

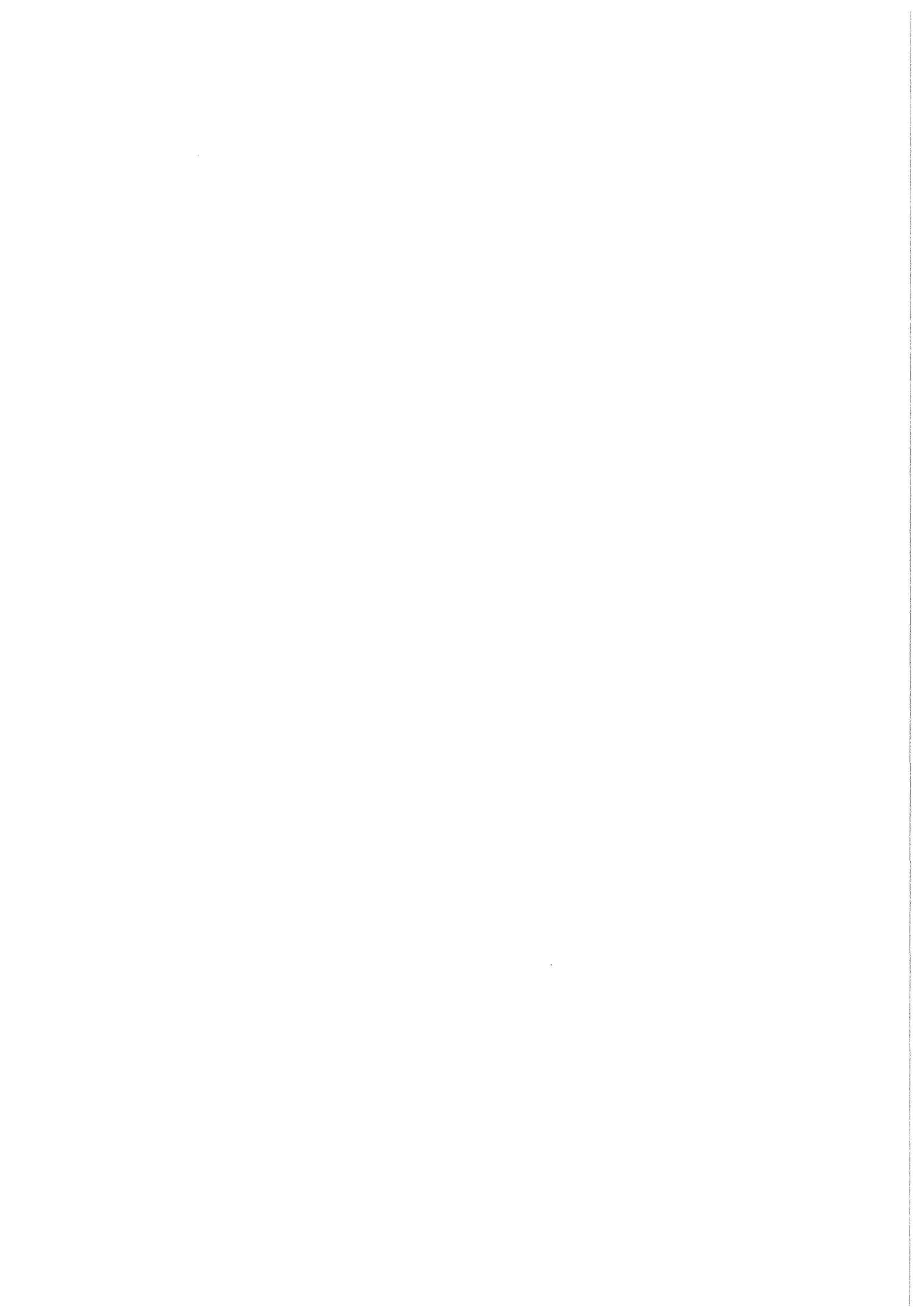
KfK 4486
Dezember 1988

Warum sie wachsen, wie sie wachsen

Die Mechanik der Bäume

C. Mattheck
Institut für Material- und Festkörperforschung

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Material- und Festkörperforschung

KfK 4486

WARUM SIE WACHSEN, WIE SIE WACHSEN
DIE MECHANIK DER BÄUME

C. Mattheck

Diese Arbeit wurde 1988 an der Universität Karlsruhe
anlässlich der Verleihung der *venia legendi* als
Antrittsvorlesung vorgetragen

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

WARUM SIE WACHSEN, WIE SIE WACHSEN - DIE MECHANIK DER BÄUME

Zusammenfassung:

Das wesentliche Ziel bei der Ausbildung der Baumgestalt ist die Schaffung eines weitgehend homogenisierten Spannungszustandes auf der Stammoberfläche. Dies gilt auch für Details wie Ast- und Wurzelanbindungen, Baumwunden und bei Fremdkörperkontakt. Wird die Homogenität des Spannungszustandes gestört, versucht der Baum durch Korrektur-, Modellier- oder Heilungswuchs sich selbst zu reparieren. Die zugehörigen Mechanismen werden diskutiert und mit modernen Computermethoden theoretisch beschrieben.

WHY THEY GROW, LIKE THEY GROW - THE MECHANICS OF TREES

Summary:

The main biomechanical aim in tree growth is a homogeneous distribution of all surface stresses acting in the tree. This is also valid for details such as branch joints and root joints, as well as for woundhealing and contact stresses due to interaction with other bodies or trees. If there is any local disturbance of the homogeneous surface stress state, the tree tries to repair itself. Related mechanisms are discussed and described theoretically with modern computer methods.

WARUM SIE WACHSEN, WIE SIE WACHSEN - DIE MECHANIK DER BÄUME

Genau vor 75 Jahren hielt Prof. Dr. Ludwig Klein anlässlich des Rektoratswechsels an der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe eine Festrede mit dem Titel 'Ästhetik der Baumgestalt', in der unter anderen Schönheitsdefinitionen der Begriff der 'pathologischen Schönheit' mit einem gewissen Gewicht geprägt wurde [1].

In der vorliegenden Abhandlung soll der biomechanische Hintergrund dieses Schönheitsbegriffes beschrieben werden. Wir wollen versuchen herauszufinden, was die alte Baumgestalt so prägt, daß in der Tat ein Zustand bewältigter Verletzung und Krankheit von den meisten als schön, zumindest als interessant, empfunden wird.

Wie Abb.1 zeigt, sind es folgende wesentliche Mechanismen, die die Gestalt eines Baumes bestimmen:

- Die hormonelle Dominanz der Endknospe (Epinastie)
- Die Neigung des Baumes parallel zur Schwerkraft zu wachsen, wobei die Äste und der Stamm der Schwerkraft entgegen wachsen (negativer Geotropismus oder Gravitropismus) und die Wurzeln in Richtung der Schwerkraft wachsen (positiver Geotropismus oder Gravitropismus).
- Die Neigung in Richtung des Lichtes zu wachsen (Phototropismus).

Die Endknospe [2] bildet u.a. das Hormon Auxin und zwar um so mehr, je mehr sie sich senkrecht über dem Baumzentrum befindet. Sie gibt ein Signal an die Folgeknospen, das man etwa mit 'wachse langsamer und halte Abstand' zusammenfassen kann und das von Münch [3] als 'Epinastie' bezeichnet wird. Mechanisch bedeutet es, daß die dem Haupttrieb zugewandte Seite des Nebentriebes stärker wächst, um diesen vom Haupttrieb wegzukrümmen und vom dominanten Endtrieb Abstand zu halten. Andererseits bewirken offenbar die Biegespannungen, die von der Schwerkraft hervorgerufen werden, einen 'Aufrichtemechanismus', der der Epinastie entgegen wirkt. Während die 'Epinastie' mechanisch weniger zugänglich ist, läßt sich die 'Neigung, entgegen der Schwerkraft zu wachsen' (negative Geotropie) recht gut durch Untersuchungen der Baumquerschnitte belegen, was später geschehen soll.

Es gibt noch weitere Arten von 'Nastien' und 'Tropismen', die in [9] sehr übersichtlich aufgeführt werden. Sie sollen hier nicht alle beschrieben

werden. Es sei nur kurz zusammengefaßt, daß ein **Tropismus** eine **Pflanzenbewegung in Reizrichtung** ist. Das heißt, der Reiz muß vektorieller Natur sein (gerichtetes Licht, Schwerkraft etc.). Dagegen sind **Nastien reizungerichtet**, meist können sie auch gar nicht reizgerichtet sein, weil der Reiz selbst skalarer Natur (Temperatur etc.) ist [9].

Sind die in Abb.1 symbolisch gezeigten Mechanismen normal wirksam, so stellt sich eine Gleichgewichtslage der Äste ein, die zu sehr geraden, parallel ausgerichteten Anordnungen führt (Abb.2). In anderen Fällen findet man in Stammnähe ein Überwiegen der Epinastie und mit zunehmendem Abstand vom Stamm eine stetige Aufrichtung der Äste, so daß fast parallele Ast-Bogenscharen entstehen (Abb.3).

Ziel ist in jedem Falle eine im Rahmen der Festigkeitseigenschaften des Holzes möglichst große Baumkrone für viel Lichtaufnahme!

Stirbt der Wipfeltrieb, aus welchen Gründen auch immer, ab oder wird er mechanisch verletzt, so übernimmt ein Seitentrieb in seiner Nähe die Führung. Ein Schicksal, das sich in Abb.4 gleich zweimal ereignete und dem Baum eine eigenartige Form gab. Gibt es mehrere Seitentriebe in vergleichbarer Lage zum Baumzentrum, also mit etwa gleicher hormoneller Situation, so kann es zu regelrechten 'Konkurrenzkämpfen' kommen (Abb.5), wo mehrere Seitentriebe sich vergleichbar stark und vergleichbar vertikal entwickeln. Ein verzögerter Hormonstop führt gelegentlich zu weit ausholenden Umlenkungen der Seitentriebe bis sie die richtige Lage als Wipfeltrieb eingenommen haben (Abb.6).

Es stellt sich nun die Frage, wie das **Korrekturwachstum** mechanisch realisiert wird [7]. Das Reaktionsholz ist anerkannte Ursache der mechanischen Korrekturbelastung. Als **Reaktionsholz** bezeichnet man allein auf einer Seite des Stammes oder Astes zugewachsenes Holz, das eine zusätzliche Spannung erzeugt, die den Baum oder Ast entgegen der Schwerkraft aufrichtet. Der Unterschied zwischen Laub- und Nadelbaum ist nun aber, daß sich beim **Nadelbaum** sogenanntes **Druckholz** (Rotholz) (Abb.7a) bildet, beim **Laubbaum** dagegen **Zugholz** (Weißholz) auf der Zugseite der Biegung, die durch die Schwerkraft oder sonst bewirkt wird (Abb.7b). Grundsätzlich ist auch der gerade stehende Baum vorgespannt, jedoch mit sich selbst im Gleichgewicht. Er wird im äußeren Ring auf Zug und im Inneren auf Druck belastet, was beim Holzschlagen ein konvexes Verwölben der Schnittfläche bewirkt, die zur **Hirnrissbildung** führen kann. Beim schrägen Baum ist das Reaktionsholz mit dem Rest des Querschnittes und dem externen Moment im Gleichgewicht. Bei Nadelbäumen ist das Reaktionsholz als **Druckholz** ausgebildet. Das in Abb.7a schematisch gezeigte Druckholz wird auf der Druckseite der Biegung angelagert, d.h. auf der konvexen oder der erdzu-

gewandten Seite des Baumes. Da es nicht nur das Schweremoment zu kompensieren hat, sondern auch den Restquerschnitt 'verbiegen' muß, um den Baum aufzurichten, kann es zugseitig zu fast völligem Wachstumsstop kommen, wie Abb.8 zeigt. Das Druckholz ist auf der konvexen Seite des Stammes. In Abb.9 ist zu sehen, wie die Druckholzkorrektur wirkt. Der linke Stamm wächst völlig gerade ohne die Bildung von Reaktionsholz. Der rechte Stamm muß wohl durch äußeren Einfluß (Steine, alter Baumstamm etc.) anfangs zu schrägem Wuchs gezwungen worden sein, den er durch Druckholzbildung kompensiert, bis beide Stämme gerade und parallel zueinander wachsen. Die Reaktionsholzbildung bleibt also sofort aus, sowie der angestrebte Zustand erreicht ist. Bei Laubbäumen ist das Reaktionsholz als **Zugholz** ausgebildet. Wie bereits Abb.7b zeigte, setzt das Reaktionsholz der Laubbäume auf der Zugseite der Biegung an. Abb.10a zeigt nunmehr einen fast völligen Wachstumsstop auf der Druckseite der Biegung. Auf Abb.10b ist deutlich der Zusammenhang zwischen der Krümmung dieses Laubbaumes und der Anlagerung des Reaktionsholzes auf der Zugseite der Biegung zu sehen. Die Rißbildung in der Hirnfläche ist typisch, entlang des kleinen Durchmessers verlaufend.

Die Abb.9 entsprechende Abbildung, die bei Laubbäumen den Aufrichtemechanismus zeigt, ist Abb.11. Die anfangs stärker geneigten Bäume werden auch stärker aufgerichtet. Die geraden Bäume bilden praktisch kein Zugholz.

Dieser soeben beschriebene Mechanismus kann jedoch instabil werden. Ein interessantes Beispiel vom Fehlverhalten des Zugholzes ist in Abb.12 zu sehen: Der linke anfänglich stärker geneigte Stamm wird aufgerichtet und wegen seiner stärkeren Neigung und Zugholzbildung an den eher geraden, rechten Stamm gepreßt. Dieser wird damit bezüglich des Schweremomentes entlastet und verspürt noch weniger Neigung sich aufzurichten. Umgekehrt jedoch trägt der linke Baum nun auch noch den Widerstand des rechten zuzüglich zum Schweremoment. Er erzeugt noch mehr Zugholz usw.. Dies führt zum 'Verschweißen' der Baumstämme als Ausdruck eines 'instabilen' Kraftzuwachses. Derselbe Mechanismus ist in Abb.13 mit derselben Folge an einer Baumgabelung erkennbar. Die seitlichen Überwallungen entstehen durch Modellierwuchs, der die Berührspannungen reduziert, was später noch ausführlich beschrieben wird. Die Tatsache, daß auch andere Momente als das Schweremoment Reaktionsholz induzieren können, wird auch deutlich aus dem Reaktionswuchs gegen Windbelastung. Nadelbäume bilden Druckholz auf der Leeseite, Laubbäume Zugholz auf der Luvseite. Eine ähnliche Reaktion ist bei Seitendruck durch einen Nachbarbaum denkbar.

Nachdem das Reaktionsholz als Erzeuger aufrichtender Biegemomente erklärt wurde, soll nachfolgend der Eigenspannungszustand eines aufrechten Baumes ohne Anwesenheit von Reaktionsholz beschrieben werden.

Während das Reaktionsholz eine Art von 'Korrekturwuchs' ist, gibt es nach Kübler [4] durchaus auch im nicht korrekturbedürftig gewachsenen Baumstamm bereits Eigenspannungen, deren Entstehung wie folgt erklärt wird: Es kommt zu einer Längsschrumpfung der Zellen auf der Außenseite des Baumes, in dem diese in Umfangsrichtung quellen. Die resultierenden Spannungsprofile unter Annahme homogenen isotropen Materials gibt Kübler in [4,5] an. In Abb.14 sind die in [4] angegebenen Spannungen qualitativ dargestellt, wobei auch die Entschärfung der gefährlichen Druckspannungen bei Belastung durch Windbiegung dargestellt ist.

Die axiale Vorspannung der Bäume, die außen aus Zug- und innen aus Druckspannungen besteht, hat also, obwohl ohne primären Einfluß auf die Gestalt des Baumes, eine **erhaltende Funktion**, indem externe Druckbelastungen gemildert werden, da Holz, wie auch in [6] ausgeführt wird, gegenüber Druckversagen empfindlich ist, indem die einzelnen Holzfasern wie 'Knickstäbe' seitlich ausbrechen.

Messungen haben bereits vor ca. 10 Jahren ergeben, daß zwischen dem Stammdurchmesser D und der Baumhöhe h vielfach in guter Näherung der Zusammenhang $h \sim D^3$ besteht [8]. Andererseits berechnen sich die maximalen Dehnungen an der Oberfläche eines kreisrunden Balkens unter dem Biegemoment M bei fester Einspannung gemäß

$$\epsilon_{\max} = 32 M / (ED^3\pi) \quad (1)$$

Für lokal verschieden verteilte Windbelastungen, d.h. eher punktförmig bei langen Stämmen mit kleiner Krone (Kiefer) und eher flächig homogen verteilt bei großer, über den Stamm verteilter Krone, ergeben sich nun verschiedene Momentenverteilungen längs des Stammes.

Aus der Forderung

$$\epsilon_{\max} = \text{const.} \quad (2)$$

ergibt sich bei Punktlast ein kubischer Zusammenhang zwischen D und h , nämlich

$$h \sim D^3 \quad (3)$$

Systematische Untersuchungen fanden jedoch gelegentlich auch einen Zusammenhang

$$h \sim D^2 \quad (4)$$

in der Realität. Gewiß ist das auch noch nicht die volle Wahrheit. Es wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, jeweils einen glaubhaften $D(h)$ -Verlauf zu bestimmen, der zumindest extrem verschiedenen Baumtypen zugeordnet werden kann. Gleichgültig, welche $D(h)$ -Kurve gilt, es scheint experimentell erwiesen [8], daß die 'Hypothese konstanter Dehnung' das Baumwachstum und speziell die Zellbildung bestimmt. Das wiederum setzt einen 'feed-back'-Mechanismus voraus, der bis heute noch unbekannt ist. Übrigens scheint die 'Constant strain hypothesis' auch die Designvorschrift für die Gestaltung von Knochen zu sein.

In [1] wird diese Hypothese bereits etwas drastischer formuliert: '... wer nicht arbeitet, soll auch nicht essen ...'. Gemeint ist damit das Zurückbleiben minder belasteter Baumbereiche. Hat man sich die allgemein akzeptierte Hypothese konstanter Oberflächenspannung erst einmal zu eigen gemacht, so drängen sich sofort eine Reihe weitergehender Schlußfolgerungen auf, die allerdings in der Literatur wohl noch nicht zu finden sind.

Der Baum sollte ebenso bestrebt sein, die Anbindung der Äste am Stamm kerbspannungsfrei zu bewältigen. Betrachtet man eine Astanbindung in erster Näherung als einen sich lokal schnell verbreiternden Zylinder, so liegt der Gedanke nahe [15], die von Baud [10] (Abb.15) für einen zugbelasteten Durchmesserübergang favorisierte Kurve in der Kontur der Astanbindung wiederzufinden, was eine über weite Bereiche konstante Oberflächenspannung bedeuten würde. Wegen der 'Betriebsbelastung' einer Astanbindung, dominierend auf Biegung durch die Schwerkraft, ist eher die für Biegung optimale Baudkurve, die auch für Torsionsbelastung gilt [11,12], zu erwarten. Es konnte übrigens in [16] gezeigt werden, daß der Gültigkeitsbereich der Baudkurve bzw. ihrer Modifikationen erheblich weiter ist, als allgemein angenommen wird. Obwohl bei Holz das Material anisotrop ist und die Querschnitte nicht ganz kreisförmig, so war hier wohl am ehesten eine Biege-Baud-Kurve zu erwarten.

Wegen der in Abb.16 nach [13] dargestellten 'verwebten Art' der Astanbindung ist ein stetiger Kraftfluß eher auf der Astunterseite zu erwarten, wo die Astfasern stetig in den Stamm umgelenkt werden. Bei rechtwinklig abstehenden, fast symmetrisch gewachsenen, Astanbindungen, die man bei

Eichen öfters, seltener bei Buchen, fast regelmäßig beim Feuerdorn findet, kann auch die obere Kontur benutzt werden.

In allen untersuchten Fällen zeigte sich zumindest für die Astunterseite sehr gute Übereinstimmung mit der Baudkurve für Biegung, was in den Abb.17a-g selbsterklärend dargestellt ist. Dadurch ermutigt, wurde auch der sich verbreitende Fuß der Bäume hinsichtlich seiner Kontur bewertet. Obwohl auf den ersten Blick ermutigend, ist die Radiusverbreiterung am Fuße der Bäume nicht ohne wissenschaftliche Brisanz. Ähnlich wie beim Knochen, endet der sich verbreiternde Schaft nicht in einem wohldefinierten breiteren Zylinderteil, sondern in einem Chaos von Einzelanbindungen, das aus einem Gewirr von Wurzeln besteht. Wegen der windinduzierten Biegebelastung kommt nur die Baudkurve für Biegung in Betracht. Es überrascht jedoch nicht, daß die Kurve gelegentlich unter die Erdoberfläche (Abb.18) führt, was die Wurzeln als eigentlicher Anker ja auch tun.

