

## Bewertung von Schäden an dauerhaften Hölzern am Beispiel von Bongossi (*Lophira alata*)



T. Huckfeldt



M. Eichhorn



G. Koch



Ch. R. Welzbacher



Ch. Brischke

### Zusammenfassung

Schäden an einem Rieselwerk zur Nitratreinigung (SARA) aus der Holzart Bongossi (*Lophira alata*) wurden augenscheinlich, mikroskopisch und durch mechanische Holzprüfungen untersucht. Dabei wurden u. a. seltene Basidiomyceten, wie der Zusammenfließende Reibeisenpilz (*Cerocorticium confluens*) und der Veränderliche Spaltporling (*Schizopora paradoxa*), sowie Moderfäulepilze festgestellt. Die Weißfäule- wie auch die Moderfäulepilze zeigten typische, aber auch ungewöhnliche Abbaumuster. Die größten Schäden traten insbesondere bei periodisch feuchten Hölzern mit Vorverkernungszone auf. Die Anzahl der Moderfäule-Kavernen in den Zellwänden des Holzes verringerte sich zum Holzinneren hin. Ein geringer Holzabbau wurde auch im Bongossi-Kernholz festgestellt. Die mechanische Charakterisierung des Holzes bestätigte einen nur leichten Rückgang der mechanischen Holzeigenschaften im Bongossi-Kernholz mit HEMI-Prüfungen (High-energy multiple impact). Die Entwicklung des langsam fortschreitenden Befalls wurde abgeschätzt.

### Summary

Decay on a 20 year old purification trestle, "SARA", made from *Lophira alata*, was investigated macro- and microscopically and using the HEMI-test (High-energy multiple impact). Due to the sensitivity of the HEMI-test it was possible to detect very small changes in the structural integrity of wood by fungal decay, and a slight deterioration in the mechanical characteristics of the heartwood was detectable. Some rare saprogenic basidiomycetes were diagnosed: *Cerocorticium confluens* and *Schizopora paradoxa*. Both caused the strongest decay within the transition zone between sap and heartwood. Only white-rot and soft-rot fungi are able to grow at high wood moisture levels. The water saturation of wood limits the growth of most basidiomycetes, but not to the same extent the decay by soft-rot fungi, which are capable of destroying all types of cells. Microscopic and macroscopic pictures of soft-rot and soft-rot decay are given. The infestation patterns had distinctive forms in *Lophira alata*, differing from those in softwoods. The number of cavities was higher close to the wood surface compared to the inner part of the wooden components. There was no significant border of decay. Decay development was predicted.

# 1 Einleitung

Dauerhafte Hölzer, z. B. Afzelia, Balau/Bangkirai, Bongossi und Iroko, finden als Bau- und Konstruktionsholz in vielen Bereichen Verwendung, in denen sie einer erhöhten Gefahr des Befalls durch holzerstörende Pilze oder Insekten ausgesetzt sind. Als dauerhaft sind hierbei Hölzer der Dauerhaftigkeitsklasse 1 = sehr dauerhaft oder 2 = dauerhaft (nach DIN EN 350-2:1994-10) zu verstehen. Die Aufgabenstellung bei der Begutachtung von dauerhaften Hölzern in der Gefährdungskategorie 3 oder 4 ist i. d. R. eine Abschätzung der möglichen Reststandzeit einer beanstandeten Holzkonstruktion bei Befallsverdacht oder Befall durch holzerstörende Pilze. Dabei müssen Fäulepilze diagnostiziert und Parameter eines Bauwerkes, wie Holzfeuchte, Bewässerungsintervalle und Lüftungsverhältnisse, untersucht werden, um Empfehlungen zur Sanierung des festgestellten Befallsbereiches abzugeben. Bei dem Bauwerk kann es sich um eine Brücke, eine Hafenanlage, Gestaltungshölzer in Parkanlagen oder, wie im vorgestellten Fall, um ein Verrieselungsgerüst handeln (siehe unten; Bilder 2 und 3).

Die Schäden am Verrieselungsgerüst traten nur am oberen Teil der Anlage auf und auch hier nur punktuell an einigen Hölzern. Die Ursache der punktuellen Schädigung war nicht offensichtlich, da es vergleichbare Hölzer in anderen Bereichen gab, die kaum Befallszeichen aufwiesen. Zerstörungen am Holz waren nur gelegentlich zu beobachten, traten dann aber in beträchtlichem Ausmaß auf (Bilder 1, 7 und 11).

## 1.1 Aufbau der Holzkonstruktion

Die rund 20 Jahre alte Holzkonstruktion des Rieselwerkes zur Nitratreinigung (SARA) ist ca. 25 m lang, 30 m breit

und 10 m hoch (Bild 2) und steht im Hamburger Hafen bei Finkenwerder. Die Anlage wurde innerhalb von zwei Monaten dreimal untersucht. Die in Bild 3 gezeigte Wasserverteilung dient dazu, Bakterienkulturen unterhalb der Schlitzbretter ständig feucht zu halten und belastetes Wasser der Reinigung zuzuführen. Die Bakterien zur Denitrifikation wachsen auf langen, gefalteten Kunststoffbahnen unterhalb der Wasserverteilung (nicht abgebildet).

Die gesamte Holzkonstruktion besteht aus **Bongossi/Azobé** (*Lophira alata*) aus der Familie der Ochnaceae. Bongossi ist besonders geeignet für Konstruktionen im Wasserbau [27]. Die maximal erreichbare Holzfeuchtigkeit („absolut nass“ oder „wassergesättigt“) liegt bei ca.  $u_{\max, m} = 60\%$  (Luft- oder Porenvolumen im Kernholz: ca. 31 % [34]). Das vollständig ausgebildete Kernholz ist dauerhaft (Dauerhaftigkeitsklasse 2, nach DIN EN 350-2:1994-10). Bongossi zählt aber zu den Baumarten, die eine sogenannte Vorverkernungszone („Zwischenholz“) ausbilden. Die Vorverkernungszone wird als ein Bereich des Kernholzes definiert, in dem die Synthese und Einlagerung von biozid oder hemmend wirkenden Kerninhaltsstoffen noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Dieser Bereich kann bei Bongossi bis zu ca. sieben Zentimeter betragen (d. h., es existiert eine sieben Zentimeter breite Übergangszone vom Splint- zum vollständig ausgebildeten Kernholz). Makroskopisch kann dieser Bereich durch eine hellere (rotbraune) Farbausprägung im Vergleich zum vollständig ausdifferenzierten Kernholz (mit violetter Tönung – Bild 4) abgegrenzt werden. Mikroskopisch unterscheidet sich die Vorverkernungszone durch eine geringere Einlagerung von phenolischen Inhaltsstoffen in den einzelnen Gewebetypen (vor allem im Axialparenchym und in den Gefäßen – Bilder 5 und 6). Holzgewebe aus der Vorverkernungszone ist deshalb nur in die Dauerhaftigkeitsklasse 3 (mäßig dauerhaft) einzustufen ([35], DIN EN 350-2:1994-10).



