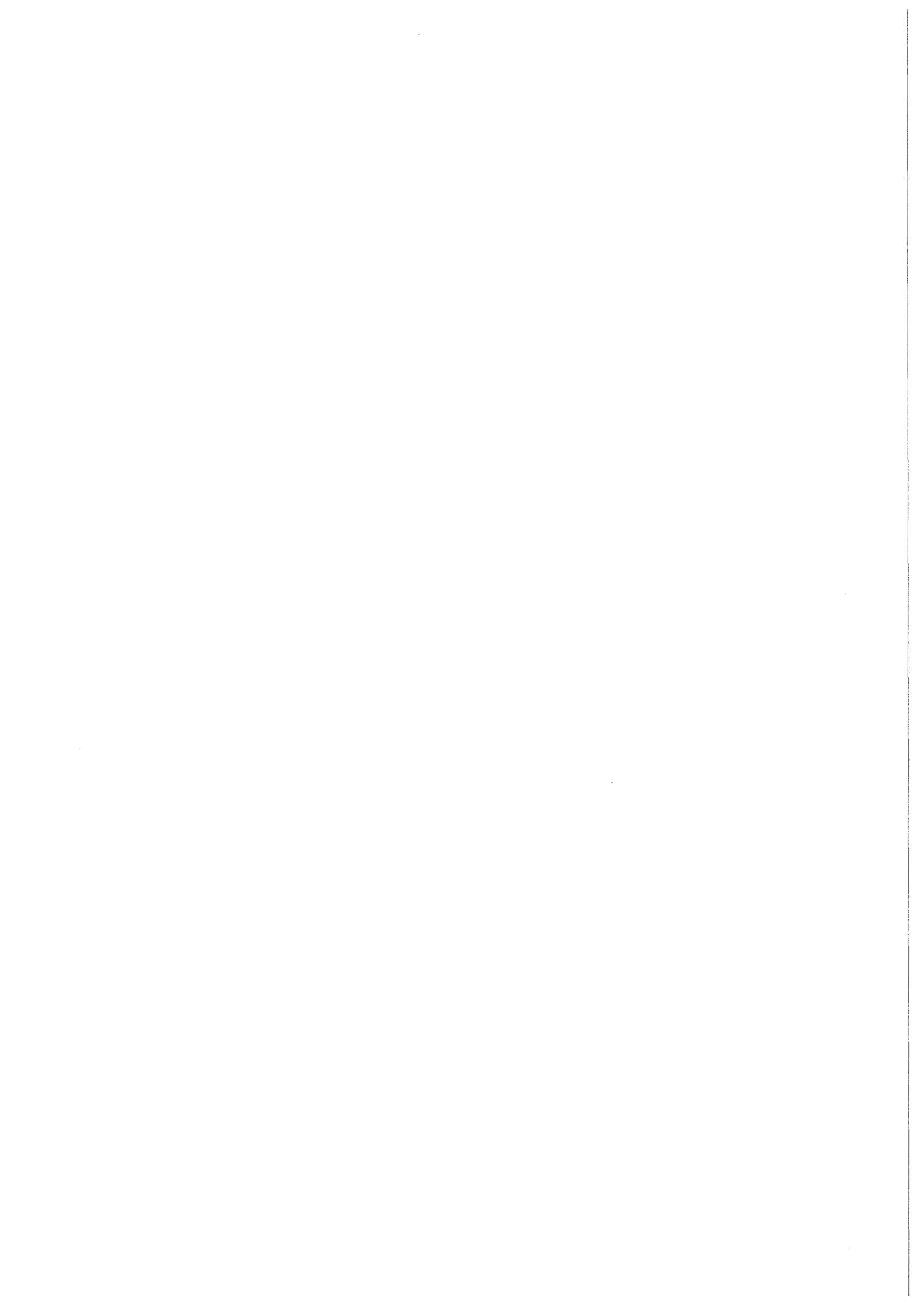


**KfK 4526**  
**Februar 1989**

# **Die Anpassung eines Baumes an die Kontaktbelastung durch einen Stein**

**C. Mattheck, H. Huber-Betzer, K. Keilen**  
**Institut für Material- und Festkörperforschung**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



**KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**  
**Institut für Material- und Festkörperforschung**

**KfK 4526**

**DIE ANPASSUNG EINES BAUMES  
AN DIE KONTAKTBELASTUNG DURCH EINEN STEIN**

**C. Mattheck, H. Huber-Betzer, K. Keilen**

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH,  
KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## DIE ANPASSUNG EINES BAUMES AN DIE KONTAKTBELASTUNG

### DURCH EINEN STEIN

#### Zusammenfassung

Ein schwerer Stein, der beim Wegebau gegen einen Baum gerollt war, drückt mit einer Kante gegen einen Baum. Dieser reagiert auf die Kontaktbelastung mit Vergrößerung der Berührfläche durch Überwallungswachstum. Vergleiche von Sägeschnitten durch den Baum mit FEM-Ergebnissen zeigen eine gute Übereinstimmung der Jahrringlängsschnitte mit den Hauptspannungstrajektorien. Der Baum wächst so, daß der Schub zwischen den Jahrringen minimiert wird.

## ADAPTATION OF A TREE DUE TO CONTACT LOAD WITH A STONE

#### Summary

A heavy stone which rolled downward a hill has come into contact with a tree. The very localized contact stress peak caused locally increased growth to distribute the stress peak. It is shown that the axial tangent vector of the growth rings is parallel to the direction of the axial main stress trajectories, calculated with the Finite Element Method.

This gives rise to the assumption that the rings try to adapt a shape avoiding shear of the ring plane especially in the area of high contact stresses. Just as the trabecular system in bones, the growth rings form structures loaded by tension-compression mainly.



## DIE ANPASSUNG EINES BAUMES AN DIE KONTAKTBELASTUNG DURCH EINEN STEIN

### Einleitung:

Wie in /1/ bereits erläutert wurde, besteht der wesentliche Unterschied im Modellierungswuchs von Holz- und Knochenstrukturen darin, daß beim Holz wesentlich nur der neu hinzuwachsende Jahresring sich optimal an die gegebenenfalls geänderte Lastsituation anpaßt, während der Knochen auch in seinem Innern umbildungsfähig ist. Es macht daher Sinn beim Knochen von **Remodellierung** (remodeling), beim **Holz jedoch** lediglich von weniger flexibler, weil oberflächlich vorhandener, **Modellierung** (modeling) zu sprechen. Der Knochen ist in der Lage frühere Strukturen, die plötzlich anderen Lastbedingungen (z.B. infolge eines in Fehlstellung verheilten Knochenbruches) ausgesetzt sind, gänzlich umzubauen. Er verwischt alle Spuren seiner Lastgeschichte. Holz dagegen offenbart sie, indem der jeweils neue Jahresring von der allein für ihn aktuellen Belastung berichtet.

Vor der eigentlichen Analyse sollen einige Beispiele von kontaktbedingtem Modellierungswuchs ohne quantitative Analyse betrachtet und nach deren Gemeinsamkeiten gesucht werden (Abb1a-h).

Um lästiges Blättern zu vermeiden wird die Beschreibung des Einzelbildes in einer ausführlichen Bildunterschrift gegeben.

Es ist leicht folgende Gemeinsamkeit zu erkennen:

Stets ruft eine lokale durch Kontakt hervorgerufene Spannungsspitze eine heftige Wachstumsreaktion hervor, die eindeutig das Ziel hat, die Berührfläche zu vergrößern und damit die Spannungsspitze abzubauen. Dies kann zu außerordentlich **knorrigen Auswüchsen** führen, so daß sich bei der bekanntlich uniaxialen Orientierung der Holzfasern und der in guter Näherung konzentrischen Anordnung der Jahresringe sofort die Frage stellt, wie denn die **interne Holzstruktur** das wohl meistert.

In Abb.2a-d sind einige Sägeschnitte von umwachsenen Einschlüssen gezeigt. Der Ast soll hier als eine Art 'natürlicher Einschluß' mit aufgeführt werden. Auch ohne jede rechnerische Analyse fällt folgende quantitative Gemeinsamkeit sofort auf:

Es gibt sowohl hinsichtlich der axialen Ausdehnung der Jahresringe als auch ihrer Gestaltung in Umfangsrichtung eine eindeutige Neigung neu hinzuwachsender Jahresringe, senkrecht auf Kontaktflächen zu stoßen. Bedenkt man, daß allein dies den Schub zwischen benachbarten Jahresringen und die Biegebela-

stung des einzelnen Jahresringes zu minimieren vermag, so kann man auch hier auf die Realisierung des 'Leichtbauprinzips' nämlich **angestrebte Zug-Druck Belastung** der mechanischen Substrukturen schließen. Diese rein qualitativen Betrachtungen regten die nachfolgende umfangreiche FE-Analyse an.

### Finite-Element-Analyse eines Baum-Stein-Kontaktes mit Modellierwuchs

Abb.3a-c zeigen einige Photographien des untersuchten und zu diesem Zwecke gefällten und zersägten Baumstammes, der unterhalb eines Waldweges leicht hangaufwärts geneigt stand und auf dessen hangnahe Seite, wohl beim Wegebau ein ca. 1.30 m hoher Felsbrocken rollte, dessen Kontaktbereich durch Modellierwuchs überwallt wurde. Durch den kontaktierenden Stammbereich wurden nunmehr zwei Sägeschnitte gelegt, einer im Bereich besonderes hoher Kontaktspannungen (A), die sogar die Rinde schwinden ließen und einen zweiten Axialschnitt (B) im eher entlasteten Kontaktbereich, wo die Rinde zumindest teilweise erhalten blieb. Vor der FE-Simulation soll noch ein Blick auf die Schnittflächen (Abb.4) geworfen werden. Die axiale Orientierung der Jahresringmantelflächen steht bei Schnitt A hervorragend senkrecht auf der oberen eigentlichen lasttragenden Steinkante, was durch die dort offensichtlich hohe Flächenpressung bewirkt worden sein dürfte (Abb.3), die dort auch teilweise zu Rindenschwund oder Rindenverdichtung führte. Die eher krumig und locker anmutende Borke im Kontaktbereich des Schnittes B deutet auf einen nur mäßig belasteten Bereich hin. Lediglich peripher scheint eine Abstützung auf dem Stein zu erfolgen. Der Baum reagiert daher ähnlich wie bei einer normalen Wundfläche mit seitlicher Überwallung und Senkrechtstellung der Jahresringenden (Einrollen) auf die zu überwallende Wundfläche wie in Abb.5 circumferentiell und bereits in Abb.2d axial gezeigt.

Die nachfolgende Finite-Elemente-Analyse soll einen Zusammenhang zwischen dem Spannungszustand und der Jahresringorientierung herstellen.

Abb.6 zeigt den zu beschreibenden Sägeschnitt (A aus Abb.3c und Abb.4) noch einmal vergrößert. Es soll nun in freilich grober Näherung das Anlagern der Jahresringe durch Vergrößern der Struktur simuliert und dabei der Abbau der Kontaktspannungen quantifiziert werden.

Die Eingabedaten für die Struktur in Abb.7 waren für zunächst isotrope Rechnung (richtungsunabhängige Materialkonstanten):

E-Modul:  $E = 11241 \cdot \text{Nmm}^{-2}$

Querkontraktion:  $\nu = 0.3$

Eine spätere orthotrope Rechnung erfolgte mit den richtungsabhängigen Kennwerten:

$$E_R = 1338. \text{ Nmm}^{-2} \quad (\text{radial})$$

$$E_L = 12044. \text{ Nmm}^{-2} \quad (\text{axial})$$

$$E_T = 697. \text{ Nmm}^{-2} \quad (\text{circumferentiell})$$

Mit den Querkontraktionszahlen:

$$\nu_{LR} = 0.37$$

$$\nu_{TR} = 0.33$$

$$\nu_{TL} = 0.027$$

und den Schubmoduli:

$$G_{LR} = 1033. \text{ Nmm}^{-2}$$

$$G_{RT} = 261. \text{ Nmm}^{-2}$$

$$G_{LT} = 771. \text{ Nmm}^{-2} \quad \text{aus /2/},$$

wobei das Koordinatensystem dem der Literatur /2/ angepaßt und gegenüber den isotropen Modellen um  $90^\circ$  gedreht wurde.

Das den Stamm gegen den Stein drehende Biegemoment ist nicht bekannt. Da es sich nur um eine elastische Analyse handelt, ist es auch gleichgültig. Entscheidend ist allein der Abbau der Kontaktspannungen relativ zum Anfangszustand durch den zu simulierenden Modellierwuchs (Überwallung) sowie der angestrebte Nachweis, daß die Jahresringe sich entlang der Hauptspannungstrajektorien ausrichten.

Bei elastischer Rechnung würden sich bei Vervielfachung der externen Belastung um einen Faktor weder die Relationen der Spannungen, die zu verschiedenen Wachstumsstadien gehören ändern, noch das Trajektorienbild.

Für die Rechnungen mit dem Programm ABAQUS /3/ wurden 4 FE-Strukturen für die betrachteten Wachstumsphasen des Baumes erzeugt. Der Stein selbst ist als 'rigid surface' definiert und wirkt als unnachgiebige starre Kontur auf der sich der Baum bei Belastung abstützt. (Die Kontur der rigid surface ist

in den Strukturplots nicht darzustellen.) Die Kontaktzone der Baumstruktur ist mit Interface-Elementen belegt, die zusammen mit der rigid surface Durchdringung verhindern und für die Kontakt oder Ablösung als Ergebnis zu erhalten ist. Reibung wurde in der Fe-Analyse nicht berücksichtigt. Abb.7a-d zeigen die Axialspannungsverteilung, die Von-Mises Spannungen wie die maximalen Druck-Hauptspannungen für die Struktur des Ausgangszustandes (kurz nach dem Baum-Stein Kontakt). Die maximale Hauptspannung  $\sigma = -139 \text{ Nmm}^{-2}$  tritt in der Kontaktzone Baum-Stein auf. In den nachfolgenden Strukturen mit zugewachsenen Jahresringen (Abb.8 und Abb.9) ist ein Abbau der Spannungen im Kontaktbereich zu beobachten, wie folgende Tabelle zeigt:

---

Modell	Hauptspannungen $\text{Nmm}^{-2}$	Von-Mises-Spannungen $\text{Nmm}^{-2}$	Axialspannungen $\text{Nmm}^{-2}$
Abb.7	-139.	125.	-70.
Abb.8	- 72.	79.	-55.
Abb.9	- 59.	68.	-43.

---

Die Trajektorien der Hauptspannung sind jeweils senkrecht zur Kontaktfläche ausgerichtet, was dem Kraftflußverlauf entspricht und mit der Orientierung der gewachsenen Fasern der Jahresringe gut übereinstimmt. Die Reaktion des Baumes auf die Störung, das verstärkte Anlagern von Material, bewirkt wie die Rechnungen zeigen einen Abbau der hohen Spannungen in der Kontaktzone und das senkrechte Einmünden des Modellierwuchses gewährleistet eine optimale Kraftübertragung und Abstützung. Die wohl stärkste Reduktion durch den Modellierwuchs erfahren die Hauptnormalspannungen. Der Abbau der Spannungen verläuft mit zunehmendem Erfolg langsamer, wohl weil die Stimulanz (Spannung) nachläßt.

In Abb.10 wurde schließlich der Endzustand des gefälltten Stammes erzeugt. Hier zeigt die isotrope Rechnung ein Wandern des Spannungsmaximums in der Kontaktzone in Richtung der zugewachsenen Struktur und keinen weiteren Abbau der maximalen Druck-Hauptspannung. Dies ist auf das in Querrichtung zu steife Verhalten der Struktur bei isotroper Rechnung zurückzuführen. Die Abstützung bringt im Endzustand eine Belastung quer zur Faserrichtung des Baumes, in der er in Realität nachgiebiger ist als in der isotropen Rechnung angenommen

wird. Ein Vergleich mit der orthotropen Rechnung (Abb.11) zeigt ein Verbleiben der maximalen Kontaktspannung mehr im Stammesinnern, etwa wie z.B. in Abb.8. Die orthotrope Rechnung trägt dem kleineren E-Modul in radialer Richtung eher Rechnung. Anschaulich bedeutet dies, daß der schwache periphere Zipfel der Überwallung durch das orthotrope Verhalten des Holzes entlastet wird. Er wird praktisch erst zum Tragen kommen, wenn die konkave Kontur des Stammes oberhalb der Überwallung etwas aufgefüllt sein wird, was gewiß auch die dort vorliegende Spannungsüberhöhung bewirken dürfte.

### Schlußfolgerungen

Die Erkenntnisse dieser Analyse lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen.

- Mit Hilfe des Modellierwuchses bemüht sich der Baum Kontaktspannungen durch Vergrößerung der Berührfläche abzubauen.
- Modellierwuchs bewirkt einen anfangs schnellen und mit zunehmendem Erfolg etwas langsameren Abbau von Störspannungen (Abb.13).
- Die Orthotropieeigenschaft des Holzes braucht nur zu beachtet werden wenn es zu signifikanten Querbelastungen des Holzes (z.B. durch weit seitliche ausholende Überwallung) kommt.
- Die interne Faser- und Jahrringstruktur wird so angelegt, daß sie sich weitgehend mit dem Verlauf der Hauptspannungstrajektorien deckt, was als **inneres Bauprinzip** von Holzstrukturen gelten kann. Das heißt, der Baum wächst so, daß der Schub zwischen den Jahrringen minimiert wird.
- Umgekehrt kann dies auch als **Designvorschrift** für die Erstellung **künstlicher Holzkonstruktionen** angesehen werden, was praktisch erfahrungsbedingt natürlich meist schon geschieht.

## Danksagung

Die Autoren danken Herrn Decker (Forstamtmann) und Herrn Thun für die perfekte Durchführung der Fäll- und Sägearbeiten.

## Literatur

- /1/ Huber H., Mattheck C., Gross U.  
unveröffentlichter Bericht, 1988
  
- /2/ Bodig J., Jayne B.A.  
Mechanics of Wood and Wood Composites  
Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
  
- /3/ Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.  
ABAQUS USER MANUAL, Version 4.6  
35 South Angell Street, Providence, R.I.02906



Abb.1a: Früherer Zustand des Modellierungswuches mit Überwallung eines steinernen Marienbildes (Bullauer Bild).  
(Foto: Reinhard).



Abb. 1b: Überwallender Modellierwuchs am "Balzer Herrgott".  
(Foto: Reinhard).



(Foto: Reinhard).



Abb.1c: Überwallender Modellierwuchs um Drähte.

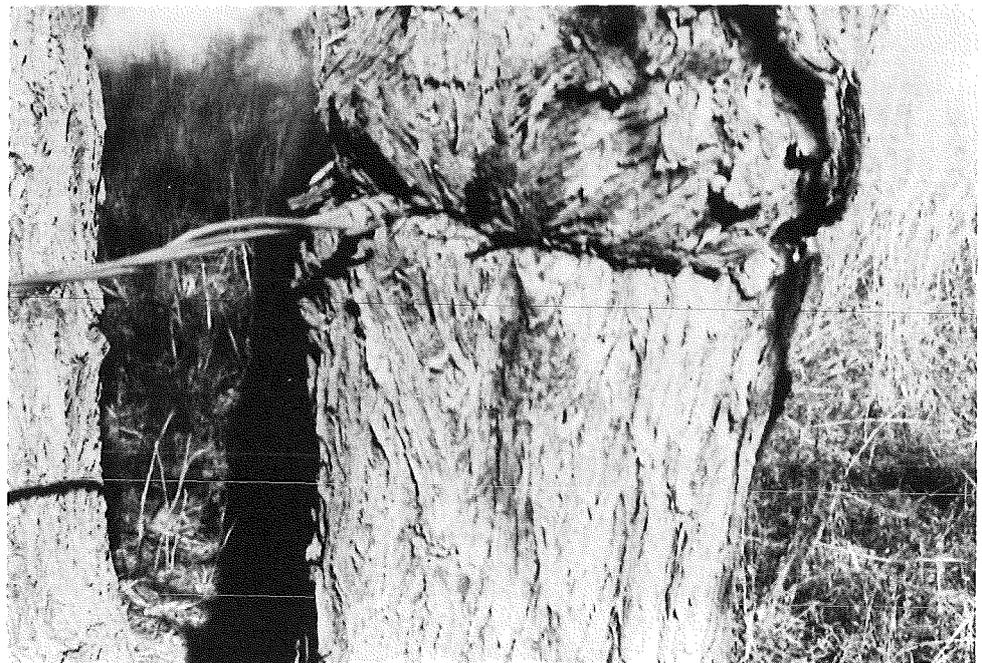


Abb.1d: Überwallender Modellierwuchs an Mehrfachdrahtschlingen.





Abb.1e-h: Überwallender Modellierwuchs bei verschiedenen Baum-Stein Kontaktpressungen.



f)



g)



h)



Abb.2a: Tendenz zur Senkrechtstellung der Jahresringe im Bereich innigen Kontaktes der Teilstämme eines Zwiesels (Stammgabelung).