Kurz, das Auslaufen der Kurve ist irgendwo unterirdisch, was zu einem etwas undefinierten Ende der Baudkurven führt. Der oberirdische sichtbare Teil des Stammes bestätigt jedoch alle Erwartungen vollends.

In dieser 'mechanistischen' Betrachtungsweise ist der Baum ein Stamm, der sich nach unten in Form der Biege-Baud-Kurve in Wurzelwerk, von unten nach oben ebenso in Äste zerteilt (Abb.18k).

Dies wäre die erste angekündigte Konsequenz aus der **Hypothese konstanter Oberflächenspannung**. Sie wurde also vom in der Literatur schon erwähnten Bereich des Stammes hier **auf Ast- und Wurzelanbindungen erweitert**.

Eine weitere naheliegende Konsequenz soll nachfolgend ausgeführt werden: Wenn der Baum nach Kräften wächst, um eine möglichst konstante Oberflächenspannung zu erlangen, dann muß es ein geradezu furchtbarer Eingriff sein, wenn auf diese Oberfläche plötzlich eine Kerbe plaziert und damit lokale Spannungsspitzen induziert werden, die die Zugspannungen im Bereich der Stammoberfläche weit übersteigen. Es ist also zu erwarten, daß der Baum eiligst versucht durch Wachstum diese Kerbspannungen abzubauen und zwar da am schnellsten, wo sie am höchsten sind.

Eine natürliche Kerbe ist ein Astloch, dessen Heilungsmechanismus in [14] detailliert beschrieben ist und hier verkürzt wiedergegeben werden soll. Abb.19 zeigt einen typischen Wundheilungsverlauf an einem ehemals etwa kreisrunden Astloch. Es bildet sich bevorzugt von den Seiten zur Mitte heilend eine spindelförmige Höhlung aus, die vollständig verheilt (Abb.20) einen in Stammrichtung orientierten Längsschlitz ergibt. Bei Astlöchern an Ästen liegt der Schlitz nicht vertikal, sondern erwartungsgemäß in Astringung.

Bedenkt man nun (Abb.21), daß das Astloch sich in der normalerweise zugbelasteten Baumoberfläche befindet und (Abb.22) seitlich auch bei Vorhandensein eines Aststumpfes Kerbspannungen wirken, so ist der Ort der aktivsten Wundheilung (Abb.19) leicht dem Ort höchster Kerbspannungen zuzuordnen. Dennoch konnte diese Erklärung in der Literatur bis jetzt nicht gefunden werden.

Auf die von der Seite zur Mitte des Astloches verlaufende Weise der Wundheilung wird zwar bereits in [17] hingewiesen, wobei dort allerdings das Transportverhalten des Phloem als Erklärung verwendet wird. In [18] wird der durch das Astloch bedingte Abbau der Umfangsspannungen als Voraussetzung für das seitliche 'Aufquellen' der Wundränder genannt und auch gleich wieder in Frage gestellt. Es wird dort eher die in Faserrichtung geführte Schnittrichtung am Wundrand beim Ästen als Ursache der seitenbetonten Wundheilung favorisiert und dabei etwas allgemein von 'Reizen' geschrieben.

Um den Einfluß eines im Loch befindlichen Aststumpfes etwas zu quantifizieren, wurde das in Abb.23a dargestellte Finite-Element-Modell einer zugbelasteten Lochplatte (ohne Ast) und mit einem von 'Interface-Elementen' umgebenen elastischen Einschluß (Ast) gerechnet. Der Aststumpf (Abb.23c) wirkt nun dergestalt, daß er die Querkontraktion des Astloches durch Aussteifung behindert, wodurch bei Annahme eines weichen Ast-E-Moduls in Querrichtung die Kerbspannung nur mäßig, nämlich auf das 3.15-fache der angelegten Spannung abgebaut wird. (Im Unterschied zur Formzahl 3.38 (Abb.23b), die sich ohne Ast ergibt!). Ein härterer Aststumpf (Abb.23d) bewirkt einen merklicheren Abbau der Formzahl auf den Wert 2.74. Dies soll nur einen Trend aufzeigen.

Die Hauptspannungstrajektorien in Abb.23b decken sich ganz gut mit dem um das Astloch modellierten Holzfaserverlauf, was - wie in einer Studienarbeit gezeigt wurde [19] - einen erheblichen Abbau der Kerbspannung bewirkt, der hier nicht beachtet wurde, der jedoch auch die grundsätzliche Präsenz der Kerbspannungen nicht in Frage stellt. Es bleibt also die Aussage, daß auch bei Präsenz eines nach und nach abfaulenden Aststumpfes Kerbspannungen existieren, die die Wundheilung stimulieren. Abb.24 zeigt in einem Stammquerschnitt durch eine Wunde, mit welchem Eifer im Bereich der Wundränder (d.h. im Bereich hoher Kerbspannungen) der Baum verbreiterte Jahrringe bildet, um sich selbst zu reparieren. Während das in Abb.20 gezeigte Astloch wie erwartet vertikal in Stammrichtung verheilte, so zeigt ein fast mechanisch isoliertes Astloch (Abb.25) in einer Stammausbeulung einen völlig anderen eher rotationssymmetrischen Heilungsverlauf. Eine weitere Bestätigung der Hypothese der kerbspannungsgesteuerten

Wundheilung liefert Abb.26 mit einer Orientierung der partiell verheilten Wunde in Richtung des erwarteten Kraftflusses.

Um diese Hypothese weiter zu erhärten, wurden zusammen mit dem Forstamt Landau gezielt Kerben in schnell heilende Bäume eingebracht, deren Gestalt und Heilungsverlauf in Abb.27 skizziert ist. Es zeigte sich erwartungsgemäß ein Wundheilungsverlauf gewichtet entsprechend der Verteilung der Kerbspannungen.

Obwohl innerhalb der wenigen verstrichenen Monate nur in begrenztem Maße Heilungswachstum (Überwallung) ausgebildet werden konnte, ist das Ergebnis eine gute erste Bestätigung, die noch durch weitere Experimente abzusichern ist.

Die Steuerung der Wundheilung durch Kerbspannungen ist eine weitere Konsequenz aus der Hypothese konstanter Oberflächenspannung.

Die bisherigen Untersuchungen betrafen allein die äußere Gestalt der Bäume, also letztlich die Optimierung von Konturen. Es stellt sich die Frage, wie der Baum sich in seinem Inneren auf die Belastung oder gar auf Belastungsänderungen einstellt. In [20] wurde u.a. der Verlauf der Hauptspannungstrajektorien an einem kreisförmigen, druckbelasteten Einschuß berechnet (Abb.28). Es zeigte sich bei Betrachtung von Einschlüssen in Stammquerschnitten, daß die Jahrringe sich etwa ebenso orientieren wie die Hauptspannungstrajektorien, d.h. es gibt eine Neigung, sich auf Kontaktflächen senkrecht zu stellen, wobei natürlich nur Jahresringe reagieren können, die nach Einbringen oder Berührung mit dem Fremdkörper zuwachsen. Im Unterschied zum Knochen, der sich als Ganzes also auch innerlich an Belastungsänderungen anpaßt, reagiert bei Holz nur der jeweils aktuelle Jahresring. Insofern läßt ein Holzsägeschnitt ein genaues - auch zeitliches - Zurückverfolgen der Vergangenheit zu. **Holz offenbart uns bereitwillig seine Lastgeschichte, der Knochen verwischt sie.**

Die Ausrichtung neuer Jahresringe etwa senkrecht zu Fremdflächen soll wohl Delaminationen des Holzes vermeiden, das schichtweise aus dem weichen und poröseren Frühholz und dem dichteren und festeren Spätholz des Herbstwuchses in Jahresringen angeordnet ist. Anders ausgedrückt bedeutet die Anordnung der Jahresringe entlang der Hauptspannungstrajektorien eine Neigung des Baumes, Schubbelastungen zwischen den Ringen zu minimieren. Bislang wurde allein die Wechselwirkung mit inneren Fremdkörpern in Querschnitten des Baumes untersucht. Nachfolgend soll die Wechselwirkung des Baumes mit Fremdkörpern, die von außen mit ihm kontaktieren, beschrieben und die Folgen auch für die Gestalt von Längsschnitten durch den Stamm erläutert und rechnerisch beschrieben werden.

Offenbar bewirkt jede äußere Flächenpressung eine lokale Überwallung, die den kontaktierenden Körper umwallt und damit die Kontaktspannung reduziert (Abb.29). Auch das kann als Folge der angestrebten Konstanz der Oberflächenspannung verstanden werden. Um die Auswirkungen auf die axiale Orientierung der Jahresringe zu untersuchen, wurde in Zusammenarbeit mit dem Forstamt Landau ein Baum, an den beim Wegebau ein Stein gerollt war und der vom Baum merklich umwallt wurde, gefällt und Längsschnitte durch den Kontaktbereich gelegt (Abb.30).

Eine sukzessive Vergrößerung der FEM-Struktur entsprechend dem Modellierwuchs [21] zeigte einen sehr effektiven Abbau der Kontaktspannungen. Neben diesem erwarteten Effekt ist auch hier eine Ausrichtung der Jahresringe entlang der Hauptspannungstrajektorien wesentliches Ergebnis (Abb.31), das sich auch im Kontaktbereich von Stammgabelungen mit zum Teil erheblichen Flächenpressungen infolge Korrekturwuchses (Abb.32) bestätigt.

Zusammengefaßt scheint der Wuchs der Bäume aus mechanischer Sicht bestimmt zu sein aus dem **Bestreben nach möglichst konstanter Oberflächenspannung**, woraus sich **Designvorschriften** auch für **Astanbindungen und Baumfüße** (Entlastungsübergänge für Biegung) sowie Regeln für **kerbspannungsabbauenden Wundheilungsverlauf** und **kontaktspannungsmindernden Modellierwuchs** ergeben. Dies betrifft die äußere Gestalt der Bäume.

Für die innere Struktur scheint eine **Anordnung der Jahresringe entsprechend den Hauptspannungstrajektorien** (axial und circumferentiell) ein wesentliches Bauprinzip zu sein, das den Schub zwischen den Jahresringen minimiert.

Wenden wir uns mit dieser Kenntnis noch einmal dem Schönheitsbegriff Kleins '**der pathologischen Schönheit**' zu, die man wohl am ehesten mechanisch als '**Interessantheit der Spuren einer langen Lastgeschichte**' zu verstehen hat.

Gemeint ist die Schönheit des zernarbten Kriegergesichtes, nicht die gepuderte Schönheit des 'Models'. Gemeint ist die Schönheit der von den Naturgewalten gebeutelten und dennoch trotzig weiterexistierenden Baumruine, nicht die des ebenmäßig zarten Sprosses.

Die Querverbindung der vorliegenden Arbeit zu dem Begriff der pathologischen Schönheit in der Arbeit Kleins [1] ist nun jene, daß die Kenntnis der Biomechanik der Bäume bei deren Beurteilung eine ähnliche Rolle spielt, wie die Lehre der Physiognomie bei der Beurteilung des Kriegergesichtes: Man kann mehr vom Leben der Baumruine (Abb.33) erfahren, wenn

man aus ihrer Gestalt auf ihre Lastgeschichte, also ihr 'mechanisches Schicksal' schließen kann.

Dies ist in Abb.34 noch einmal an einem besonders interessanten Fall selbsterklärend dargestellt. Auch hier wird deutlich, daß ein von besonders vielen 'Schicksalsschlägen' betroffener Baum viele Ansatzpunkte zu biomechanischer Analyse liefert.

Dank

Ich danke Prof. Dr. K. Keilen (Forstamt Landau) für seine freundliche Unterstützung unserer Arbeiten und so manches anregende 'Waldgespräch'. Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Mitarbeitern, ohne deren Fleiß und Einsatzbereitschaft diese Untersuchungen nicht möglich gewesen wären.

Literatur

- [1] L. Klein
Ästhetik der Baumgestalt
Festrede anlässlich des Rektoratswechsels an der Großherzoglichen
Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe
Müllersche Hofbuchdruckerei Karlsruhe, 1914

- [2] H. Johnson
Bäume, Pawlak-Verlag 1987

- [3] E. Münch
Entstehungsursachen und Wirkung des Zug- und Druckholzes der Bäume
Forstliche Wochenschrift Silva 45 (1937) 345-352

- [4] H. Kübler
Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannungen quer zur
Faserrichtung
Holz als Roh- und Werkstoff 17 (1959) 1-9

- [5] H. Kübler
Studien über Wachstumsspannungen des Holzes
Zweite Mitteilung: Die Spannungen in Faserrichtung
Holz als Roh- und Werkstoff 17 (1959) 44-54

- [6] J. Bodig, B. Jayne
Mechanics of Wood and Wood Composites
Van Nostrand Reinhold Company, London

- [7] R. Archer
Growth Stresses in Trees
Springer Verlag, Berlin 1987

- [8] B. Wilson, R. Archer
Tree Design: Some biological solutions to mechanical problems
Bioscience 29 (1979) 293-298

- [9] G. Fels, M. und H. Grah
Der Organismus
Ernst Klett-Verlag, Stuttgart

- [10] R. V. Baud
Beiträge zur Kenntnis der Spannungsverteilung in
prismatischen und keilförmigen Konstruktions-
elementen mit Querschnittsübergängen
Bericht 29 Schweiz. Verb. f. Mat.-Prüf. d. Techn.
(Bericht 83 d. Eidg. Mat. Prüf.-Anst. Zürich 1934)
- [11] A. Thum, W. Bautz
Der Entlastungsübergang - Günstigste Ausbildung
des Übergangs an abgesetzten Wellen und dergleichen
Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 6 (1935) 269-273
- [12] R. E. Peterson
Stress concentration factors
J. Wiley, New York 1974
- [13] A. L. Shigo
How tree branches are attached to trunks
Canad. J. Botany 63 (1985) 1391-1401
- [14] C. Mattheck, H. Huber
Die Kerbspannungen am Astloch als mögliche Erklärung
des Verlaufes der Wundheilung bei Bäumen
Interner Bericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe 1988
- [15] C. Mattheck, H. Huber, D. Erb
Die Baudkurve - eine Konturdesignvorschrift für biologische
Kraftträger
Interner Bericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe 1988
- [16] H. Huber, C. Mattheck, D. Erb
Zylindrische Körper mit spannungsoptimiertem Durchmesserüber-
gang
Interner Bericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe 1988,
vorgesehen zur Veröffentlichung in Int. Journal Fatigue
- [17] M. H. Zimmermann, C. L. Brown
Tree structure and function
Springerverlag, Berlin 1980, S. 110

- [18] H. Meier-Wegelin
Ästung
Verlag H. Schaber, Hannover 1936
- [19] U. Vorberg
Der kerbspannungsreduzierende Effekt der Umlenkung von Fasern um
Kreiskerben unter Zugbelastung und interner Belastung durch Bolzen
Studienarbeit am Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde
im Maschinenbau der Universität Karlsruhe, 1988
- [20] H. Huber, C. Mattheck, U. Gross
Die Hauptspannungstrajektorien als inneres Bauprinzip von Holz-
und Knochenstrukturen
Interner Bericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe 1988
- [21] C. Mattheck, H. Huber, K. Keilen
Die Anpassung eines Baumes an die Kontaktbelastung mit einem
Stein
Interner Bericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe 1988

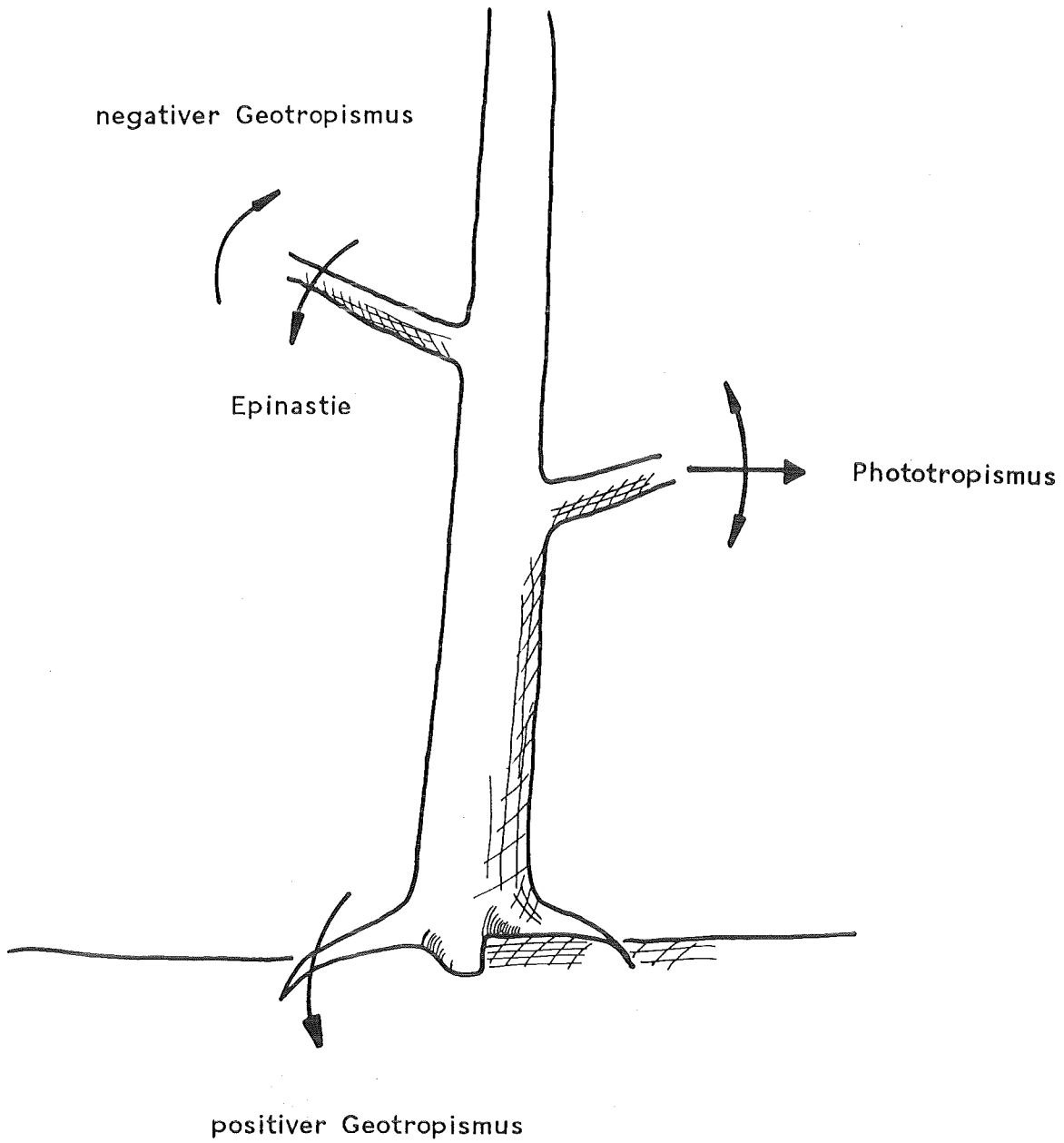


Abb.1 Das Gegeneinanderwirken der wachstumsbestimmenden Faktoren

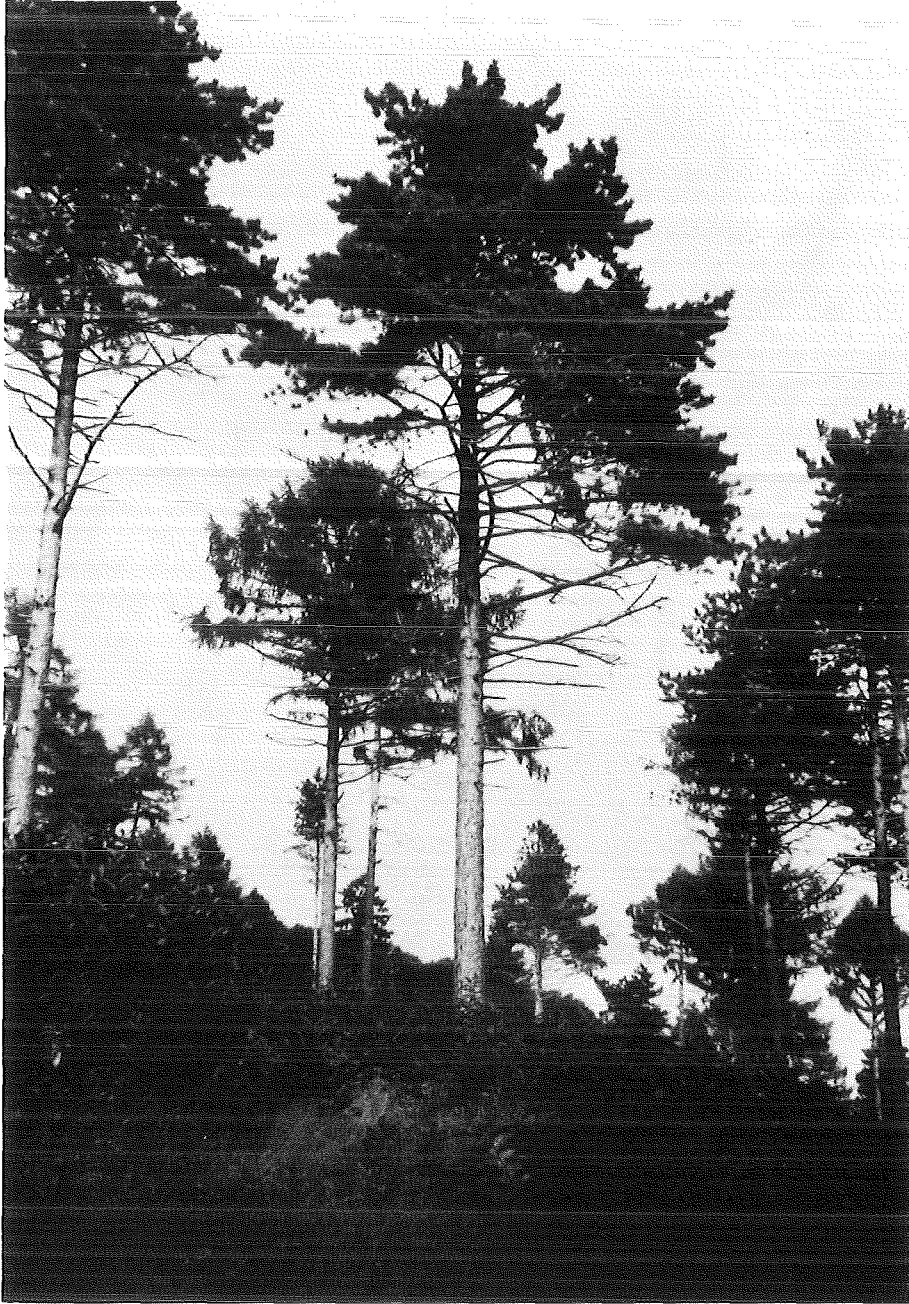


Abb.2 Linear-parallele Astordnung als Folge reproduzierten Gleichgewichtes von Epinastie und negativer Geotropie