**Bild 1:** Weißfäuleschaden an einem Querbalken aus Bongossi



## 1.2 Fragestellung

Die Aufgabe im hier beschriebenen Rieselwerk war eine Abschätzung der Reststanddauer der Hölzer: Da umfangreiche Erneuerungen von korrodierten Metallbeschlägen nötig waren, musste vorab geklärt werden, ob sich eine solche Maßnahme in Relation zu der zu erwartenden Reststandzeit noch lohnte. Zur Klärung dieser Frage wurde die Konstruktion nach Augenschein (Bild 7) und mit dem Stechbeitel (Bild 1) auf pilzliche Befallsschäden hin untersucht. Außerdem wurden an 17 Probenpunkten Pilzteile, Bohrspäne oder Bohrkernproben entnommen (Bilder 11

und 21), die weitergehenden Laboruntersuchungen zugeführt wurden. Im Verlauf der Begutachtung wurde zudem eine mechanische Prüfung durchgeführt.

## 2 Untersuchung des Holzes

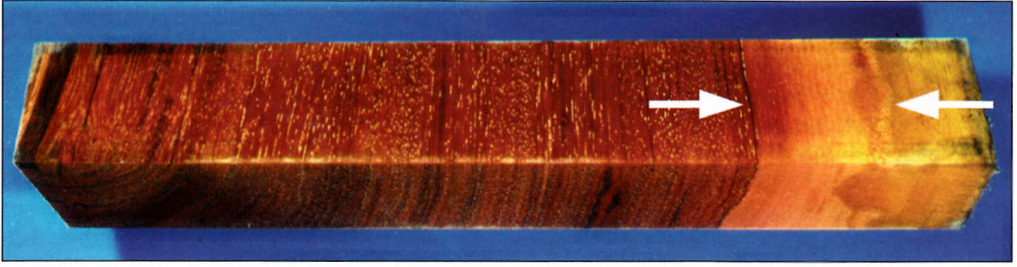
Bohrkerne und Späne waren nach makroskopischen und mikroskopischen Strukturmerkmalen eindeutig der Holzart **Bongossi, Azobé** (*Lophira alata* – Bilder 5 und 6) zuzuordnen. Bei den besonders geschädigten Stellen wurde Holzgewebe aus Vorverkernungszonen nachgewiesen.



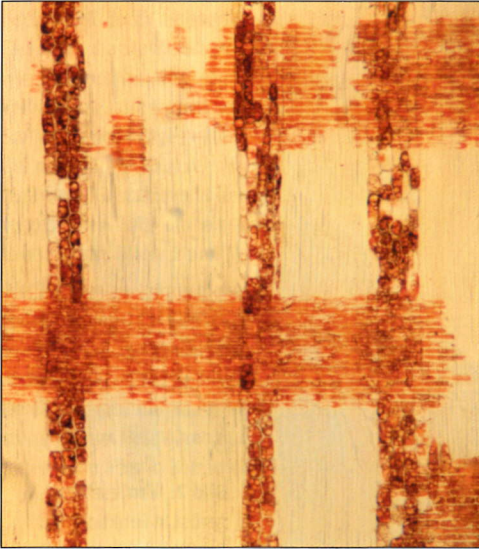
**Bild 2:** Verrieselungsgerüst in Funktion; ein Großteil der Konstruktion war ständig befeuchtet.



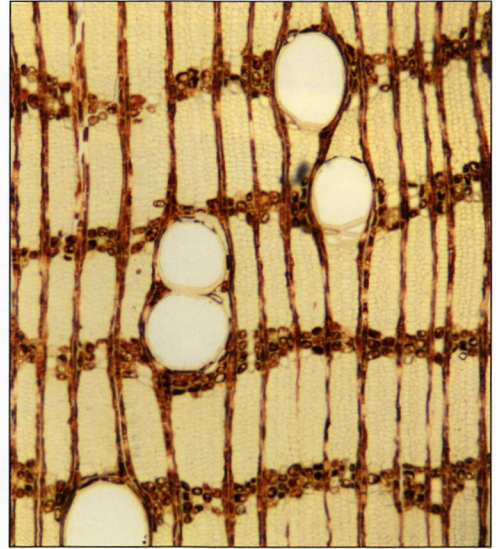
**Bild 3:** Verrieselungsgerüst außer Funktion; Blick unter das Wasserverteilungssystem; die Holzoberfläche war mit einer schwarzen Schmutzschicht überzogen.



**Bild 4:** Makroskopisch gut erkennbare hellere Vorverkernungszone (→ ←) mit Anschluss an den dunkleren, vollständig ausdifferenzierten Kernbereich



**Bild 5:** Nicht geschädigtes Bongossi-Kernholz (*Lophira alata*); Übersicht: Radialschnitt, die Parenchymzellen (Axialparenchym und Holzstrahlen) sind fast vollständig mit phenolischen Inhaltsstoffen ausgefüllt.



**Bild 6:** Detail: Querschnitt mit großen Gefäßen und vollständig mit Kerninhaltsstoffen gefüllten Lumina der Parenchymzellen; Holzzellwände durchsichtig (hyalin)

### Untersuchung der Holzschäden

Die Schäden an der Anlage waren unterschiedlich ausgeprägt (Bilder 7 und 21). Weiß- und Moderfäuleschäden herrschten vor und befanden sich insbesondere im Bereich der Deckenlüfter und an Hölzern mit breiter Vorverkernungszone. An den Schäden waren hauptsächlich Pilzarten beteiligt, die in Gebäuden selten auftreten, aber im Freiland auch dauerhafte Holzarten wie Robinie und Eiche [21] besiedeln, so der Zusammenfließende Reibeisenpilz (*Cerocorticium confluens*), der Veränderliche Spaltporling (*Schizopora paradoxa*), die Schmetterlings-Tramete (*Trametes versicolor*) oder der Zarte Dauerporenschwamm (*Perenniporia tenuis*).

Die unterschiedlich starke Schädigung der Konstruktion lässt sich wie folgt erklären: Die Anlage wird je nach Schmutzwasser-Anfall unterschiedlich stark genutzt. Zum

Zeitpunkt der ersten und zweiten Untersuchung waren alle Wasserrinnen gefüllt, bei der dritten Untersuchung nur ein Drittel der Anlage in Betrieb. Für die Hölzer der Wasserverteilungsebene ergaben sich somit Feuchtigkeitswechsel mit zeitweisem Abtrocknen der Holzoberfläche. Die ständig nassen Hölzer im unteren Bereich der Anlage hatten hingegen kaum die Möglichkeit, Sauerstoff aus der Umgebung aufzunehmen; sie entsprachen Hölzern „unter Wasser“, die nur sehr langsam angegriffen werden [5]. Die wechselfeuchten Hölzer entsprachen der Kontaktzone „Wasser-Luft“ (Gefährdungsklasse 4, EN 335-1:2006-10) und waren somit stärker gefährdet, da zumindest periodisch der Zutritt von ausreichend Sauerstoff möglich war. Verschärfend hinzu kam die bereichsweise Verwendung des weniger dauerhaften Bongossi-Holzes aus der Vorverkernungszone, welches an den wechselfeuchten Stellen zuerst versagte.