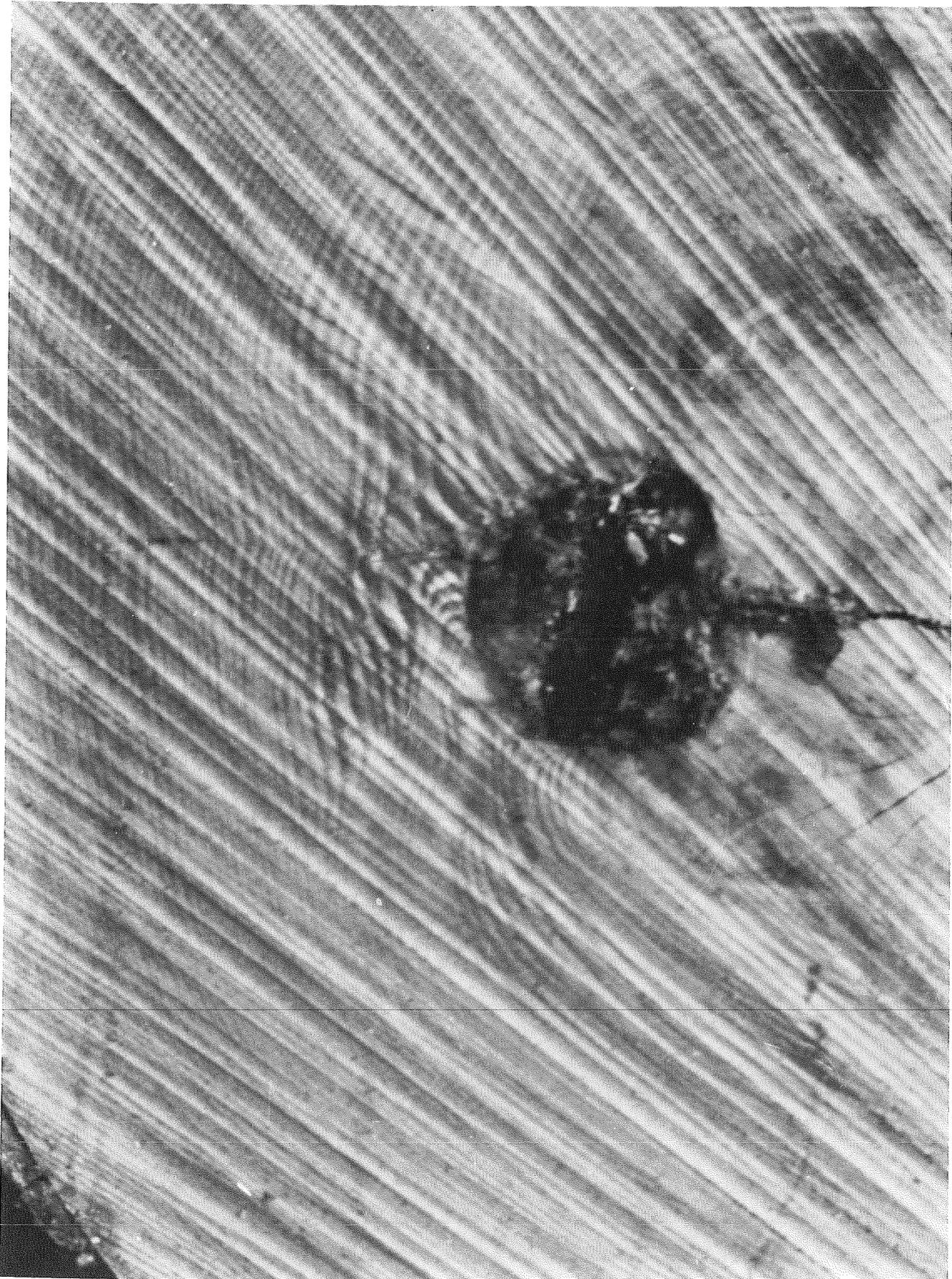


Abb.2b: Senkrechtstellung der Jahresringe auf einem Einschluß  
(Granatsplitter?).

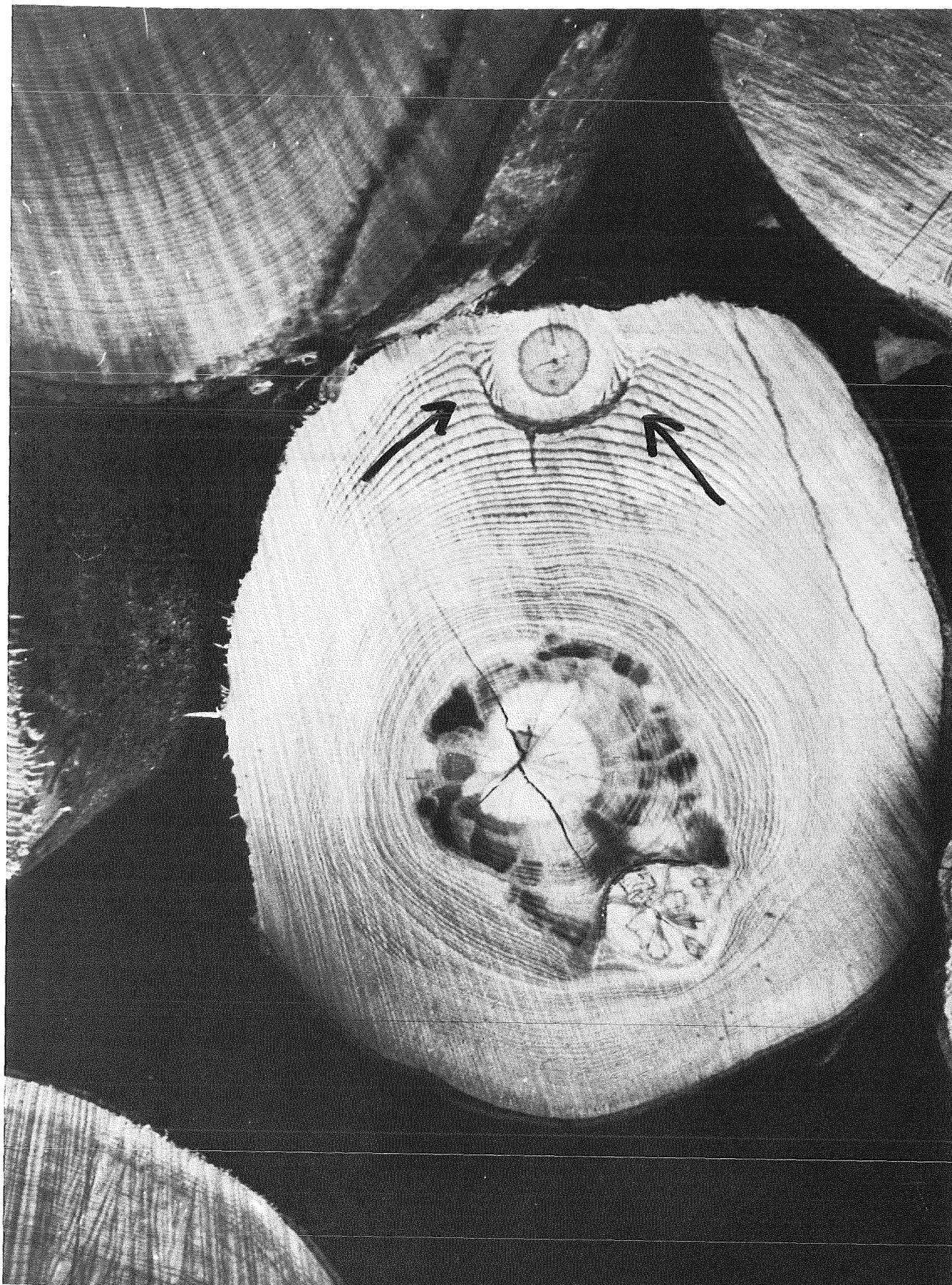


Abb.2c: Tendenz zur Senkrechtstellung der zuwachsenden Jahresringe auf die Peripherie eines Asteinschlusses.

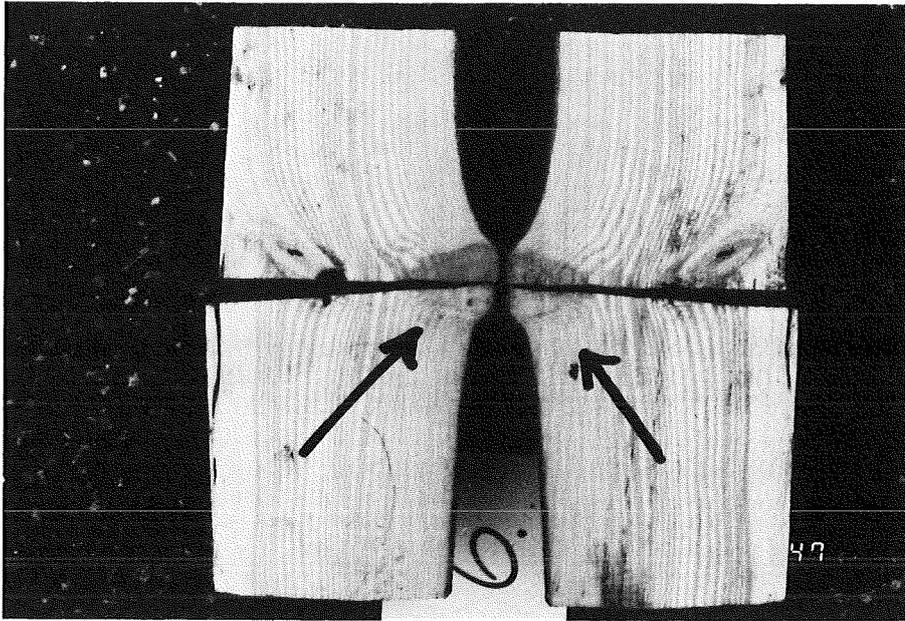


Abb.2d: Axiale Senkrechtstellung der Jahresringe auf einen überwallten Aststumpf.



Abb.3a: Zu beschreibender Baum-Stein Kontakt;  
Globalansicht vor dem Fällen des Baumes.



Abb.3b: Detail aus Abb.3a mit deutlichem Modellierwuchs.

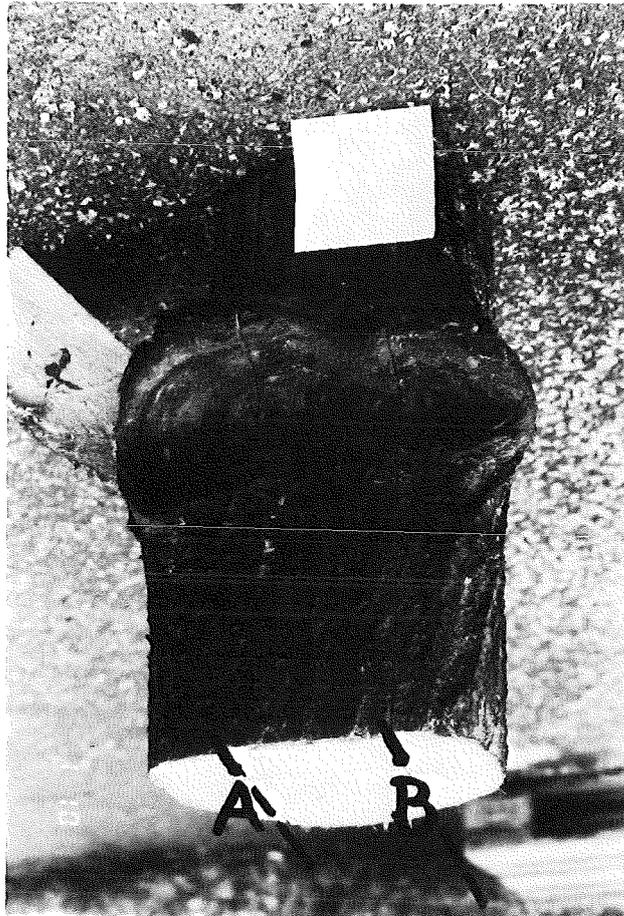
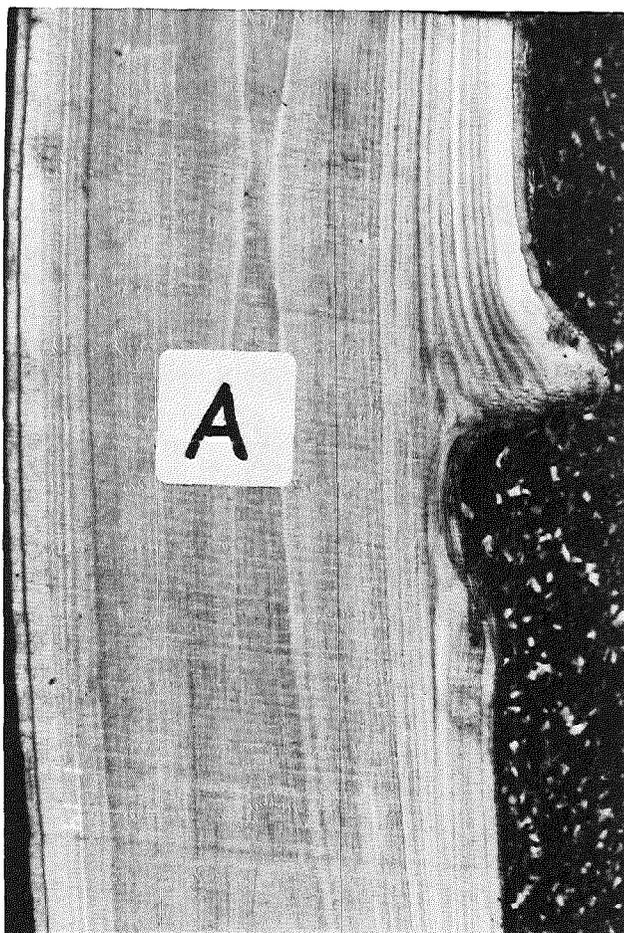
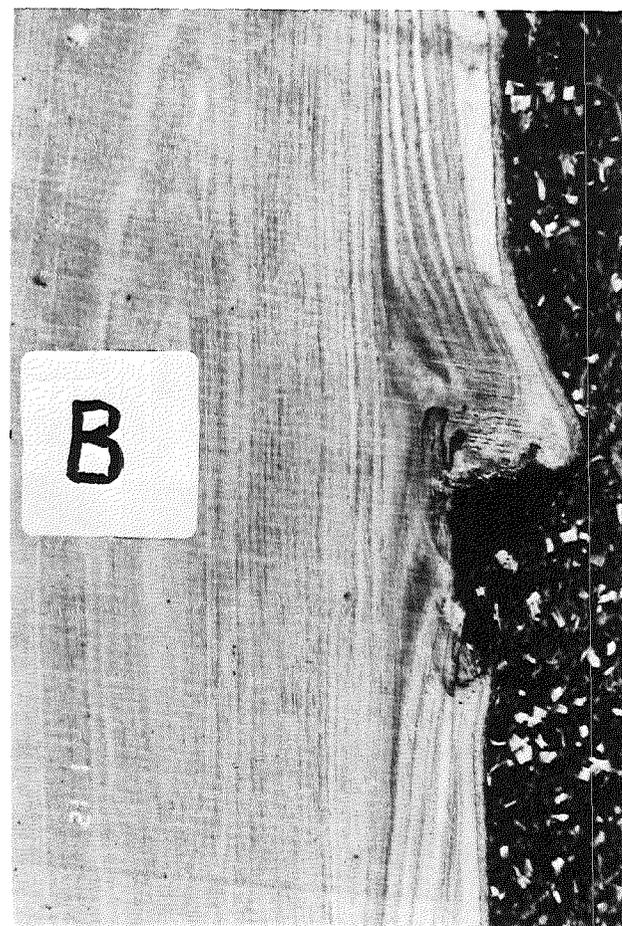


Abb.3c: Zwei Sägeschnitte (A,B) durch den Kontaktbereich.  
Hohe Flächenpressung (A) (Rinde reduziert),  
geringe Flächenpressung (B) (Rinde erhalten).



A: Senkrechte Jahresringausrichtung bezüglich der oberen Steinkontaktfläche infolge hoher Flächenpressung.



B: Peripher senkrechte, weiter innen eher sich einrollende Jahresringausrichtung infolge reduzierter Flächenpressung.

Abb.4: Sägeschnitte in axialer Richtung durch den Kontaktbereich:



Abb.5: Sich einrollender Überwallungswuchs mündet senkrecht auf eine Wund-oder Einschlußoberfläche.

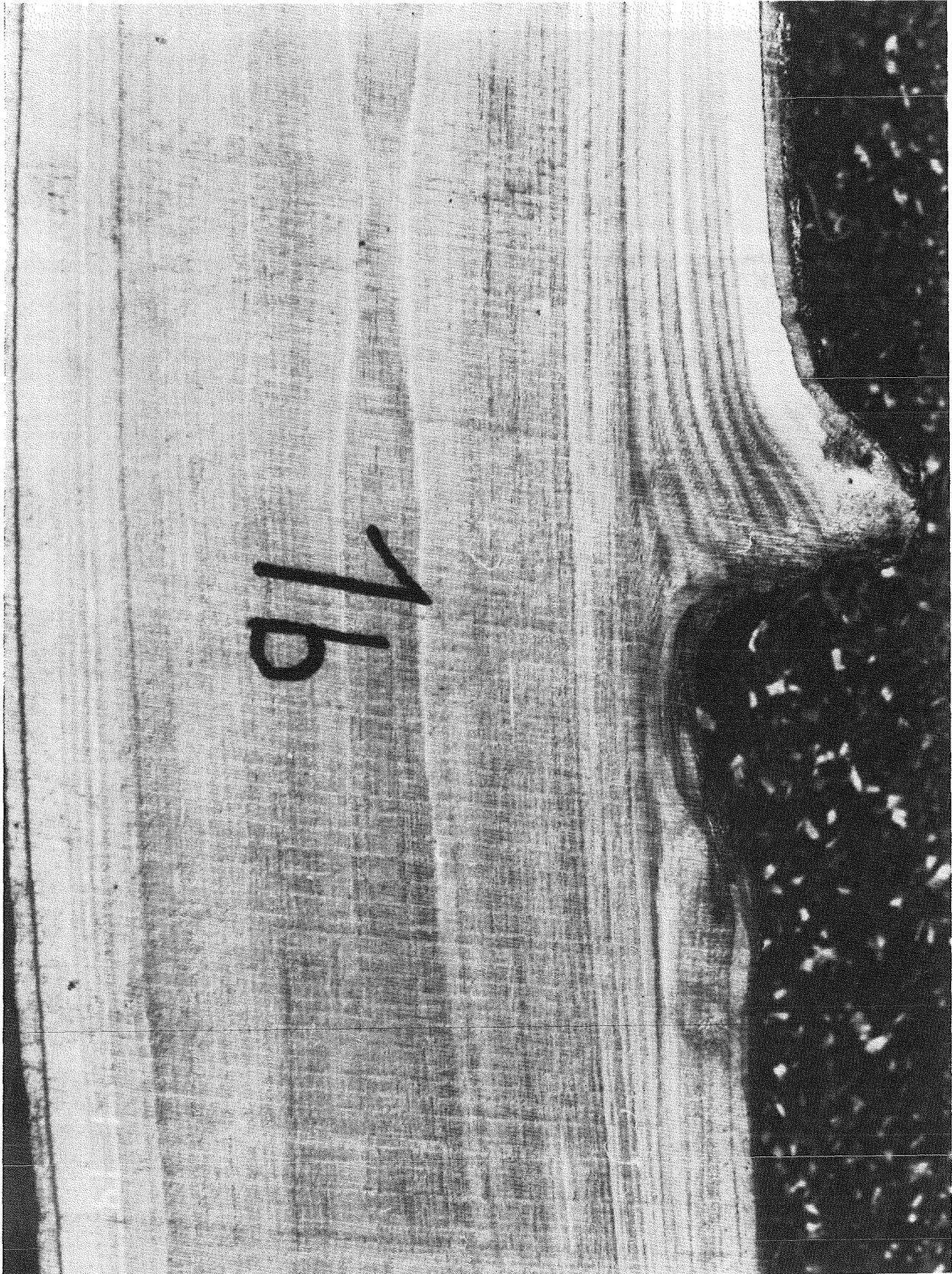


Abb.6: Zu modellierende Struktur als zweidimensionales Modell unter Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes (Schnitt A aus Abb.4).

