

Zusammenfassung

Unsicherheiten bei der Auswertung von Untersuchungs-befunden, die mit der zum Nachweis von Fluor-haltigen Holzschutzmitteln dienenden ZA-Reaktion erhalten worden waren, veranlaßten eine möglichst genaue Bestimmung der ihr Verhalten und die Ergebnisse beeinflussenden Faktoren. Dazu wurden Versuche mit der ZA-Reaktion in der Form, wie sie in den Normvorschriften DIN 52618 (1949) und DIN 52161 Blatt 3 (Entwurf 1963) vorgeschrieben ist, sowohl in Lösungen als auch an Holzflächen durchgeführt.

Dabei ergab sich: Das Reagenz wird beim Stehen unempfindlicher. Die Reaktion vollzieht sich nur in stark saurem Medium. Das Fluor von Fluorosilicaten bewirkt den Farbumschlag erst in etwas größerer Menge als das der Mono- und Hydrogenfluoride. Etwa vorhandene Störstoffe müssen bei der Beurteilung der Reaktion berücksichtigt werden. Mit einer Vergrößerung der auf das Holz aufgetragenen Reagenzmenge sinkt die Empfindlichkeit der Reaktion. Die gleiche Wirkung hat Trockenheit des Holzes.

Die übliche Angabe für die Empfindlichkeit des Reagenzes 0,2% Natriumfluorid im Holz ist nicht als quantitative Aussage zu verstehen; sie vermittelt nur einen Anhaltspunkt für die Größenordnung des Fluorid-Gehalts.

Summary

Uncertainties in the evaluation of results gained by means of the ZA-reaction, which is used for the determination of fluorine containing wood preservatives, induced investigations to determine as far as possible the factors influencing process and results of the reaction. Tests with the ZA-reaction according to the standard specification: DIN 52618 (1949) and DIN 52161, No. 3 (Draft 1963), on wood surfaces and, for comparison, in solutions showed that:

When not moved for a while, the reagent becomes less sensitive. The reaction takes place in strongly acid media only. The fluorine of fluorosilicates effects the change of colour only in a somewhat larger amount than that of mono- and hydrogenfluorides. On evaluating the reaction, possibly present disturbing media must be considered. The sensitiveness of the reaction is diminished with a larger quantity of the

reagent applied to the wood. Dryness of wood has the same effect. The usually made statement for the sensitiveness of the reagent „0,2% sodium fluoride in wood“ must not be regarded as a quantitative statement, but it only gives a clue to the range of quantity of the fluorine.

Schrifttum

1. American Wood Preservers' Association: Methods of Determining Penetration of Sodium Fluoride. Proc. AWWA Bd. 15 (1919) S. 143/144. — 2. Bayenclamm, W.: Fungizide Wirkung von Mastenachtpilegemitteln. Elektr.-Wirtschaft Bd. 52 (1953) S. 134. — 3. Becker, G.: Neue Erkenntnisse über Fluorverbindungen im Holzschutz. Angew. Chemie Bd. 62 (1950) S. 382/385. — 4. Becker, G. u. M. Gersonde: Quantitative Untersuchungen über das Eindringen von Fluorid aus Modellbandagen in Holzmasse. Mitt. Dt. Ges. f. Holzforsch. Nr. 42 (1958) S. 34/44. — 5. Berghoff, W.: Beiträge zur Verfahrenstechnik einer quantitativen Bestimmung von Fluor im Holz. Holzforsch. Bd. 11 (1957) S. 80/85. — 6. Boer, H. J. de: Een kleur-reactie op Zirkonium en op Fluor. Chem. Weekblad Bd. 21 (1924) S. 404/405. — 7. Feigl, F.: Quantitative Analyse mit Hilfe von Tüpfelreaktionen. 3. Aufl. Leipzig 1938: Akad. Verl. Ges. — 8. Gersonde, M. u. G. Becker: Untersuchungen über das Eindringen von Fluorid aus Handelsbandagen in Holzmasse. Mitt. Dt. Ges. f. Holzforsch. Nr. 42 (1958) S. 44/53. — 9. Jander, G. u. E. Blasius: Lehrbuch der analytischen und präparativen Chemie. 4. Aufl. Stuttgart 1962: Hirzel. — 10. Oertel, J.: Untersuchungen über die Anwendbarkeit qualitativer Nachweisreaktionen für Fluor und Chrom-III im Holz zum Zweck der Gütekontrolle. Holztechnologie Bd. 1 (1960) S. 51/55. — 11. Peters, E.: Holzschutzstoffe. In: Mahfke, Tröschel, Liese: Handbuch der Holzkonservierung. 3. Aufl. Berlin Göttingen/Heidelberg 1950: Springer. — 12. Sandermann, W.: Grundlagen der Chemie und chemischen Technologie des Holzes. Leipzig 1950: Akademie-Verlag. — 13. Schulze, B.: Zur Methodik der Fluorbestimmung in der Holzforschung. Holzforsch. Bd. 7 (1953) S. 18/25. — 14. Schulze, B.: Zur Frage des Nachweises der Fluor-Verbindungen im praktischen Holzschutz. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 12 (1954) S. 320/324. — 15. Schwalle, C. G.: Studien zur Holzkonservierung I. Z. f. angew. Chemie Bd. 40 (1927) S. 105/110. — 16. Simon, A.: Über Strichproben-Reaktionen zur Erkennung von Imprägniersalzen und deren Eindringtiefe in Holz sowie deren quantitative Bestimmung. I. Polytechnische Tagung der TH Dresden 1950. — 17. Strache, E.: Ein Verfahren zur quantitativen Bestimmung fluorhaltiger Schutzmittel in Holz. Holzforsch. Bd. 7 (1953) S. 114/116. — 18. Zycha, H.: Quantitative Untersuchungen über das Eindringen von Fluorid aus Modellbandagen in den Mast. Mitt. Dt. Ges. f. Holzforsch. Nr. 42 (1958) S. 25/34.

Der Zellkollaps im Holz -- Zweite Mitteilung: Verhütung, Verminderung und Prognose des Zellkollaps

Neuere Forschungsergebnisse

Cell Collapse in Wood — Part II:

Prevention, Reduction and Prediction of Collapse

Recent Results

Von **Walter G. Kauman**, Melbourne*

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Forest Products, South Melbourne, Victoria, Australien

Einleitung — Verminderung und Verhütung des Kollaps: Chemische Behandlung; Physikalische Behandlung — Prognose des Kollaps — Neuere Forschungsergebnisse: Entlastung der Flüssigkeitsspannung durch Keimbildung von Blasen; Kollaps während wiederholter Trocknungszyklen; Kinetik der Kollapsentwicklung — Kollaps in lebenden Pflanzen und einzelnen Zellen: Bäume; Andere Pflanzen; Einzelne Zellen — Schlußbemerkungen: Theoretische Probleme; Praktische Probleme — Zusammenfassung.

Einleitung

In der ersten Mitteilung zu dieser Untersuchung¹ wurde der Zellkollaps sowohl vom theoretischen als auch vom praktischen Standpunkt aus erörtert. Besonderes Augenmerk galt einer Übersicht über die gesicherten Forschungs-

* Zur Zeit Instituto Forestal, Santiago de Chile.