Bei der allgemeinen Betrachtung von Schäden an dauerhaften Hölzern fällt die hohe Beteiligung von Weiß- und Moderfäulepilzen auf, die bei diesen Holzarten die wesentlichen Schadorganismen sind (Tabelle 1). Braunfäulepilze

treten nur bisweilen auf. In geschlossenen Anlagen wurde die Bedeutung von Weißfäule-Erregern wie dem Ausgebreiteten Hausporling (*Donkioporia expansa*), dem Großporigen Feuerschwamm (*Phellinus contiguus*) und dem

**Tabelle 1:** Konstruktionen aus dauerhaften Holzarten und ihre Fäule-Erreger in den Gefährdungsklassen (GK) 3 und 4

Bauwerk/Bauteil	GK	Holzart	Fäuletyp	Diagnose
Rieselwerk (SARA); Querträger und Stiele	4	Bongossi	Weißfäule	Veränderlicher Spaltporling ( <i>Schizopora paradoxa</i> )
Rieselwerk (SARA); Querträger	4	Bongossi	Weißfäule	Zusammenfließender Reibeisenpilz ( <i>Cerocorticium confluens</i> )
Rieselwerk (SARA); Querträger und Stiele	3	Bongossi	Moderfäule	Moderfäulepilze, nach innen abnehmende Befallsintensität, aber mindestens in 7 mm Tiefe noch nachweisbar
Rieselwerk (SARA); Querträger und Stiele	3	Bongossi	Weißfäule	Weißfäule-Erreger, Schäden mit Kavernenbildung: Die Befallsintensität sinkt von außen nach innen, Kavernen bis in 60 mm Tiefe nachweisbar
Brücke	3	Bongossi	Braunfäule	Brauner Kellerschwamm ( <i>Coniophora puteana</i> )
Brückenträger	3	Bongossi	Weißfäule	Zusammenfließender Reibeisenpilz ( <i>Cerocorticium confluens</i> )
Brückenträger	3	Bongossi	Weißfäule	Striegeliger Schichtpilz ( <i>Stereum hirsutum</i> )
Brückenträger	3	Bongossi	Weißfäule	unbekannter Weißfäule-Erreger
Brückenträger	3	Bongossi	Moderfäule	Moderfäulepilze
unterer Fensterrahmen	3	Khaya	Weißfäule	Schmetterlings-Tramete ( <i>Trametes versicolor</i> )
Schiffsplanken und Spanten	4	Khaya	Braunfäule	Brauner Kellerschwamm ( <i>Coniophora puteana</i> )
Schiffsplanken	4	Khaya	Braunfäule	Weißer Porenschwamm ( <i>Antrodia</i> sp.)
unterer Fensterrahmen	3	Mahagoni	Weißfäule	Zusammenfließender Reibeisenpilz ( <i>Cerocorticium confluens</i> )
seitlicher Fensterrahmen	3	Mahagoni	Weißfäule	Zarter Dauerporenschwamm ( <i>Perenniporia tenuis</i> )
bewittertes Ziergerüst	3	Meranti	Weißfäule	Großporiger Feuerschwamm ( <i>Phellinus contiguus</i> )
bewittertes Ziergerüst	4	Meranti	Weißfäule	Stachelsporling ( <i>Trechispora</i> spp.)
bewittertes Ziergerüst	4	Meranti	Weißfäule	Wachsporling ( <i>Ceriporia metamorphosa</i> )
unterer Fensterrahmen	3	Meranti	Weißfäule	Zusammenfließender Reibeisenpilz ( <i>Cerocorticium confluens</i> )
Wintergarten Schwelle	4	Rotes Meranti	Moderfäule	Moderfäulepilze
Wintergartenpfosten	3	Rotes Meranti	Weißfäule	Weißfäule-Erreger
Duckdalbe Hafen, oberes Ende	3	unbekannt	Weißfäule	Großporiger Feuerschwamm ( <i>Phellinus contiguus</i> )

**Tabelle 2:** Masseverlust an dauerhaften Holzarten durch die Schmetterlings-Tramete (*Trametes versicolor*) nach 96 Wochen (Auszug aus [36])

Holzart (wissenschaftlicher Name)	Masseverlust an stark geschädigten Bereichen in %	Masseverlust an weniger geschädigten Bereichen in %
Bongossi ( <i>Lophira alata</i> )	53	21
Chengal ( <i>Neobalanocarpus heimii</i> )	0	0
Rotes Meranti ( <i>Shorea</i> , subg. <i>Rubroshorea</i> )	31	0
Balau ( <i>Shorea</i> , subg. <i>Shorea</i> )	40	0

Wässerigen Porling (*Physisporinus vitreus*) nachgewiesen [2, 31]. Die schadhafte Wirkung von Moderfäulepilzen sowohl an dauerhaften Holzarten als auch an chemisch geschütztem Holz (chromfixiert) zeigten Morrell & Smith [25]. Dass auch sehr dauerhafte Hölzer zerstört werden, zeigten Langzeitlaborversuche von über 96 Wochen mit der Schmetterlings-Tramete (Tabelle 2) und Erfahrungsberichte von Fenstern aus dauerhaften Hölzern [15].

### 3 Wenig beachtete Pilzarten

Als Verursacher der Weißfäuleschäden an der Anlage wurden neben der Schmetterlings-Tramete und dem Zarten Dauerporenschwamm der Veränderliche Spaltporling und der Zusammenfließende Reibeisenpilz diagnostiziert. Da diese Pilzarten im Zusammenhang mit Bauholzschäden wenig Beachtung finden, werden sie hier näher beschrieben.

#### 3.1 Veränderlicher Spaltporling (*Schizopora paradoxa*)

Die Fruchtkörper werden bis 2 mm dick, sind flach anliegend, aber z. T. knotenähnlich verdickt (Bilder 8 und 9). Beim Trocknen werden sie etwas rissig. Die Fruchtschicht ist weißlich bis hellbraun mit 1 bis 3 Poren je Millimeter

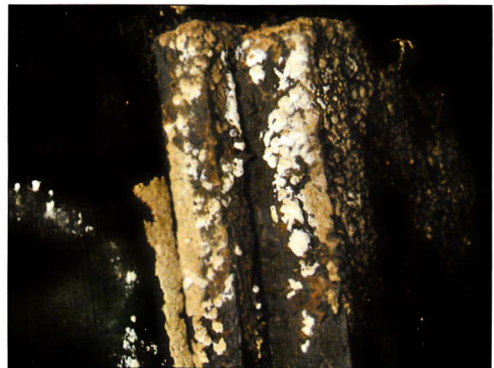


**Bild 7:** Übersicht über den Befallsort mit Fruchtkörpern des Veränderlichen Spaltporlings

(Bild 10) und insgesamt sehr variabel: Die Poren sind fast immer zerrissen und unregelmäßig geformt, z. T. auch nur als ungleichmäßige Zähne ausgebildet [29]. Der Fruchtkörper-Rand läuft oft feinfaserig aus. Es wird angenommen, dass die Spaltporlinge nicht zu den Porenpilzen, sondern zu den Schichtpilzen gehören [16].

Der Veränderliche Spaltporling verursacht eine schnell voranschreitende Weißfäule [30]. Im Wald kommt er auch an absterbenden Zweigen vor, meist ist er Saprobiont und greift auch Holzarten an, die dauerhaft sind, wie Eiche [21]. Der Veränderliche Spaltporling ist zugleich ein Pilz mit langsamem Wachstum [2,7 mm pro Tag bei 25 °C (einige Stämme des Braunen Kellerschwammes (*Coniophora puteana*) wachsen im Labor über 10 mm am Tag)] und hohen Feuchtigkeitsansprüchen. Ab einem Wasserpotenzial von unter  $-3,1$  MPa stellt er sein Wachstum ein [4]. Zum Vergleich dazu stellt *Aspergillus niger* sein Wachstum bei  $-14,5$  MPa ein [32].