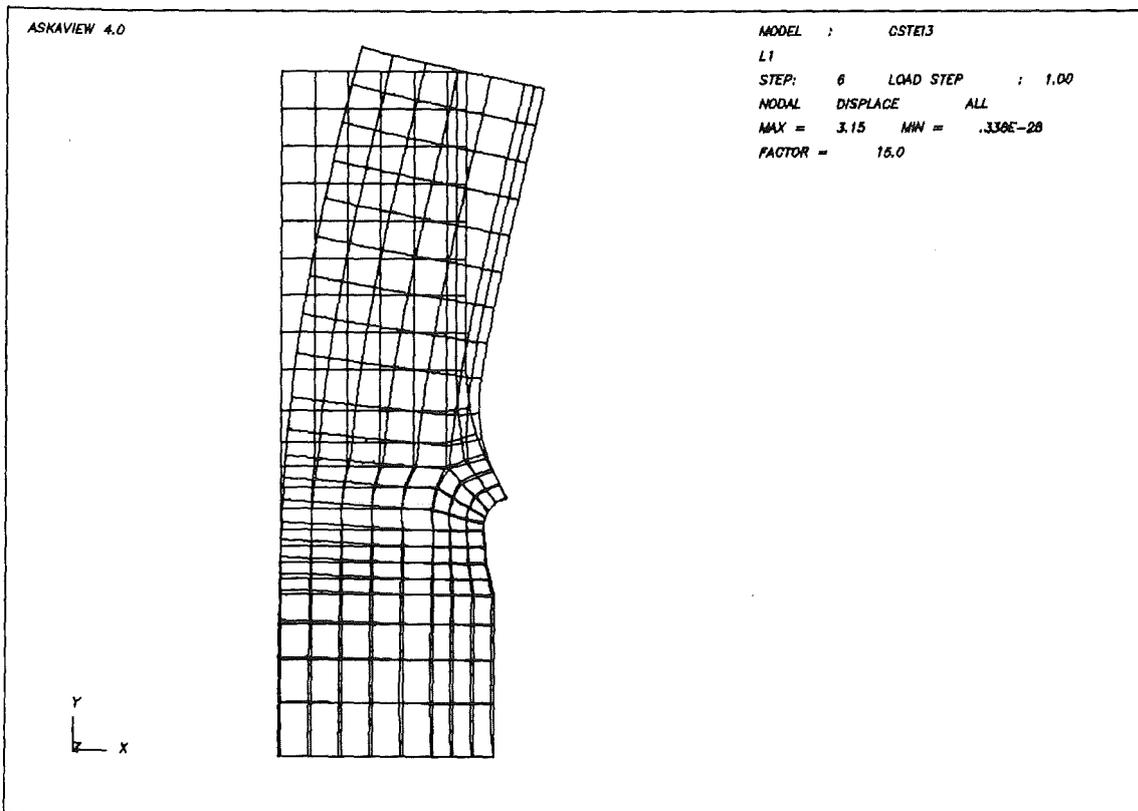
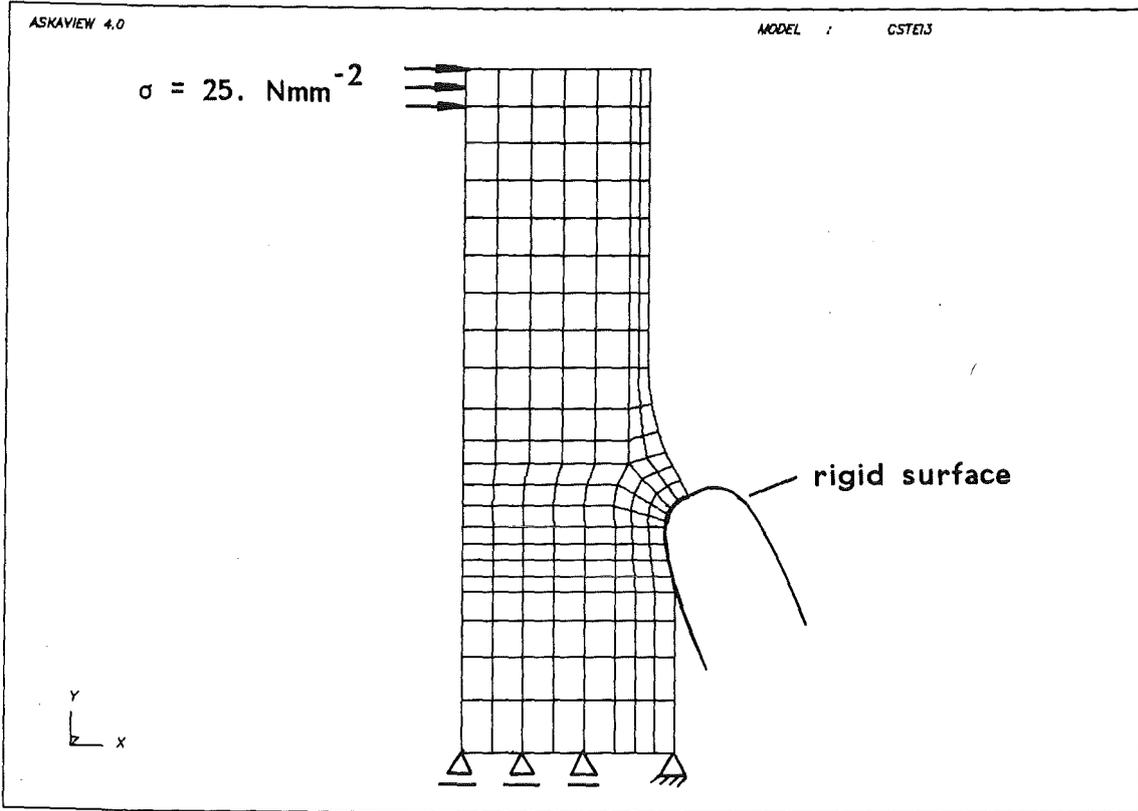
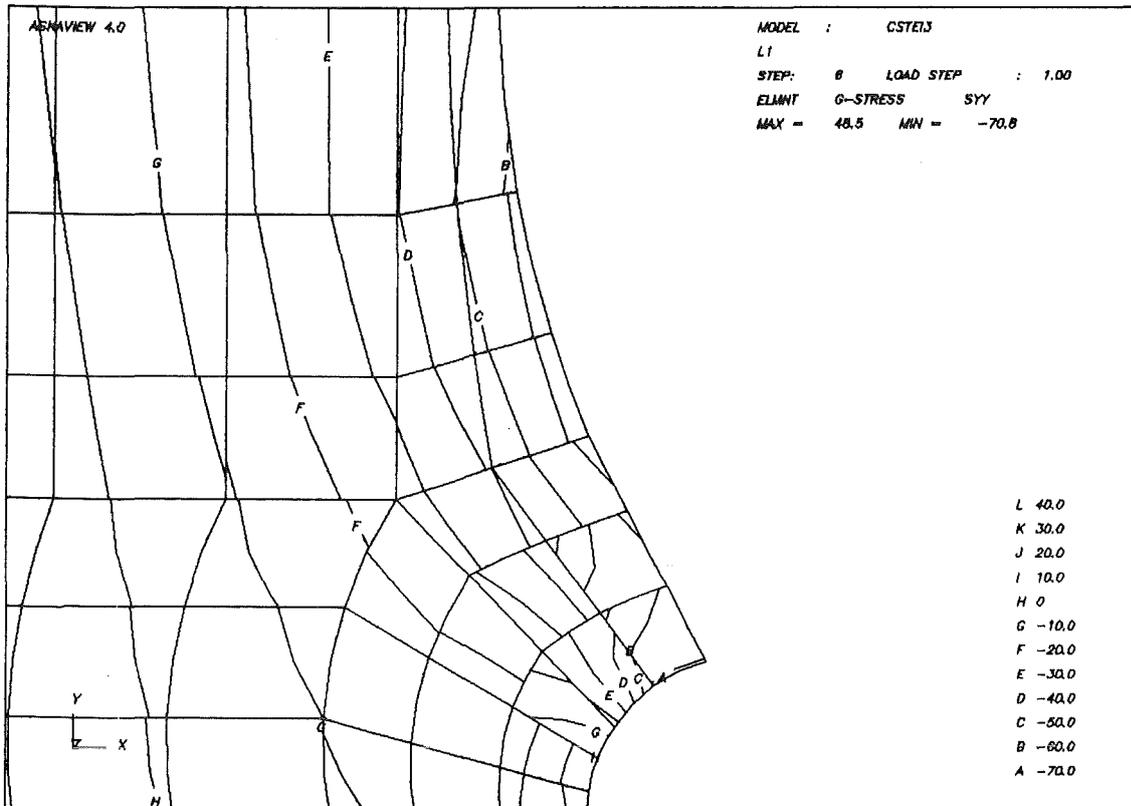
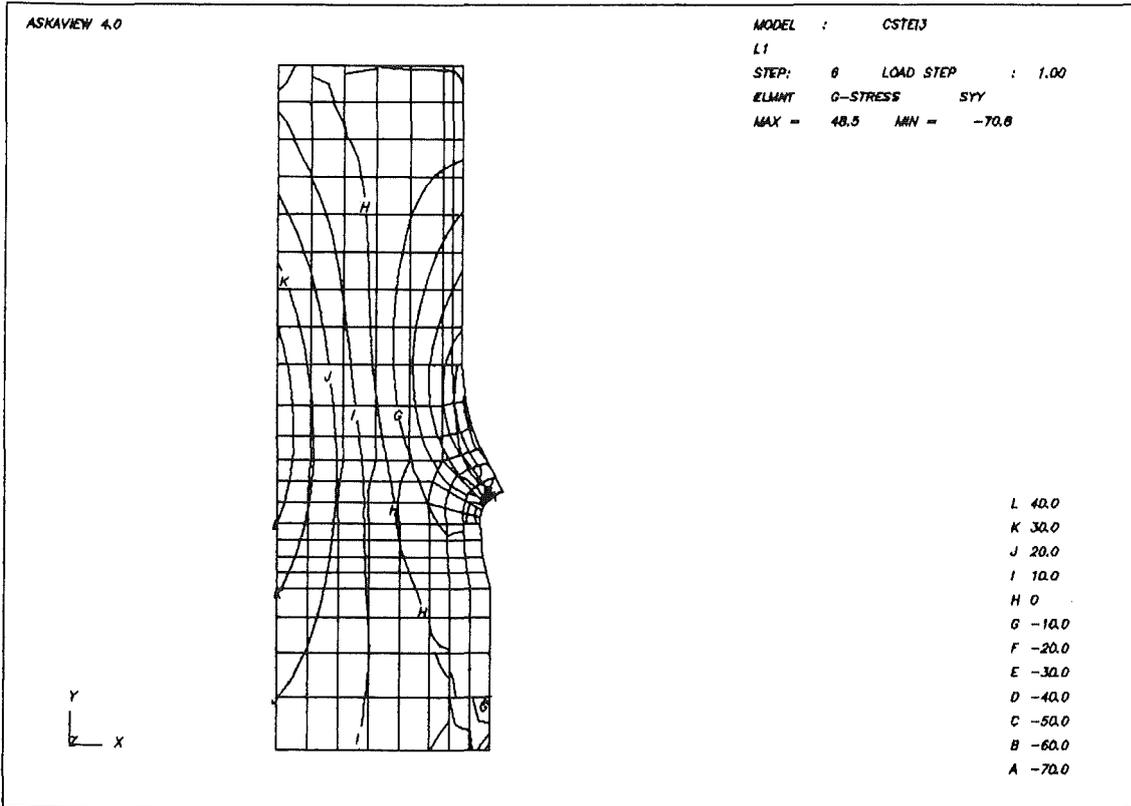
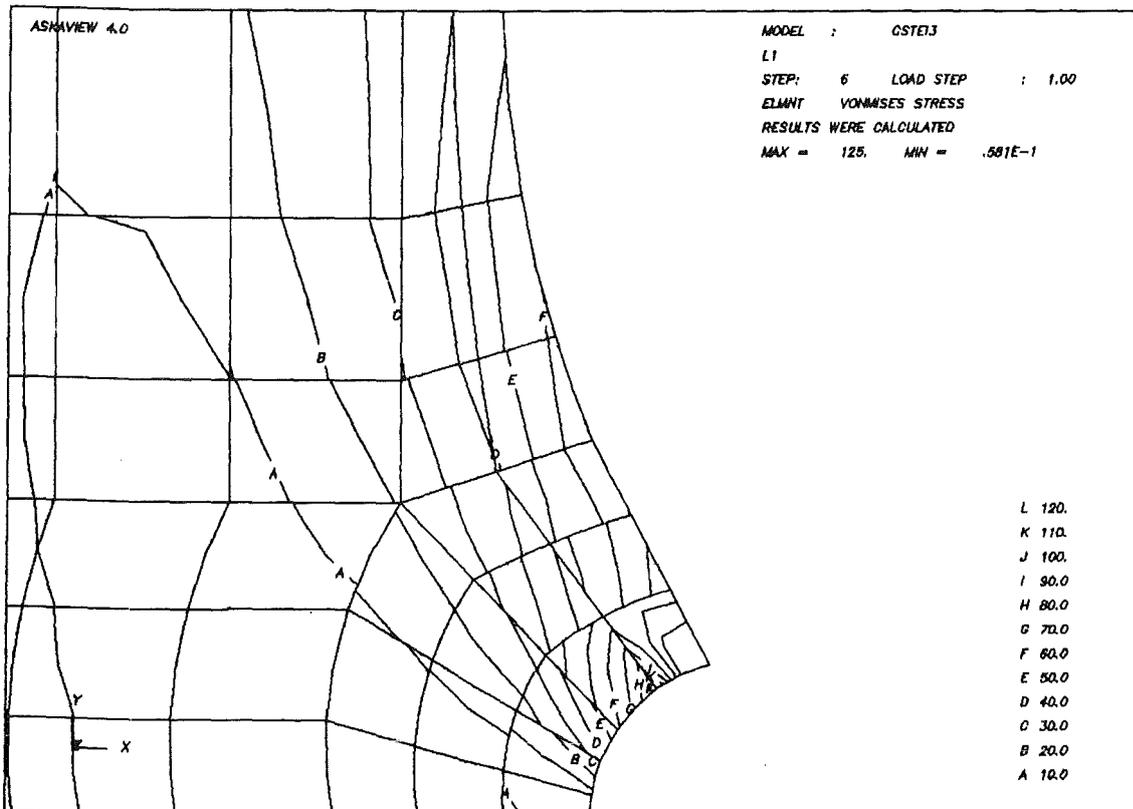
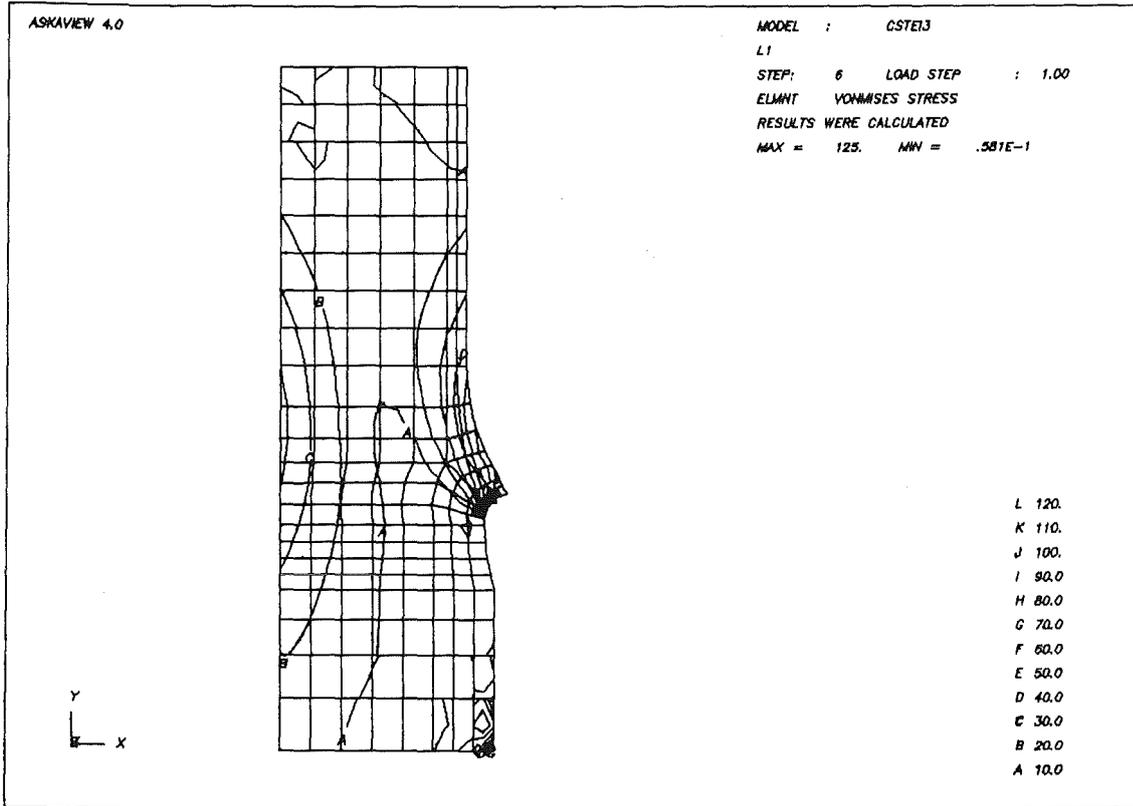


Abb.7: Kurz nach Steinkontakt nur wenige Jahresringe angelagert.

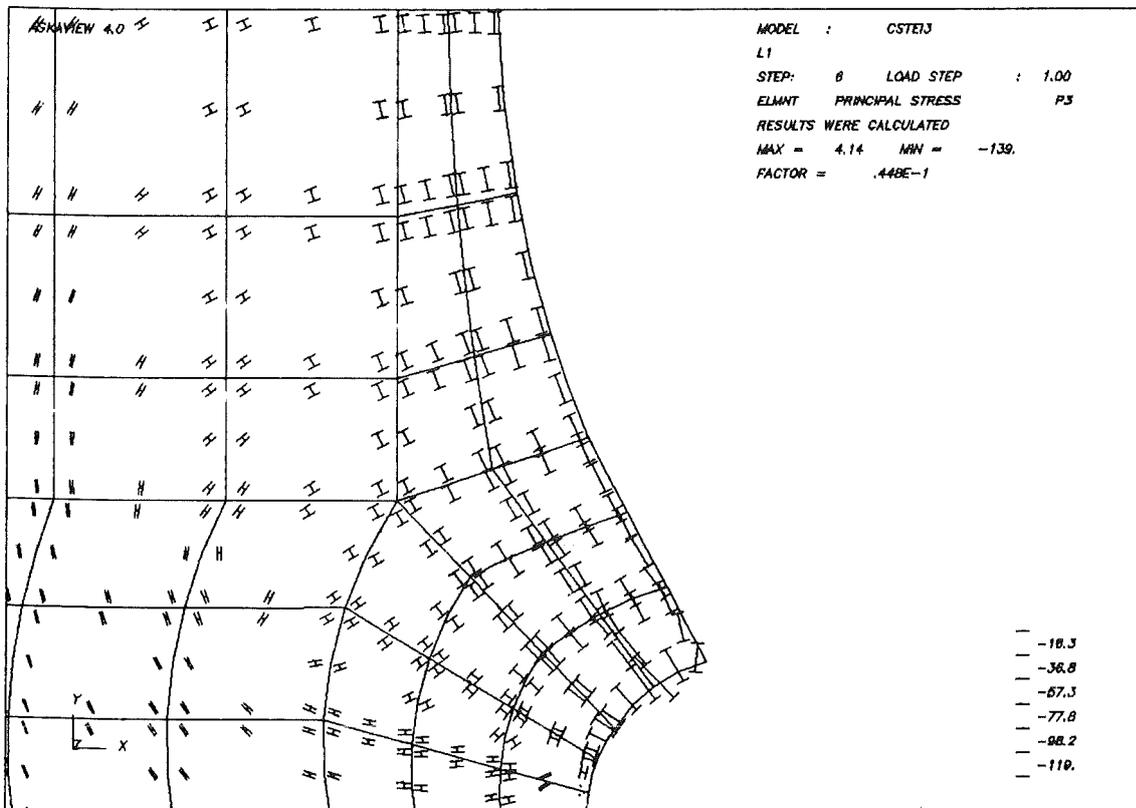
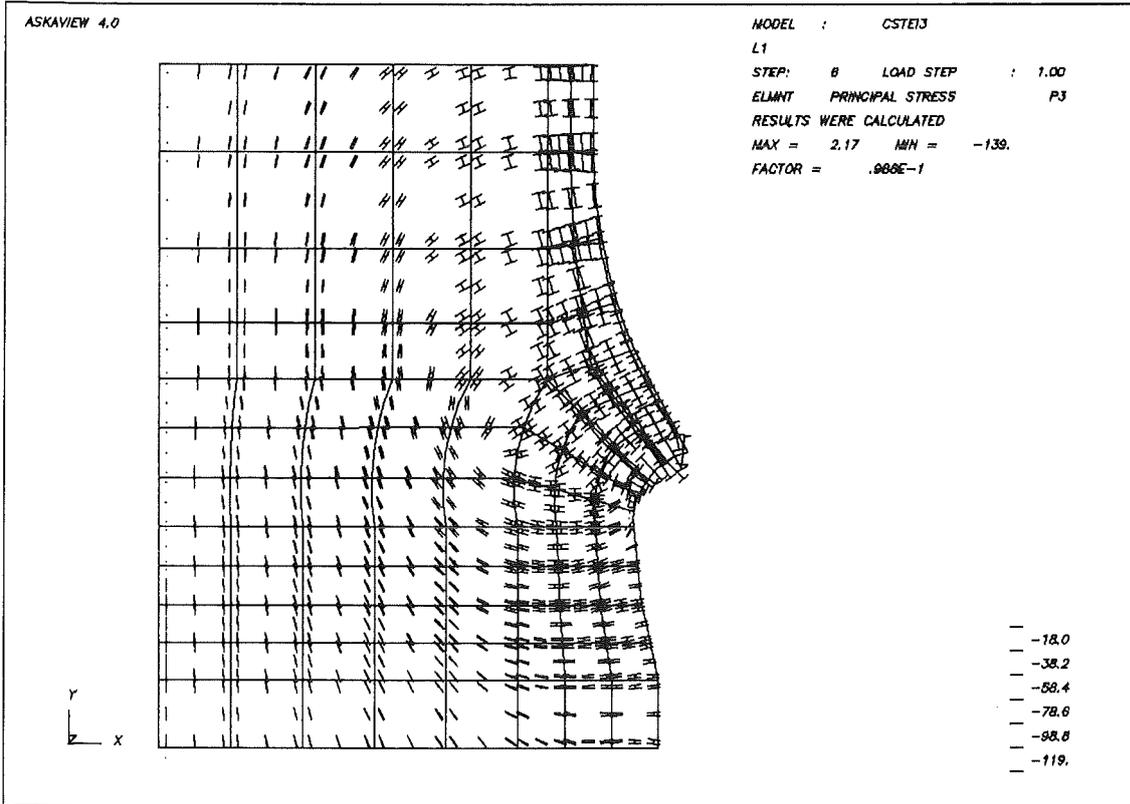
a) FE-Struktur mit Lagerung und Deformationsplot



