



KfK 4951
Oktober 1991

Die mechanische Steuerung der Jahresringformation bei Baumkontakten

L. Harzheim, C. Mattheck
Institut für Materialforschung

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

KfK 4951

Die mechanische Steuerung der Jahresringformation
bei Baumkontakten

L. Harzheim, C. Mattheck

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

DIE MECHANISCHE STEUERUNG DER JAHRESRINGFORMATION BEI BAUMKONTAKTEN

Zusammenfassung

Das CAO-Verfahren, mit dem das adaptive Wachstum von biologischen Kraftträgern simuliert werden kann, wurde erstmals auf Kontaktprobleme angewendet. Als Beispiel wurden ein Druck-zwiesel und ein Baum-Stein-Kontakt gewählt. Es zeigte sich, daß das CAO-Verfahren nahezu unverändert verwendet werden kann, um den Reaktionswuchs bei Kontaktproblemen qualitativ zufriedenstellend zu beschreiben. Dies ist eine weitere Bestätigung für die "Hypothese der konstanten Spannung auf der "Bauteil"-Oberfläche", die als Designregel für biologische Kraftträger formuliert wurde. Auch eine quantitative Beschreibung ist mit Hilfe einiger zu bestimmender Parameter möglich, so daß auch Vorhersagen getroffen werden können.

THE MECHANICAL CONTROL OF GROWTH RING FORMATION FOR THE CASE OF TREE CONTACT

Summary

The CAO-method, which is able to computer-simulate adaptive growth of biological load carriers, is firstly applied here to contact problems. The special problems considered are "compression tree fork" and a tree-stone contact. It is shown that the CAO-method could be applied quite straight-forward without drastic modifications. This is a further proof of the "constant stress hypothesis" as a design rule for biological load carriers. Beside good qualitative agreement also a quantitative prediction could be possible if the necessary biological parameters are known from nature.

1. Einleitung

Biologische Kraftträger, wie Bäume und Knochen, sind im mechanischen Sinn nichts anderes als Bauteile, die Belastungen ausgesetzt sind. Die Arterhaltung fordert, daß diese Kraftträger möglichst leicht und dennoch versagenssicher beschaffen sein müssen. Wie frühere Studien zeigten [1,2,3,4,5,13] scheint dies durch eine Formgebung erreicht zu werden, die bei Belastung eine "gerechte" Belastungsverteilung (constant stress) aufweist. Die daraus abgeleitete "Hypothese der konstanten Spannung auf der Oberfläche" ("Constant stress hypothesis") wurde in vielen untersuchten Beispielen immer wieder bestätigt. Weiterhin wird sie durch die Beobachtung von Wundheilprozessen an Bäumen und Knochen gestützt [2,3,4,6,7,8]. So stellt beispielsweise ein altes Astloch in einem Baum eine Kerbe im mechanischen Sinne dar, die eine lokale Spannungserhöhung (Kerbspannung) hervorruft und damit die homogene Spannungsverteilung stört. Als Reaktion versucht der betroffene biologische Kraftträger möglichst schnell wieder in eine optimierte Form zu wachsen, die dann wieder eine homogene Spannungsverteilung aufweist. Das zugrunde liegende adaptive Wachstumsgesetz läßt sich einfach so formulieren:

Lagere an hoch belasteten Stellen Material an, und unterlasse diese Anlagerung (Bäume) bzw. entferne Material (Knochen) an unterbelasteten Bereichen.

Diese Wachstumsregel stellt die Grundlage für das CAO-Verfahren [1,2,3,6,7,9,10,11] dar, mit dem numerisch das adaptive Wachstum bei Verwendung der Finite Elemente Methode (FEM) simuliert werden kann. Das Verfahren besteht aus folgenden Einzelschritten:

1. **MODELLGENERIERUNG:** Es wird ein FEM-Modell für die zu untersuchende Struktur erzeugt. An den Stellen der Oberfläche, die wachsen sollen, wird eine Schicht mit finiten Elementen gleicher Dicke erzeugt, die sogenannte Wachstumsschicht. Sie entspricht dem aktuellen Jahresring beim Baum. (Sollte es nicht möglich sein, eine Wachstumsschicht konstanter Dicke zu erzeugen oder kann im Laufe der Wachstumszyklen die konstante Dicke nicht gewährleistet werden, kann dies durch eine Schichtdickenkorrektur [11] in Schritt 3 ausgeglichen werden.)
2. **ELASTISCHER FEM-LAUF:** Es werden die Spannungen in der zu untersuchenden Struktur unter der zu erwartenden Betriebsbelastung mit Hilfe der Finite Elemente Methode berechnet.
3. **WACHSTUMSLAUF:** Von den berechneten Spannungen in der Wachstumsschicht wird eine vorzugebende Referenzspannung abgezogen und die so erhaltenen Spannungsdifferenzen formal gleich einer Temperatur gesetzt. Die Temperatur in der restliche Struktur wird Null gesetzt. Man berechnet mit diesem "Temperaturfeld" die thermischen Dehnungen und erhält dadurch das gewünschte Wachstumsverhalten. An den Stellen, an denen die Temperatur größer Null ist (d.h. die Spannung ist größer als die Referenzspannung) dehnt sich die Wachstumsschicht aus und man erhält somit Wachstum. Optionell kann man an den Stellen, an denen die Temperatur kleiner Null ist (d.h. die Spannung ist kleiner als die Referenzspannung) ein Zusammenziehen und damit ein Schrumpfen der Wachstumsschicht zulassen.

Damit sich die Wachstumschicht ungehindert ausdehnen kann, wird deren E-Modul um einen Faktor $1/400$ reduziert.

4. NEUE AUSSSENKONTUR: Die thermischen Verschiebungen der Außenknoten aus dem Wachstumslauf werden skaliert und zu den entsprechenden Koordinaten addiert, um die neue Außenkontur zu erhalten. Die Skalierung ist notwendig, um eine sinnvolle Wachstumsrate zu erhalten. Sinnvoll bedeutet, daß man wenig Wachstum zulassen sollte, wenn sich die Spannungen durch das Wachstum stark ändern. Dagegen sind auch größere Zuwachsraten möglich, wenn sich die Spannung nur wenig ändert.
5. NETZKORREKTUR: Das Netz wird (entsprechend dem Wachstum der Oberschicht) nachgezogen, um wieder eine konstante Dicke der Wachstumsschicht zu erhalten und um zu starke Netzdeformationen zu vermeiden.
6. Für einen neuen Wachstumszyklus beginne man wieder bei 2 mit wieder überall dem gleichen E-Modul.

Es konnte anhand vieler Beispiele gezeigt werden, daß sich mit der CAO Methode das adaptive Wachstum von biologischen Kraftträgern gut simulieren läßt. Dabei wurden sowohl Knochen als auch Bäume untersucht. Die Bäume haben den Vorteil, daß deren Lastgeschichte anhand der Jahresringe genau verfolgt werden kann. Die Jahresringe stellen eine Art Tagebuch dar. Der Knochen dagegen verwischt seine Lastgeschichte, da er an den unterbelasteten Stellen Material entfernt [13].

Bisher wurden jedoch noch keine Kontaktprobleme mit dieser Methode untersucht. Ein solcher Fall ist beispielsweise in Abb. 1 dargestellt, wo ein Baum durch einen Stein kontaktiert wird. Auf die dadurch entstehende Kontaktspannung reagiert der Baum mit Überwallung, was nach der "Constant stress hypothesis" verständlich ist. Auf diese Weise wird nämlich die lokal hohe Kontaktspannung durch Vergrößerung der Berührfläche homogenisiert und reduziert [8,13].

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob sich dieses Verhalten auch mit dem CAO-Verfahren simulieren läßt und welche Besonderheiten dabei zu beachten sind. Als Beispiele wurden der oben genannte Baum und ein Druckwiesel gewählt, deren Sägeschnitte jeweils in Abb. 2 und 3 zu sehen sind. Dabei wurde nicht angestrebt, die gewachsene Form exakt zu erhalten. Dazu müßten alle Einflüsse, die das Wachstum steuern, berücksichtigt werden, wie beispielsweise der mittlere Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur etc. im jeweiligen Jahr und die standortbedingte Lichtrate. Vielmehr sollte gezeigt werden, daß das wesentlich mechanisch gesteuerte Wachstumsverhalten bei Kontaktproblemen qualitativ richtig beschrieben werden kann und somit eine quantitative Beschreibung prinzipiell möglich ist. Weiterhin sollte untersucht werden, welche Parameter eventuell noch benötigt werden. Die verwendeten Modelle und die getroffenen Annahmen werden in Kapitel 2 erläutert.