¹ Vgl. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 22 (1964) H. 5, S. 183/196.

ergebnisse; die Folgerungen hieraus für die Verwendung des Holzes in der Praxis wurden ebenso ausführlich dargelegt.

Ziel dieser zweiten Mitteilung ist es, die Übersicht über den Kollaps auf die weniger genau bekannten Erscheinungen auszudehnen. Hierbei sind die Möglichkeiten der Verminderung und Verhütung des Zellkollaps sowie das Auftreten eines Zelleneinbruches im lebenden Baum von besonderer Bedeutung. Ferner werden, um die gegenwärtige Entwicklung der Forschung auf diesem Gebiet zu erläutern, bisher unveröffentlichte Versuchsergebnisse und theoretische Erwägungen über die Physik des Kollaps erörtert.

Verminderung und Verhütung des Kollaps

Eine Dimensionsstabilisierung des Holzes, welche die Kollapsschwindung verhindern würde, wäre offensichtlich äußerst wertvoll. Von mehreren Seiten wurden deshalb Untersuchungen durchgeführt, um dieses Ziel mit Hilfe chemischer oder physikalischer Verfahren zu erreichen.

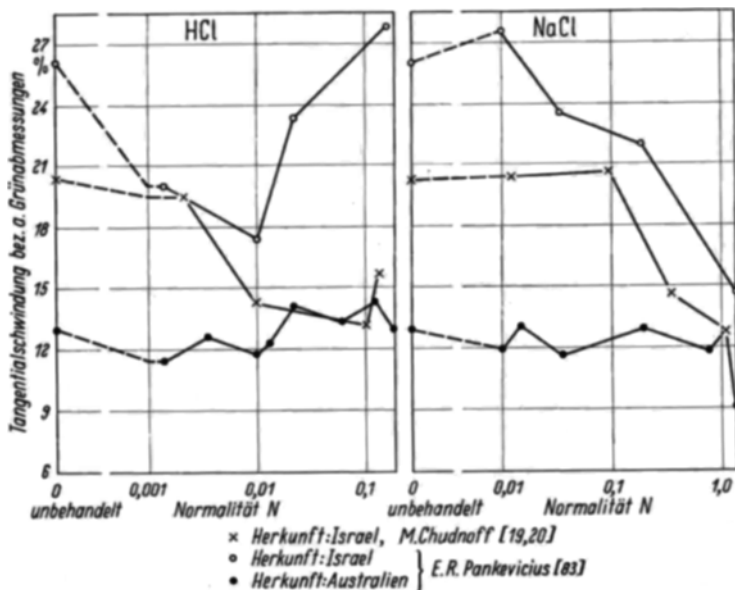


Bild 1. Einfluß der Behandlung mit verdünnter Salzsäure und Natriumchlorid auf die Tangentialschwindung von *E. camaldulensis* australischer und israelischer Herkunft.

Chemische Behandlung

Bei der Erörterung des chemischen Abbaues in der ersten Mitteilung wurde darauf hingewiesen, daß die Kollapsgefahr durch jederlei Behandlung erhöht wird, die irreversible chemische Veränderungen im Holz hervorruft [58].² M. Chudnoff berichtet aber über Erfolge bei israelischem *E. camaldulensis*-Splintholz (Red Gum), das nach mehrwöchiger Lagerung in angesäuerter Zinkchloridlösung oder in sehr schwacher Salzsäurelösung getrocknet wurde [18, 19, 20, 21]. Die Ansicht über eine Wirkung des Zinkchlorids wird heute nicht mehr aufrecht erhalten, doch bewirken schwache Salzsäuren (0,001 bis 0,01 N) tatsächlich eine erhebliche Kollapsverminderung, wenngleich der Erfolg bei australischem Material viel geringer ist als bei Holz israelischer Herkunft [81, 83], wie Bild 1 zeigt. Der Chemismus besteht wahrscheinlich in einer sehr leichten Hydrolyse, die einige Fugen in der Tüpfelmembrane öffnet, wodurch der Halbmesser des Verdampfungs-meniskus größer wird und die kollabierende Kraft abnimmt. Stärkere Behandlungen schwächen dagegen das Zellwandgefüge und erhöhen den Kollaps.

² Bezüglich des zitierten Schrifttums wird auf die umfangreiche Zusammenstellung im Anschluß an die 1. Mitteilung, H. 5/1964, S. 196, verwiesen.

Physikalische Behandlung

Als physikalische Behandlungen werden solche angesehen, die reversible Veränderungen einer physikalischen Eigenschaft des Holz-Wasser-Komplexes bewirken, wie zum Beispiel Veränderungen der Oberflächenspannung oder die Herbeiführung einer Blasenbildung im Zellsaft, aber ohne Veränderung des Holzgefüges.

Das Trocknen von Holz und Cellulose nach Sättigung mit anderen Flüssigkeiten als Wasser wurde von A. J. Stamm [94, 96] und M. V. Merchant [7,4] erörtert. A. J. Stamm und W. P. Petering [91] berichteten, daß benetzende Flüssigkeiten die Eindringung von Schutzmitteln in Nadelholz nicht verbesserten; H. Bruun [14] stellte dagegen fest, daß sie die Eindringung in Laubbölkern verbessern, wenngleich dies wahrscheinlich vor allem für die Längsrichtung gilt. Die Wirkung der Veränderung der Oberflächenspannung auf den Kollaps wurde von R. Cortes und W. G. Kauman (unveröffentlichte Ergebnisse) sowie von E. L. Ellwood u. M. [35] untersucht; als

Verfahren diente die Imprägnierung des Holzes mit netzenden Flüssigkeiten und die Verdrängung des Zellsaftes durch andere Flüssigkeiten. Die Ergebnisse und Schlußfolgerungen zeigten, daß in den meisten Fällen nur eine ziemlich vollständige Verdrängung des Zellsaftes den Kollaps während des anschließenden Trocknungsvorganges merklich verringert. Die Größe der Kollapsverminderung steht in losem Zusammenhang mit der Oberflächenspannung der verwendeten verdrängenden Flüssigkeit. Die besten Ergebnisse wurden mit Polyäthylenglykol, Monoäthyläther und einigen Alkoholika erzielt. Andererseits waren die Imprägnierungs-Behandlungen auf Diffusionsgrundlage weniger erfolgreich, sofern nicht sehr lange Eintauchzeiten angewendet wurden. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Ergebnisse³.

Um eine möglichst schnelle Verdrängung des Wassers durch andere Flüssigkeiten zu erreichen, muß man das Wasser zuerst durch Trocknung unter Vakuum bei Temperaturen bis zu 60°C entfernen, und die Proben müssen dann abwechselnd unter Vakuum und Atmosphärendruck in der neuen Flüssigkeit gelagert werden. Ebenso kann die Wasserverdrängung durch Destillation unter Vakuum erfolgen. Für Sägeholz dürfte dieses Verfahren daher ohne größeren praktischen Wert sein, aber bei dünnen Furnieren können die Diffusionsbehandlungen wahrscheinlich mit Erfolg angewendet werden.