b) Isolinien der Axialspannungen



c) Isolinien der Von-Mises Spannungen



d) Verlauf der Hauptspannungstrajektorien

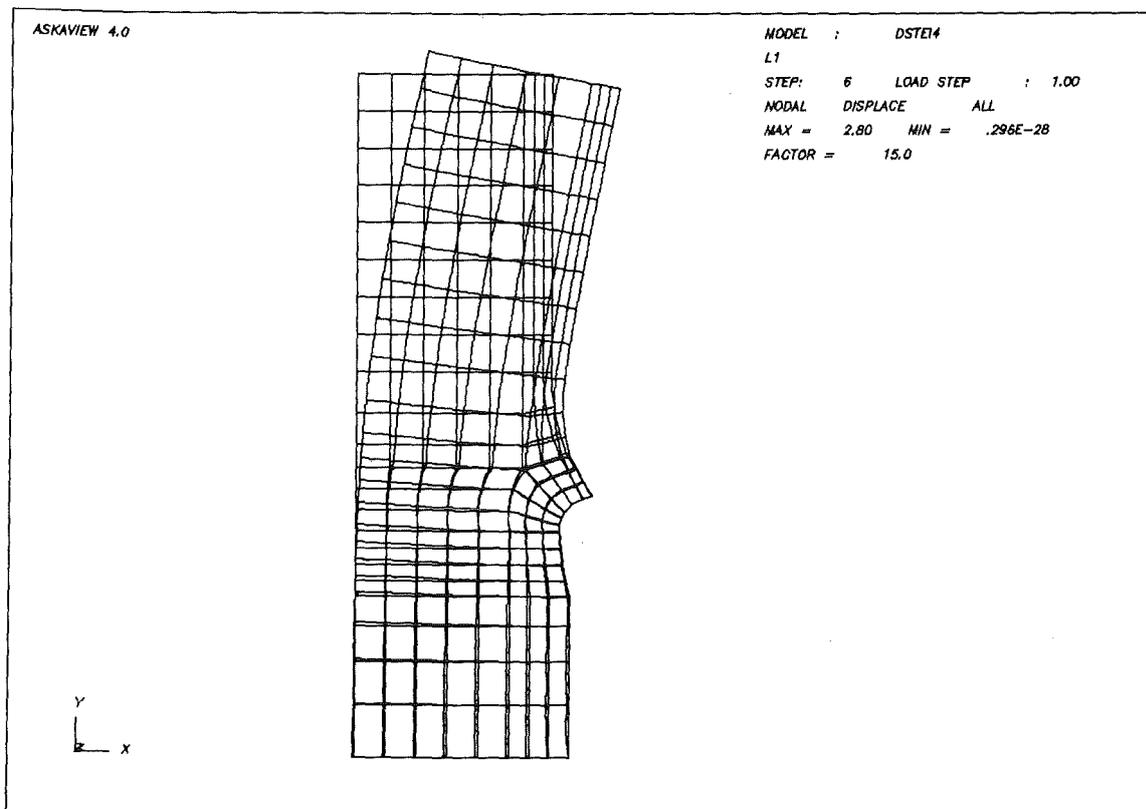
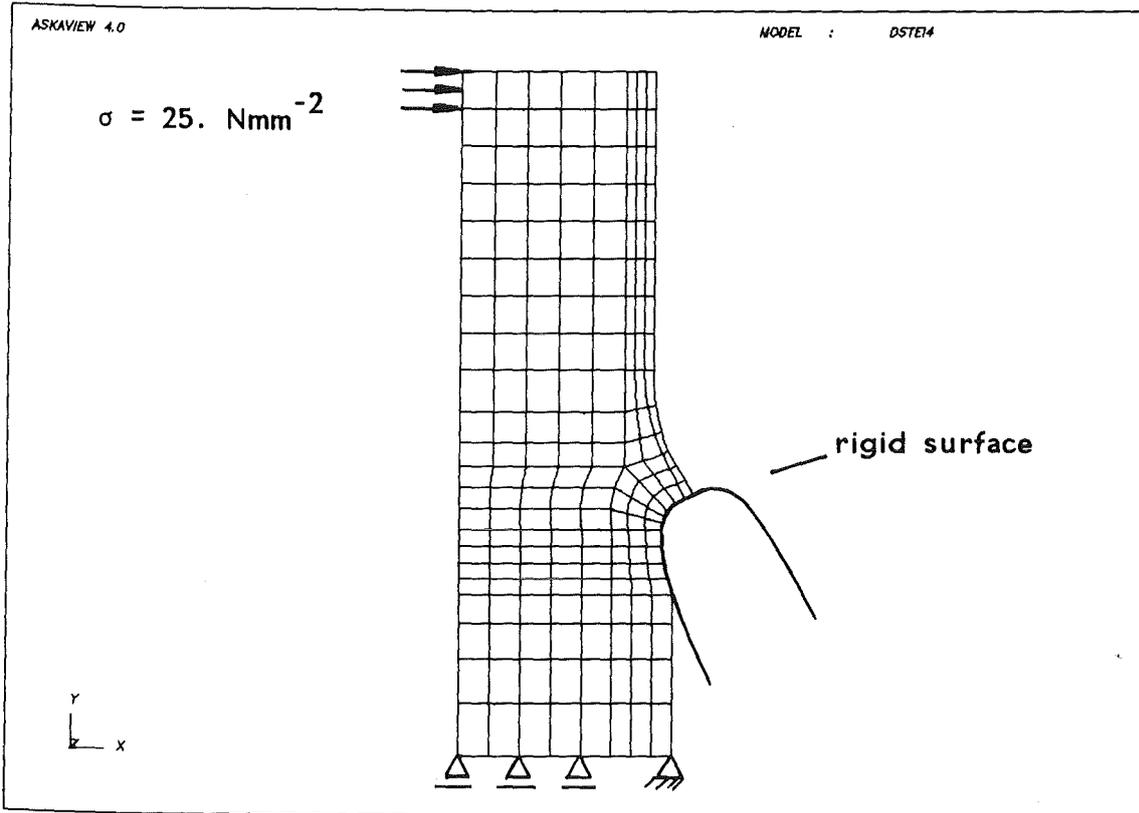
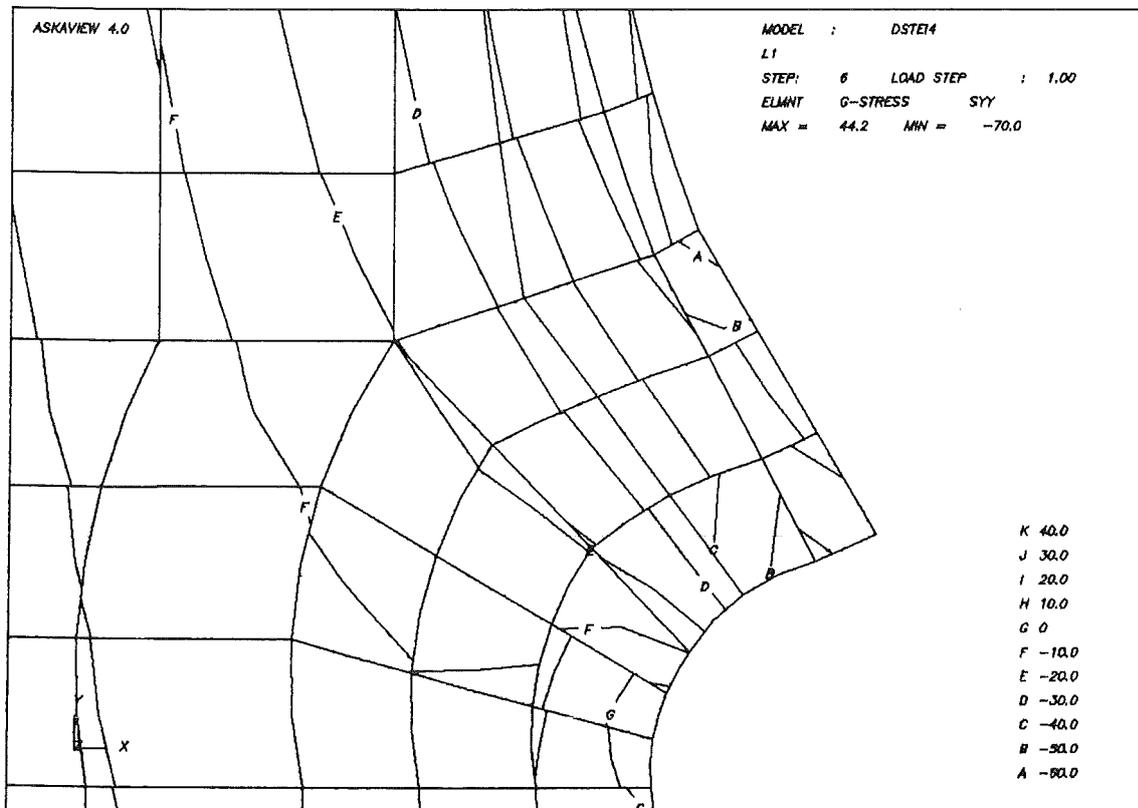
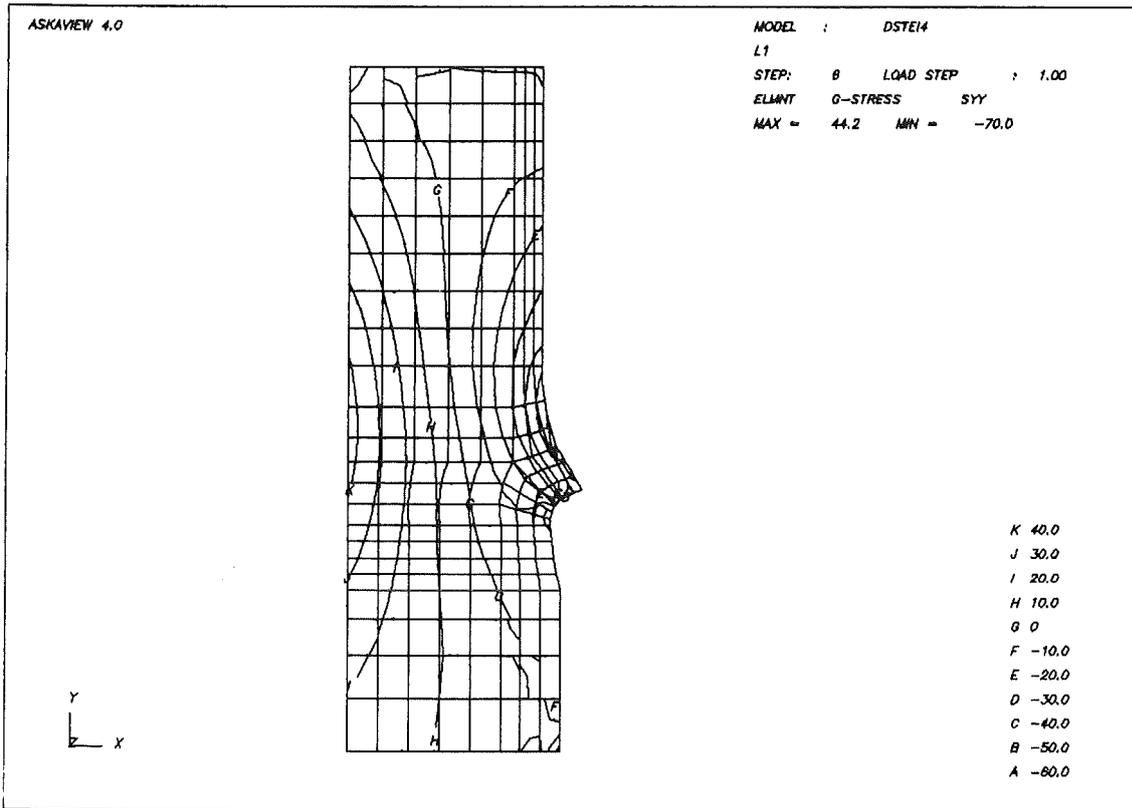
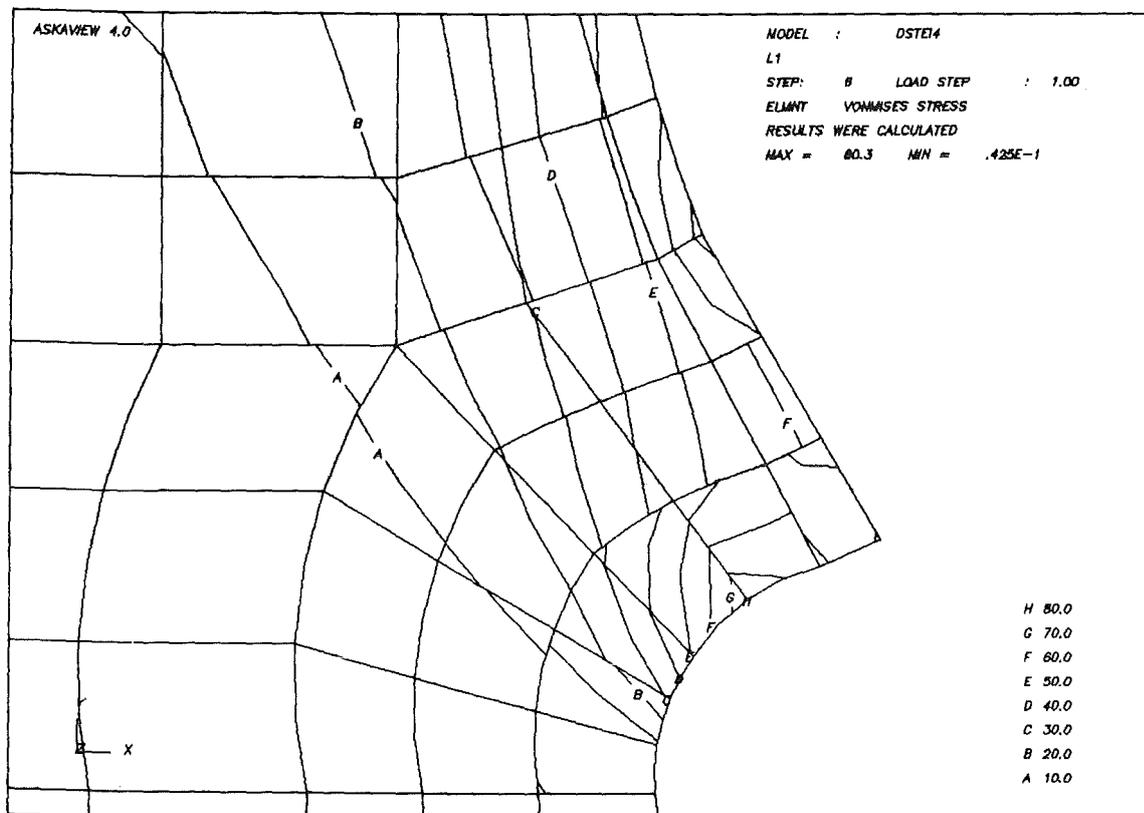
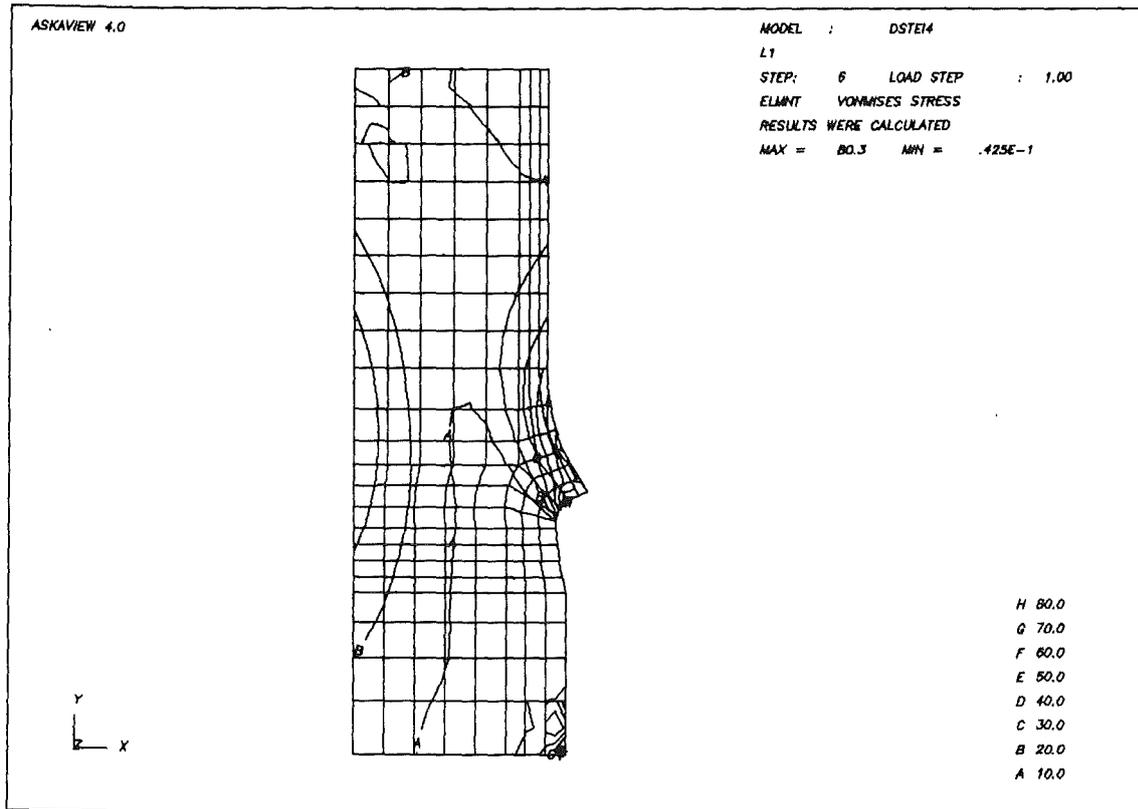