2. Modelle und Berechnungen

2.1 CAO bei Kontaktproblemen

Alle FEM-Berechnungen und Wachstumsläufe wurden mit dem Programm ABAQUS [12] durchgeführt. Es wurden in allen Modellen rechteckige Elemente mit linearem Verschiebungsansatz für den ebenen Dehnungszustand verwendet. Dies bedeutet, daß alle Konturen als Polygonzüge approximiert werden, was zu teilweise etwas eckig aussehenden Konturen führt. Man könnte für die Darstellung die Ecken mit einem Spline abrunden, jedoch wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet. Als Materialparameter wurden für das Holz [8] ein E-Modul von $E = 11241 \text{ N/mm}^2$ und eine Poissonische Querszahl von $\nu = 0.3$ und für den Stein $E = 2.1E5 \text{ N/mm}^2$ und $\nu = 0.3$ gewählt. Die Orthotropie des Holzes wurde vernachlässigt, was nach [8] in guter Näherung möglich ist.

Das Programm ABAQUS erlaubt es, Kontaktprobleme mit großen Relativverschiebungen zu berechnen. Dazu wird auf einer der beiden Kontaktflächen eine sogenannte "Slide Line" [12] definiert, während die andere Fläche mit Interface-Elementen belegt wird. Letztere überprüfen, ob ein Kontakt bezüglich der "Slide Line" vorliegt, verhindern im Kontaktfall eine Durchdringung und übertragen den Kraftfluß. Weiterhin kann über einen Reibungskoeffizienten die Reibung zwischen den Kontaktflächen berücksichtigt werden. Testrechnungen zu den untersuchten Modellen zeigten jedoch keinen signifikanten Einfluß der Reibung auf die Ergebnisse, so daß der Reibungskoeffizient für die Rechnungen zu Null gesetzt wurde.

Bei Kontaktproblemen müssen zusätzliche Punkte bei der Wachstumssimulation beachtet werden. In früheren CAO-Simulationen wurden immer geometrisch lineare Rechnungen durchgeführt. Deswegen beeinflusste die absolute Größe der Belastung nicht die relativen Verhältnisse der auftretenden Spannungen und damit auch nicht die relativen Wachstumsraten. Da die Wachstumsraten nach jedem Wachstumslauf auf eine sinnvolle Größe skaliert werden, ist somit die Größe der Belastung bei linearen Problemen irrelevant. Dagegen ist ein Kontaktproblem immer nichtlinear, so daß sich die relative Spannungsverteilung mit der Größe der Last ändert. Dieses kann leicht am Beispiel des Baum-Stein-Kontaktes aus Abb. 1 verdeutlicht werden, wenn man ein Biegemoment als Last annimmt. Haben Baum und Stein im Modell einen geringen Abstand und ist das aufgebrachte Moment zu klein, um zum Kontakt zu führen, tritt auch keine Kontaktspannung auf und die Spannungsverteilung entspricht nicht den tatsächlichen Verhältnissen. Ist dagegen das Moment so groß, daß sich der Baumstamm um den Stein "wickelt", treten auch Kontaktspannungen oberhalb des wirklichen Baum-Stein-Kontaktes auf. Man muß also bei Kontaktproblemen immer anhand der Verschiebungen überprüfen, ob die verwendete Last auch realistisch ist. In der Praxis liegt jedoch in den meisten Fällen zwischen den Extremfällen ein großer Bereich, in dem sich die Spannungsverhältnisse nicht signifikant mit der Last ändern, so daß auch dort die Kenntnis der genauen Lastgröße nicht notwendig ist.

Weiterhin mußte der Wachstumslauf etwas verändert werden, um das richtige Wachstumsverhalten bei Kontaktproblemen zu erhalten. Die thermischen Dehnungen, die ursprünglich isotrop gerechnet wurden, führten durch die großen Dehnungen senkrecht zur Oberflächennormalen bei den Kontaktregionen zu einer viel zu starken Wulstbildung, wie sie in der Natur nicht beobachtet werden kann. Abhilfe konnte durch orthotropes Wachstum geschaffen werden, indem der thermische Ausdehnungskoeffizient nur in Richtung der Oberflächennormalen ungleich Null gesetzt wurde. Testrechnungen zeigten, daß durch die Orthotropie auch die Tendenz des CAO-Verfahrens, bei großen Wachstumsverschiebungen "Knitter" in der Schwellenschicht zu bilden, stark reduziert wird. Es ist deswegen immer empfehlenswert die thermischen Dehnungen im Wachstumslauf orthotrop zu rechnen.

Ein letzter Unterschied zum üblichen CAO-Verfahren besteht darin, daß bei Kontaktproblemen die aus dem Wachstumszyklus berechneten Verschiebungen nicht mehr nachträglich skaliert werden dürfen. Diese Verschiebungen wurden ja gerade so berechnet, daß keine Durchdringung der Körper an der Kontaktzone auftritt. Eine nachträgliche Skalierung würde dies zunichte machen. Deswegen müssen bei Kontaktproblemen bereits die Temperaturdifferenzen im 3. Schritt so skaliert werden, daß Wachstum in der gewünschten Größenordnung auftritt. Der Skalierungsfaktor s kann in guter Näherung aus der Formel

$$s = \frac{(d_{\max})}{(\alpha \cdot \Delta T_{\max})} \quad (\text{mit Schichtdickenkorrektur}) \quad (1a)$$

beziehungsweise

$$s = \frac{(d_{\max})}{(\alpha \cdot \Delta T_{\max} \cdot D)} \quad (\text{ohne Schichtdickenkorrektur}) \quad (1b)$$

berechnet werden, wobei d_{\max} die gewünschte Wachstumsverschiebung an der Stelle der maximalen "Temperaturdifferenz" ΔT_{\max} , D die Dicke des entsprechenden Elementes und α der verwendete thermische Ausdehnungskoeffizient ist (üblicherweise $\alpha = 1$).

Die notwendige Skalierung, deren Größe von der jeweiligen Wachstumsphase abhängt, kann bei der Darstellung der Ergebnisse zu Verwirrung führen. Meist ist man nämlich gezwungen, während der ersten Wachstumszyklen (bei meist noch kleiner Kontaktfläche) die Skalierung klein zu wählen, weil dort schon geringe Zuwächse zu starken Spannungsänderungen führen, während später auch größere Skalierungen möglich sind. Stellt man dann alle gewonnenen Wachstumskonturen in einem Bild zusammen, so liegen im allgemeinen die ersten sehr eng zusammen, während die Abstände gegen Ende immer größer werden. Dies erweckt den Eindruck, daß die simulierte Wachstumsrate insbesondere auch im kontaktfernen Bereich am Anfang geringer ist als gegen Ende. Grund dafür sind jedoch die verschiedenen Skalierungen, die auch als Wachstumsdauern interpretiert werden können. Deswegen wurde für die Ergebnisse eine Darstellung gewählt, bei der die Zeitabstände (Skalierungen) bei allen Konturen gleich ist. Dazu wurden alle Skalierungen aufsummiert, dieser Wert als Gesamtzeit interpretiert und daraus die Konturen mit gleichen Zeitabstand bestimmt. Die teilweise benötigten Zwischenkonturen wurden durch lineare Interpolation gewonnen.

2.2 Der Druckzwiesel

Für die Ausgangsstruktur des Druckzwiesels wurde ein einfaches 2D-Modell erzeugt, dessen Netz, Randbedingungen und Last in Abb. 4 dargestellt ist. Es wurde für jeden der beiden Stämme nur eine Viertelstruktur erzeugt. Durch die gewählten Randbedingungen besitzt das Modell eine Spiegelebene bezüglich der y-Achse, so daß de facto in der Rechnung jeweils eine halbe Struktur enthalten ist. Die jeweils abgewandte Hälfte der beiden Stämme wurde vernachlässigt, was gerechtfertigt ist, wenn der Einfluß der Kontaktspannung dort gering ist. Wie die Ergebnisse zeigten, war das der Fall. Der in der Natur durch das Reaktionsholz verursachte Druck der beiden Stämme gegeneinander wurde in dem Modell durch eine Einzelkraft F simuliert. Als Referenzspannung wurde der Wert Null gewählt. Dies bedeutet, daß im Wachstumsschritt nur das Wachstum auf Grund der Kontaktspannung, nicht jedoch das normale Jahreswachstum, das auch ohne Kontakt vorhanden wäre, simuliert wird.