Der Abbau an den Hölzern des Rieselwerks durch den Veränderlichen Spaltporling folgte im Wesentlichen bekannten Abbaumustern einer Weißfäule (Bilder 11 bis 14). Als Besonderheit war die intensivere Zerstörung des Faserzellen-Anteils gegenüber dem Markstrahlzellen-Anteil bemerkenswert. Offensichtlich kam es zu einem verminderten Befall der intensiv natürlich im-



**Bild 8:** Detail des Fruchtkörpers an einem tragenden Stiel





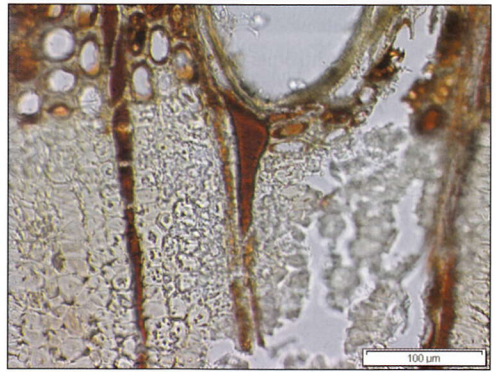
**Bild 9:** Detail der knotenähnlich verdickten Fruchtschicht des Veränderlichen Spaltporlings



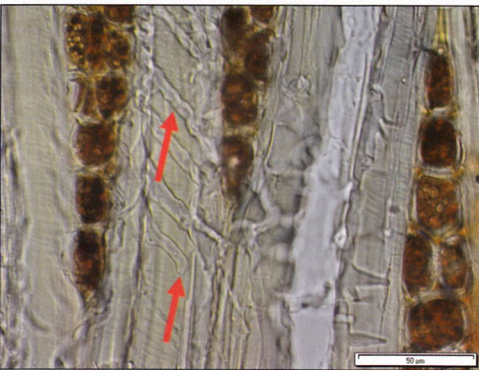
**Bild 10:** Poren im Detail: 2 bis 3 Poren je Millimeter



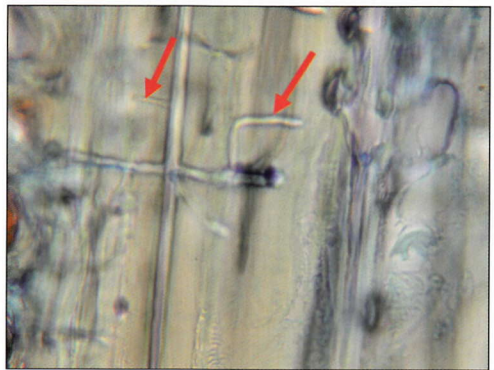
**Bild 11:** Weißfäuleschaden: An diesem Träger wurden einige Millimeter der Holzoberfläche abgetragen.



**Bild 12:** Querschnitt: Weißfäule durch *Schizopora paradoxa*



**Bild 13:** Tangential-Schnitt im Detail: deutliche Kavernen (↑) von *Schizopora paradoxa*



**Bild 14:** Ungewöhnliche „Kavernenbildung“ (↑) im Holz

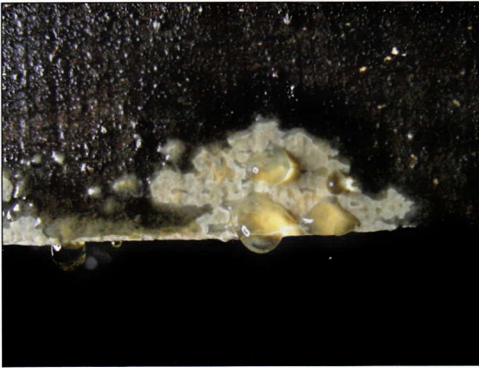
prägnierten Gefäßzellen, die in diesem Bereich kaum Kavernen zeigten. Das Befallsbild wurde durch Moderfäulepilze beeinflusst. Befallsorte lagen insbesondere an Stellen, die die Berieselung nur unzureichend erreichte (Bild 7).

### 3.2 Zusammenfließender Reibeisenpilz (*Cerocorticium confluens*)

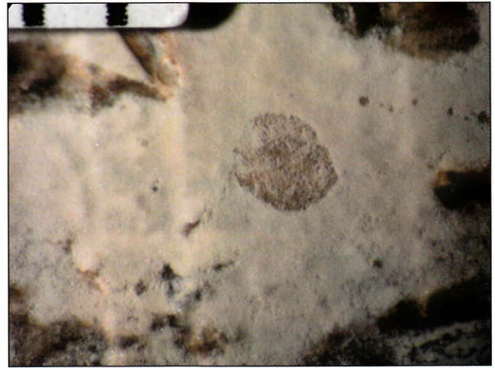
Die Fruchtkörper sind nur wenige Quadratzentimeter groß, vollständig flach anliegend, weniger als 1 mm dick, weich

und weißlich, cremefarben oder grau (Bild 15), z. T. mit blauem Stich (zwei Farbvariationen; die Art wird in der Literatur als sehr variabel beschrieben). Der Fruchtkörper-Rand ist gleichfarbig und wachsartig, z. T. fehlt er. Die

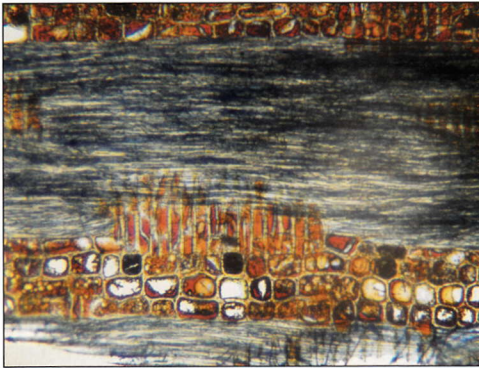
Fruchtschicht ist glatt bis kaum warzig, dicht und nicht durchscheinend (Bild 16). Wichtiges Bestimmungsmerkmal sind die breiten, etwas tropfenähnlichen Sporen ([6], Bilder 19 und 20). Der Zusammenfließende Reibeisenpilz



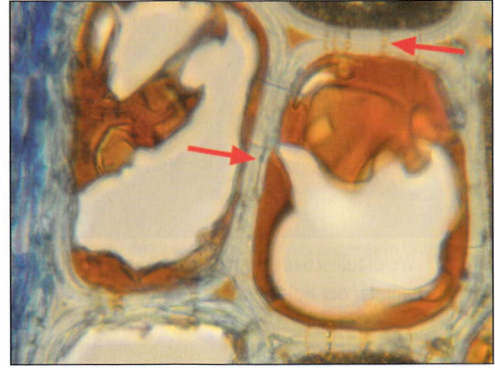
**Bild 15:** Heller Fruchtkörper von *Cerocorticium confluens* mit Guttationstropfen auf dem Holz



