

► PER HOFFMANN

## Die Kogge unterm Mikroskop – Abbaumuster in archäologischem Holz

### Einleitung

Mit keinem Gegenstand hat Detlev Ellmers sich während seiner Jahre als Direktor des Deutschen Schifffahrtsmuseums mehr beschäftigt als mit der Kogge. Keines der vielen Schiffe und Boote des Museums hat ihm so am Herzen gelegen. Nun möchte ich ihn einen ungewohnten Blick in die Kogge werfen lassen und ihm zeigen, wie dieses große Schiff im Innersten aussieht.

Er wird regelhafte Veränderungen in den 600 Jahre alten Schiffshölzern sehen – wiederkehrende Abbaumuster. Die Interpretationen der Abbaumuster im nassen archäologischen Holz, die



Abb. 1 Aus gut 40 Tonnen nassem archäologischem Holz rekonstruieren Schiffbauer im Deutschen Schifffahrtsmuseum die mittelalterliche Bremer Kogge. (Foto: G. Meierdierks/DSM)

man mit bloßem Auge und unter dem Mikroskop sieht, haben sich in den 20 Jahren meiner Beschäftigung mit der Kogge gewandelt. Früher nahm man an, daß wassergesättigtes Holz einen rein chemischen Abbau durch im Grundwasser gelöste Stoffe erleidet und daß Moderfäulepilze Holz unter Wasser abbauen. Seit wenigen Jahren wissen wir, daß der Abbau von nassem archäologischem Holz überwiegend von Pilzen und Bakterien verursacht wird.

Man kann diese Bakterien sogar bei der Arbeit sehen. Dazu braucht man leistungsfähige Elektronenmikroskope. Erste Abbaumuster erkennt man aber bereits mit dem bloßen Auge.

## Makroskopische Abbaumuster – mit dem bloßen Auge zu erkennen

Archäologisches Holz hat fast immer eine weiche, schwammige und offensichtlich abgebaute Oberfläche. Sticht man mit einem spitzen Messer oder einer Nadel hinein, fühlt man, ob sich unter der weichen Oberfläche ein Kern aus härterem Holz verbirgt. Die Einstichtiefe zeigt gleich-



Abb. 2 Ein Stück aus der Kielplanke eines römischen Flußschiffes aus Mainz mit einem nur noch kleinen inneren Bereich kaum abgebauten Holzes.  
(Foto: E. Laska/DSM)



Abb. 3 Eschenholz aus der 1545 gesunkenen MARY ROSE, dem Flaggschiff Heinrichs VIII.: Das äußere, stark abgebaute Holz unterscheidet sich auch farblich vom gesunden inneren Kern. Aus den markierten Feldern entnehmen wir Proben für die Mikroskopie.  
(Foto: P. Hoffmann/DSM)



Abb. 4 In diesem versteinerten Nadelholz ist auch nach 20 Millionen Jahren das ehemals stark abgebaute Holz als hellgraue Außenschicht zu erkennen.  
(Foto: E. Laska/DSM)

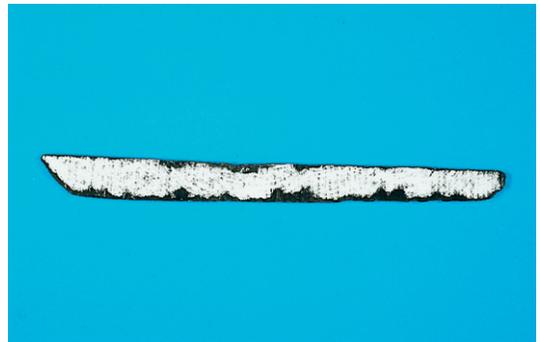


Abb. 5 Querschnitt einer Planke der Bremer Kogge: Die äußere Schicht stark abgebauten Holzes ist unregelmäßig dick. Zur Verdeutlichung ist der nicht abgebaute Innenbereich weiß angefärbt.  
(Foto: E. Laska/DSM)

zeitig die Dicke der abgebauten Oberflächenschicht. Diese Schicht ist nicht immer gleichmäßig dick. Sie kann an den verschiedenen Seiten eines Holzes unterschiedlich stark sein, und sie kann sich entlang von Rissen und anderen Holzfehlern stärker ausgebreitet haben. Will man sich ein genaueres Bild vom Zustand des Holzstückes oder Objektes machen, so wiederholt man den Nadeltest an vielen Stellen und trägt die Einstichtiefen in eine Skizze des Gegenstandes ein.

