12 zeigt die mit FLAC erstellte Gebirgskennlinie. Auf der Ordinate wird die Relaxation der Stützkräfte (Ausbauwiderstand) aufgetragen. Dabei bedeutet beispielsweise „-0,1“, dass die berechneten Reaktionskräfte (Ausbau von 100 % zum Zeitpunkt des Ausbruchs) um 10 % abgemindert wurden. Folglich bedeutet „-1,0“, dass alle rückhaltenden Kräfte entfernt wurden. Auf der Abszisse wird die zugehörige Horizontalverschiebung in der Ulme aufgetragen.

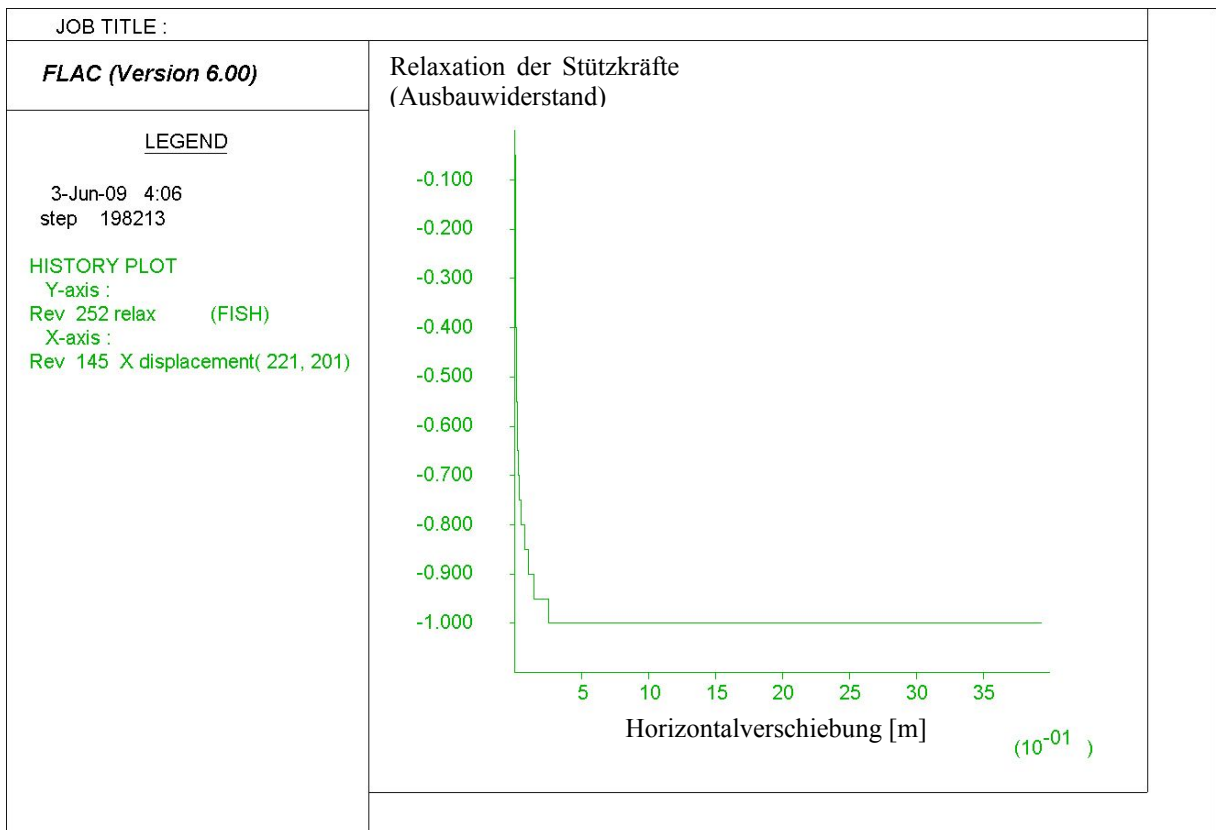


Abbildung 4.12: Gebirgskennlinie für die Ulme (erstellt mit FLAC)

Die aus Abbildung 4.12 abgeleitete und angegliche Gebirgskennlinie zeigt Abbildung 4.13.