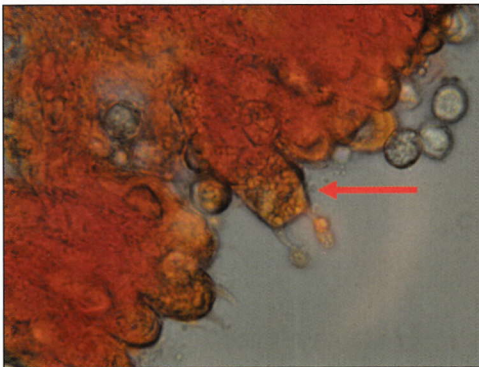
**Bild 16:** Detail der cremefarbenen, getrockneten Fruchtschicht



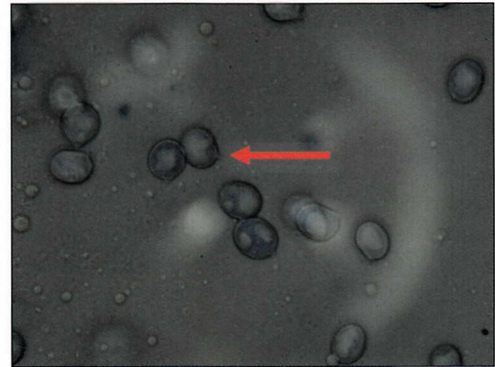
**Bild 17:** Moder- und/oder Weißfäulekavernen in den Faserzellen, sehr zahlreich; gefärbt mit Pikrin-Anilinblau (starke Blaufärbung = starker Befall)



**Bild 18:** Moder- und/oder Weißfäulekavernen, vereinzelt in den Zellwänden der Gefäße (↑); natürlich imprägnierte Tüpfelverbindungen sind gelblich (↑); gefärbt mit Pikrin-Anilinblau



**Bild 19:** Basidie (↑) von *Cerocorticium confluens* mit noch unreifen Sporen; gefärbt mit Kongorot



**Bild 20:** Dünwandige, hyaline Sporen von *Cerocorticium confluens* mit Ansatzstelle (↑); gefärbt mit Pikrin-Anilinblau



ist ein reiner Saprobiont und verursacht eine Weißfäule [21]. Angegriffen werden meist Laub-, selten auch Nadelhölzer. Im Freiland werden unter anderem Holzarten angegriffen, die dauerhaft sind, wie Eiche und Robinie [21]. Tabelle 1 zeigt, dass auch Bongossi und Mahagoni besiedelt werden. Im Holz ließen sich die typischen Abbaubilder einer Weißfäule beobachten (Bilder 17 und 18).

Der Pilz zerstört Holz, wie der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrymans*), über die gesamte Vermorschungszeit hinweg, von der initialen bis zur finalen Abbauphase des Holzes. Sein Vorkommen erstreckt sich über ganz Europa und viele andere Teile der Welt – bis nach Australien [21]. Auch wenn über die Feuchtigkeitsansprüche wenig bekannt ist, lassen die Standorte einen hohen Bedarf an Holzfeuchte erkennen.

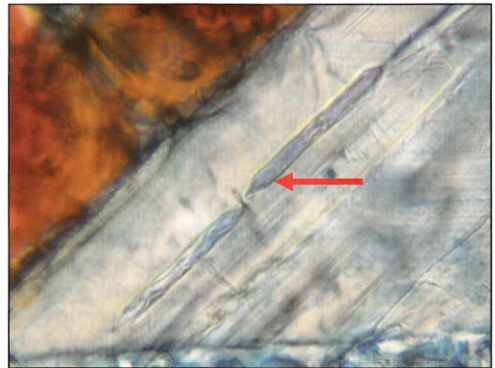
### 3.3 Moderfäulepilze

Moderfäulepilze zählen nicht zu den Hausfäulepilzen. In Bezug auf den verursachten Schaden nehmen sie eine Mittelstellung zwischen den Schimmel- und Bläuepilzen

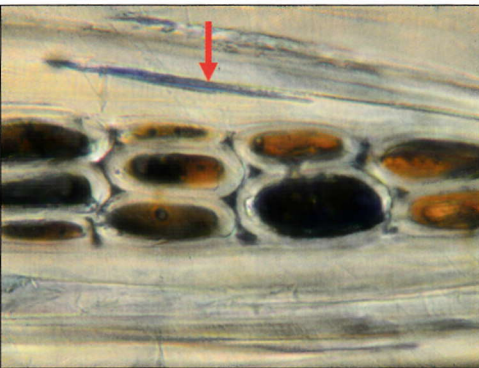
auf der einen und den Hausfäulepilzen auf der anderen Seite ein [14]. Moderfäule wird als eigenständiger Fäuletyp definiert [12, 23]. Sie wird durch Ascomyceten und Fungi imperfecti hervorgerufen, die im Holz wachsen und es abbauen. Auch eine Beteiligung von Basidiomyceten ist denkbar (insbesondere *Coniophora puteana*); Nachweise liegen aus Laborversuchen an Fichte (*Picea abies*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) vor [9, 19]. Ähnlich wie bei der Braunfäule werden bevorzugt Cellulose und Hemicellulose abgebaut. Die Abbauraten von Moderfäulepilzen sind recht unterschiedlich und abhängig vom Feuchte- sowie Sauerstoffgehalt, der Holzart und der verursachenden Art. Der Schaden kann oberflächlich sein oder das gesamte Bauteil betreffen. Das Holz fällt durch eine vermehrte Sprödigkeit auf. Oft fehlt der dumpfe Klang des beklopften Holzes, der für das von Basidiomyceten zerstörte Holz typisch ist. Eine Gefahr ergibt sich aus dem z. T. unvorhergesehenen und schnellen Bruch von moderfaulen Holzteilen [23, 33]. Das Bruchbild ist oft muschelförmig stumpf, das heißt, die Bruchkante verläuft großteilig entlang der Jahresringe. Ein Charak-



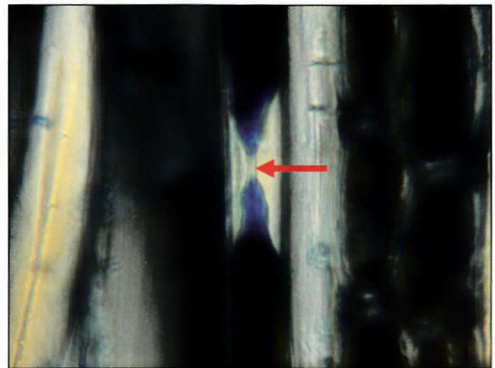
**Bild 21:** Übersicht über den Probenpunkt: Schwelle und Stiel



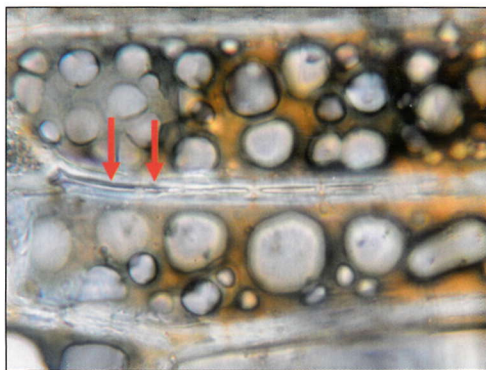
**Bild 22:** Typische, spitz zulaufende Moderfäulekavernen (↑); Holzgewebe gefärbt mit Pikrin-Anilinblau