Ein noch deutlicheres Bild liefert ein Sägeschnitt: In Bereichen stark abgebauten archäologischen Holzes hinterläßt die Säge eine glatte Oberfläche, in wenig abgebautem Holz hat der Schnitt eine faserige oder wollige Oberfläche. Außerdem haben die Abbauzonen in den meisten Holzarten unterschiedliche Farben. Häufig sind stark abgebaute und wenig abgebaute Bereiche scharf und deutlich gegeneinander abgegrenzt, manchmal gibt es eine schmale Übergangszone. Mitunter sind stark abgebaute Bereiche unregelmäßig im Holz verteilt, und manchmal ist das Holz durch und durch gleichmäßig stark abgebaut. Aus solchem Holz kann man mit der Hand Wasser auspressen. Es bricht sehr leicht in glatten Brüchen ohne jede Faserstruktur.

Im Lichtmikroskop bei bis zu 1000fachen Vergrößerungen kann man erkennen, welche Veränderungen im Holzgewebe und in einzelnen Zellen sich hinter dem Begriff Holzabbau verbergen.

### Mikroskopische Abbaumuster – mit dem Lichtmikroskop zu sehen

Mit histologischen Färbemethoden, mit polarisiertem Licht und mit fluoreszenzmikroskopischen Techniken kann man zwischen gesunden und angegriffenen Holzzellen unterscheiden.

Eine einfache Anfärbung mikroskopischer Schnitte macht die an sich fast farblose Holzsubstanz sichtbar. In gesunden Zellen liegt die homogen erscheinende Zellwand fest an den Mittellamellen, den sehr dünnen Membranen zwischen benachbarten Zellen. In abgebauten Zellen erscheinen die Zellwände granulär verändert. Oft haben sie sich von den Mittellamellen gelöst und liegen ohne Halt im Zellhohlraum. Bei weiterem Abbau lösen sie sich auf zu einer lockeren Masse, die den Zellhohlraum füllt, dann aber mit der Zeit ganz verschwindet. Sehr stark abgebaute Hölzer bestehen manchmal nur aus dem wassergefüllten feinen System der Mittellamellen. Das erklärt auch, warum viele Naßholzfunde in den Händen der zügig arbeitenden Archäologen zerbrechen: Sie bestehen aus fast nichts, sind nur von Wasser gestützt.

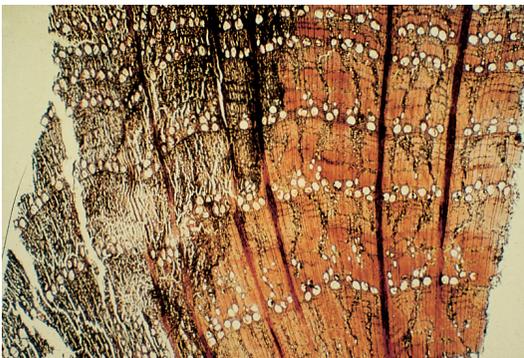


Abb. 6 Querschnitt durch eine eichene römische Schiffsplanke aus Mainz: links stark abgebautes Holz, rechts nicht abgebautes Holz. Lichtmikroskopische Aufnahme bei etwa 3- bis 4facher Vergrößerung. (Foto: P. Hoffmann/DSM)

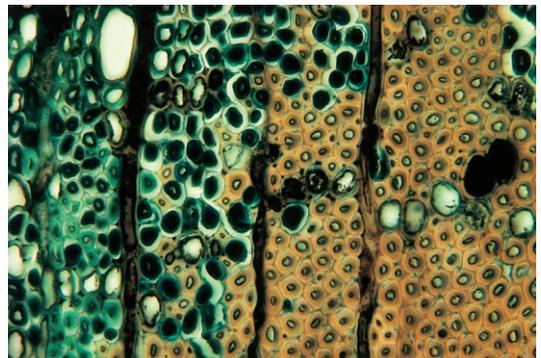


Abb. 7 Querschnitt durch archäologisches Eichenholz: Abgebautes Gewebe (links) ist von nicht verändertem Gewebe (rechts) scharf getrennt. Lichtmikroskopische Aufnahme bei etwa 200facher Vergrößerung. (Foto: P. Hoffmann/DSM)

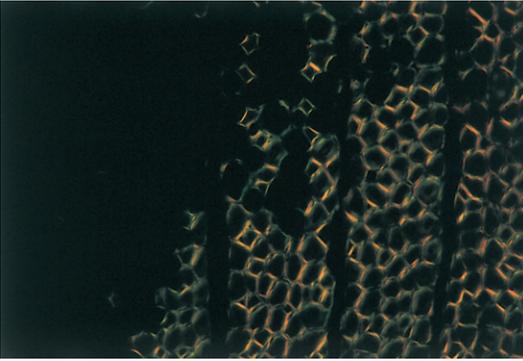


Abb. 8 Präparat wie Abb. 7 mit polarisiertem Licht durchleuchtet: Kristalline Cellulose in den unveränderten Zellwänden des nicht abgebauten Gewebes leuchtet auf. (Foto: P. Hoffmann/DSM)