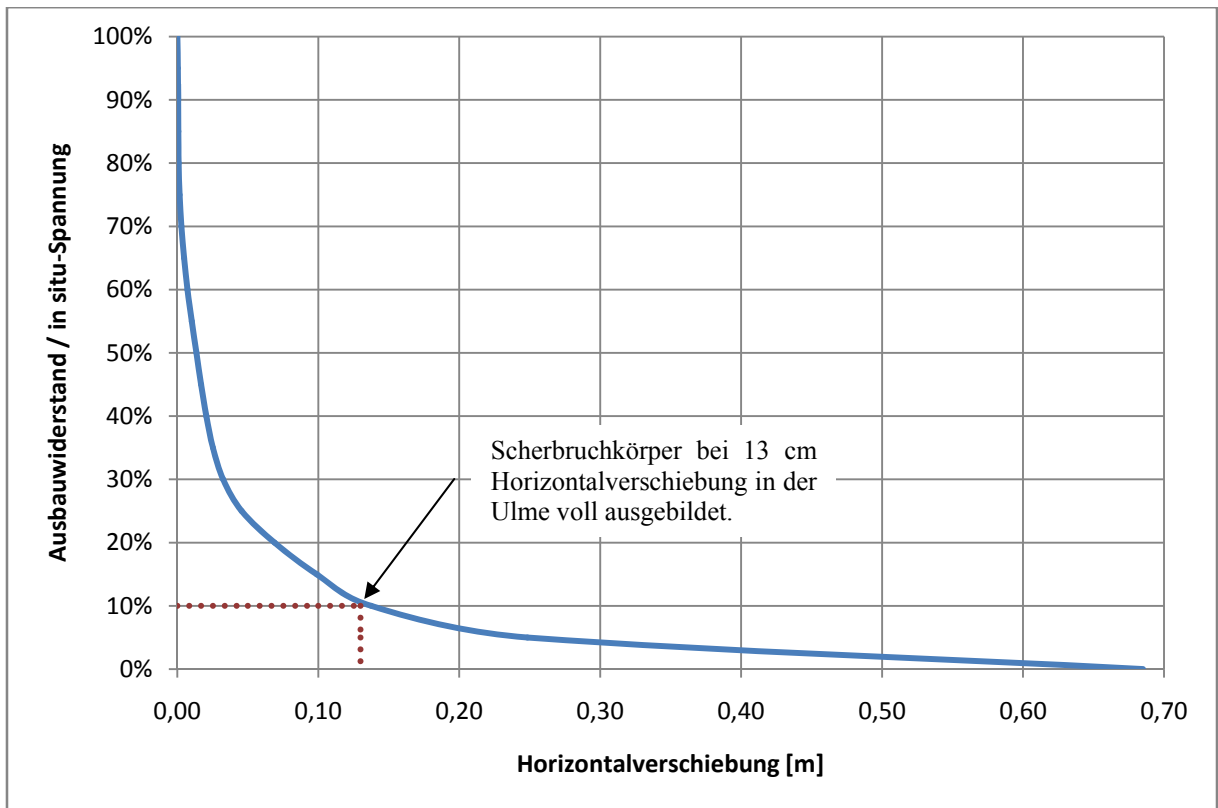


Abbildung 4.13: Gebirgskennlinie für die Ulme (angeglichen mit Excel)

Wie bereits im Verlauf der Horizontalverschiebungen der Ulme (Abbildung 4.3) zu erkennen war, zeigt auch die Gebirgskennlinie, dass nach der vollständigen Bildung der Scherbruchkörper durch die Bildung der die trapezförmigen Bereiche begrenzenden Bruchflächen die Verschiebungen bis zur Stabilisierung noch auf das Vierfache ansteigen.

Weiters wird deutlich, dass nach abgeschlossener Bildung der Scherbruchkörper der erforderliche Ausbawiderstand in der Ulme nur mehr 10 % der horizontalen in situ-Spannung, also rund 1,7 MPa beträgt. Mit diesem verhältnismäßig geringen Ausbau lassen sich 80 % der auftretenden Gesamtverschiebung verhindern.

5 Interpretation der Untersuchungsergebnisse

Die von RABCEWICZ (1964) beschriebene Bildung der keilförmigen Bruchkörper und die darauf folgende zunehmende Verschiebung in der Ulme und in der Firste werden mit FLAC sehr gut dargestellt. Ein Ausknicken in der Firste und Sohle, wie von RABCEWICZ (1964) in Phase III beschrieben, kann mittels FLAC nicht modelliert werden. Anstatt der Ausknickungen bilden sich in der Firste und der Sohle trapezförmige Bereiche, die in der Richtung der größeren in situ-Spannung gegeneinander drücken. Es kann nicht beobachtet werden, dass die Verschiebungen in der Ulme zeitlich vor den Verschiebungen der Firste auftreten. Wie Abbildung 5.1 zeigt, treten die Verschiebungen anfänglich gleichzeitig und mit gleicher Intensität auf. Erst nach Ausbildung der Scherbruchkörper wird die Zunahme der Horizontalverschiebungen in der Ulme größer als die Vertikalverschiebungen in der Firste.