Das Modell und die Wachstumsschicht wurden während der Wachstumszyklen wie nachfolgend beschrieben modifiziert, um eine realistische Beschreibung zu bekommen. So ist aus Sägeschnitten bekannt, daß das Kambium an den kontaktierten Flächen abgequetscht wird. Es ergibt sich ein Verlauf des Kambiums, wie er schematisch in Abb. 5a gezeigt ist. Um dieses Verhalten zu simulieren wurden jeweils alle innen anliegenden Elemente, wie in Abb. 5b dargestellt, aus der Wachstumsschicht entfernt und die entsprechenden Knoten fixiert. Dies hatte zusätzlich den Vorteil, daß numerische Probleme vermieden wurden, die infolge der durch die hohen Spannungen bewirkten Ausdehnungen dieser Elemente sonst auftreten würden. Weiterhin ist bekannt, daß sich ein gemeinsames durchgehendes Kambium bildet, wenn sich die Jahresringe senkrecht zur Kontaktfläche gestellt haben, d.h. wenn sie knickfrei von einem Teilstamm des Zwiesels in den anderen übergehen können [13]. Dies wurde dadurch berücksichtigt, daß von da an ein neues Modell mit einer durchgehenden Wachstumsschicht erzeugt und weiterverwendet wurde. Hier wurden natürlich keine "Slide Line" und Interface-Elemente mehr benötigt, weil keine Relativbewegungen durch Gleiten der Kontaktflächen mehr unterstellt zu werden brauchen.

Abb. 6 zeigt das Ergebnis der Wachstumszyklen bis zur Senkrechtstellung der Außenkonturen zur Kontaktfläche. Das entsprechende neue Modell mit durchgehender Wachstumsschicht ist in Abb. 7 und die Ergebnisse der nachfolgenden Wachstumsläufe sind in Abb. 8 dargestellt.

Die Abb. 9 zeigt das wesentliche Gesamtergebnis, wobei jetzt, wie oben beschrieben, nur Konturen dargestellt sind, deren zeitlicher Abstand gleich ist, d.h. die mit gleichem Skalierungsfaktor gefunden worden wären. Es ist deutlich das überhöhte Wachstum am Anfang (lokal stark verbreiterte "Jahresringe") infolge der hohen Kontaktspannung zu erkennen und die im Laufe des Wachstums abnehmende Wachstumsrate, was auf die Reduktion der wuchsstimulierenden Kontaktspannung durch die Vergrößerung der Kontaktfläche zurückzuführen ist. Weiterhin zeigt sich gegen Ende die Wulstbildung, die auch der Zwiesel in Abb. 3 auf seiner verschweißten Seite aufweist. Es ist auch deutlich erkennbar, daß der Einfluß der Kontaktspannung an den Außenkanten vernachlässigbar gering ist und somit kein kontaktbedingtes Wachstum hervorruft. Dies be-

stätigt nachträglich die Näherung, die abgewandte Hälfte der Stämme in dem Modell zu vernachlässigen.

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß das allgemeine Wachstumsverhalten des Druckzwiesels durch die CAO-Methode realistisch beschrieben und durch die Kontaktspannung mechanisch gesteuert wird.

2.3 Baum-Stein-Kontakt

Das 2-dimensionale FEM-Modell, das nach dem Sägeschnitt in Abb. 2 erzeugt wurde, ist mit Randbedingungen und Last in Abb.10 dargestellt. Anders als beim Druckzwiesel ist hier die Belastung hauptsächlich durch die Windlast gegeben. Da der betrachtete Baum nur im oberen Bereich Belaubung trug und somit auch dort der Hauptangriffspunkt der Windlast anzusetzen ist, kann der Baum mechanisch als Balken mit oben angreifender Querkraft angesehen werden. Dieses führt zu einem linear ansteigendem Moment von der Krone bis zu den Wurzeln. Im Prinzip müßte man die effektive Höhe der angreifenden Windlast für die Belastung kennen. Nimmt man jedoch eine effektive Höhe von 8m an (was sicher realistisch ist) so ergibt sich im relevanten Bereich (20cm) des Modells nur eine relative Änderung des Momentes von ca. 2.5%. Dieser geringe Effekt wurde vernachlässigt und deswegen ein konstantes Moment verwendet.

Das Moment führt nicht nur zu einer Kontaktspannung infolge des Steinkontaktes in dem Baumstamm, sondern auch zu einer Biegespannung, die das normale Wachstum der Jahresringe neben Umweltregulatoren (Wasser, Wetter etc.) mitsteuert. Hier ist also, im Gegensatz zum Druckzwiesel, der normale Zuwachs und der durch die Kontaktspannung stimulierte Korrekturwuchs nicht zu trennen. Die Wachstumsschicht wurde während der Wachstumszyklen genauso wie beim Druckzwiesel gemäß Abb. 6 behandelt, um das Abquetschen des Kambiums zu simulieren.

Das Ergebnis ist in Abb. 11 dargestellt, wobei die Wachstumskonturen mit gleichem Zeitabstand dargestellt sind. Es zeigt sich, daß die Überwallung des Steins qualitativ richtig wiedergegeben wird. Im Vergleich zum Sägeschnitt ergeben sich jedoch einige signifikante Unterschiede. So weisen auch die Ringe beim Sägeschnitt (Abb. 2) am Anfang in der Nähe des Steinkontaktes ein überhöhtes Wachstum auf, aber bei weitem nicht so stark, wie bei der FEM-Simulation. Die Ursache ist, daß beim CAO das Wachstum direkt proportional zur Spannung ist, d.h. eine n-fach überhöhte Spannung führt auch zum n-fach überhöhtem Wachstum. Dieses Verhalten ist in der Natur jedoch nur begrenzt realisiert, da das Wachstumspotential des Baumes biologisch und umweltbedingt begrenzt ist. So scheint bei dem betreffenden Baum, wie der Sägeschnitt zeigt, höchstens eine ca. vierfach überhöhte Jahresringbreite lokal möglich zu sein. Offensichtlich ist noch größeres Wachstum auch bei höherer Spannung nicht mehr möglich. Diesen Effekt könnte man prinzipiell beim CAO-Verfahren berücksichtigen, indem man nur eine maximale "Temperaturdifferenz" beim Wachstumsschritt zuläßt.

Ein weiterer Unterschied zeigt sich in der Form der Außenkontur, die beim FEM-Modell fast gradlinig ist, während sie beim Sägeschnitt stark nach innen gekrümmt verläuft. Diese Abweichung ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß ein 2D-Modell im ebenen Dehnungszustand verwendet wurde. In diesem Fall wird das Modell intern als unendlich dicke Platte berechnet, d.h. es hat einen rechtwinkligen Querschnitt im Gegensatz zum runden Querschnitt beim Baum. Es ist bekannt, daß sich die hinsichtlich Spannungskonstanz optimierten Formen eines mit Querkraft belasteten einseitig eingespannten Balkens für verschiedene Querschnitte drastisch unterscheiden. So erhält man für den kreisförmigen Querschnitt eine Höhen-Durchmesser-Relation $d \propto (H - z)^{1/3}$, dagegen beim rechteckigem Querschnitt $d \propto (H - z)^{1/2}$ (d =Durchmesser, H =Höhe des Baumes, z =Koordinate in Stammrichtung gemessen von der Einspannung (Wurzelansatz)). Eine realistische Beschreibung der Außenkontur kann somit wahrscheinlich nur in einem 3D-Modell gelingen, was jedoch zu einem erhöhtem Rechenaufwand führt. Die Abweichungen des Modells vom Vorbild sind somit erklärbar und zumindestens prinzipiell behebbar.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde versucht mit Hilfe des CAO-Verfahrens den Reaktionswuchs bei Kontaktproblemen biologischer Kraftträger am Beispiel eines Druckzwiesels und eines Baum-Stein-Kontaktes zu simulieren. In beiden Fällen erhält man eine qualitativ zufriedenstellende Übereinstimmung von Modell und Vorbild. Dieses zeigt, daß im Rahmen der "Constant stress hypothesis" [3,4,13] der Korrekturwuchs allein als spannungsgesteuerter Mechanismus verstanden und mit dem CAO-Verfahren erfolgreich simuliert werden kann. Es eröffnen sich damit zu ersten Mal die Möglichkeiten, sowohl den kontaktgesteuerten Wuchs nachträglich zu simulieren und damit die Belastungsgeschichte und Einflußgrößen zu verstehen als auch Vorhersagen über das mittlere zukünftige Wachstum zu treffen, was man als eine vorausschauende Dendrochronologie bezeichnen könnte.

Um auch eine quantitative Übereinstimmung zu erhalten, sind nur kleine Änderungen nötig, die jedoch die Kenntnis von Parametern voraussetzen. Diese sind noch nicht bekannt und müssen somit noch experimentell ermittelt werden. So kann man beim Druckzwiesel das normale Wachstum einbeziehen, indem man auf alle Knoten der Wachstumsschicht eine konstante Temperaturdifferenz ΔT_w hinzuaddiert. Das Verhältnis der maximalen Kontaktspannung T_k^{max} zu ΔT_w ist ein Maß für die Stärke, mit der der Zwiesel zusammengedrückt wird. Dieser Wert, der wahrscheinlich je nach Verhältnissen und Standort der Bäume variiert, kann aus Vergleich der Jahresringe mit FEM-Rechnungen mit verschiedenen Parameterwerten bestimmt werden. Liegen Erfahrungen über die Größenordnung der Parameter vor, sind entsprechende Vorhersagen möglich.

