

Über den Befall von Nadelholz durch Bakterien

On the Attack of Coniferous Wood by Bacteria

Von **Walter Liese** und **Gerhard Karnop**

Institut für Holzbiologie und Holzschutz der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Reinbek

Zusammenfassung

Um die an wasserlagerndem Nadelholz möglichen Schäden zu erkennen und die Bakterienflora zu erfassen, wurden entrindete Fichten- und Kiefernabschnitte bis zu 22 Monaten unter Wasser gebracht und laufend ausgewertet.

Das Holz wird von zahlreichen Bakterienarten befallen, die sich in 4 große Gruppen einteilen lassen: Coliforme Kurzstäbchen, andere sporenlose Bakterien sowie aerobe und anaerobe Sporenbildner. Die isolierten Reinkulturen wurden biochemisch auf ihre Fermentausstattung gegenüber verschiedenen Zuckern, Alkoholen und Polysacchariden geprüft. Mehrere Arten besaßen Pektinasen zum Abbau des Pektins in den Tüpfelmembranen und Parenchymzellen. Als Erreger eines anaeroben Celluloseabbaus wurde *Bacillus omelianskii* erkannt, dessen cellulolytische Aktivität in vitro an verschiedenen Substraten überprüft wurde. Ein Angriff auf verholzte Tracheidenwände wurde in keinem Fall beobachtet; der Abbau der Tüpfel erstreckte sich stets nur auf das Splintholz.

Das von Bakterien befallene Holz wird für Flüssigkeiten wegsamer, so daß Holzschutzmittel leichter eindringen können. Eine Minderung der Holzfestigkeit ist im allgemeinen nicht zu befürchten, da die wichtigen strukturbildenden Holzbestandteile nicht oder allenfalls sehr langsam in den bakteriellen Stoffwechsel einbezogen werden. Die Bedeutung der Bakterien beim simultanen oder sukzessiven Befall mit holzabbauenden Pilzen und ihre Rolle bei der Detoxifizierung von Schutzmitteln sind noch zu klären.

Summary

In order to investigate the possible damage to water-stored softwood and to determine the microflora present, debarked spruce and Scots pine specimens were stored under water for 22 months and periodically examined.

The wood was attacked by many types of bacteria, which can be divided into four groups: coliform bacteria, other sporeless bacteria, aerobic and anaerobic spore producers. The isolated cultures were tested for enzyme production on various sugars, alcohols and polysaccharides. Some bacteria exhibit pectolytic activity and are able to degrade pectic substances in the pit membranes.

Bacillus omelianskii proved to be the most important bacterium for which the cellulolytic activity was demonstrated on various substrates. In no case an attack of the lignified tracheid walls occurred, and the degradation of pit membranes was always confined to the sapwood.

Wood attacked by bacteria becomes more permeable to liquids, and preservatives therefore may be more readily introduced. A reduction in wood strength is generally not a cause for concern, since the attack takes place very slowly. The importance of bacteria in simultaneous or successive attack by wood-destroying fungi and in the detoxification of preservatives has still to be investigated.

Einleitung

Auf der Holzschutztagung 1962 in Freiburg wurde in mehreren Vorträgen über das Vorkommen und die Auswirkung der Moderfäulepilze im Holz berichtet und die Praxis damit besonders auf diese Organismengruppe aufmerksam gemacht. Die teilweise mit Unruhe aufgenommenen Ergebnisse führten zu der Frage an die Wissenschaft, wieso Untersuchungen über derart wichtige Holzzerstörer so lange unterblieben seien. Erklärend wurde damals darauf hingewiesen, daß erst die eingehendere Bearbeitung des biologischen Holzabbaus in den letzten Jahren dazu geführt habe, alle durch diese Pilze verursachten Schäden als solche zu erkennen. Entdeckungen von weiteren holzbewohnenden Organismengruppen, die z. B. die Wahl des Schutzmittels wesentlich hätten beeinflussen könnten, seien jedoch kaum anzunehmen.

Zu bedenken war hier die Möglichkeit von bakteriellen Schäden, über die zu dieser Zeit erst wenige Beobachtungen vorlagen. Bakterien verursachen im allgemeinen keine auffälligen Holzzerstörungen; es sind — im Vergleich zu Pilzen — sehr kleine, einzellige Organismen, die sich schon dadurch der unmittelbaren Beobachtung entziehen. In den letzten Jahren ist jedoch der bakterielle Holzabbau eingehender untersucht worden, und es soll daher über den gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse berichtet werden.

* Nach einem Vortrag auf der 10. Holzschutztagung der DGfH am 28. 11. 1967, Braunschweig. Die Untersuchungen wurden finanziell durch einen Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten gefördert.

¹ Die Unterlagen über diese Versuche sind in den Nachkriegsjahren verlorengegangen; die Angaben verdanken wir dem damaligen Mitarbeiter Herrn Dr. W. Zimmermann.

Das Vorkommen von Bakterien im Holz

Aus der Forstpathologie ist seit längerem bekannt, daß Bakterien das Holz stehender Bäume befallen können [M. McCreary, B. Cosenza u. A. L. Shigo 1965]. Sie kommen z. B. auch im Naßkern von Tanne und anderen Nadel- und Laubbäumen vor. Shigo [1965] hat über das simultane und sukzessive Vorhandensein von Bakterien und Pilzen berichtet.

Für den gefällten Baum und das verarbeitete Holz liegen insbesondere von drei ökologisch verschiedenen Bereichen Beobachtungen über einen bakteriellen Abbau vor: An Rammpfählen aus Kiefer und anderen längere Zeit im Wasser unter Sauerstoffabschluß verbaute Hölzern beobachtete Johannes Liese um 1943/44 in den Tracheidenwänden von blaugrün verfarbtem Splintholz eigenartige Abbausymptome, die als bakterieller Angriff gedeutet wurden [J. Liese 1950] (Bild 1). Die Isolierung der Erreger und nachfolgende Kulturversuche bestätigten das Vorhandensein anaerober Bakterien. Das angegriffene Holz entwickelte einen intensiven Geruch, der auf Buttersäuregärung schließen ließ.¹ In ähnlichen Objekten haben auch L. Harmsen und T. K. Nissen [1965] einen Bakterienangriff beobachtet. Sie stellten an über 90 Jahre im Wasser verbaute Kiefern- und Fichtenpfähle eine allmähliche „Vermoderung“ von außen nach innen fest. Die Tracheidenwände zeigten charakteristische Zerstörungen in Form von konischen Vertiefungen, die vom Zellumen ausgingen, die Tertiär- und Sekundärwand erfaßten und bis zur Mittellamelle reichten. Bei diesen Beobachtungen ist ein Mischbefall von Bakterien und Pilzen nicht auszuschließen, doch unterscheiden sich die Symptome von den bekannten Befallsmustern holzzerstörender Pilze.