In der gleichen Weise wurden Versuche unternommen, um die kollapsbewirkende hydrostatische Spannung durch die Bildung ausdehnungsfähiger Blasen in den Zelllumina zu verringern. Das Verfahren beruht grundsätzlich auf der Diffusions- oder Druck-Imprägnierung mit doppelkohlensaurem Natrium [111, 70, W. G. Kauman, unveröffentlichte Ergebnisse], brachte praktisch jedoch nur negative Ergebnisse. Tatsächlich erhöht die chemische Aktivität des doppelkohlensauren Natriums im allgemeinen den

³ In nach dem Abschluß der vorliegenden Arbeit veröffentlichten Untersuchungen erklären Ellwood und Mitarbeiter die Wirkung verdrängender Flüssigkeiten wie folgt: (Forest Products J. Vol. 13 (1963) pp. 291...298 u. 401...404): 1. Flüssigkeiten, die das Holz chemisch angreifen, erhöhen den Kollaps. — 2. Chemisch neutrale und mit Wasser vermischbare Flüssigkeiten vermindern den Kollaps verhältnismäßig zu ihrer Oberflächenspannung. — 3. Chemisch neutrale, aber mit Wasser nicht vermischbare Flüssigkeiten können den Kollaps vermindern, wenn sie die Zellwand gut benetzen.

Tabelle 1. Wirksamkeit gegen Schwindung und Kollaps von Fränkchenhölzern mit verschiedenen Mitteln

Fränkchenholz	Konzentration, Gew.-%	Holzart (Schönheit, Wärmeholz, gelbes, orange)	Behandlung	Trocknungs-Verfahren	Wirksamkeit gegen				Bemerkung
					Gesamt-schwindung % ⁺		Kollaps % ^{**}		
					tangential	radial	tangential	radial	
Natriumchlorid (Kochsalz)	8,7	<i>E. camaldulensis</i> (Australien)	Diffusion im Grünzustand Splint Kern	Raumtemperatur	29	32	39	50	W. G. Kauman 58
		(Israel)			11	28	11	59	
	5,8		Splint Kern	Raumtemperatur	56				M. Chudnowf (19)
					32				E. R. Pankevicius 82)
Harnstoff	25	<i>E. delegatensis</i>	Diffusion im Grünzustand	Raumtemperatur	48	49	0	0	E. R. Pankevicius, persönl. Mittlg.
Saccharose	25	<i>E. delegatensis</i>	Diffusion im Grünzustand	Raumtemperatur	48	54	0	20	
Glukose	25	<i>E. delegatensis</i>	Diffusion im Grünzustand	Raumtemperatur	50	62	0	19	
Methanol		<i>Quercus kelloggii</i>	Diffusion im Grünzustand	Trockenschrank 101°C	34	66			E. L. Ellwood u. M. (35)
Äthanol		<i>Quercus kelloggii</i>	Diffusion im Grünzustand	Trockenschrank 101°C	45	68			E. L. Ellwood u. M. (35)
		<i>E. regnans</i>	Diffusion im Grünzustand	Raumtemperatur	19	0	15	0	R. Cortes u. W. G. Kauman, unveröffentl.
		<i>E. regnans</i>	Tränkung des trockenen Holzes	Raumtemperatur	21	39	34	61	
n-Butanol		<i>Quercus kelloggii</i>	Vakuum-Destillation	Trockenschrank 101°C	43	83			E. L. Ellwood, u. M. (35)
Tertiäres Amyl-Äl		<i>Quercus kelloggii</i>	Vakuum-Destillation	Trockenschrank 101°C	73	96			E. L. Ellwood u. M. (35)
Äthylenglycol Monoäthyl-äther	84	<i>Arbutus menziesii</i>	Vakuum-Destillation	Trockenschrank 101°C	48	94			E. L. Ellwood u. M. (35)
Polyäthyl-Än Glycol MW 1000	25	<i>E. delegatensis</i>	Diffusion im Grünzustand	Raumtemperatur	10	50	50	65	E. R. Pankevicius, persönl. Mittlg.
	50	<i>E. delegatensis</i>			27	54	84	94	
Dioxan		<i>Quercus kelloggii</i>	Vakuum-Destillation	Trockenschrank 101°C	51	63			E. L. Ellwood u. M. (35)
Aceton		<i>Quercus kelloggii</i>	Vakuum-Destillation	Trockenschrank 101°C	47	58			E. L. Ellwood u. M. (35)
Toluol		<i>E. regnans</i>	Diffusion im Grünzustand	Raumtemperatur	0	9	0	10	R. Cortes u. W. G. Kauman, unveröffentl.
		<i>E. regnans</i>			Tränkung des trockenen Holzes	Raumtemperatur	42	36	
Alkaren (Dodecyl-Benzol-Schwefelsäure, Natriumsalz)	20	<i>E. regnans</i>	Diffusion im Grünzustand	Raumtemperatur	13	22	55	70	R. Cortes u. W. G. Kauman, unveröffentl.
		<i>E. regnans</i>	Tränkung des trockenen Holzes	Raumtemperatur	57	61	97	91	

* Wirksamkeit gegen Schwindung = $\left(1 - \frac{\text{Gesamt-schwindung der behandelten Proben}}{\text{Gesamt-schwindung der unbehandelten Kontrollen}}\right) \times 100$

** Wirksamkeit gegen Kollaps = $\left(1 - \frac{\text{Rückbildungsfähiger Kollaps der behandelten Proben}}{\text{Rückbildungsfähiger Kollaps der unbehandelten Kontrollen}}\right) \times 100$
(d. h. rückbildungsfähig durch gewöhnliche Rekonditionierung)

+ Probengröße: 2,5 cm Würfel australischer Eukalyptus
2,5 cm × 7,5 cm × 2,5 cm israelischer Eukalyptus
10 cm Länge und 2,5 cm × 3,5 cm oder × 0,3 cm Querschnitt aus *Quercus* und *Arbutus*

Kollaps [58]. Die Blasenkeimbildung in Holz wird nachstehend erörtert. Durch Imprägnierung des Holzes mit Natriumchlorid (Kochsalz) und anderen anorganischen Salzen läßt sich der Kollaps gleichfalls vermindern. Abgesehen von der Füllwirkung [90] bewirken diese Salze eine Verminderung des Feuchtigkeitsgefälles und verringern so die Neigung zum Druckspannungs-Kollaps [59, 81, 83].

Prognose des Kollaps

Keines der erörterten Verfahren läßt sich wirtschaftlich zufriedenstellend anwenden, um den Kollaps zu vermindern oder zu verhüten, außer vielleicht bei Furnieren. Solange eine Verhütung nicht möglich ist, wäre es für den Trocknungsmeister von großem Nutzen, wenn er das Kollapsverhalten eines jeden Stammes schon vor der Trocknung bestimmen könnte. H. D. Tiemann [116] berichtet, daß es einem erfahrenen kalifornischen Holzfachmann, T. J. Gillespie, gelang, bereits im Walde die Bäume auszuwählen, die nichtkollabierendes Holz liefern würden. Leider ist es nach ihm niemand mehr gelungen, eine derartige Bestimmung vorzunehmen. E. L. Ellwood u. M. [36] stellte fest, daß H. D. Tiemanns einfacher „Seifenschaum-Test“ [115] eine einigermaßen genaue Prognose der Trocknungsgüte einer Holzart, nach der Trocknung in organischen Dämpfen, zulasse. Die Bemühungen jedoch, dieses und andere auf Permeabilität beruhende Verfahren anzuwenden, um den Kollaps in einzelnen Stämmen vorauszubestimmen, waren nicht erfolgreich.