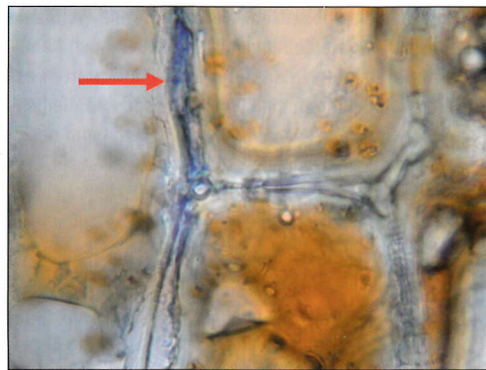
**Bild 23:** Detail: Kavernen in den Zellwänden der Gefäß- und Faserzellen (↑)



**Bild 24:** Detail: Polarisationsmikroskopische Aufnahme: spitz zulaufende Kavernen mit Verbindungskanal (↑)



**Bild 25:** Detail, 1,4 cm tief: Kavernen (↑) auch im Bereich der Mittellamelle der Gefäßzellen

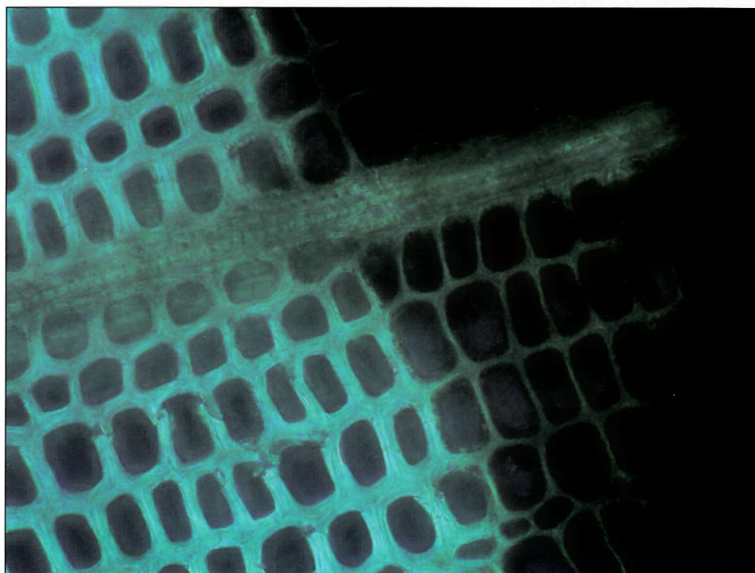


**Bild 26:** Detail, 1,4 cm tief: Kavernen auch im Bereich der Mittellamelle der Gefäßzellen (↑)

teristikum der Moderfäulepilze ist ein kavernenförmiger Abbau der Holzzellwände (u. a. Bilder 22 bis 24). Bild 21 illustriert einen Entnahmepunkt.

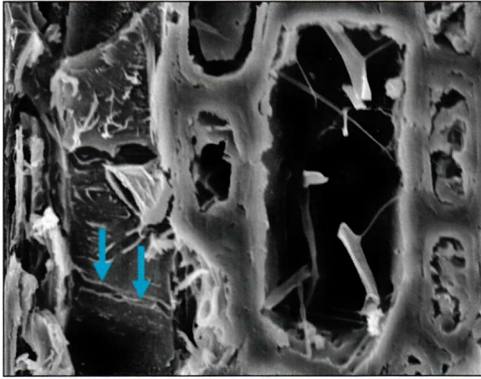
Moderfäulepilze sind auf feuchtes Holz angewiesen. Befall und Schädigung von Bongossi und anderen Tropenhölzern durch Moderfäule sind beschrieben [24]. Der Holzabbau durch Moderfäulepilze in tropischen Hölzern entspricht aber nicht immer den bekannten Abbaumustern [25, 31]. So wurden in den vorliegenden Proben teilweise Abbauvorgänge direkt an der Mittellamelle beobachtet, wie sie sonst kaum beschrieben sind (Bilder 25 und 26). Üblich bei Moderfäule sind Befälle mit deutlicher Befallsgrenze ([24], Bild 27). Eine derartige Verlaufsform wurde im vorgestellten Fall an keiner Probe nachgewiesen. Die Befallsintensität war zwar außen stärker als innen, jedoch zeigten sich bis zu einer Tiefe von 6 cm an allen Bohrkernen normale Kavernen oder Mikrokavernen.

In 1 cm Tiefe kam es an einigen Probenpunkten z. T. zu einem Mischbefall aus Moder- und Weißfäule, bei dem insbesondere die Mittellamelle und die Primärwand, z. T. auch die Sekundärwand 1, angegriffen wurden. Bei der Feinheit der Kavernen, die teilweise unter  $0,5 \mu\text{m}$  breit waren, war die Unterscheidung von Weiß- und Moderfäule nicht immer klar. Einige rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen belegen aber beide Befallsformen (Bilder 28 und 29). In einem anderen Fall wurde insbesondere die Primärwand und evtl. auch die Sekundärwand 1 angegriffen und die Mittellamelle blieb bestehen. Je tiefer der Probenpunkt lag, desto geringer war die Anzahl der Kavernen und desto mehr Kavernen fanden sich in den Parenchymzellen, obwohl die Lumina in der Regel stark mit Kerninhaltsstoffen gefüllt waren (abgesehen von der Vorverkerungszone). Der Weißfäuleabbau in 6 cm Tiefe entsprach mit dem Angriff von Gefäßen und den sie umgebenden

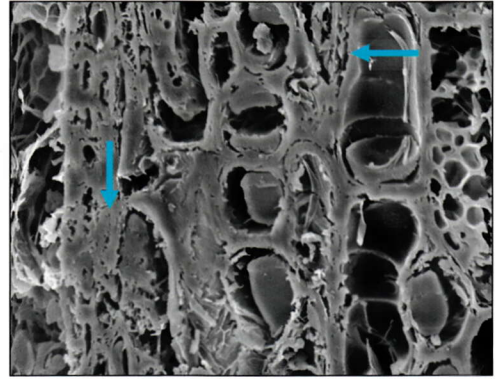


**Bild 27:** Querschnitt an der Befallsgrenze; durch polarisiertes Licht kann die Grenze dargestellt werden.





**Bild 28:** REM-Aufnahme, Kavernen, wie sie von Weißfäulepilzen beschrieben sind (↑); im Lumen sind Hyphen zu erkennen.



**Bild 29:** REM-Aufnahme, feine Moderfäule-Kavernen in den Zellwänden von Bongossi (↑)

Zellen dem zu erwartenden, normalen Besiedlungsschema von Weißfäulepilzen und Moderfäulepilzen [19].

Das tiefe Eindringen der Pilze bringt Schwierigkeiten bei der Bewertung der Schäden mit sich, da kaum vergleichende Untersuchungen existieren. Bisherige Studien aus vergleichbaren Anlagen, wie z. B. Kühltürmen, haben sich mit Schäden beschäftigt, die nach wenigen Jahren auftraten [1, 22]. Daher wurde zusätzlich eine mechanische Prüfung durchgeführt.