Auch J. B. Boutelje und H. Kiessling [1964] berichten über das Vorkommen von Moderfäulepilzen und Bakterien in gesunkenen Schiffen aus Eichenholz vom Beginn des 17. Jahrhunderts.

In den letzten Jahren wurde ein bakterieller Angriff an Nadel- und Laubholz auch bei der Lagerung von Hackschnitzeln in großen Haufen beobachtet. Hierüber liegen Berichte aus Skandinavien und Nordamerika vor. E. Björkman und G. E. Haeger [1963] sowie B. Hennigsson [1967] fanden besonders in der äußeren Schicht gemeinsam mit Pilzen stets auch Bakterien und stellten z. T. antagonistische oder synergistische Einflüsse fest.

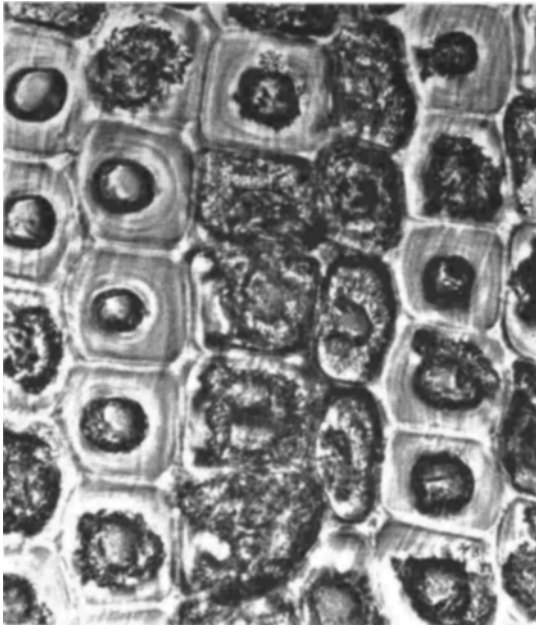


Bild 1 Querschnitt durch abgebaute Kiefernholztracheiden eines Rammpfahles, gedeutet als Bakterien Schaden. (Aufn.: J. Liese).

Die Mehrzahl der Befunde über den Einfluß von Bakterien stammt von wassergelagertem Holz. Während das Flößen des Rundholzes seit jeher eine wichtige Art der Holzbringung, besonders in Skandinavien und Kanada, darstellt, ist die Wasserlagerung im Klotzteich zum Schutz gegen Austrocknen und damit gegen Entwertung durch Risse und Organismen erst in letzter Zeit wichtiger geworden. Dieser natürliche Holzschutz hat 1967 eine besondere Aktualität durch den großen Anfall an Nadelholz infolge der Sturmschäden erhalten. Große Mengen Fichtenholz können nicht ohne erheblichen Preisverlust von dem ohnehin schwachen Markt aufgenommen werden, sondern müssen gestapelt und langsam dem Verbrauch zugeführt werden. Hier bietet sich eine Lagerung der Stämme in Teichen und Seen an, die jedoch voraussetzt, daß damit keine Qualitätsverschlechterung verbunden ist.

Erste eingehende Untersuchungen an geflößtem Kiefernholz wurden von O. Suolalhti und A. Wallén [1958] sowie H. E. Holmgren [1961] in Skandinavien durchgeführt; es ergab sich bei luftgetrocknetem Holz ein Anstieg der Tränkbarkeit, der auf die Tätigkeit von pektinabbauenden Mikroorganismen zurückgeführt wurde. Eine wesentliche Vertiefung der Kenntnisse über bakteriell bedingte Schäden erbrachten die Arbeiten von E. L. Ellwood und B. A. Ecklund [1959] sowie D. T. Knuth und E. McCoy [1961] in den USA. Sie isolierten aus wassergelagertem Kiefernspiltholz insbesondere *Bacillus polymyxa*, der im Laborversuch bei Nadel- und Laubholz einen Permeabilitätsanstieg verursachte. Die bessere Weg-

samkeit wurde auf einen Abbau von Pektin, Stärke und möglicherweise auch Hemicellulose und Cellulose zurückgeführt. Mikroskopisch waren in den Tracheiden jedoch an der Sekundär- und Primärwand keine Schäden zu erkennen; auch war für die isolierten Bakterien keine cellulolytische Aktivität nachweisbar. Desgleichen fand O. A. Vasil'ev [1965] an wassergelagertem Kiefern- und Fichtenholz sowie in Laborversuchen keinen Abbau verholzter Zellwände. Licht- und elektronenmikroskopisch konnte das Vorkommen von Bakterien gemeinsam mit Moderfäulepilzen in Kühlturmholz, Postmasten und anderen Objekten festgestellt werden [J. G. Savory 1954; W. Liese 1955, unveröffentl.]. An der Zerstörung von versuchsweise in Kühltürmen eingesetzten Wellpappen waren Bakterien maßgeblich beteiligt; sie verursachten zunächst filigranartige Kavernen und später einen lokalen Abbau der Sekundärwandschichten [W. Liese u. H. Courtois, unveröffentl.]. Neben diesen Untersuchungen an natürlich infiziertem Holz wurde der bakterielle Angriff auch im Laborversuch verfolgt. H. Greaves und J. F. Levy [1965] und H. Greaves [1966] stellten mit Schüttelkulturen des weitverbreiteten, nicht cellulolytischen *Bacillus polymyxa* einen allmählichen Abbau der parenchymatischen Markstrahl-Zellwände bei Nadel- und Laubholzarten fest. Polarisationsoptisch wurde eine Abschwächung der Doppelbrechung der Tracheidenwände beobachtet; die hierdurch angezeigte strukturelle Veränderung der Zellwand soll die erhöhte Porosität des befallenen Holzes erklären. H. Courtois [1966] beobachtete an vier Nadelhölzern nach 18monatiger Inkubationszeit mit einer natürlichen bakteriellen Ausgangspopulation in Standgläsern einen deutlichen, wenn auch langsamen Angriff auf die Zellwände besonders des Frühholzes. Der Abbau zeigte sich als unregelmäßig feines, filigranartiges Korrosionsmuster und erfaßte nacheinander alle Wandschichten, wobei die widerstandsfähigere Mittellamelle langsamer abgebaut wurde. K. Seifert [1967] fand nach 18monatiger Infektion von Kiefernholzproben in Nährlösung mit einem nicht näher bestimmten Bakterium eine Abnahme der Cellulose um 5%, und der Hemicellulose um 13%, während Lignin zwar keinen Verlust, doch durch Anstieg der Alkalilöslichkeit eine Veränderung anzeigte. Buchenholz erwies sich als widerstandsfähiger.