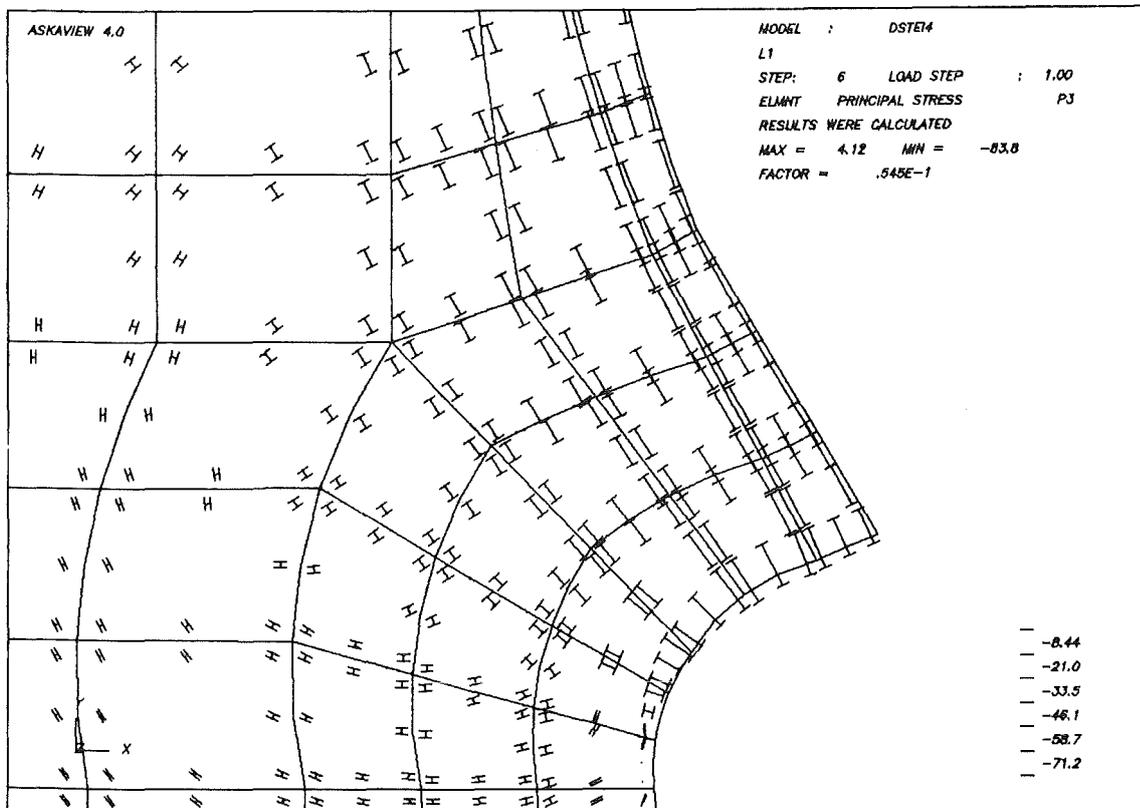
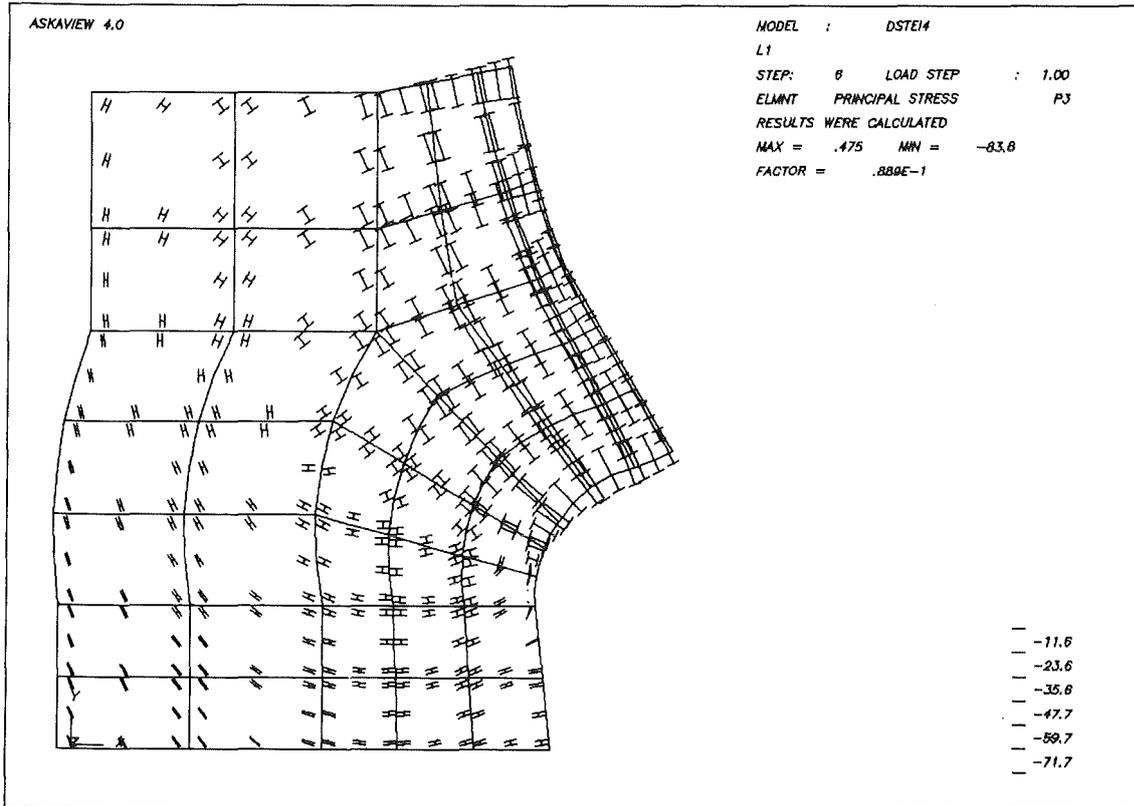
Abb.8a: FE-Struktur mit mäßigem Zuwachs und Deformationsplot



b) Isolinien der Axialspannungen



c) Isolinien der Von-Mises Spannungen



d) Verlauf der Hauptspannungstrajektorien

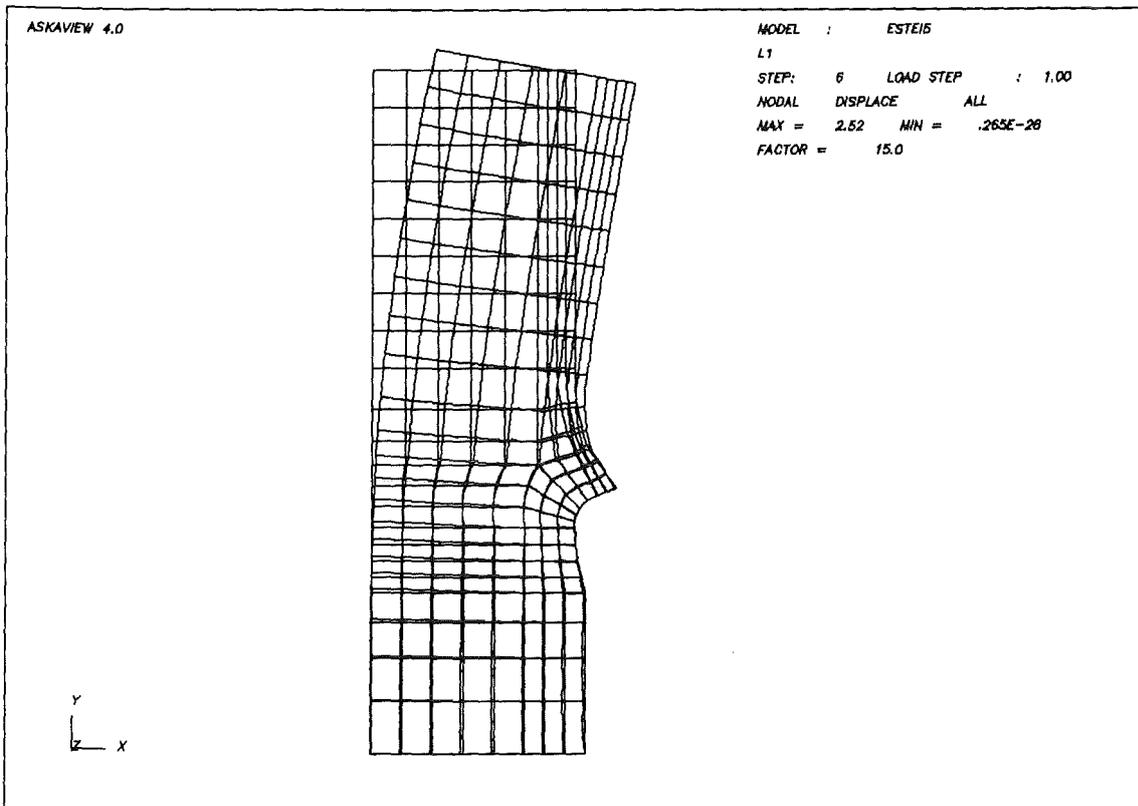
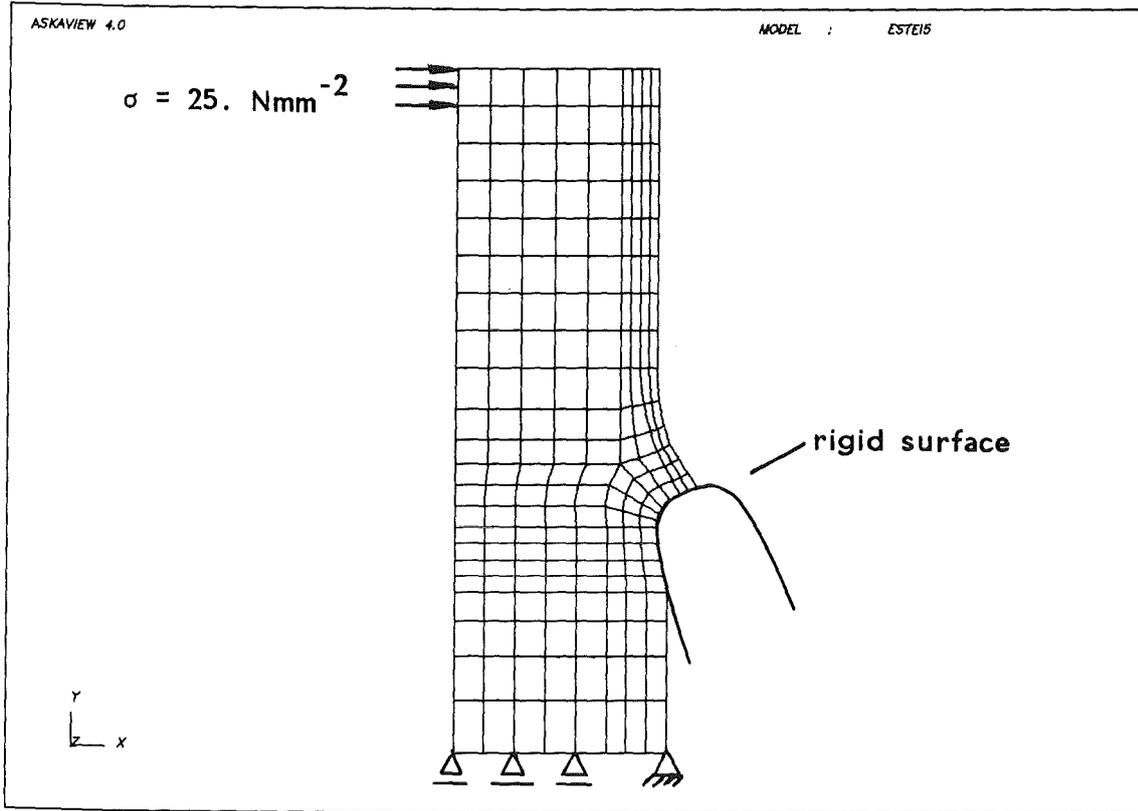
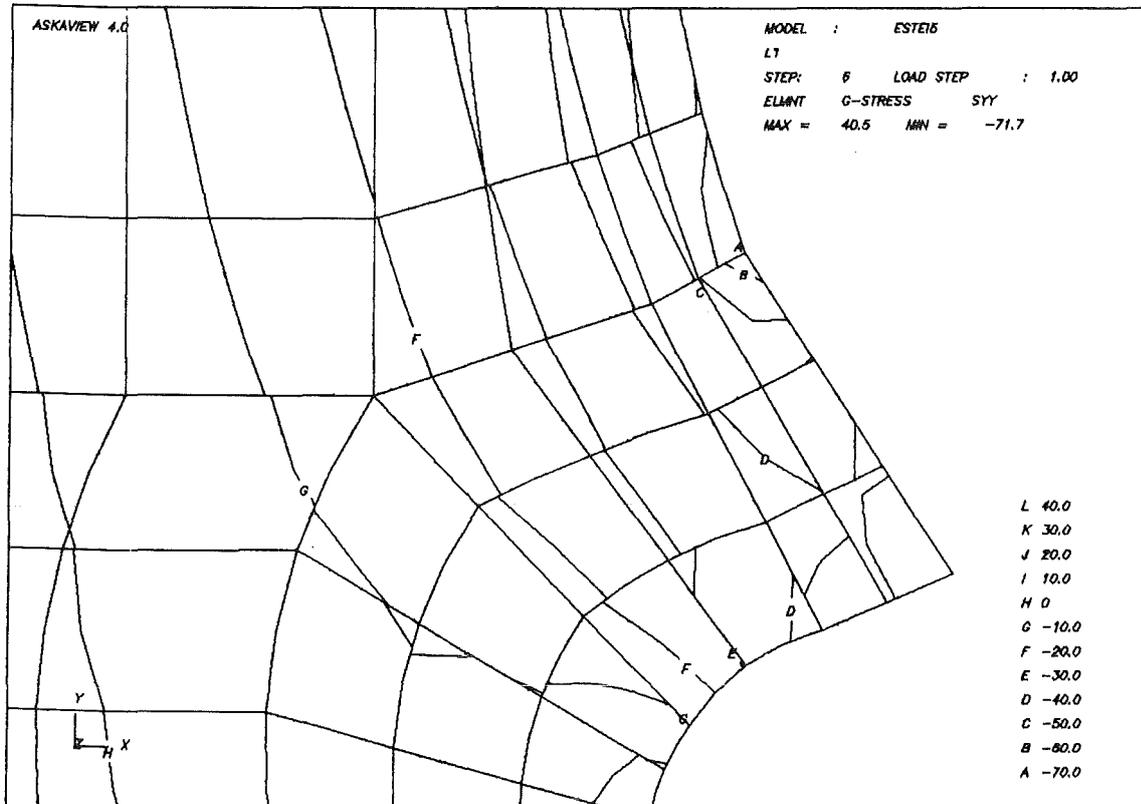
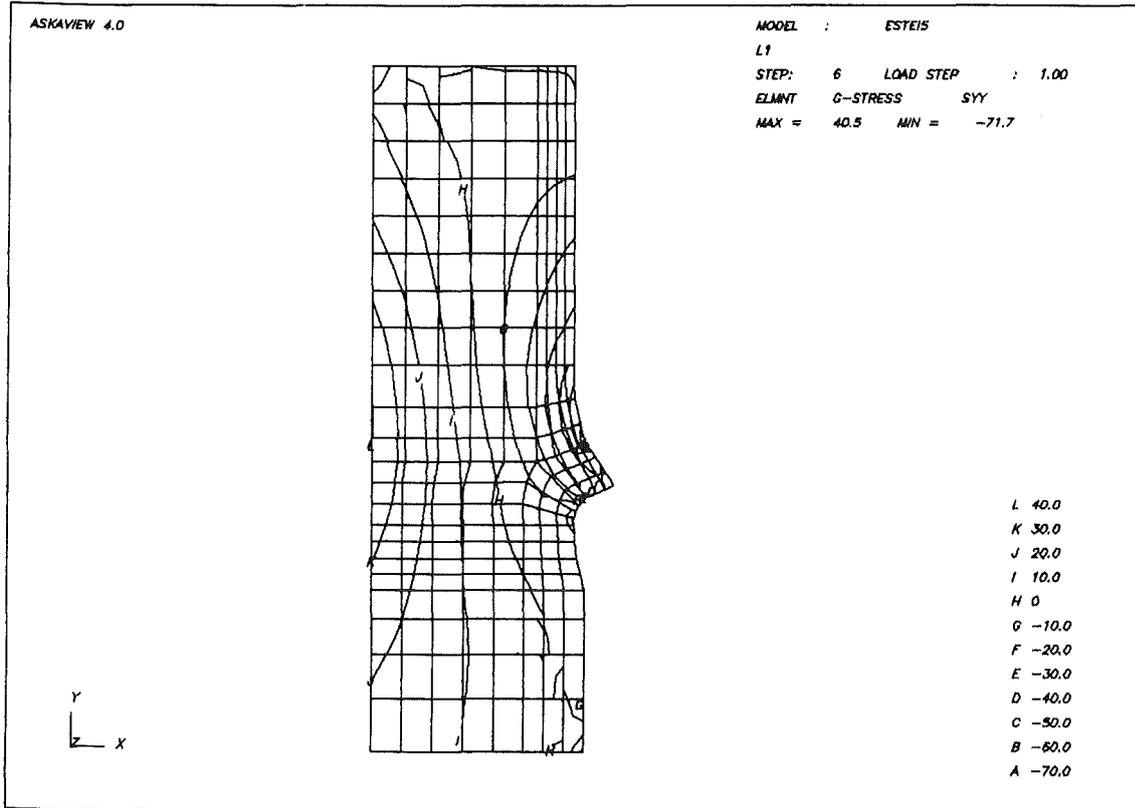
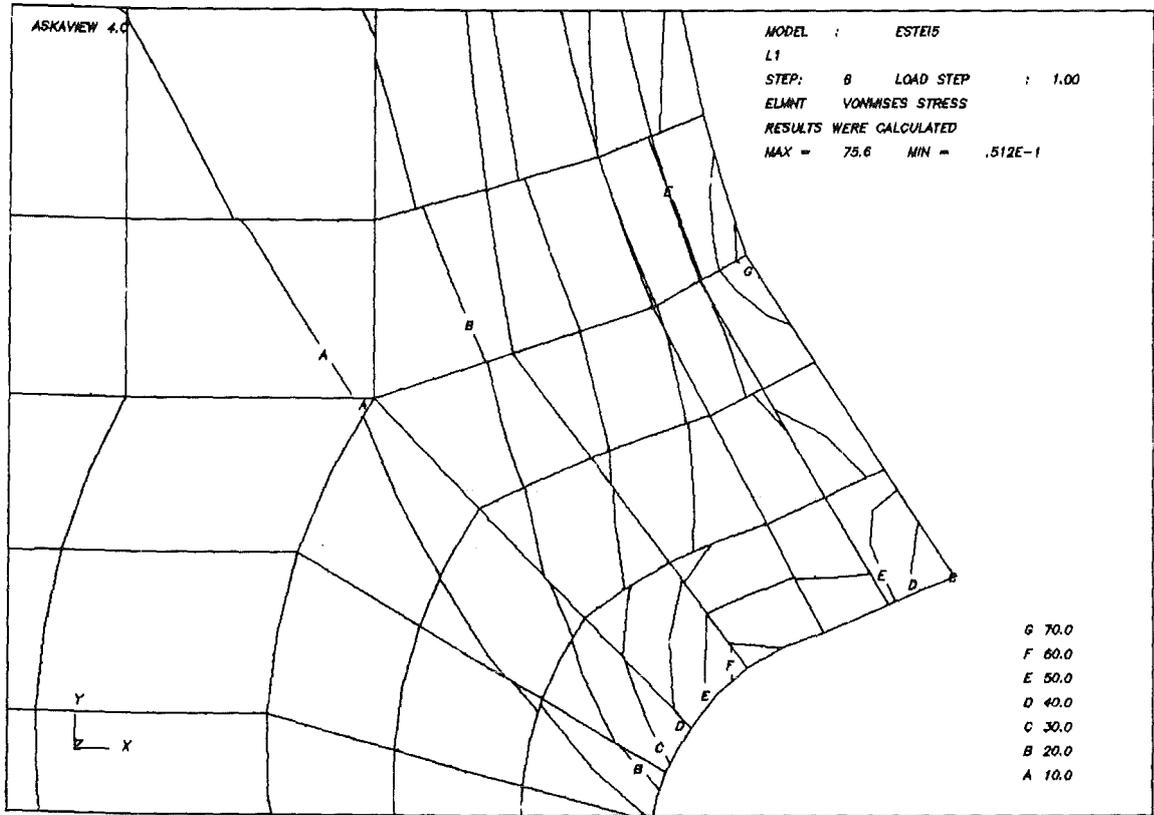
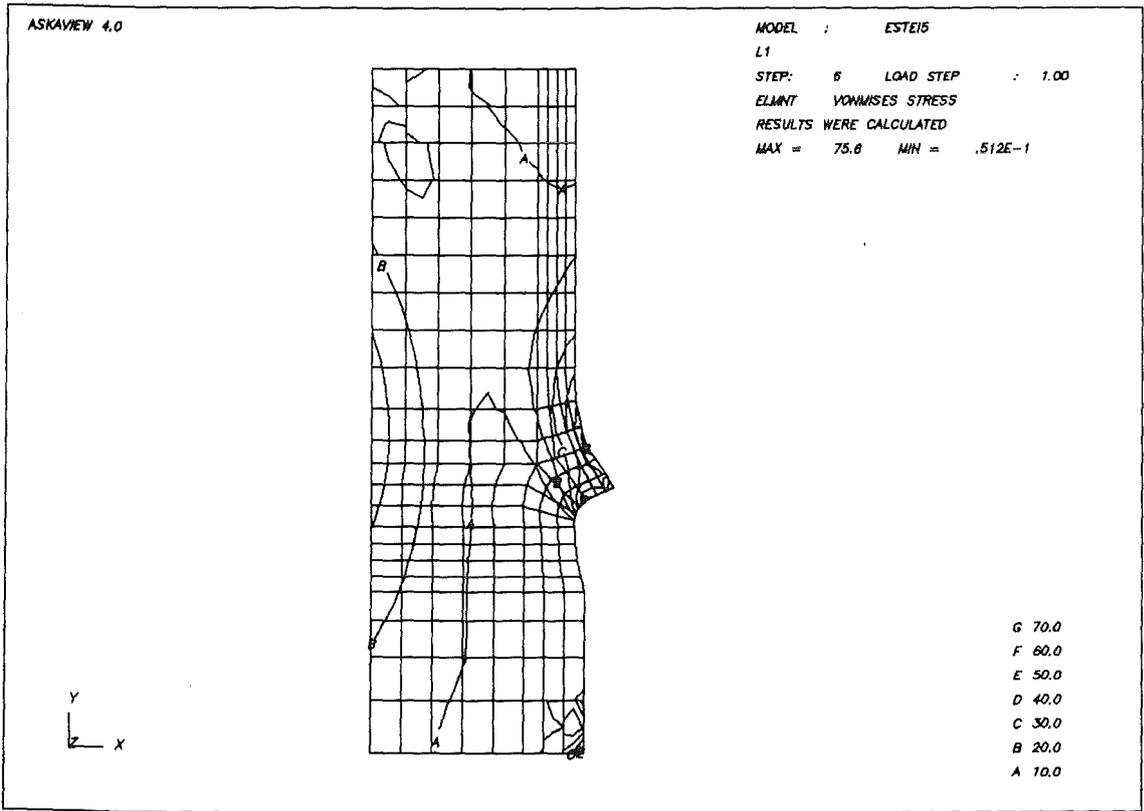