Abb.3 Gekrümmt-parallele Astordnung als Folge reproduzierten, aber ortsvariablen Gleichgewichtes von Epinastie und negativer Geotropie



Abb.4 Zweimaliger Ausfall des Wipfeltriebes, verzögerter Hormonstop und Übernahme der Führung durch einen Seitentrieb



Abb.5 Konkurrierende Seitentriebe nach Wegfall (oder Reduktion) des Epinastiesignals durch den Wipfeltrieb

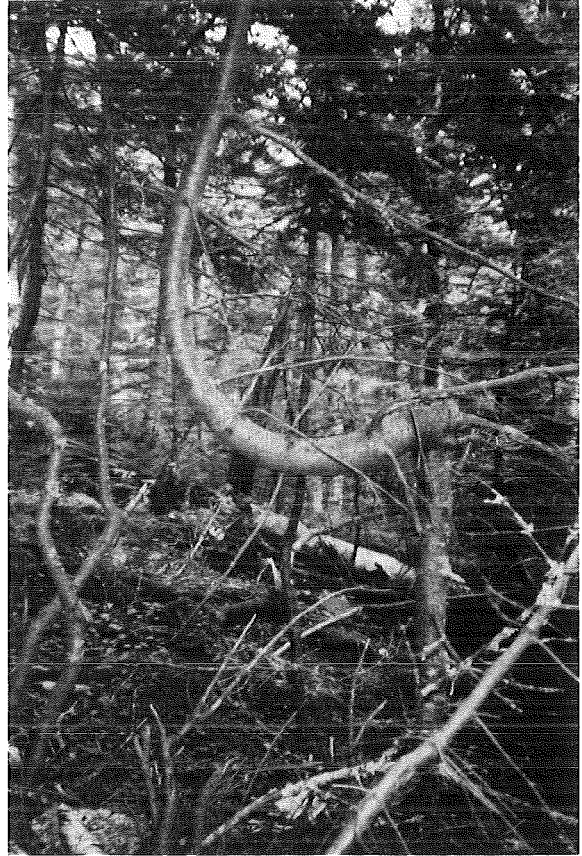


Abb.6 Weit ausholendes Umlenkwachstum vermutlich infolge verzögerten Hormonstops bei Übernahme der Führung durch einen Seitentrieb

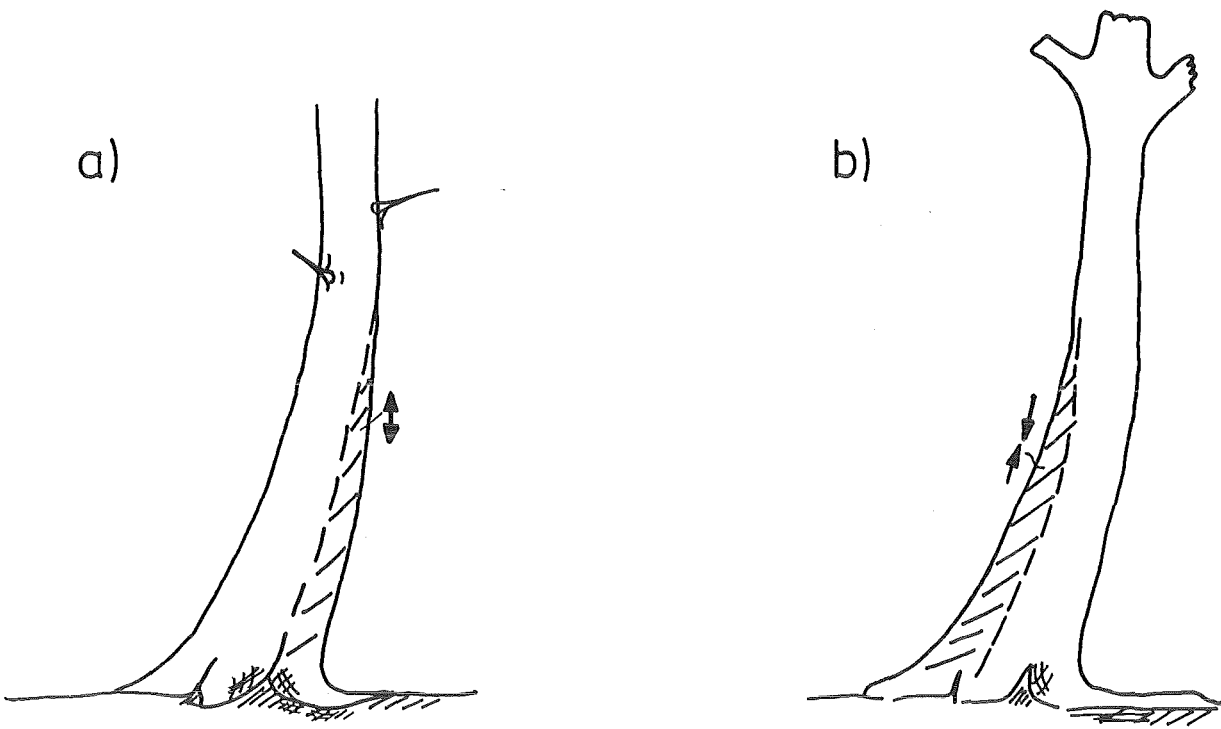


Abb.7 a) Druckholz als Reaktionsholz bei Nadelbäumen (schematisch)
b) Zugholz als Reaktionsholz bei Laubbäumen (schematisch)



Abb.8 Druckholz (Rotholz) im Sägeschnitt in plausibler Lage auf der konvexen Baumseite

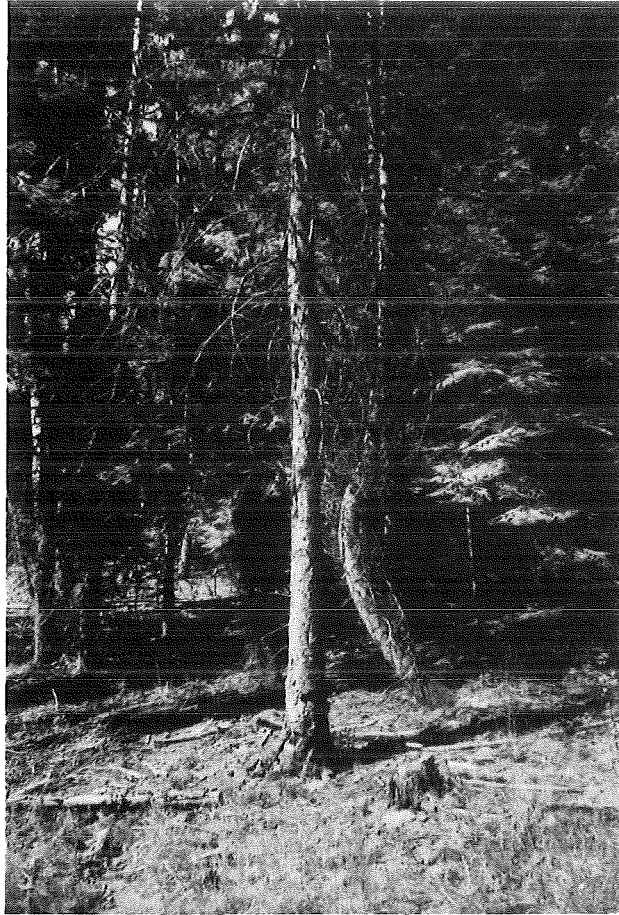


Abb.9 Unkorrigierter Baum ohne Reaktionsholz (links) und durch Reaktionsholzbildung schließlich korrigiert gewachsener Baum (rechts)

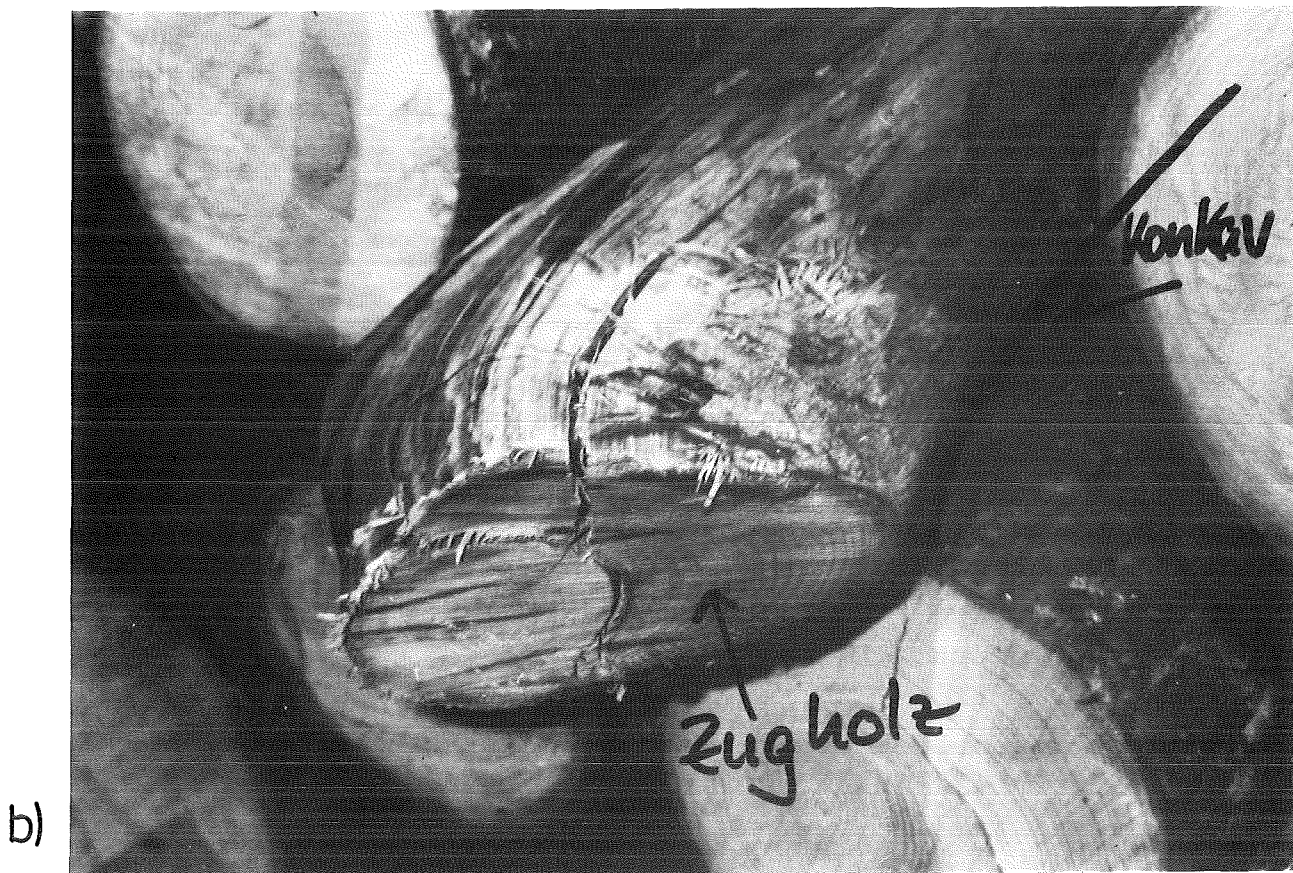
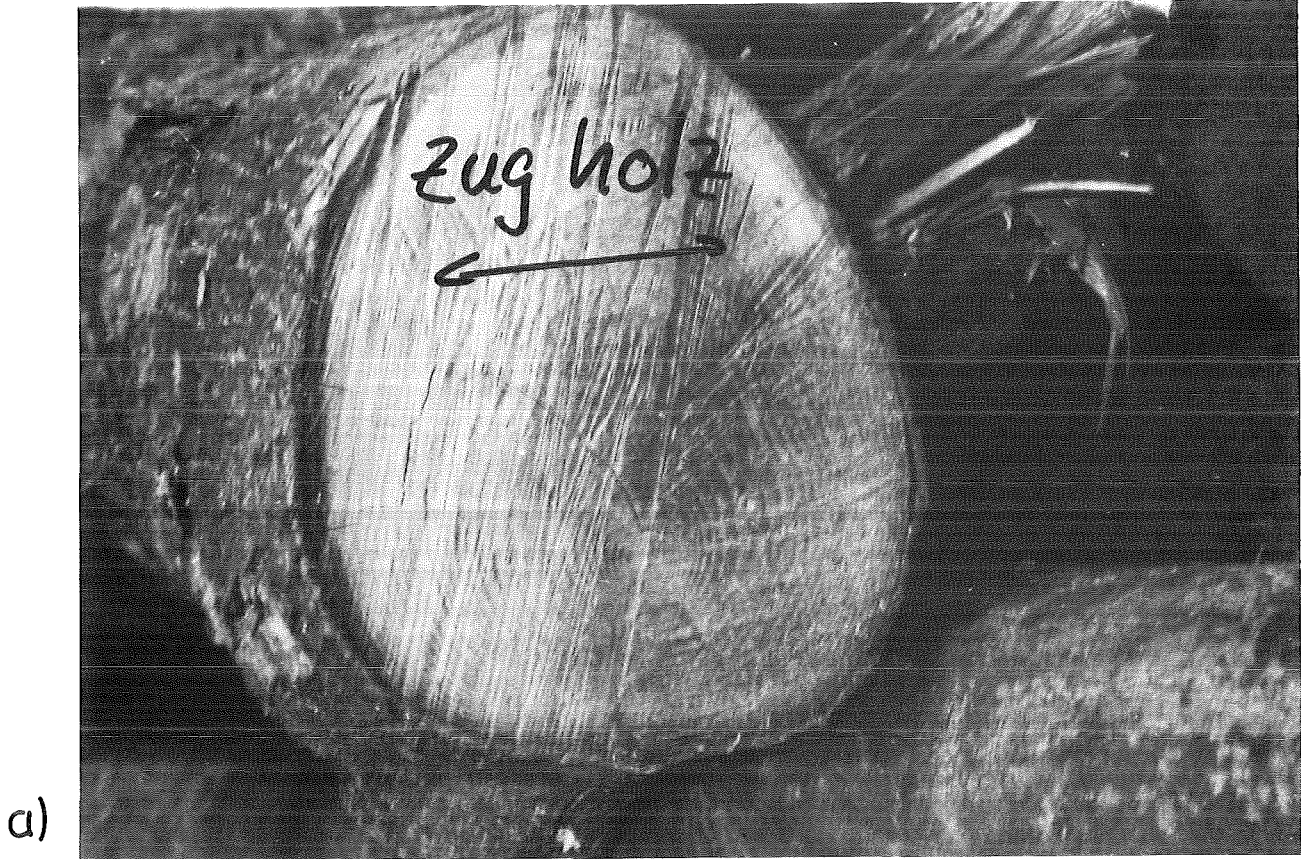


Abb.10 Zugholz (Weißholz) bei einem Laubbaum im Sägeschnitt in plausibler Lage auf der konkaven Baumseite



Abb.11 Verschieden starke Korrekturen durch Zugholz bei Laubbäumen mit
verschiedener Anfangsneigung



Abb.12 'Baumverschweißung' als Folge eskalierendem Korrekturverhaltens von Bäumen verschiedener Anfangsneigung

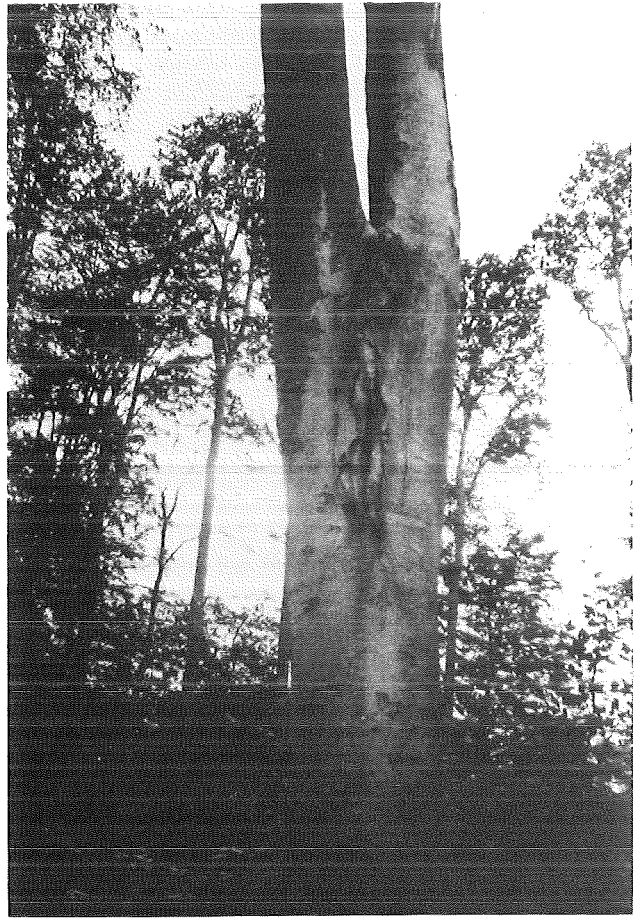
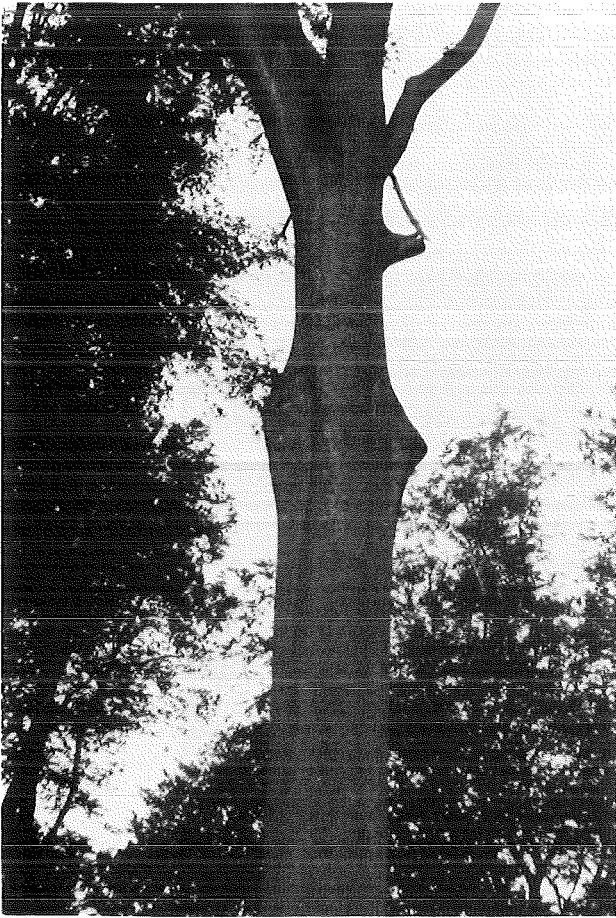