Experimentelle Untersuchungen

Die vorliegenden Arbeiten über den Holzabbau durch Bakterien wurden angeregt durch die steigende Verwendung von wassergelagertem Nadelholz, über dessen mögliche Bakterien Schäden noch keine ausreichenden Kenntnisse vorliegen. Bei den Versuchen interessierte zunächst die Frage nach den Veränderungen von Kiefern- und Fichtenholz während einer Wasserlagerung. Da auch die Kenntnisse über die Bakteriologie des wassergelagerten Holzes noch sehr unzureichend sind, war ferner die Erfassung der Bakterienflora und ihre morphologisch-physiologische Kennzeichnung notwendig (G. Karnop 1967). Für die Untersuchungen wurden entrindete Kiefern- und Fichtenholzabschnitte im Reimbeker Mühlenteich und dem Hamburger Hafen unter Wasser gebracht und während einer 22monatigen Lagerung ständig ausgewertet; weitere Versuche erfolgten in Bassins unter Laborbedingungen.

Mikroskopische Beobachtungen

Während der Wasserlagerung zeigte sich zunächst eine Veränderung der Holzfarbe. Im Sommer wurde nach etwa 3 Wochen eine Gelbstreifigkeit im gesamten Splintholz erkennbar, der später eine graugrüne Verfärbung bis zu einer Tiefe von 15 mm folgte. Bei Einlagerung im Winter

war nach zwei Monaten in einer schmalen Oberflächzone eine mehr rotbraune Tönung zu beobachten. Die Farbänderungen reichten in keinem Fall bis in das Kernholz.

Der Massenwechsel der vorkommenden Bakterien sowie die mikromorphologischen Veränderungen des Holzgewebes wurden lichtmikroskopisch untersucht. Es zeigte sich, daß die Anzahl der Mikroorganismen in den Wintermonaten am geringsten war und erst im Mai sprunghaft anstieg. Eine Bestimmung der Zahl vermehrungsfähiger Keime ist jedoch nicht durchgeführt worden. In den Sommermonaten breiteten sich die Bakterien verhältnismäßig schnell im Splintholz aus und erreichten die Kernholzgrenze bei der Kiefer in etwa 4 Wochen, bei der Fichte hingegen erst nach 12 bis 16 Wochen. Das Kernholz wurde auch im Verlauf von 2 Jahren nicht angegriffen; selbst Dalben und Pfahlgründungen aus Kiefernholz, die 50 bis 60 Jahre im Hamburger Hafen gestanden hatten, enthielten im Kernbereich keine Bakterien.



Bild 2. Tangentialschnitt von wassergelagertem Kiefernholz mit bakteriell abgebauten Markstrahlen.

Die Infektion des Holzes erfolgt vorwiegend durch die Markstrahlen. Im Kiefernholz verlieren die Fenstertüpfel der Markstrahlen schnell ihre Färbbarkeit mit dem pektinanzweigenden basischen Farbstoff Astrablau. Etwas langsamer erfolgt ein immer stärker werdender Färbbarkeitsverlust der gesamten Markstrahlparenchymzellen. Der Angriff führt schließlich zu einer fast völligen „Anastrophilie“ und zu einer mehr oder weniger starken Zerstörung aller Tüpfelmembranen und Parenchymzellwände. Bei der Fichte hingegen werden nur die wesentlich kleineren Tüpfelmembranen zwischen den Markstrahlzellen aufgelöst und die Zellen selbst entleert, so daß die Struktur der Markstrahlen erhalten bleibt. Besonders auffallend ist die Zerstörung von Markstrahlen, die einen Harzkanal enthalten. Bei der Kiefer wird zuerst das Parenchym und später das den Harzkanal umkleidende Epithel, d. h. der gesamte Markstrahl bis auf die Quertracheiden abgebaut, so daß hierdurch Radialkanäle entstehen, die im Furnier oder in Holzplättchen bis etwa 5 mm Dicke mit bloßem Auge durch den punktförmigen Lichtdurchfall erkennbar sind (Bild 2). Bei der Fichte hingegen kommt es nur zu einer Entleerung des Harzkanals ohne Zellzerstörungen.

In den Längstracheiden ist der bakterielle Angriff zunächst durch eine abnehmende Färbbarkeit der Tori

in den Hoftüpfeln erkennbar. Später erscheinen sie granuliert oder sind völlig abgebaut. Eine teilweise oder vollständige Zerstörung der Tori ist jedoch lichtmikroskopisch nicht immer einwandfrei festzustellen, da für die sichere Erkennung des Zerstörungsgrades eine Anfärbung (Astrablau) notwendig ist, die jedoch mit fortschreitendem Pektinabbau versagt. Mitunter liegen die Tori auch mehr oder weniger exzentrisch in der Tüpfelkammer, was auf der Zerstörung der Margofibrillen beruhen muß.

Eine Veränderung der Zellwände war lichtmikroskopisch auch nach einjähriger Wasserlagerung weder an den Längstracheiden noch an den Markstrahltracheiden erkennbar.