Weiterhin muß bekannt sein, um welchen Faktor λ mechanisch bedingtes überhöhtes Wachstum auftreten kann. Dieser Wert, der wahrscheinlich von Baumart zu Baumart variiert, kann durch Vergleich der Jahresringe im kontaktfreien und im kontaktierenden Bereich bestimmt und durch anschließende FEM-Simulation bestätigt werden. Für den Baum-Stein-Kontakt muß die Rechnung jedoch in einem 3D-Modell erfolgen, da in der 2-dimensionalen Näherung zu große Abweichungen auftreten.

So zeigt sich, das der Grundmechanismus der Jahresringformierung bei Kontaktproblemen prinzipiell einfach und zu verstehen ist, die exakte Simulation jedoch die genauere Kenntnis von biologischen, umweltspezifischen und individuellen Parametern verlangt, die jedoch grundsätzlich bereitgestellt werden können. Damit wäre der CAO-Methode ein weiteres Anwendungsgebiet, nämlich das der Jahresringvorhersage, auch bei Kontaktproblemen erschlossen. Nach wie vor ist die einzige Aufforderung an das Bauteil: Wachse in einen Zustand räumlich homogener Spannungsverteilung!

Literatur

- [1] C. Mattheck, 'Ein intelligentes CAD-Verfahren auf der Basis biologischen Wachstums zur Streckung der Ribinitierungsphase technischer Bauteile', DVM-Handbuch der 21.Tagung des AK "Bruchvorgänge", Bad Nauheim 27.-28. February 1989, 135-144
- [2] C. Mattheck, 'Design and Growth Rules for Biological Structures and their Application to Engineering', Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol 13 Nr.5 (1990), 535-550
- [3] C. Mattheck, 'Engineering components grow like trees', Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 21 (1990), 143-168
- [4] C. Mattheck, 'Why they grow, how they grow - the mechanics of trees', Arboricultural Journal 14 (1990), 1-17
- [5] C. Mattheck and H. Huber-Betzer, 'The Baud-curve - a General Design Principle for Biological Load Carriers (in German)', Allg. Forst- u. J. Ztg., 160.Jg., 9/10 (1989), 194-200
- [6] C. Mattheck and S. Burkhardt, 'A New Method of Structural Shape Optimization on the Basis of Biological Growth', Int. J. Fatigue 12 Nr.3 (1990), 185-190 (1990)
- [7] C. Mattheck and G. Korseska, 'Wound Healing in a Plane (Platanus Acerifolia (Ait.) Willd.) an Experimental Proof of its Mechanical Stimulation', Arboricultural Journal 13 (1989), 211-218
- [8] C. Mattheck, H. Huber-Betzer and K. Keilen, 'Die Anpassung eines Baumes an die Kontaktbelastung durch einen Stein (in German)', Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK 4526 (1989)
- [9] C. Mattheck and H. Moldenhauer, 'Intelligent CAO-Method Based on Biological Growth', Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 13 (1990), 41-51
- [10] C. Mattheck, 'Computer Aided Optimization - Engineering Components Grow like Trees into an Optimized Shape without Notch Stresses', Information Brochure of the Karlsruhe Nuclear Research Center (1989) (available from the authors)
- [11] C. Mattheck, L. Harzheim, 'Effect of Loading on the Optimized Shape of a Kinked Bar', Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 22 (1991), 236-244
- [12] Hibbitt, Karlsson and Sorensen, 'ABAQUS', User-Manual , Providence, Rode Island (1985)
- [13] C. Mattheck, 'Die Baumgestalt als Autobiographie - Einführung in die Mechanik der Bäume und ihre Körpersprache', Verlag des Kernforschungszentrums Karlsruhe (1991), engl. Übersetzung 'Trees-The Mechanical Design' demnächst im Springer-Verlag, Heidelberg



Abb.1 Umwallung eines Steines durch einen kontaktierenden Baum.

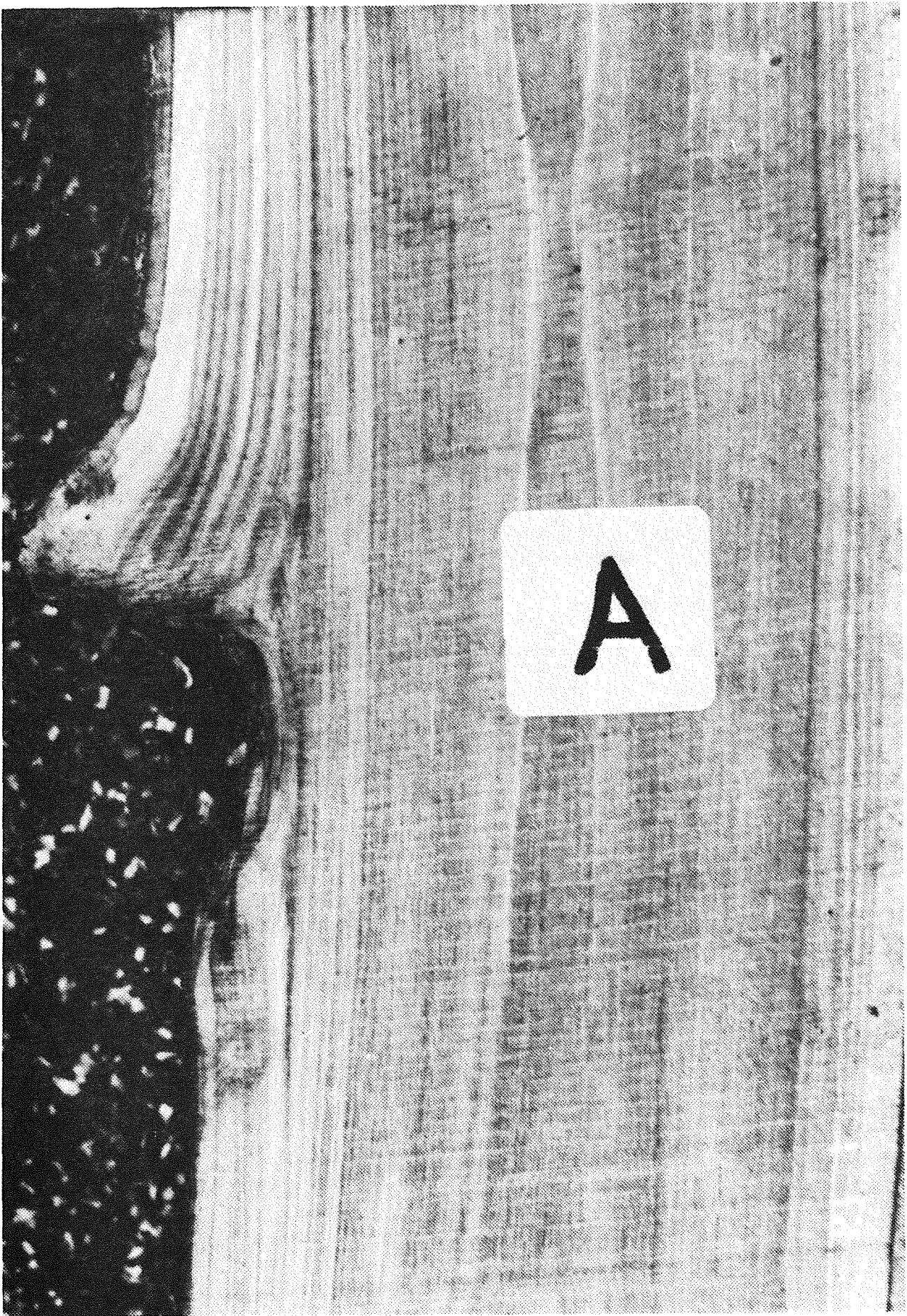


Abb.2 Axialer Sägeschnitt durch den kontaktierenden Stammbereich.