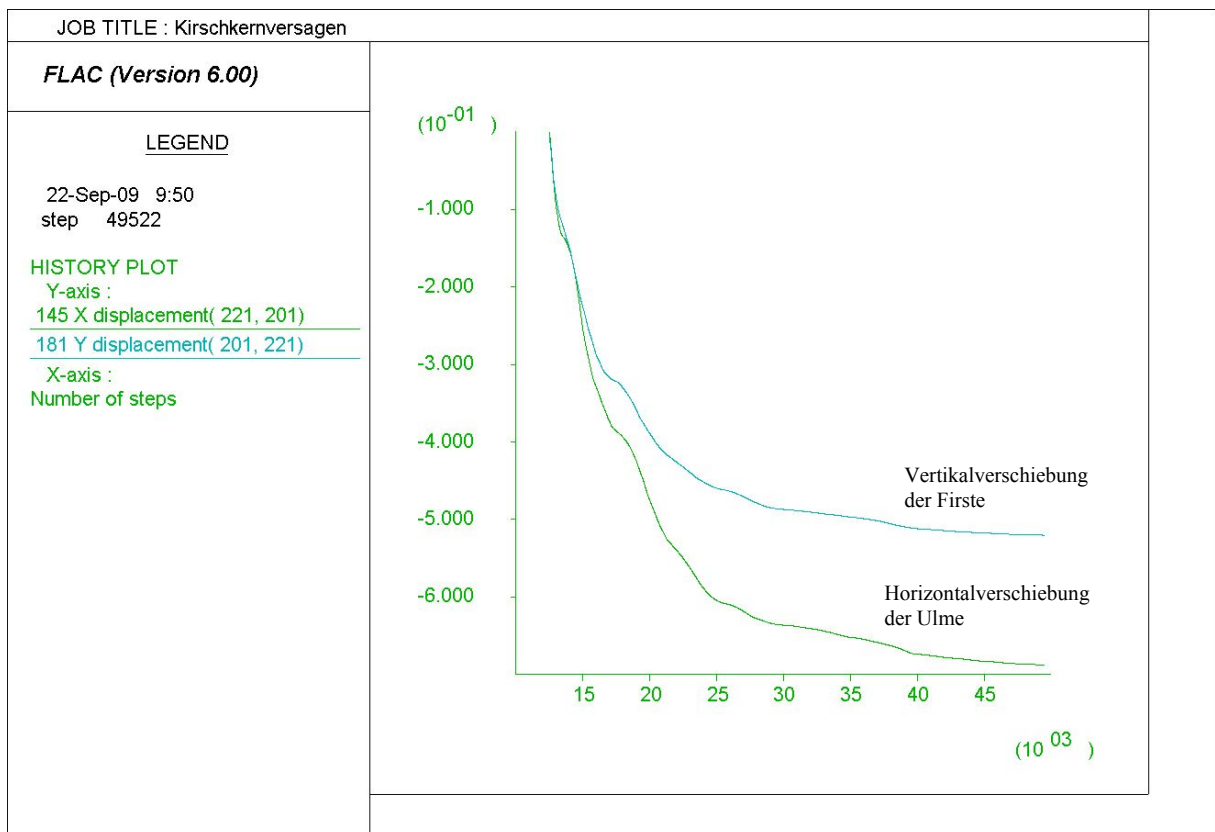


Abbildung 5.1: Vergleich der Horizontalverschiebung der Ulme mit der Vertikalverschiebung der Firste

Die von FEDER (1977) beschriebenen Radialrisse in Firste und Sohle können mit FLAC nicht nachvollzogen werden. Umso deutlicher jedoch zeigen sich die zermalzten Ulmenbereiche in der Darstellung der Schubverzerrungen. Die Scherbrüche in Zustand 3 können nicht in der von FEDER (1977) beschriebenen Weise nachgebildet werden.

Wie in Kapitel 4.4 gezeigt wurde, lässt sich der Versagensablauf in zwei Phasen einteilen. In der ersten Phase bilden sich die keilförmigen Scherbruchkörper im Bereich der Ulme aus. In der zweiten Phase bilden sich Bruchflächen aus, die von den Spitzen der Scherbruchkörper ausgehend bis tief ins umliegende Gebirge reichen. Nach dieser Phase, in der die größten Verschiebungen auftreten, wachsen bei den gewählten Materialparametern und in situ-Spannungen die Bruchflächen nicht weiter an und das Modell stabilisiert sich. Dieser beobachtete Mechanismus unterscheidet sich grundlegend von den von RABCEWICZ (1964) und FEDER (1977) beschriebenen Abläufen.