#### 4 Mechanische Prüfung

Um mögliche Einbußen der strukturellen Integrität bzw. der Festigkeit des Holzes einzuschätzen, wurden High-energy multiple impact (HEMI) Tests durchgeführt. Mit dieser multiplen Schlagprüfung lassen sich auch sehr kleine Prüfkörper, wie sie sich z. B. aus Bohrkernen gewinnen lassen, untersuchen [7]. Die Tests beruhen darauf, dass beim Zerschlagen von Holz mit Stahlkugeln in Abhängigkeit vom Abbaugrad unterschiedlich große Fragmente verbleiben (strukturelle Integrität). Zum Zerschlagen dient eine Schwingscheibenmühle. Die Fragmente werden anschließend fraktioniert und in ihrer Menge bestimmt. Aus den verschiedenen Fraktionen lässt sich schließlich die Resistance (Resistenz) to Impact (Einschlag) Milling (Mahlen) (RIM) ableiten, ein Kennwert, der Werte zwischen 0 % und 100 % annehmen kann. Je höher der RIM-Wert, desto höher die verbliebene Festigkeit des Holzes.

Die HEMI-Tests wurden am Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI) durchgeführt. Ursprünglich entwickelt wurde dieser Test zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften von thermisch modifiziertem Holz (TMT) [26]. Versuche an befallenen Prüfkörpern mit sehr unterschiedlichen Abbaugraden zeigten eine gute Korrelation von Abbaugrad und sinkendem RIM-Wert. Ähnliche Korrelationen wurden mit verschiedenen Hausfäulepilzen erzielt [8].

Die mechanische Prüfung wurde insbesondere im Hinblick auf den unteren, schwer zugänglichen Teil der Anlage durchgeführt sowie zur Beurteilung von Hölzern mit sehr schwacher Kavernenbildung tief im Bauteilinneren, die sich einer lichtmikroskopischen Einschätzung entzogen. Diese Kavernenbildung zeigte sich in Schwellen, die im Betrieb wahrscheinlich ständig stark befeuchtet waren. Geprüft wurden insbesondere die Schwellen an einem Knotenpunkt (Bild 21). Aus dem Bauteil wurde ein Satz von sechs Bohrkernen mit 30 mm Durchmesser entnommen. Diese wurden in zwei Gruppen geteilt – je ein äußerer und ein innerer Teil. Je Test wurden die Abschnitte aus drei Bohrkernen zusammengefasst. Die obersten 5 mm wurden verworfen. Zum Vergleich wurden unbewitterte Bongossi-Referenzen geprüft. Als Ergebnis wurde eine geringfügige Minderung der mechanischen Eigenschaft festgestellt (Tabelle 3). Erwartungsgemäß war die Minderung im Inneren der untersuchten Bauteile geringer als in den weiter außen gelegenen Bohrkernanteilen. Dies deckte sich mit den mikroskopischen Befunden.

#### 5 Abschätzung des Masseverlustes und der Restfestigkeit

Für die untersuchte Anlage wurde ein Masseverlust von 1 % bis 2 % mit einer Abnahme der Bruchschlagarbeit um ca. 25 % im Kernholz geschätzt. Grundlage waren die mikroskopischen Beobachtungen und die Ergebnisse der HEMI-Prüfungen (Tabelle 3). Die verbleibenden Restquerschnitte sollten um 25 % bezüglich der Bruchschlagarbeit gemindert werden. Andere Eigenschaften, z. B. die Druckfestigkeit, sollten weniger gemindert sein. Hier wird eine Minderung der verbleibenden Restquerschnitte um 12 % geschätzt. Bei einem von außen nach innen

fortschreitenden, linearen Abbauperlauf von ca. 0,5 mm pro Jahr muss mit einer weiteren Minderung der Restquerschnitte um ca. 2 % pro Jahr gerechnet werden. (Im Vergleich hierzu wurde an unbehandeltem Holz von Stützkonstruktionen in Kühltürmen ein Abbau von 0,9 mm/Jahr festgestellt [24].) Die Bruchschlagarbeit wird sich entsprechend weiter vermindern, schließlich werden die Hölzer ihre Tragfähigkeit ganz verlieren.

Bei Wartungsarbeiten ist die verminderte Bruchschlagarbeit zu beachten. Das heißt, schlagähnliche Punktlasten sind zu vermeiden. Besondere Umsicht ist daher beim Umgang mit schweren Gegenständen gefordert.

**Tabelle 3:** Resistance to Impact Milling (RIM) von Bongossi-Bohrkernen und nicht bewitterten Bongossi-Referenzen (Es wurden jeweils  $n = 12$  Prüfkörper geprüft.)

	Resistance to Impact Milling in %
Bongossi-Referenz 1, unbewittert	45,0
Bongossi-Referenz 2, unbewittert	41,7
Bongossi-Referenz 3, unbewittert	47,8
Bohrkerne 1, 3 und 4, Schwelleninneres	39,6
Bohrkerne 1, 3 und 4, Schwellenaußenseite	36,4

## 6 Vorgeschlagene Maßnahmen und Begründung

Wie oben schon beschrieben, wurde in der Anlage ein Befall mit Moderfäulepilzen und weiteren holzerstörenden Pilzen vorgefunden. Besonders intensive Schäden waren an den Hölzern mit Vorverkernungszone zu konstatieren.

Befallene, faule Teile sind auszubauen und durch neue Hölzer der Dauerhaftigkeitsklasse 1 oder 2 zu ersetzen, am besten durch Wasserbauhölzer [3, 27, DIN 68800-4:1992-11, DIN EN 350-2:1994-10]. Der Einsatz eines chemischen Holzschutzes dürfte bei dem auslaugenden Effekt des fließenden Wassers und der Resistenz vieler Moderfäulepilze schwierig sein [13, 25]. Zudem müsste jedes Holzschutzmittel daraufhin geprüft werden, ob es Schäden an den Denitrifikations-Bakterien verursacht. Stark moderfaules Holz ist auszutauschen, wenn der Befall tief greifend und die Standsicherheit gefährdet ist. Ein oberflächlicher oder schwacher Befall, der als üblicher Abbauprozess anzusehen ist, kann in gewissen Grenzen hingenommen werden. Die

Befallssituation ist von Bauteil zu Bauteil unterschiedlich. Die massiv geschädigten Bauteile sind bei einer Reparatur im Einzelnen zu erfassen und zu tauschen.

In der Anlage liegen unterschiedliche Feuchtigkeitsbedingungen vor. Im oberen Bereich ist es vergleichsweise trocken. Dies wird durch die Belüftung unterstützt, die vom Dach her auf die Anlage einwirkt. Holzbauteile mit einem Holzfeuchtegradienten stellen häufig Problemzonen dar, da in der Regel ständig ausreichend Feuchtigkeit und Sauerstoff für die Aktivität holzerstörender Pilze vorhanden sind. Sie sind somit Angriffsflächen für diverse Pilze. So wurden in diesem Fall im Bereich der Lüfter mittels Widerstandsmessung Holzfeuchtigkeiten von 25 % bis 40 % gemessen, was in Bongossi das Wachstum von einigen Basidiomyceten, aber auch Moderfäulepilzen ermöglicht. Im unteren Bereich der Anlage und den berieselten Teilen der Konstruktion war das Holz in der Regel wassergesättigt. Bei solch hohen Holzfeuchtigkeiten (in Bongossi  $u_m = 60$  %) sind nur sehr langsam fortschreitende Schäden zu erwarten. Für einen konstruktiven Schutz muss die Feuchte der Hölzer deshalb insgesamt ober- oder unterhalb der für Pilze geeigneten Lebensbedingungen gehalten werden. Im vorliegenden Fall ist nur eine dauerhafte Befeuchtung möglich. Zur Vermeidung von intensiv getrockneten Flächen sollte die Belüftung nicht punktuell erfolgen. Zur Ermittlung der Restnutzungsdauer war außerdem der erforderliche Restquerschnitt der Hölzer zu bestimmen. Seit Fertigstellung der Anlage im Jahr 1989 hatte sich der tragfähige Querschnitt der geprüften Hölzer um ca. 2 cm reduziert. Die erforderlichen Berechnungen wurden einem Statiker übertragen.