Abb.13 Ebenfalls eskalierendes Korrekturwachstum mit nachfolgender 'Verschweißung' im Astgabelbereich einer Buche verstärkt durch seitliche Überwallung infolge von Kontaktspannungen

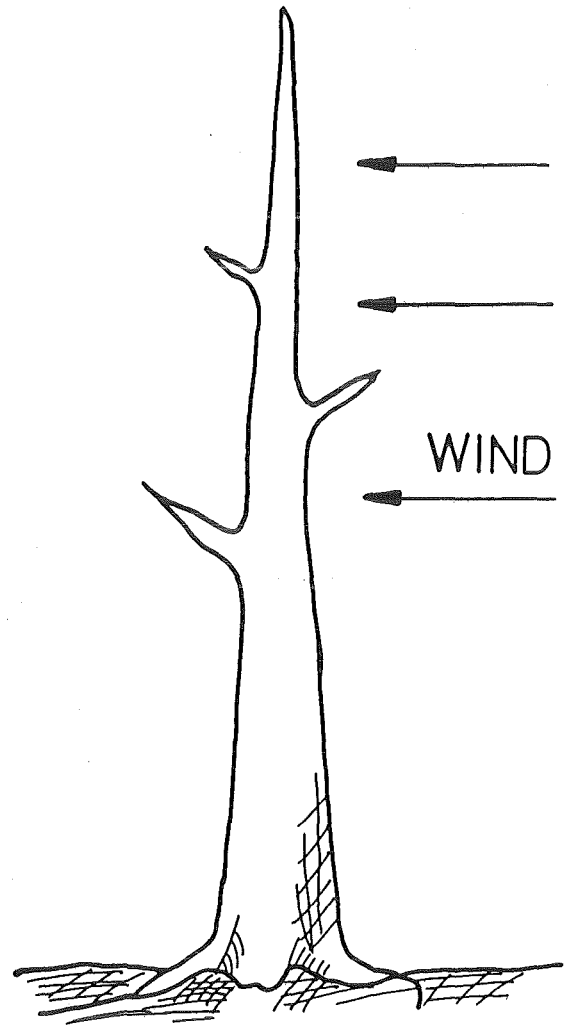
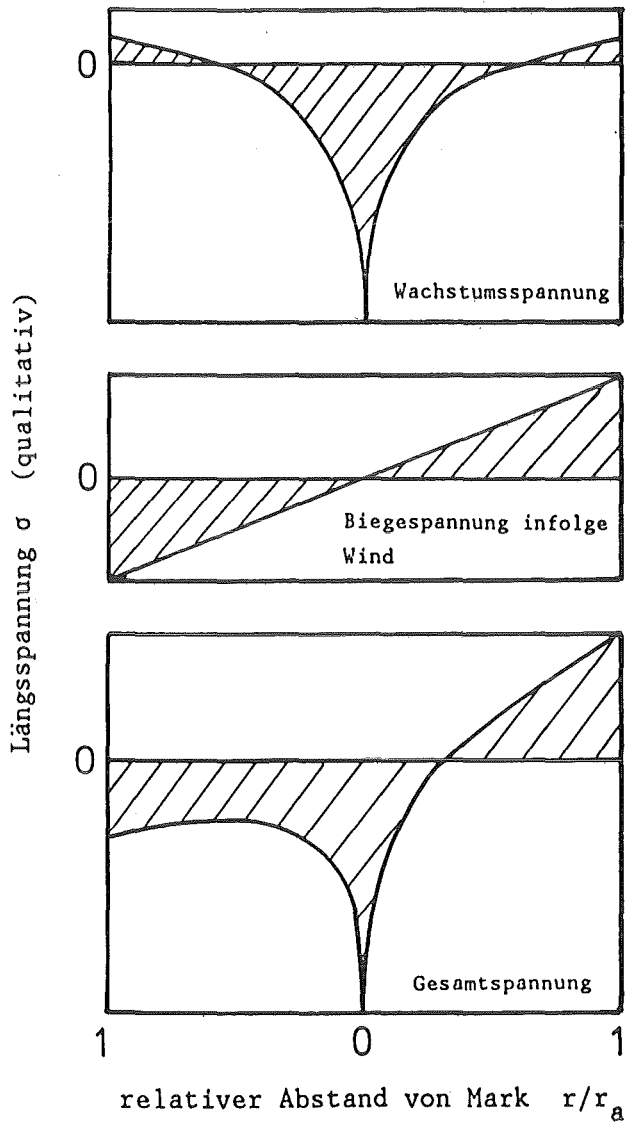


Abb.14 Axialspannungen mit und ohne Windbelastung in der Darstellung nach Kübler [4]

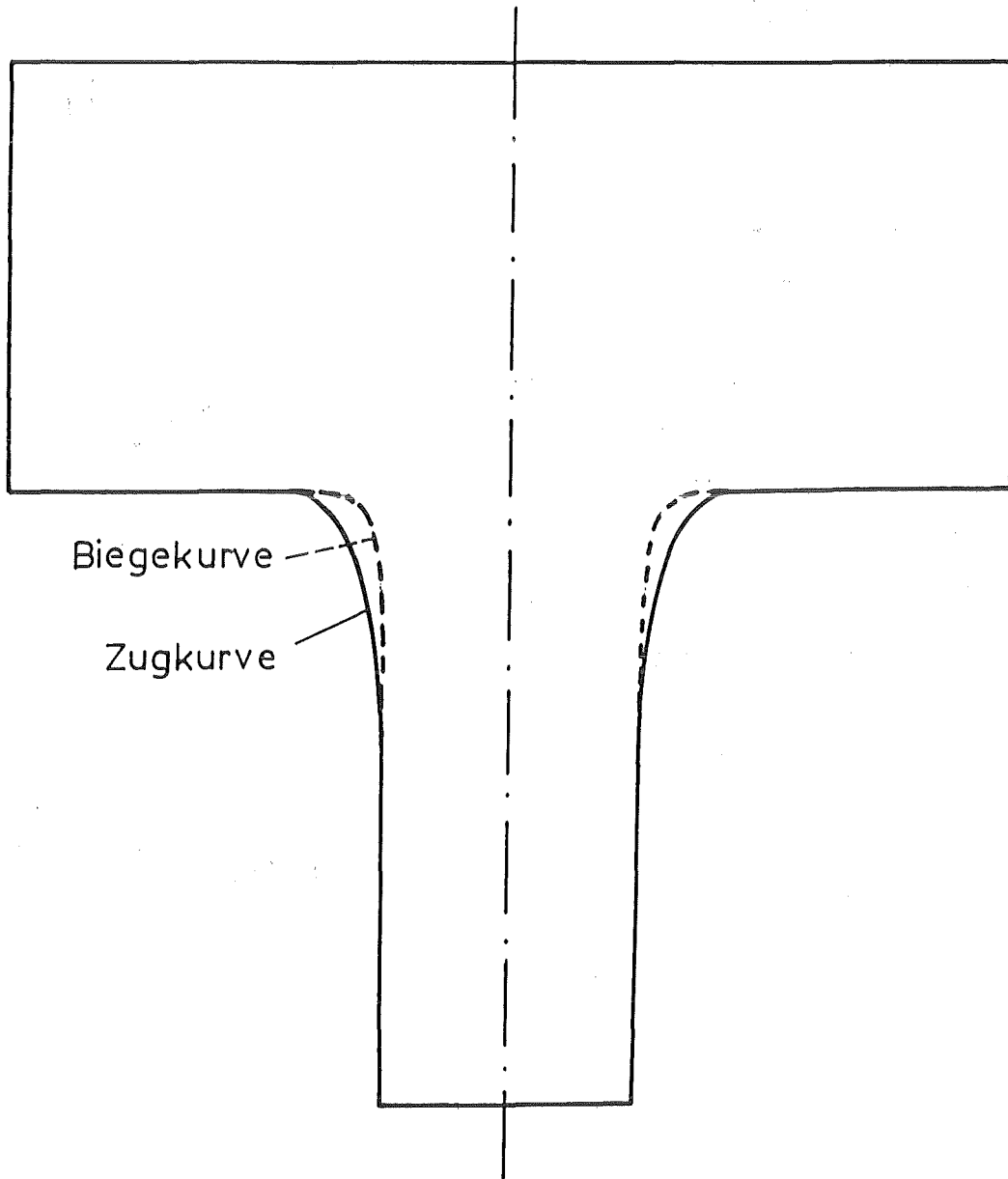
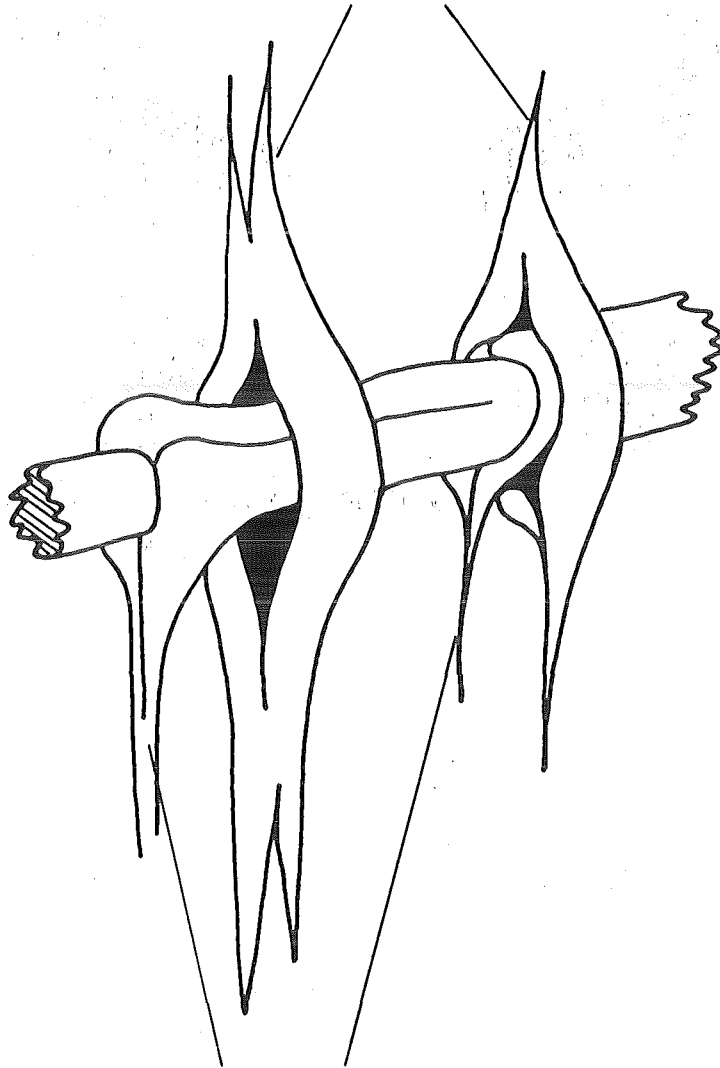


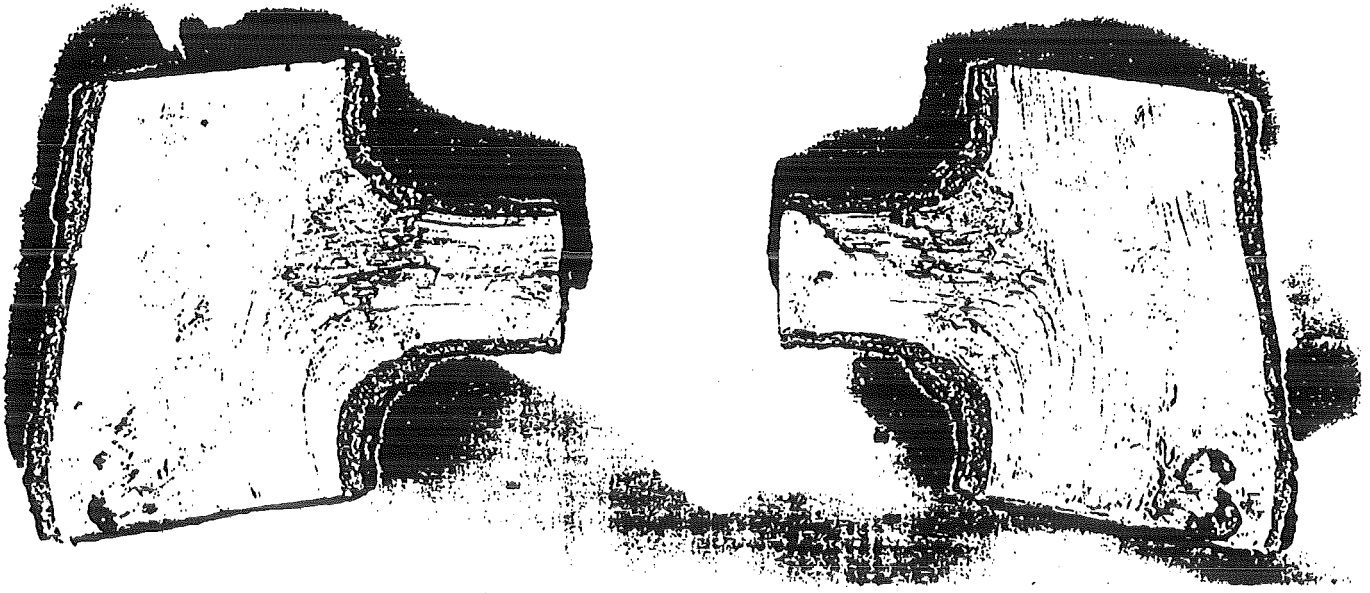
Abb.15 Erscheinung der Baudkurve als Randkontur eines auslaufenden idealen Flüssigkeitsstrahles aus einem Behälterloch, die für Biegung in [10] modifiziert wurde.

Um den Ast gewebte Stammfasern



In den Stamm abwärts laufende Astfasern

Abb.16 Verwebung des Astes im Stamm nach [13]



a.)

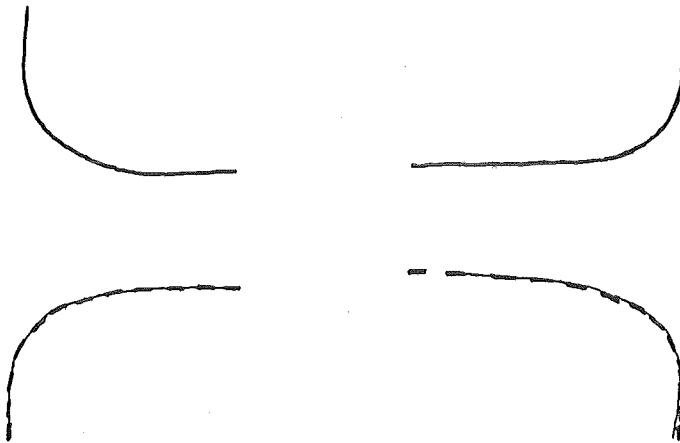
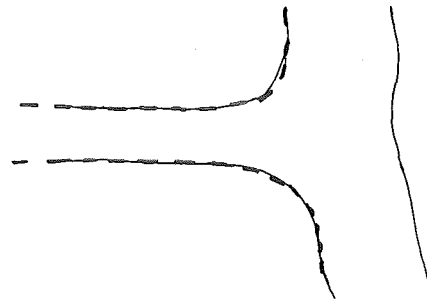
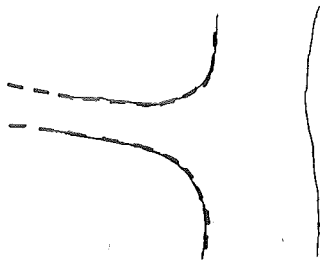
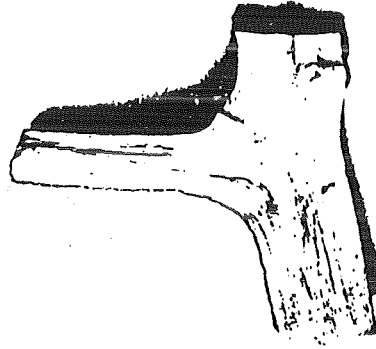
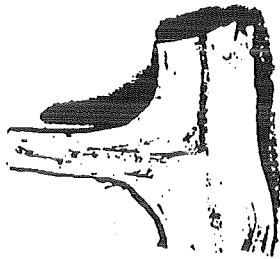
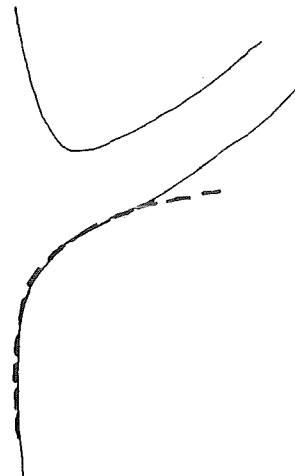


Abb.17 a-g) Verschiedene Astanbindungen mit zugehöriger Biege-Baudkurve
(---- Biege-Baudkurve; — Baumkontur)

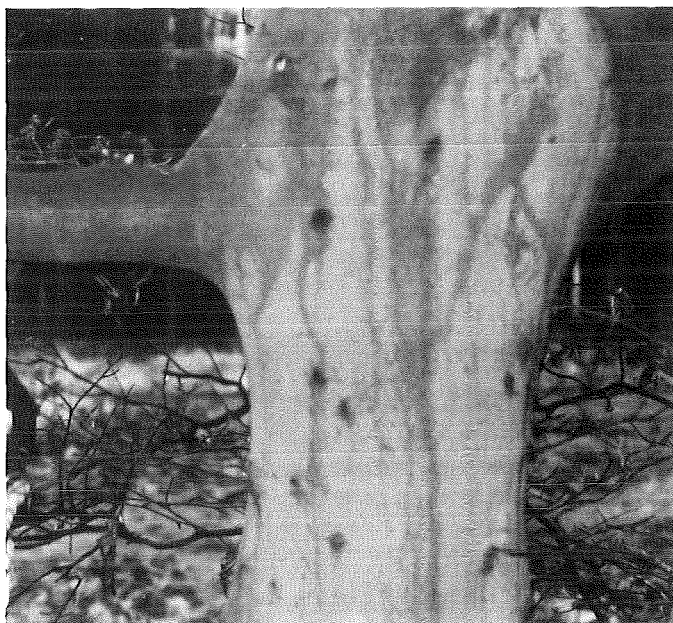
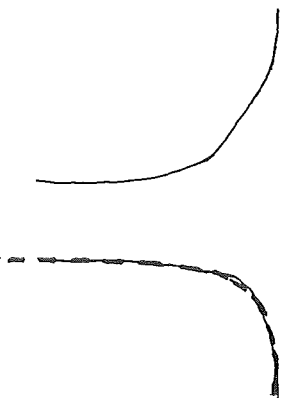


- b.) Für Feuerdorn ist auch die obere Kontur der Astanbindung durch die Baudkurve beschrieben.

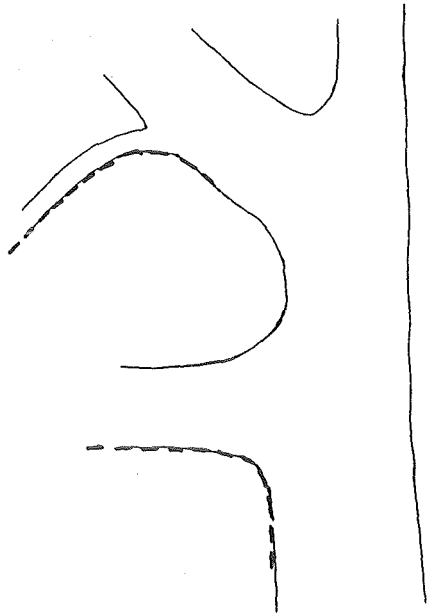
c.)