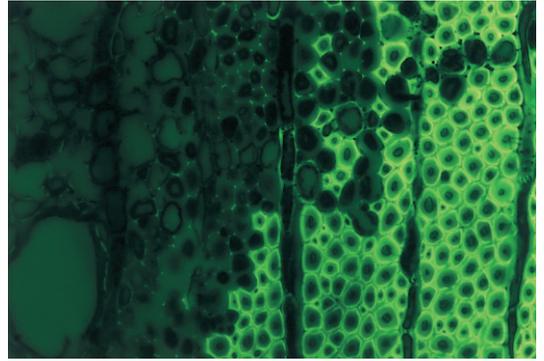


Abb. 9 Präparat wie Abb. 7 im UV-Licht: Nicht abgebaute Zellwände zeigen eine grüne Fluoreszenz, abgebaute Zellwände nicht. (Foto: P. Hoffmann/DSM)

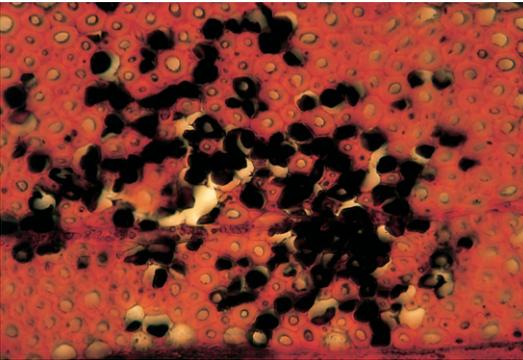


Abb. 10 Querschnitt durch Ulmenholz aus der MARY ROSE: Abgebaute Zellen (schwarz) sind einzeln im noch nicht angegriffenen Gewebe verteilt. Lichtmikroskopische Aufnahme bei etwa 200facher Vergrößerung. (Foto: P. Hoffmann/DSM)

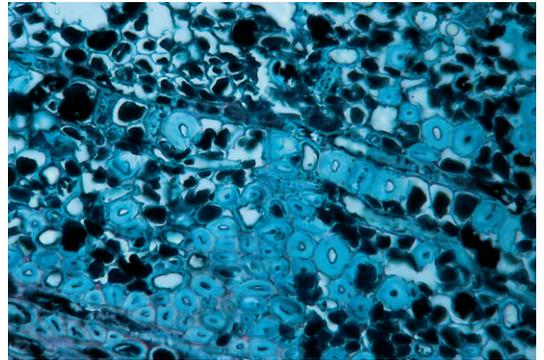


Abb. 11 Querschnitt durch Eichenholz: Abgebaute Zellen (schwarz) und gesunde Zellen (hellblau) sind miteinander vermischt. Lichtmikroskopische Aufnahme bei etwa 200facher Vergrößerung. (Foto: P. Hoffmann/DSM)

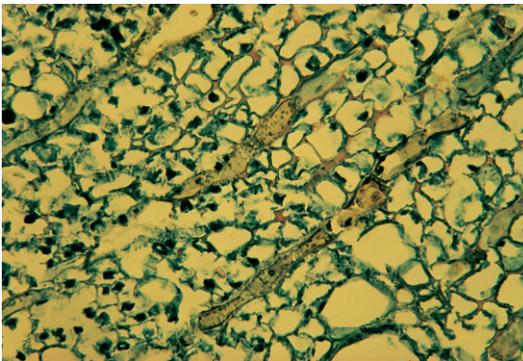


Abb. 12 Querschnitt durch stark abgebautes Eichenholz: Nur das fragile System der Mittellamellen zwischen den Zellen ist noch übrig und wird von Wasser getragen. Granuläre und koagulierte Zellwandreste (dunkel) tragen nicht zur Festigkeit des archäologischen Holzes bei. Lichtmikroskopische Aufnahme bei etwa 200facher Vergrößerung. (Foto: P. Hoffmann/DSM)

Gesunde Holzzellen und angegriffene, veränderte Zellen reagieren unterschiedlich, wenn man sie mit polarisiertem Licht durchleuchtet und durch einen Polarisationsfilter betrachtet: Zellwände, die Cellulose in der ursprünglichen kristallinen Form enthalten, leuchten hell auf. Zell-

wände, die nicht aufleuchten, enthalten keine kristalline Cellulose. Entweder ist die Cellulose verändert oder sie ist völlig abgebaut und verschwunden. Gesunde und veränderte Zellwände zeigen auch unterschiedliche Fluoreszenz bei Anregung mit ultraviolettem Licht. Stark abgebaute Zellwände haben überhaupt keine Fluoreszenz mehr.