Das derzeit beste Verfahren zur Kollapsprognose besteht in der Darrtrocknung kleiner Abschnitte oder radialer Segmente [42] und der Beobachtung des entstandenen Kollaps. Dieses Verfahren nimmt nicht mehr als 24 h in Anspruch, und bei einiger Erfahrung läßt sich der während der Kammer- oder Lufttrocknung zu erwartende Kollaps mit Hilfe des etwas größeren Kollaps während der Darrtrocknung abschätzen.

W. L. Greenhill [44] zeigte, daß der Kollaps in kleinen Proben von 15 cm × 2,5 cm Querschnitt und mindestens 2,5 cm Faserlänge ähnlich dem in ganzen Brettern oder in Leisten desselben Querschnitts ist, unter der Voraussetzung, daß die freiliegenden Hirnflächen der kleinen Proben abgedichtet werden, um ein Austrocknen über diese Hirnflächen zu verhindern. Der in der Flächenmitte von Würfeln mit 2,5 cm Kantenlänge gemessene Kollaps entspricht annähernd dem maximalen Dickenkollaps von 2,5 cm dicken Brettern [59] in der gleichen Gefügerichtung.

Neuere Forschungsergebnisse

Entlastung der Flüssigkeitsspannung durch Keimbildung von Blasen

Wie in der ersten Mitteilung im Abschnitt über die Theorie des Zelleinbruchs ausgeführt wurde, kann der Flüssigkeits-Spannungs-Kollaps nur auftreten, wenn das freie Wasser im Zellumen keine Blasen enthält, welche die Spannung durch Ausdehnung auffangen können, und wenn die Zugfestigkeit des Wassers ausreicht, um ohne zu zerreißen die Spannung zu übertragen.

Die kinetische Theorie der Bildung von Blasen durch Keimbildung in Flüssigkeiten unter Spannung wurde von M. Volmer [123] und anderen ausgearbeitet. In einem neueren Überblick stellt T. H. Bull [11] jedoch fest, daß „die experimentellen Kenntnisse über die Zugfestigkeit von Flüssigkeiten mager und ungewiß“ seien. Wie schon früher mitgeteilt, kann aber der Zellsaft wahrscheinlich Spannungen von mindestens 10 atü ohne Hohlrumbildung übertragen. Die höchsten verlässlichen Versuchswerte, über die berichtet wird, gehören einer Größenordnung von

40 atü an [104] für Wasser in Glas bei rund 50°C, selbst wenn das Wasser gelöste Luft enthält. Für fließendes Wasser dürfte die Festigkeit jedoch niedriger sein, vor allem unter turbulenten Bedingungen. Gereinigtes Wasser kann bis auf 273°C erwärmt werden, bevor es explodiert [12], was einer Spannung von rund 50 atü entspricht.

Der Zugspannungsbruch reiner Flüssigkeiten wird durch Blasen oder „Keime“ verursacht, die auf Grund von thermisch bedingten, örtlichen Dichteschwankungen in der Flüssigkeit entstehen. Erreichen diese Blasen eine kritische Größe, so dehnen sie sich aus und die Flüssigkeit reißt; wenn sie diese Größe nicht erreichen, werden sie wieder aufgelöst. Der kritische Halbmesser, r_{crit} , wird von M. Volmer [123] mit

$$r_{crit} = \frac{4\sigma}{3P} \quad (1)$$

angegeben, worin P = hydrostatische Spannung in der Flüssigkeit ist. Die Häufigkeit der Blasenbildung J ist

$$J \approx Z_1 \cdot e^{-\frac{\lambda}{kT}} \sqrt{\frac{6\sigma}{(3-b)m}} \exp - \left[\frac{16\pi\sigma^3}{3kT(P_N - P_L)^2} \right] \quad (2)$$

Hierin bedeuten Z_1 die Anzahl der Moleküle je cm^3 , k die Boltzmannsche Konstante, m die Molekülmasse, λ die molekulare latente Verdampfungswärme, $b(P_N - P_L)/P_N$ (für $b > 3$ wird die Gleichung abgeändert), P_N der Druck im Keim, P_L der Druck in der Flüssigkeit.

Tabelle 2 enthält einige kennzeichnende Werte. Sie zeigen, daß bei Zimmertemperatur theoretisch eine Spannung in der Größenordnung von mehreren tausend Atmosphären erforderlich ist, um reines Wasser zu zerreißen. Die viel niedrigeren Versuchswerte für die Zugfestigkeit des Wassers sind auf die Bildung von Keimen auf der Oberfläche kleinster Verunreinigungen oder an Rissen in der Oberfläche des umgebenden Gefäßes, wo die freie Energie zur Blasen-Keimbildung sehr stark vermindert sein kann, zurückzuführen.

Bei einer Spannung von 10 atü liegt der kritische Blasenhalbmesser bei 1000 Å; er ist damit fast sicher

Tabelle 2. Blasenbildung in reinem Wasser
durch Blasenkeime

Überhitztes Wasser

Temperatur °C	Blasen- radius Å	Außendruck kp/cm ²	Hydrostatische Spannung in Wasser kp/cm ²	Zeit bis zur Bildung einer Blase
100	∞	1	0	∞
125	7800*	1	2,4	10 ¹⁰⁷ Jahre
225	290*	1	24	10 ¹⁰¹ Jahre
320***	25*	1	111	1 s

Mechanischer Zugbruch

Temperatur °C	Kritischer Radius Å	Hydrostatische Spannung in Wasser kp/cm ²	Zeit bis zur Bildung einer Blase
25	420 000**	0	10 ¹⁰¹¹ Jahre
25	1 000	10	10 ¹⁰⁶ Jahre
25	10	1000	10 ¹⁵⁰ Jahre
25	6	1600	1 s
75	9	1000	1 s

* Die Werte geben nur die Größenordnung an, da die Theorie verschiedene Annäherungen einschließt. Kleine Fehler bei den verwendeten Werten der Oberflächenspannung können erhebliche Ungenauigkeiten in den Ergebnissen bedingen, da die Oberflächenspannung in der 3. Potenz eingeht.

** Mit einer Beziehung, genauer als Gl. (1), berechnet.

*** Eine verbesserte Theorie besagt, daß die Zugfestigkeit von Wasser bei 273°C aufgehoben wird, was experimentell bewiesen werden konnte [12].

größer als die weiteste Öffnung in der Zellwand von Angiospermen. Es ist daher unwahrscheinlich, daß Blasen mit der kritischen Größe von außen in das Lumen eindringen können.

Die thermisch bedingten, örtlichen Dichteschwankungen in einer Flüssigkeit führen die Entstehung einer Blase mit 0,4 Halbmesser ungefähr einmal je Sekunde und cm³ herbei, aber eine Blase von 1000 Å Halbmesser entsteht nur einmal in 10¹⁰ Jahren (Gl. (21)). organische Unreinheiten in Konzentrationen von weniger als 10⁻²⁰%, können zwar die kritische Blasengröße durch die Bildung einer Außenschicht mit niedrigerer Oberflächenspannung verringern [73], werden aber kaum die Geschwindigkeit der Bildung von 1000 Å Blasen auf mehr als eine in 10¹⁰ Jahren erhöhen.