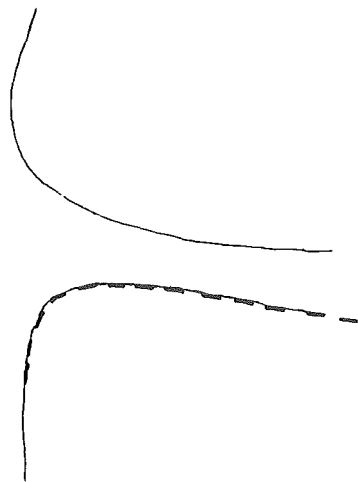
d.)



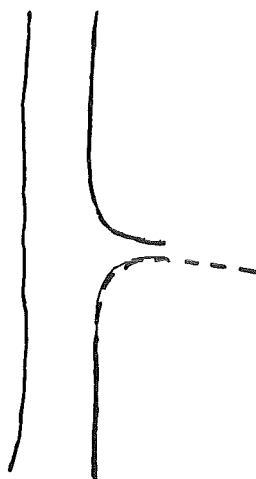
e.)



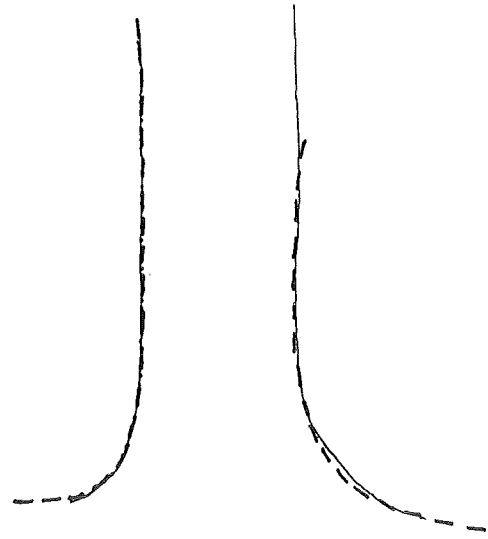
f.)



g.)



a.)



b.)

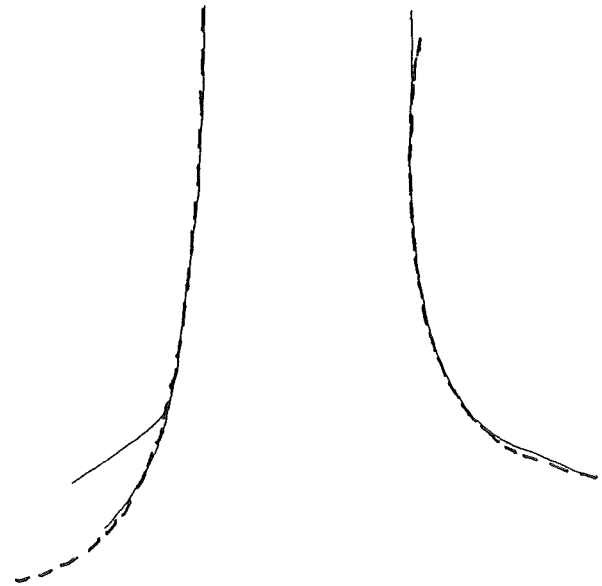
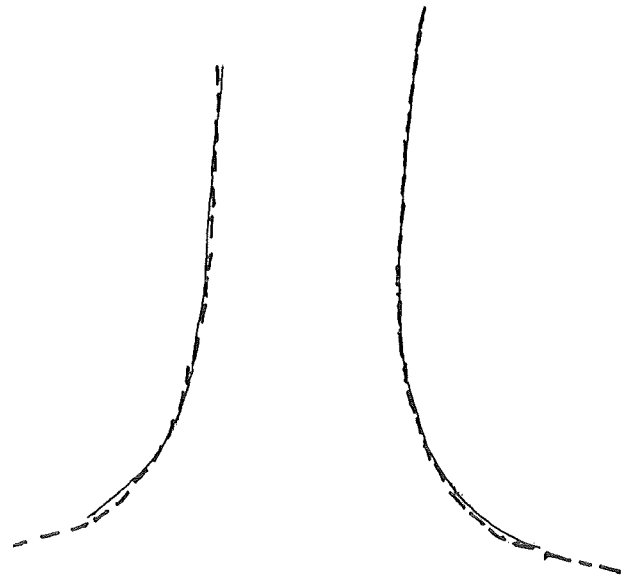
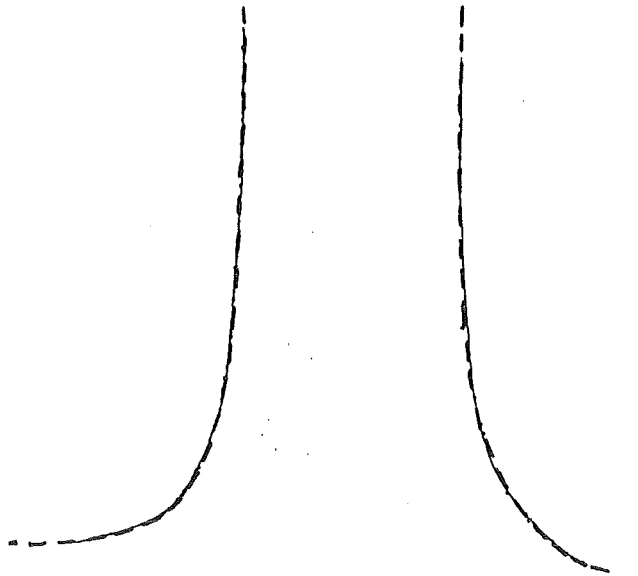


Abb.18 a-1) Verschiedene Konturen von Baumfüßen mit zugehöriger Biege-Baudkurve (---- Biege-Baudkurve; — Baumkontur)

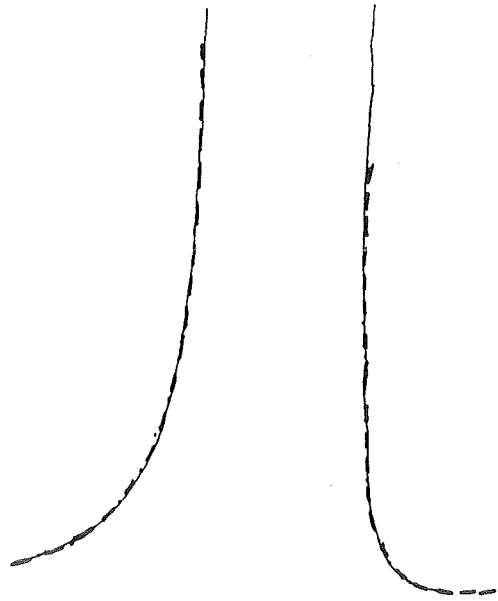
c.)



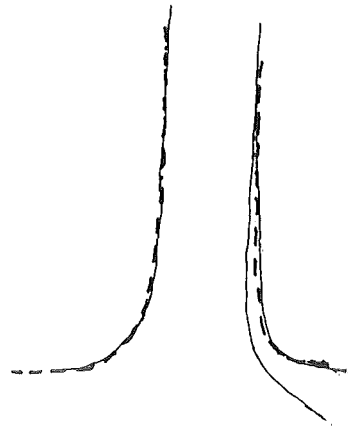
d.)



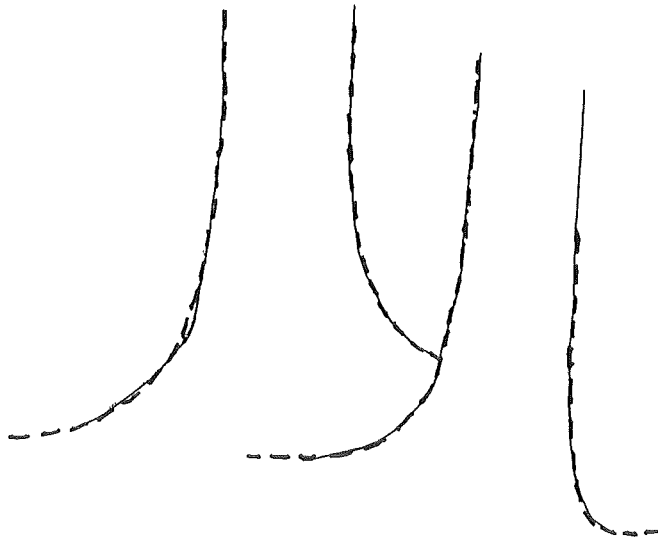
e.)



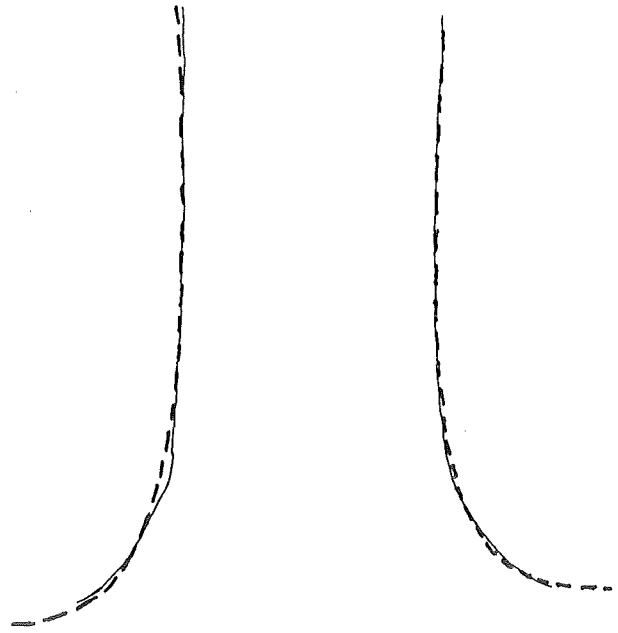
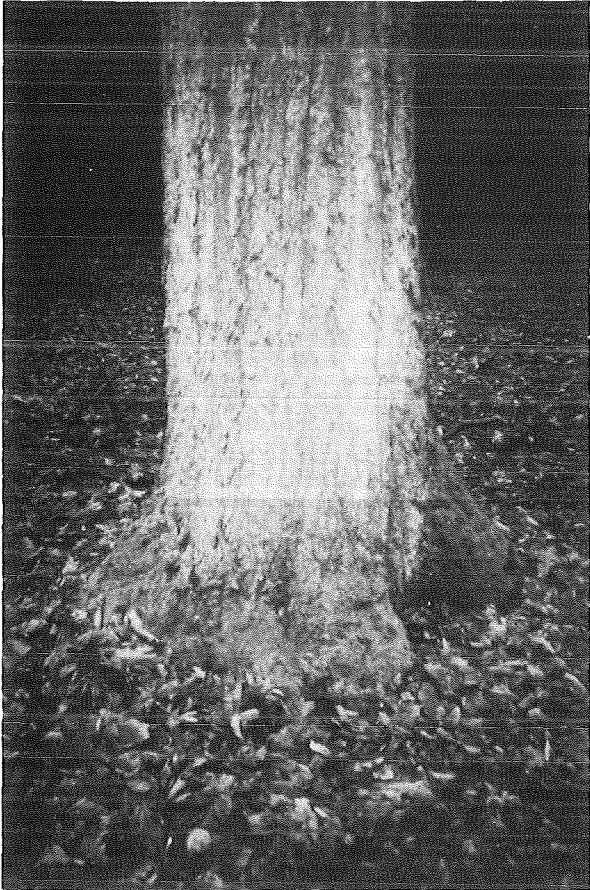
f.)



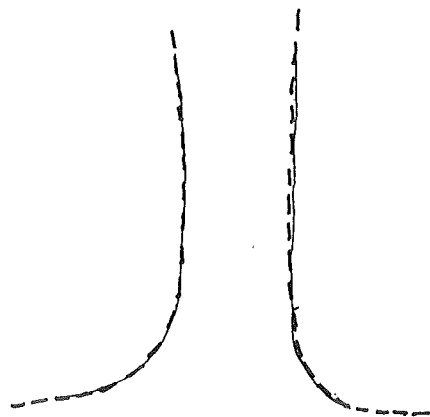
g.)



h.)



i.)





k) Biege-Baud-Kurven im oberen Baumbereich an den Astanbindungen
und im unteren Baumbereich an den Wurzelanbindungen



Abb.19 Typisches, fast verheiltes Astloch mit kreisförmiger Anfangskontur und spindelförmiger Momentankontur



Abb.20 Oben ein fast vollständig verheiltes Astloch mit lediglich noch sichtbarem Längsschlitz. Unten ein vollständig verschlossenes Astloch, wo auch der Längsschlitz verschlossen wurde. Die über dem unteren Astloch befindliche Bogenfalte heißt 'Chinesenbart'.