Die von POISEL, STEGER und ZETTLER (1995) mittels bruchmechanischer Untersuchungen beschriebenen Ansätze, wonach bei Erreichen der Druckfestigkeit am Rand eines Hohlraumes zwar ein Scherbruch gebildet wird, dieser aber arretiert und erst bei einer etwa fünffachen Tangentialspannung fortschreitet kann mit Abbildung 4.11 nachvollzogen werden.

Unter anisotropen in situ-Spannungen konnte in den Berechnungen keine Bildung einer gewölbeartigen Struktur im Gebirge, innerhalb derer es zu einer Entlastung kommt, beobachtet werden.

Die geringer werdenden Verschiebungsgeschwindigkeiten (Abbildung 4.10) nach der Ausbildung der Scherbruchkörper deuten darauf hin, dass sich ein Zustand einstellt, der weniger instabil ist als der Zustand während der Bildung dieser Scherbruchkörper.

PREH und POISEL (2009) schreiben, dass die Vermutung nahe liegt, wonach *„die Akzeptanz großer Verschiebungen und damit eines großen Überprofils die Belastung eines Ausbaus mit hoher Verformbarkeit deutlich reduziert, was zu einer neuen Ausbauphilosophie bei tiefliegenden Tunneln führen könnte. Die Zweckmäßigkeit langer Anker in den Kämpferbereichen zur Verdübelung der schrägen Scherbrüche oder zum „Aufhängen“ der trapezförmigen Bereiche in der Firsche an nicht beeinflusste Bereiche sollte überdacht werden.“*

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, das Versagen von Tunnelleibungen in tiefliegenden Tunneln unter anisotropen in situ-Spannungen in Form des Scherbruchmechanismus („Kirschkerneversagen“) zu untersuchen. Die Modellierung erfolgte mit dem finiten Differenzen Code FLAC^{2D} („Fast Lagrangian Analysis of Continua“) der ITASCA CONSULTING GROUP.

RABCEWICZ (1964) teilt die Spannungsumlagerungen, die sich nach dem Ausbruch eines Hohlraumes aus dem Gebirge einstellen, in drei Phasen. In einer ersten Phase bilden sich auf beiden Seiten des Tunnels keilförmige Bruchkörper, die in Richtung Tunnelmitte drängen. Durch die so vergrößerte Spannweite beginnen sich in der zweiten Phase Firste und Sohle aufeinander zuzuschieben. Diese Bewegung nimmt in der dritten Phase weiter zu und es kommt durch den entstehenden und andauernden Seitendruck zu Ausknickungen an diesen Bereichen.

Auch FEDER (1977) beschreibt für den Versagensablauf drei Zustände. Im ersten kommt es in Firste und Sohle zu Radialrissen, die im Firstbereich bereits einen Verbruch bewirken können. Im zweiten Zustand erfolgt ein Zermalmern der Ulmenbereiche, je nach Gebirgsfestigkeit in Form von Bergschlägen, Spaltbruchserien und Ausquetschungen weicher Komponenten. Für den dritten Zustand sind Scherbrüche charakteristisch, die entstehen, wenn die Tragfähigkeit im Zustand 2 überschritten wird.

SATTLER (1965) beschreibt in seiner Schubbruchhypothese die Spannungsumlagerung nach Ausbruch des Tunnelquerschnittes unter Berücksichtigung einer bewehrten Spritzbetonschale. Dabei bildet sich im Bereich der Ulmen ein als Kern bezeichneter Bereich, der nach vollständiger Plastifizierung ins Tunnelinnere gedrückt wird. Des Weiteren gibt er Formeln zur Dimensionierung der bewehrten Spritzbetonschale an.

Zu Beginn dieser Arbeit wurde untersucht, welche Größe und Feinheit des Netzes notwendig beziehungsweise ausreichend ist, um den Scherbruchmechanismus möglichst detailgenau darzustellen. Dabei wurden unter Anwendung des Materialmodells nach Mohr-Coulomb, Netze mit einem Raster von 1x1 Meter, 0,5x0,5 Meter und 0,25x0,25 Meter verglichen. Es konnte festgestellt werden, dass der Raster nicht nur einen Einfluss auf die Feinheit der Kontur-Plots hat, sondern auch für die erreichten Verschiebungen wesentlich ist. Je feiner das Netz skaliert wird, desto größere Verschiebungen werden berechnet.