Mit diesen mikroskopischen Techniken kann man also Vorkommen und Verteilung gesunder und abgebaute Holzzellen in einem archäologischen Holz sichtbar machen (Hoffmann/Jones 1990). Unter dem Lichtmikroskop erkennt man häufig, daß gesundes und abgebautes Gewebe direkt aneinander grenzt. Man kann geradezu von einer Abbaufont sprechen, die sich durch das Holzstück hinzieht: auf der einen Seite nur abgebautes Gewebe, auf der anderen Seite noch unverändertes Holz. In anderen Fällen sieht man eine Übergangszone, in der abgebaute und nicht angegriffene Zellen oder Zellgruppen vermischt sind. Mit dem Lichtmikroskop betrachtet, besteht archäologisches Holz nur aus stark abgebauten und nicht abgebauten Zellen, die in verschiedenen Mustern angeordnet sein können.

Nur selten erkennt man Zellen, in denen der Abbauprozess gerade stattfindet: Die Zellwände scheinen in einem Schritt von gesund zu stark abgebaut umgewandelt zu werden. Dieser Prozess schreitet meist vom Zellhohlraum her in die Zellwand vor. Manchmal breitet er sich auch innerhalb der Zellwand seitlich aus.

Was beim Holzabbau genau geschieht, enthüllen erst hochauflösende Elektronenmikroskope bei bis zu 10 000fachen Vergrößerungen.

### Ultrastrukturelle Abbaumuster – mit dem Elektronenmikroskop sichtbar gemacht

Transmissions- und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen die Spuren, die Moderfäulepilze und Bakterien an und in Zellwänden hinterlassen haben. Manchmal sieht man auch die Mikroben selbst. Die verschiedenen Gruppen von Mikroorganismen, die nasses archäologisches Holz abbauen, verursachen jeweils eindeutige und unterscheidbare Spuren in den Zellwänden, typische Abbaumuster.

Moderfäulepilze wachsen innerhalb der Zellwände. Sie folgen der in Längsrichtung der Zelle orientierten fibrillären Struktur der Zellwand und lösen mit ihren Enzymen ziemlich große

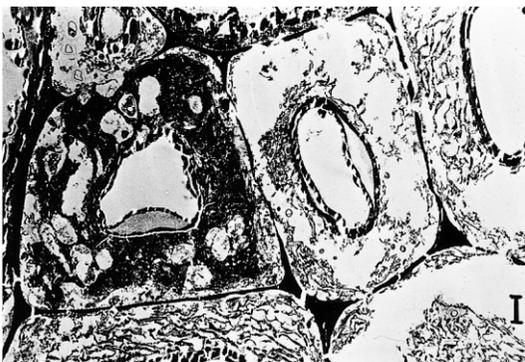


Abb. 13 Querschnitt durch stark abgebautes Ulmenholz: In der dunklen Zellwand der linken Zelle sind als rundliche Löcher die querschnittenen Kavernen von Moderfäulepilzen zu erkennen. Transmissions-elektronenmikroskopische Aufnahme bei etwa 3000facher Vergrößerung. (Aus: Hoffmann/Paramesvaran 1982)

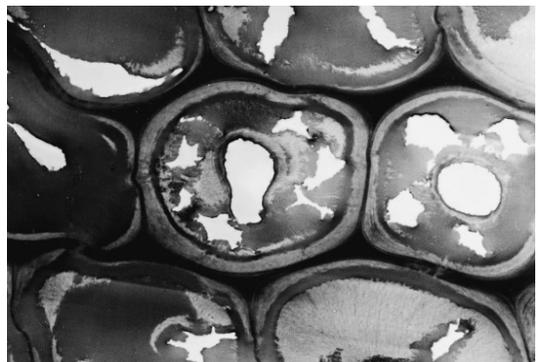


Abb. 14 Querschnitt durch fossiles Nadelholz aus einer Braunkohlengrube: In den Zellwänden sind noch immer die 23 Millionen Jahre alten, inzwischen deformierten Kavernen von Moderfäulepilzen zu erkennen. Transmissions-elektronenmikroskopische Aufnahme bei etwa 2000facher Vergrößerung. (Aus: Hoffmann/Blanchette 1997)