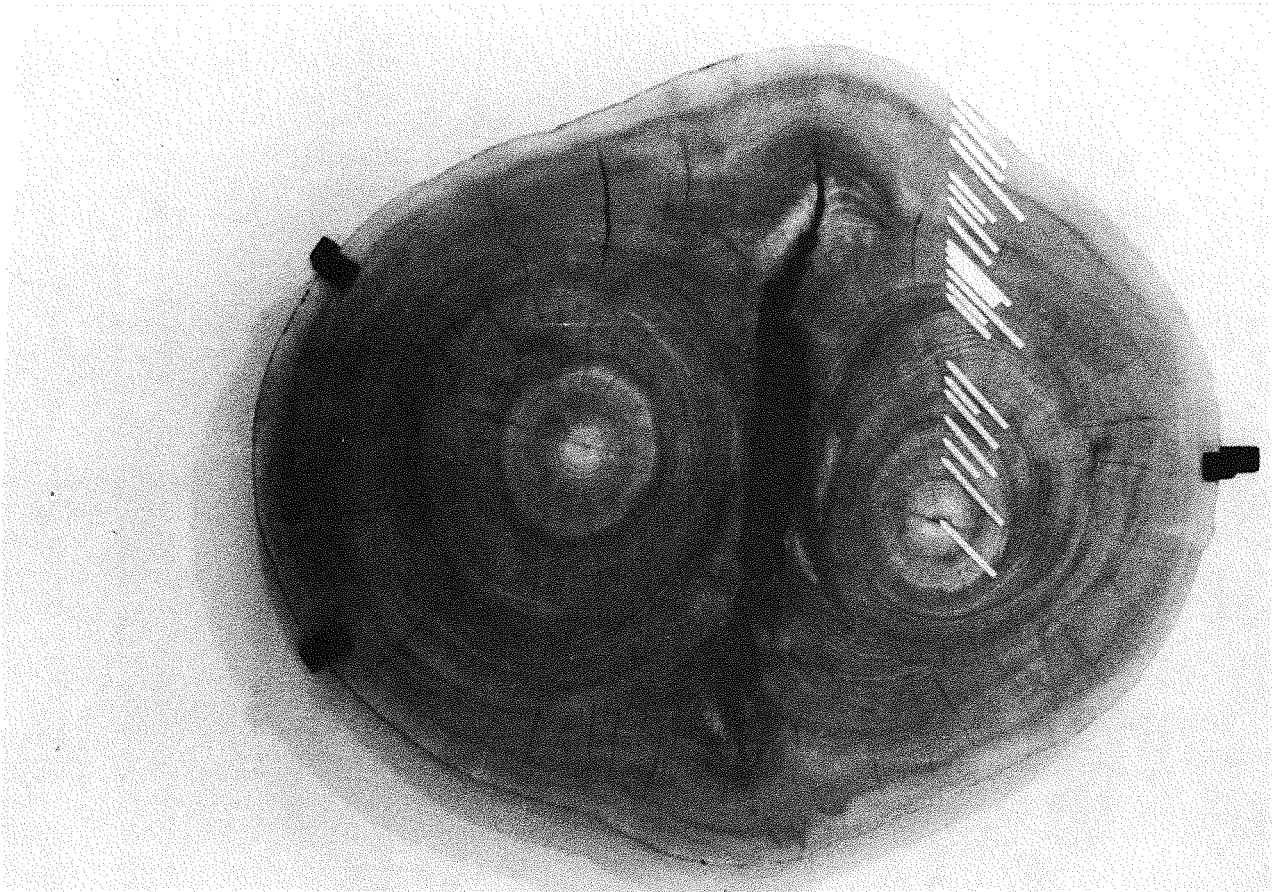


Abb.3 Waagerechter Sägeschnitt durch einen Druckzwiesel mit einseitig verschweißtem allumfassenden Jahresring. (Diesen Sägeschnitt durch die "Umland-Ulme" überließ uns freundlicherweise Prof. Jurzitza, Institut für Botanik I, Universität Karlsruhe.)

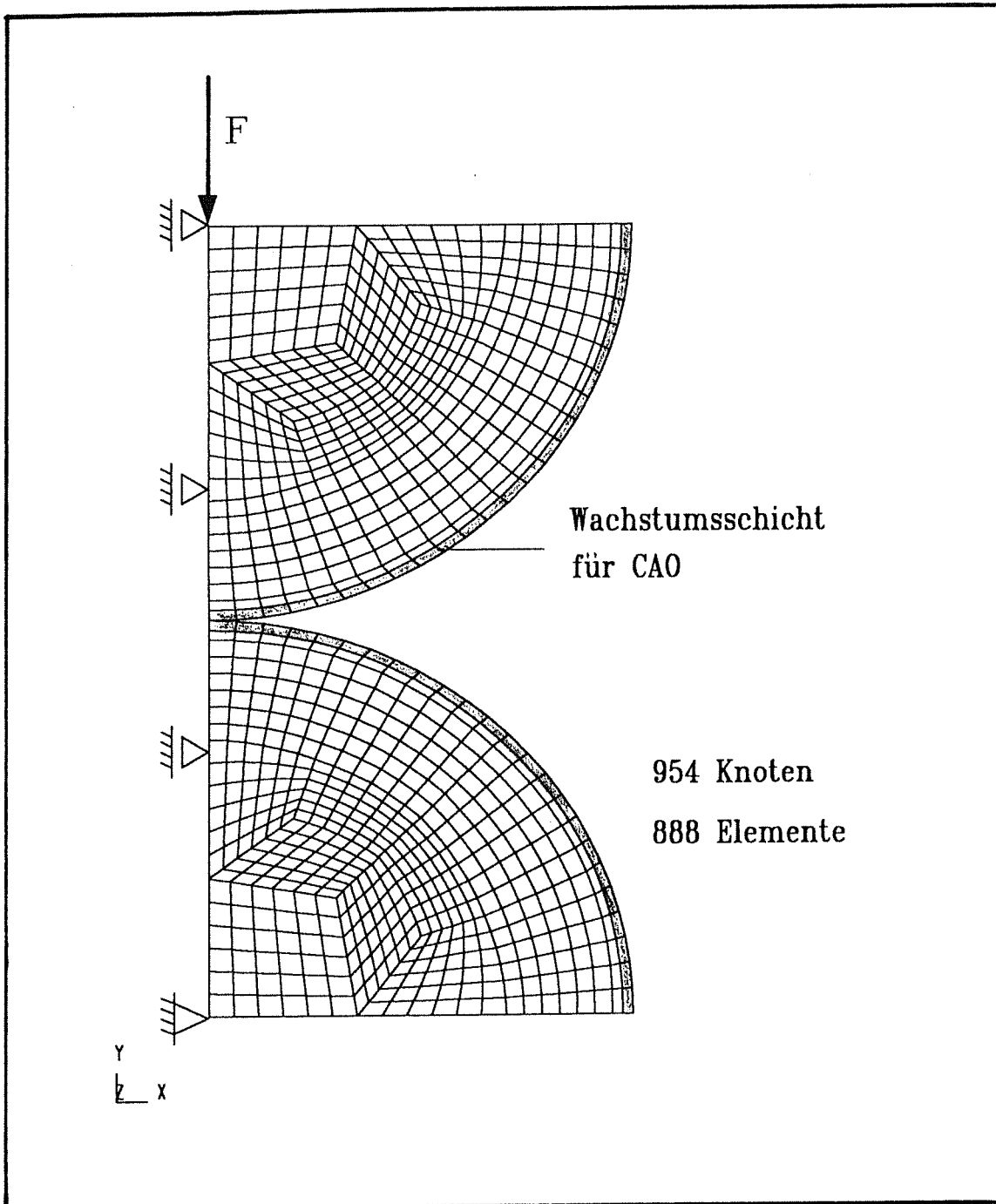


Abb.4 FEM-Modell des Druckziewiels mit Randbedingungen, Last und Definition der Wachstumsschicht für den ersten Wachstumsschritt.