Wie zuvor beschrieben, entstehen nach RABCEWICZ (1964) bei der Spannungsumlagerung in einer ersten Phase keilförmige Bruchkörper im Ulmenbereich, deren Spitzen einen Abstand vom 1,5 bis 1,8-fachen Tunneldurchmesser aufweisen. Diese Bruchkörper wurden in den Ausbruchquerschnitt eingebunden und das System Tunnel-Scherbruchkörper mit einer Ellipse beziehungsweise einem

Polygonzug umschrieben. Entgegen der Annahme, dass damit die Phase der Bildung der keilförmigen Bruchkörper übersprungen wird, bilden sich in den Ulmen erneut Scherbruchkörper aus. Hinsichtlich der Standsicherheit konnte keine Verbesserung festgestellt werden. Die berechnete Horizontalverschiebung in der Ulme ist beim Ellipsenprofil um circa 30 % größer als beim Kreisprofil, die Vertikalverschiebung in der Firste sogar um circa 60 %.

Es wurde versucht, den Ablauf des Scherbruchmechanismus anhand eines simulierten Druckversuches einer „Scheibe mit Loch“ zu analysieren. Dafür wurde ein quadratisches Modell mit einer Seitenlänge von 100 Meter, einem Tunneldurchmesser von 10 Meter und einer Rasterfeinheit von 0,25x0,25 Meter gewählt. Das Modell wurde bei nicht aktivierter Gravitation von oben und unten belastet und an den seitlichen Rändern in X-Richtung fixiert. Es kann beobachtet werden, dass sich die Bruchkörper im Ulmenbereich und die Brüche, die zufolge des Versagens des gesamten Modells auftreten, nicht nacheinander, sondern zeitgleich ausbilden. Da bei diesem Belastungsablauf der Prüfkörper (das Modell) bereits gelocht ist, erfassen die Brucherscheinungen den ganzen Prüfkörper und nicht nur die Hohlraumumgebung und es erfolgen andere Spannungsumlagerungen als in einem bereits belasteten Körper, aus dem ein Hohlraum ausgebrochen wird.

Um realitätsnähere Ergebnisse zu erzielen, wurde im Modell zuerst der in situ-Spannungszustand erzeugt und danach der volle Tunnelquerschnitt ausgebrochen. Die Belastung durch die Überlagerung wurde mit einer am oberen Modellrand aufgetragenen Gleichlast nachgebildet. Das Modell ist am unteren Rand (in X- und Y-Richtung) sowie an den Seiten (in X-Richtung) fixiert. Die Berechnung erfolgte mit aktivierter Gravitation. Es wurde das „Strain Softening“ Modell angewendet, welches auf dem Mohr-Coulomb Materialmodell basiert, es aber ermöglicht, nach dem Bruch eine Reduktion der Parameter Reibungswinkel und Kohäsion zu berücksichtigen.

Es wurde eine Parameterkalibrierung mit dem Ziel durchgeführt, geeignete und aufeinander abgestimmte Materialkennwerte für das FLAC-Modell zu finden. Dabei wurde bei einer fixen Belastung von $\sigma_v = 50$ MPa und einem Reibungswinkel von 35° untersucht, in welchem Ausmaß eine Anwendung des „Strain Softening“ relevant beziehungsweise zielführend ist. Die Untersuchung zeigte, dass das „Strain Softening“ nicht zu abrupt erfolgen darf, da das Modell sehr empfindlich reagiert. Minimale Unterschiede in der Größe der Festigkeitsreduktion können enorme Auswirkungen auf die Verschiebungen in der Ulme verursachen und somit entweder ein stabiles oder instabiles System bewirken.

Dies lässt jede Art der Vordimensionierung beziehungsweise Festlegung von Gebirgsverhaltenstypen (nach ÖGG-Richtlinie) problematisch erscheinen, da bei tiefliegenden Tunneln die Ermittlung dieser Parameter mit einer derartigen Genauigkeit in der Planungsphase nicht möglich ist.

Wie der Verlauf der Horizontalverschiebungen in der Ulme zeigt, lässt sich der Ablauf des Versagens in zwei Phasen unterteilen. In der ersten Phase bilden sich rasch die Scherbruchkörper in der Ulme aus. Dies bewirkt eine Horizontalverschiebung im Ulmenpunkt von 13 cm.