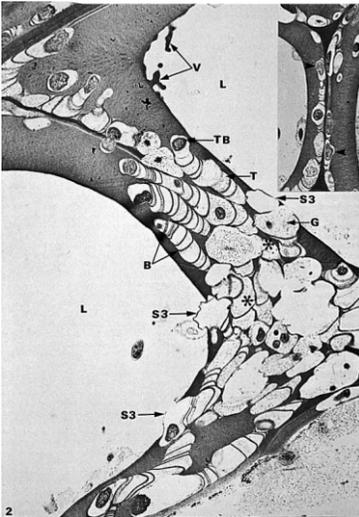


Abb. 15 Querschnitt durch die Zellwände zweier benachbarter Zellen: Tunneling bacteria (TB) minieren in den Zellwänden und sind in ihren septierten Tunneln zu erkennen. Transmissions-elektronenmikroskopische Aufnahme bei etwa 3000facher Vergrößerung. (Aus: Singh et al. 1987)

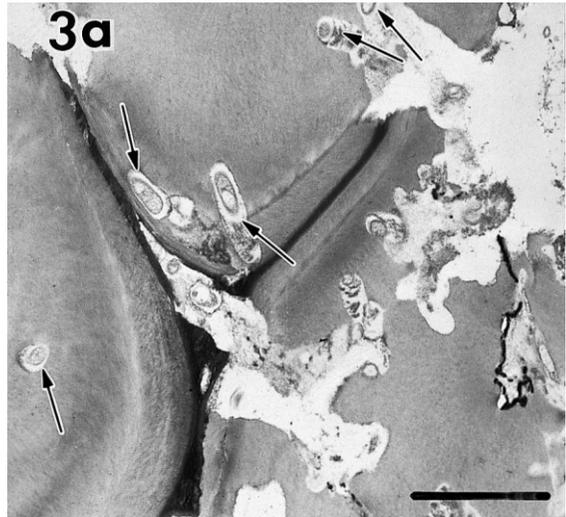


Abb. 16 Aktive tunneling bacteria – Pfeile – in einem mittelalterlichen Gründungspfahl aus Eichenholz. Tunneling bacteria können die Mittellamellen zwischen den Zellen durchbrechen und dadurch die gesamte Holzstruktur zerstören. Transmissions-elektronenmikroskopische Aufnahme bei etwa 4000facher Vergrößerung. (Aus: Blanchette/Hoffmann 1994)

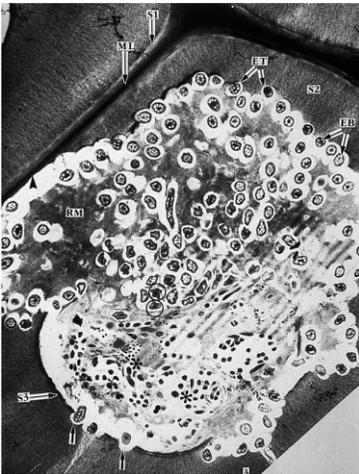


Abb. 17 Querschnitt durch eine Kiefernholz-Zelle: Erosionsbakterien (EB) bauen die Zellwand – S2 – großflächig ab und hinterlassen eine aufgelockerte, wolkige Masse, in der andere, sekundäre Bakterien leben. Transmissions-elektronenmikroskopische Aufnahme bei etwa 3000facher Vergrößerung. (Aus: Singh et al. 1990)

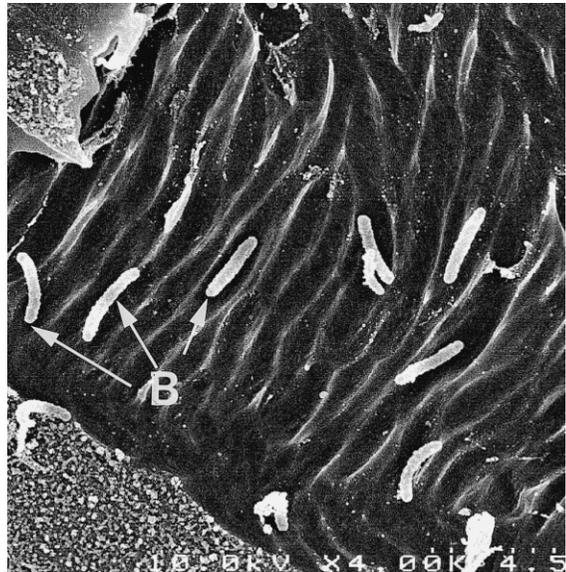


Abb. 18 Blick vom Zellhohlraum auf die Zellwand in einem mittelalterlichen Bauholz: Stäbchenförmige Erosionsbakterien bauen die Zellwand ab und bewegen sich dabei in den von ihnen produzierten Abbaurinnen. Raster-elektronenmikroskopische Aufnahme bei etwa 7000facher Vergrößerung von Charlotte Björdal, Schwedische Landwirtschaftsuniversität in Uppsala.

Kanäle in die Zellwandsubstanz, in denen sie weiter wachsen. Mit der Zeit durchziehen immer mehr Kanäle die Zellwand, bis keine Holzsubstanz mehr übrig ist.