Versuche mit Reinkulturen

Um die im Holz vorhandenen und eventuell an dessen Abbau beteiligten Bakterien zu isolieren, wurde die in den Proben enthaltene Flüssigkeit unter sterilen Bedingungen ausgepreßt. Über Anreicherungskulturen konnten auf Lactose-Agar und anderen Medien 18 Reinkulturen angelegt werden [G. Karnop 1967]. Hinsichtlich des Vorkommens verschiedener bakterieller Erregertypen scheinen keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen Kiefer und Fichte zu bestehen.

Die meisten der in recht aufwendigen Arbeitsverfahren isolierten Bakterien lassen sich in 4 große Formenkreise einordnen. Es sind: Coliforme Kurzstäbchen, andere sporenlose Aerobier sowie aerobe und anaerobe Sporenbildner.

Die Hauptmasse der im Splintholz von wassergelagerter Kiefer festgestellten Bakterien gehört zur Gruppe der coliformen Kurzstäbchen und weist eine Länge von 2 bis 4 μm und eine Breite von rd. 0,5 μm auf (Bild 3). Von ihnen konnten auf Lactose-Pepton-Agar 6 aerobe bis fakultativ anaerobe Stämme isoliert und auf ihre Fermentausstattung untersucht werden. Die Differentialdiagnose ergab, daß es sich bei diesem Formenkreis nicht um typische Coli-Bakterien (*Escherichia coli*), sondern um indolnegative Varianten mit vielfach atypischen biochemischen Leistungen handelt. Alle Stämme wurden auf die Fermentation verschiedener Zucker, Alkohole und Polysaccharide geprüft. Die meisten besaßen Fermente zur Spaltung von Eiweiß, Stärke, Lactose, Glukose, Maltose, Saccharose, Arabinose, Xylose und Xylan; einige Stämme waren zum Pektinabbau befähigt. Durch Infektion steriler Splintholzklötzchen mit den Reinkulturen konnte nachgewiesen werden, daß nur durch den Angriff pektinabbauender Stämme die Tori und Parenchymzellen ihre Färbbarkeit mit wässriger Astrablaulösung verlieren. In gleicher Weise gelang mit Pektinasen aus Fertigpräparaten eine



Bild 3. Coliforme Kurzstäbchen. Vergr.: 2000:1.

Entfärbung dieser Zellbestandteile. Die auch an wasserlagerndem Kiefern Splintholz stets zu beobachtende „Anastraphilie“ der Tüpfelmembranen beruht somit auf der Aktivität pektinolytischer Bakterien.

Der cytopathogene Effekt dieser Gruppe besteht in der Fermentation des Markstrahlplasmas und der nicht-strukturbildenden Toruskomponenten. Ein Angriff dieser Reinkulturen auf die Zellwandstrukturen konnte mikroskopisch nicht festgestellt werden.

Als zweite Gruppe wurden 4 sporenlose Bakterien isoliert sowie ein Staphylokokken-Stamm (Bild 4). Ver-

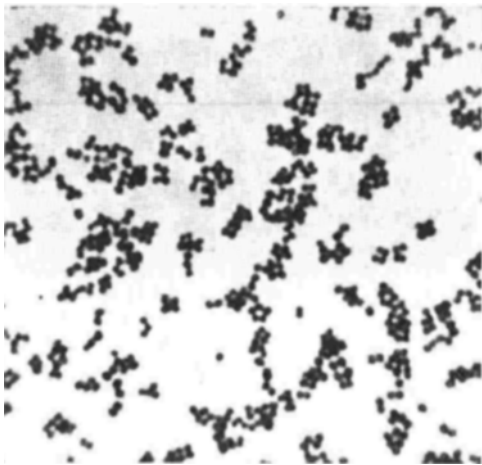


Bild 4. Kokken. Vergr.: 1100:1.

suche mit verschiedenen Substraten ergaben, daß diese Bakterien in unterschiedlichem Maße Glukose, Laktose, Arabinose, Xylöse, Pektin, Stärke und Eiweiß spalten konnten. Einige aktive Stämme verursachten gleichfalls einen Pektinabbau und damit eine Unfärbbarkeit der Tori und Parenchymzellwände. In dieser Gruppe trat auch ein Erreger auf, der Xylan (Hemicellulose) unter Säurebildung angriff.



Bild 5. *Bacillus subtilis*, sporulierend. Vergr.: 2000:1.

Aerobe Sporenbildner wurden in wasserlagerndem Holz nur vereinzelt in den Sommermonaten gefunden. Laborversuche zeigten, daß diese Bakterien vermutlich auf Grund ihres höheren Sauerstoffbedarfs nur eine geringe Affinität gegenüber dem nassen und sauerstoffarmen Holz besitzen. Es konnten *Bacillus subtilis* (Bild 5) und *B. mesentericus* sowie 2 Formen mit terminaler und eine mit subterminaler Spore isoliert werden. Einige Arten spalteten Pektin, Stärke, Eiweiß und Xylan, keine dagegen Cellulose.

Eine vierte Gruppe enthält die anaeroben Sporenbildner. Von ihnen wurden zwei Formen vom Typ des *Clostridium butyricum* und *Cl. tetani* isoliert. Sie zeigten jedoch in Laborversuchen keine sichtbare Affinität gegenüber den Bestandteilen des Holzes.

Die im Teichwasser vorhandenen aeroben Cellulosebakterien konnten im Holz selbst nicht festgestellt werden. Mit den im Sommer aus Teichwasser angereicherten Cellulosebakterien gelang zwar ein Abbau von Filtrierpapier und Baumwolle (Bild 6), doch war es nicht möglich, mit den Anreicherungskulturen Splintholzproben zu infizieren

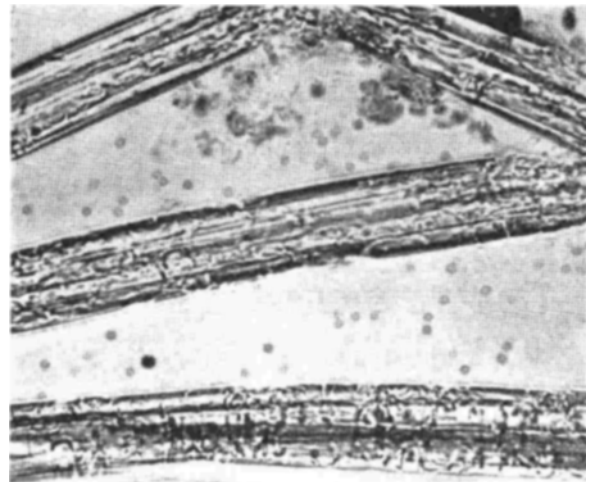


Bild 6. Durch aerobe Cellulosebakterien zerstörte Baumwollfasern. Vergr.: 600:1.