Das beobachtete Auftreten von Gasblasen und gasgefüllten Zellen in Holz muß daher entweder auf physiologische Vorgänge im lebenden Baum [52] oder auf winzige Unreinheiten zurückzuführen sein, die als Grundlage zur Bildung von Blasenkeimen dienen. Die Häufigkeit der Blasenkeimbildung im Gefäßsystem der Bäume wurde auf eine Blase je Monat und cm³ geschätzt. Das bedeutet, daß ein Leitgefäß von 1 cm² Querschnitt und 10 cm Länge durch das Abreißen der Wassersäule nach 3 Tagen außer Betrieb gesetzt wäre. Wenn aber das Gefäß in eine Million Teile von je 10⁻⁶ cm² Querschnitt aufgeteilt ist, wird nur jeweils eines von ihnen jeden dritten Tag außer Betrieb gesetzt, und es wird rund 8000 Jahre dauern, bis das ganze Leitsystem funktionsuntüchtig geworden ist [97]. Dies gibt eine Erklärung dafür, daß hydrostatische Spannungen in den kleinen Gefäßen der Bäume und in den Lamina der Holzfasern viel länger erhalten bleiben als in größeren Kapillaren, wie sie für Laborversuche verwendet werden.

Die Rolle der Gasblasen und Blasenkeime bei der Entwicklung des Kollaps wurde vom Verfasser in bisher unveröffentlichten Untersuchungen mit Würfeln von 0,5 bis 1,5 cm Kantenlänge aus *E. regnans* ermittelt.

Einfluß der Blasen

Die Proben wurden bei Temperaturen unter 50 C bis zum wasserfreien Zustand getrocknet und durch Lagerung in luftfreiem bzw. luftgesättigtem Wasser wieder bis zur Sättigung getränkt. Die Behandlung in luftfreiem Wasser bestand aus einem ersten Eintauchen unter Vakuum und anschließend mehrfachen Wechsel von Vakuum und Atmosphärendruck in Zyklen mit Abständen von wenigen Minuten. Die Mittelwerte der Ergebnisse in Tabelle 3 zeigen, daß in Holz, gefüllt mit gasfreiem Wasser, der Kollaps wesentlich größer ist. Einige frühere Ergebnisse von W. L. Greenhill, die diese Befunde bestätigen, sind zum Vergleich mit aufgeführt. Um zu diesen Ergebnissen zu gelangen, muß dafür Sorge getragen werden, daß eine vollkommene Durchdringung und Sättigung des Holzes mit dem gasfreien Wasser gewährleistet ist.

Einfluß der Blasenkeime

Keime in Form kleinster Gas- oder Dampfblasen können aus einer Flüssigkeit durch die Anwendung hohen Druckes, der das Gas in die Lösung treibt, beseitigt werden. Würfel von 1 cm Kantenlänge aus *E. regnans* wurden mit gasfreiem Wasser gesättigt und während des Eintauchens einem Druck von 850 Atmosphären bei 25 C für 24 h ausgesetzt. Diese Druckbehandlung führte während der anschließenden Trocknung zu keinem wesentlichen Anwachsen des Kollaps. Damit zeigte sich, daß die Sättigung des Holzes mit gasfreiem Wasser das Fehlen von Blasenkeimen über der kritischen Größe gewährleistet.

Künstliche Blasenkeimbildung

Theoretisch müßte es möglich sein, den Zellkollaps durch die Einführung von Blasen über der kritischen Größe in die Zellumina während des Trocknens zu verhindern. Wie bereits erwähnt, schlugen W. K. Loughborough und L. D. Espenas [70] zu diesem Zweck eine Imprägnierung des Holzes mit doppeltkohlensaurem Natron vor, doch erwies sich dieses Verfahren als nicht erfolgreich. Grüne Würfel mit 0,5 cm Kantenlänge aus *E. regnans* wurden in mit CO₂ gesättigtem Wasser bei einem Druck von 50 atü sowie in einer teilweise gesättigten Lösung bei 250 atü für eine Dauer bis zu 17 h imprägniert. Die Sättigung wurde durch Einlegen einer äquivalenten Menge Trockeneis in den Tränkkessel gewährleistet. Beim Absetzen des Druckes wird die Lösung stark übersättigt, und in den Zellumina entstehen zahlreiche Blasen. Der Kollaps während der nachfolgenden Trocknung unterschied sich jedoch nicht wesentlich von dem in unbehandelten Kontrollproben.

Durch hohe örtliche Spannungskonzentration im Wasser, wie sie in einem Ultraschallfeld auftreten, könnte ebenfalls eine Hohlraumbildung in den Lamina hervorgerufen werden. Voruntersuchungen über das Trocknen kleiner *E. regnans*-Würfel, die in einem Ultraschallfeld behandelt worden waren, zeigten keine Kollaps-Verminderung.

Kollaps während wiederholter Trocknungszyklen

Proben, die durch Wasserlagerung nach dem Trocknen wieder bis zum Grünzustand gesättigt werden, kollabieren bei erneuter Trocknung. Dieses Verfahren kann in vielen Zyklen mit dem immer gleichen Ergebnis wiederholt werden, gleichgültig ob die Proben nach jeder Trocknung rekonditioniert werden oder nicht. In den meisten Fällen werden die Proben nach dem ersten Trocknungs- und Eintauchzyklus ihre Originalabmessungen nicht vollkommen zurückgewinnen, sondern einen Restkollaps von 2% der Grünabmessungen behalten.

Bild 2 zeigt Ergebnisse, die man während des wiederholten Trocknens und der neuerlichen Tränkung von Würfeln mit 1 cm Kantenlänge aus *E. regnans* erhielt. Die

Tabelle 3. Kollaps in Eukalyptus-Proben nach Trocknung und Sättigung in luftfreiem und luftgesättigtem Wasser

Tränkung	Holzfeuchtigkeit nach Tränkung %	Gesamtschwindung bei 12% Holzfeuchtigkeit %		Rückbildungsfähiger Kollaps %		Beobachter
		tangential	radial	tangential	radial	
in luftfreiem H ₂ O	124	15,4	8,1	7,2	3,5	W. G. Kauman (1956), unveröffentl. (<i>E. regnans</i>)
in luftgesättigtem H ₂ O	81	8,3	4,7	1,2	0,9	
		Volumenschwindung				
unter Vakuum	109	32,0		24,8		W. L. Greenhill (1938), unveröffentl. (<i>E. globulus</i>)
bei atmosph. Druck	97	12,2		4,7		

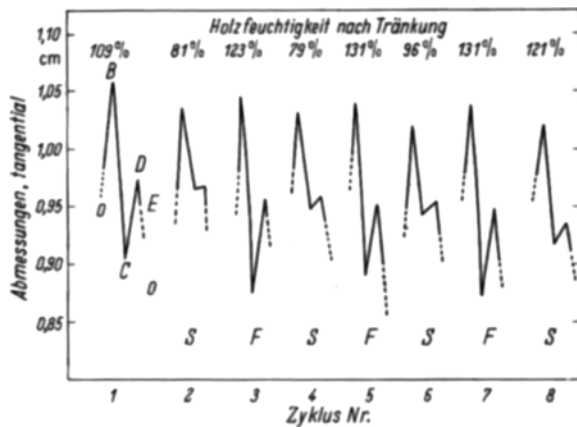


Bild 2. Abmessungen eines Würfels mit 1,0 cm Kantenlänge aus *E. regnans* nach mehrfacher Darrtrocknung bei Temperaturen unter 50°C und Sättigung durch Wasserlagerung. Luftfreies (F) bzw. luftgesättigtes (S) Wasser wurde abwechselnd verwendet. OB Tränkbehandlung zur Sättigung darrtrockener Proben mit Wasser, BC Rücktrocknung auf Raumtemperatur, CD Rekonditionierung, DE Rücktrocknung auf 12% Feuchtigkeit, EO Darrtrocknung.