So genannte »tunneling bacteria« bohren sich vom Zellhohlraum in die Zellwand und fressen feine Gänge kreuz und quer durch die Holzsubstanz. In kurzen Abständen scheiden sie hinter sich eine Art Membran ab, die den Gang verschließt. So entsteht als typisches Abbaubild eine ungeordnete Vielzahl feiner septierter Gänge in der Zellwand.

Erosionsbakterien greifen in Gruppen vom Zellinneren her die Zellwand an. Die stäbchenförmigen Bakterien liegen eng nebeneinander und lösen die Zellwand großflächig auf. In der angegriffenen Oberfläche entstehen dabei deutliche Furchen, jedes Bakterium produziert seine eigene Furche. Der fortschreitende völlige Abbau der Zellwand und die gefurchte Angriffsfläche charakterisieren das Abbaubild durch Erosionsbakterien.

Die verschiedenen Abbaubilder in archäologischen Hölzern zeigen auch auf der ultrastrukturellen Ebene, daß die Umwandlung der Holzsubstanz in einem Schritt erfolgt. Vor den angreifenden Pilzen oder Bakterien liegt unveränderte Zellwand, hinter ihnen liegen die völlig strukturlosen Reste, die sie nicht haben verdauen können. Es gibt keine nennenswerten Mengen an nur teilweise umgewandelter Holzsubstanz. Diese Beobachtung ist sehr wichtig für den Konservator archäologischer Naßholzfunde.

## Schlußfolgerungen für den Konservator

Die Analyse der Abbaumuster zeigt, daß archäologisches Holz nur aus zwei Qualitäten besteht: unveränderter Zellwandsubstanz und Restmaterial völlig abgebauter Zellwandsubstanz, eingeschlossen im System der Mittellamellen. Unabhängig davon, wie die beiden Holzqualitäten in einem Holzstück verteilt oder vermischt sind, wird das Holz sich werfen, schrumpfen und reißen, wenn man es trocknen läßt, ohne es vorher zu stabilisieren. Eine stabilisierende Behandlung muß die sehr unterschiedliche strukturelle Beschaffenheit der beiden Abbauzustände im Holz berücksichtigen.

Für die Bremer Kogge haben wir am Deutschen Schiffahrtsmuseum eine Zwei-Stufen-Behandlung mit zwei unterschiedlichen Stabilisierungsmitteln entwickelt und erfolgreich angewandt: In einem ersten Tränkbad mit niedermolekularem Polyethylenglykol (PEG) 200 diffundierten diese kleinen Moleküle durch das stark abgebaute Gewebe hindurch und in die Zellwände

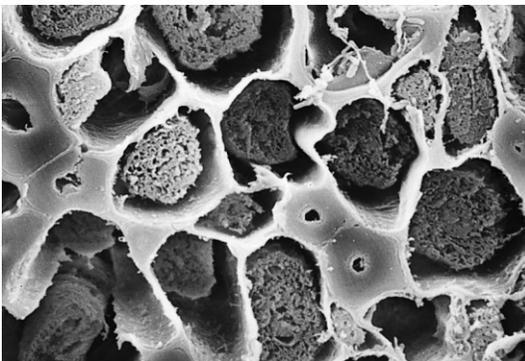


Abb. 19 Abgebaute und nicht abgebaute Zellen in Ulmenholz in einer rasterelektronischen Aufnahme bei etwa 300facher Vergrößerung.  
(Aus: Hoffmann/Jones 1990)



Abb. 20 Stück einer Planke von einem Bootsfund – ohne Konservierung getrocknet. (Foto: E. Laska/DSM)



Abb. 21 Die Bremer Kogge im Deutschen Schiffahrtsmuseum – nach Konservierung getrocknet.  
(Foto: P. Hoffmann/DSM)

der nicht abgebauten Partien der Hölzer hinein. In einem zweiten Bad füllte und festigte hochmolekulares PEG 3000 die stark abgebauten Partien des Holzes (Hoffmann/Schnall 2003). Jedes PEG wirkte an einem anderen Ort in der Ultrastruktur des Koggeholzes, gemeinsam haben sie das große Schiff vor ernststen Trocknungsschäden bewahrt.

Von außen sieht man der Kogge den teilweise starken Abbau ihrer Hölzer nun nicht mehr an.