Bild 7. *Bacillus omelianskii* an den Fenstertüpfeln eines Kiefernmarkstrahls. Vergr.: 1700:1.

und dadurch eine Affinität aerober Cellulosebakterien gegenüber dem Holz nachzuweisen.

Bacillus omelianskii

Als ein wichtiger, auch im wasserlagernden Holz auftretender Sporenbildner konnte der anaerobe Cellulosegärer *Bacillus omelianskii* (*Clostridium omelianskii*) festgestellt werden. Dieser Erreger besitzt eine Größe von etwa $5 \text{ bis } 7 \times 0,4 \text{ bis } 0,6 \mu\text{m}$ und ist durch eine streng terminal abgesetzte runde Spore von $1 \text{ bis } 1,2 \mu\text{m}$ Durchmesser gekennzeichnet (Bild 7). Bei atypischer Entwicklung unter Laborbedingungen kann er eine Länge bis zu $15 \mu\text{m}$ erreichen. Die unbeweglichen, stecknadelförmigen

Bazillen sind gramnegativ, lassen sich aber mit basischen Farbstoffen wie Methylenblau anfärben. Sie liegen stets einzeln, bilden keine Ketten und sind besonders gut in den Markstrahlen zu erkennen, wo sie an den Fenster-tüpfeln haften. Da sie nur im jugendlichen, sporensenen Zustand eine geringe Eigenbewegung in Form einer Drehung um die Längsachse aufweisen, sind sie nicht — wie die coliformen Stäbchen — über das ganze Splintholz verteilt, sondern oft fleckenweise zu finden. Nach Anreicherung des Erregers in verschiedenen Nährlösungen war es möglich, seine cellulolytische Aktivität gegenüber mehreren Cellulosequellen nachzuweisen. Hierbei wurden Filtrierpapier (Bilder 8, 9) Baumwolle, Cellophanfolien

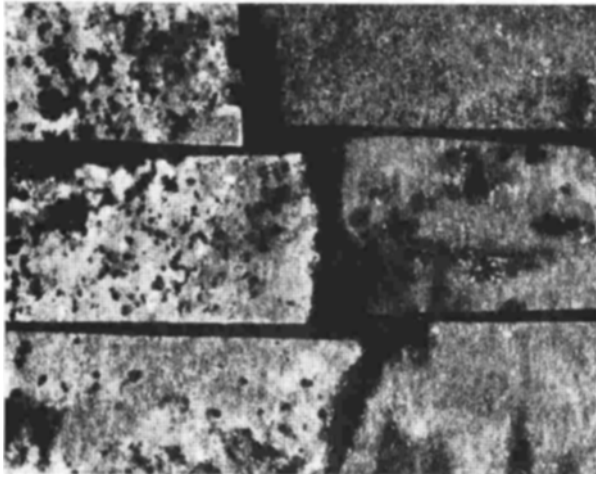


Bild 8. Durch *Bacillus omelianskii* zerstörte Filtrierpapierstreifen.



Bild 9. Von *Bacillus omelianskii* angegriffene Filtrierpapierfasern.

und Chromatographie-Cellulosepulver befallen und unter Bildung verschiedener Korrosionsmuster und Entwicklung von Wasserstoff und Kohlendioxid abgebaut. Die Zerstörung der Baumwollfasern begann mit der Entstehung ovaler Vertiefungen in den Zellwänden (Bild 10). Die länglichen Korrosionsmulden vertieften sich im Laufe der Inkubation und führten schließlich zur Auflösung der Fasern, wobei unregelmäßige Bruchstücke und längere Zellwandreste zurückblieben. Der anaerobe Angriff durch *B. omelianskii* verläuft demnach anders als der aerobe Abbau, bei dem es zu einer unregelmäßigen Zerklüftung der Zellwand mit Querbrüchen der Faser kommt (vgl. Bild 6). Auch die cellulosereichen Sekundärwände von Zugholzfasern aus dem Wurzelholz von *Robinia pseudacacia* wurden durch Anreicherungskulturen abgebaut.

Die Anlage von Reinkulturen nach einem Verdünnungsverfahren gelang allerdings nicht. Durch Überimpfen verschiedener verdünnter Sporensuspensionen aus Anreicherungskulturen in Tylose-Pepton-Hefeextrakt-Agar und durch Oberflächenbeimpfung unter anaeroben Bedingungen wurden Kulturen erhalten, die noch durch einen Erdbazillus vom *Mesentericus*-Typ schwach verunreinigt waren. Da einerseits *Bacillus omelianskii* als Cellulosezerstörer bekannt ist [Imschenezki 1959], andererseits Erdbazillen mit zentraler Spore keine cellulolytischen Eigenschaften besitzen, dürfte der beobachtete Abbau durch *B. omelianskii* verursacht worden sein.

Nach Einbringen von Mikrotomschnitten aus frischem Kiefern Splintholz in die Anreicherungskulturen wurde beobachtet, daß der Bacillus vorzugsweise Hoftüpfel und Fenster-tüpfel besiedelt, sich aber nicht an den Parenchymzellwänden verankert, da diese offenbar keine für ihn direkt angreifbare Cellulosequelle darstellen. In den Versuchen mit Probeklötzchen war er auch in den Tracheiden vorhanden, an deren Wänden er sich jedoch — wahrscheinlich auf Grund der Lignifizierung [L. E. Wise 1952] — ebenfalls nicht festsetzte. Die Aktivität von *B. omelianskii* ist auf die Sommermonate beschränkt, wobei die geringen Mengen an verwertbarer Cellulose in den Tüpfeln und Parenchymzellen aufgebraucht werden. Danach kommt es zu einem Abklingen der Infektion. Es können noch vereinzelt Torusreste oder auch unzerstörte

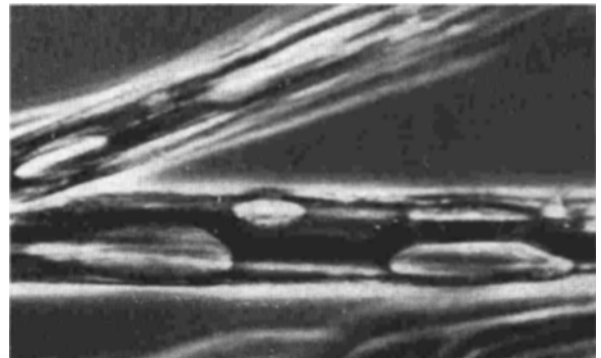


Bild 10. Von *Bacillus omelianskii* angegriffene Baumwollfaser.