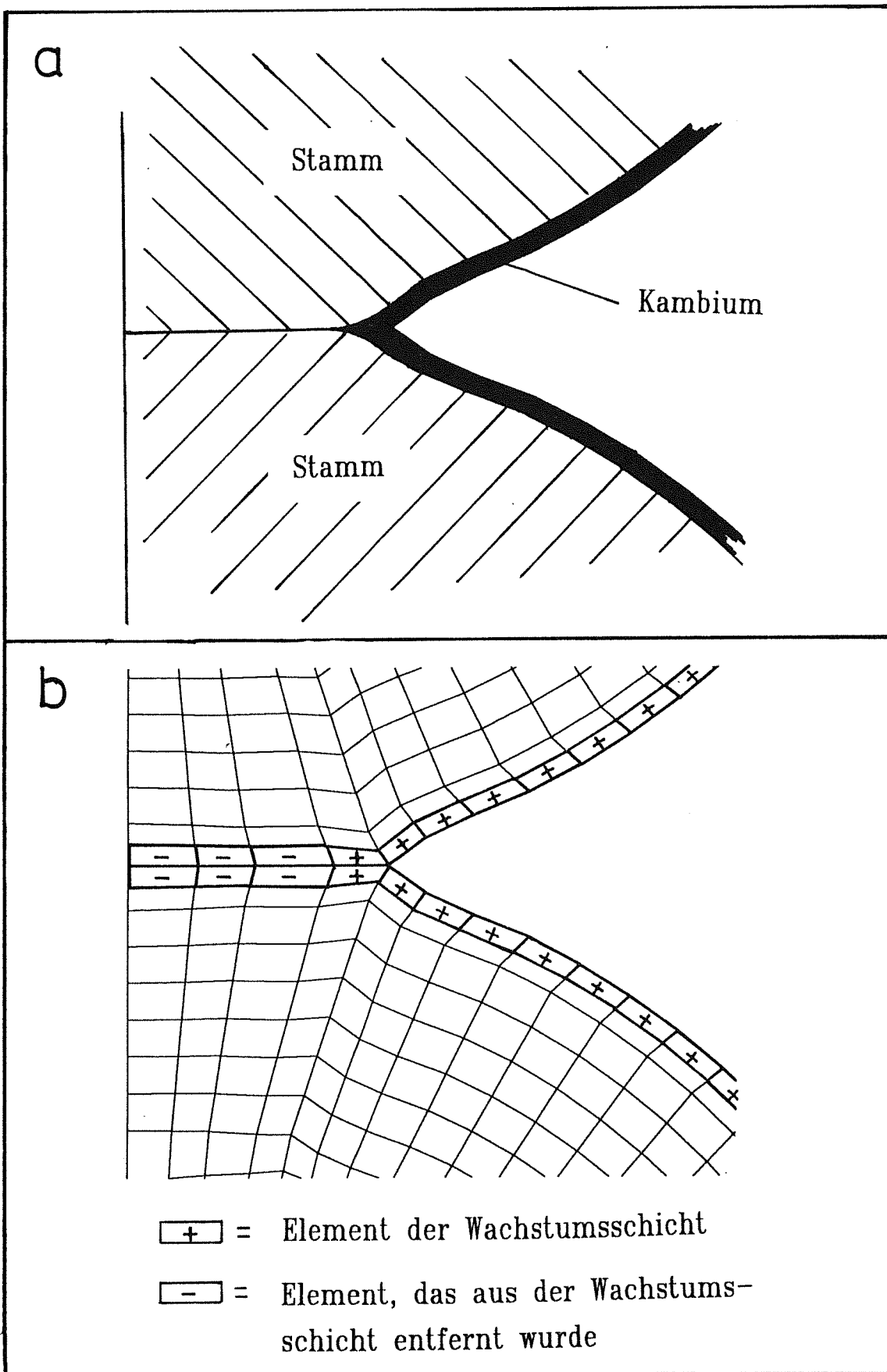


Abb.5 Modifikationen der Wachstumsschicht im Kontaktbereich.

- a. Verlauf des Kambiums bei kontaktierenden Flächen (schematisch).
- b. FEM-Modell zur Simulation dieses Kambiumverlaufes.

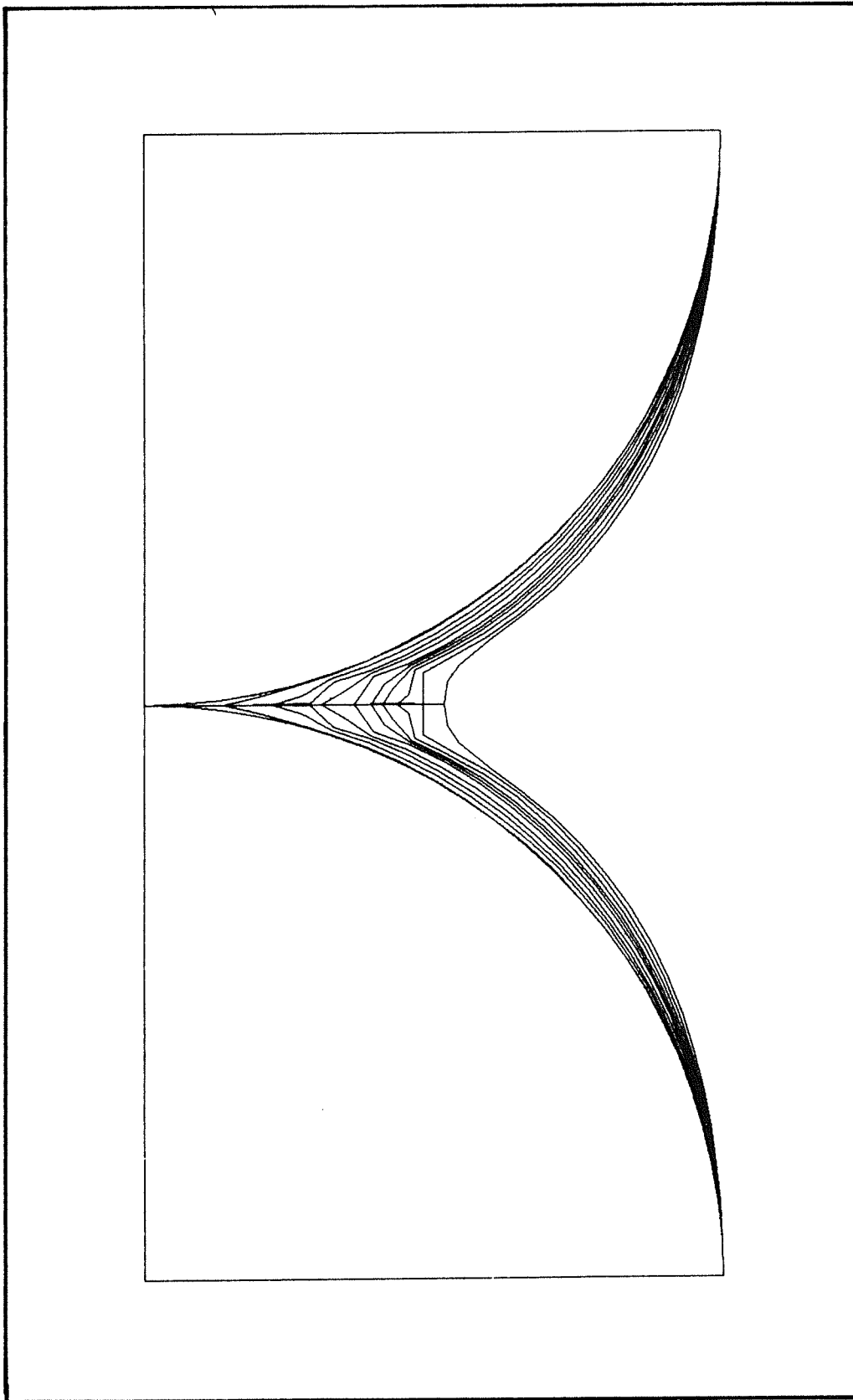


Abb.6 Ergebnis der Wachstumszyklen mit dem ersten Modell (vor der Ausbildung gemeinsamer Jahresringe) für den Druckzwiesel. Zur besseren Übersicht wurde nur jeweils jede zweite Kontur dargestellt.