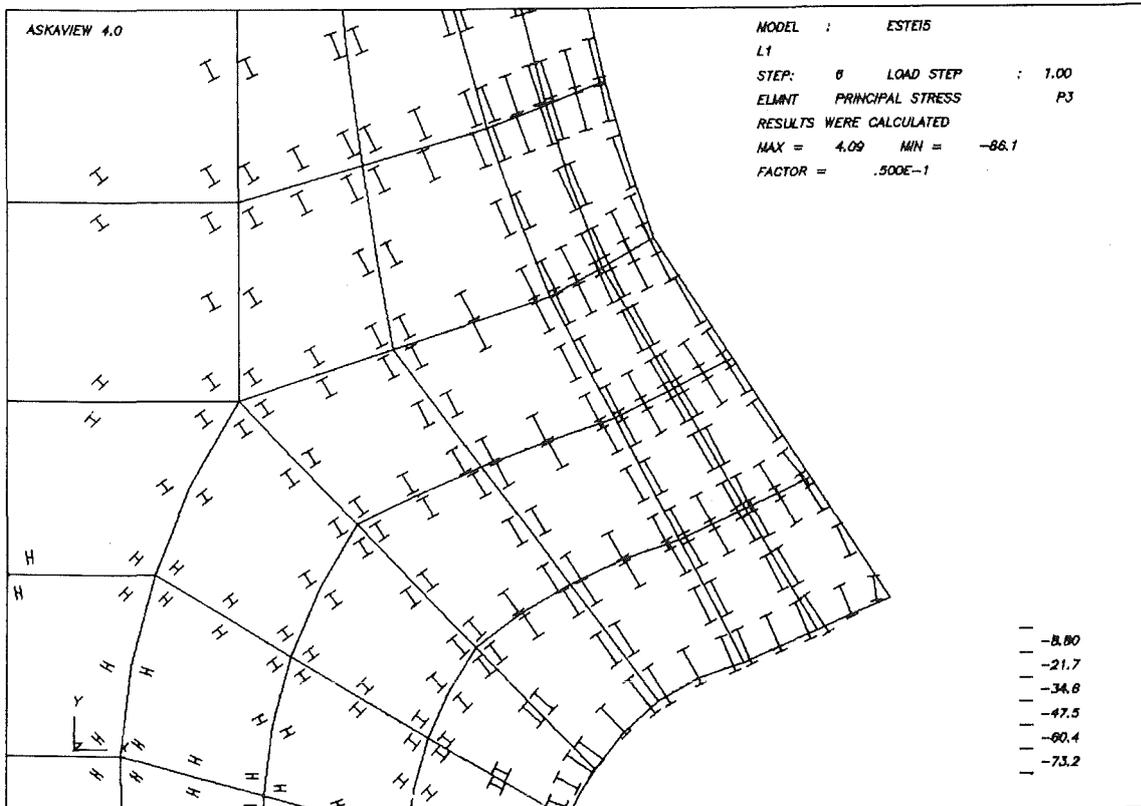
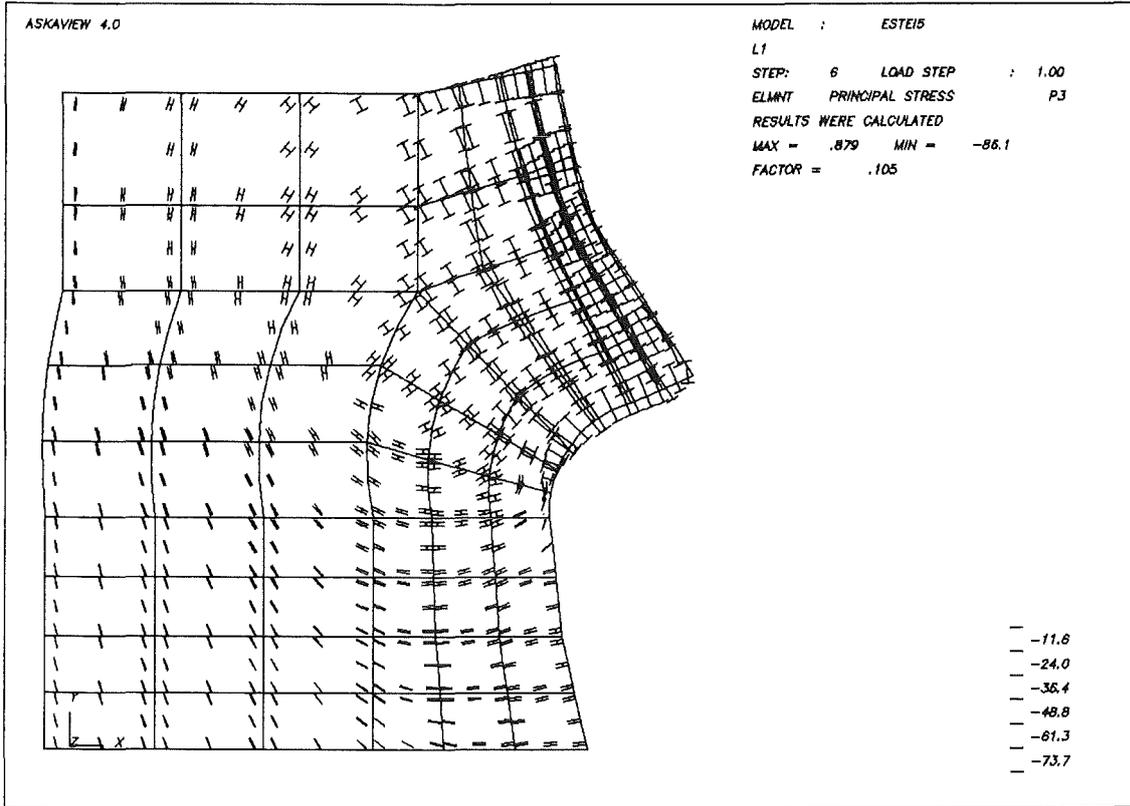
Abb.9a: FE-Struktur mit weiterem Zuwachs oberhalb der Kontaktfläche und Deformationsplot



b) Isolinien der Axialspannungen



c) Isolinien der Von-Mises Spannungen



d) Verlauf der Hauptspannungstrajektorien

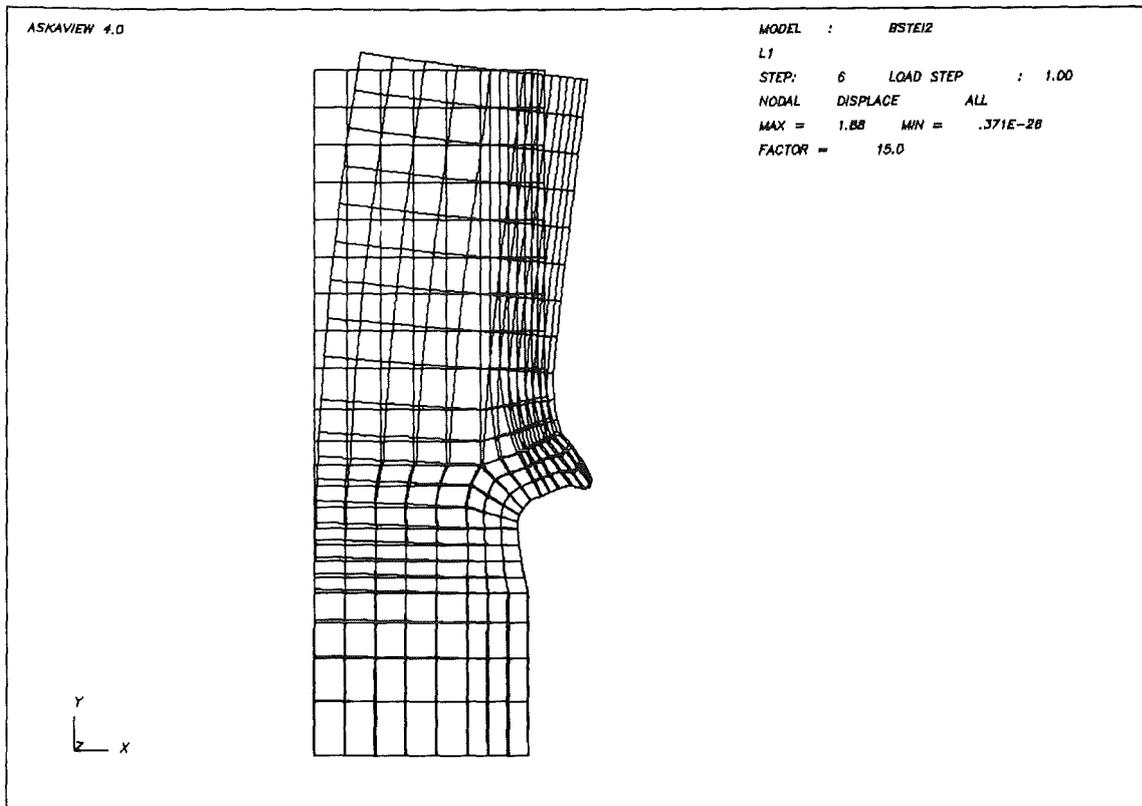
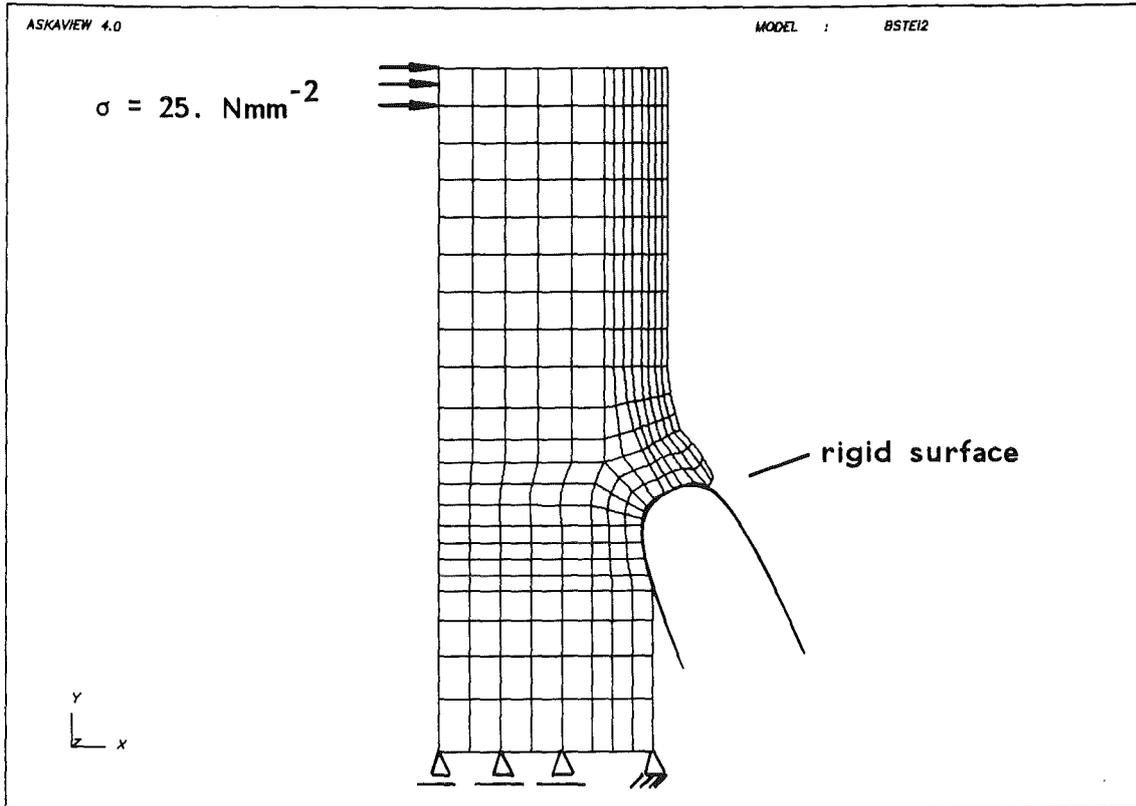
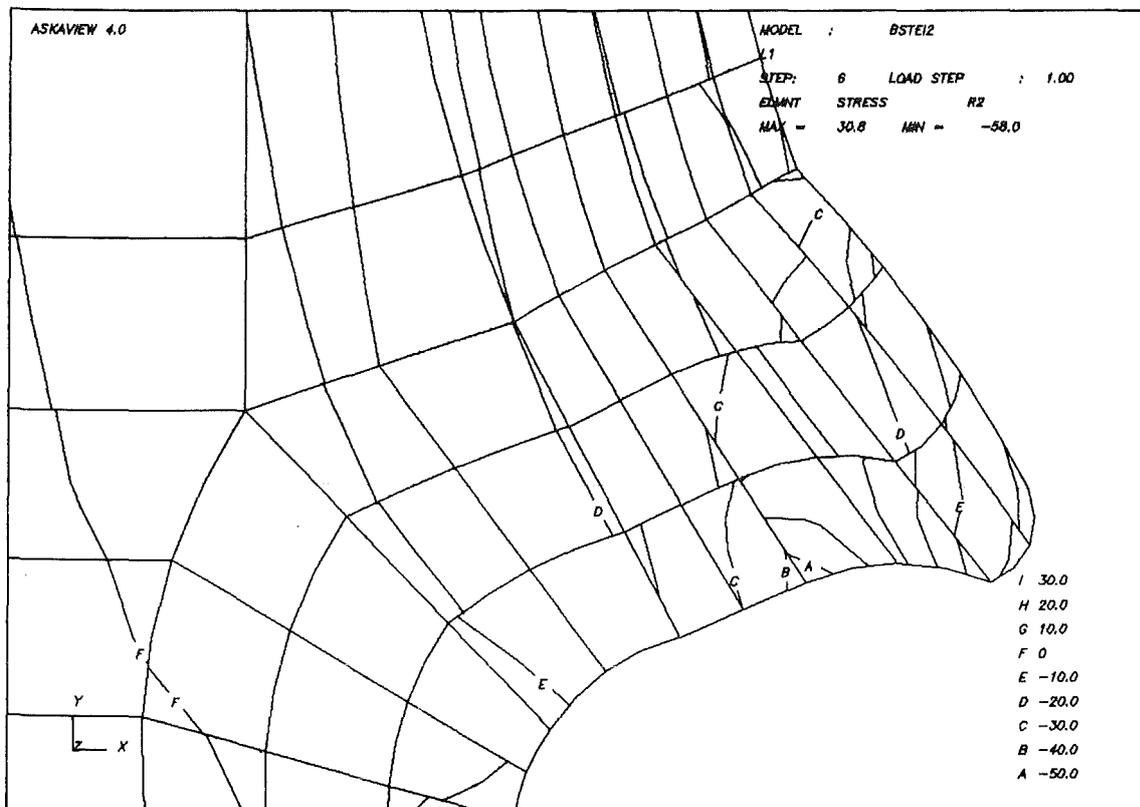
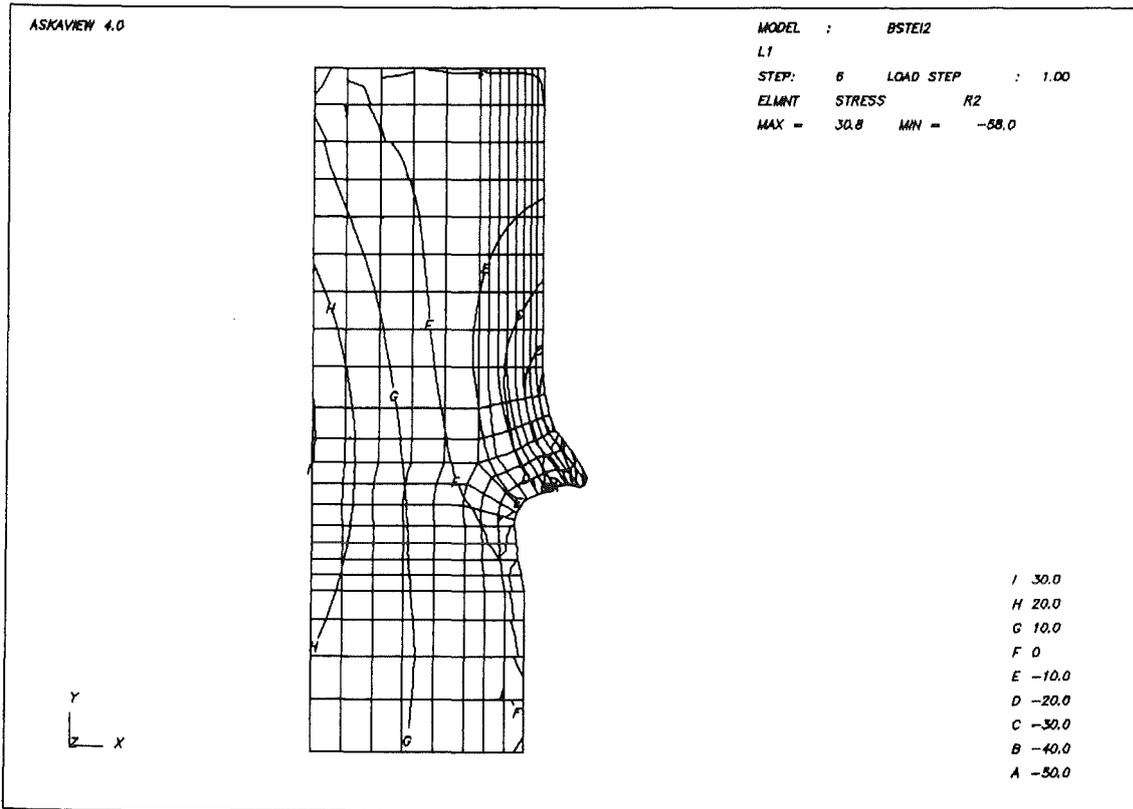
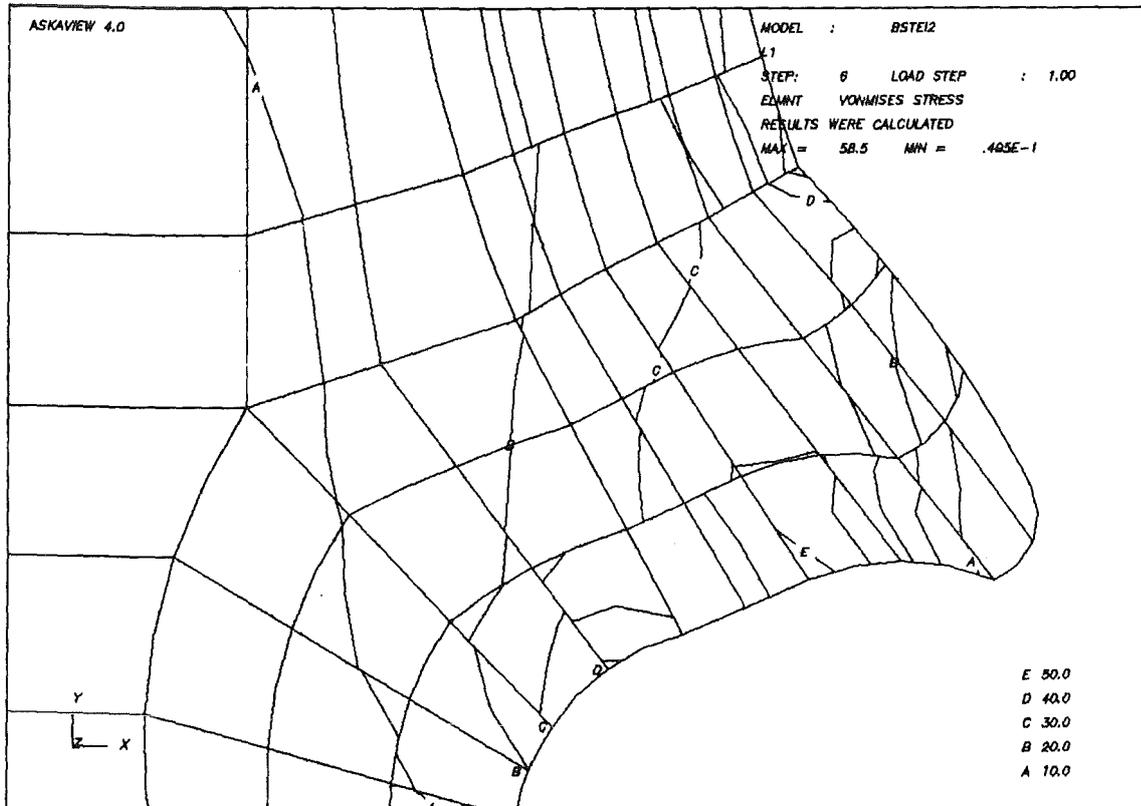
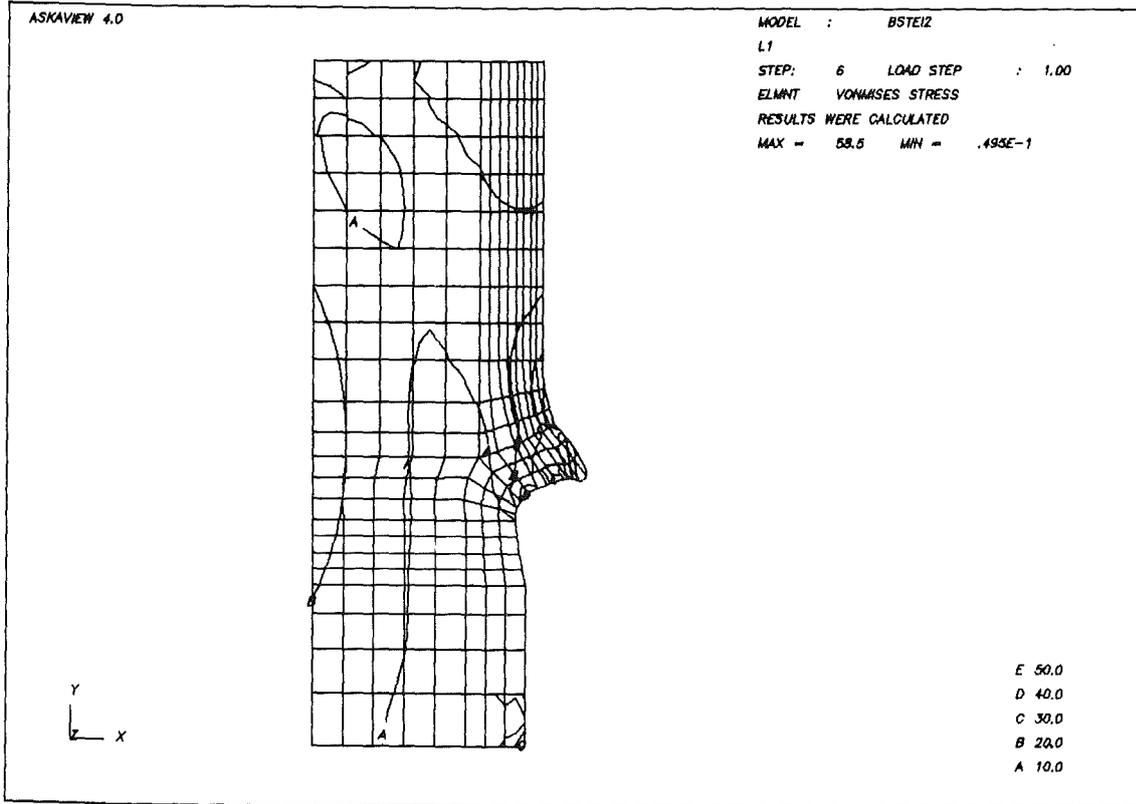