Tüpfelmembranen und Parenchymzellen vorhanden sein, doch haben diese infolge der unter natürlichen Bedingungen stets vorhandenen pektinolytischen Begleitbakterien ihre Färbbarkeit mit Astrablau verloren. Die Infektion durch den Cellulosegärer kann bereits während der Aufarbeitung des Holzes durch die im Erdboden vorhandenen Sporen erfolgen. Versuche ergaben, daß der versportete Bacillus jahrelang an trockenem Holz überleben kann.

Der Abbau der Tüpfelmembranen hatte eine Veränderung der Tränkbarkeit des wassergelagerten Holzes zur Folge. Zur näheren Prüfung wurden kleine Splintholzproben von 2 cm × 3 cm × 3 cm bis auf die Mantelfläche allseitig abgedichtet und verschiedenen Tränkbedingungen ausgesetzt. Die aufgenommene Wassermenge stieg bei den Kiefernproben bereits nach vierwöchiger Sommerwässerung auf den zehnfachen Betrag und zeigte damit eine stark erhöhte Porosität an. Eine längere Wässerung von zwei bis drei Monaten brachte im Sommer keine wesentliche Steigerung mehr. Der Befund entspricht den Ergebnissen aus Skandinavien, den USA und England. Die Fichtenholzproben besaßen insgesamt eine geringe Durchtränkbarkeit, zeigten jedoch nach vierwöchiger Sommerwässerung gleichfalls eine rund zehnfach gesteigerte Aufnahme. Während der Wintermonate hingegen erfolgte bei Kiefernholz lediglich eine mäßige Steigerung der

Permeabilität. Bei der Fichte sind die Wintermonate bis zum April nahezu wirkungslos.

Folgerungen

Die in den Labor- und Wasserlagerungsversuchen von Bakterien angegriffenen Proben konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht näher auf ihre tränketechnischen Eigenschaften untersucht werden; die Versuche werden daher in größerem Rahmen fortgesetzt. Die bisherigen Erkenntnisse lassen jedoch zusammen mit den Ergebnissen anderer Autoren einige Schlußfolgerungen für die Praxis zu:

Kiefernrundholz erfährt bereits in der kalten Jahreszeit durch Wasserlagerung eine mäßige Steigerung der Permeabilität. In den Sommermonaten werden die Parenchymzellen und auch die Tori der Längstracheiden schnell zerstört, woraus sich eine Überporosität des Splintholzes ergibt. Sie führt zu einer intensiveren und gleichmäßigeren Durchtränkung, ist allerdings mit den Nachteilen einer zu hohen Aufnahme verbunden. Andererseits zeigen wasser-gelagerte Kiefern ein erheblich geringeres Ausschwitzen von Teeröl [For. Prod. Lab. Princ. Risborough 1958; H. F. Holmgren 1961; E. L. Ellwood und B. A. Ecklund 1964; BWPA News Sheet, 1964], so daß in der bakteriell gesteuerten Vorinfektion eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Erzeugung oberflächentrockener Maste liegen kann. Auch die vielfache Beobachtung in der Praxis, daß bei gleicher Aufnahme skandinavische Kiefern oft weniger schwitzen als deutsche, dürfte zum Teil auf dem Flößen des Holzes beruhen. Ursächlich hierfür scheint die Vermeidung des Teerölstaus in der äußeren Randzone infolge der besseren Verteilung innerhalb des Splintholzes zu sein. Eine kürzere Wässerung führt zu einem unregelmäßigen Befall, der sich in einer entsprechend ungleichmäßigen Schutzmittelverteilung äußern kann. Das mitunter zu beobachtende unterschiedliche Verhalten von Kiefern Splintholz beim Streichen oder Kurztuchen in Form eines fleckenweisen Einziehens der Flüssigkeit in das Holz beruht wahrscheinlich ebenfalls auf einem lokalen Bakterienbefall. Gesonderte Untersuchungen hierzu werden zur Zeit durchgeführt.

Auch an Fichtenholz wirkt sich eine Wasserlagerung günstig auf die tränketechnischen Eigenschaften aus und ist daher besonders interessant. Zu beachten ist allerdings, daß die Stämme zur Qualitätserhaltung in der Regel mit Rinde in das Wasser gelangen, wodurch der bakterielle Angriff erheblich verlangsamt wird. Eingehendere Untersuchungen hierüber erfolgen derzeit. Auch Versuche in einem anderen Zusammenhang zeigten, daß sich durch Wasserlagerung die schlechte Tränkbarkeit des Fichtenholzes deutlich verbessern läßt. Desgleichen ergaben Untersuchungen im Forest Research Institute, Princes Risborough [BWPA 1964] für Sitkafichte nach dreimonatiger Wässerung eine etwa doppelte Aufnahme, nach 6 Monaten eine dreifache. Die Durchtränkung bleibt auch hier auf das Splintholz beschränkt, da der Kern innerhalb des in Betracht kommenden Zeitraumes nicht von Bakterien angegriffen wird. Zu klären ist die Frage einer möglichen Beeinträchtigung der Tränklösung durch die im Holzwasser befindlichen Abbaustoffe.