In weiterer Folge bilden sich Scherbruchflächen aus, die - ausgehend von den Spitzen der Scherbruchkörper - bis tief in das Gebirge reichen. Dabei entstehen in der Firste und der Sohle trapezförmige Bereiche, die in der Richtung der größeren in situ-Spannung gegeneinander drücken. Mit den wachsenden Scherbruchflächen vergrößert sich die Verschiebung auf rund 60 cm. Ab diesem Zeitpunkt nehmen die Verschiebungen weniger zu und das System beginnt sich zu stabilisieren. Die Horizontalverschiebung bis zur Stabilisierung beträgt etwa 68 cm. Die Verschiebungsgeschwindigkeit der Ulmen nimmt während dem Versagensablauf von 10^{-4} auf 10^{-5} m/Berechnungsschritt ab.

Die für dieses Modell berechnete Gebirgskennlinie zeigt, dass nach der vollständigen Bildung der Scherbruchkörper durch die Bildung der die trapezförmigen Bereiche begrenzenden Bruchflächen die Verschiebungen bis zur Stabilisierung noch auf das Vierfache ansteigen. Weiters wird deutlich, dass nach abgeschlossener Bildung der Scherbruchkörper der erforderliche Ausbauwiderstand in der Ulme nur mehr 10 % der horizontalen in situ-Spannung, also rund 1,7 MPa beträgt. Mit diesem verhältnismäßig geringen Ausbau lassen sich 80 % der auftretenden Gesamtverschiebung verhindern.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Prinzipdarstellung Kirschkernversagen ($P_{0,1} > P_{0,3}$).....	1
Abbildung 1.2: Spaltbruch und Scherbruch (POISEL, STEGER, TETTLER, 1995).....	2
Abbildung 1.3: Aufreißen und Scherung (POISEL, STEGER, TETTLER, 1995).....	2
Abbildung 1.4: Versagensablauf nach RABCEWICZ (1964) in 3 Phasen.....	3
Abbildung 1.5: Zustände des Bruchversagens nach FEDER (1977, modifiziert).....	4
Abbildung 1.6: Schubbruchhypothese nach SATTLER (1965).....	6
Abbildung 1.7: Scherbruchtheorie, RABCEWICZ (1973).....	7
Abbildung 2.1: Berechnungsablauf in FLAC ^{2D} , (nach ITASCA, 2008).....	8
Abbildung 2.2: Beispiel einer asymmetrischen Darstellung der Schubverzerrungen.....	9
Abbildung 2.3: Teil eines geklüfteten Gesteinskörpers (ITASCA, 2006).....	10
Abbildung 3.1: Lösungsverfahren von FLAC ^{2D} (nach ITASCA, 2008).....	11
Abbildung 3.3: Mohr-Coulomb'sches Bruchkriterium (Felsmechanik VO, 2006).....	12
Abbildung 3.2: Materialmodell nach Mohr-Coulomb (f_y ...Streckgrenze/Bruchspannung).....	12
Abbildung 3.4: Skizze des Modells.....	14
Abbildung 3.5: Abgestuftes Netz.....	14
Abbildung 3.6: Netz 100, Schubverzerrungen bei 0,5 m Verschiebung in der Ulme.....	15
Abbildung 3.7: Netz 200, Schubverzerrungen bei 0,5 m Verschiebung in der Ulme.....	16
Abbildung 3.8: Netz 400, Schubverzerrungen bei 0,5 m Verschiebung in der Ulme.....	17
Abbildung 3.9: Vergleich der Berechnungsschritte.....	18
Abbildung 3.10: Schubverzerrungen unverformtes Netz, 0,5m Verschiebung in der Ulme.....	20
Abbildung 3.11: Schubverzerrungen verformtes Netz, 0,5m Verschiebung in der Ulme.....	20
Abbildung 3.12: Schubverzerrungen unverformtes Netz, Gleichgewichtszustand.....	21
Abbildung 3.13: Schubverzerrungen verformtes Netz, Gleichgewichtszustand.....	21
Abbildung 3.14: Bereiche gleicher Horizontalverschiebungen, unverformtes Netz.....	22
Abbildung 3.15: Bereiche gleicher Horizontalverschiebungen, verformtes Netz.....	22
Abbildung 3.16: Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen, unverformtes Netz, Gleichgewichtszustand.....	23
Abbildung 3.17: Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen, verformtes Netz, Gleichgewichtszustand	23
Abbildung 3.18: Schubverzerrungen bei 0,5 m Verschiebung in der Ulme (mit Rezoning).....	25
Abbildung 3.19: Verzerrung des Netzes unter Anwendung der „Rezone-Funktion“.....	25
Abbildung 3.20: Scherbruchkörper.....	26
Abbildung 3.21: Elliptischer Ausbruch.....	27
Abbildung 3.22: Ausbruch mit Polygonzug.....	27