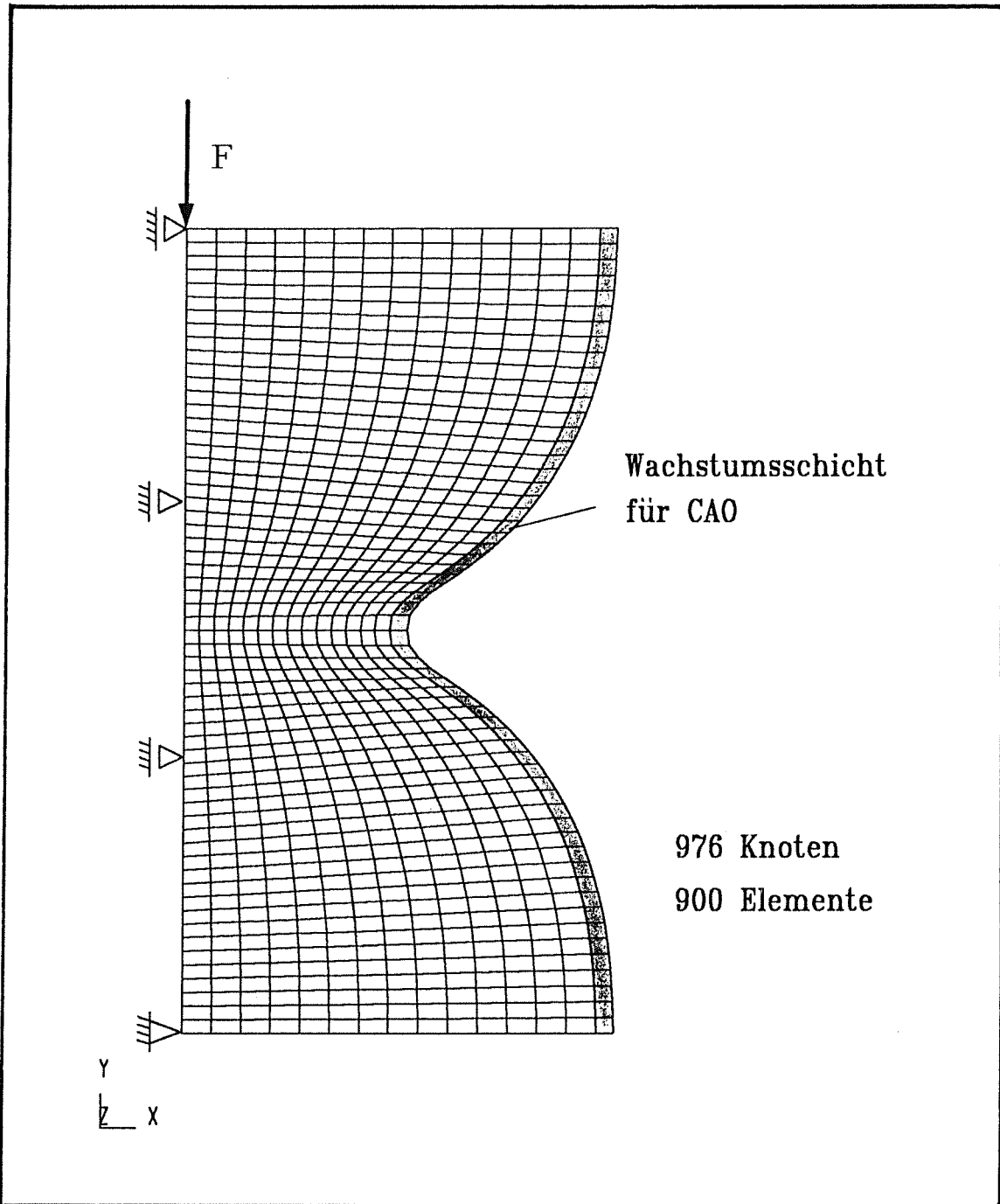


Abb.7 Neues Modell für den Druckzweisel mit durchgehender Wachstumsschicht (allumfassende Jahresringe).

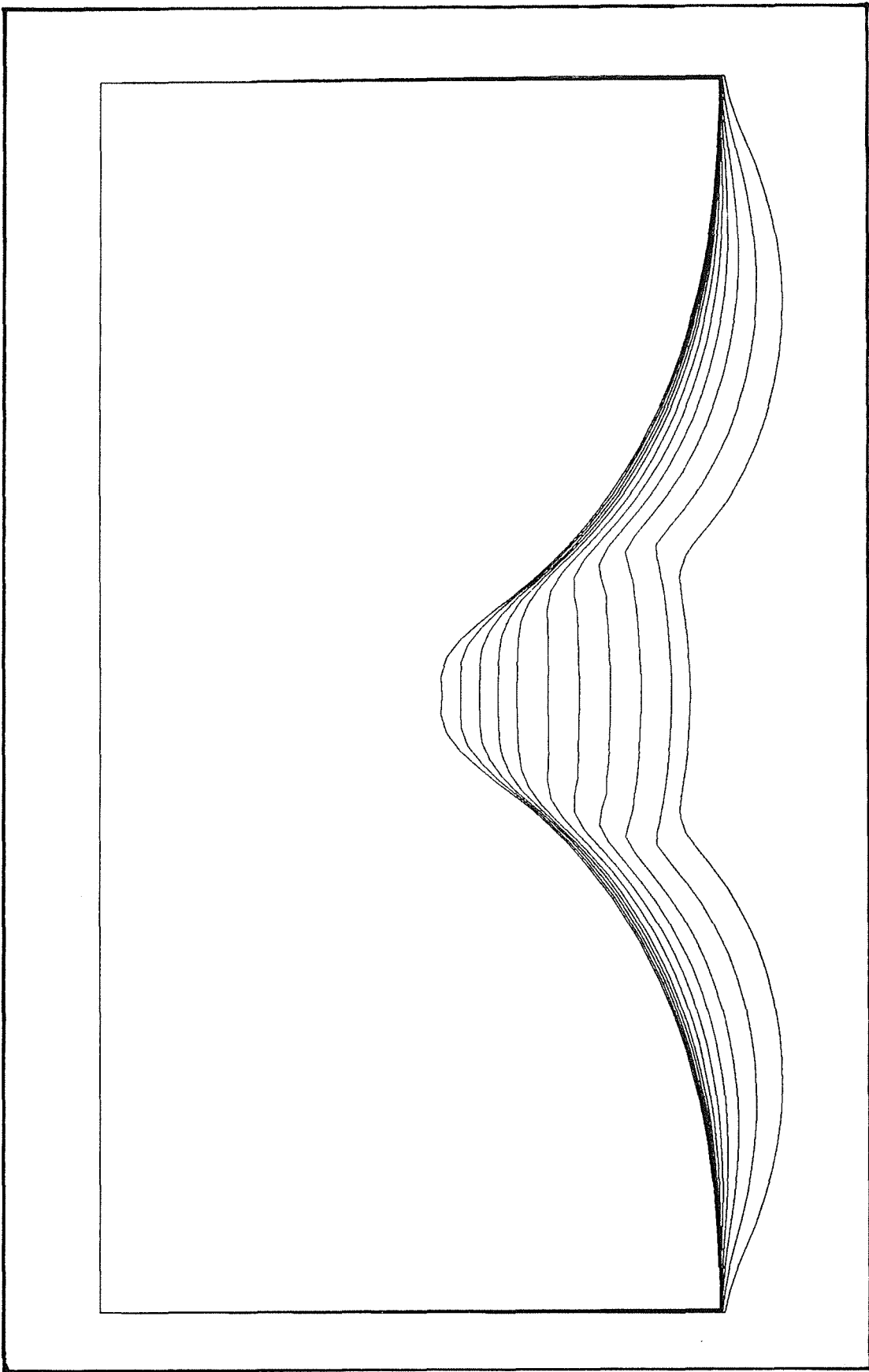


Abb.8 Ergebnis der Wachstumszyklen nach der Jahresringverschweißung für den Druckziesel.

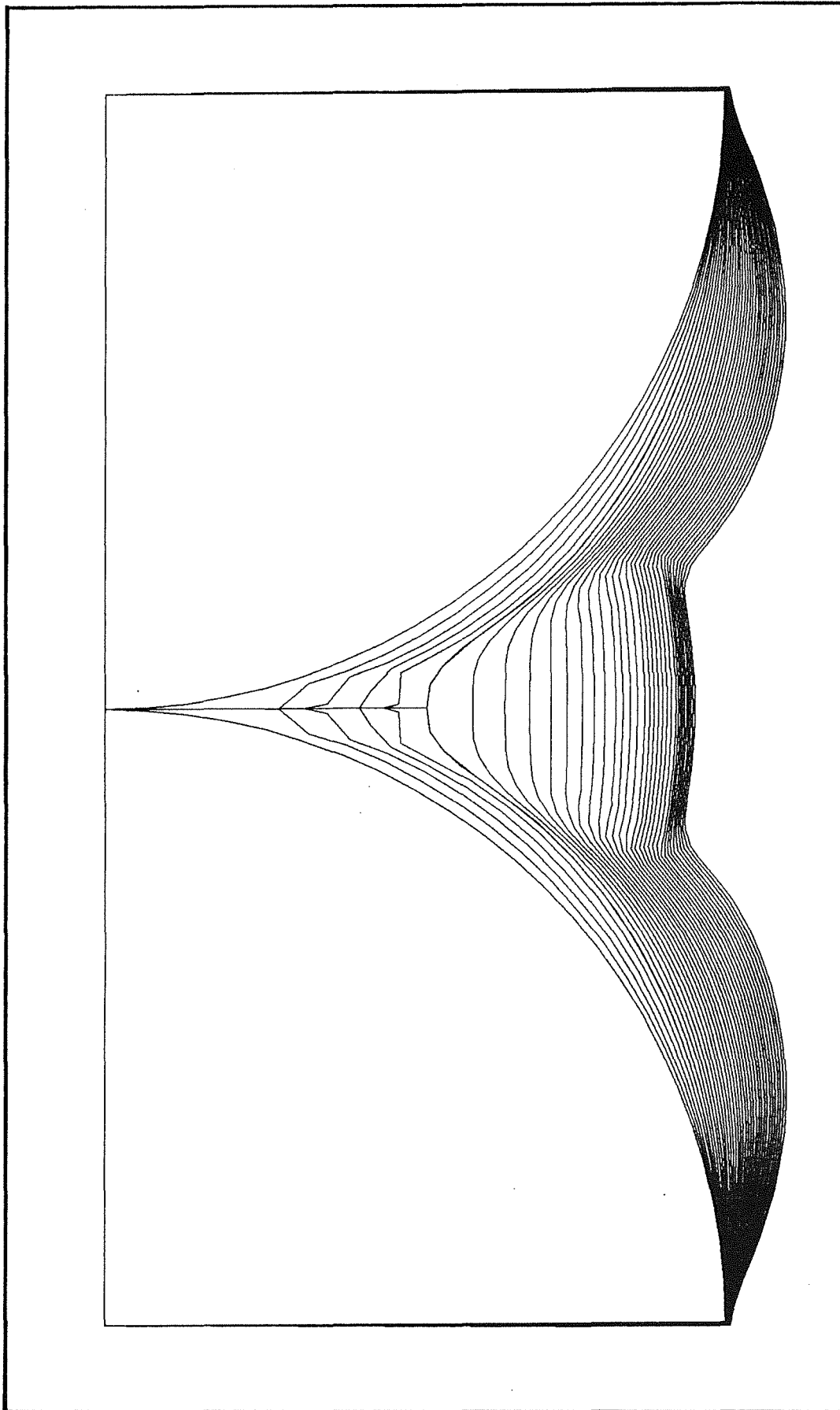


Abb.9 Gesamtdarstellung der Jahresringformation im Druckwiesel (nur kontaktbedingte Zuwächse wurden berücksichtigt). Es sind nur Konturen mit gleicher Wuchsdauer dargestellt.