Die Verbesserung der Tränkbarkeit von Nadelholz infolge eines Bakterienbefalls ist jedoch nicht an eine vorhergehende Lagerung im Wasser gebunden. Da Bakterien ebenso wie Pilzsporen nahezu an allen natürlichen Substraten vorhanden sind, erfolgt eine Infektion auch auf Lagerplätzen. Eine langsame Trocknung von entrindeten Masten kann daher unter günstigen Umständen zu einem bakteriellen Abbau der hemmenden Tüpfelmembranen führen; noch stärker wirkt sich eine längere Feuchtlagerung etwa durch Besprühen aus. Auch die oft beobachtete

positive Wirkung des Überwinterns auf die Tränkeigenschaften kann die Folge eines selektiven bakteriellen Abbaus während der feuchten Jahreszeit sein.

Trotz dieser offensichtlich positiven Einflüsse ist auch an die Gefahren eines bakteriellen Angriffs für das Holz zu denken. Bislang sind allerdings keine beachtenswerten Schäden bekannt geworden. Holzbewohnende Bakterien ernähren sich vor allem von den Zellinhaltsstoffen der parenchymatischen Zellen. Selbst der Abbau der Tüpfelwände während einer Wasserlagerung scheint keine Minderung der Festigkeit zur Folge zu haben. Auch die Infektionsversuche von D. T. Knuth [1964] mit verschiedenen Bakterienstämmen ergaben keine Herabsetzung von Zugfestigkeit und Zähigkeit. Der von H. Courtois [1966] nach 18monatiger Lagerung festgestellte Abbau der Tracheiden verschiedener Holzproben erstreckte sich nur auf die äußeren Zellschichten und verlief sehr langsam. Insgesamt sind daher Bakterien nicht als aggressive Holzzerstörer anzusehen, zumal die Aktivität cellulolytischer Formen durch den Ligningehalt stark gehemmt, wenn nicht weitgehend verhindert wird [A. Bauer 1937]. Nach L. E. Wise [1952] und Umschenezki [1959] können pflanzliche Zellwände durch celluloseaktive Bakterien nur abgebaut werden, wenn der Ligningehalt unter 1% liegt bzw. Holz durch andere Einflüsse delignifiziert wird. Lignin wirkt hier gleichsam als ein natürliches Hemmnis. Zu beachten sind jedoch auch die Befunde von K. Seifert [1967], der eine Veränderung des Lignins feststellte. Eine geringe Beeinflussung des Schälwiderstandes beobachteten J. F. Lutz, C. G. Duncan und T. C. Scheffler [1966] an wasser-gelagerten Kiefernrollen, doch war nicht eindeutig nachzuweisen, ob diese Erscheinung tatsächlich bakteriell bedingt ist; die Autoren empfehlen, auch andere Eigenschaften derartigen Holzes, wie Trocknung, Verleimung und Oberflächenbehandlung, auf Veränderungen hin zu prüfen.

Untersuchungen über die Sensibilität der holzbefallenden Bakterien gegenüber Schutzmitteln stehen noch aus. Da diese Organismen im feuchten Milieu praktisch stets zusammen mit holzabbauenden Pilzen vorkommen, sind nähere Kenntnisse über ihre mögliche Mitwirkung am Abbau getränkten Holzes erforderlich. So hat B. Henningsson [1967] kürzlich gezeigt, daß bei gemeinsamen Befall von Bakterien und Pilzen hemmende und fördernde Wachstumseinflüsse auftreten können; ferner bilden bestimmte Bakterien das für viele Pilze lebenswichtige Vitamin B₁ (Thiamin) [N. Fries 1958] und erleichtern dadurch eventuell den Befall von geschütztem Holz. Ihre Wirkungsweise bei einer möglichen Detoxifizierung von Schutzmitteln und ihre Rolle beim sukzessiven oder simultanen Angriff der Mikroorganismen ist noch unbekannt.

Die Untersuchung des bakteriellen Holzabbaus wird sich in den nächsten Jahren mit der Biochemie der holzaktiven Bakterien sowie mit dem Einfluß von Temperatur, Verschmutzungsgrad, Durchlüftung und anderen Wasserfaktoren befassen müssen, um die Gesetzmäßigkeiten zu erforschen, denen das Holz bei Wasserlagerung unterworfen ist. Weiterhin sind die Zusammenhänge zwischen Bakterienbefall und Wirkung von Schutzmitteln und Fragen nach einer eventuell vorhandenen und von der Holzart abhängigen Bakterienresistenz zu klären. Es ist jedoch kaum damit zu rechnen, daß selbst bei intensiver Forschung auf diesem Gebiet wirtschaftlich bedeutende, bisher unbekannt gebliebene Schadeinflüsse der Bakterien aufgedeckt werden. Dazu findet der mögliche Abbau in zu engen Bereichen und darüber hinaus zu langsam statt.