Abbildung 3.23: Elliptischer Ausbruch, Schubverzerrungen 300 Berechnungsschritte nach in situ.....	28
Abbildung 3.24: Elliptischer Ausbruch, Schubverzerrungen 4000 Berechnungsschritte nach in situ...	28
Abbildung 3.25: Verlauf der Verschiebungen, kreisförmiger Hohlraum.....	29
Abbildung 3.26: Verlauf der Verschiebungen, ellipsenförmiger Querschnitt	29
Abbildung 3.27: Ausbruch mit Polygonzug, Schubverzerrungen 300 Berechnungsschritte nach in situ	30
Abbildung 3.28: Ausbruch mit Polygonzug, Schubverzerrungen 4000 Berechnungsschritte nach in situ	30
Abbildung 3.29: Verlauf der Verschiebungen, Ausbruch mit Polygonzug.....	31
Abbildung 3.30: Schubverzerrungen bei $\sigma_V = 8$ MPa	33
Abbildung 3.31: Schubverzerrungen bei $\sigma_V = 16$ MPa	33
Abbildung 3.32: Schubverzerrungen bei $\sigma_V = 25$ MPa	34
Abbildung 3.33: Verlauf der Horizontalverschiebungen in der Ulme	34
Abbildung 3.35: Abminderung Kohäsion/Reibungswinkel (e^p ...plastische Schubverzerrungen).....	35
Abbildung 3.34: Skizze des Modells.....	35
Abbildung 3.36: Verhältnis E-Modul zu Druckfestigkeit (aus DEERE/MILLER, 1966)	37
Abbildung 3.37: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 1	38
Abbildung 3.38: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 1.....	39
Abbildung 3.39: Schubverzerrungen bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes, Parametergruppe 139	
Abbildung 3.40: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 2a	40
Abbildung 3.41: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 2a.....	41
Abbildung 3.42: Schubverzerrungen bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes, Parametergruppe 2a	41
Abbildung 3.43: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 2b	42
Abbildung 3.44: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 2b.....	43
Abbildung 3.45: Schubverzerrungen zum Zeitpunkt des Abbruchs, Parametergruppe 2b	43
Abbildung 3.46: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 3a	44
Abbildung 3.47: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 3a.....	45
Abbildung 3.48: Schubverzerrungen bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes, Parametergruppe 3a	45
Abbildung 3.49: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 3b, Bezugswert 0,33 (stabil)	47
Abbildung 3.50: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 3b, Bezugswert 0,30 (instabil)	47
Abbildung 3.51: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 3b, instabil	48
Abbildung 3.52: Schubverzerrungen nach 19541 Berechnungsschritten, instabil.....	48
Abbildung 3.53: Schubverzerrungen nach 30541 Berechnungsschritten, instabil.....	49
Abbildung 3.54: Schubverzerrungen zum Zeitpunkt des Abbruchs, Parametergruppe 3b, instabil.....	49

Abbildung 3.55: Verlauf der Verschiebungen, Parametergruppe 4a, stabil.....	50
Abbildung 3.56: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 4a.....	51
Abbildung 3.57: Schubverzerrungen bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes, Parametergruppe 4a	51
Abbildung 3.58: Verlauf der Verschiebungen Parametergruppe 4b, stabil.....	53
Abbildung 3.59: Verlauf der Verschiebungen Parametergruppe 4b, instabil	53
Abbildung 3.60: Schubverzerrungen 1000 Berechnungsschritte nach in situ, Parametergruppe 4b, instabil	54
Abbildung 3.61: Schubverzerrungen nach 19383 Berechnungsschritten, Parametergruppe 4b, instabil	54
Abbildung 3.62: Schubverzerrungen nach 40383 Berechnungsschritten, Parametergruppe 4b, instabil	55
Abbildung 3.63: Schubverzerrungen zum Zeitpunkt des Abbruchs, Parametergruppe 4b, instabil.....	55
Abbildung 4.1: Anordnung von „History Points“	59
Abbildung 4.2: Beispiel für eine stabile und instabile Gebirgskennlinie	60
Abbildung 4.3: Verlauf der Horizontalverschiebungen der Ulme	61
Abbildung 4.4: Schubverzerrungen nach 13522 Berechnungsschritten.....	62
Abbildung 4.5: Bereiche gleicher Horizontalverschiebungen [m] nach 13522 Berechnungsschritten..	62
Abbildung 4.6: Schubverzerrungen nach 26522 Berechnungsschritten.....	63
Abbildung 4.7: Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen [m] nach 26522 Berechnungsschritten.....	63
Abbildung 4.8: Schubverzerrungen nach 49522 Berechnungsschritten (stabil)	64
Abbildung 4.9: Bereiche gleicher Vertikalverschiebungen [m] nach 49522 Berechnungsschritten (stabil).....	64
Abbildung 4.10: Verlauf der horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten	65
Abbildung 4.11: Verlauf der maximalen Hauptspannung (Tangentialspannung).....	66
Abbildung 4.12: Gebirgskennlinie für die Ulme (erstellt mit FLAC).....	67
Abbildung 4.13: Gebirgskennlinie für die Ulme (angepasst mit Excel)	68
Abbildung 5.1: Vergleich der Horizontalverschiebung der Ulme mit der Vertikalverschiebung der Firste.....	69