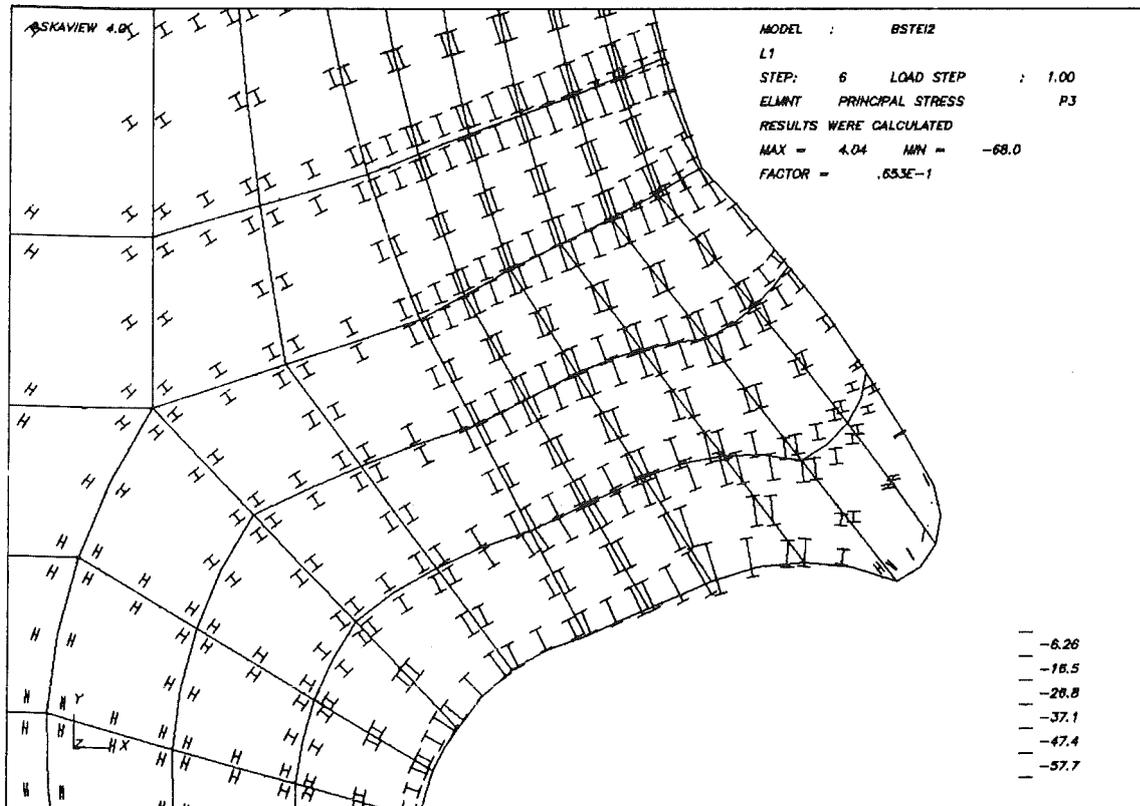
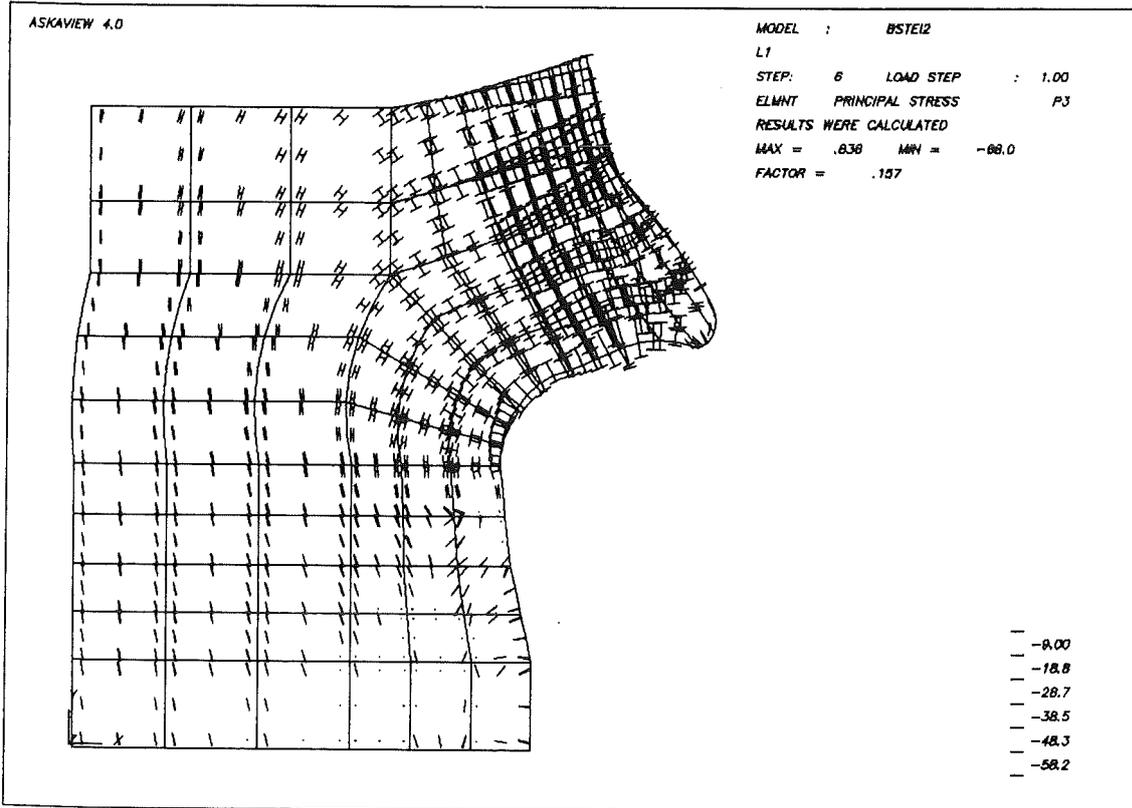
Abb.10a: FE-Struktur des schließlich gefällten Stammes und Deformationsplot



b) Isolinien der Axialspannungen



c) Isolinien der Von-Mises Spannungen



d) Verlauf der Hauptspannungstrajektorien

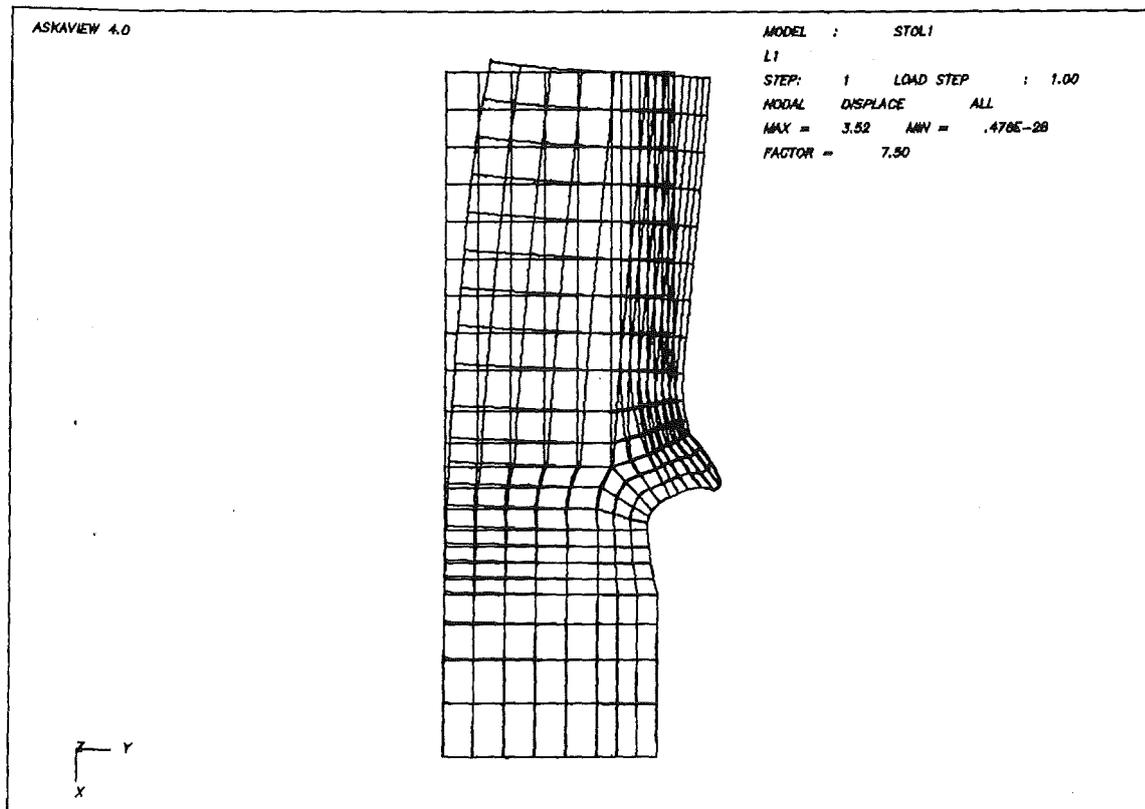
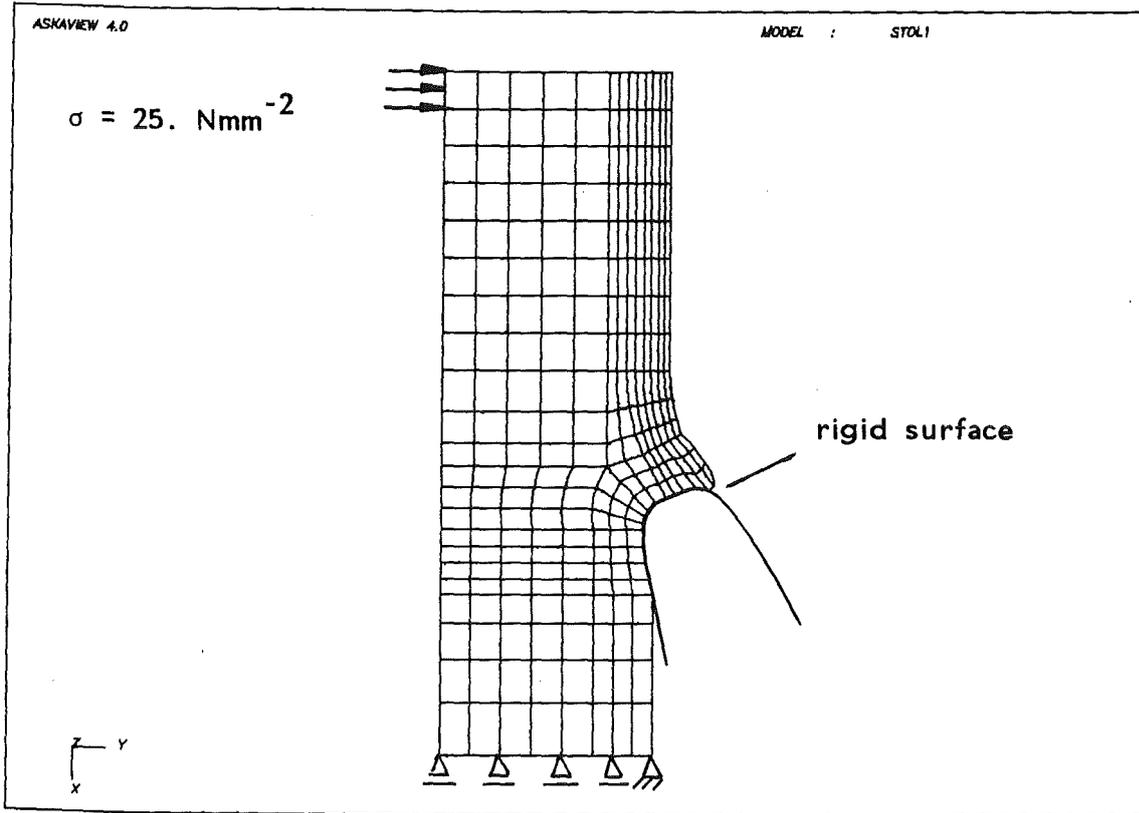
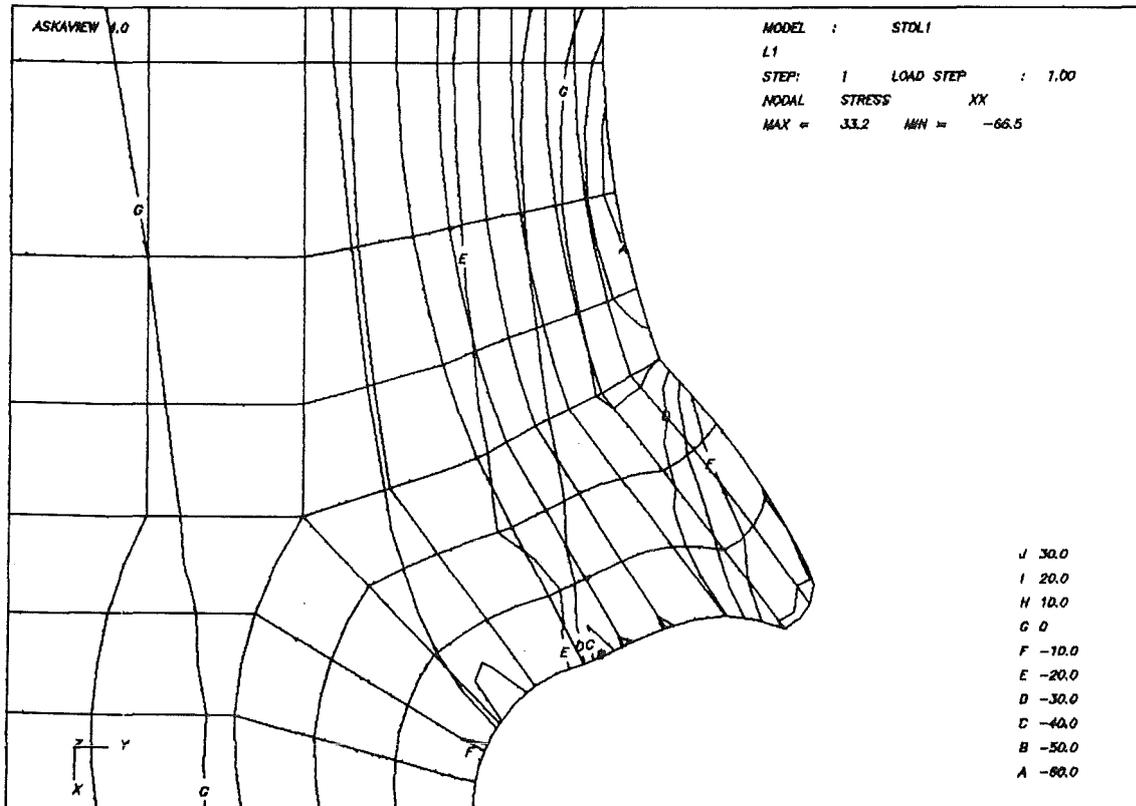
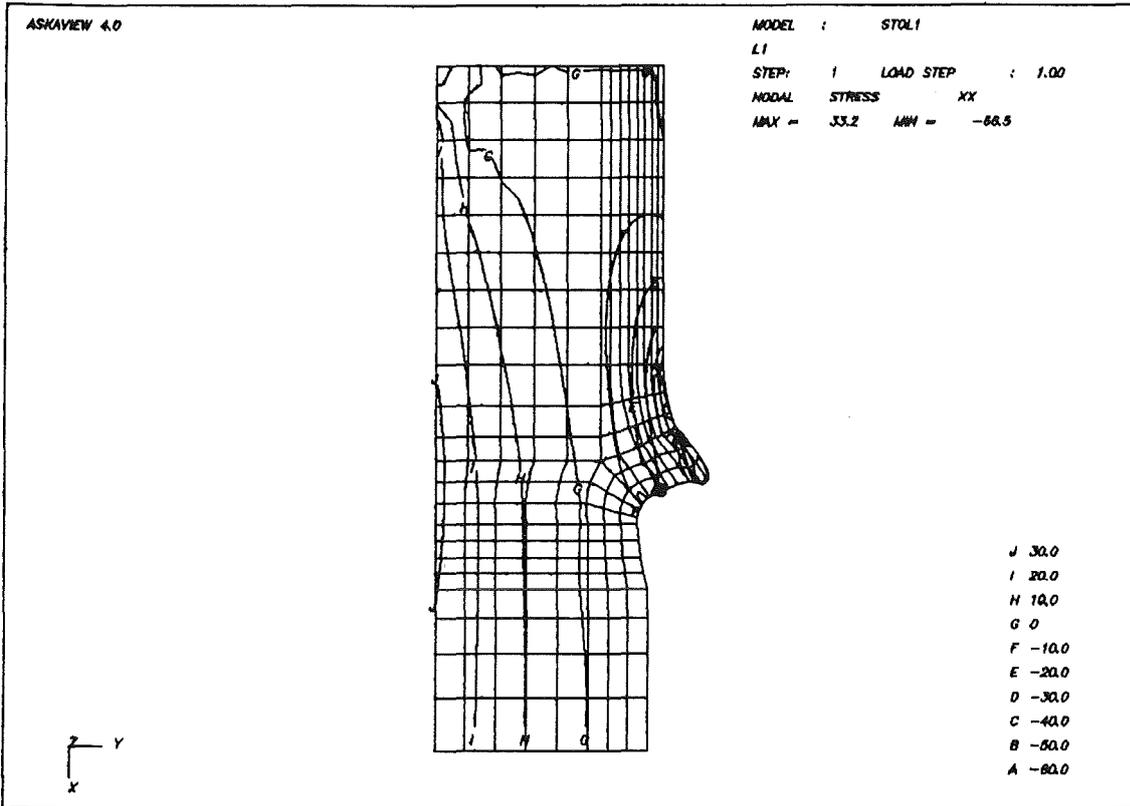
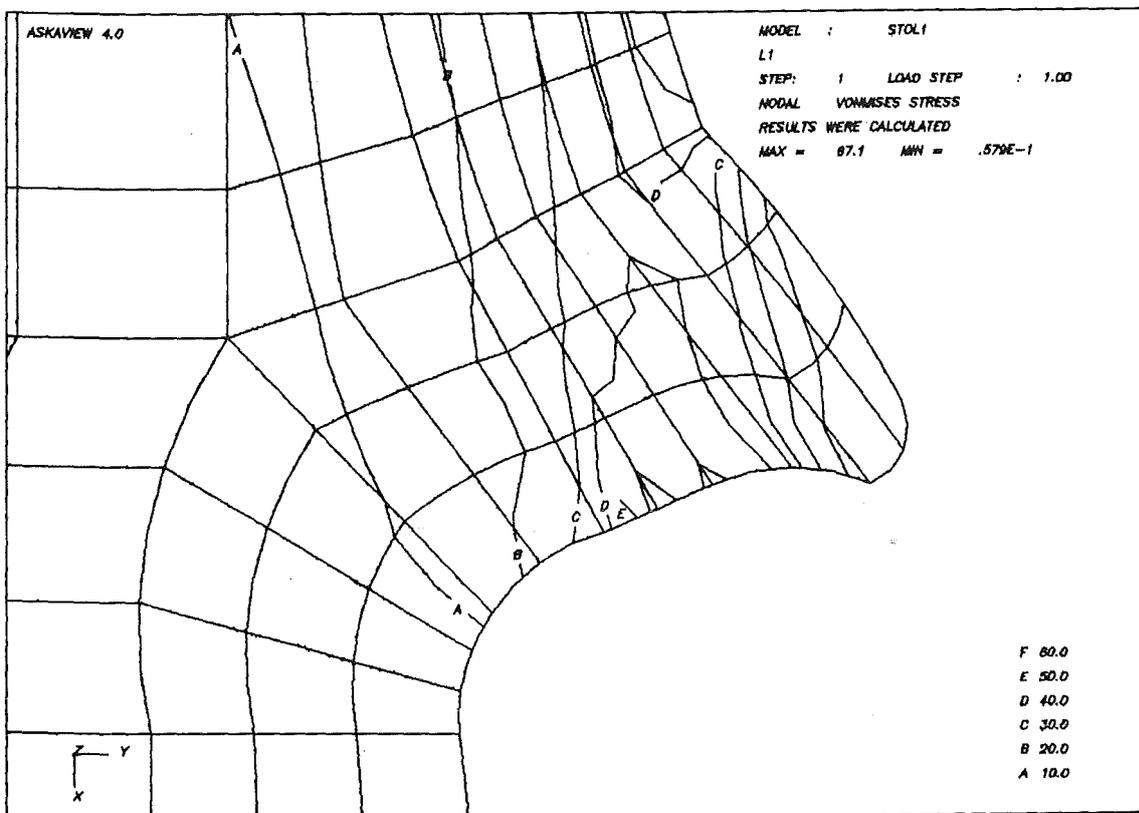
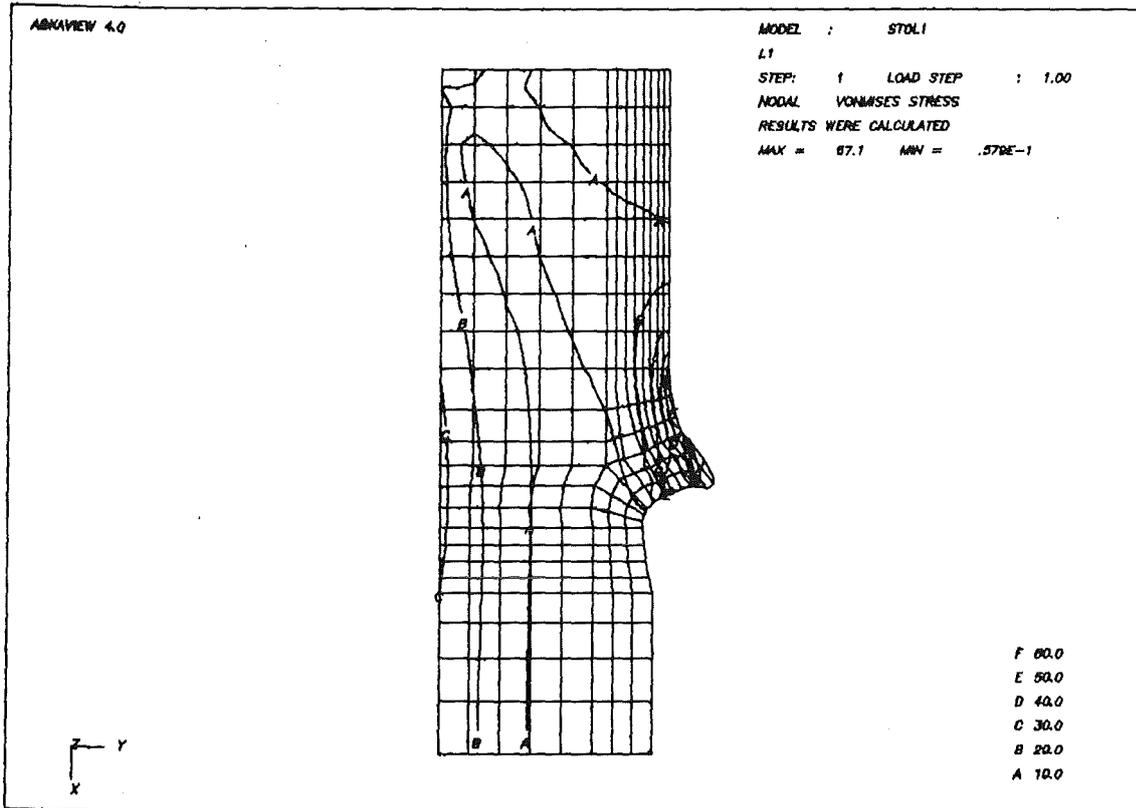