### Danksagung

Die gezeigten REM-Aufnahmen wurden freundlicherweise in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. U. Schmitt und Frau T. Potsch vom vTI erstellt. Für die technische Hilfe danken wir Herrn Jonetzki von der Hamburg Port Authority.

### Literatur

- [1] J. Acker Van, M. Stevens, V. Rijckaert: Highly virulent wood-rotting basidiomycetes in cooling towers. Stockholm: Intern. Res. Group Wood Prot., Doc. No. 10125/1995
- [2] J. Acker Van: Laboratory culturing and decay testing with *Physisporinus vitreus* and *Donkioporia expansa* originating from identical cooling tower environments show major differences. Stockholm: Intern. Res. Group Wood Prot., Doc. No. 10184/1996
- [3] Anonymus: Holzschutz: baulich, chemisch, bekämpfend; Erläuterungen zu DIN 68800-2, -3, -4. Hrsg. DIN und DGfH, Beuth-Kommentare, Berlin 1998



- [4] L. Boddy: Effects of temperature and water potential on growth rate of wood-rotting basidiomycetes. *Trans. Brit. mycol. Soc.* 80/1983, S. 141–149
- [5] P. Böttcher: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Gründungspfählen. *Holz Roh-Werkstoff* 47/1989, S. 179–184
- [6] J. Breitenbach, F. Kränzlin: Pilze der Schweiz. Bd. 2, Nichtblätterpilze. *Mykologia*, Luzern 1986
- [7] C. Brischke, C. R. Welzbacher, A. O. Rapp: Detection of fungal decay by high-energy multiple impact (HEMI) testing. *Holzforschung*, 60/2006, S. 217–222
- [8] C. Brischke, C. R. Welzbacher, T. Huckfeldt: Influence of fungal decay by different basidiomycetes on the structural integrity of Norway spruce wood. *Holz Roh-Werkstoff* 66/2008, S. 433–438
- [9] H. Courtois: Mikromorphologische Veränderungen verholzter Zellwände durch Basidiomyceten (Braunfäuleerreger). *Holz & Organismen*, Beih. 1/1965, S. 41–53
- [10] DIN 68800-4: Holzschutz – Teil 4: Bekämpfungsmaßnahmen gegen holzerstörende Pilze und Insekten, Beuth, Berlin, 1992-11
- [11] DIN EN 350-2: Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa. Deutsche Fassung EN 350-2, Beuth, Berlin 1994
- [12] W. P. K. Findlay, J. G. Savory: Moderfäule. *Holz Roh-Werkstoff* 12/1954, S. 22–24
- [13] J. Irvine, R. A. Eaton, G. E. B. Jones: The effect of water of different ionic composition on the leaching of a water borne preservative from timber placed in cooling towers and in the sea. *Mat. Org.* 7/1972, S. 45–70
- [14] T. Huckfeldt, E. Melcher: Moderfäulepilze. In: H. Venzmer (Hrsg.): *Europäischer Sanierungskalender 2008*, Beuth, Berlin 2007, S. 233–250
- [15] T. Huckfeldt, H.-J. Wenk (Hrsg.): *Holzfenster*. Rudolf Müller, Köln 2009
- [16] H. Jahn, H. Reinartz, M. Schlag: *Pilze an Bäumen*. Patzer, Berlin 1990
- [17] K. Kempe: *Dokumentation Holzschädlinge*. Bauwesen, Berlin 1999
- [18] G-H. Kim, D-S. Son, J-J. Kim: Fungi colonizing Douglas-fir in cooling towers: identification and their decay capabilities. *Wood Fiber Science* 37/2005, S. 638–642
- [19] G. Kleist, U. Schmitt: Characterisation of a soft rot-like decay pattern caused by *Coniophora puteana* (Schum.) Karst. in Sapelli wood (*Entandrophragma cylindricum* Sprague). *Holzforschung* 55/2001, S. 573–578
- [20] G. Kleist: Rotstreifigkeit im Fichtenholz. *Z. Mykol.* 67/2001, S. 213–224
- [21] G. J. Krieglsteiner: *Die Großpilze Baden-Württembergs*. Bd. 1, Ulmer, Stuttgart 2000
- [22] W. Liese: Neue Befunde über den Abbau des Holzes durch Pilze. *Holz-Zentralblatt* 88/1963, S. 505–507
- [23] W. Liese: On the decomposition of the cell wall by micro-organisms. *Rec. Br. Wood Preserv. Assoc.* 1955, S. 159–160
- [24] W. Liese: Untersuchungen über die Ursachen der Holzerstörung in Kühltürmen. In: H. Kühn, L. Brandt (Hrsg.): *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen 2026/1969*
- [25] J. J. Morrell, S. M. Smith: Fungi colonizing redwood in cooling towers: Identities and effects on wood properties. *Wood and Fiber Science* 20/1988, S. 243–249
- [26] A. O. Rapp, C. Brischke, C. R. Welzbacher: Interrelationship between the severity of heat treatments and sieve fractions after impact ball milling: a mechanical test for quality control of thermally modified wood. *Holzforschung* 60/2006, S. 64–70
- [27] H. G. Richter: *Hölzer für den Wasserbau*. Informationsdienst Holz: Arbeitsgemeinschaft Holz e. V., Düsseldorf und Verein Deutscher Holzeinfuhrhäuser, Hamburg 1998, 8 S.
- [28] B. Ridout: *Timber decay in buildings. The conservation approach to treatment*. E & FN Spon, London 2000
- [29] S. Ryman, I. Holmäsén: *Pilze*. Thalacker, Braunschweig 1992
- [30] G. Schlechte: *Holzbewohnende Pilze*. Jahn & Ernst, Hamburg 1986
- [31] O. Schmidt, U. Schmidt, U. Moreth-Kebernik, T. Potsch: Wood decay by the white-rotting basidiomycete *Physisporinus vitreus* from a cooling tower. *Holzforschung* 51/1997, S. 193–200
- [32] O. Schmidt: *Wood and tree fungi, biology, damage, protection, and use*. Springer, Heidelberg 2006
- [33] A. Unger, A. A. P. Schniewind, W. Unger: *Conservation of wood artifacts*. Springer, Berlin 2001
- [34] R. Wagenführ: *Anatomie des Holzes*. DRW, Leinfelden-Echterdingen 1999

- [35] H. Willeitner: Natürliche Dauerhaftigkeit des Holzes. Beiträge zur 16. Holzschutz-Tagung der DGfH, DGfH, München 1982, S. 1–17
- [36] H. Willeitner: Biological degradation of highly resistant timber species. International union of forest research organizations. IUFRO World Congress, Ljubljana 1986, 8. S.

**Bildnachweis:**

Bilder 1 bis 3, 7 bis 27: T. Huckfeldt

Bilder 4 bis 6 und 28, 29: G. Koch