Würfel wurden abwechselnd in Zyklen in gasfreiem bzw. luftgesättigtem Wasser getränkt.

Kinetik der Kollapsentwicklung

Die außerordentliche Verformung der Zellwand, ihr Verbleiben im verformten Zustand und die Zeitabhängigkeit der Kollapsbildung weisen darauf hin, daß die Kollapsbildung einen Fließvorgang enthält, bei dem eine Lösung und Neubildung von Verbindungen zwischen submikroskopischen Gefügeeinheiten stattfindet.

Wird dieses Fließen als zeitabhängiger Vorgang betrachtet, so kann die Aktivierungsenergie aus der Geschwindigkeit der Kollapsentwicklung bei verschiedenen Temperaturen abgeleitet werden mit der bekannten Beziehung

$$k_r = A \cdot e^{-\frac{E_{act}}{R \cdot T}} \quad (7)$$

worin k_r die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante, E_{act} die Aktivierungsenergie und A einen Parameter bedeuten.

Unter Verwendung von früher ermittelten Versuchsergebnissen [59, 56] wurde festgestellt, daß die Aktivierungsenergien für den Kollaps rund 4,6 kcal/Mol bei Würfeln mit 2,5 cm Kantenlänge aus *E. regnans* im Temperaturbereich 40° bis 80°C bzw. 3,1 kcal/Mol bei 1,5 mm dickem Schäl furnier aus *E. delegatensis* im Temperaturbereich 85° bis 115°C betragen. Der Wert für die 2,5-cm-Würfel stellt eine Obergrenze dar, da die Diffusion einen maßgebenden Einfluß auf die Geschwindigkeit gehabt haben kann; für das Furnier jedoch ergab sich, daß die Geschwindigkeit der Dimensionsänderungen allein von der Kollapsbildung abhing.

Die Aktivierungsenergie von 3 bis 4 kcal/Mol liegt ungefähr in der Mitte zwischen den Werten von Wasserstoffbrücken und van der Waalschen Kräften und zeigt an, daß beide Bindungsarten Einfluß auf Zellwandverformungen während des Kollaps haben können. Die notwendige Energie, um in Holz von 16 kp/cm² Druckfestigkeit einen 20%igen Kollaps herbeizuführen, beläuft sich auf etwa $1,5 \cdot 10^{-4}$ kcal/cm³ trockene Holzmasse. Wird die Aktivierungsenergie von 4 kcal/Mol durch dieses Ergebnis geteilt, so ergibt sich ein spezifisch je Mol gebundenes Volumen von rund 27000 cm³, mit anderen Worten rund $2 \cdot 10^{19}$ Bindungen/cm³ müssen gelöst werden, um den Kollaps zu erzeugen. Diese Zahlen liegen in der gleichen Größenordnung wie die von A. H. Nissan [80] in seiner Theorie über das rheologische Verhalten von durch Wasserstoffbrücken gebundenen Festkörpern gefundenen Werte.

Obwohl die Anwendung der Geschwindigkeitstheorie auf einen Fließvorgang zu übereinstimmenden und einsichtsvollen Ergebnissen führen kann [75], ist es doch etwas gefährlich, die Annäherung zu weit auszulegen. Insbesondere die Theorie der absoluten Reaktionsgeschwindigkeiten war für einfache Reaktionen vorgesehen, und ihre Anwendung zur Deduktion von Molekularmechanismen auf verwickeltere Vorgänge in flüssigen oder festen Aggregatzuständen, muß mit größter Vorsicht geschehen.

Die tatsächliche Geschwindigkeit der Kollapsentwicklung hängt von der Probengröße und -geometrie ab, welche die Trocknungsgeschwindigkeit und den Anteil des Druckspannungskollaps bestimmen. Die Bilder 3 a und 3 b zeigen, daß in 1,5 mm Furnier und 1 mm dicken Sägeproben der Kollaps bei ungefähr 100% Feuchtigkeitsgehalt einsetzt und bei rund 30% abgeschlossen ist. Andererseits beginnt in 2,5-cm-Würfeln der Kollaps bei einer höheren Durchschnitts-Holzfeuchtigkeit, was auf das vorhandene Feuchtigkeitsgefälle zurückzuführen ist, verringert sich jedoch, sobald die Feuchtigkeit sich 30% nähert, da der Spannungszustand in der äußeren trockenen Schicht einen stabilisierenden Einfluß ausübt (Bild 3 b).

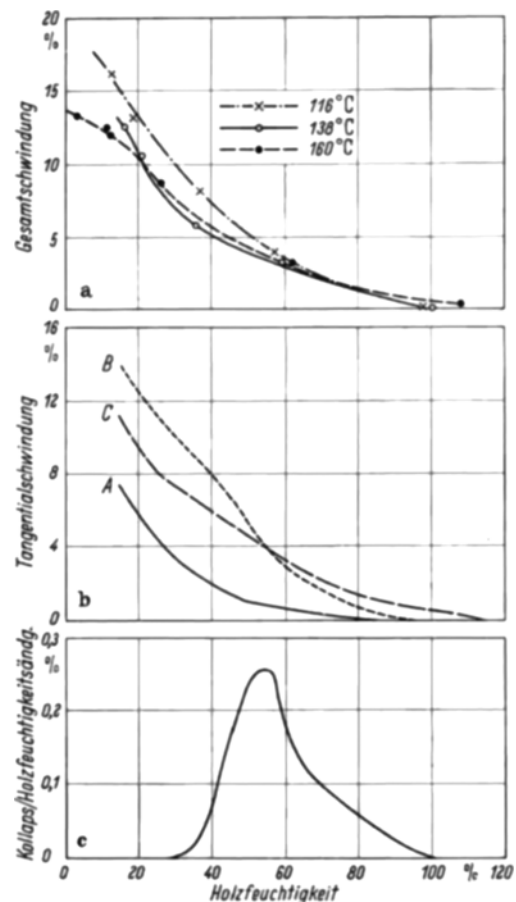


Bild 3. Entwicklung des Kollaps während der Trocknung. a) 1,5 mm Schäl furnier aus *E. delegatensis*, getrocknet durch Atmungs-Verfahren in einer Heizpresse bei den angegebenen Temperaturen.

b) Kleine *E. regnans*-Proben bei 20°C getrocknet. A Kollapsfreie Schwindung an Proben mit 1 mm Länge in Faserrichtung und 2,5 cm x 2,5 cm im Querschnitt; B Proben mit kleinstmöglicher Druckspannung: 1 mm radial, 2,5 cm tangential und 2,5 cm in Faserrichtung; C 2,5-cm-Würfel; der Einfluß des Feuchtigkeitsgefälles auf den früheren Kollapsbeginn und des Spannungszustandes auf die Verminderung der Gesamtschwindung sind zu erkennen.

c) Differentialkurve der Kollapsentwicklung, erhalten durch Subtraktion (Kurve A - Kurve B in 3 b) und graphische Ableitung.