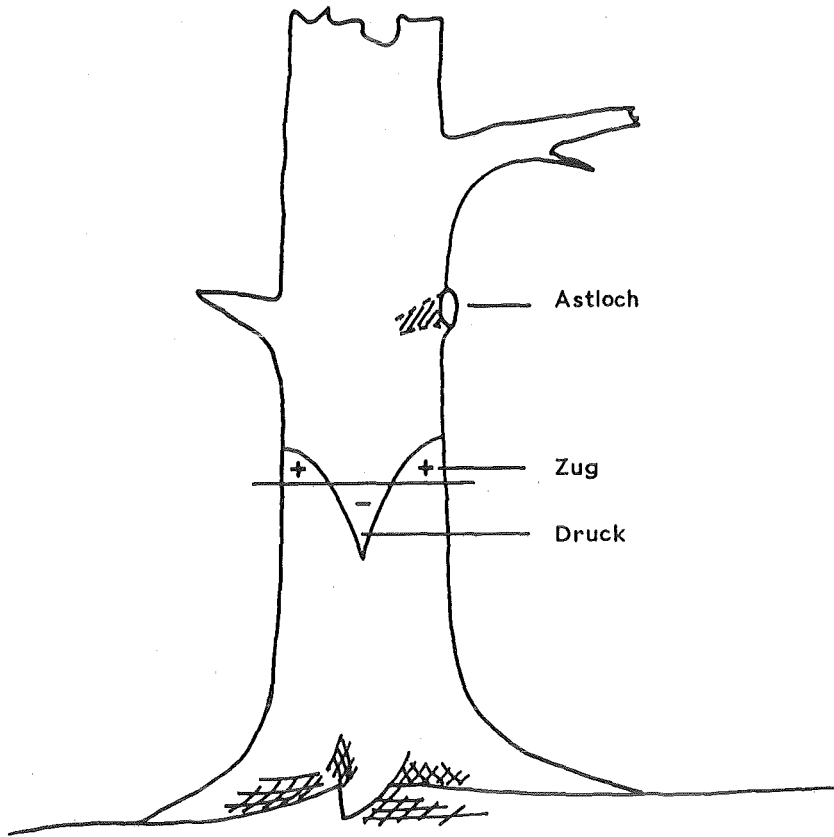


Abb.21 Die Platzierung von Astlöchern im Zugbereich auf der Stammoberfläche

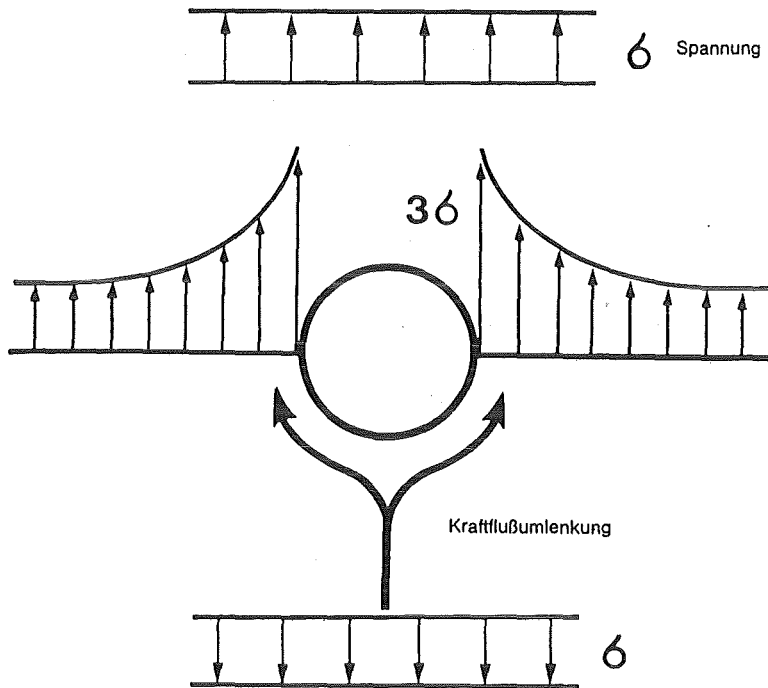


Abb.22 Kerbspannungen infolge Kraftflußumlenkung

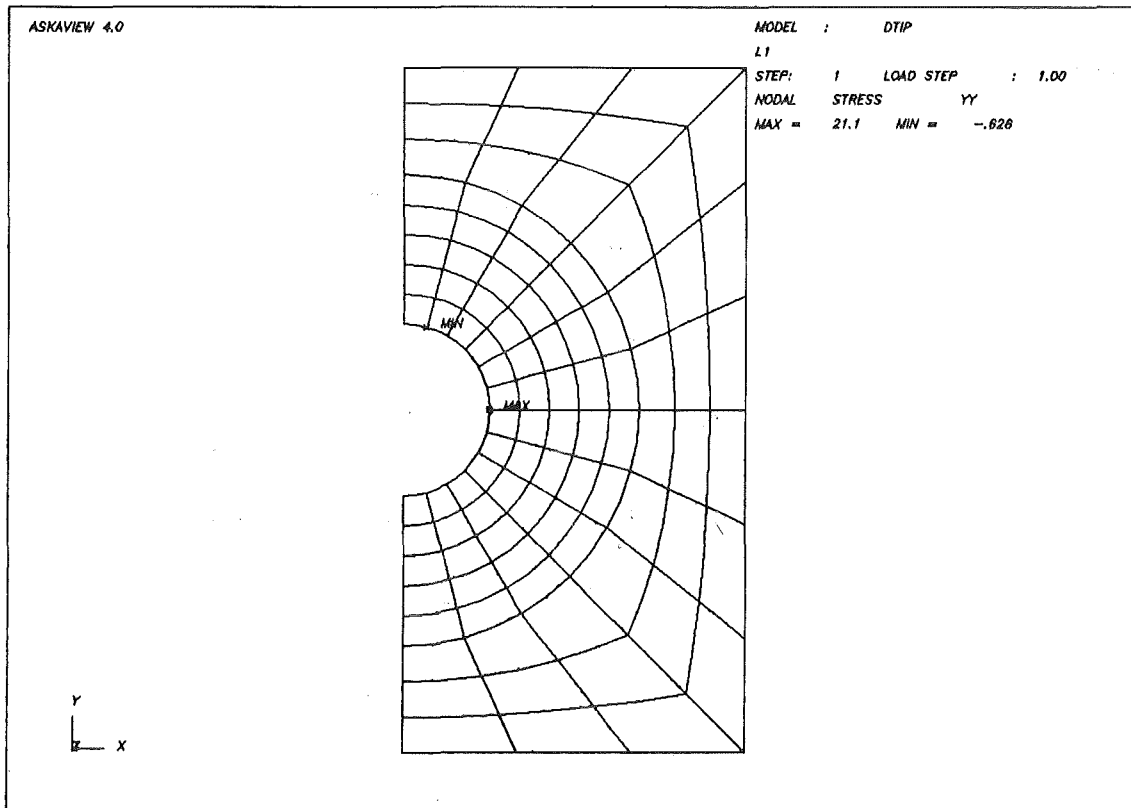
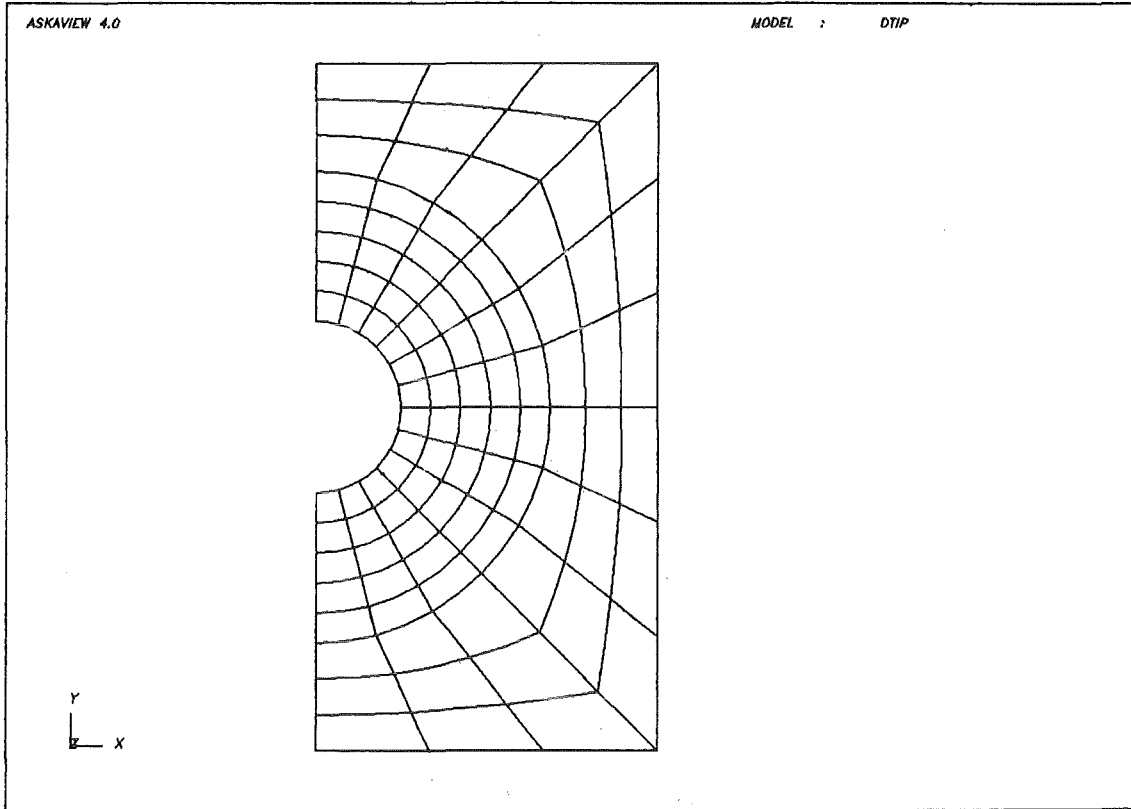
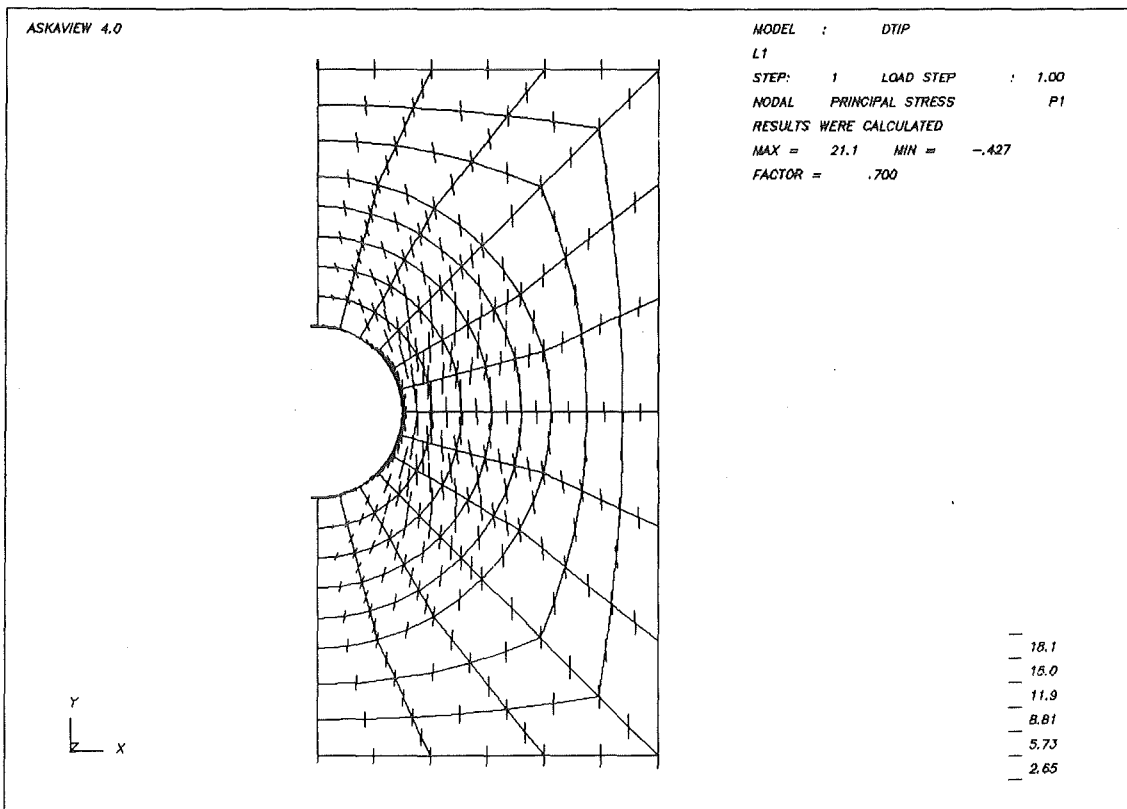
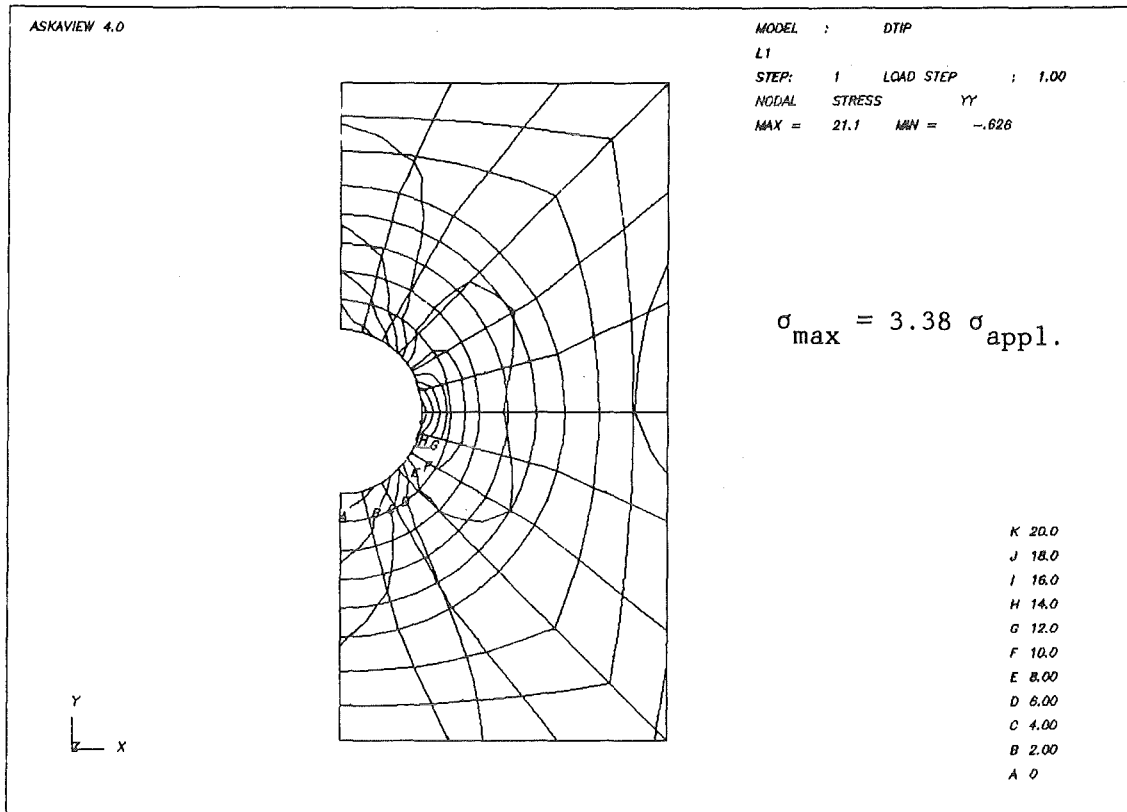
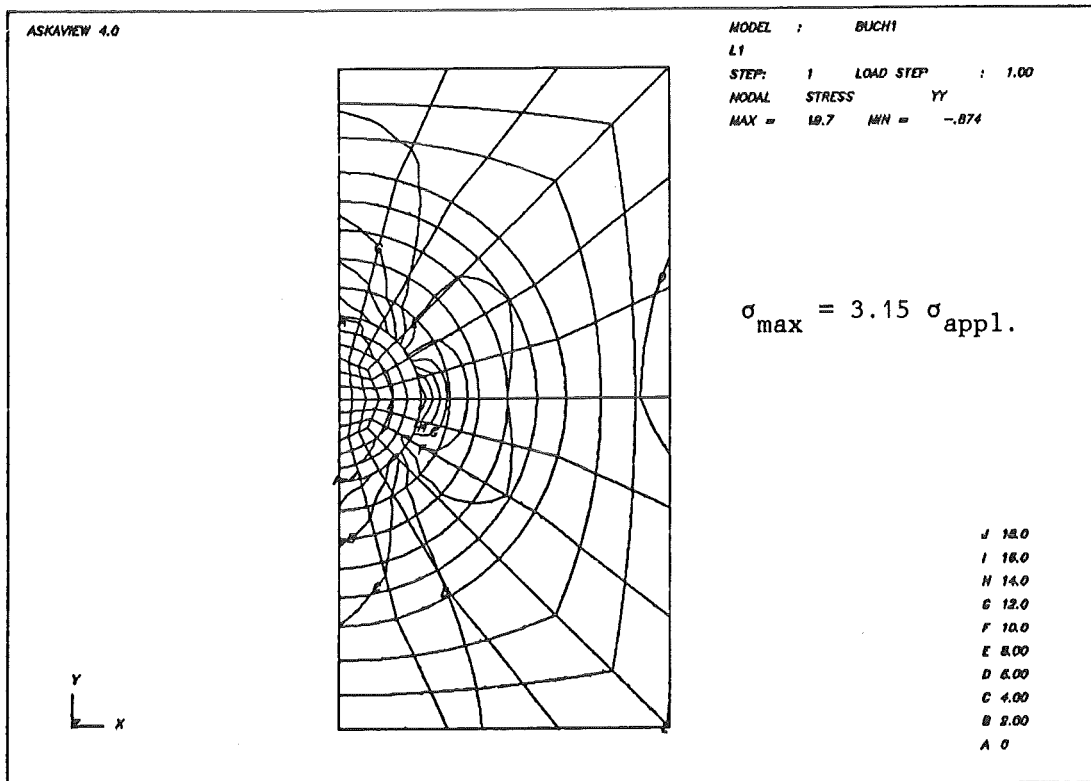
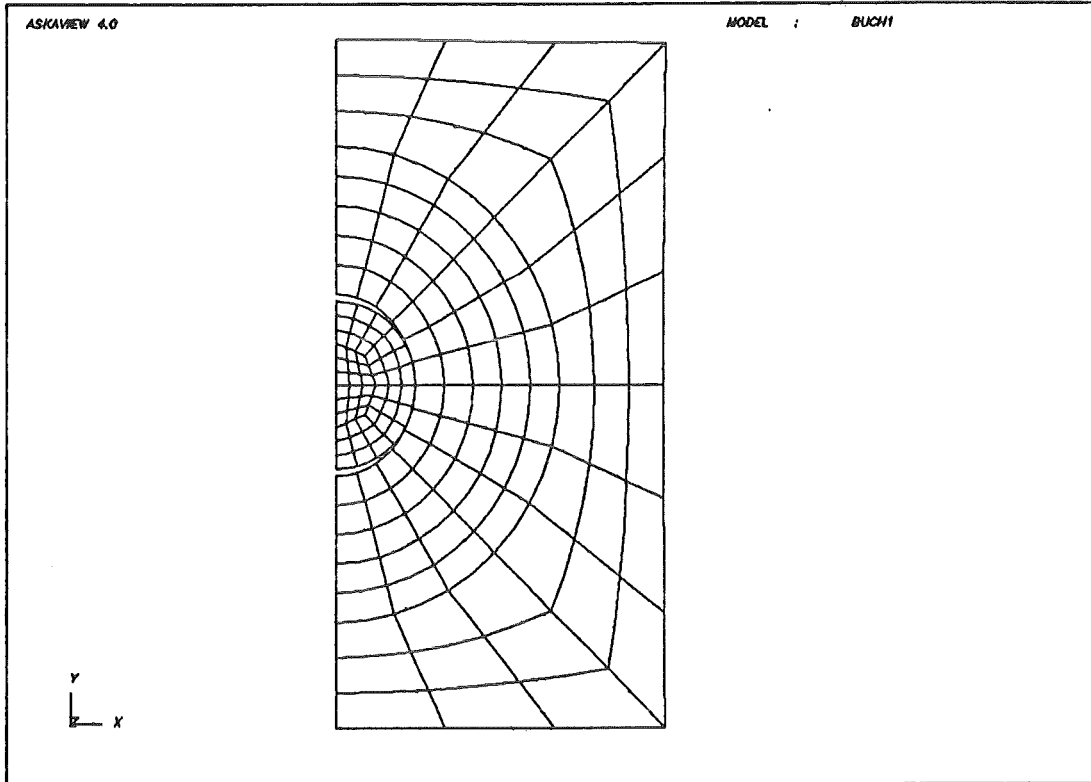


Abb.23 a) FE-Struktur

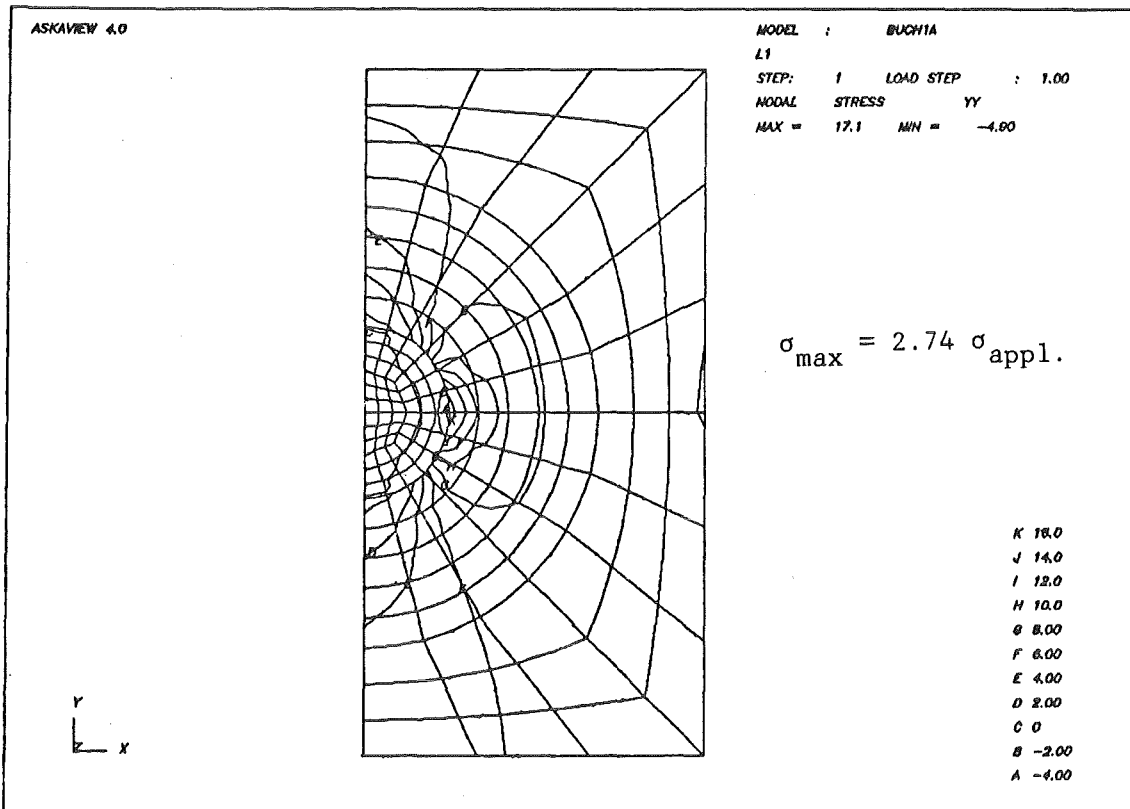
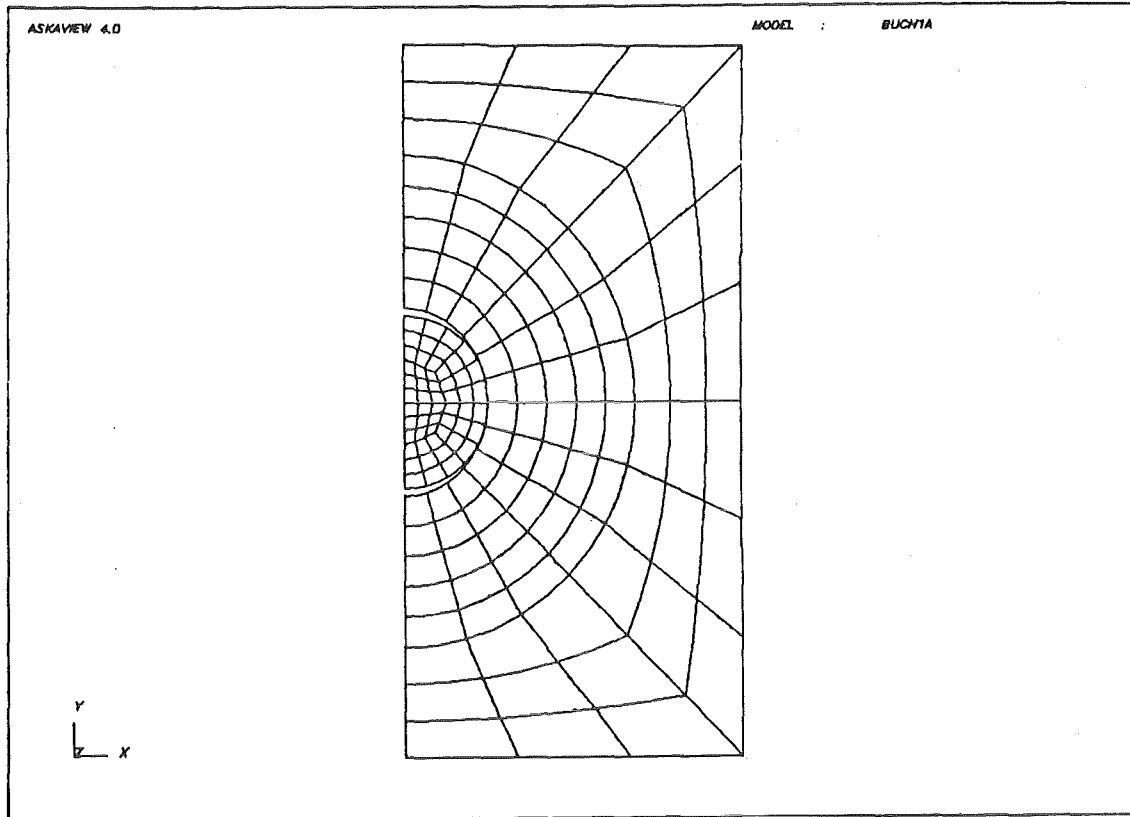


b) Isolinien der Axialspannungen bei Zugbelastung

Hauptspannungstrajektorien der max. Hauptspannung σ_{11}



c) Isolinien der Axialspannungen bei Belastung durch äußeren Zug mit Hertz'schem Kontakt bei Präsenz eines weicheren Aststumpfes ($E_{\text{Platte}}/E_{\text{Ast}} = 10.6 \text{ Nmm}^{-2}$)



- d) Isolinien der Axialspannungen bei Belastung durch äußeren Zug mit Hertz'schem Kontakt bei Präsenz eines härteren Aststumpfes ($E_{\text{Platte}}/E_{\text{Ast}} = 0.75 \text{ Nmm}^{-2}$)