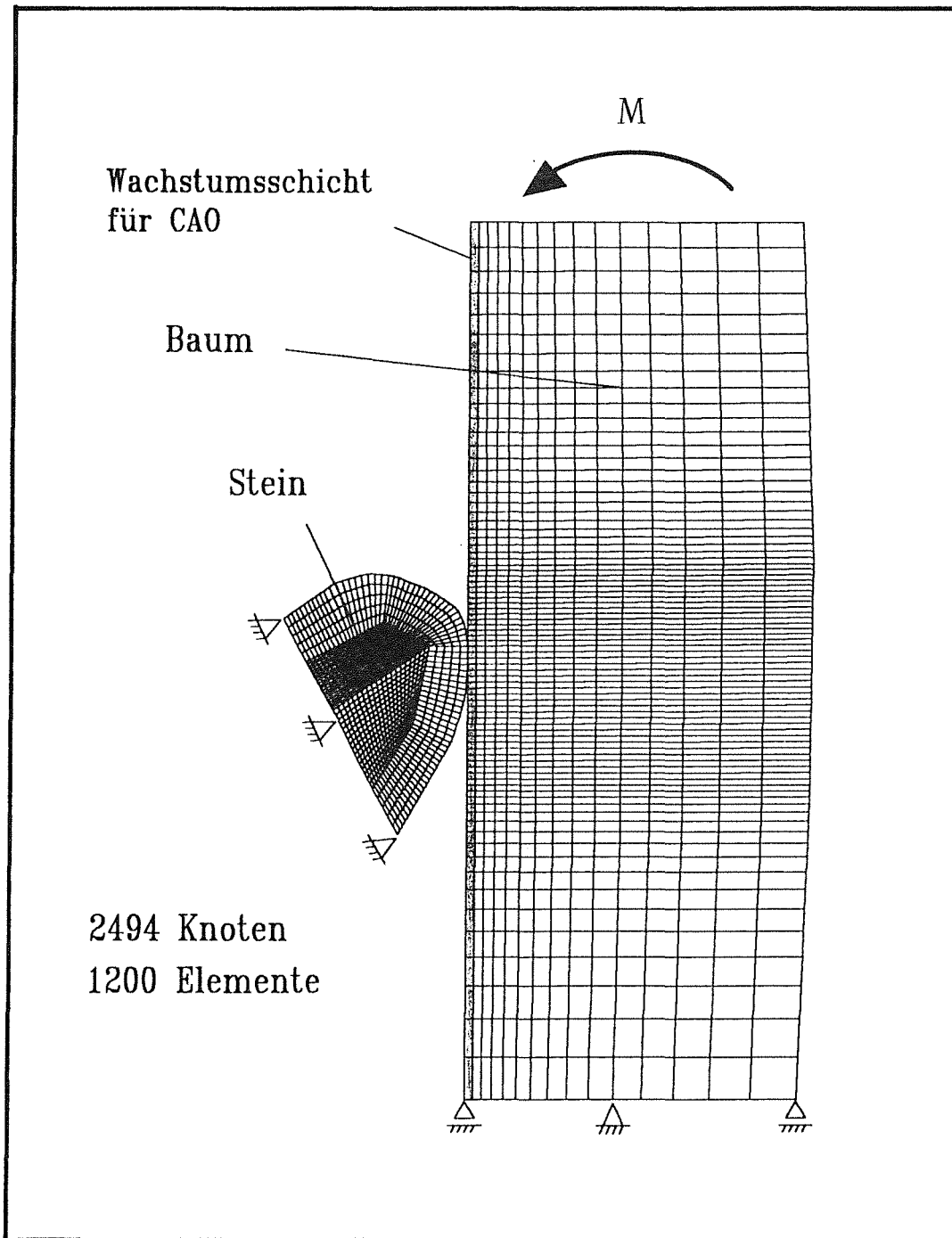


Abb.10 FEM-Modell für den axialen Schnitt des Baum-Stein-Kontaktes aus Abb. 1.

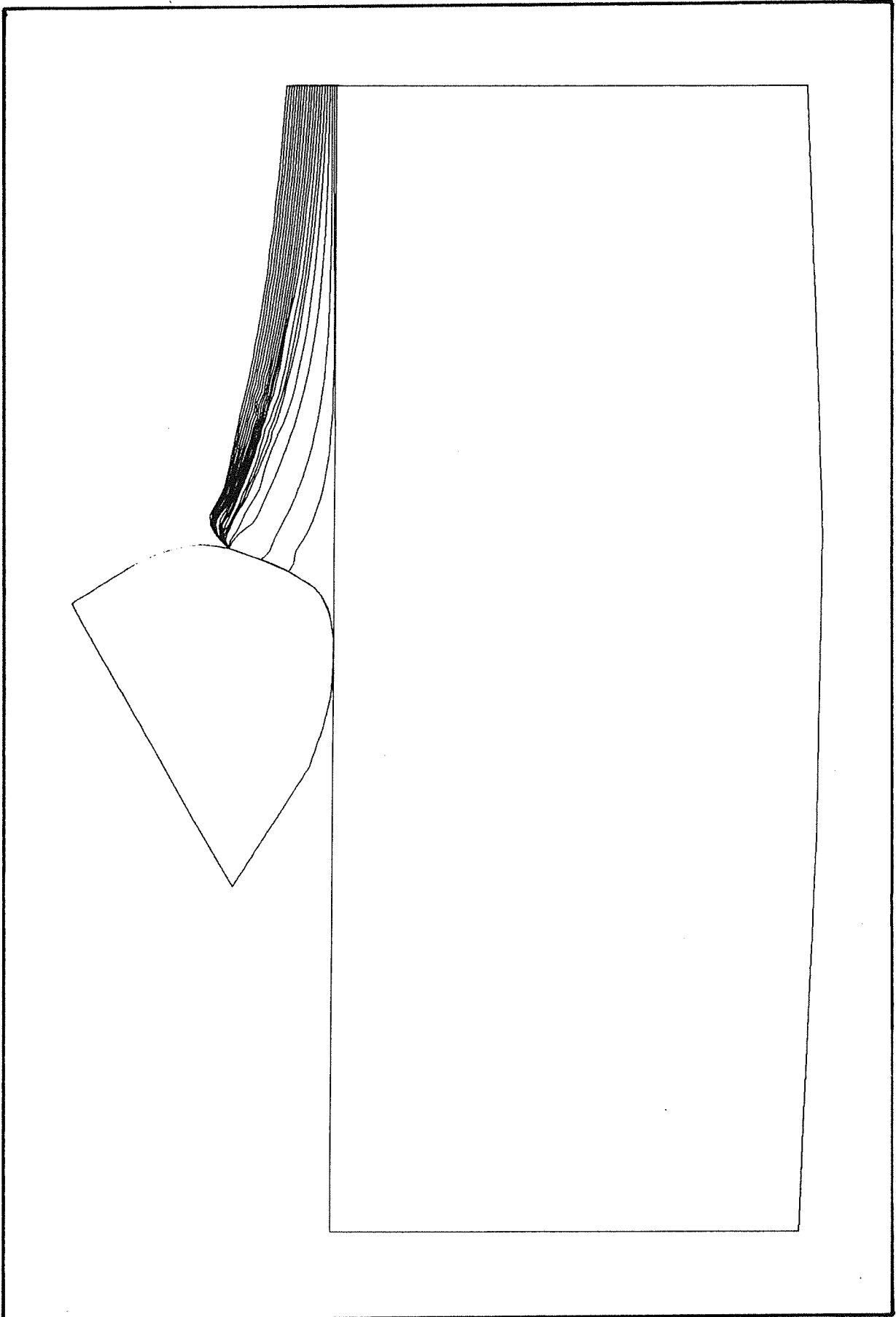


Abb.11 Ergebnis der Wachstumssimulation bei Baum-Stein-Kontakt. Es sind nur Konturen mit gleicher Wuchsdauer dargestellt.