Das Maximum der Differentialkurve der Kollapsentwicklung (Bild 3f) für 1 mm dicke gesägte Proben zeigt, daß die Entstehungsgeschwindigkeit des Flüssigkeits-Spannungs-Kollaps bei Feuchtigkeiten im Bereich von 50 bis 70% ihren Höhepunkt erreicht. Die Form der Kurve ergibt sich theoretisch durch zwei Einflußgrößen: a) die statistische Verteilung der spannungsbeeinflussenden Porengrößen, welche die Größe der Kraft bestimmt, die den Flüssigkeits-Spannungs-Kollaps herbeiführt, und b) die Funktion, welche die Zeitabhängigkeit des Fließ- oder Kriechvorganges, von dem die Verformungsgeschwindigkeit in der Zellwand abhängt, bestimmt. In der Praxis können Feuchtigkeitsgefälle, selbst in dünnen Proben, nicht vollständig vermieden werden, und das Maximum neigt dazu, etwas flacher auszufallen als im Idealfall.

Kollaps in lebenden Pflanzen und einzelnen Zellen

Bäume

Kollaps wurde mehrfach auch in lebenden Bäumen beobachtet. Im allgemeinen wird er in Form von kleinen inneren Rissen im Frühholz der Jahrringe sichtbar, die den in eschenartigen Eukalypten oft beobachteten kleinen Trockenrissen sehr ähnlich sehen (vgl. Bild 6 der 1. Mitt.).

W. R. Day [27] berichtete über Trockenrisse in englischen Kiefernen, und H. J. Lutz [71] beobachtete ähnliche Risse im Frühholz der Alaska-Weißbuche (*Picea glauca*). Seine Mikrophotographien zeigen Kollaps rund um diese Risse. J. S. Reid und M. T. Mitchell [86] untersuchten die gleiche Erscheinung an Douglasie (*Pseudotsuga laricina*) aus Neuseeland und G. J. Amos [4] an in Australien gepflanzter *Pinus radiata*. H. D. Ticmann [112] beschrieb ähnliche kleine Risse im Frühholz von Gelbpappel, die aber auch während der Trocknung aufgetreten sein können.

Fast alle Forscher bringen die Risse mit Kollaps in Zusammenhang, hervorgerufen durch übermäßige hydrostatische Spannungen in den flüssigkeitsführenden Nylemgeweben des Baumes. Übermäßige Spannungen können auftreten, wenn die Transpiration schneller erfolgt als die Wasseraufnahme, z. B. unter Dürrebedingungen, wenn hohe Bindungsenergien der Bodenfeuchtigkeit zu überwinden sind, oder in Gebieten wie Alaska, wo Dauerfrost im Boden die Wassierzufuhr zu den Wurzeln beschränkt. Die Wasseraufnahme der Wurzeln wird auch in wassergesättigten Böden oder an überschnittenen Orten durch mangelhafte Belüftung beeinträchtigt [67].

Eine andere Auffassung [4] schreibt diese Risse den Frostschäden zu. Es wurde gezeigt, daß, zumindest bei *Pinus radiata*, der tangentiale Wärmeausdehnungs-Koeffizient des Holzes negativ ist. Bei niederen Temperaturen kann die Tangentialausdehnung des Holzes zusammen mit dem Schwinden des Holzsaftes Spannungen verursachen, die groß genug sind, um das Frühholz reißen zu lassen.

Nach Ansicht des Verfassers aber stehen diese Vorgänge mehr im Einklang mit der Kollapstheorie.

Andere Pflanzen

Der Flüssigkeits-Spannungs-Kollaps spielt in der Physiologie einer Anzahl von Pflanzen eine bedeutende Rolle, indem er die Kräfte liefert, um mechanische Bewegungen in verschiedenen Organen der Pflanze in Gang zu setzen. Das bestbekannte Beispiel ist der Öffnungsmechanismus des Farnsporangiums [52, 101]. Das Sporangium wird durch die hydrostatische Spannung, die in den Zellen des Annulus entsteht, aufgerissen. Die Spannung wird dann durch Blasen aufgehoben, die in den Zellhöhl-

räumen auftreten, und die dadurch entstehende ruckartige Rückwärtsbewegung der Kapsel streut die Sporen aus. Die Spannung während der ersten Öffnung wird auf 350 atm geschätzt, entsprechend einem Porendurchmesser von rund 50 Å.

Solche Kollapsmechanismen tragen z. B. auch zur Bewegung der Fangblase der fleischfressenden *Utricularia*-Arten beim Erbeuten kleiner Insekten bei.

Einzelne Zellen

Der Kollaps oder die „Zytorrhise“ ist an lebenden Pflanzenzellen in hypertonischen Lösungen, gegen welche die Zellmembran auf Grund osmotischer Wirkung semipermeabel ist, zu beobachten. Er kommt auch in Zellen mit voll permeablen Wänden vor, wenn das Wasser sehr schnell durch eine hochkonzentrierte Lösung entzogen wird [60].

Bisher konnte der Kollaps an einzelnen Holzfasern nicht beobachtet werden, da es schwierig ist, eine einzelne unversehrte Faser aus dem Holzverband herauszulösen. An einzelnen Fasern im Faserbrei für die Papierherstellung ist Kollaps ebenfalls schon festgestellt worden; sehr aufschlußreiche Erörterungen und Photographien von H. W. Emerton [37] sowie von D. H. Page und P. A. Tydeman [84] können als eine Einführung zu diesem Thema angesehen werden. H. W. Emerton berichtet dort über die interessante Feststellung, daß einzelne Nadelholz-Fasern, wenn sie vom getrockneten Zustand aus getrocknet werden, so daß dabei keine Oberflächenspannungen auftreten, nicht kollabieren. Diese Beobachtung stützt die Flüssigkeits-Spannungs-Theorie. Wenn sie wieder befeuchtet werden, nehmen die kollabierten Fasern in der Mehrzahl annähernd ihre ursprüngliche Form wieder an, d. h. sie werden „re-konditioniert“, obwohl sie delignifiziert sind. Bei der Papierherstellung vergrößert der Kollaps in den Fasern die für die Faserbindung verfügbaren Flächen und ermöglicht damit dichtere Papiere mit höherer Zug- und Berstfestigkeit.

Kollaps wird ebenso in unligifizierten Baumwollfasern beobachtet. In diesen Fasern ist er irreversibel, und beim Befeuchten bildet er sich nicht mehr zurück [128].

Schlußbemerkungen

Seit der ersten Entdeckung des Kollaps im Jahre 1913 wurden große Anstrengungen unternommen, um diese Erscheinung richtig zu deuten und zu verstehen, ebenso wie zur Entwicklung praktischer Verfahren, mit denen der Einfluß des Kollaps auf die praktische Verwendung des Holzes untersucht werden kann. Das vorliegende umfangreiche, in dieser Arbeit genannte Schrifttum legt Zeugnis über die Forschungsarbeiten, die sich ein halbes Jahrhundert mit dem Kollaps befaßten, und über die errungenen Erfolge ab.