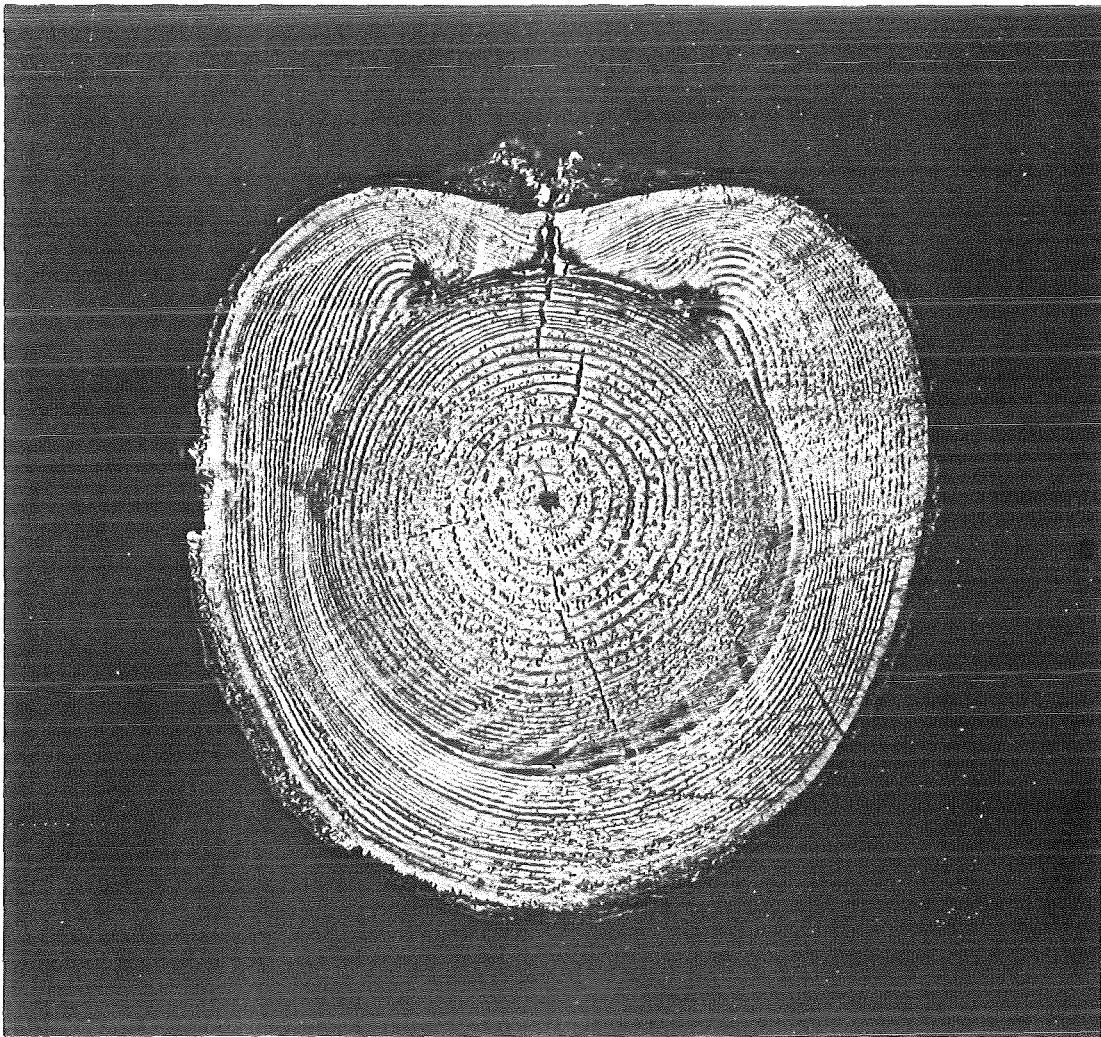


Abb.24 Jahresringe einer Kiefer mit deutlich erhöhter Ringbreite im Bereich des Wundrandes und eher äquidistanter Breite in wundfernen Bereichen deuten auf wundbedingte, d.h. im Rahmen dieser Hypothese kerbbedingte Wachstumszunahme



Abb.25 Ein im mechanischen Abseits bezüglich der Stammspannungen plaziertes Astloch verheilt wegen der weniger eindeutig orientierten Kraftrichtung (diffuse Belastung) eher rotationssymmetrisch



Abb.26 Spindelorientierung der partiell verheilten Wunde in Richtung des zu erwartenden Kraftflusses (Pfeil) (Foto: W. Eisele)

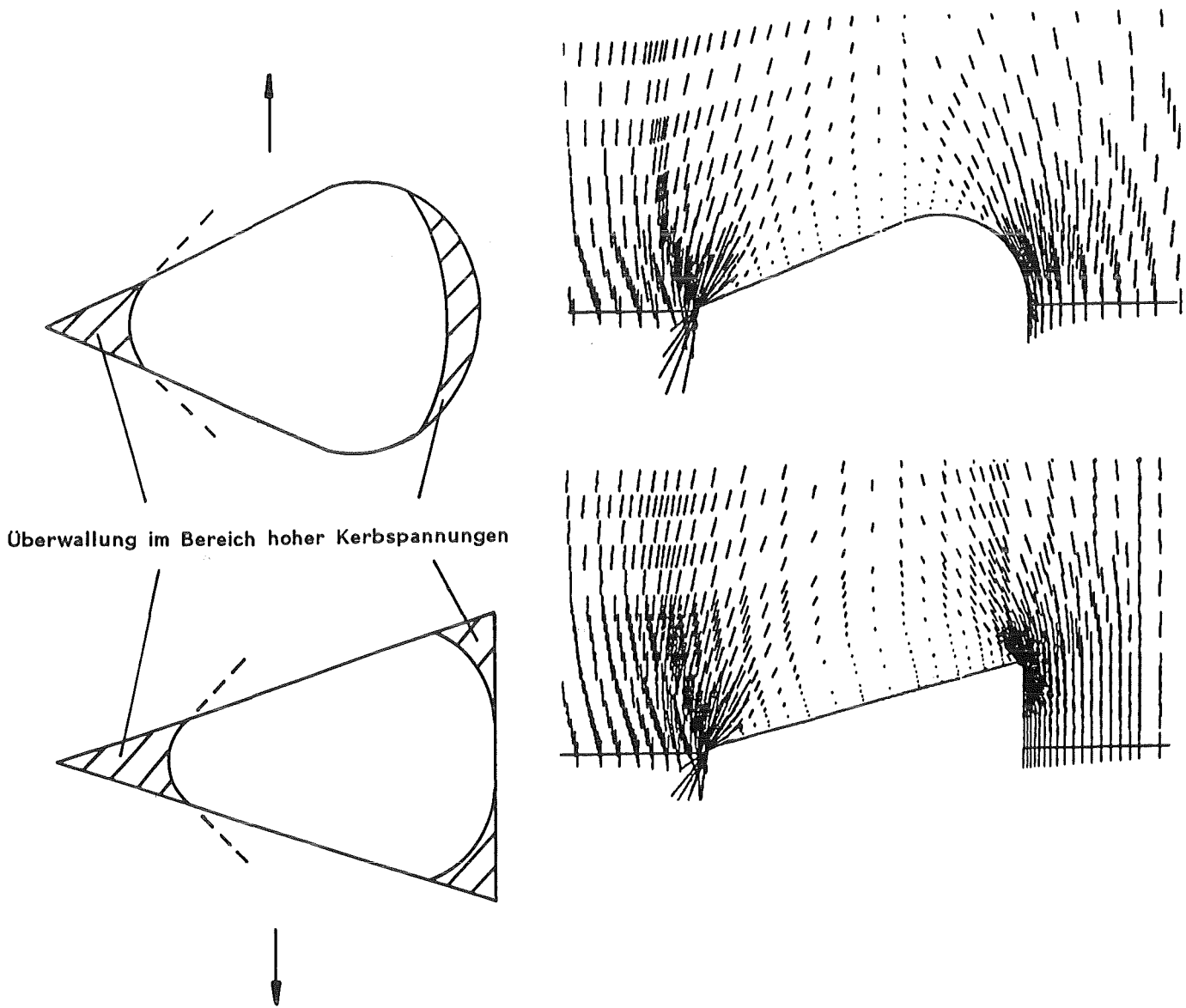


Abb.27 Zwei Kerbformen und die beobachtete Wundheilung (schraffiert), sowie die Hauptspannungstrajektorien aus einer 2D-Finite-Elemente-Analyse

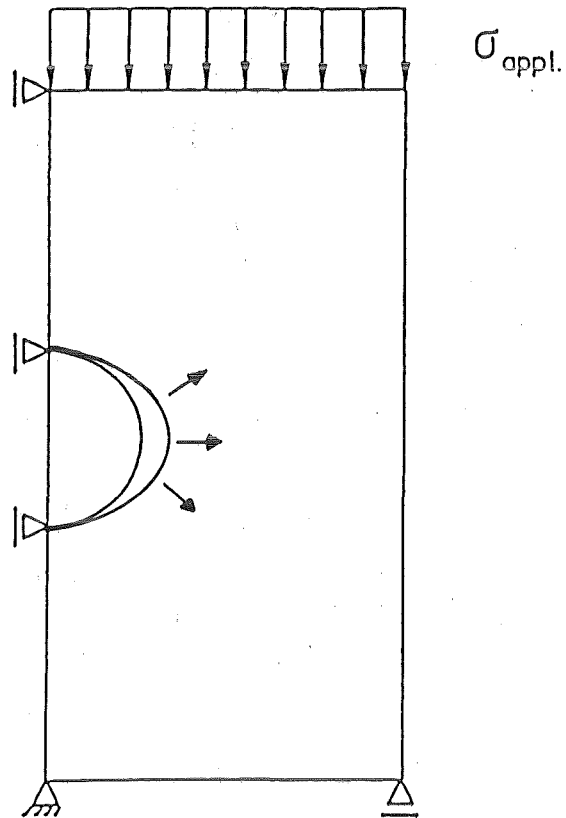
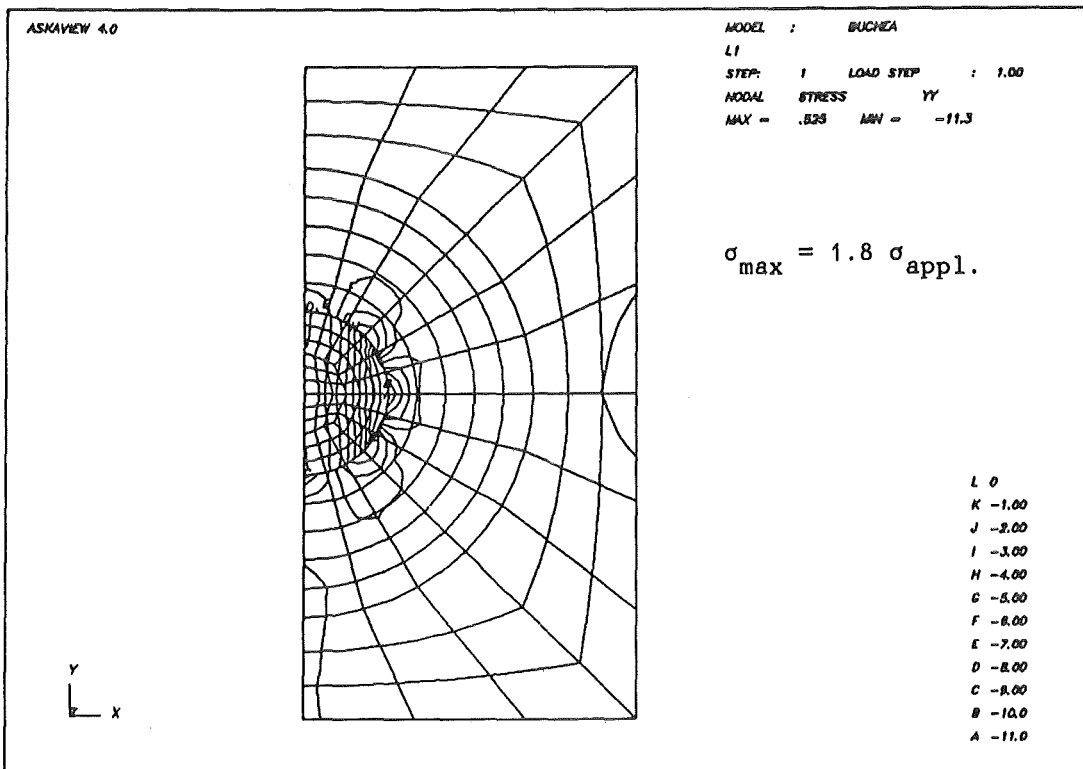
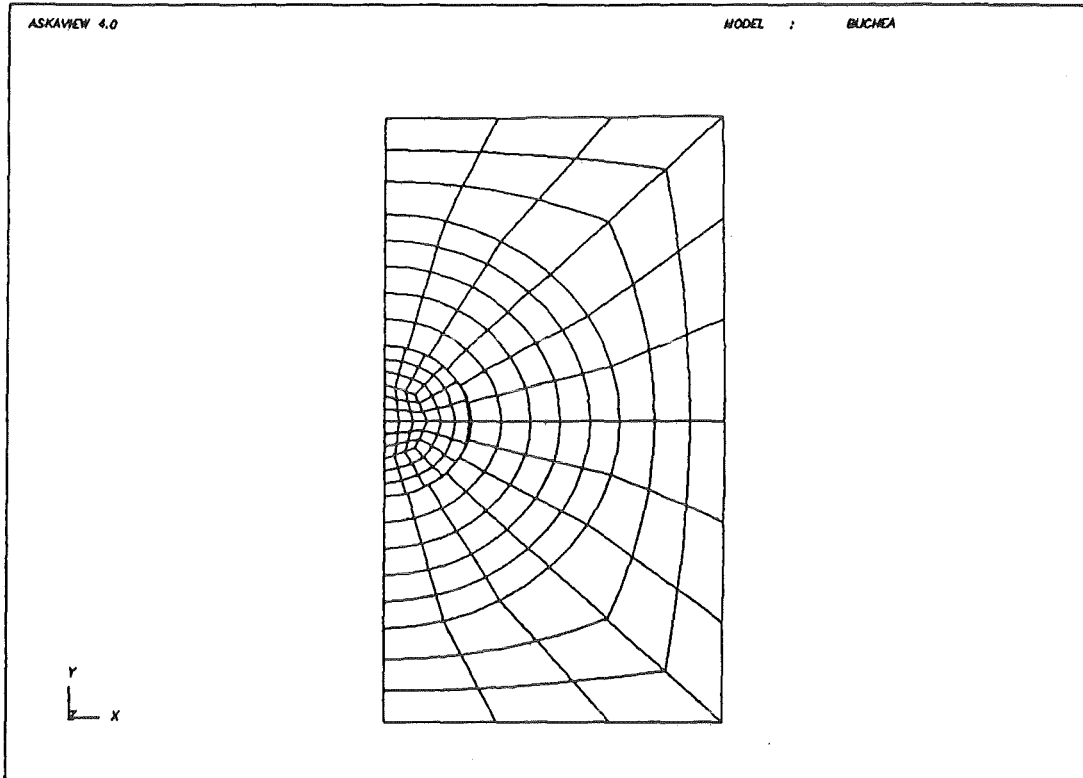
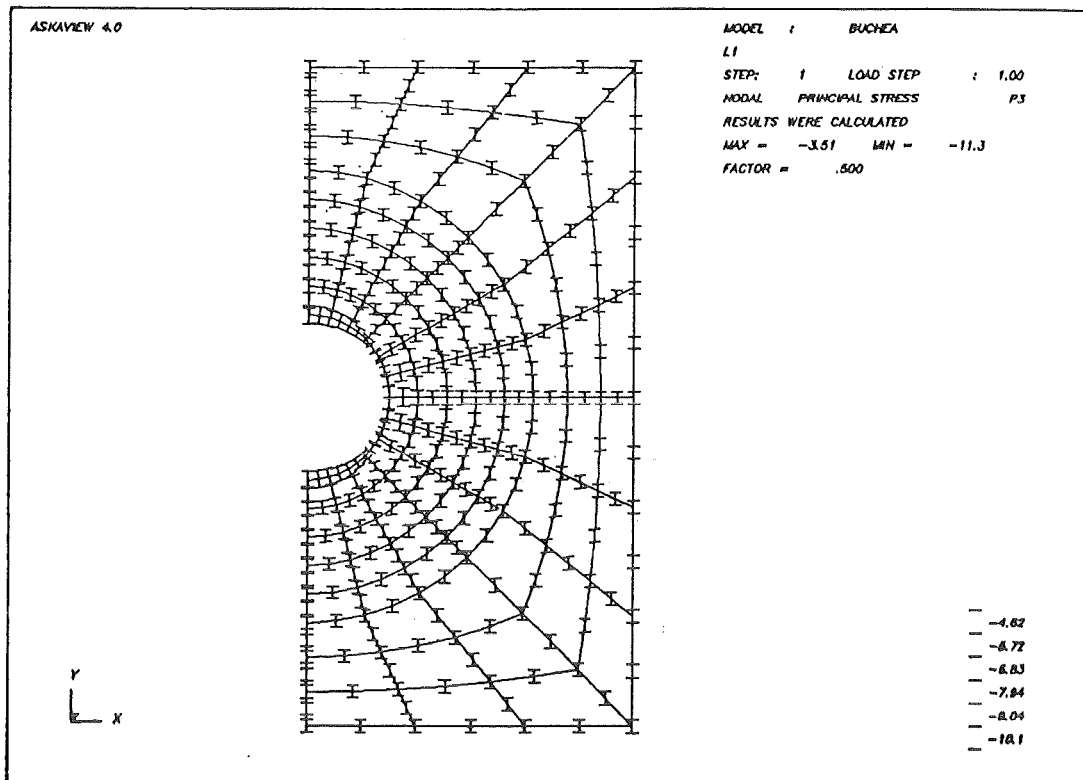


Abb.28 a) Platte mit kreisförmigem Einschuß, von dem sich bei Druckbelastung der seitliche Lochrand abhebt als Folge der Querspannung (Einschuß ist 1.34-fach härter als das umgebende Material was für Äste etwa realistisch ist)