#### Literatur:

- Blanchette, R.A., Nilsson, T., Daniel, G.F., und Abad, A.: Biological degradation of wood. In: Rowell, R.M., Barbour, R.J. (eds.): *Archaeological Wood: Properties, chemistry, and preservation.* (= *Advances in Chemistry Series 225*). Washington D.C. 1990, S. 141-176.
- Blanchette, R.A., und Hoffmann, P.: Degradation processes in waterlogged archaeological wood. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Portland, Maine 1993.* Bremerhaven 1994, S. 111-142.
- Hoffmann, G., und Schnall, U. (Hrsg.): *Die Kogge. Sternstunde der deutschen Schiffsarchäologie.* (= *Schriften des DSM 60*). Hamburg 2003.
- Hoffmann, P., und Blanchette, R.A.: The conservation of a fossil tree trunk. In: *Studies in Conservation* 42, 1997, S. 74-82.
- Hoffmann, P., und Jones, A.M.: Structure and degradation process for waterlogged archaeological wood. In: Rowell, R.M., Barbour, R.J. (eds.): *Archaeological Wood: Properties, chemistry, and preservation.* (= *Advances in Chemistry Series 225*). Washington D.C. 1990, S. 35-66.
- Hoffmann, P., und Paramesvaran, N.: Chemische und ultrastrukturelle Untersuchungen an wassergesättigten Eichenhölzern aus archäologischen Funden. In: *Berliner Beiträge zur Archäometrie* 7, 1982, S. 273-285.
- Singh, A.P., Nilsson, T., und Daniel, G.F.: Ultrastructure of the attack of the wood of two high lignin tropical hardwood species, *Alstonia scholaris* and *Homalium foetidum*, by tunnelling bacteria. In: *Journal of the Institute of Wood Science* 11, 1987, S. 26-42.
- Singh, A.P., Nilsson, T., und Daniel, G.F.: Bacterial attack of *Pinus sylvestris* wood under near anaerobic conditions. In: *Journal of the Institute of Wood Science* 11, 6, 1990, S. 237-249.

## The Bremen Cog under the microscope – Degradation patterns in archaeological wood

### Summary

Archaeological wood which has survived in wet or waterlogged conditions low in oxygen content has in most cases been attacked and degraded by soft rot fungi and/or bacteria. Looking into the wood one recognises recurring degradation patterns which are typical for and indicative of the kind of micro-organisms that have produced them. Sometimes one can still see bacteria at work.

### Macroscopic degradation patterns

Pricking at the wood with a needle or a pointed knife one will allow one to discern a soft outer layer enveloping a harder inner core. On a saw-cut surface across the wood the hard inner portion of the timber will stand out as a fibrous area, whereas the degraded outer tissue is cut smoothly, leaving no protruding fibres. In many cases the areas also differ in colour. In the light microscope, at magnifications of up to 1,000 times, the modifications of the wood tissue and of individual wood cells which define the term degradation become visible.

### Microscopic degradation patterns

Histological staining methods, polarised light, and fluorescence techniques allow us to discriminate between sound and degraded wood cells.

In sound cells the cell walls appear homogeneous, and they are attached to the middle lamellae between neighbouring cells. In degraded cells, the walls have been transformed to a granular mass, often separated from the middle lamellae and coagulated to a lump, filling the cell lumen as a flimsy cloud. Heavily degraded wood often consists of the water-filled system of middle lamellae only.

Completely degraded and non-degraded cells are often situated next to each other, either in a mosaic-like pattern or as sharply segregated areas of tissue: heavily degraded tissue bordering on non-degraded wood along a degradation front.

How the cell-walls are degraded can be seen in electron microscopes at magnifications of up to 10,000 times.

### Ultra-structural degradation patterns

Soft rot fungi grow within the wooden cell wall. With their ektoenzymes they dissolve caverns along the fibrillar structures of the cell wall, which appear as rather big holes in the wall of a cross-cut cell.

Tunneling bacteria dissolve very fine canals criss-crossing within the cell wall and typically septated with fine membranes in short distances.

Erosion bacteria attack the cell wall from the cell lumen. They grow in aligned groups and dissolve the cell wall completely.

Soft rot fungi and bacteria dissolve, metabolise, and transform the cell wall substance in one step into an amorphous residual debris which has no physical strength. There are no appreciable amounts of only partially modified cell wall substance present in archaeological wood. This observation is of great importance to the conservator.

### Consequences for the conservator

Waterlogged archaeological wood needs to be stabilised against shrinkage, warping, and cracking on drying. Its composition of only two wood qualities – non-degraded cells with original cell wall

substance, and degraded cells with completely dissolved and transformed cell walls or with cell walls which are partly unchanged and partly totally degraded – calls for two different mechanisms for stabilisation.