8 Literaturverzeichnis

CUNDALL, P.A.: Numerical modelling of jointed and faulted rock. Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Rossmanith (ed.). Balkema, Rotterdam. 11-18 (1990).

DEERE, D.U., MILLER, R.P.: Engineering Classification and Index Properties for intact Rock. University of Illinois (1966).

EWY, R.T., COOK, N.G.W.: Deformation and Fracture Around Cylindrical Openings in Rock – I. Observations and Analysis of Deformations. Int. J. Rock Mech. & Min.Sci. 27. S. 387-407 (1990a).

EWY, R.T., COOK, N.G.W.: Deformation and Fracture Around Cylindrical Openings in Rock – II. Initiation Growth and Interaction of Fractures. Int. J. Rock Mech. & Min.Sci. 27. S. 409-427 (1990b).

FEDER, G.: Zum Stabilitätsnachweis für Hohlräume in festem Gebirge bei richtungsbetontem Primärdruck, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte Jahrgang 122, Heft 4, 131-140 (1977).

GLEICK, J.: Chaos: Making a new science. Penguin books. ISBN 0-14-00.9250-1 (1987).

GUENOT, A.: Spannungs- und Bruchbedingungen um Erdölbohrungen (in Französisch). Ber. 6. Int. Kongr. Felsmechanik, Montreal 1987, Band 1, S. 109-118. Rotterdam: Balkema (1987.)

ITASCA: FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) User's Guide, Version 6.0. Itasca Consulting Group (2008).

ITASCA: UDEC (Universal Distinct Element Code) User's Guide, Version 4.0. Itasca Consulting Group (kein Datum).

PANHOLZER, R.: Numerische Modellierung des Verhaltens von Tunnelbauwerken in quellenden Gebirge mittels FALC 2D. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien (2006).

POISEL, R.: Studienblätter VO Felsmechanik, Technische Universität Wien (2007).

POISEL, R., STEGER, W., ZETTLER, A.H.: Neue Standsicherheitsuntersuchungen von Tunneln. Felsbau 13, 146-152 (1995).

PREH, A., POISEL, R.: Scherbruchkörper in der Leibung von Tunneln (Kirschkerneversagen) – neue Erkenntnisse zum Versagensablauf. *Geomechanics and Tunneling* 2 (2009) No.4.

PREH, A., POISEL, R., STEINER, M.: Scherbruchkörper in der Leibung von Tunneln (Kirschkerneversagen) – von analytischen zu den diskontinuumsmechanischen Modellen. „Proceedings 7. Österreichische Geotechniktagung“, ÖIAV Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein, Wien, 2009, ISBN 978-3-902450-00, S. 295-307.

RABCEWICZ, L.: The New Austrian Tunnelling Method. Part one. *Water Power* November 1964, 453-457 (1964).

RABCEWICZ, L.: Theorie und Praxis bei den Untertagearbeiten eines großen Dammbauvorhabens. *Rock Mechanics*, Suppl. 2, S. 193-224 (1973).

ROTH, W.: Ermittlung von Sicherheitsfaktoren mittels des kontinuumsmechanischen Finiten Differenzen-Codes FLAC. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien (1999).

SATTLER, K.: Die neue Österreichische Tunnelbauweise, II. Statische Wirkungsweise und Bemessung. *Der Bauingenieur* Heft 8 (1965).

SCHUBERT, W.: Skriptum Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz (2007).

STEINER, M.: Untersuchung des Versagens von Tunnelleibungen unter richtungsbetontem Primärdruck (Kirschkerneversagen) mit Hilfe des Particle Flow Codes PFC2D. Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien (2008).

THOMPSON, J.M.T., STEWART, H.B.: *Nonlinear dynamics and chaos*. John Wiley & Sons. ISBN 0-471-90960-2 (1986).

ZETTLER, A.H.: Studienblätter VO Underground Excavation Design, Technische Universität Wien (2007).