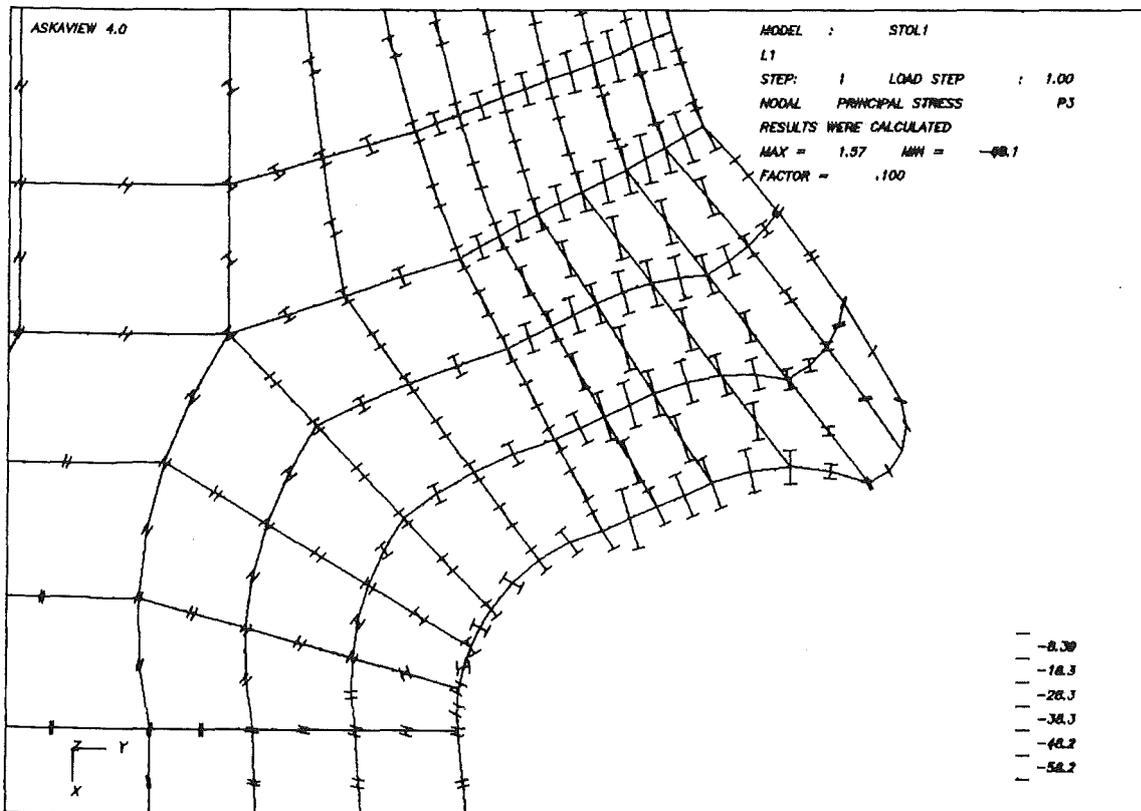
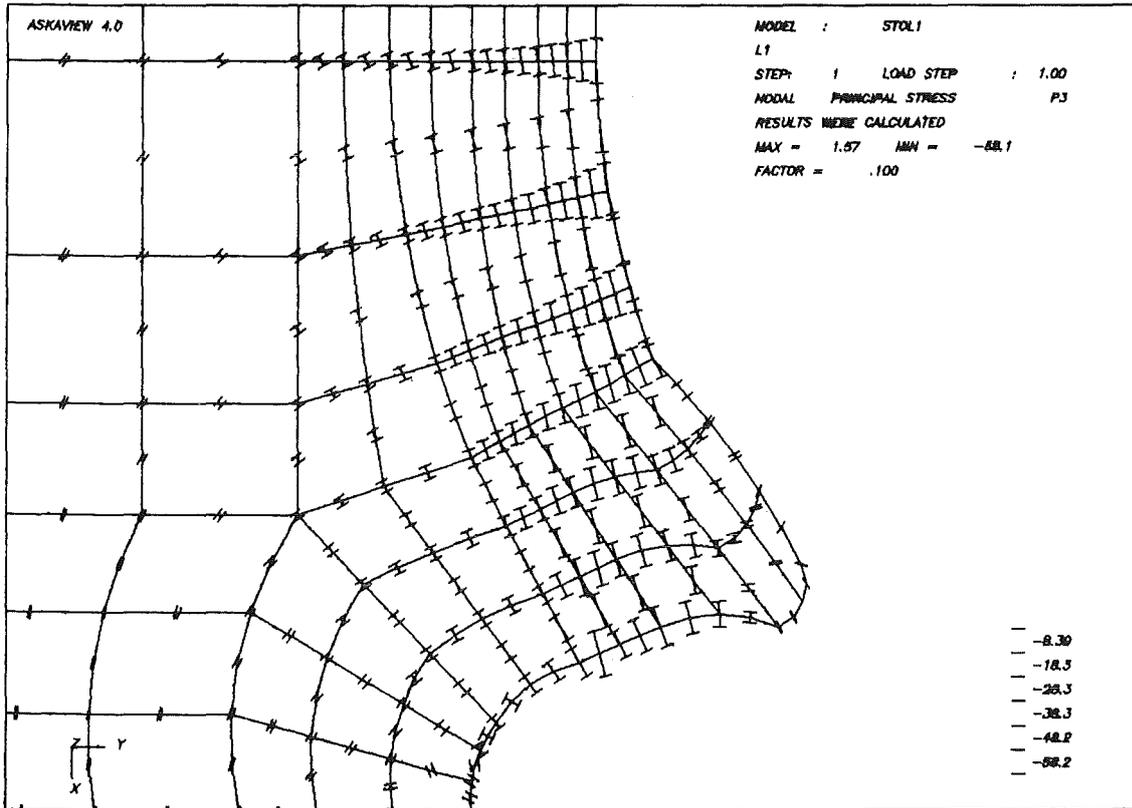
Abb.11a: Struktur- und Deformationsplot des orthotropen Laufes.  
(Das Koordinatensystem ist gegenüber den isotropen Rechnungen um 90° gedreht).



b) Isolinien der Axialspannungen



c) Isolinien der Von-Mises Spannungen



d) Verlauf der Hauptspannungstrajektorien

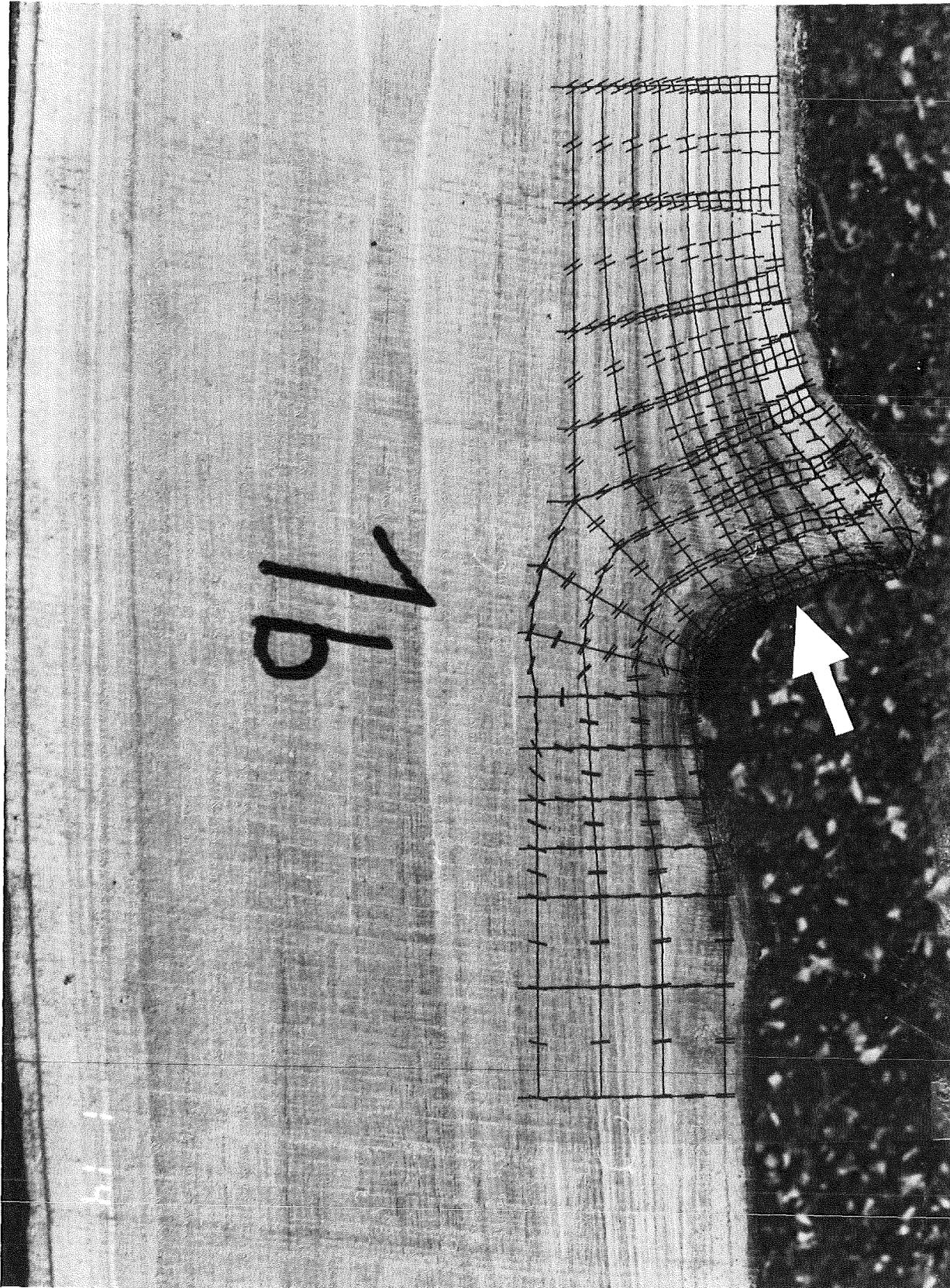


Abb.12: Sägeschnitt und zugehöriges Trajektorienbild passen ausgezeichnet zusammen. Die maximalen Kontaktspannungen liegen im Bereich des weißen Pfeiles.

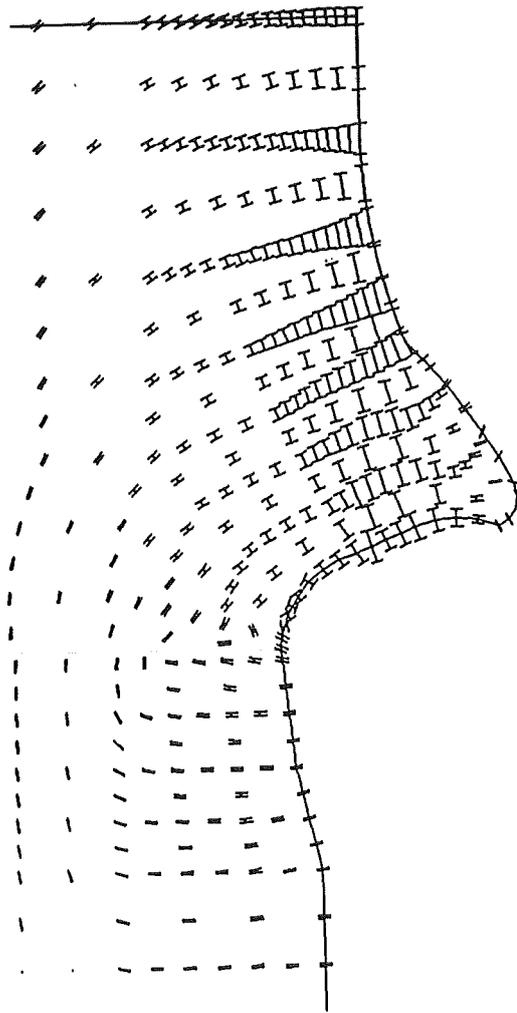
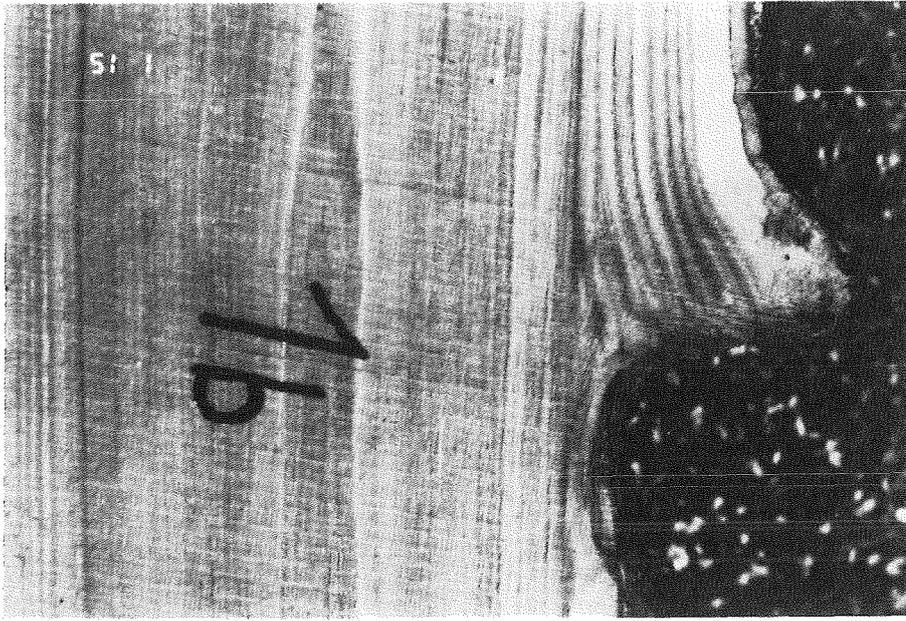


Abb.12: b) Nebeneinanderdarstellung

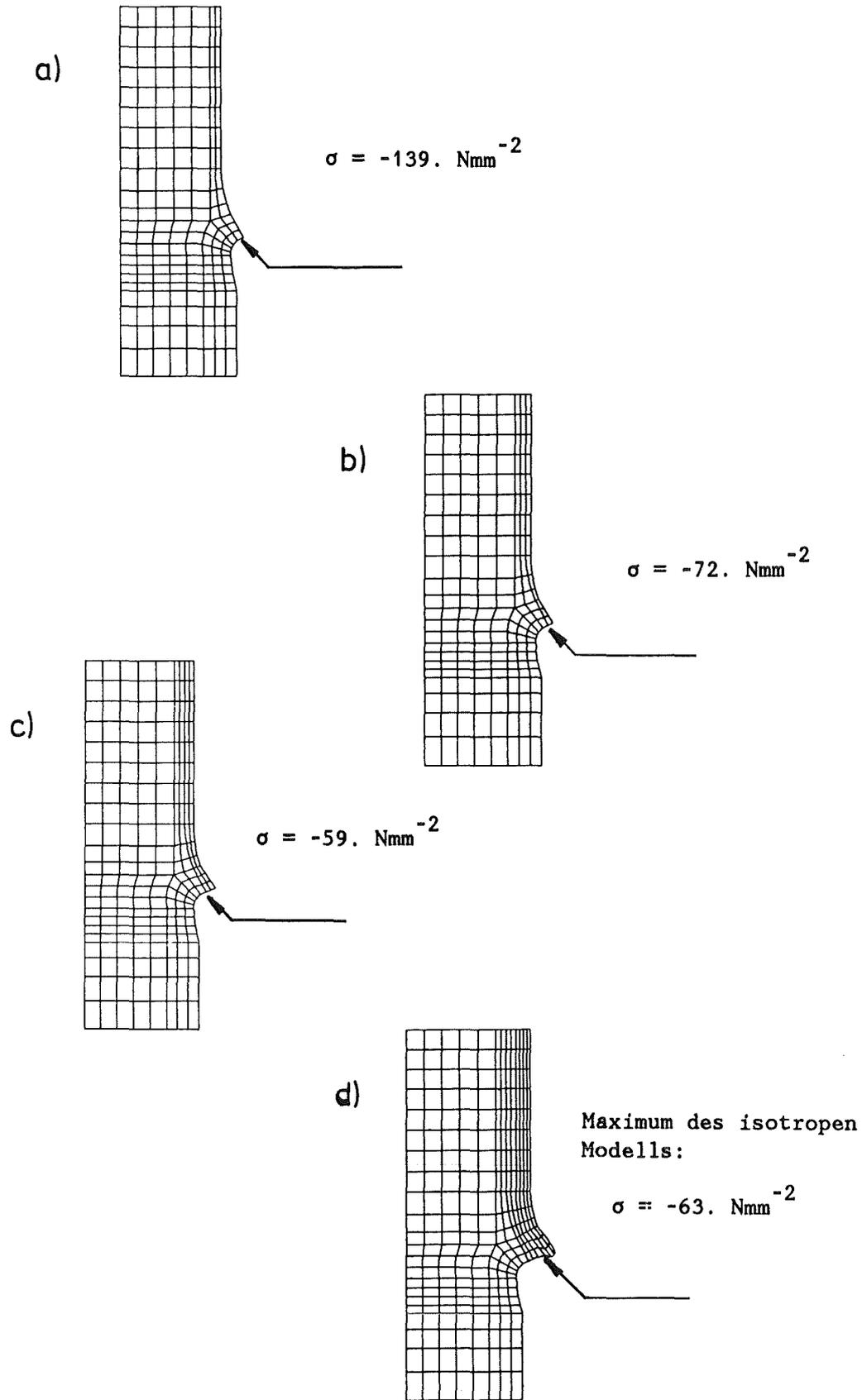


Abb.13: Abbau der Störspannung mit zunehmendem Modellierwuchs.