Zum Abschluß dieser Übersicht sei auf solche Fragen hingewiesen, die immer noch unzureichend erforscht sind oder deren Erforschung bisher keine Erfolge brachte. Sowohl auf theoretischem wie auf praktischem Gebiet gibt es hier ungelöste Probleme.

Theoretische Probleme

Obwohl die Flüssigkeits-Spannungs-Theorie des Kollaps durch umfangreiche Versuchsergebnisse gestützt wird, sind die physikalischen Grundlagen noch längst nicht geklärt. Ein vollkommenes theoretisches Verständnis wird erst möglich sein, wenn die Physik eine allgemeine Theorie der Flüssigkeiten entwickelt hat; inzwischen könnten experimentelle Untersuchungen an Flüssigkeiten unter mechanischer Spannung sehr nützlich sein.

Die Theorie des Druckspannungs-Kollaps befindet sich immer noch im Anfangsstadium. Eine eingehendere Analyse der Rheologie des Holzes während des Kollaps ist hier erforderlich. Diese sollte mit einer Analyse des Fließens der Zellwand und mit der thermodynamischen Berechnung der beteiligten Energien verbunden sein. Das Studium der Beziehungen zwischen Kollaps und dem Feinbau sowie der chemischen Zusammensetzung und der Veränderung des Holzes bietet ein weiteres aufschlußreiches Untersuchungsfeld. Der Verfasser ist der Ansicht, daß Untersuchungen über den organischen und physikalischen Chemismus des Holzes im Hinblick auf den Kollaps sehr wohl Antworten auf die Fragen nach den Ursachen der unterschiedlichen Kollapsstärken in den verschiedenen Holzarten und in einzelnen Bäumen liefern können. Die Wechselbeziehung zwischen Wärmeabbau und Kollaps, und die Wirkung des Vordämpfens, könnte ebenso geklärt werden. Auch die theoretischen Grundlagen der Rekonditionierung sowie die Suche nach einem Verfahren zur Verhinderung des Kollaps gehören hierher. Die Untersuchung des Einflusses der Tüpfelmembran von Laubhölzern auf den Kollaps stellt eine weitere interessante Frage dar.

Praktische Probleme

Forschung und Erfahrung während über 30 Jahren ermöglichten es dem australischen Forest Products Laboratory, Trocknungspläne aufzustellen und Verfahren zu empfehlen, die zur Lösung der meisten praktischen Fragen, die bei der Bearbeitung kollabierenden Holzes auftreten, geeignet sind. Ähnliche Auskünfte können heute amerikanische, britische und die meisten anderen großen Holzforschungslaboratorien geben.

Außer der rein wirtschaftlichen Seite bleibt es eine der größten Fragen, wie man den Holzpraktiker, vor allem den Bedienungsmann an der Trockenkammer, mit den Forschungsergebnissen vertraut machen und in die Lage versetzen kann, diese praktisch anzuwenden. Insbesondere ist zu überlegen, daß die Einführung der gegenwärtig nur in Australien praktisch durchgeführten Rekonditionierung bedeutende wirtschaftliche Gewinne durch bessere Holzqualitäten, auch in Gebieten wie Europa oder Südamerika bringen kann, wo empfindliche Laubhölzer augenblicklich immer noch im kollabierten Zustand verarbeitet werden.

Obwohl kollabiertes Holz zufriedenstellend verarbeitet werden kann, sollten alle Anstrengungen gemacht werden, um ein Verfahren zur Verhinderung der Kollapsentwicklung überhaupt oder wenigstens zur Verminderung zu finden. Wie schon gesagt, können Fortschritte in dieser Richtung wahrscheinlich durch ein besseres theoretisches Verständnis der Beziehung zwischen Kollaps und den grundlegenden Eigenschaften des Holzes erzielt werden.

Zusammenfassung

Der Zellkollaps während des Trocknens kann durch vorherige Imprägnierung mit Füll- oder Netzmitteln oder durch eine sehr milde Säurehydrolyse vermindert werden. Keines der bisher bekannten Verfahren ist allerdings voll wirksam, und noch ist keines wirtschaftlich anwendbar.

Die Theorie der Keimbildung von Blasen im Zellsaft wird erörtert, und es wird gezeigt, daß die theoretische

Häufigkeit der Blasenbildung vernachlässigbar ist. Zwar bestätigen die Versuchsergebnisse die Bedeutung der Luftblasen im Holz für die Verminderung des Kollaps, jedoch scheinen keine Blasen durch Keimbildung während der Trocknung kollabierenden Holzes zu entstehen. Versuche, Blasenkeime durch Druckimprägnierung mit Kohlendioxyd oder durch Ultraschallfelder einzuführen, blieben bisher ohne Erfolg.

Es wurde gezeigt, daß der Kollaps dünner Holzquerschnitte zeitabhängig ist, und in der Annahme, daß es sich um einen reaktionskinetischen Vorgang handelt, wurde die Aktivierungsenergie als im Bereich von 3 bis 4 kcal/Mol liegend errechnet. Der Kollaps setzt bei 100 bis 120% Feuchtigkeit ein und ist beendet, sobald die kollabierenden Zellen den Fasersättigungspunkt erreicht haben. Die Kollapsentwicklung erreicht bei 50 bis 70% Feuchtigkeit ihre höchste Geschwindigkeit.

In lebenden Bäumen wurde der Kollaps unter solchen äußeren Bedingungen beobachtet, die übermäßige hydrostatische Spannungen im leitenden Xylem verursachen; dies ist der Fall, wenn die Transpirationsgeschwindigkeit die der Wasseraufnahme überschreitet. Mechanismen wie der Zellkollaps sind ebenfalls für mechanische Bewegungen in einigen Pflanzen verantwortlich. Kollaps wird häufig in Fasern für die Papierherstellung beobachtet und führt zu erhöhter Zug- und Berstfestigkeit. Einige unge löste Fragen der Kollapsforschung werden erwähnt und erfolgversprechende Wege für weitere Fortschritte beschrieben.

Summary

Collapse during drying may be reduced by prior impregnation with bulking or wetting agents, or by very mild acid hydrolysis. However, none of the treatments known are 100 per cent effective, and none is as yet commercially practicable.

The theory of nucleation of bubbles in the cell sap is discussed, and the theoretical nucleation frequency is shown to be negligible. Although experimental evidence confirms the importance of air bubbles in the wood in reducing collapse, bubbles do not seem to arise by nucleation during the drying of collapsing timbers. Attempts to introduce nuclei by pressure impregnation with carbon dioxide or by ultrasonic fields have so far failed.

Collapse of thin wood sections has been shown to be time-dependent, and assuming it to be a rate process, the activation energy is calculated to be of the order of 3 to 4 kcal/mole. Collapse starts at 100 to 120 per cent. moisture content and is complete when the collapsing cells reach fibre saturation point. Its rate of development reaches a maximum at 50 to 70 per cent. moisture content.

In living trees, collapse has been reported under external conditions which cause excessive hydrostatic tensions in the conducting xylem, as may occur when the rate of transpiration exceeds that of water uptake. Mechanisms involving collapse are also responsible for mechanical movements of some plants. Collapse is often observed in papermaking fibres and results in increased tensile and burst strength.

Outstanding problems in collapse research and promising avenues for further progress are outlined.