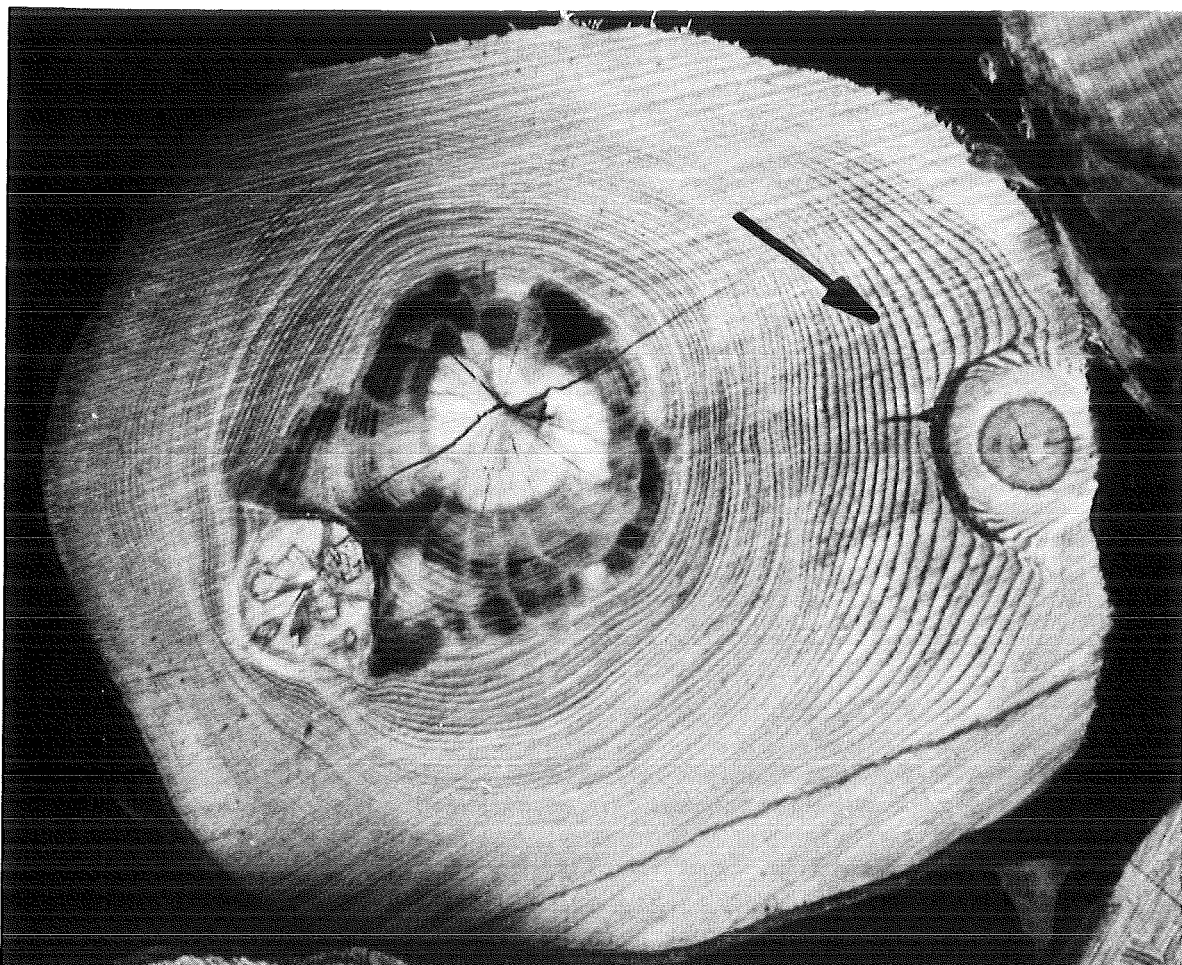


b) Deformation der Struktur unter Druckbelastung

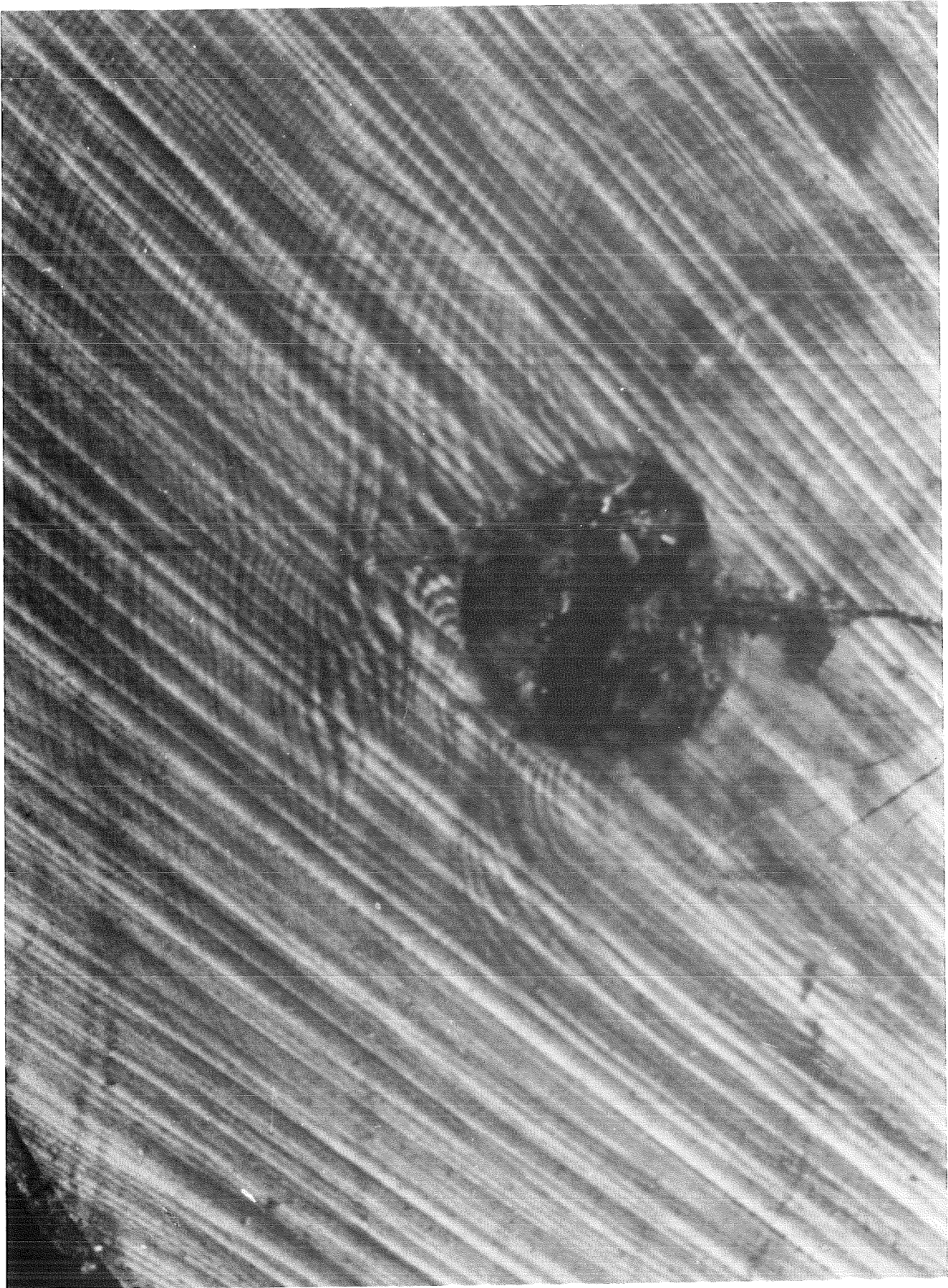
Isolinien der Axialspannungen



c) Hauptspannungstrajektorien der maximalen Hauptspannung im Druckbereich als erwartungsgemäße Orientierung neu zuwachsender Jahresringe



Realisierte Jahresringorientierung im Druckbereich der Umfangsspannungen (Spätholz ist Kraftträger), d.h. angestrebte Senkrechtstellung auf dem Einschuß



d) In etwa trajektorienrichtige Jahresringformierung um einen Granatsplitter

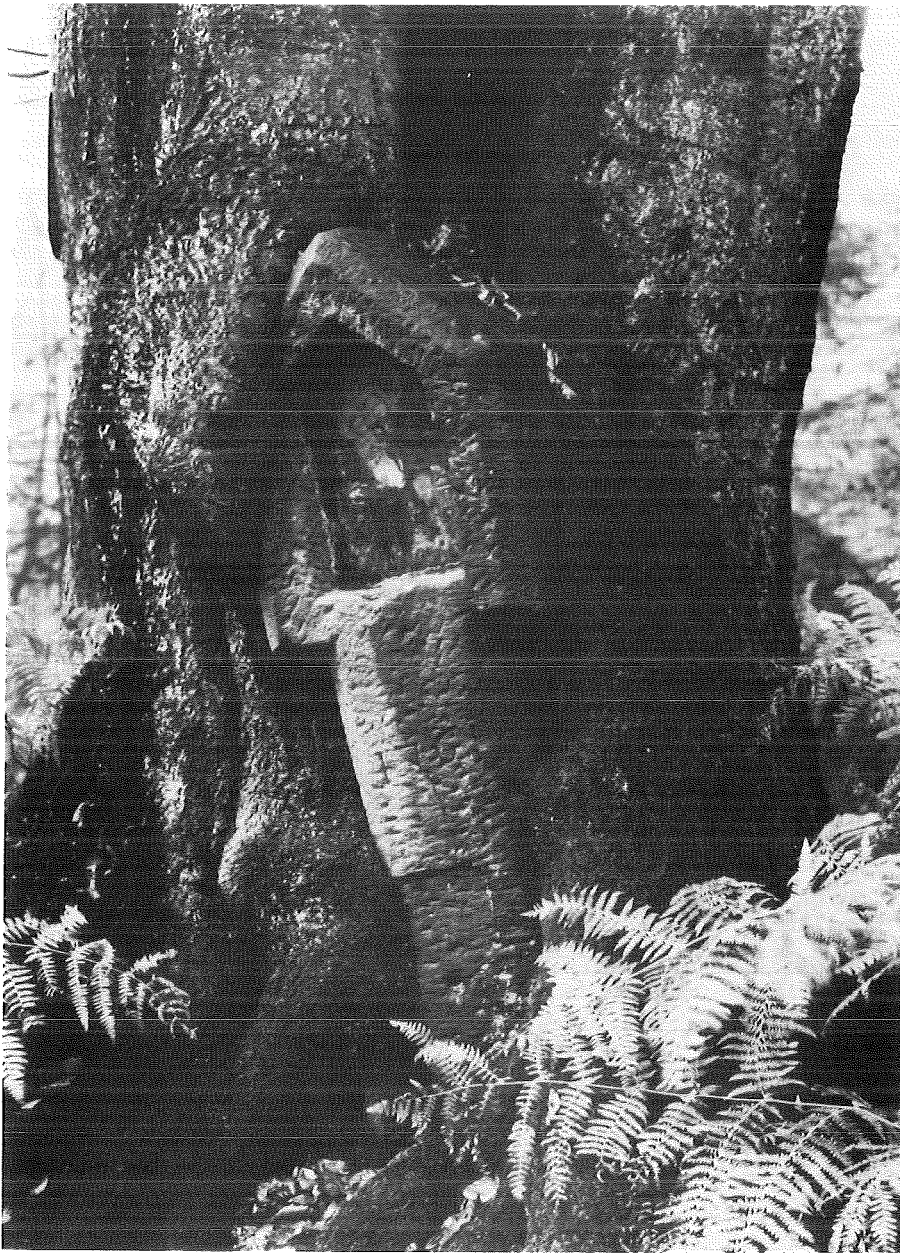


Abb.29 Überwallender Modellierwuchs eines Baumes über einen kontaktierenden Stein

a) Bullauer Bild (Foto: Reinhard)



b) Balzer Herrgott (Foto: Reinhard)





c) Für diese Untersuchung ausgewählter Stein

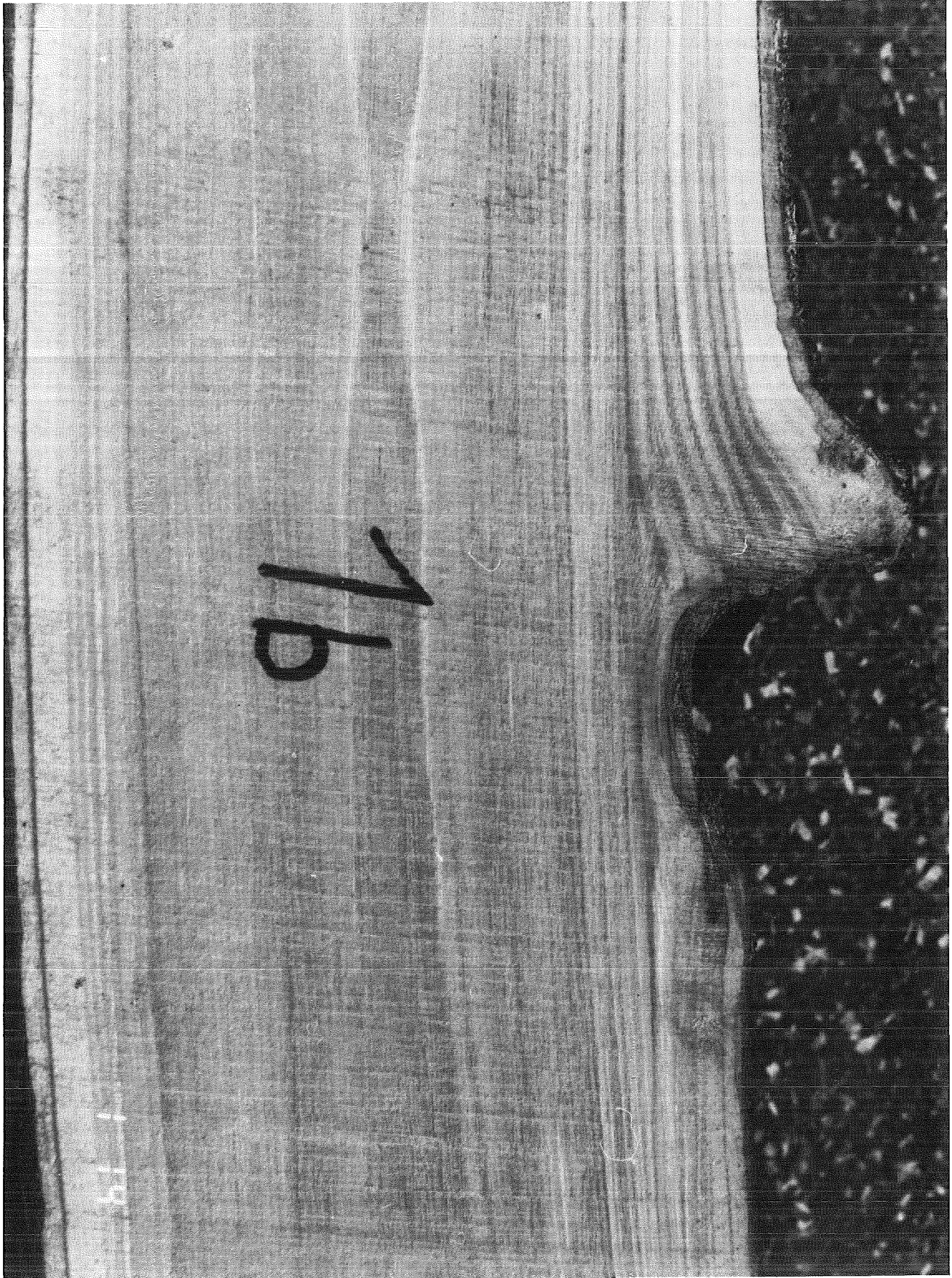


Abb.30 Sägeschnitt in axialer Richtung durch den Stamm in Abb.29c
im Kontaktbereich

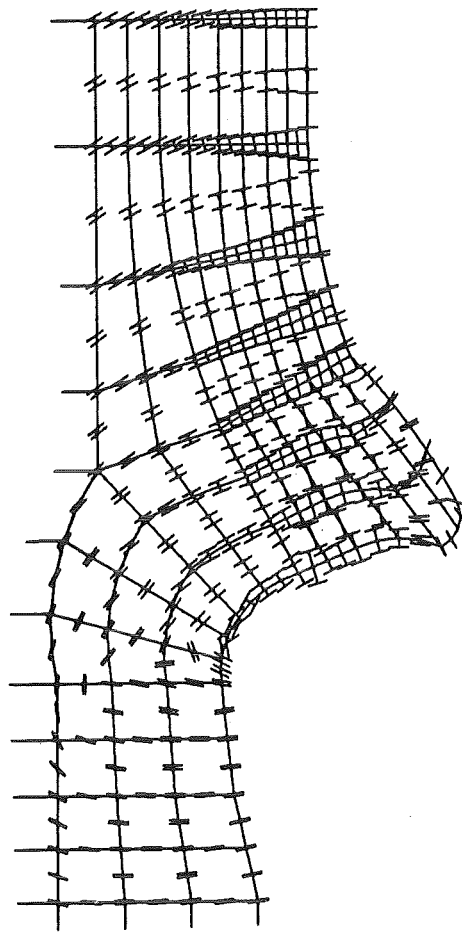
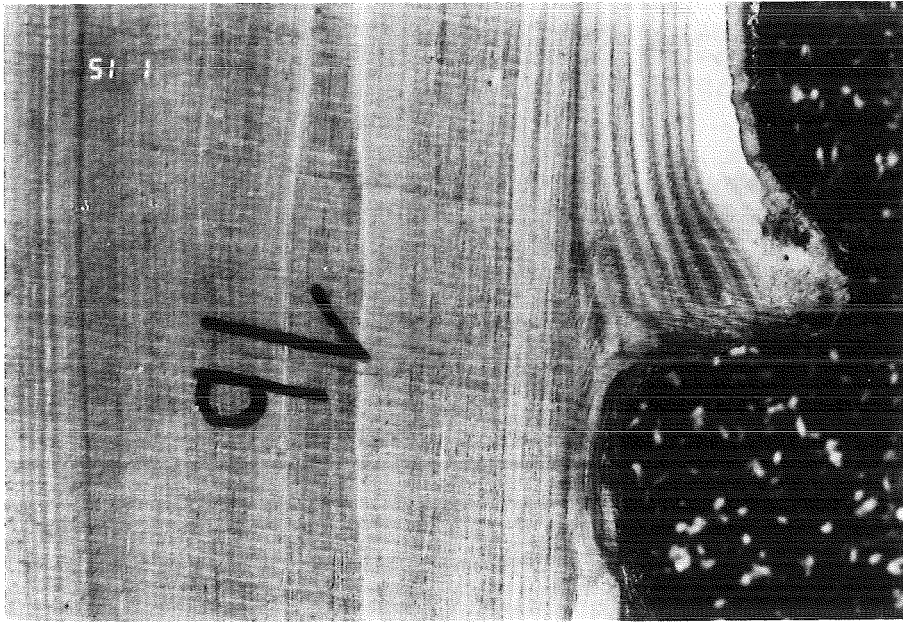


Abb.31 Ausrichtung der Jahresringe entlang der Hauptspannungstrajektorien
d.h. Anstrebung minimalen Schubes zwischen den Jahrringen



Abb.32 Senkrechtstellung der Jahrringe auf die Kontaktflächen zweier verschweißender Stämme im Astgabelbereich
(Ein ähnliches Verhalten dürfte in Abb.13 vorliegen)



Abb.33 Arvenruine für die u.a. der Begriff der 'pathologischen Schönheit' gewählt wurde (Zeichnung nach einem Foto aus [1])

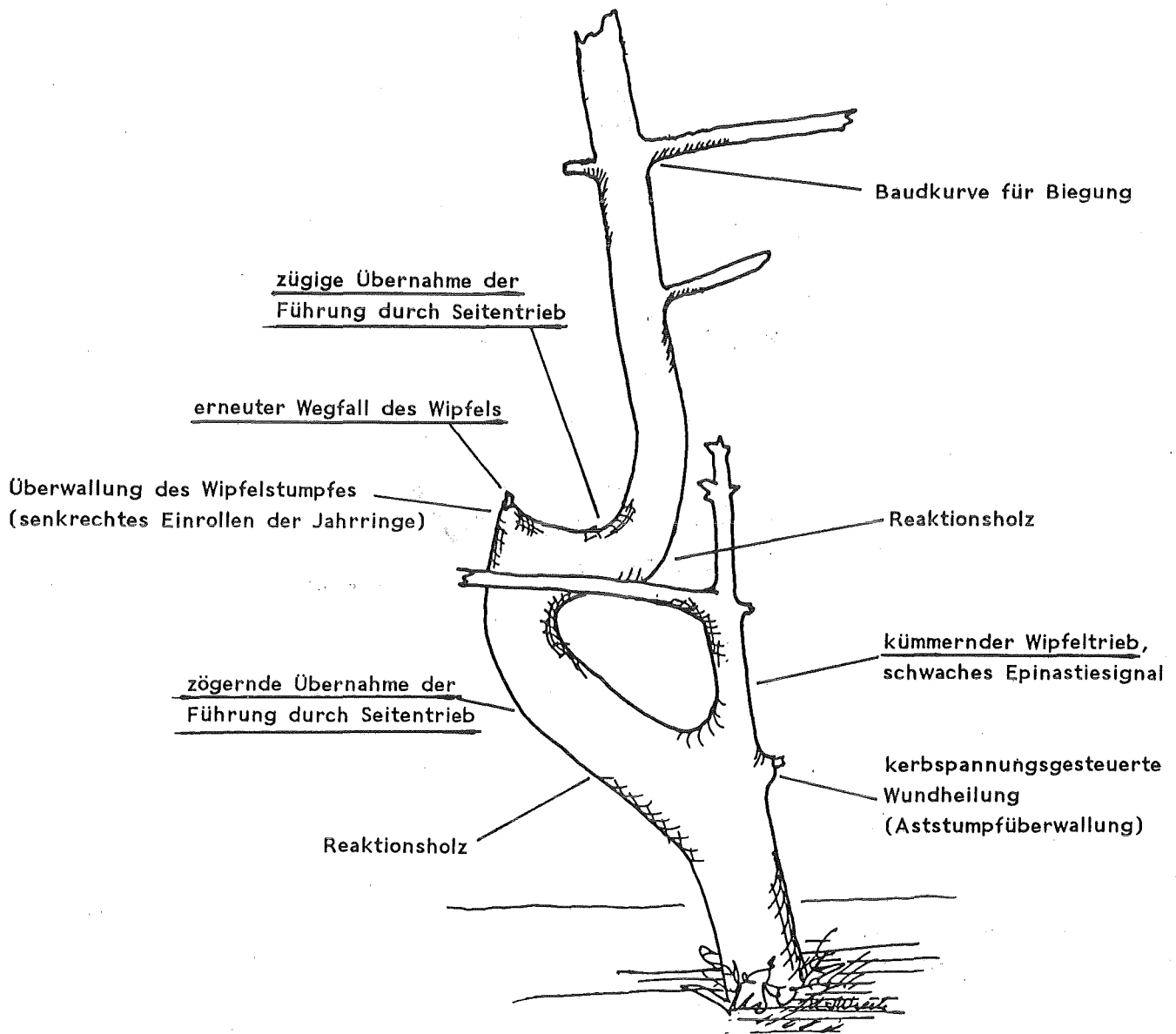


Abb.34 Besonders vielfältige Lastgeschichte, die sich gut nachvollziehen läßt