Schrifttum

- Bauer, A.: Die verholzte Zellwand und ihre Widerstandsfähigkeit gegen bakterielle Angriffe. Diss., Univ. Münster, 1937.
- Björkman, E., u. G. E. Haeger: Outdoor Storage of Chips and Damage by Microorganisms. Tappi Bd. **46** (1963) S. 757/766.
- Boutelje, J. B., u. H. Kiessling: On Water-stored Oak Timber and its Decay by Fungi and Bacteria. Brit. Wood Pres. Ass., News Sheet 40, 1964. Arch. f. Mikrobiol. Bd. **49** (1964) S. 305/314.
- Courtois, H.: Über den Zellwandabbau durch Bakterien im Nadelholz. Holzforsch. Bd. **20** (1966) S. 148/154.
- Ellwood, E. L., u. B. A. Ecklund: Bacterial Attack of Pine Logs in Pond Storage. For. Prod. J. Bd. **9** (1959) S. 283/292.
- Fries, N.: Über die Bedeutung von Wuchsstoffen für das Wachstum verschiedener Pilze. Symb. Bot. Upsal. III, **2**, (1938).
- Greaves, H., u. J. F. Levy: Comparative Degradation of the Sapwood of Scots Pine, Beech and Birch by *Leuzites trabea*, *Polystictus versicolor*, *Chaetomium globosum* and *Bacillus polymyxa*. Forest Products Lab. Princ. Risborough. Jahresbericht 1958. J. Inst. Wood Sci. (1965) No. 15. S. 55/63.
- Greaves, H.: The Effect of Bacterial Action on Some Wood Cubes in Shake Culture. In: „Holz u. Organismen“. Internat. Sympos. Berlin-Dahlem 1965. Beih. 1, Material u. Organismen, Berlin (1966) S. 64/67.
- Harmsen, L., u. T. V. Nissen: Der Bakterienangriff auf Holz. Holz als Roh- u. Werkstoff. Bd. **23** (1965) S. 389/393.
- Henningsson, B.: Interaction Between Microorganisms Found in Birch and Aspen Pulpwood. Stud. for. suec. (1967), No. 53.
- Holmgren, H. F.: Impregnation of Water-logged Pine. Rec. Annu. Conv. Brit. Wood Preserv. Assoc. (1961) S. 187/201.
- Imschenetzki, A. A.: Mikrobiologie der Cellulose. Berlin 1959: Akademie-Verlag.
- Karnop, G.: Der Befall von wassergelagertem Nadelholz durch Bakterien mit besonderer Berücksichtigung des anaeroben Celluloseabbaus durch *Bacillus omelianskii*. Diss., Univ. Hamburg, 1967.
- Knuth, D. T., u. E. McCoy: Bacterial Deterioration of Pine Logs in Pond Storage. For. Prod. J. Bd. **12** (1962) S. 437/442.
- Knuth, D. T.: Bacteria Associated with Wood Products and their Effects on Certain Chemical and Physical Properties of Wood. Diss., Univ. Madison, 1964.
- Liese, J.: Zerstörung des Holzes durch Pilze und Bakterien. In: Mahlke-Troschel, Handbuch der Holzkonservierung, 3. Aufl. S. 44/111. Berlin 1950: Springer-Verlag.
- Liese, W.: On the Decomposition of the Cell Wall by Microorganisms Rec. Annu. Conv. Brit. Wood Pres. Assoc. (1955) S. 159/160.
- Lutz, J. F., C. G. Duncan u. T. C. Scheffer: Some Effects of Bacterial Action on Rotarycut Southern Pine Veneer. For. Prod. J. Bd. **16** (1966) S. 23/28.
- McCreary, M., B. Cosenza u. A. L. Shigo: Bacteria Isolated from Decays and Discolorations in Northern Hardwoods. Phytopathology Bd. **55** (1965) S. 129/130.
- Savory, J. G.: Damage to Wood Caused by Microorganisms. J. Appl. Bacteriology Bd. **17** (1954) S. 213/218.
- Seifert, K.: Über den Holzabbau durch Bakterien. Holz als Roh- u. Werkstoff Bd. **25** (1967) S. 377/379.
- Shigo, A. L.: Organism Interactions in Decay and Discoloration on Beech, Birch, and Maple. US. Forest Serv. Res. Pap. Northeastern Forest Exp. Sta. Upper Darby (1965), NE-43.
- Suolahti, O., u. A. Wallén: Der Einfluß der Naßlagerung auf das Wasseraufnahmevermögen des Kiefernspiltholzes. Holz als Roh- u. Werkstoff Bd. **16** (1958) S. 8/17.
- Vasil'ev, O. A.: Effect of Micro-organisms on Pine and Spruce Wood Kept in Water. (Orig. russ.). Izv. Vyss. Uceb. Zaved. Lesn. Z., Arhang. Bd. **8** (1965) S. 110/118.
- Wise, L. E.: Wood Chemistry. New York 1952: Reinhold Publ. Comp.

Zur Systematik der Holzfäulen, ihre chemischen und physikalischen Kennzeichen***On the Systematics of Wood Rots, their Chemical and Physical Characteristics**Von **Karl Seifert**

Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin-Dahlem, Fachgruppe 5.1 Biologische Materialprüfung

Zusammenfassung

Die vielen im Schrifttum vorhandenen Angaben über die wichtigsten chemischen und physikalischen Veränderungen des lignocellulosehaltigen Materials infolge des Energiestoffwechsels der holzzerstörenden Pflanzenorganismen werden kritisch gesichtet und systematisch geordnet. Es ergeben sich für den Abbau der verholzten Zellwandsubstanz vier Typen, gekennzeichnet durch individuelle Merkmale (Braun-, Weiß-, Moder- und bakterielle Fäule).

Für jede Fäuleart werden nach allgemeinen Angaben über Synonyme, Reaktion, Vorkommen und Bezeichnung der untersuchten Organismen die heute gültigen Anschauungen über den Verlauf der Dissimilation von Cellulose, Hemicellulosen und Lignin geschildert. Die Veränderung der Löslichkeitsverhältnisse des Substratrückstandes, die Säurebildung und Hygroskopizität sowie die physikalischen Veränderungen (mechanische Festigkeiten, Dimensionsstabilität) werden erläutert.

Summary

The variety of data on the most important chemical and physical changes of lignocellulosic material under the influence of the energy metabolism of wood-destroying plant organisms was critically reviewed and systematically arranged. Four types of rots were shown to participate in the decomposition of the lignified cell wall substance. They are characterised by species-specific symptoms (brown, white, soft and bacterial rots).

After making general statements on synonyms, reaction, occurrence, and names of the organisms investigated, each type of decay is described with reference to the latest concepts on the course of the dissimilation of cellulose, hemicelluloses and lignin. The changing solubility ratios of the substrate residue, acid production and hygroscopicity as well as physical changes (mechanical strength properties, dimensional stability) are described.

Einleitung

Während der letzten Jahrzehnte sind viele Hunderte von Arbeiten veröffentlicht worden, die sich mit dem Abbau lignocellulosehaltigen Materials, hauptsächlich des Holzes, durch pflanzliche Organismen befaßten. In diesem Schrifttum begegnet der Leser einer Fülle von auf mannig-

faltige Weisen gewonnenen Zahlenangaben und Anschauungen, die eine kritische Sichtung und Zusammenschau nahelegen, um so die vielen Einzeldaten unter einigen wenigen Gesichtspunkten sinngemäß ordnen zu können.

Schon früher [Seifert 1963] wurde versucht, die in eigenen Arbeiten aufgefundenen Gesetzmäßigkeiten, unter welchen der Holzabbau infolge der Tätigkeit der verschiedenen Organismen verläuft, auf ihre allgemeine Gültigkeit hin zu überprüfen. Hierzu wurde außer eigenen Er-

* Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die durch Bereitstellung von Geldmitteln diese Arbeit ermöglichte, wird auch hier verbindlich gedankt.