For the Bremen Cog we developed a two-step treatment with two different stabilisation agents: In a first bath low molecular weight PEG 200 (polyethylene glycol with molecular weight 200) diffused into the non-degraded interior of the timbers to substitute the water in this tissue. In a second bath high molecular weight PEG 3000 filled the heavily degraded parts of the timbers. On drying the ship, PEG 200 kept the non-degraded wood in the swollen state, and the PEG 3000 solidified and braced the degraded tissue against shrinkage and deformation.

## La Kogge de Brême sous le microscope – types de dégradation dans le bois archéologique

### Résumé

Le bois archéologique, qui a survécu soit dans des conditions humides avec un taux peu élevé d'oxygène, soit saturé d'eau, a été attaqué et décomposé dans la plupart des cas par de la pourriture molle et/ou des bactéries. En regardant le bois, on peut reconnaître des types de dégradation se répétant, symptomatiques et indiquant quelles espèces de micro-organismes les ont produits. On peut même parfois observer des bactéries encore à l'œuvre.

### Types de dégradations macroscopiques

En piquant le bois avec une aiguille ou un couteau pointu, on peut discerner une couche externe molle enveloppant un noyau dur. Sur une surface de coupe effectuée à la scie à travers le bois, la partie dure intérieure révélera une aire fibreuse, tandis que le tissu altéré extérieur une coupe douce, sans fibres protubérantes. Dans de nombreux cas, les aires diffèrent également par la couleur. Sous un microscope qui grossit mille fois, les modifications du tissu ligneux et des cellules ligneuses individuelles, qui déterminent la dégradation finale, deviennent visibles.

### Types de dégradations microscopiques

Les méthodes histologiques de coloration, la lumière polarisée et les techniques de fluorescence permettent de différencier entre cellules ligneuses saines et endommagées.

Dans les cellules saines, les parois de la cellule apparaissent homogènes et elles sont attachées aux lamelles du milieu entre les cellules avoisinantes. Dans les cellules abîmées, les parois se sont transformées en une masse granuleuse, souvent séparée des lamelles du milieu et coagulée en un caillot, remplissant l'espace vide de la cellule comme un léger nuage. Le bois fortement décomposé est souvent constitué par le système rempli d'eau des lamelles centrales uniquement.

Les cellules complètement dégradées et celles intactes sont souvent situées les unes à côté des autres, formant parfois comme un motif ressemblant à une mosaïque, parfois délimitant nettement les surfaces du tissu: le tissu fortement dégradé bordant le bois non détérioré, le long d'un front de dégradation.

Jusqu'à quel point les parois des cellules sont dégradées peut être observé sous microscopes électroniques grossissant 10 000 fois.

### Types de dégradation ultra-structural

La pourriture molle grandit à l'intérieur de la paroi cellulaire ligneuse. Avec ses ectoenzymes, elle creuse des cavités le long de la structure fibrillaire de la paroi cellulaire, qui apparaissent alors comme des trous assez gros dans la paroi d'une cellule en coupe transversale.

Des bactéries formant des tunnels font apparaître de très fins canaux en zig-zag à l'intérieur de la paroi cellulaire, et typiquement compartimentés par des fines membranes peu espacées.

Les bactéries érosives attaquent la paroi cellulaire à partir de l'espace vide de la cellule. Elles croissent en groupes alignés et désagrègent totalement la paroi cellulaire.

La pourriture molle et les bactéries désintègrent, métabolisent et transforment en une seule étape la substance de la paroi cellulaire en débris résiduels amorphes, sans aucune solidité physique. Dans le bois archéologique, il n'y a aucune quantité appréciable de substance de la paroi cellulaire qui soit uniquement modifiée de façon partielle. Cette observation est de grande importance pour le conservateur.

### Conséquences pour le conservateur

Le bois archéologique saturé d'eau a besoin d'être stabilisé afin de résister au rétrécissement, au gauchissement et aux fissures dues à la dessiccation. Sa composition comprenant uniquement deux qualités de bois – des cellules intactes avec la substance originale de la paroi cellulaire, et des cellules dégradées avec des parois cellulaires complètement dissoutes et transformées ou avec des parois cellulaires qui sont partiellement inchangées et partiellement totalement dégradées – demandent deux processus différents de stabilisation.

En ce qui concerne la Kogge de Brême, nous avons développé un traitement en deux phases, avec deux agents de stabilisation différents : dans un premier bain, le PEG 200 de poids moléculaire peu élevé (polyéthylèneglycol, poids moléculaire 200) s'introduit à l'intérieur encore intact du bois pour se substituer à l'eau dans ces tissus. Dans le second bain, le PEG 3000 de poids moléculaire élevé remplira les parties fortement abîmées du bois. Lorsque le navire sèchera, le PEG 200 gardera le bois intact dans son état gonflé et le PEG 3000 solidifiera et consolidera les tissus dégradés, empêchant ainsi le rétrécissement et la déformation.